



**L'INFLUENCE DES CONDITIONS MÉTÉO-MARINES ET
DES OUVRAGES DE PROTECTION SUR LA
MORPHOSÉDIMENTOLOGIE DES PLAGES ET DE
L'HERBIER À SPARTINE ALTERNIFLORE, ÎLE AUX
COUDRES (QUÉBEC, CANADA)**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **Francis Bonnier Roy**

Avril 2019

Composition du jury :

Thomas Buffin-Bélanger, président du jury, Université du Québec à Rimouski

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

Guillaume Marie, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

**Jean Carlos Montero Serrano, examinateur externe, Institut des sciences de la mer de
Rimouski**

Dépôt initial le 28 août 2018

Dépôt final le 9 avril 2019

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

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

« Tout seul, on va plus vite.
Ensemble, on va plus loin. »

- *Proverbe africain*

REMERCIEMENTS

J'aimerais commencer par remercier mon directeur Pascal Bernatchez et mon codirecteur Guillaume Marie pour le soutien qu'ils m'ont apporté durant toute ma maîtrise. Sans eux, rien de tout cela n'aurait pu être possible. J'exprime aussi ma gratitude envers le Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec pour le soutien financier m'ayant permis de mener à terme ce projet. Merci à Adrien Lambert pour son aide et sa contribution précieuse sur la partie hydrodynamique. Merci à Jean-Carlos Montero-Serrano de m'avoir montré comment réaliser les analyses minéralogiques et toute son aide qui s'y rattache. Merci à Claude Belzile de m'avoir permis d'utiliser son laboratoire et son aide précieuse. Un très gros merci à Éric (Puddy) Filion, David Didier, Frédéric Banville-Côte, Roch Guevremont, Philippe Berthiaume, Jérôme Dubé, Pierre-André Lalanne, Cyril (Mister) Ros, Nicholas Marion, Joëlle Voglimacci-Stéphanopoli, Louis Cormier, Stéphanie Van-Wierts et Ariane Levert-Longpré pour m'avoir apporté votre aide précieuse sur le terrain et en laboratoire. Merci à la cidrerie Pedneault pour leur soutien moral après une bonne journée de terrain! Je remercie ma copine Camille Berthod pour son soutien inépuisable et le bonheur qu'elle m'apporte au quotidien. Merci à tous mes amis de Rimouski pour votre soutien, les fous rires et les moments inoubliables que j'ai passés avec vous pendant ces quatre années. Merci à ma famille, sans à eux je n'aurais pu me rendre jusque-là. Protégeons notre fleuve Saint-Laurent, cette richesse unique au monde, car « nous n'héritons pas de la terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants » (Antoine de Saint-Exupéry).

RÉSUMÉ

Cette étude avait pour principal objectif d'évaluer les impacts potentiels à court terme (3 ans) de nouveaux enrochements implantés à l'automne 2014 sur la morphosédimentologie des plages et les herbiers à spartine alterniflore. Afin d'y répondre, il a fallu d'abord étudier les conditions météo-marines (hydrodynamisme local) et son interaction avec la morphosédimentologie des plages de ce système côtier insulaire. Cette démarche a permis de départager les causes naturelles des causes anthropiques en cas de changements importants suite à l'installation des nouveaux enrochements. La revue historique de la côte sur l'ensemble des 50 dernières années a mis en lumière une certaine stabilité et résilience (moyenne de 0,02 m/an). Quelques événements d'érosion ponctuels ont cependant été observés, tel qu'un recul de 3,25 m entre 2010 et 2011 près du chemin de la Traverse, ont nécessité la mise en place d'un nombre de plus en plus important d'enrochements. Toutefois, ces taux restent faibles comparativement à la moyenne des côtes sableuses de l'estuaire moyen. L'étude de l'hydrodynamisme local a montré un double gradient spatial dans l'intensité des dynamiques qui affectent l'île aux Coudres, soit du large à la côte et d'ouest en est. Globalement, le climat de vagues est calme malgré la présence de pics d'intensité. La moyenne des hauteurs significatives des vagues mesurées à la limite de la zone inférieure du bas estran est de 0,16 m. Il a aussi été montré que la morphologie et l'orientation de l'estran joue un rôle dans la dissipation de l'énergie des vagues puisque les secteurs orientés vers le nord-est et le sud-ouest étaient plus propices à l'érosion. La présence d'une large plateforme rocheuse et d'un cordon de basse mer au sud de l'île permet d'atténuer l'énergie des vagues par friction sur le fond ou déferlement. L'un des impacts les plus importants fut l'empiètement des ouvrages sur le haut de plage. La segmentation côtière a permis de montrer une relation entre la présence de l'ouvrage et l'absence de haut de plage (environ 90% des enrochements sont sans haut de plage). La recharge de plage réalisée avec la clé de l'enrochement au-devant de celui-ci a alors contribué à stabiliser le stock sédimentaire des plages pendant la période de l'étude et en élargissement temporairement la plage sur le bas de plage et le bas estran. En ce qui concerne les herbiers à spartine alterniflore, aucun impact négatif n'a été observé. Peu de différences ont été observées entre les échantillons devant des secteurs naturels et artificiels. De plus, l'effet de bout est un phénomène bien présent sur les berges de l'île, non pas seulement aux extrémités des nouveaux enrochements, mais aussi des anciens enrochements. Enfin, les analyses minéralogiques ont permis de prouver que l'érosion de la plateforme rocheuse était la source principale des plages et que deux autres sources sédimentaires contribuaient aux volumes des plages, soit la zone sablo-vaseuse et le cordon de basse mer au sud. Le faible taux d'érosion des terrasses de plage ne peut permettre de constituer une source importante en sédiments pour les plages, surtout avec la croissance de l'artificialité des berges au cours de la dernière décennie. Les enrochements seront potentiellement davantage susceptibles d'avoir une action sur la morphodynamique lors de conjonctions de fortes vagues et de niveaux d'eau élevés si la hausse du niveau marin continue dans la région de Charlevoix et que les événements de tempêtes sont plus fréquents.

Mots clés : [Érosion côtière, enrochement, suivi environnemental, herbier à spartine, hydrogéomorphologie, impacts environnementaux]

ABSTRACT

The main objective of this study was to evaluate the short-term potential (3 years) impacts of new rock armor implanted in the fall of 2014 on the morphosedimentology of beaches and *spartina alterniflora*. In order to answer them, it was first necessary to study the local hydrodynamism and its interaction with the morphosedimentology of the beaches of this insular coastal system. This approach has made it possible to separate major changes of the natural causes from the anthropogenic causes following the installation of the rock armor. The historical review of the coast over the last 50 years has brought to light a stability and resilience on these beaches (average of 0.02 m / year). However, some occasional erosion events were observed, such as 3.25 m between 2010 and 2011 near the Chemin de la Traverse, which necessitated a growing number of rock armor beaches. However, these rates remain low compared to the average sandy coast of the Upper Estuary. The study of local hydrodynamism has shown a double spatial gradient in the intensity of the dynamics that affect Ile aux Coudres, from offshore to coast and from west to east. Overall, the wave climate is calm despite the presence of intensity peaks. The average significant wave heights measured at the edge of the foreshore are 0.16 m. It has also been shown that the morphology and orientation of the foreshore plays a role in the dissipation of wave energy since the northeasterly and southwesterly oriented areas are more prone to erosion. The presence of a large rock platform and a near subtidal sand barrier on the south shore helps to reduce the energy of the waves by friction on the bottom or surf. One of the most significant impacts was the encroachment of the rock armor on the backshore. Coastal segmentation has shown a relationship between the presence of the structure and the absence of backshore (about 90% of the rock is without backshore). The beach nourishment made from the digging of the rock armor helped to stabilize the beaches during the study period and temporarily widening the beach on the bottom of beach and the upper foreshore. Also, no negative impact was observed on the seagrass. Few differences were observed between the beach samples in front of natural and artificial areas. Moreover, the end effect is a phenomenon that is very present on the island, not only at the ends of the rock armors but also near the old ones. Finally, the mineral analysis has proved that the erosion of the rock platform was the main sediments source of the beaches and that two other sedimentary sources contributed to the volumes of the beaches, namely the sandy-muddy zone and the sand barrier in the south. The low erosion rate of beach slope can not provide an important source of sediments, especially with the growth of shoreline artificiality over the last decade. However, rock armor will be more likely to have an effect on morphodynamics during conjunctions of high waves and high water levels if sea level rise continues in the Charlevoix region and storm events are more frequent.

Key words: [Coastal erosion, rock armor, environmental monitoring, *spartina alterniflora*, hydrogeomorphology, environmental impacts]

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ.....	ii
ABSTRACT	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	xx
LISTE DES ANNEXES	xxiv
INTRODUCTION	1
1. Problématique et pertinence de la recherche	1
2. Objectifs et hypothèses.....	3
Chapitre I Cadre théorique.....	4
1.1. Les plages et leurs agents morphodynamiques	4
1.2. Concepts de cellule hydrosédimentaire et de budget sédimentaire	14
1.3. Les rythmes d'évolution de la côte.....	17
1.4. Les structures de défense côtière parallèles au trait de côte et leurs impacts sur l'hydrodynamisme et la morphodynamique des plages	18
1.5. Impact de la végétation intertidale sur l'hydrodynamisme	25
Chapitre II Site d'étude : L'île aux Coudres.....	28
2.1. Présentation générale du terrain d'étude	28
2.2. Géologie et dépôts quaternaires	29
2.3. Variations récentes du niveau marin relatif.....	31
2.4. Morphologie de la zone côtière	34
2.5. Conditions météo-marines.....	42

Chapitre III Méthodologie.....	49
3.1. Photo-interprétation et évolution historique	49
3.2. Segmentation côtière.....	54
3.3. Profils topographiques	58
3.4. Modèle numérique de terrain	59
3.5. Granulométrie	67
3.6. Minéralogie	71
3.7. Cartographie et caractérisation des herbiers	75
3.8. Conditions hydrodynamiques	79
3.9. Figure synthèse méthodologique	83
Chapitre IV Résultats	84
4.1. Évolution historique de l'état de la côte (1964 à 2012).....	84
4.2. Taux de déplacements annuels récents (2007 à 2016).....	94
4.3. Bilan récent de la ligne de rivage (2014 à 2016)	97
4.4. Évolution récente de la sédimentologie de la plage.....	115
4.5. Morphologie générale du littoral	163
4.6. Évolution verticale et horizontale récente des plages	168
4.7. Évolution récente du volume des plages.....	200
4.8. Comportement récent des herbiers à spartine alterniflore	225
4.9. Climat de vagues et interactions avec les ouvrages de protection	239
4.10. Minéralogie	251
Chapitre V Interprétation et discussion	263
5.1. Dynamique du littoral	263
5.2. Origine des sédiments	270

5.3. Rôle des conditions hydrodynamiques et de la morphologie de l'estran	274
5.4. Différences saisonnières et spatiales	277
5.5. Impacts des ouvrages sur la morphosédimentologie des plages	281
5.6. Rôle des herbiers et impacts des ouvrages	288
5.7. Pertinence des ouvrages et gestion préconisée des stocks sédimentaires	291
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	293
RÉFÉRENCES	295
ANNEXES.....	318

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Schéma du profil type de la zone côtière sur la partie sud de l'île aux Coudres incluant les éléments morphologiques, les zones hydrodynamiques à marée haute et les niveaux d'eau : PMSGM (Pleine mer supérieure de grande marée), NME (niveau moyen des eaux) et BMIGM (Basse mer inférieure de grande marée).	4
Figure 2. Les différentes zones d'action des vagues et les principaux courants pouvant agir près des côtes. H : profondeur ; z : distance sous la surface ; L : longueur d'onde des vagues ; 1 courant orbital ; 2 : courant oscillatoire (sur le fond) ; 3 : dérive littorale ; 4 : courant de <i>downwelling</i> ; 5 : courant <i>d'undertow</i> ; 6 : courant d'arrachement. Source : Héquette, 2001.	8
Figure 3. Représentation schématique des courants de fond et de surface qui agissent dans la zone côtière pendant une onde de tempête. Source : Héquette, 2001.....	10
Figure 4. Développement d'un courant de dérive littorale par le résultat des vagues en approche de la plage avec un certain angle. Elle réfère à au mouvement net des grains de sable dans une direction le long du rivage. Source : Patsch et Griggs, 2006.	11
Figure 5. Sources sédimentaires des plages. Modifié de Bird, 2008	15
Figure 6. Affouillement et diminution du profil de la plage suite à la mise en place d'un mur de protection. Modifié de Bird, 2008.....	20
Figure 7. Emplacement de l'île aux Coudres et des secteurs à l'étude (trait rouge et noir). .	28
Figure 8. Faille de chevauchement (trait vert), île aux Coudres. Modifié de Rondot, 1969.	30
Figure 9. Extension des glaciers au dernier maximum glaciaire à l'échelle de l'Amérique du Nord. Source: Houde-Poirier <i>et al.</i> (2014) modifiée de Dyke <i>et al.</i> (2002)	31
Figure 10. Séries chronologiques du dernier cycle glaciaire de l'inlandsis laurentidien selon les modèles de Tarasov-Peltier (ligne pointillée) et Marshall-Clarke (ligne pleine). a) Température moyenne de l'air en °C. b) Volume de glace de l'inlandsis. c) Épaisseur maximale (trait large) et moyenne (trait fin) de la calotte glaciaire. d) Superficie de la calotte glaciaire. Modifié de Marshall <i>et al.</i> (2000).	32

Figure 11. Niveau marin relatif du moyen estuaire du Saint-Laurent (Montmagny) indiquant la transgression marine et l'émergence postglaciaire durant l'Holocène (modifié de Dyke et Peltier, 2000).	33
Figure 12. Profil type de la zone intertidale au sud de l'île. Exagération verticale 67x.	35
Figure 13. Profil type de la zone intertidale au nord-est de l'île. Exagération verticale 17x.	35
Figure 14. Largeur (m) de la plateforme rocheuse entre la flexure et la fin de l'affleurement rocheux devant le linéaire côtier étudié.....	37
Figure 15. Plateforme rocheuse flyschique à pendage subverticaux située au sud de l'île recouverte de sédiments fins sablo-limoneux et de graviers de schistes érodés.	38
Figure 16. Plateforme rocheuse située au nord-est de l'île recouverte de graviers issus de l'érosion et de la météorisation de la roche.	39
Figure 17. Bloc erratique situé sur la zone sablo-vaseuse de la côte sud de l'île.....	40
Figure 18. Rides de courant dans la zone sablo-vaseuse sur le profil 1, 15 novembre 2016.	40
Figure 19. Cordon de basse mer composé de sable et de blocs de diverses tailles (entre le profil 3 et 4), 19 mai 2015. Photo : Adrien Lambert.....	41
Figure 20. Distribution des hauteurs de vagues significative en fonction de la direction des vagues sur le littoral de la côte sud-est de l'île, mesurée à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015 (Bonnier Roy <i>et al.</i> , 2018).....	44
Figure 21. Rose des vents de l'Isle-aux-Coudres (Bernier <i>et al.</i> , 2006).	45
Figure 22. Carte des principales directions des courants autour de l'île aux Coudres. L'intensité du courant est ajustée au marnage de la marée au port de référence à l'aide d'un facteur de correction (Pêches et Océans Canada, 1997).	46
Figure 23. Images des caméras <i>Spypoint</i> et l'étendue du pied de glace sur le haut estran et le bas estran sur la côte sud et nord-est le 22 février 2015.	47
Figure 24. Emplacement de l'île aux Coudres, des travaux d'enrochements, des toponymes délimitant les secteurs et du linéaire côtier à l'étude.	49

Figure 25. Ligne de rivage utilisée pour tracer l'évolution historique du littoral. (Bernatchez et Drejza, 2015 d'après Daigle <i>et al.</i> , 2006)	52
Figure 26. Exemple de l'utilisation de l'outil DSAS sur ArcGIS 10.1.	54
Figure 27. Segmentation côtière en août 2014 représentée par les catégories de microfalaise.	1
Figure 28. Profils topographiques suivis.	58
Figure 29. Exemple de modèle tridimensionnel LiDAR avant post-traitement réalisé sur le littoral de l'île aux Coudres (Chemin de la Bourroche) durant la campagne du 12 au 16 mai 2014. Source : Lambert et Bernatchez, 2014.	60
Figure 30. Croquis de la méthode de segmentation des polygones des MNE. Exemple en utilisant deux dates de levé terrain novembre 2014 et mai 2015.	63
Figure 31. Croquis représentant la démarche du calcul du volume de plage pour chaque polygone.	64
Figure 32. Emplacements des échantillons granulométriques des profils topographiques et hydrodynamiques pour la période du suivi 2014 à 2016.	67
Figure 33. Exemple de positionnement des échantillons granulométriques sur un profil topographique.	68
Figure 34. Exemple d'un diagramme ternaire pour les sables 63 µm à 2000 µm.	70
Figure 35. Emplacements des échantillons utilisés pour les analyses minérales et des sources potentielles d'apports sédimentaires (zones grisées).	72
Figure 36. Emplacements des herbiers à spartine alterniflore cartographiés.	75
Figure 37. Illustration montrant l'emplacement des herbiers cartographiés sur le profil.	76
Figure 38. Croquis de l'utilisation de l'outil intersect.	78
Figure 39. Capteur de pression déployé sur l'estran de L'Isle-aux-Coudres. Source : Lambert et Bernatchez, 2014.	79
Figure 40. ADV positionné au sud-est de l'île du 18/05/2015 au 15/12/2015	82
Figure 41. Synthèse des objectifs spécifiques et des méthodes d'acquisitions de données associées.	83
Figure 42. Évolution du pourcentage du littoral artificialisé entre 1964 et 2012.	84

Figure 43. Nombre de bâtiments près du linéaire côtier à l'étude entre 1964 et 2012. À noter que la côte nord-est a une longueur de 1 487 m et que la côte sud de 6 339 m.	85
Figure 44. État de la côte (naturelle et artificielle) entre 1964 et 2012.	86
Figure 45. Taux de migration (m/an) et leur position sur la ligne de rivage (1964 à 2012). Marge d'erreur maximale de 0,145 m/an est représentée par la bande grise.	88
Figure 46. Taux de migration historiques (m/an) séparés en 5 classes (1964 à 2012). Le secteur 1 va de 0 m à 1 930 m, le secteur 2 de 1 930 m à 3 500 m, le secteur 3 de 3 500 m à 6 375 m, le secteur 4 de 6 375 m à 6 815 m, le secteur 5 de 6 815 m à 7 250 m et le secteur 6 de 7 250 m à 7 685 m.	89
Figure 47. Taux de déplacement historiques (m/an) de la ligne de rivage et leur position sur le linéaire côtier délimité par secteurs pour quatre périodes entre 1964 et 2012. Les interventions de protection des berges sont illustrées par les zones grisées et représentent l'état de la côte de la date la plus récente de l'intervalle.	90
Figure 48. Taux moyens annuels de déplacement de la ligne de rivage (Stations de mesure du LDGIZC entre 2007 et 2016).	95
Figure 49. a. Taux de déplacement annuel mesuré sur les berges à l'étude grâce au réseau de stations de mesures d'érosion du LDGIZC. b. Nombre d'années de mesures par station. ...	96
Figure 50. Ligne de rivage déjà artificielle avant les travaux de 2014 (trait rouge) et enrochements réalisés lors des travaux de 2014 (cercles noirs).	97
Figure 51. État de la ligne de rivage en août 2014.	101
Figure 52. État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côte sud).	102
Figure 53. Érosion accélérée par l'effet de bout à l'est du nouvel enrochement (côte sud). Photo prise le 19 août 2016.	103
Figure 54. État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côte nord-est).	105
Figure 55. Catégories de microfalaises de la côte sud de 2014 à 2016.	108
Figure 56. Catégories de microfalaises de la côte nord-est de 2014 à 2016.	110
Figure 57. Relation entre les segments sans haut de plage et l'artificialité de la côte – août 2014.	111
Figure 58. Relation entre l'absence de haut de plage et l'état de la côte de 2014 à 2016.	113

Figure 59. Moyenne des proportions et pourcentages par profil de la matrice fine (<2 mm de diamètre) des échantillons sur l'ensemble des profils (5, 6, 7) de la côte nord-est- août 2014.	116
Figure 60. Moyenne des proportions et pourcentages par profil de la matrice fine (<2 mm de diamètre) des échantillons sur l'ensemble des profils (1, 2, 3, 4, 8) de la côte sud - août 2014.	117
Figure 61. Exemples d'échantillons et des pourcentages de matériel grossier et fin ainsi que la composition détaillée de la matrice pour les trois classes texturales. Échelle : pièce de 25 ¢ canadienne (diamètre de 23,81 mm).....	123
Figure 62. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côte sud.	125
Figure 63. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur le profil 1 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte sud.	126
Figure 64. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côte sud.	127
Figure 65. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 1 et 8 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte sud.....	128
Figure 66. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côte sud.	129
Figure 67. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côte sud.	130
Figure 68. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 1 et 8 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte sud.....	131
Figure 69. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côte sud.	133

Figure 70. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du haut de plage situé sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.	134
Figure 71. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur le profil 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.	135
Figure 72. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.	136
Figure 73. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 5 et 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.	136
Figure 74. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.	137
Figure 75. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons bas estran 1 situés sur les profils 5 et 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.	138
Figure 76. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 μm à 250 μm , sable moyen de 250 μm à 500 μm et sable grossier de 500 μm à 2 000 μm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 1.	142
Figure 77. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 μm à 250 μm , sable moyen de 250 μm à 500 μm et sable grossier de 500 μm à 2 000 μm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 2.	145
Figure 78. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 μm à 250 μm , sable moyen de 250 μm à 500 μm et sable grossier de 500 μm à 2 000 μm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 3.	148
Figure 79. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sables fins de 63 μm à 250 μm , sables moyens de 250 μm à 500	

µm et sables grossiers de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 4.....	150
Figure 80. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 5.....	153
Figure 81. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 6.....	156
Figure 82. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 7.....	159
Figure 83. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 8.....	162
Figure 84. Profils topographiques de la côte sud, août 2014. Exagération verticale 69x...	164
Figure 85. Profils topographiques de la côte nord-est, août 2014. Exagération verticale 10x.	165
Figure 86. Largeur de plage des profils topographiques (août 2014).....	166
Figure 87. Profils topographiques de la plage côte sud, août 2014. Exagération verticale 2,6x.	167
Figure 88. Profils topographiques de la plage côte nord-est, août 2014. Exagération verticale 2,6x.	168
Figure 89. Évolution du profil topographique 1 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.	169
Figure 90. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 1.	170

Figure 91. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure depuis le pied de l'enrochement pour le profil topographique 1.	172
Figure 92. Évolution du profil topographique 2 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.....	173
Figure 93. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 2.....	174
Figure 94. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 2.	176
Figure 95. Évolution du profil topographique 3 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.....	177
Figure 96. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 3.....	178
Figure 97. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 3.	180
Figure 98. Évolution du profil topographique 4 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.....	181
Figure 99. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 4.....	182
Figure 100. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 4.	184
Figure 101. Évolution du profil topographique 5 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.....	185
Figure 102. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 5.....	186
Figure 103. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 5.	188
Figure 104. Évolution du profil topographique 6 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.....	189
Figure 105. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 6.....	190
Figure 106. Évolution de la largeur de plage et du haut de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 6.	192
Figure 107. Évolution du profil topographique 7 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.....	193

Figure 108. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 7.	194
Figure 109. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 7.	196
Figure 110. Évolution du profil topographique 8 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.	197
Figure 111. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 8.	198
Figure 112. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 8.	200
Figure 113. Volume de plage (m^3/m^2) des polygones lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 1).	201
Figure 114. Volume de plage (m^3/m^2) des polygones lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 2).	202
Figure 115. Volume de plage (m^3/m^2) par polygone lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 3).	203
Figure 116. Représentation cartographique du volume de plage (m^3/m^2) des polygones lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (Côte nord-est).	207
Figure 117. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type (barre d'erreur) par polygone des plages naturelles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 m^3/m^2$ à $0,1 m^3/m^2$	211
Figure 118 Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles ayant fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 m^3/m^2$ à $0,1 m^3/m^2$	212
Figure 119. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages déjà artificielles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 m^3/m^2$ à $0,1 m^3/m^2$	214
Figure 120. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages artificielles ayant fait l'objet de réfection lors des travaux de l'automne 2014, côte sud. À	

considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de 0,09 m ³ /m ² à 0,1 m ³ /m ²	215
Figure 121. Différences cumulées des volumes (m ³) des plages de la côte sud entre août 2014 et mai 2016.	216
Figure 122. Évolution du volume de plage total (m ³) par secteur entre mai 2014 et mai 2016 pour la côte sud. À noter que sur les levés du printemps et l'été 2014, 39 et 9 polygones respectivement étaient manquants de par des imprévus techniques sur le terrain. Leur volume a été estimé grâce à d'autres levés et ajouté dans les secteurs respectifs.	218
Figure 123. Évolution du volume de plage moyen (m ³ /m ²) par polygone des plages naturelles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.	219
Figure 124. Évolution du volume de plage moyen (m ³ /m ²) par polygone des plages naturelles ayant fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.	220
Figure 125. Évolution du volume de plage moyen (m ³ /m ²) par polygone des plages déjà artificielles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.	221
Figure 126. Évolution du volume de plage moyen (m ³ /m ²) par polygone des plages artificielles ayant fait l'objet de réfection lors des travaux de l'automne 2014, côte nord-est.	222
Figure 127. Différences cumulées des volumes (m ³) des plages de la côte nord-est.	223
Figure 128. Évolution du volume de plage total (m ³) par secteur entre mai 2014 et septembre 2015 pour la côte sud.	224
Figure 129. Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m ²) de la zone 1 en août 2014.	226
Figure 130. Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m ²) de la zone 2 en août 2014.	227
Figure 131. Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 1.	229
Figure 132. Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 1.	230
Figure 133. Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 1.	231

Figure 134. Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 2.	234
Figure 135. Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 2.	235
Figure 136. Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 2.	236
Figure 137. Distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral du côté sud-est de l'île, mesurée à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015.	239
Figure 138. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut estran du profil 1 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation du sommet de l'ouvrage sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique l'élévation du pied de l'ouvrage.	243
Figure 139. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 2 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation de la route sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique le début du haut de plage.	245
Figure 140. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 3 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation de la route sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique le début du haut de plage.	246
Figure 141. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 4 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation du sommet de l'ouvrage sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique l'élévation du pied de l'ouvrage.	247
Figure 142. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 5 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes	

d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation du sommet de l'ouvrage sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique l'élévation du pied de l'ouvrage.....	249
Figure 143. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 6 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation de la route sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique le début du haut de plage.....	250
Figure 144. Silhouette des groupes d'échantillons en fonction de la composition minéralogique.....	251
Figure 145. Graphique montrant la relation entre les concentrations (%) de quartz, de feldspath potassique, de plagioclase et de phyllosilicate pour les différents clusters. Cercle noir (cluster 1), cercle rouge (cluster 2) et cercle vert (cluster 3).	252
Figure 146. Diagramme ternaire des groupes d'échantillons en fonction des minéraux choisis pour discriminer leur origine sédimentaire. Les courbes correspondent aux analyses en composante principale des trois concentrations de minéraux (phyllosilicates, feldspath-K et plagioclase).....	253
Figure 147. Ratios $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ des échantillons de sédiments meubles et de roc de l'ensemble de l'île.	255
Figure 148. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien de la plage pour chaque échantillon sur les profils durant les campagnes d'échantillonnage août 2014, mai 2015 et novembre 2016.	259
Figure 149. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la plateforme rocheuse pour chaque profil sur les périodes d'échantillonnage de novembre 2014, août 2015, octobre 2015, mai 2016 et août 2016.	260
Figure 150. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la zone sablo-vaseuse située entre la plateforme rocheuse et le cordon de basse mer pour chaque profil de la côte sud sur les périodes d'échantillonnage d'octobre 2015 et août 2016.	261

Figure 151. Sens de la dérive littorale de la côte sud de l'île grâce à la photo-interprétation des photographies aériennes de 1964 et 2012.....	266
Figure 152. Sens de la dérive littorale de la côte nord-est de l'île grâce à la photo-interprétation des photographies aériennes de 1964 et 2012.	267
Figure 153. Cellules hydrosédimentaires des zones à l'étude de l'île aux Coudres.	269
Figure 154. Carte synthèse des sources sédimentaires des plages à l'étude de l'île, incluant les courants de surface. La direction des courants a été estimée selon la moyenne des cinq premiers mètres de profondeur depuis la surface entre juin et septembre (voir l'Atlas des courants de marée, Pêches et Océans Canada, 1997).	272
Figure 155. Zone de l'estran (polygone orange) où la topographie est légèrement plus basse et moins rugueuse devant le profil 5 (ligne pointillée blanche).....	278
Figure 156. Carte synthèse des éléments marquants de la segmentation côtière en 2016, dont les effets de bout aux extrémités des structures de protection.	282
Figure 157. Érosion accentuée (effet de bout) par un enrochement déjà présent avant cette étude à l'est du profil 2 (distance 3 000 m), sur la côte sud de l'île le 1 ^{er} septembre 2015.	283
Figure 158. Herbier à spartine alterniflore qui colonise la limite supérieure du bas estran.	289

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques de la marée à l'île aux Coudres (Pêches et Océans Canada, cité dans Roche Itée, 2010).	43
Tableau 2. Composantes de la ligne de rivage et leurs variables utilisées pour la segmentation et caractérisation côtière (Source : Drejza <i>et al.</i> , 2014).	55
Tableau 3. Nomenclature des microfalaises.....	56
Tableau 4. Mesures statistiques sur l'ensemble des secteurs et pour tous les levés en m ³ /m ² (mai 2014 à mai 2016). n = 1440.	66
Tableau 5. Limites des classes des volumes (m ³ /m ²) de plage (mai 2014 à mai 2016).	66
Tableau 6. Classes des volumes de plage (m ³ /m ²) (mai 2014 à mai 2016).....	66
Tableau 7. Ratio Phy/(Kfs+Plg) et l'origine minéralogique associée.	74
Tableau 8. Classes du pourcentage de recouvrement des herbiers déterminés par leurs critères	77
Tableau 9. Longueur et pourcentage des segments par classes du taux de migration historique (1964 à 2012).	87
Tableau 10. Moyenne du taux de déplacement de la ligne de rivage (m/an) et l'écart-type pour chaque période et par secteur.	91
Tableau 11. État de la côte selon l'orientation nord-est et sud (août 2014).	98
Tableau 12. État de la côte après les travaux d'enrochement de l'automne 2014 sur la côte nord-est et sud.	98
Tableau 13. Impacts de l'empiètement sur la plage des nouveaux enrochements de 2014. .	98
Tableau 14. Type d'artificialité sur l'ensemble de la ligne de rivage étudiée - août 2014. .	99
Tableau 15. Type d'artificialité sur l'ensemble de la ligne de rivage étudié – août 2015. .	100
Tableau 16. Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur sur la côte sud entre 2014 et 2016.	102
Tableau 17. Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur de la côte sud entre 2014 et 2016.	105
Tableau 18. Relation entre l'état de la côte et la catégorie de microfalaise – août 2014. .	107

Tableau 19. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2014.	112
Tableau 20. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2015.	113
Tableau 21. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2016.	114
Tableau 22. Moyenne de la proportion des sédiments fins en fonction de la position de l'échantillon sur le profil et l'état de la côte, août 2014.	118
Tableau 23. Pourcentage de la proportion de l'échantillon inférieure à 2 mm de diamètre selon l'état de la côte sur le profil d'échantillonnage (novembre 2014 à novembre 2016). Le profil d'échantillonnage 4 est celui qui était déjà artificialisé en 2014. Les profils 1, 5, 7 et 8 sont les profils qui ont été artificialisés en 2014. Les profils 2,3 et 6 sont les profils qui sont restés devant une côte naturelle.	119
Tableau 24. Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons de la côte sud.	121
Tableau 25. Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons de la côte Nord-est.	121
Tableau 26. Taille en millimètre et microns des classes granulométriques de la matrice fine.	122
Tableau 27. Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côte nord-est, août 2014.	124
Tableau 28. Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côte sud, août 2014.	124
Tableau 29. Distance entre la route et la ligne de rivage, août 2014.	163
Tableau 30. Caractéristiques moyennes de la morphologie de la plage et l'écart-type selon l'orientation nord-est et sud, août 2014.	166
Tableau 31. Volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type des polygones par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte sud).	204

Tableau 32. Volume moyen de la plage (m^3) et l'écart-type des polygones par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte sud).	205
Tableau 33. Volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte sud).	206
Tableau 34. Volume moyen de plage (m^3) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte sud).	206
Tableau 35. Volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type des polygones par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte nord-est).	208
Tableau 36. Volume de la plage moyen (m^3) et l'écart-type des polygones par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte nord-est).	209
Tableau 37. Volumes de plage moyens (m^3/m^2) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).	209
Tableau 38. Volumes moyens de plage (m^3) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).	210
Tableau 39. Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côte sud.	218
Tableau 40. Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côte sud.	225
Tableau 41. Somme des superficies d'herbiers selon l'état de la côte en août 2014.	227
Tableau 42. Hauteur moyenne pondérée des herbiers à spartine alterniflore, août 2014... ..	228
Tableau 43. Pourcentage de recouvrement des herbiers, août 2014.	228
Tableau 44. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 1. ...	232
Tableau 45. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2015 et 2016 pour la zone 1. ...	232
Tableau 46. Hauteur moyenne des herbiers de spartine alterniflore de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.	233
Tableau 47. Proportion d'herbiers à spartine alterniflore par pourcentage de recouvrement de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.	233
Tableau 48. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 2. ...	237
Tableau 49. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2015 et 2016 pour la zone 2. ...	237

Tableau 50. Hauteur moyenne des herbiers à spartine alterniflore de la zone 2 en août 2014, 2015 et 2016.....	238
Tableau 51. Proportion d’herbiers à spartine alterniflore par pourcentage de recouvrement de la zone 2 en août 2014, 2015 et 2016.	238
Tableau 52. Comparaison des fréquences des classes de hauteurs significatives pour les vagues provenant des secteurs nord-est et sud.....	240
Tableau 53. Moyennes et maximum des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d’eau (d) enregistrés par le capteur du haut estran sur les profils hydrodynamiques 1 à 6.....	241
Tableau 54. Similarité de la composition minéralogique entre les échantillons de sources potentielles de l’île aux Coudres et les échantillons de rivière du Bouclier canadien (BC) et des Appalaches (AP).....	254
Tableau 55. Moyenne des ratios $Phy/(Kfs+Plg)$ des échantillons selon sa position sur l’île. La couleur orange indique une origine du Bouclier canadien, en vert une origine des Appalaches et en jaune un mélange des deux.....	256

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1. Liste des échantillons utilisés pour les analyses minéralogiques.	318
Annexe 2. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 1, côte sud.....	321
Annexe 3. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 2, côte sud.....	322
Annexe 4. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 3, côte sud.....	323
Annexe 5. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 4, côte nord-est.	324
Annexe 6. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 5, côte nord-est.	325
Annexe 7. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 6, côte nord-est.	326
Annexe 8. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 1 (Enroché en 2014).....	327
Annexe 9. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 2 (Naturel)..	327
Annexe 10. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 3 (Naturel)	328
Annexe 11. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 4 (Déjà artificiel en 2014).....	328
Annexe 12. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 5 (Encoché en 2014).....	329
Annexe 13. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 6 (Naturel).	329
Annexe 14. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 7 (Enroché en 2014).....	330
Annexe 15. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 8 (Enroché en 2014).....	330
Annexe 16. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).	331
Annexe 17. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 1).....	332
Annexe 18. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 2).....	333
Annexe 19. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 3).....	334
Annexe 20. Différences cumulées des volumes (m^3) de plage du secteur 1 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.	335

Annexe 21. Différences cumulées des volumes (m ³) de plage du secteur 2 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.	336
Annexe 22. Différences cumulées des volumes (m ³) de plage du secteur 3 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.	337
Annexe 23. Différences cumulées des volumes (m ³) de plage des secteurs 4,5 et 6 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.	338
Annexe 24. Interprétation de l'évolution surfacique des herbiers entre 2014 et 2015.....	339
Annexe 25. Interprétation de l'évolution surfacique des herbiers entre 2015 et 2016.....	341
Annexe 26. Données statistiques de la station météorologique de La Pocatière pour les mois d'avril, mai, juin et juillet 2014, 2015 et 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017).	343
Annexe 27. Données statistiques de la station météorologique de Charlevoix (MRC) pour les mois d'avril, mai, juin et juillet 2014, 2015 et 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017).	344
Annexe 28. Distribution croisée des hauteurs significatives et directions de vagues à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015 (9204 observations de 1024 s).	345
Annexe 29. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.	346
Annexe 30. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 17 mai 2015 au 1 ^{er} décembre 2015.	347
Annexe 31. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.	348
Annexe 32. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.	349
Annexe 33. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 17 mai 2015 au 1 ^{er} décembre 2015.	350
Annexe 34. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.	351

Annexe 35. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.....	352
Annexe 36. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 17 mai 2015 au 1 ^{er} décembre 2015.....	353
Annexe 37. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.....	354
Annexe 38. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.....	355
Annexe 39. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 17 mai 2015 au 1 ^{er} décembre 2015.....	356
Annexe 40. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.....	357
Annexe 41. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.....	358
Annexe 42. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 17 mai 2015 au 1 ^{er} décembre 2015.....	359
Annexe 43. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.....	360
Annexe 44. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.....	361
Annexe 45. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 17 mai 2015 au 1 ^{er} décembre 2015.....	362
Annexe 46. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.....	363
Annexe 47. Ratios Phy/(Kfs+Plg) des échantillons de sédiments meubles et de roc de la côte sud.	364
Annexe 48. Ratios Phy/(Kfs+Plg) des échantillons de sédiments meubles et de roc de la côte sud.	365

INTRODUCTION

1. Problématique et pertinence de la recherche

Les berges de l'île aux Coudres sont en érosion sur certains secteurs du linéaire côtier. Cette situation est problématique, car elle affecte l'intégrité d'une route côtière construite immédiatement sur l'arrière-plage qui constitue un enjeu de communication sur l'île. D'après le bureau d'étude Roche (2010, 2013), 12,3 km du linéaire côtier bordant cette route sont en érosion et nécessitent la construction d'un ouvrage de protection afin de maintenir la route en place. Ainsi, près de 2,5 km de berges ont fait l'objet de travaux d'enrochement à l'automne 2014 pour protéger ces tronçons routiers vulnérables.

Cette solution est la plus utilisée jusqu'à maintenant au Québec pour réduire le recul du littoral (Bernatchez *et al.*, 2017), mais son efficacité à réduire les risques côtiers et ses effets sur l'environnement sont rarement quantifiés.

Cet empiètement sur le haut de plage fait craindre une modification de la morphodynamique de la plage de graviers de schistes et de sables située en bordure et dans les secteurs adjacents à l'enrochement et une dégradation de l'herbier à spartine alterniflore. Cela serait problématique si les enrochements engendraient un abaissement du profil de la plage, une augmentation de l'érosion à leurs extrémités (effets de bout) ou encore un élargissement de la plage vers le large conduisant à l'enfouissement de l'herbier à spartine alterniflore situé sur la partie supérieure du bas estran. Ces modifications, si elles survenaient, pourraient réduire l'efficacité de l'estran à atténuer l'énergie des vagues et, par conséquent, augmenter le risque de submersion par un dépassement de l'ouvrage par des niveaux d'eau élevés et le déferlement des vagues.

L'originalité de cette étude est que les évaluations des impacts de ces structures ne se font que rarement dans les conditions de plages sablo-graveleuses à large estran rocheux. La plupart des études se font sur des plages sableuses en contexte océanique (Tait et Griggs, 1990; Griggs *et al.*, 1991; Fletcher *et al.*, 1997; Weigel, 2002a, 2002b, 2002c). L'approche

est innovante, car elle définit un état de référence avant les travaux d'enrochement et une période de suivi de 2 ans tout en se basant aussi sur la dynamique rétrospective historique de la côte. De plus, une meilleure compréhension du fonctionnement morphodynamique de ce type de côte permettra d'améliorer l'adaptation et l'atténuation du risque d'érosion/submersion côtier au Québec, et à mieux identifier et calibrer d'éventuelles solutions d'adaptation aux changements climatiques (Lambert et Bernatchez, 2014).

2. Objectifs et hypothèses

En tenant compte des connaissances scientifiques disponibles sur l'île aux Coudres et les interactions entre les enrochements et l'hydrodynamisme côtier dans un contexte de plages sableuses, les hypothèses suivantes ont été élaborées:

1. Les conditions météo-marines ont des effets significatifs saisonniers sur la morphosédimentologie des plages;
2. Les enrochements n'auront pas d'impacts significatifs à court terme sur la morphosédimentologie du bas estran et les herbiers à spartine alterniflore;
3. Les sources sédimentaires qui alimentent les plages sont l'érosion de la plateforme rocheuse de schiste et le cordon sablo-graveleux de basse mer.

Ce projet de maîtrise a pour objectif principal d'évaluer les impacts possibles des enrochements et des conditions météo-marines sur la morphosédimentologie de la plage et les herbiers à spartine situés en contrebas de celle-ci. Ces modifications, si elles surviennent, pourraient augmenter le risque de submersion.

Les objectifs spécifiques sont les suivants:

1. Réaliser une analyse de l'évolution rétrospective du littoral (1964 à 2012);
2. Constituer l'état initial de la morphosédimentologie des plages des secteurs naturels et artificiels avant la mise en place des structures en 2014;
3. Établir un bilan sédimentaire saisonnier et un bilan des changements morphosédimentaires;
4. Vérifier l'absence d'impact des ouvrages sur la flore située sur la partie supérieure du bas d'estran, à proximité de la plage sablo-graveleuse ;
5. Identifier et quantifier les causes des changements saisonniers et annuels de la morphosédimentologie des plages et identifier les sources sédimentaires qui alimentent les plages;
6. Proposer une approche de gestion des stocks sédimentaires.

CHAPITRE I CADRE THÉORIQUE

Cette section a pour but de dresser un portrait général des connaissances actuelles sur les différentes thématiques qui seront abordées dans ce mémoire. Il est indispensable de saisir certains concepts afin d’apprécier davantage la lecture.

1.1. Les plages et leurs agents morphodynamiques

La zone côtière de l’île aux Coudres est constituée majoritairement d’une terrasse de plage qui est prolongée par une plage sablo-graveleuse, d’un large estran rocheux et sablo-vaseux. Elle est typique de ce que l’on retrouve sur les littoraux de l’estuaire du Saint-Laurent, plus particulièrement ceux de la rive sud. Du point de vue morphologique, on peut distinguer plusieurs segments : la terrasse de plage Mitis, le haut de plage végétalisé (ou haute plage), le haut estran, correspondant à une plage sablo-graveleuse, une plateforme rocheuse située dans la partie supérieure du bas estran, une zone sablo-vaseuse ainsi qu’un cordon de basse mer sur sa partie inférieure et l’avant-côte (figure 1).

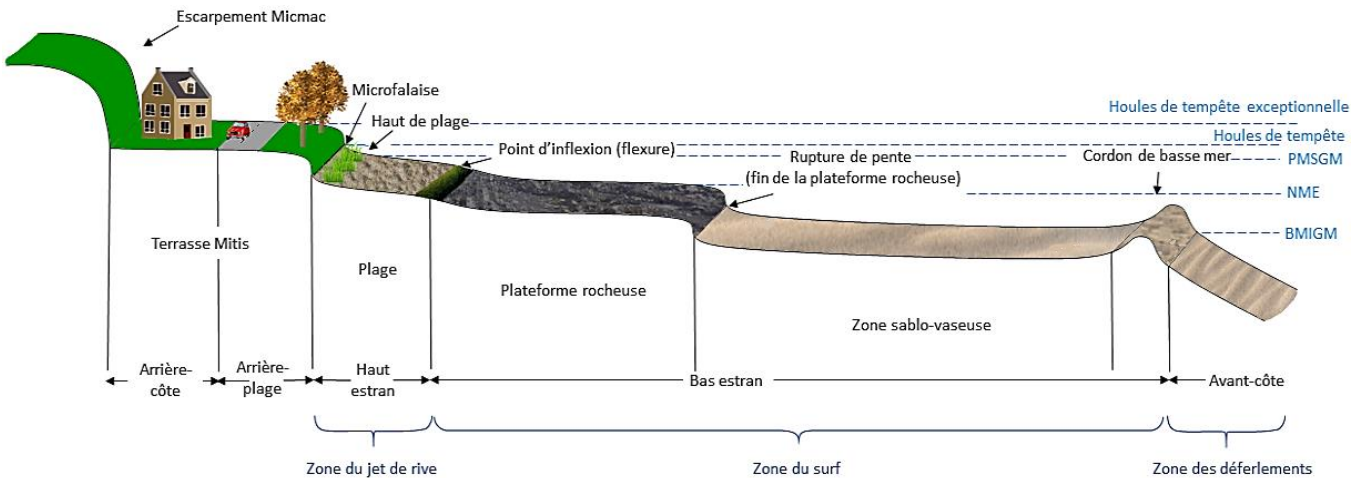


Figure 1. Schéma du profil type de la zone côtière sur la partie sud de l’île aux Coudres incluant les éléments morphologiques, les zones hydrodynamiques à marée haute et les niveaux d’eau : PMSGM (Pleine mer supérieure de grande marée), NME (niveau moyen des eaux) et BMIGM (Basse mer inférieure de grande marée).

Aux premiers abords de la plage se trouve la terrasse Mitis qui constitue l'arrière-plage et l'arrière-côte. Elle s'est formée lors d'un ancien niveau marin et peut être submergée exceptionnellement lors de tempêtes de fortes intensités. Sur l'île aux Coudres, elle est fortement anthropisée par la route côtière et la présence d'habitations. La zone de haute plage est une zone végétalisée ou semi-végétalisée, faisant partie de l'écosystème côtier, tout comme l'arrière-plage, située derrière celle-ci, beaucoup plus végétalisée et stable. Elle est parfois bornée côté terre par une microfalaise d'érosion ou des débris signifiant la limite maximale atteinte par les vagues de tempêtes. Dans le cas de l'île aux Coudres, cette limite est souvent anthropisée à des fins de protection contre l'érosion par des structures rigides, tels un enrochement ou un muret. Le haut estran est la portion entre la haute plage (bornée par la ligne de rivage, à proximité de la limite des pleines mers supérieures de grandes marées ou PMSGM) et le point d'inflexion (flexure) situé à proximité de la limite du niveau moyen des eaux. À mi-marée, cette zone est complètement émergée. Sur l'île aux Coudres, la portion du bas estran située juste en dessous de la flexure est souvent colonisée par des herbiers à spartine alterniflore. Le bas estran est la section du littoral en dessous de ce point d'inflexion qui s'étend jusqu'à la limite des basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM). C'est par une granulométrie généralement plus fine et une pente plus douce qu'il est distinguable du haut estran dans un environnement sédimentaire. Le bas estran de l'île aux Coudres comporte trois éléments majeurs, la plateforme rocheuse, la zone sablo-vaseuse et le cordon de basse mer (uniquement sur la rive sud de l'île). L'avant-côte est la section sous les basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM) qui est toujours sous le niveau de l'eau.

C'est la dernière section d'échanges sédimentaires avec les autres segments de la plage. La zone intertidale comprend les segments à l'intérieur des battements de marées, soit le haut estran et le bas estran.

1.1.1. Les agents naturels morphogènes des plages

Les agents morphogènes des plages peuvent être expliqués séparément, mais ils doivent être compris et interprétés comme un tout, car ils s'influencent mutuellement en

continu. Comme le mentionnent Fox et Davis (1978), les vagues et la dérive littorale influencent la topographie, ce qui a pour réaction d'affecter en retour les vagues et les courants. De plus, la taille granulométrique affecte la capacité de transport des agents morphogènes ainsi que la forme de la zone intertidale (Pye et Blott, 2004).

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, les paramètres qui expliquent la dynamique sédimentaire du littoral sont les variations du niveau marin, les tempêtes, la végétation intertidale, l'action combinée des vagues et des courants sur la taille des sédiments, la pente et les glaces côtières (Drapeau, 1992). Les agents morphogènes locaux sont les échanges saisonniers de sédiments entre la zone intertidale et le large, la présence de grands affluents, les structures et activités humaines ainsi que le broutage des marais par certaines espèces d'oiseaux (d'Anglejan *et al.*, 1981; Lucotte et d'Anglejan, 1986; Drapeau, 1992).

Dionne (1996a) mentionne, alors qu'il étudie les processus d'érosion de la basse terrasse (terrasse Mitis) à Petite-Rivière, que le pouvoir érosif des vagues est accentué par un effet combiné des tempêtes et des marées de vive-eau. Il évoque aussi que durant l'hiver, le pied de glace qui recouvre le rivage a un effet érosif secondaire. Toutefois, cette étude ne permet pas de mettre en cause précisément les raisons de l'érosion de la basse terrasse. L'élévation du niveau marin relatif ainsi que l'augmentation de la fréquence et l'importance des tempêtes sont des causes soulevées par l'auteur. Il précise toutefois que « les conditions paléoenvironnementales, qui ont existé lors de l'édification de la basse terrasse, n'existent plus depuis longtemps ». Cela implique qu'en l'absence de ces conditions, l'entretien naturel de la terrasse ne peut pas se faire au même rythme que par le passé, ce qui la soumet aux conditions hydrodynamiques actuelles et donc à l'érosion.

La forme du Saint-Laurent et la direction prédominante des vents augmentent l'amplitude de la marée vers l'amont tandis que la hauteur et la période des vagues sont diminuées (Drapeau, 1992). Les vents soufflent en prédominance de l'ouest, car ils ont tendance à s'aligner parallèlement à l'axe du Saint-Laurent. Par contre, les vagues de tempêtes importantes proviennent de l'est, car les fetchs (distance sur laquelle le vent souffle

sur un plan d'eau) y sont plus grands (Drapeau, 1992). Le fleuve Saint-Laurent, étant situé dans le type de climat continental humide (classification de Köppen), subit ainsi une saisonnalité des conditions hydrodynamiques. En juillet et en août, la probabilité que se forment des vagues de deux mètres dans l'estuaire moyen est à peu près nulle, tandis qu'en décembre elles sont inférieures à 5% (Vigeant, 1984).

1.1.2. Vagues

Les vagues et leurs courants associés constituent les principaux mécanismes de transport de sédiments littoraux et contribuent fortement aux modifications morphologiques des plages (Drapeau et Morin, 1981; Larson et Kraus, 1989 ; Dean, 1991; Kriebel *et al.*, 1991; Martinez et Harbaugh, 1993). Elles sont caractérisées par leur longueur d'onde (λ), leur hauteur (dénivellation entre le creux et la crête), leur période (T) et leur célérité (c). Elles dépendent de la vitesse du vent, la durée pendant laquelle il souffle et du fetch (course) soit l'étendue d'eau entre la zone de genèse de l'onde et la côte. Ces vagues possèdent une énergie (E) mécanique, potentielle et cinétique qui transforme les plages lorsqu'elles arrivent à la côte (Paskoff, 2012). Les vagues sont à l'origine de plusieurs types de courants qui se manifestent avec une fréquence et une intensité variables selon la profondeur à laquelle ils agissent (Héquette, 2001).

D'ailleurs, les vagues interagissent constamment avec l'estran et plus celui-ci est large comme sur l'île aux Coudres, plus il est en mesure de dissiper l'énergie des vagues (Drapeau, 1992). À marée haute, ce phénomène permet le frottement sur les faibles profondeurs, tel que le large estran rocheux de l'île, en favorisant le dépôt sur place des particules fines en suspension (Paskoff, 2012).

Brodeur et Allard (1983) expliquent qu'en fonction de la situation de l'île aux Coudres dans le moyen estuaire ainsi que de l'importance du marnage, « la zone intertidale est soumise à de forts courants de marée tandis que les conditions de vents et de fetchs permettent la formation de vagues de tempête dont l'énergie connaît une grande dispersion verticale ».

1.1.3. Courants côtiers

Les courants engendrés par les vagues ont une capacité de transports élevée pouvant mener à une accrétion ou une érosion du stock sédimentaire (Héquette, 2001; Paskoff, 2012). Ils participent aux échanges de sédiments entre la zone intertidale et l'avant-plage. Ce processus est important pour comprendre la dynamique sédimentaire de l'estuaire du Saint-Laurent (Drapeau, 1992). Les mécanismes hydrodynamiques peuvent être divisés en plusieurs zones, soit la zone du large, la zone de transformation des vagues, la zone de déferlement, la zone de surf et la zone de jet de rive (figure 2). Elles se basent sur l'interaction de la houle avec le fond marin et la plage qui engendre des courants et une dynamique sédimentaire particulière pour chacune d'entre elles.

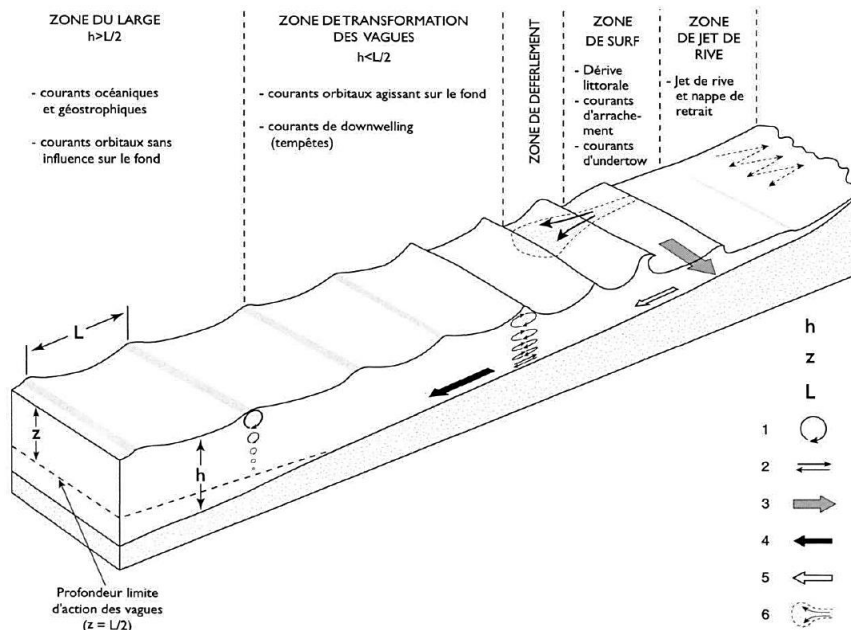


Figure 2. Les différentes zones d'action des vagues et les principaux courants pouvant agir près des côtes. H : profondeur ; z : distance sous la surface ; L : longueur d'onde des vagues ; 1 : courant orbital ; 2 : courant oscillatoire (sur le fond) ; 3 : dérive littorale ; 4 : courant de *downwelling* ; 5 : courant d'*undertow* ; 6 : courant d'arrachement. Source : Héquette, 2001.

Dans la zone du large, les vagues présentent un profil sinusoïdal et se propagent sans qu'elles ne soient affectées par le fond, car les profondeurs y sont trop importantes (Héquette, 2001). C'est pour cette raison qu'elles ne participent pas au transit sédimentaire. Le courant

orbital de la vague vers la côte est de même intensité que celui qui se manifeste vers le large et ils agissent tous deux pendant un laps de temps égal (Greenwood et Osborne, 1991; Komar, 1998). À l'approche de la zone de transformation des vagues, l'onde commence à être influencée par le fond lorsqu'il se situe à une profondeur (h) inférieure à la moitié de la longueur d'onde ($h < L/2$). Il y a une diminution de leur longueur d'onde et de leur célérité alors que leur hauteur a généralement tendance à augmenter (Héquette, 2001). Le fond est atteint par les courants orbitaux des vagues qui y entraînent un mouvement oscillatoire. La hauteur des vagues plus importante et leur cambrure plus prononcée engendrent un mouvement oscillatoire dissymétrique sur le fond avec un mouvement net vers le large (mouvement plus long dans ce sens, bien que la vitesse orbitale atteinte soit moindre qu'en direction de la côte) (Greenwood et Osborne, 1991; Komar 1998). Le déplacement des sédiments se fait donc dans les deux sens, mais de façon plus importante vers le large lors des tempêtes automnales et hivernales, expliquant la migration des sédiments vers le bas de plage (Niedoroda *et al.*, 1984 ; Wright *et al.*, 1991). Les courants côtiers durant les tempêtes jouent ainsi un rôle important sur les échanges sédimentaires entre les plages et le large (Carter, 1988).

Les vastes différences saisonnières dans les conditions de vagues mènent à des changements saisonniers importants en termes de largeur de plage et d'érosion côtière (Fletcher *et al.*, 1997). Durant l'été, les vagues sont moins hautes et les vitesses orbitales des courants oscillatoires sont moins élevées. La vitesse critique de mise en mouvement du sédiment (u_i) ne pourra alors être dépassée que vers la côte et le sable ne sera donc transporté que dans cette direction (Héquette, 2001). Lors de tempêtes, les conditions de houle de haute énergie, généralement en provenance de l'est, ont un fort potentiel d'érosion du littoral. Ce mauvais temps est souvent causé par une basse pression atmosphérique et des vents qui augmentent le niveau d'eau dans la zone littorale (Drapeau, 1992). Les conditions de fortes vagues mettent facilement en suspension les particules sédimentaires (Wright *et al.*, 1991 ; Héquette et Hill, 1993).

Le courant de *downwelling* ou plongée des eaux se produit lors d'un événement de surcote (figure 3). L'accumulation d'eau sur le rivage responsable de la formation d'une pente faible du niveau de la mer qui s'abaisse vers le large (Héquette, 2001). De ce fait, la direction du vent par rapport à l'orientation de la côte est un facteur essentiel pour expliquer la formation de ces courants (Héquette, 2001).

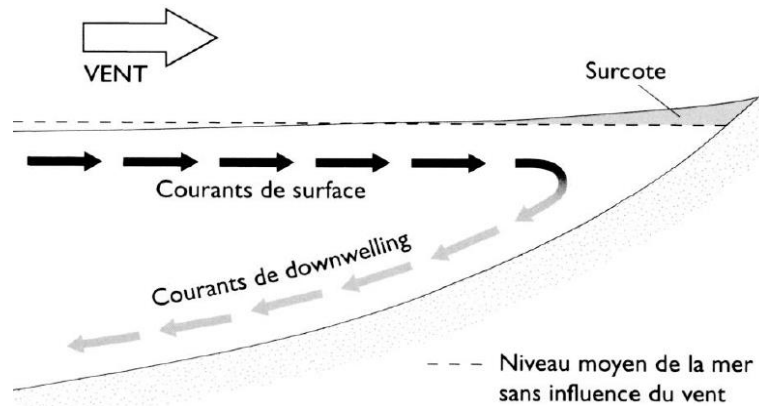


Figure 3. Représentation schématique des courants de fond et de surface qui agissent dans la zone côtière pendant une onde de tempête. Source : Héquette, 2001.

Cet apport d'eau vers la côte doit être équilibré par un retour vers le large. Le courant de *downwelling* se met en place afin que les échanges de masse d'eau soient en équilibre dans la zone littorale (Héquette, 2001). Ces courants agissent près du fond et s'écoulent perpendiculairement ou de façon oblique avant la zone de déferlement et implique généralement peu de transits sédimentaires.

D'autres courants, essentiellement dus à l'action du vent pendant les tempêtes, sont responsables du transport de quantités considérables de sédiments et agissent jusqu'à des profondeurs nettement plus importantes (Héquette, 2001). Les courants d'*undertow* ou courants de reflux se manifestent essentiellement sous la masse d'eau près de la surface dans la zone de déferlement (Svendsen, 1984).

Que ce soit en période de beau temps ou mauvais temps, le courant de dérive littorale se développe dans la zone de surf parallèlement à la côte par le résultat du déferlement des vagues avec un certain angle par rapport au trait de côte (Patsch et Griggs, 2006; Paskoff,

2012). C'est ce courant qui explique en grande partie le transit sédimentaire longitudinal et individualise des cellules hydrosédimentaires.

Lors du déferlement d'une vague, le jet de rive (swash) projette l'eau de la vague dotée d'une forte turbulence vers l'avant sur la plage. Cette énergie est capable de mobiliser et de déplacer des sables, des graviers et des galets par suspension, saltation et roulement. Puis, la nappe de retrait (backswash), moins turbulente, descend la pente en roulant du matériel résultant un déplacement latéral (figure 4). Ainsi, les sédiments sont transportés avec un mouvement de zigzag le long du rivage dans une certaine direction.

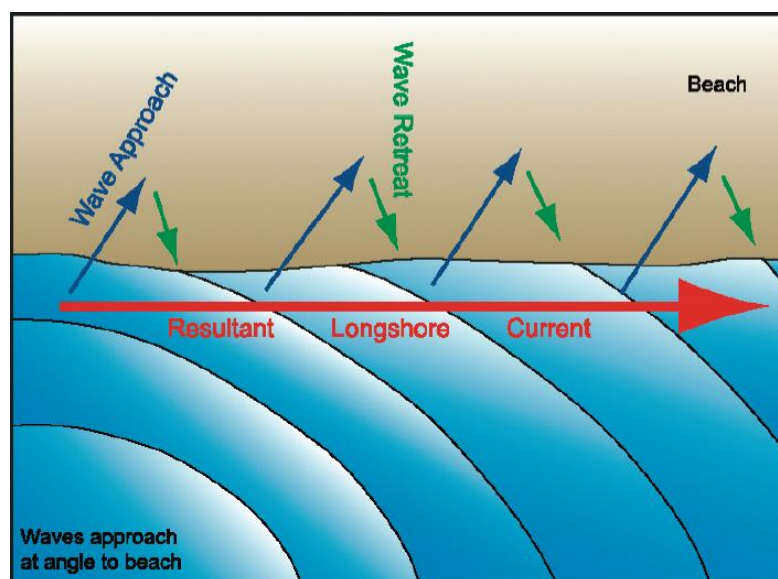


Figure 4. Développement d'un courant de dérive littorale par le résultat des vagues en approche de la plage avec un certain angle. Elle réfère à au mouvement net des grains de sable dans une direction le long du rivage. Source : Patsch et Griggs, 2006.

Sa vitesse dépend essentiellement de l'angle d'incidence des vagues, mais aussi de la période et la hauteur des vagues au moment du déferlement, la pente et rugosité de l'espace infralittoral (Paskoff, 2012). La direction de la dérive peut s'inverser quand les vagues changent de direction, mais un sens prédomine, soit le plus efficace en termes de quantité de matériaux déplacés.

1.1.4. Marée

À la tête du moyen estuaire du Saint-Laurent, l'hydrodynamique littorale est dominée par les marées qui sont de type semi-diurne (Centre Saint-Laurent, 1996). À Saint-Joseph-de-la-Rive, le marnage est de type macrotidal avec une amplitude de 4,8 m pour les marées moyennes et 7,0 m pour les marées de vives-eaux (Lambert et Bernatchez, 2014).

Les courants de marée créés par le mouvement de va-et-vient des masses d'eau, sont particulièrement importants dans l'estuaire moyen où ils « peuvent être déplacés le long de l'axe longitudinal de l'estuaire sur une distance de 10 à 20 km entre l'étale de marée haute et l'étale de marée basse » (Laprise et Dodson, 1993, cités dans Biorex Inc, 1999). De façon générale, l'intensité des courants de marée atteint son paroxysme durant le jusant (marée descendante), particulièrement dans les eaux superficielles et au niveau d'étranglements importants ou de chenaux comme celui de l'île aux Coudres.

La marée permet aux vagues de mobiliser les sédiments dans l'ensemble de la zone intertidale en raison du battement continu des niveaux d'eau. La puissance engendrée est très importante et ces courants agissent sur de grandes profondeurs, surtout en milieu macrotidal et les marais maritimes à sédiments fortement cohésifs (Centre Saint-Laurent, 1996). C'est ce qui explique que sur les estrans larges et à pente faible de l'estuaire du Saint-Laurent, la répartition et le tri des sédiments peuvent ne pas être aussi bien démarqués que sur les littoraux à faible marnage et à forte énergie de vagues (Drapeau et Morin, 1981). Cela dépend aussi des sources sédimentaires et de la géologie du secteur. En effet, il est important de noter la grande présence de particules fines dans le moyen estuaire en raison du bouchon vaseux (Silverberg et Sundby, 1979).

1.1.5. Glaces

La dynamique sédimentaire dans la zone intertidale de l'estuaire du Saint-Laurent est fortement influencée par des processus glaciels qui contribuent à la sédimentation, au transport et à l'érosion des sédiments (Dionne, 1973; Drapeau, 1992; Centre Saint-Laurent, 1996). D'ailleurs, Brodeur et Allard (1983) mentionnent que la saison de gel, qui dure environ 4 mois par année sur l'île aux Coudres, est susceptible de jouer un rôle important dans les processus d'érosion glaciels sur les battures de l'île.

Dans l'estuaire du Saint-Laurent, la glace se forme généralement à la fin novembre ou début décembre (Brochu, 1960; Dionne, 1973). La glace qui s'accumule durant l'hiver sur le rivage se nomme le pied de glace. Dans l'estuaire moyen, sa formation sur la plage dure entre 15 jours et un mois. Il correspond à de la glace agglomérée et soudée amenée sur les berges par les vagues ou par «la congélation d'eau projetée sur la partie supérieure du rivage lors du déferlement» (Dionne, 1973). Il peut aussi être formé de glace pure, c'est-à-dire par la congélation sur place d'une nappe d'eau (marine ou lacustre), ainsi que parfois de glace nivale dans sa partie interne et à sa surface. Le pied de glace de haut estran, de par sa position sur la frange supérieure du littoral, n'est pas soumis aux marées. Cependant, la partie plus large du pied de glace située sur le bas estran est quant à elle sujette aux battements des marées puisqu'elle n'est généralement pas fixée au fond (Dionne, 1973). Ce dernier se forme après le pied de glace de haut estran et prend environ de 25 à 45 jours pour se former. Il est à noter que les conditions météo-marines et la topographie côtière jouent un rôle déterminant sur sa morphologie ainsi que sa vitesse de formation (Forbes et Taylor, 1994).

Le pied de glace constitue un des principaux agents morphosédimentologiques de l'estuaire du Saint-Laurent (Dionne, 1973; Drapeau et Morin, 1981). Selon Dionne (1973), il est à la fois un agent de destruction, de construction et de protection. La carapace que forme cette glace littorale limite grandement l'action des vagues, des courants, de la marée et des processus physico-chimiques et biologiques sur l'estran, ce qui résulte en une érosion plus lente des littoraux en régions froides (Dionne, 1973).

Début avril, la dislocation du pied de glace s'entame dans l'estuaire moyen et peut contribuer à l'action d'ablation par l'arrachement des sédiments collés ou emprisonnés aux glaces flottantes, redistribuées par les courants, vagues et marées (Dionne, 1973; Paskoff, 2012). Le jeu de la marée amène la glace à être en contact avec les sédiments lors de la marée basse, et ces derniers sont soudés à la surface inférieure par le gel (Dionne, 1981; Troude et Sérodes, 1988; Drapeau, 1992). Le vent peut transporter des sédiments en poussant les glaces vers le large, causant de l'érosion, mais aussi en soufflant vers les terres, diminuant les pertes sédimentaires. Le retrait des glaces laisse la zone intertidale particulièrement vulnérable. Le dégel ayant diminué la cohésion des sédiments du haut estran, ils sont plus facilement érodés par l'action combinée des vagues et des courants (Drapeau, 1992).

Avec les changements climatiques actuels, une réduction spatiale et temporelle du couvert de glace saisonnier est observable dans l'estuaire du Saint-Laurent (Johnston *et al.*, 2005; Savard *et al.*, 2009; Galbraith *et al.*, 2013; Senneville *et al.*, 2014). Dans ce contexte, la diminution de la présence du pied de glace peut avoir des impacts importants sur les processus de cryoclastie, mais aussi des impacts sur son rôle d'agent morphogénique et de protection que constitue cette glace de rivage (Forbes *et al.*, 2002; Bernatchez et Dubois, 2004).

1.2. Concepts de cellule hydrosédimentaire et de budget sédimentaire

Les plages sont des systèmes dynamiques et en constante évolution. Ainsi, l'équilibre d'une plage dépend des pertes sédimentaires (sortants) et de ses sources sédimentaires (intrants). Le concept de cellule hydrosédimentaire exprime de manière conceptuelle le dynamisme des stocks de plages dans un espace déterminé fini. Elle possède ses propres limites pratiquement infranchissables par les sédiments, ses sources sédimentaires, sa dérive littorale et un ou des puits où les sédiments sont perdus de façon permanente (Dubois, 1973; Patsch et Griggs, 2006). Ce concept est employé pour comprendre les processus côtiers, les intrants et les sortants de sédiments, les stockages et le transport sédimentaire. Il est un cadre de travail pour évaluer les impacts des activités humaines sur la zone côtière. Patsch et Griggs

(2006) expliquent que ses frontières sont majoritairement un promontoire rocheux, une barrière d'origine anthropique ou un puits sédimentaire.

Le budget sédimentaire est un autre concept qui permet de comprendre les sources et les puits de sédiments, leurs patrons de transport et leurs magnitudes à l'intérieur d'une cellule hydrosédimentaire pour une période de temps définie (Rosati, 2005; Patsch et Griggs, 2006). Le budget sédimentaire est une balance de volume des sédiments entrants (sources) et sortants (puits) d'un secteur donné et résultant d'une accrétion ou érosion du secteur de côte étudié (Rosati, 2005; Bird, 2008; Paskoff, 2012). Le budget est fait pour représenter les conditions à court terme comme ceux des saisons jusqu'à des périodes plus longues d'un temps historique donné. En ce sens, le budget sédimentaire est un élément fondamental des études de processus sédimentaire côtier (Komar, 1998). Il sert de cadre de travail pour évaluer un projet en milieu côtier, développer une compréhension des patrons de transports sédimentaires dans le temps, estimer les taux futurs d'érosion et accrétion et de voir l'impact éventuel d'une infrastructure de protection sur le milieu (Rosati, 2005).

Il existe plusieurs sources actuelles et reliques de sédiments qui alimentent les plages (figure 5).

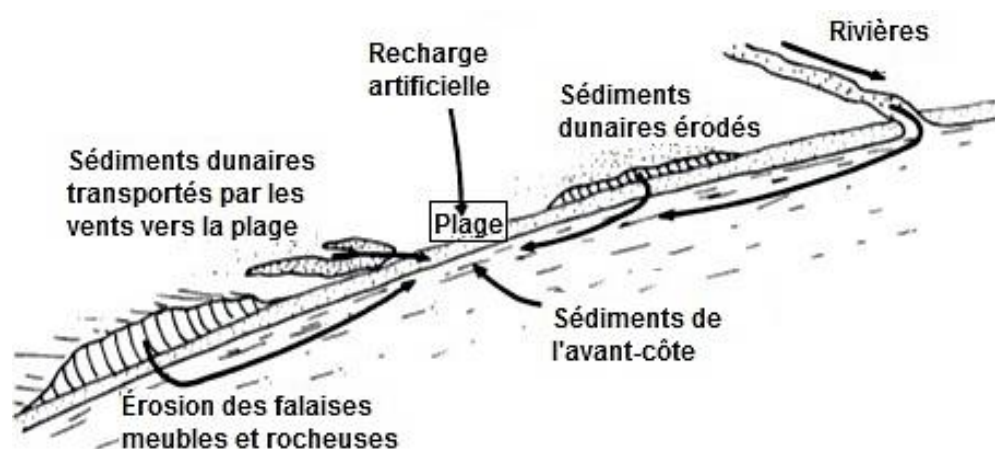


Figure 5. Sources sédimentaires des plages. Modifié de Bird, 2008

Par exemple, les falaises et microfalaises actives ainsi que l'arrière-plage peuvent fournir à la plage de grandes quantités de sédiments tant qu'il leur reste du matériel, que leur lien n'est pas interrompu par des obstacles (ex : un enrochement ou un muret) et que le matériel est pris en charge par la dérive littorale (Paskoff, 2012). L'avant-côte est une source de sables et de galets pouvant être remontés vers les plages (Bird, 2008; Paskoff, 2012). Les stocks sédimentaires peuvent aussi avoir été accumulés par des agents continentaux (eau, glace, vent) durant la dernière époque glaciaire lorsque le niveau marin était plus bas.

Dans les régions englacées comme le Québec, les sédiments accumulés dans les mers postglaciaires sont aujourd'hui une source sédimentaire. Tel que le mentionnent Brodeur et Allard (1985), les sédiments accumulés sur l'île aux Coudres par la mer de Goldthwait sont des dépôts littoraux minces de la mer de Goldthwait (terrasse Mitis) et une plaine d'argile marine sur une partie de l'île.

Les apports sédimentaires des cours d'eau ne sont pas à négliger et peuvent être une source importante à l'intérieur de la cellule hydrosédimentaire (Bird, 2008; Paskoff, 2012). Lors de la fonte printanière, l'érosion dans les bassins versants par la glace et le grand volume d'eau qui s'écoule des rivières apporte une charge grossière considérable de matériel qui se jette à la mer (Paskoff, 2012). La météorisation des affleurements rocheux de la zone littorale offre une source terrigène de sédiments pour les plages (Bird, 2008). Le vent lorsqu'il souffle depuis les terres peut emporter des sables qu'il laisse tomber dans les eaux littorales (Bird, 2008; Paskoff, 2012).

Ultimement, le sable est exclu du compartiment hydrosédimentaire lorsqu'il termine son chemin dans les « puits » vers le large, hors de la portée du transport littoral, sur les dunes côtières ou dans une autre cellule adjacente (Bird, 2008; Paskoff, 2012). Les marais maritimes peuvent également servir de puits à sédiments grâce à la floculation ou la sédimentation des particules fines, favorisée par la croissance de la végétation (Drapeau, 1992).

Bien évidemment, les échanges sédimentaires qui affectent les plages sont fonction du type d'environnement dans lequel se produisent les mécanismes érosifs, hydrodynamiques et éoliens. Dans le cas de l'île aux Coudres, le type de côte principalement retrouvé sur les secteurs à l'étude est celui de la terrasse de plage constituée d'une « basse terrasse de quelques dizaines à quelques centaines de mètres de largeur, composée de sables et graviers littoraux reposant sur un substrat rocheux aplani » (Brodeur et Allard, 1983). Cette terrasse de plage, aussi appelée terrasse Mitis, a été édifiée il y a environ 2 000 ans durant l'Holocène (Locat, 1977; Brodeur et Allard, 1983; Brodeur et Allard, 1985; Dionne 1990; Dionne, 2002). Les dépôts fluvio-glaciaires et glaciaires, comme le till ou les moraines, laissés sur le continent et sur le littoral actuel, peuvent être une source de sédiments pour les plages. En effet, ces dépôts anciens peuvent être transportés par les cours d'eau ou remaniés par les vagues, les courants et les marées et ainsi servir à alimenter la côte en matériel.

Ainsi, la sensibilité du littoral de l'île aux Coudres découle du fait qu'elle est formée de plages dont le stock sédimentaire est hérité de processus du passé et entretenu seulement par l'érosion de la terrasse Mitis, des recharges sédimentaires réalisées par les humains et des apports provenant du bas estran. Des sédiments fins issus des cordons de bas estran ou de l'avant-plage peuvent en effet potentiellement engraisser les plages de l'île et l'érosion de la plateforme rocheuse peut également fournir des plaquettes de schiste par météorisation (gélifraction essentiellement), voire par l'action mécanique des vagues. Il n'y a par contre que très peu d'apports en provenance de l'érosion des falaises adjacentes ou des cours d'eau. La présence croissante des ouvrages de protection sur le littoral peut limiter ou obstruer le transit sédimentaire naturel des cellules de l'île.

1.3. Les rythmes d'évolution de la côte

L'érosion est un phénomène qui affecte l'ensemble des côtes mondiales (Bird, 1985; Komar, 1998; Stone et Orford, 2004; Paskoff, 2012). Luijendijk, *et al.* (2018) ont évalué que 24% des plages du monde s'érodent à des taux dépassant 0,5 m / an, tandis que 28% sont en accrétion et 48% sont stables. La vitesse de recul des côtes est fortement variable selon les

types de littoraux (plage, falaise rocheuse, falaise meuble, etc.) et les processus côtiers morphogènes (Paskoff, 2012). Leur action peut être temporaire, épisodique ou sur le long terme (Kraus, 1988).

Une plage connaît des variations naturelles saisonnières durant une année (Fox et Davis, 1973). Les sédiments perdus durant les tempêtes d'automne et d'hiver dessinent un profil typique concave sur le haut estran (Hayes et Boothroyd, 1969; Fox et Davis, 1978). Les sédiments sont ensuite retournés à la plage durant la période de beau temps au printemps et en été (Fox et Davis, 1978). Ces cycles d'érosion et d'accrétion sont liés aux conditions de vagues saisonnières (Fox et Davis, 1978).

Le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR possède un réseau de 5 407 bornes effectives de mesure d'érosion dans le Québec maritime (Bernatchez et Drejza, 2015). De ce nombre, 407 bornes de suivi d'érosion côtière sont implantées dans la région de la Capitale-Nationale (incluant l'île aux Coudres) où le taux de migration moyen est de -0,5 m/an, tous types de côtes confondus. À titre de comparaison pour des côtes similaires à ce que l'on retrouve sur l'île aux Coudres, Quintin *et al.* (2016) mentionnent que la côte de Beaupré et la rive nord de l'île d'Orléans obtenaient respectivement, sur les côtes à marais maritime, des taux de déplacements moyens de -0,75 m/an et de -0,85 m/an. Pour ce qui est des côtes meubles, les taux étaient de -0,69 m/an pour la côte de Beaupré et de -0,46 m/an pour le côté nord de l'île d'Orléans. Toutefois, les taux d'érosion étaient plus faibles et localisés sur les terrasses de plage de la rive sud de l'île d'Orléans, soit de l'ordre de -0,20 m/an.

1.4. Les structures de défense côtière parallèles au trait de côte et leurs impacts sur l'hydrodynamisme et la morphodynamique des plages

En réponse à l'érosion côtière, les berges ont été activement défendues avec des structures d'ingénierie côtière depuis que les humains se sont installés en zone côtière (Charlier *et al.*, 2005). Au Québec, la mise en place de structures rigides par enrochements est une des techniques les plus employées pour contrer l'érosion côtière (Barnabé, 1974;

Drejza *et al.*, 2014; Bernatchez *et al.*, 2017). Ces structures rigides de protection ont pour objectifs d'empêcher le recul de la ligne de rivage et de mettre à l'abri de l'attaque des vagues de tempêtes les constructions ou voies de communication aménagées trop près de la mer (Dean, 1978; Kraus, 1988; Bird, 1996; Pinot, 1998; Nordstrom, 2000; Charlier *et al.*, 2005; O'Connell, 2010; Bernatchez et Fraser, 2012; Paskoff, 2012). Néanmoins, n'importe quelle structure placée en milieu côtier aura des impacts sur l'une ou plusieurs composantes de la zone côtière, notamment sur l'hydrodynamisme, les courants, les régimes des vagues, les dynamiques sédimentaires, la taille granulométrique, les processus de déposition et les écosystèmes côtiers (coastal squeeze) (Fletcher *et al.*, 1997; Miles *et al.*, 2001; Runyan et Griggs, 2003; Martin *et al.*, 2005; Bernatchez et Quintin, 2016). L'étendue des effets et leur magnitude sont fonction du degré d'exposition et d'interaction de la structure avec la nappe d'eau dont le niveau dépend des marées et des vagues (Dugan *et al.*, 2011).

1.4.1. Empiètement sur l'estran

L'empiètement de l'ouvrage sur la plage est un impact primaire lorsque celui-ci est installé dans la zone intertidale et qui va de pair avec l'altération des processus hydrodynamiques sur les environnements adjacents (Dugan *et al.*, 2011). La position de la structure sur le littoral joue un rôle important sur les conséquences potentielles telles que l'abaissement et le rétrécissement des plages suite aux interactions avec l'ouvrage de protection et le blocage des échanges sédimentaires avec l'arrière-plage (Bernatchez et Fraser, 2012).

1.4.2. Impacts sur l'hydrodynamisme et abaissement de la plage

Lorsque les éléments hydrodynamiques (courants, vagues) interagissent avec la structure de protection rigide, leur comportement est modifié et peut se traduire par la réflectivité sur la structure, surtout lors d'une tempête (Carter, 1988; Kraus, 1988; Kraus et McDougal, 1996; Bernatchez et Fraser, 2012). De ce fait, la série d'ondes de vagues qui frappe l'ouvrage de protection est réfléchiée vers le large, éventuellement avec un angle, et ne

permet ainsi plus la dissipation de l'énergie des vagues comme sur une plage naturelle (Hall et Pilkey, 1991; Griggs, 2005a, 2005b).

Un des premiers impacts morphologiques d'un ouvrage parallèle au trait de côte est l'affouillement au pied de la structure (Dean, 1987; Komar et McDougal, 1988; Kraus, 1988; Morton, 1988; Fowler, 1993; Kraus et McDougal, 1996; Lipp, 1995; Pinot, 1998; Griggs, 1999; Sutherland *et al.*, 2003; Bird, 2008; O'Connell, 2010; Bernatchez *et al.*, 2011). Ce phénomène (dike scouring) est connu et bien documenté (Burcharth et Hughes, 2002); il peut potentiellement contribuer à déstabiliser la plage en augmentant la dissipation turbulente et la réflexion des vagues percutant l'ouvrage, voire même le déchausser. Cette érosion (figure 6) est observée au pied d'une structure et a pour conséquence de déplacer les sédiments vers le large ou dans le sens de la dérive littorale (Pinot, 1998; Bernatchez *et al.*, 2008; Bird, 2008; Bernatchez *et al.*, 2011).

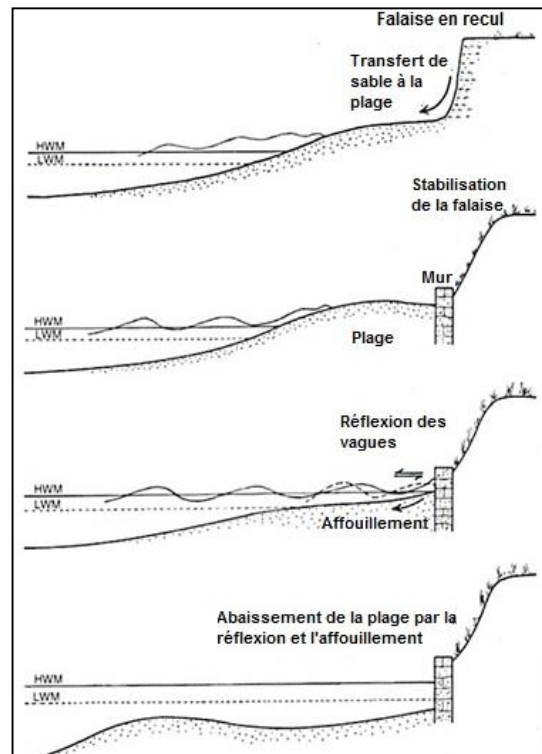


Figure 6. Affouillement et diminution du profil de la plage suite à la mise en place d'un mur de protection. Modifié de Bird, 2008.

C'est une nouvelle interaction turbulente entre l'eau et les sédiments qui n'existaient pas dans le contexte original de la plage (Kraus, 1988; Plant et Griggs, 1992; Pinot, 1998; Paskoff, 2012). La turbulence contrôle le transport sédimentaire par le mouvement vertical de la colonne d'eau des particules en suspension (Dyer, 1986).

Une structure rigide empêche par ailleurs les échanges sédimentaires entre la plage et l'arrière-plage pourtant indispensables à son bon équilibre et à sa dynamique sédimentaire (Dean, 1987; Kraus, 1988; Nordstrom, 2000; Hill *et al.*, 2004; Bernatchez *et al.*, 2011; Bernatchez et Fraser, 2012; Paskoff, 2012). Il en résulte une diminution de l'apport sédimentaire à la plage de cette source (Fletcher *et al.*, 1997).

La perte du stock sédimentaire est largement observable devant un mur ou un enrochement (Griggs et Tait, 1988; Kraus, 1988; Terchunian, 1988; Dean, 1991; Plant et Griggs, 1992; Kraus et McDougal, 1996; Bernatchez et Dubois, 2004). Cette érosion peut mener à une modification du profil de plage observable par la réduction de largeur et de la hauteur de la plage (McDonald et Patterson, 1984; Carter *et al.*, 1986; Harmsworth et Long, 1986; Kraus, 1988; Pilkey et Wright, 1988; Tait et Griggs, 1990, Hall et Pilkey, 1991; Birkemeier *et al.*, 1991; Douglass et Pickel, 1999; Griggs, 2005a, 2005b; Basco, 2006; Fletcher *et al.*, 2007; Bernatchez *et al.*, 2011; Bernatchez et Fraser, 2012; Paskoff, 2012). Il peut ainsi en résulter la perte d'une plage sèche devant les enrochements, car les niveaux d'eau sont constamment en contact avec les sédiments (O'Connell, 2010; Bernatchez et Fraser, 2012). De plus, selon la granulométrie de la plage, il peut se produire une augmentation de la taille granulométrique de la plage, en particulier dans un secteur en déficit sédimentaire à cause de l'augmentation de l'énergie des vagues qui emporte le matériel plus petit (Kraus *et al.*, 1988).

Cette diminution en largeur et hauteur réduit la capacité de dissipation d'énergie des vagues de l'estran (Paskoff, 2012). Ainsi, l'abaissement du profil de plage au-devant de la structure modifie la hauteur d'eau permettant aux vagues d'atteindre l'ouvrage avec plus d'énergie puisqu'il y a moins ou plus de dissipation de vagues (Kraus et McDougal, 1996;

Paskoff, 2012). De ce fait, les vagues peuvent frapper l'ouvrage de protection avec plus d'énergie et plus fréquemment (Bernatchez et Fraser, 2012). Par conséquent, l'action répétée des vagues qui déferlent sur la structure de protection engendre une pente de la plage plus abrupte, donc plus courte et moins dissipative (Dean, 1987; Kraus *et al.*, 1988; NRC, 2007).

Bernatchez *et al.* (2008) ont déterminé que les secteurs de plage artificialisés dans la Baie-des-Chaleurs avaient des indices de déficit sédimentaire élevés à très élevés contribuant à un déséquilibre sédimentaire (Bernatchez, *et al.*, 2008; Bernatchez et Fraser, 2012). Fletcher *et al.* (1997) ont eu des conclusions similaires sur une plage artificialisée d'Hawaï qui avait une largeur deux fois plus petite que celle d'un secteur naturel. Cette situation est d'autant plus sérieuse pour le stock sédimentaire de la plage si ses sources en matériel sont en déficit (Dean et Mauermeyer, 1983; Dean, 1987 cité dans Kraus, 1988; Basco *et al.*, 1992; O'Connell, 2010; Paskoff, 2012).

Hill *et al.* (2004) ont démontré dans une étude réalisée dans le sud du Maine aux États-Unis que les secteurs artificialisés ne se rétablissent pas aussi rapidement que les secteurs naturels après une tempête, car ils possèdent moins de sable pour contribuer au nouveau profil de plage. Ainsi, les murs, par des effets indirects, compromettent la résilience des plages pour le rétablissement après un événement de tempête (Kriebel *et al.*, 1986; Komar et McDougal, 1988; Morton, 1988; Nakashima et Mossa, 1991; Lipp, 1995). La capacité naturelle de la plage à répondre à une tempête est alors réduite. Nelson et Fink (1980) expliquent que la topographie d'une plage naturelle se modifie avant une tempête. En effet, les vagues plus fortes ont tendance à ramener les sédiments du haut de la plage vers le bas, adoucissant le profil ce qui permet un meilleur amortissement des tempêtes et une plus grande résilience aux hautes vagues et aux conditions de vents. De plus, l'augmentation de la réflexion des vagues sur une structure réduit significativement le transport net de sédiments vers la plage, ce qui est un processus important de rétablissement de la plage en période de beau temps à la suite d'un événement de tempête important (Miles *et al.*, 2001). Ainsi, un budget sédimentaire faible devant une structure réduit la capacité naturelle de résilience de la plage à absorber l'énergie des vagues (Bernatchez *et al.*, 2011).

De manière générale, les structures côtières altèrent le régime des processus hydrodynamiques à la côte, modifient les processus de déposition et maintiennent mobiles les sédiments sur les côtes sableuses exposées (Miles *et al.*, 2001). Il en résulte des courants de dérive littorale plus intenses sur les plages naturelles situées immédiatement en aval des structures artificielles (Plant et Griggs, 1992). Conséquemment, ils modifient le transport sédimentaire perpendiculairement et parallèlement à celui-ci en affectant significativement la charge de matériel en suspension (Dorland, 1940; Dean, 1987; Kraus, 1988; Carter, 1988; Kraus et McDougal, 1996; Miles *et al.*, 2001; Griggs, 2005b; EEA, 2006; Stancheva et Marinski, 2007). Miles *et al.*, 2001 ont remarqué dans une étude menée à South Devon au Royaume-Uni, que la suspension de sédiments avait augmenté devant le mur en raison de la réflexion des vagues et que les sédiments étaient alors transportés par les courants dominants.

Une conséquence de l'abaissement du profil de plage est l'augmentation de la fréquence de la submersion marine. Ce phénomène a été clairement identifié comme plus propice dans les secteurs avec des structures artificielles sur le trait de côte (Griggs, 1999; Bernatchez *et al.*, 2008; Didier *et al.*, 2015). Elle est d'autant plus propice à se produire quand le déficit sédimentaire est élevé, que la largeur et la hauteur du haut estran sont faibles. Par conséquent, une plage moins élevée amène davantage de vagues à se briser sur la structure et il y a surpassement des structures et inondation de l'arrière-plage (Bernatchez *et al.*, 2011).

1.4.3. Effet de bout

Le phénomène de l'effet de bout peut affecter les secteurs adjacents des structures rigides parallèles au trait de côte par un déficit sédimentaire (Komar et McDougal, 1988; Morton, 1988; Hall et Pilkey, 1991; Lipp, 1995; Kraus et McDougal, 1996; Griggs, 2005a, 2005b; O'Connell, 2010; Bernatchez et Fraser, 2012; Paskoff, 2012), et ce jusqu'à une distance de 150 m d'une structure de protection (Griggs et Tait, 1988). Ce phénomène est caractérisé par une augmentation du recul du trait de côte des secteurs naturels de part et d'autre de la structure (Kraus, 1988; Basco, 2006; Bernatchez et Fraser, 2012). Ce phénomène est davantage marqué en aval de la dérive littorale et à la suite de tempêtes

(Elsayed *et al.*, 2005; Bernatchez et Fraser, 2012). Il est expliqué par la diffraction des vagues qui arrivent sur la structure vers le secteur non protégé en aval de la dérive où elles rencontrent des sédiments meubles friables de la côte (Dean, 1987; Basco, 2006). De plus, l'abaissement du niveau de la plage par la réflexion des vagues de tempêtes amène de plus grosses vagues obliques à attaquer les secteurs voisins (Plant et Griggs, 1992). En somme, ce phénomène peut être résumé par l'énergie des vagues arrivant à la côte qui est non dissipée et transmise au segment adjacent.

Griggs et Tait (1988) ont déterminé que l'importance de cet impact en aval de l'ouvrage de protection dépend de la hauteur et de la période des vagues. D'autres facteurs semblent avoir une influence sur cet effet, soit l'angle d'approche des vagues, la géométrie et la perméabilité de la section terminale de la structure (Griggs et Tait, 1988). D'ailleurs, ils ont observé que la réflexion était plus grande sur un enrochement dont les blocs étaient d'un diamètre plus petit (moins perméable) que sur un autre site où les roches étaient plus grosses (plus perméable). Également, plus la structure est située près de la mer, donc dans la zone de battement des marées, plus la turbulence générée accentue le processus d'érosion (Griggs et Tait, 1988).

1.4.4. Variabilité des réponses

Plusieurs auteurs mentionnent que les plages artificialisées ne retrouvent pas leur état d'équilibre à la suite des tempêtes comparativement aux secteurs naturels et qu'elles sont plus directement impactées par les fortes conditions météorologiques (Hill *et al.*, 2004). Néanmoins, les impacts des ouvrages sur la plage et l'hydrodynamisme dépendent de plusieurs conditions. Les agents météo-marins influencent la variabilité des réponses de l'hydrodynamisme et la morphologie de la plage devant les structures de défense côtière. Les tempêtes engendrent plus de conséquences que les périodes de beau temps, car ils réduisent la zone de déferlement et renforcent les processus physiques (Hall et Pilkey, 1991; Griggs, 1998, 2005a, 2005b; Miles *et al.*, 2001).

Ensuite, les effets associés sur l'évolution du budget sédimentaire de la plage dépendent entre autres du coefficient de réflectivité et de rugosité de la structure (Kraus, 1988; Bernatchez et Fraser, 2012). Les murs possèdent une rugosité inférieure aux enrochements et sont généralement plus réfléchifs par leur structure verticale (Neelamani et Sandhya, 2004). Inversement, les structures de gravats (petits blocs) présentent généralement de faibles niveaux de jet de rive et de réflexions en absorbant ou en dissipant une grande partie de l'énergie de l'onde incidente. Cette dissipation est principalement induite par la turbulence des vagues et la friction dans l'écoulement sur et à travers les vides des roches de l'ouvrage de protection (Bradbury *et al.*, 1988).

Le positionnement joue aussi un rôle primordial sur les effets possibles d'une structure. Plus la position est basse sur le profil de plage, plus grands sont les impacts physiques associés (Weigel, 2002a, 2002b, 2002c). Ainsi, implanter l'ouvrage sur l'arrière-plage limite le contact entre la structure et les vagues. Ce contact existant seulement durant les événements de tempête engendre moins d'impacts que s'il avait lieu tout au long de l'année (Bernatchez et Fraser, 2012).

Par ailleurs, les impacts sur le bilan sédimentaire global peuvent aussi être négligeables suite à la mise en place d'un ouvrage de défense si les apports sédimentaires sont suffisants (Kraus, 1988; Runyan et Griggs, 2003; Basco, 2006).

Enfin, l'étendue de la zone côtière impactée est fonction de l'intensité de l'interaction entre la structure et les processus côtiers, l'augmentation de l'âge des structures (accumulation d'effets et des interactions sur le long terme) et la hausse du niveau de la mer (Dugan *et al.*, 2011).

1.5. Impact de la végétation intertidale sur l'hydrodynamisme

La végétation de la zone intertidale, particulièrement sous forme de marais maritime, est très abondante sur les rives du moyen estuaire (Drapeau, 1992; Centre Saint-Laurent, 1996). Cet habitat naturel constitue une défense contre la submersion et l'érosion en dissipant

l'énergie des vagues incidentes par la friction à la surface de la végétation du marais (Owen, 1984). Concrètement, elle réduit le potentiel d'érosion de la zone intertidale et augmente la capacité de déposition des sédiments par la réduction de la vitesse de l'écoulement (Carling, 1982; Stumpf, 1983; Drapeau, 1992; Wang *et al.*, 1993; French *et al.*, 1995; Allen et Duffy, 1998; Brown, 1998; Reed *et al.*, 1999; Christiansen *et al.*, 2000; Shi *et al.*, 2000; Van Proosdij *et al.*, 2000; Cooper, 2005; Neumeier et Amos, 2006; Dugan *et al.*, 2011). Cette accumulation de sédiments durant l'été compense les pertes des saisons précédentes (Drapeau, 1992).

L'étude de Wayne (1976) mentionnait que la spartine alterniflore était très efficace pour réduire la hauteur et l'énergie des vagues de par son positionnement sur le schorre inférieur (bas estran), sa rigidité et résistance au pliage. Grâce à ses caractéristiques, elle génère un plus grand degré de turbulence lorsque les vagues passent au travers. Coulombier (2011) mentionne que, dans les marais de l'estuaire du Saint-Laurent, les courants et les vagues sont atténués par la végétation de manière variable durant l'année. Ses résultats montrent que le « transport en suspension et le dépôt sédimentaire sont influencés par le schorre, mais aussi par les vagues, l'hydrodynamisme et la distance des sources locales de sédiments ». Il précise toutefois que la croissance de la végétation joue un rôle insignifiant sur le transport sédimentaire dans le marais.

Plusieurs études ont été entreprises afin de déterminer la magnitude de ce processus de dissipation d'énergie des vagues dans un marais. Knutson *et al.* (1982) ont testé en laboratoire ce processus et ont déterminé que sur 2,5 m de largeur de marais, l'énergie des vagues incidentes était réduite de 50%. Presque aucune énergie des vagues ne persistait après 30 m de largeur. Möller *et al.* (1996) mentionnaient que la réduction de l'énergie des vagues se chiffrait entre 47 à 100% (moyenne de 79%) au travers du schorre étudié à North Norfolk en Angleterre. De plus, Möller (2006) estime que la hauteur et la densité du marais jouent un rôle important sur l'atténuation de l'énergie des vagues. Owen (1984) concluait que sur les 80 mètres de largeur d'un marais maritime au Royaume-Uni, la hauteur des vagues était réduite de 49%. Fonseca et Cahalan (1992) ont déterminé en laboratoire que lorsque la hauteur des herbiers était approximativement égale à la profondeur d'eau, la réduction de

l'énergie était d'environ 40% sur un mètre de largeur d'herbier. Cooper (2005) a mesuré que la hauteur moyenne des vagues était dissipée de 91% et que l'énergie des vagues l'était de 97% au niveau d'un marais maritime large de 425 m dans l'estuaire The Wash, au nord-est de l'Angleterre.

Il existe aussi d'autres types d'écosystèmes intertidaux qui agissent de manière similaire que les marais maritimes tels que les herbiers à zostère et les récifs coralliens (ministère des Pêches et des Océans Canada, 2009; Ferrario, 2014). Leur présence agit un peu comme des brise-lames en interagissant avec les vagues de manière à créer de la friction et ainsi réduire l'énergie qui arrive à la côte.

Il est important de ne pas oublier que l'ampleur de cette dissipation d'énergie des vagues par les écosystèmes dépend des conditions physiques de l'environnement intertidal comme le marnage, l'énergie des vagues incidentes, les caractéristiques de la végétation du marais et de la topographie de l'estran (Knutson *et al.*, 1982). En conséquence, plus l'altitude de l'estran est élevée, plus les niveaux d'eau moyens seront loin du rivage et plus la zone tampon de dissipation d'énergie des vagues du marais salé sera grande (Cooper, 2005).

CHAPITRE II

SITE D'ÉTUDE : L'ÎLE AUX COUDRES

2.1. Présentation générale du terrain d'étude

L'île aux Coudres se situe dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent, à environ 90 km au nord-est de la ville de Québec, dans la région de Charlevoix (figure 7). Elle est séparée de la rive nord du fleuve par le chenal de l'île aux Coudres faisant 2,7 km de largeur. Sur les 28 km de côte, ce sont près de 8 km de linéaire côtier (trait rouge et noir sur la figure 7) qui ont été étudiés pour ce projet d'une durée de 3 ans (2014 à 2016).

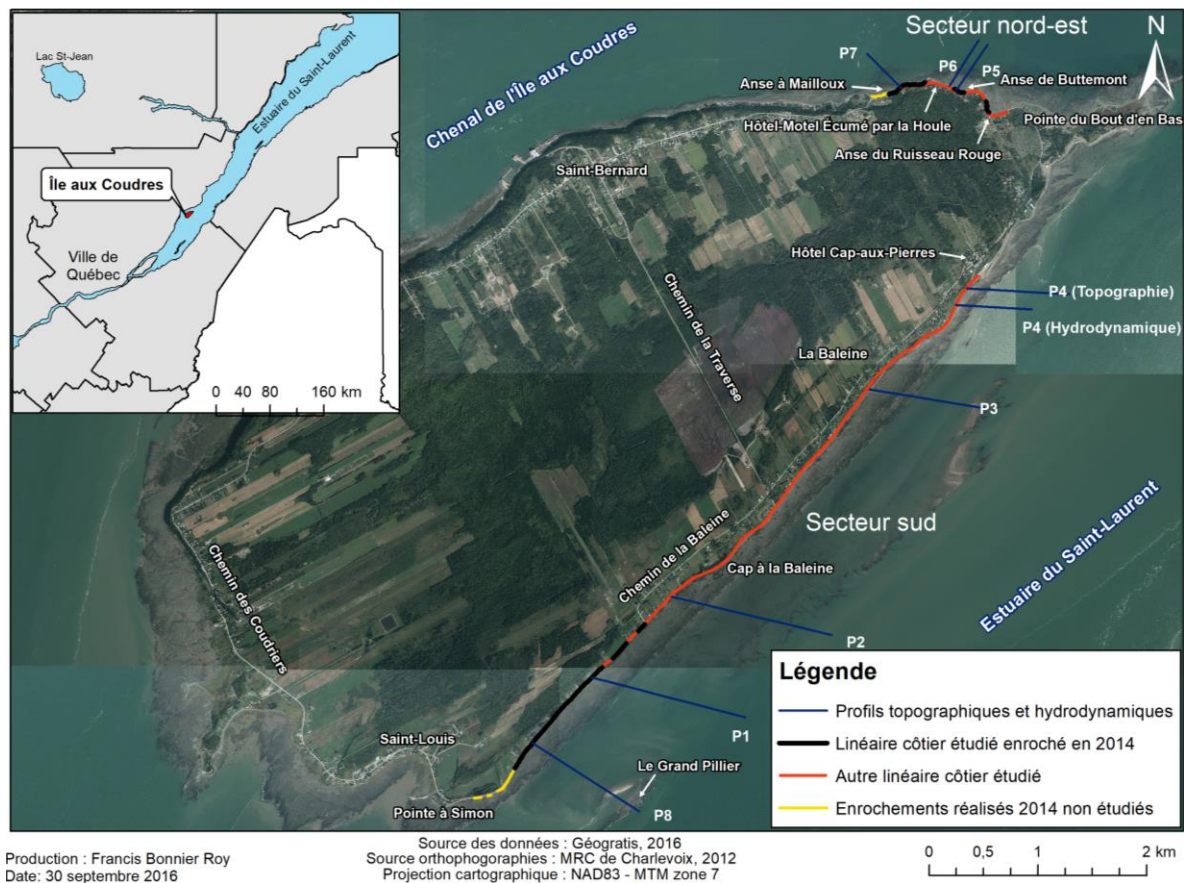


Figure 7. Emplacement de l'île aux Coudres et des secteurs à l'étude (trait rouge et noir).

Nous avons distingué le secteur nord-est (1,4 km), s'étendant de l'anse à Mailloux à l'anse au Ruisseau Rouge, et le secteur sud, compris entre l'Hôtel Cap-aux-Pierres, au sud du cap éponyme, et l'est de la pointe à Simon, face au Grand Pilier (6,4 km).

L'île possède une forme grossièrement elliptique, avec un grand axe sud-ouest nord-est mesurant 10,4 km et un petit axe sud-est nord-ouest mesurant 4 km. La côte est indentée par plusieurs anses, particulièrement au nord-est de l'île avec les anses à Mailloux, Buttemont et Ruisseau Rouge ainsi que le long de la pointe du Bout d'en Bas, formée d'un cordon sableux boisé orienté dans l'axe de l'estuaire se terminant par une flèche de blocs glaciels à l'extrémité aval (Brodeur et Allard, 1983). La côte sud est plutôt rectiligne et uniforme. La zone intertidale représente une portion importante de la superficie de l'île. Brodeur et Allard (1983) avaient déterminé qu'à marée basse, l'ensemble de la zone intertidale était évalué à 35% de la superficie totale de l'île, soit 16,25 km².

La population de la municipalité de l'Isle-aux-Coudres était de 1 143 habitants en 2016 (Statistique Canada, 2017). Elle est constituée de 3 villages fusionnés (Saint-Bernard, Saint-Louis et La Baleine) reliés par les 23 km de route, le chemin des Coudriers, qui longe la côte.

2.2. Géologie et dépôts quaternaires

Le socle rocheux de l'île est d'origine appalachienne et est composé de deux séquences de roches détritiques cambro-ordoviciennes (≈ 500 Ma) séparées par une faille de chevauchement dans le sens du grand axe (trait vert sur la figure 8) (Rondot, 1969).

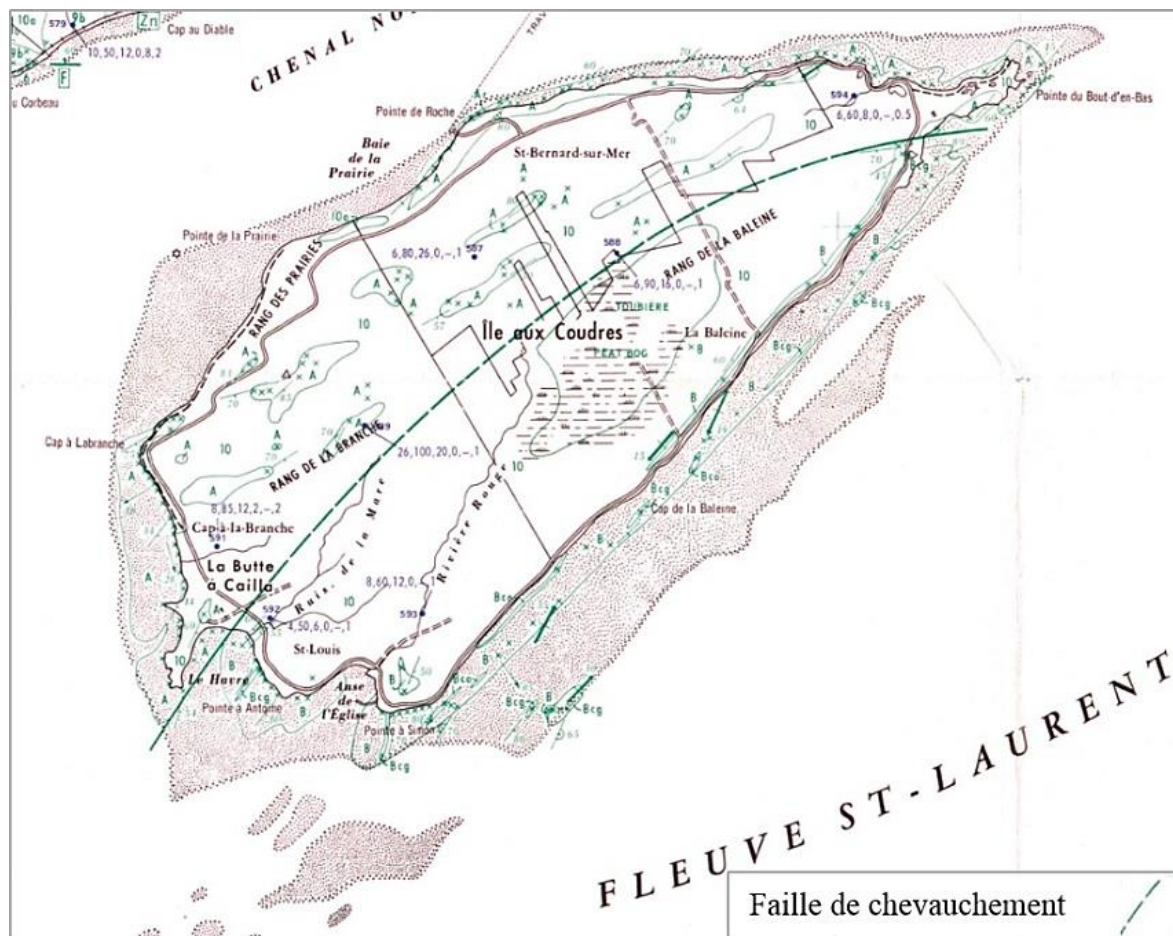


Figure 8. Faille de chevauchement (trait vert), île aux Coudres. Modifié de Rondot, 1969.

La première séquence au nord est en majeure partie constituée de microgrès tandis que la deuxième, au sud-est, est plutôt de type flyschique avec des blocs conglomératiques à éléments calcaires ou gréseux ayant un pendage variant entre 60° et 85° (Rondot, 1968). Sur la majeure partie de l'île, l'arrière-plage est formée par la terrasse Mitis (Locat, 1977; Brodeur et Allard, 1983, Dionne 2002). Cet élément géomorphologique de faible pente et d'élévation rencontre l'escarpement de la falaise morte Micmac, édifiée pendant « une longue période de stabilité du niveau marin relatif durant l'Holocène » il y a 2030 ± 80 ans AA (médiane des datations) (Brodeur et Allard, 1983; Dionne, 2002). L'actuel niveau marin des pleines mers supérieures de grandes marées (PMSGM) délimite la ligne de rivage avec une microfalaise taillant la terrasse Mitis sur la plupart des côtes de l'île.

2.3. Variations récentes du niveau marin relatif

Lors de la dernière ère glaciaire, le Wisconsinien (80 à 10 ka), il est estimé que 30 % de la superficie des continents était alors englacée (Landry et Mercier, 1992). En Amérique du Nord, l'inlandsis laurentidien recouvrait la portion à l'est des montagnes Rocheuses, était d'une épaisseur allant jusqu'à 4 000 m à son paroxysme glaciaire (20 000 AA) (Marshall *et al.*, 2000) (figure 9). Son volume alors estimé de $25 \times 10^{15} \text{ m}^3$ de glace a largement contribué à abaisser le niveau marin des océans à cette époque (figure 10).

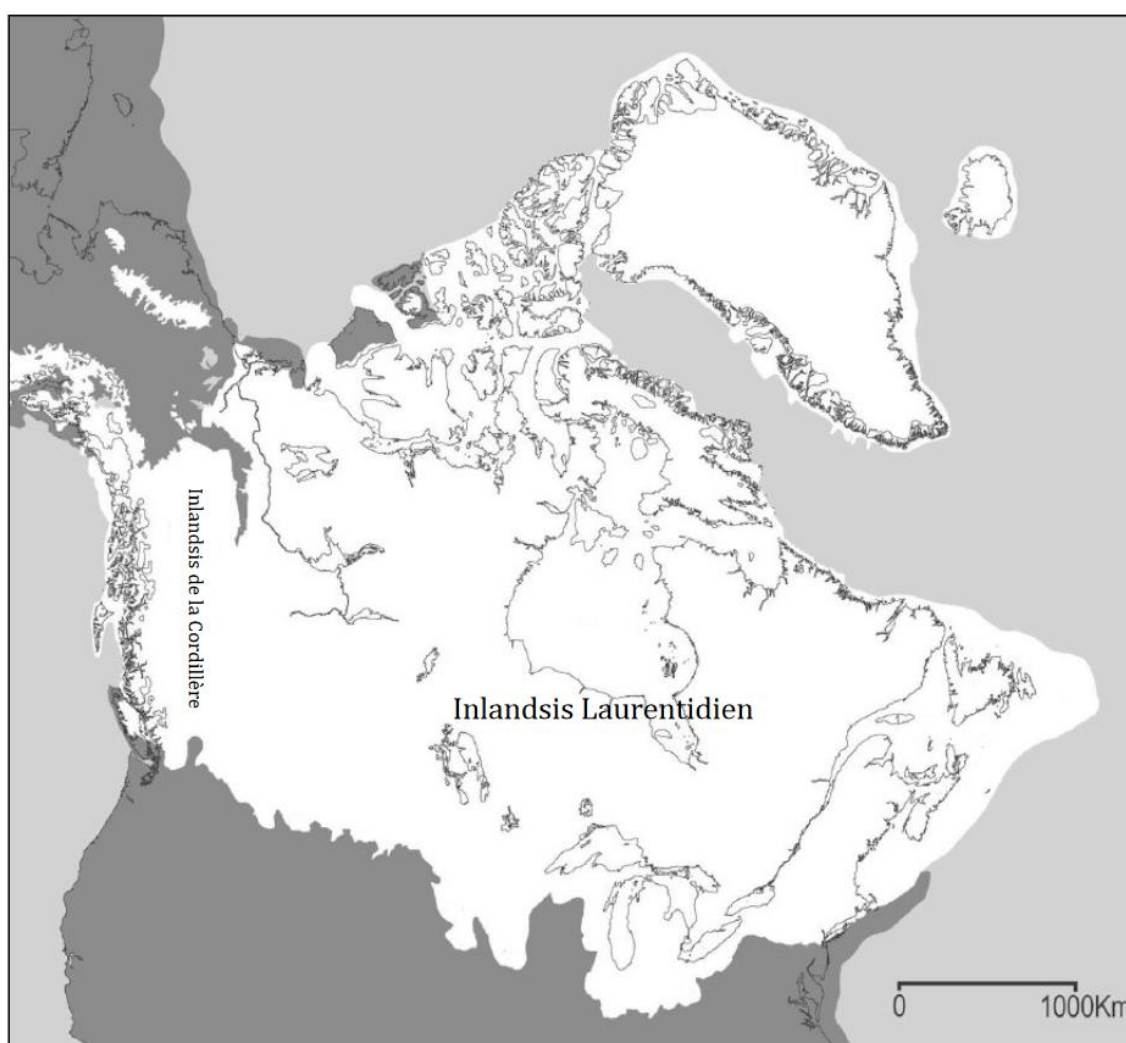


Figure 9. Extension des glaciers au dernier maximum glaciaire à l'échelle de l'Amérique du Nord. Source: Houde-Poirier *et al.* (2014) modifiée de Dyke *et al.* (2002)

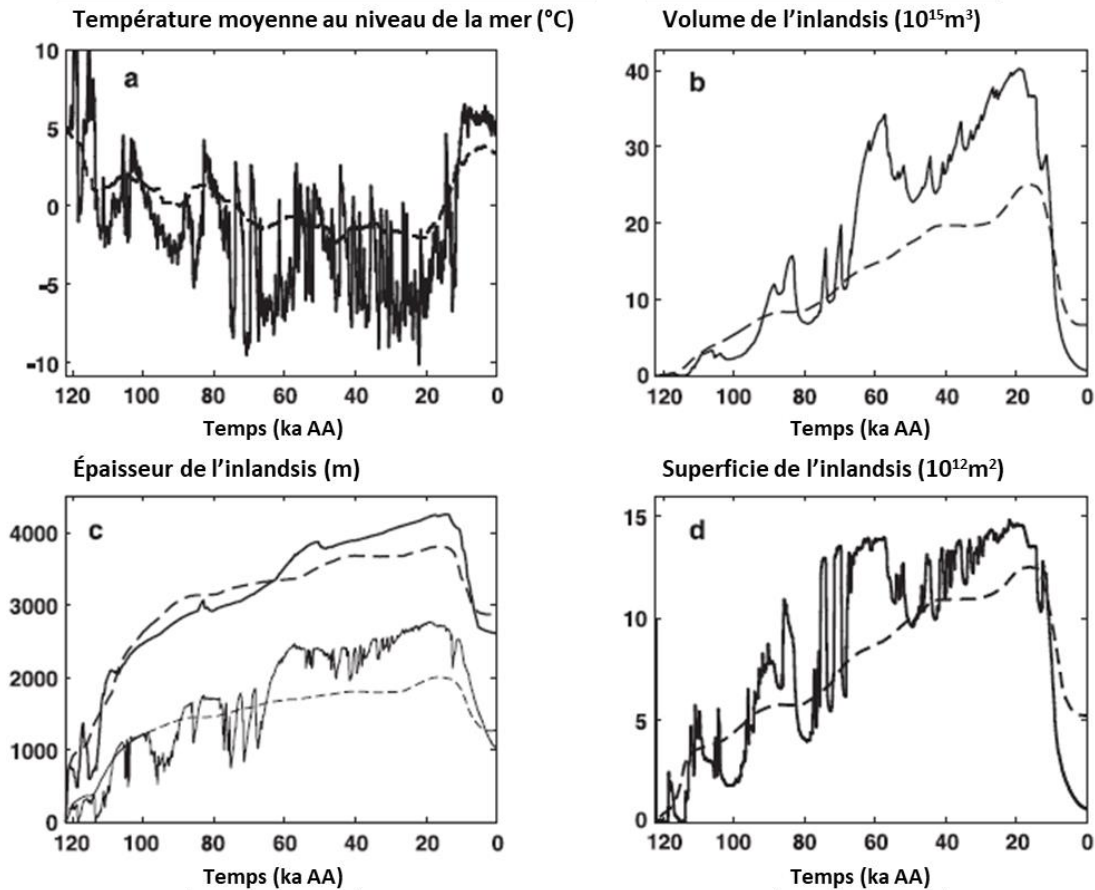


Figure 10. Séries chronologiques du dernier cycle glaciaire de l'inlandsis laurentidien selon les modèles de Tarasov-Peltier (ligne pointillée) et Marshall-Clarke (ligne pleine). a) Température moyenne de l'air en °C. b) Volume de glace de l'inlandsis. c) Épaisseur maximale (trait large) et moyenne (trait fin) de la calotte glaciaire. d) Superficie de la calotte glaciaire. Modifié de Marshall *et al.* (2000).

Au Québec, le paysage côtier a été façonné par cette dernière période glaciaire et tout particulièrement par les mers postglaciaires qui s'en sont suivies lors du retrait de l'inlandsis. La déglaciation, débutée dans le golfe peu avant 14 000 ans AA (Rodrigues *et al.*, 1993), a permis à l'eau du golfe Saint-Laurent de pénétrer dans l'estuaire formant ainsi la Mer de Goldthwait (Dionne, 1977, 1997) et atteint la ville de Québec vers 12 400 AA (Chauvin *et al.*, 1985 ; Occhietti, 1989). Selon Brodeur et Allard (1985), l'aspect actuel de l'île aux Coudres serait hérité de l'épisode de la troisième phase de la Mer de Goldthwait (9800 - 9400

ans AA) qui a suivi la déglaciation de la rive nord de l'estuaire du Saint-Laurent. Les éléments importants du paysage tels que la terrasse Mitis et l'escarpement Micmac présents sur l'île sont des éléments hérités des anciens niveaux marins des mers postglaciaires (Dionne, 2002). Le relèvement isostatique du continent suite à la déglaciation a causé une régression postglaciaire du niveau marin relatif dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent (Dionne, 1988). La courbe du niveau marin relatif durant l'Holocène illustre l'effet du rebond isostatique du continent ayant pour effet de faire baisser le niveau relatif de la mer (figure 11). Ce recul de la mer s'est produit à différentes vitesses et les différents niveaux marins ont ainsi édifié l'escarpement Micmac au pied duquel s'est façonnée la terrasse Mitis.

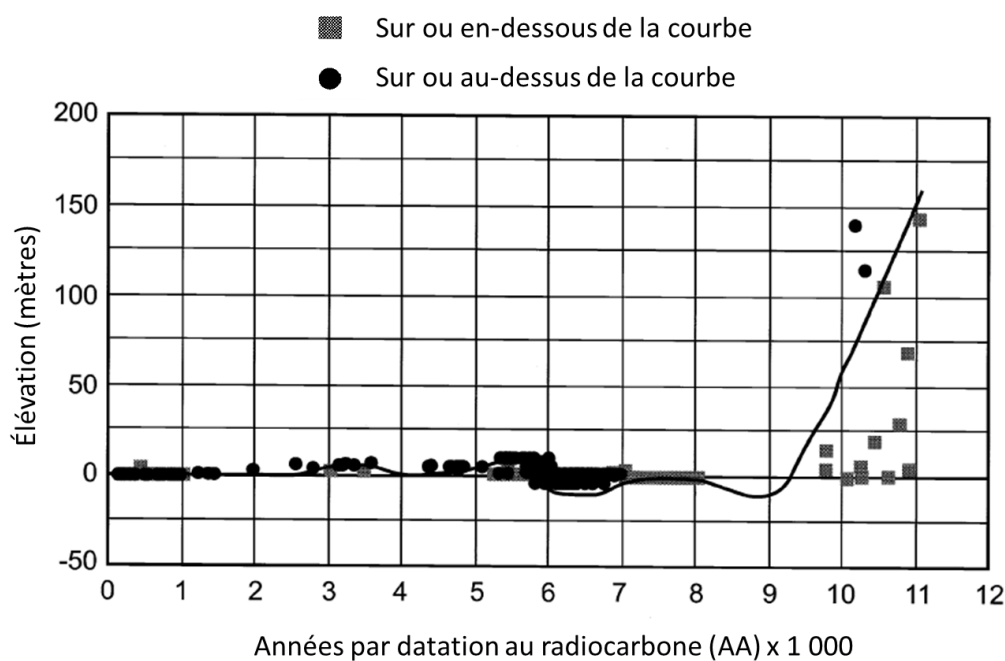


Figure 11. Niveau marin relatif du moyen estuaire du Saint-Laurent (Montmagny) indiquant la transgression marine et l'émergence postglaciaire durant l'Holocène (modifié de Dyke et Peltier, 2000).

Pour la période récente entre 1993 et 2009, la hausse du niveau marin relatif mondial, causé par le réchauffement climatique, était de $3,2 \pm 0,4$ mm/an (données satellitaires) et de $2,8 \pm 0,8$ mm/an (données marégraphiques) (Church et White, 2011; Rhein et al., 2013). Toutefois, au Québec, cette hausse du niveau marin est ralentie par le rebond isostatique. En

effet, selon Koohzare *et al.* (2008), l'île aux Coudres se situe dans une zone où le mouvement vertical de la croûte terrestre est de +1,3 à +2,0 mm/an. Néanmoins, les données récentes issues du marégraphe de Saint-Joseph-de-la-Rive indiquent un rehaussement de +3,96 mm/an entre 2000 et 2013 (comm. pers. Bernatchez, 2018). Cela peut vouloir dire que la hausse du niveau moyen des océans est plus rapide que le rebond isostatique (Bernatchez et Quintin, 2016).

2.4. Morphologie de la zone côtière

Le linéaire côtier de l'île est de 27,5 km dont la grande majorité est constituée de terrasse de plage (20,8 km ou 75,5 %). Elles sont réparties principalement au sud et au nord-est de l'île. Ensuite, les côtes à marais maritime sont représentées sur 5,2 km du littoral coudrois (19 %), surtout sur la côte ouest et nord-ouest. Quelque 600 mètres de falaises meubles et rocheuses sont présents sur la face nord de l'île (2,5%) et 800 mètres de côtes artificielles (3%) composent le secteur de la zone portuaire ainsi que la pointe artificielle de l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle.

La morphologie de la zone intertidale de l'île aux Coudres est différente entre les côtes nord et sud. Les deux secteurs possèdent une plage et une plateforme rocheuse, tandis que la vasière et le cordon de basse mer se retrouvent uniquement le long de la côte sud, la zone intertidale, plus large, pouvant atteindre jusqu'à 1 200 m de largeur (figure 12). C'est aussi uniquement sur la côte sud que l'on retrouve un herbier à spartine alterniflore à l'interface de la plateforme rocheuse et de la plage.

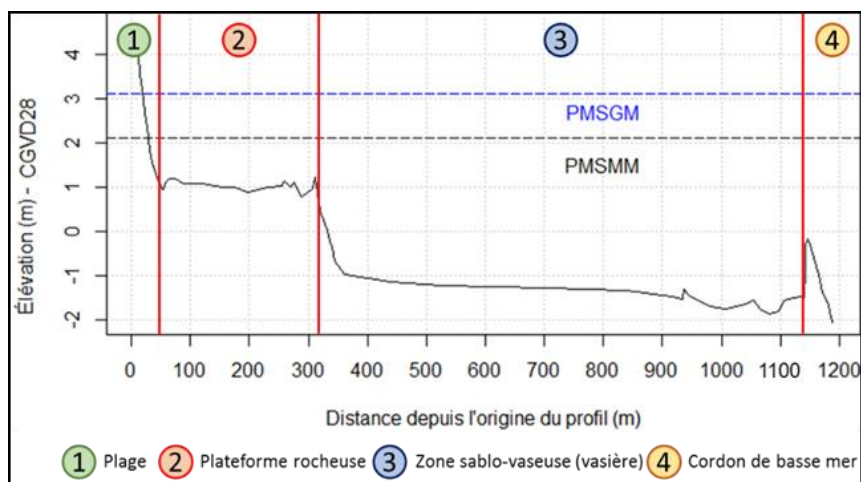


Figure 12. Profil type de la zone intertidale au sud de l'île. Exagération verticale 67x.

Au nord-est de l'île, l'estran est plus étroit qu'au sud, avec une largeur généralement comprise entre 250 et 300 m (figure 13). Le reste de la rive nord de l'île, au-delà de la pointe à Mailloux et qui n'a pas été étudié, possède des caractéristiques géomorphologiques proches. L'ensemble de ce secteur est à terrasse de plage, sauf un tronçon de 40 mètres à falaise rocheuse basse (moins de 5 mètres de hauteur) dans l'anse à Mailloux (aujourd'hui enrochée). De plus, une terrasse de plage à estran rocheux (écueils rocheux) d'environ 100 m est située sur la rive gauche de l'embouchure du ruisseau Rouge.

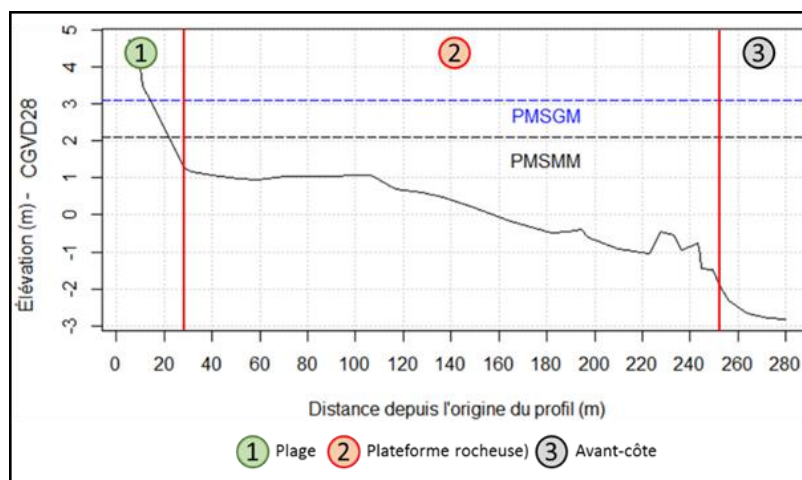


Figure 13. Profil type de la zone intertidale au nord-est de l'île. Exagération verticale 17x.

2.4.1. Plage

La plage, située sur le haut estran, est assez courte (environ 20 mètres de large) et avec des pentes variant entre 5° et 8°. Les plages au sud de l'île sont parfois composées de sable grossier (principalement de minéraux de quartz), tandis qu'à d'autres endroits les graviers schisteux généralement centimétriques, parfois décimétriques, dominent. Certaines plages sont constituées d'un mélange des deux. Au nord-est, les plages sont essentiellement composées de sédiments typiques de la plateforme rocheuse, soit de graviers de schiste.

2.4.2. Plateforme rocheuse

Brodeur et Allard (1983) ont étudié les plateformes de l'île aux Coudres afin d'établir la cause des niveaux d'aplanissement littoraux du moyen estuaire. Ils mentionnent en conclusion que « la morphologie des plateformes de l'île aux Coudres résulte vraisemblablement de la dynamique littorale actuelle ». Ils font aussi référence à des marques d'abrasion glaciaire observées par Dionne (1970; 1972) et par Allard (1981) ainsi que des dépôts glaciaires ou glaciomarins qui recouvrent la plateforme à plusieurs endroits (Lasalle, 1972). Ils précisent aussi que cette entité morphologique de l'estran possède, à marée basse, une superficie de 5,93 km² (Brodeur et Allard, 1983).

La plateforme rocheuse de type flyschique au sud constitue une portion plus importante de l'estran à marée basse que la plateforme de microgrès au nord-est. Dans le secteur sud étudié (Profil 1 à 4 et Profil 8), la moyenne de la largeur de la plateforme rocheuse est de 235 m, tandis qu'elle est de 180 m au nord-est (Profil 5 à 7). La figure 14 illustre la largeur de cette plateforme rocheuse depuis la flexure jusqu'à la fin de l'affleurement rocheux devant les secteurs étudiés.

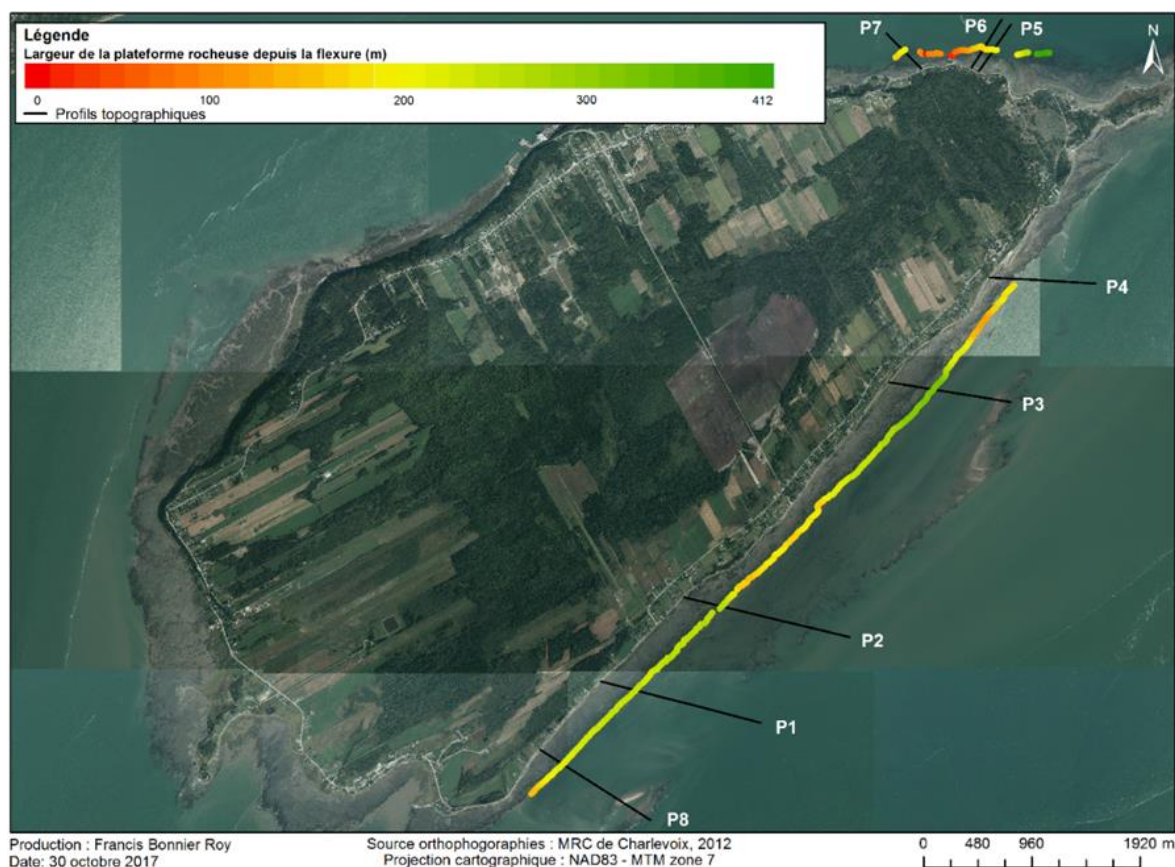


Figure 14. Largeur (m) de la plateforme rocheuse entre la flexure et la fin de l’affleurement rocheux devant le linéaire côtier étudié.

Cette caractéristique est importante, car elle joue un rôle déterminant sur la dissipation de l’énergie des vagues qui atteignent la côte. En effet, là où l’estran, et en particulier la plateforme rocheuse, est plus large, l’énergie des vagues dans la colonne d’eau est davantage atténuée par la friction avec le fond (Bonnier Roy *et al.*, 2018).

Tel que le mentionne Brodeur et Allard (1983), les plateformes littorales de l’île aux Coudres sont « en équilibre, du moins tendant à le devenir, avec les conditions hydrodynamiques actuelles ». Ainsi, quelques « témoins d’abrasion des hautes mers » subsistent sur cette zone essentiellement plane du bas estran, c’est-à-dire des affleurements rocheux érodés par l’action actuelle des vagues, des glaces et du gel-dégel laissant sur place des galets anguleux. En plus de ces galets, la plateforme rocheuse est aussi recouverte par

endroits de placages superficiels de sables, de limons et de graviers de schistes. Ces derniers sont transportés par les courants de marée, qui sont d'ailleurs de fortes vitesses sur le pourtour de l'île, les vagues et par le battement des marées, de façon préférentielle au niveau des lits de schistes argileux érodés entre les lits gréseux plus résistants (Brodeur et Allard, 1983) (figure 15).



Figure 15. Plateforme rocheuse flyschique à pendage subverticaux située au sud de l'île recouverte de sédiments fins sablo-limoneux et de graviers de schistes érodés.

Le long de la côte sud de l'île, cette plateforme se poursuit sur la partie distale du bas estran par une zone sédimentaire plane large de plusieurs centaines de mètres découverte à marée basse appelée aussi vasière ou zone sablo-vaseuse. Elle est d'ailleurs décrite comme étant « recouverte inégalement de sédiments grossiers intertidaux ou de blocs et d'un diamicton glaciaire » par Brodeur et Allard (1983). Ces derniers précisent que la zone de transition entre la plateforme rocheuse, appelée replat supérieur ou plateforme de haute mer, et la zone sédimentaire nommée plateforme de basse mer, est caractérisée par des gradins successifs ou une pente convexe.

Au nord-est, la plateforme rocheuse de type microgréseuse est surtout recouverte de petits graviers issus de l'érosion par les vagues et la météorisation (figure 16).



Figure 16. Plateforme rocheuse située au nord-est de l'île recouverte de graviers issus de l'érosion et de la météorisation de la roche.

2.4.3. Zone sablo-vaseuse

Cette section de très faible pente de la zone intertidale se situe après la rupture de pente de la plateforme rocheuse et a été surnommée plateforme de basse mer par Brodeur et Allard (1983). Sa largeur est seulement de quelques dizaines de mètres sur la côte nord-est à marée basse tandis qu'elle peut atteindre jusqu'à 800 m sur la côte sud. Elle est essentiellement composée de sédiments grossiers intertidaux (sables) et de limons, ainsi que de galets anguleux. Selon l'article de Dionne et Poitras (1996) portant sur les méga-blocs des battures de Petite-Rivière, au nord-ouest de l'île sur le continent, les blocs de grandes tailles (+ de 3 m de grand axe a) trouvés sur l'estran sont d'origine du Bouclier canadien. Ils auraient été mis en place par l'érosion des dépôts glaciaires près du rivage. Ces auteurs mentionnent aussi que le poids de ces gros blocs est trop important pour qu'ils soient déplacés par les glaces

flottantes. Sur l'île aux Coudres, quelques gros blocs sont présents, mais la majorité sont plus petits que les 3 m du grand axe, ce qui laisse croire que les glaces ont pu déplacer ces blocs erratiques à cet endroit (figure 17). Quelques dépressions de cette zone restent en partie submergées à marée basse puisque l'eau ne réussit pas à être totalement évacuée avant la nouvelle marée montante.



Figure 17. Bloc erratique situé sur la zone sablo-vaseuse de la côte sud de l'île.

Lors du flot et du jusant, les courants de marées de forte intensité forment dans la zone sablo-vaseuse des rides de courants dont la largeur est décimétrique (Brodeur et Allard, 1983) (figure 18).



Figure 18. Rides de courant dans la zone sablo-vaseuse sur le profil 1, 15 novembre 2016.

2.4.4. Cordon de basse mer

À environ 1 kilomètre de la côte, sur la partie distale de l'estran sud de l'île, à la limite du point le plus bas de la marée basse, se situe le cordon de sable et de blocs. Il est constitué de blocs de tailles diverses selon les endroits, centimétriques à décimétriques (figure 19). Le cordon de basse mer peut atteindre une hauteur de 1,5 m et une largeur pouvant aller jusqu'à 100 m. Il est présent sur presque toute la côte sud de l'île. Toutefois, l'élévation du cordon entre les profils 1 et 2 est presque nulle. Les eaux lors de la marée descendante peuvent être évacuées par cet endroit ou aux extrémités du cordon, à l'ouest ou à l'est de la côte sud.

Ce matériel est composé de sable et de blocs ignés provenant du Bouclier canadien. Puisque le socle rocheux de l'île aux Coudres est d'origine appalachienne, il est fort probable que cette forme soit issue d'un till déposé par l'inlandsis lors de la dernière glaciation ou des dépôts plus anciens, et remaniés par les vagues et les courants. Brodeur et Allard (1983) en font mention en parlant de diamicton glaciaire, c'est-à-dire, d'un mélange d'éléments de toutes grosseurs qui est déposé par la glace. Cet élément de la zone intertidale joue aussi un rôle déterminant puisqu'il agit en quelque sorte comme un brise-lame, réduisant l'énergie des vagues qui arrive à la côte.



Figure 19. Cordon de basse mer composé de sable et de blocs de diverses tailles (entre le profil 3 et 4), 19 mai 2015. Photo : Adrien Lambert.

2.5. Conditions météo-marines

2.5.1. Climat

Le climat subpolaire subhumide et continental de l'île aux Coudres est influencé par la mer, ce qui atténue les écarts de température entre le jour et la nuit (Robitaille et Saucier, 1998). Il est aussi caractérisé par une courte saison de croissance pour les végétaux. La durée de la saison sans gel totalise 120 jours (Bernier *et al.*, 2006). La température moyenne quotidienne est de 4,5 °C tandis que la température moyenne mensuelle la plus froide est de -10,6 °C en janvier et la plus chaude survient en juillet avec 18 °C. Les précipitations annuelles moyennes sont de 932,9 mm, dont 24 % sont sous la forme neigeuse (Environnement Canada, 2018, période de 1981 à 2010).

2.5.2. Marées

En amont du moyen estuaire du Saint-Laurent, vers l'île d'Orléans, l'hydrodynamique littorale est dominée par les marées (Centre Saint-Laurent, 1996). C'est également le cas sur l'Isle-aux-Coudres. Ces marées sont de type semi-diurne, soit deux hautes mers et deux basses mers par jour. Le marnage moyen est de 4,67 m, alors qu'il est de 6,95 m lors de marnage extrême (Brodeur et Allard, 1983). Le tableau 1 présente les différentes caractéristiques de la marée à l'île aux Coudres. Le niveau de pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM), à 7,1 m au-dessus du zéro marégraphique, équivaut à la limite de la ligne de rivage sur le littoral, tandis que la basse mer inférieure de grande marée (BMIGM), à 0,1 m, limite la zone intertidale (estran). Le niveau moyen de la mer (zéro géodésique) est situé à la limite entre la plateforme rocheuse et la zone sablo-vaseuse.

Tableau 1. Caractéristiques de la marée à l'île aux Coudres (Pêches et Océans Canada, cité dans Roche Itée, 2010).

Type de marée	Élévation marégraphique (m) (en fonction du niveau zéro des cartes)
Marée moyenne	4,9
Grande marée	7,0
Pleine mer supérieure de marée moyenne (PMSMM)	6,0
Pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM)	7,1
Basse mer inférieure de marée moyenne (BMIMM)	1,1
Basse mer inférieure de grande marée (BMIGM)	0,1
Extrême de pleine mer	8,0
Extrême de basse mer	-1,0
Niveau moyen de l'eau	3,6

2.5.3. Vagues

Sur l'île aux Coudres, il existe un double gradient spatial dans l'intensité des dynamiques de vagues, soit du large à la côte et d'ouest en est (Bonnier Roy *et al.*, 2018). Néanmoins, l'intensité de ces dynamiques est faible, car les moyennes des hauteurs de vagues significatives enregistrées entre 2014 et 2016 au large de la côte sud-est (limite infralittorale) sont inférieures à 0,16 m. Ainsi, le climat de vagues est généralement calme avec quelques pics d'intensité.

La figure 20 présente une spatialisation de la distribution des hauteurs de vagues significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral de la côte sud-est de l'île.

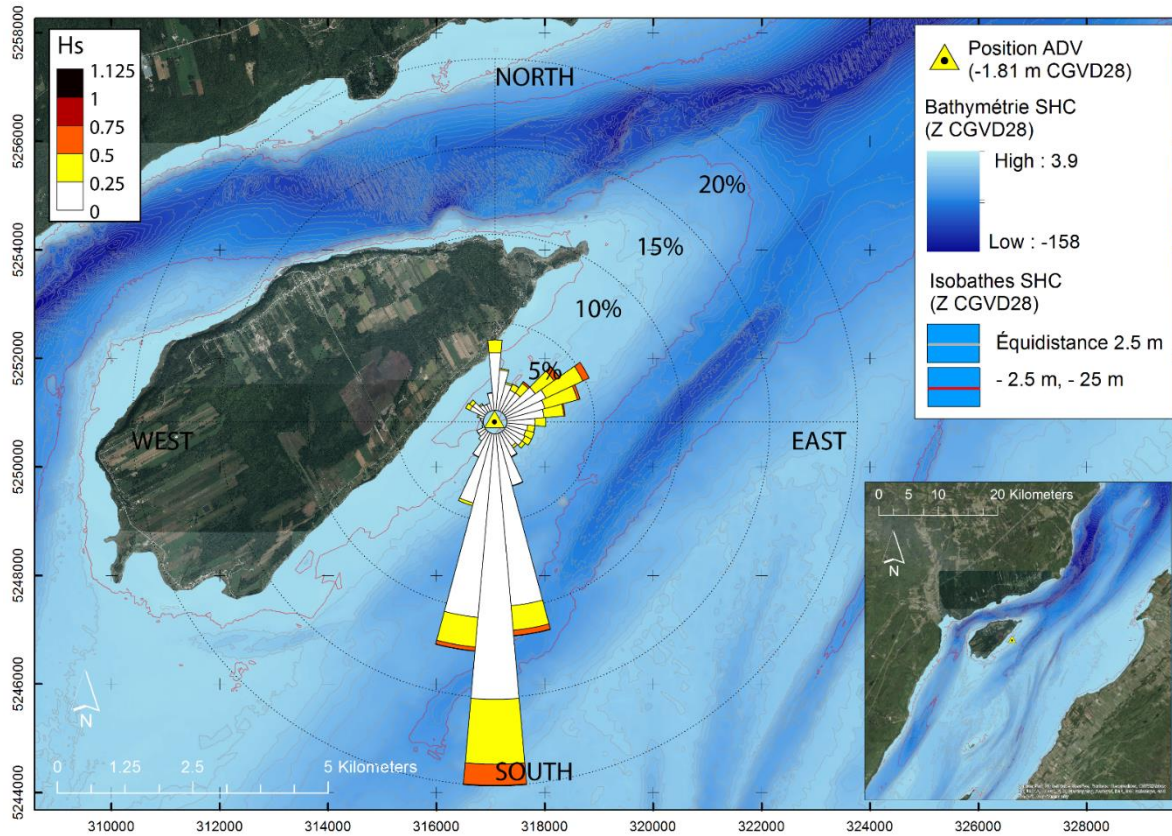


Figure 20. Distribution des hauteurs de vagues significative en fonction de la direction des vagues sur le littoral de la côte sud-est de l'île, mesurée à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015 (Bonnier Roy *et al.*, 2018).

Les résultats obtenus de l'ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*), placé au sud-est de l'île pour la période du 20/05/2015 au 15/12/2015, ont permis d'établir qu'une majorité des vagues proviennent du sud (44 % des observations) et du nord-est (19 % des observations), ce qui correspond aux deux distances de fetch les plus longues, situées globalement dans l'axe de l'estuaire. Même si les vagues provenant du nord-est sont moins fréquentes que celles du sud, elles sont néanmoins plus élevées en moyenne : 0,25 m contre 0,18 m pour le sud.

Cela va de pair avec les directions des vents principalement enregistrées à l'Isle-aux-Coudres entre 1976 et 2009 (figure 21).

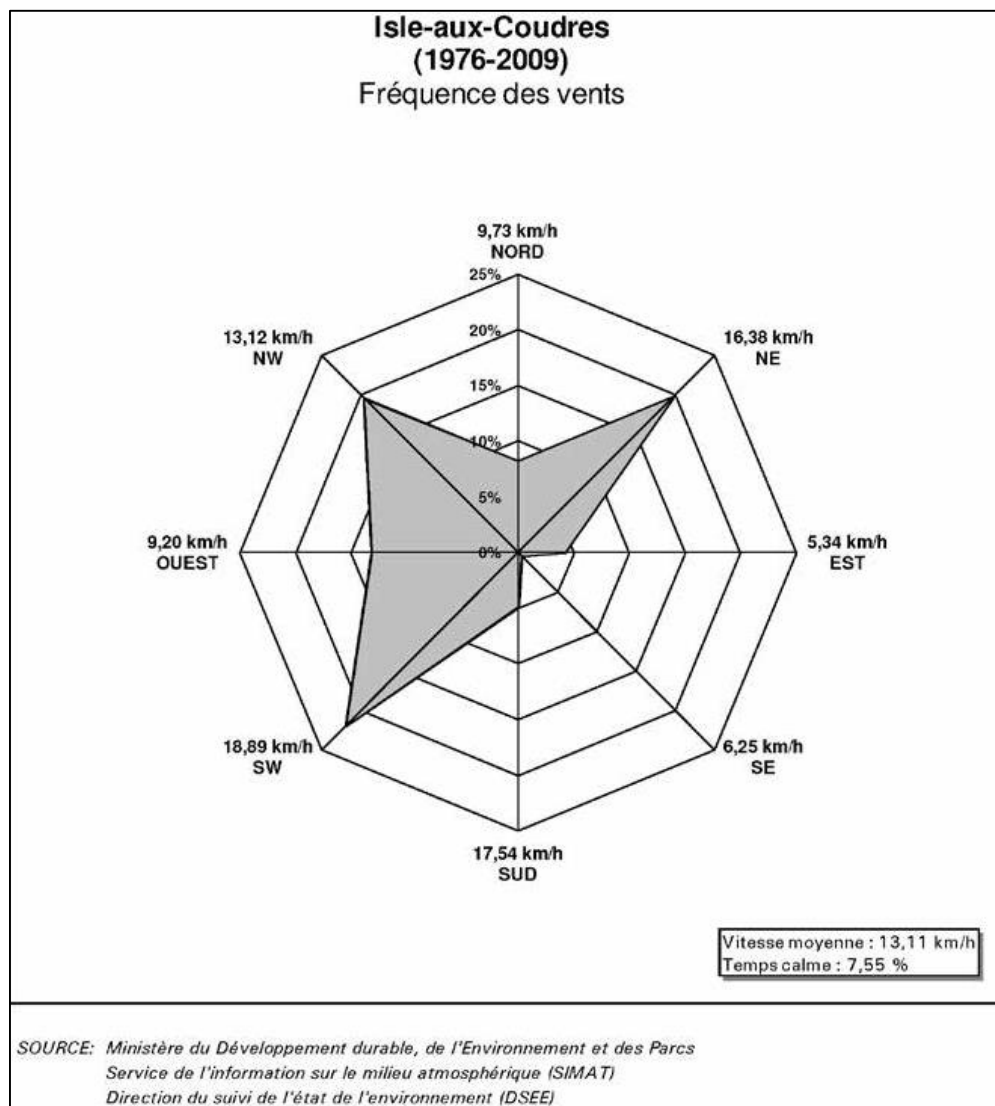


Figure 21. Rose des vents de l'Isle-aux-Coudres (Bernier *et al.*, 2006).

2.5.4. Courants

Les courants de surface autour de l'île sont régulés par le battement des marées. Ainsi, lors du jusant, la direction des courants de surface se fait d'est en ouest tandis que durant le flot, les courants de surface se font d'ouest en est (figure 22).

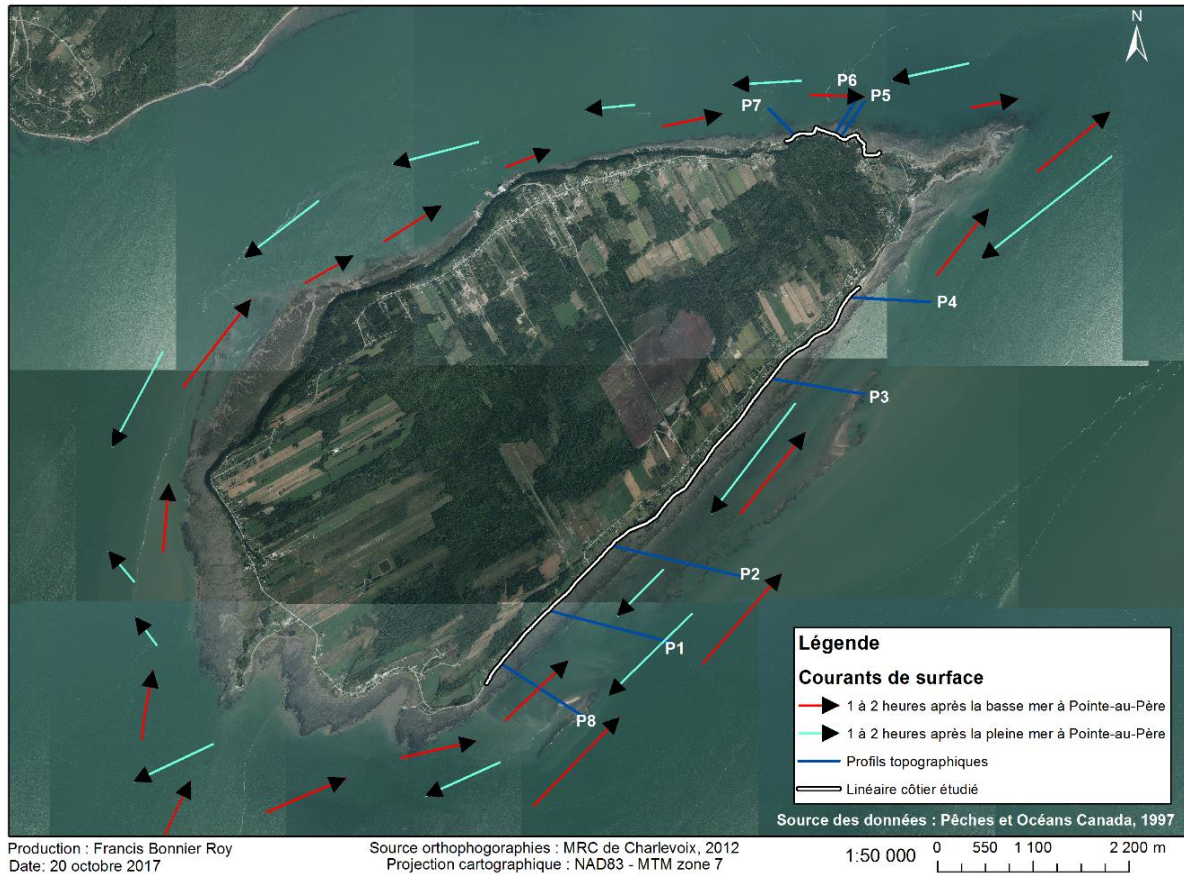


Figure 22. Carte des principales directions des courants autour de l'île aux Coudres. L'intensité du courant est ajustée au marnage de la marée au port de référence à l'aide d'un facteur de correction (Pêches et Océans Canada, 1997).

2.5.5. Glaces

Dans ce secteur, le fleuve est couvert de glaces de décembre à avril (Senneville *et al.*, 2014). Étant donné la largeur de l'estran sur la côte sud de l'île, la couverture de glace est plus importante sur cette côte de l'île. Sur la rive nord, les glaces ont plus tendance à dériver dans le chenal maritime. Selon Dionne (1973), le pied de glace de haut estran, plus stable, a généralement une épaisseur comprise entre 40 et 100 cm et une largeur de 20 à 50 m tandis que le pied de glace de bas estran (plus dynamique) possède une épaisseur entre 50 et 150 cm et une largeur pouvant atteindre plus de 1000 m en raison du large estran. Ces chiffres de la littérature scientifique sont avérés sur les côtes de l'île aux Coudres grâce aux images des caméras installées sur le site d'étude (figure 23). Au printemps, la température s'adoucit et le débit du Saint-Laurent augmente, ce qui accentue le taux de transport de ces glaces à la dérive (Roche, 2010).

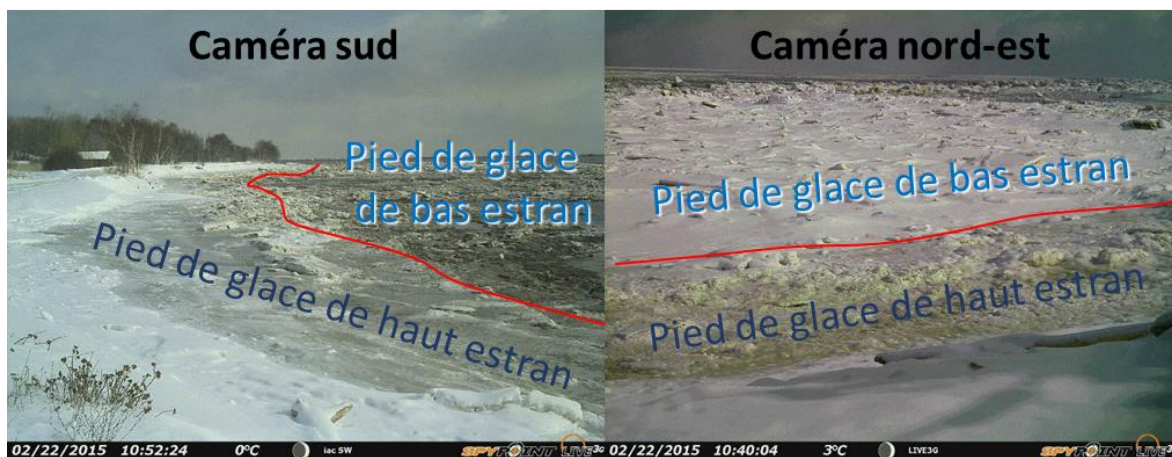


Figure 23. Images des caméras *Spypoint* et l'étendue du pied de glace sur le haut estran et le bas estran sur la côte sud et nord-est le 22 février 2015.

Dans l'estuaire moyen, dès la fin novembre ou début décembre, une couche de glace continue se forme rapidement près du rivage appelée pied de glace (Dionne, 1973). La période de formation du pied de glace sur le haut estran dure environ 15 jours à 1 mois. Durant l'hiver, les glaces servent de carapaces de protection aux berges durant les tempêtes hivernales. Lors du retour des températures supérieures à zéro au printemps (fin mars ou

début avril), les marées de vives-eaux, le vent et le débit élevé entraînent la débâcle des glaces sur les battures. Le pied de glace exerce une action morpho-sédimentologique importante sur l'estran, en particulier au printemps lors de la débâcle (Dionne, 1973). En effet, les glaces favorisent l'abrasion et l'affouillement en agissant comme des « agents de transport de matériel sédimentaire et érodent les zones intertidales et de faibles profondeurs » (Dionne, 1973, Centre Saint-Laurent, 1996).

CHAPITRE III MÉTHODOLOGIE

Cette section décrit les différentes méthodes d'acquisition de données utilisées sur le terrain et en laboratoire ainsi que les analyses effectuées pour ce projet.

3.1. Photo-interprétation et évolution historique

L'ensemble du linéaire côtier étudié est de 7 709 mètres (figure 24), soit 28,7 % du littoral de l'île (26,8 km).

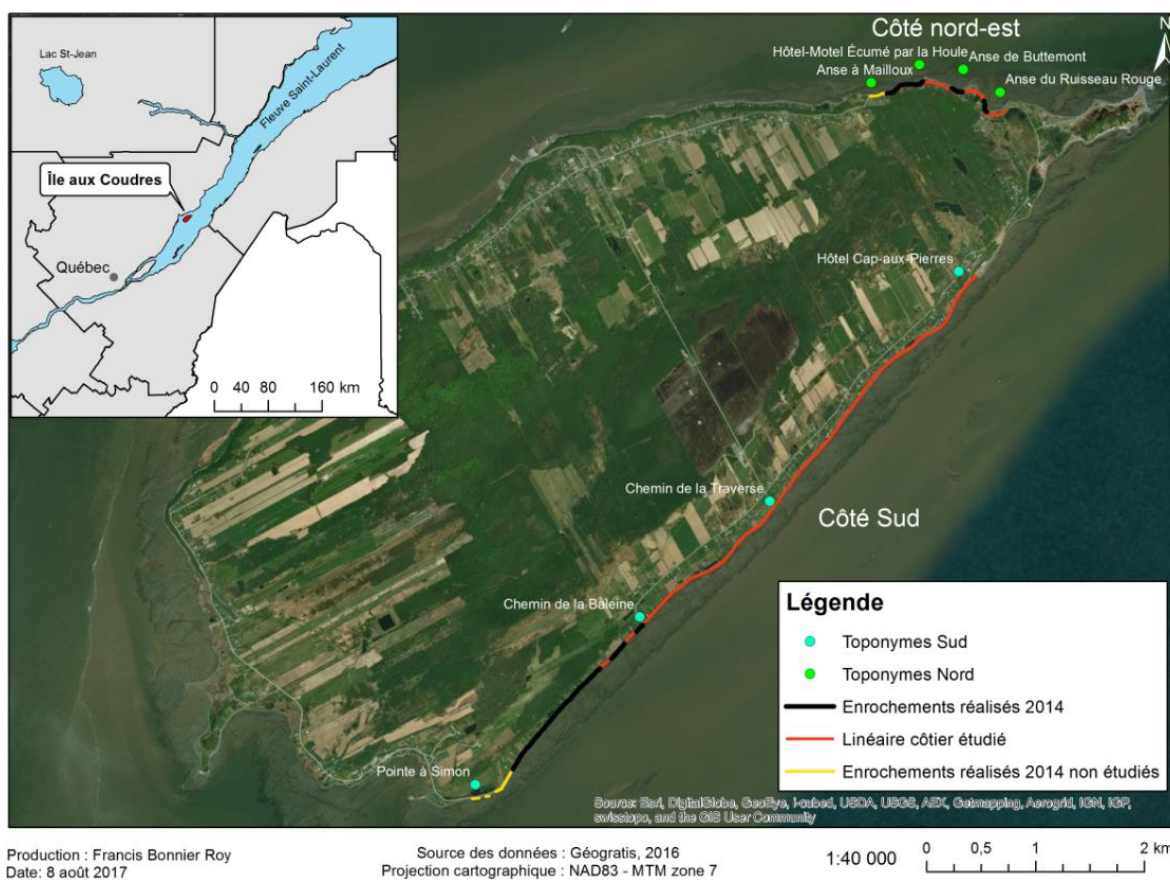


Figure 24. Emplacement de l'île aux Coudres, des travaux d'énrochements, des toponymes délimitant les secteurs et du linéaire côtier à l'étude.

Il constitue presque entièrement le tronçon sud du chemin des Coudriers de la Pointe à Simon à l'Hôtel Cap-aux-Pierres (6 442 m) ainsi qu'une petite portion de la côte nord-est allant du début du chemin de la Bourroche dans l'anse à Mailloux jusqu'à l'anse du ruisseau rouge (1 267m). Les toponymes sur la carte ont été choisis pour faciliter le repérage des résultats spatialement. Ces noms de lieux représentent des termes connus par les résidents de l'île comme des anses, des bâtiments importants ou des pointes.

3.1.1. Travail réalisé préalablement par Poly-Géo

En 2008, la firme Poly-Géo Inc. a réalisé une photo-interprétation et une caractérisation de la ligne de rivage sur l'ensemble de l'île aux Coudres (Dagneau et Lévesque, 2009). Les photographies aériennes noir et blanc qui ont été utilisées couvrent les dates suivantes : 9 juin 1964 (1 : 15 840), 16 juillet 1981 (1 : 15 000) et 20 juillet 2002 (1 : 15 000). Le traçage des éléments avait été fait directement sur les photographies aériennes à l'aide d'un crayon mine non permanent. Les critères utilisés par Poly-Géo Inc. (2009) pour tracer la ligne de rivage ont été les suivants :

- La limite supérieure des falaises (hauteur >1,5 m) et des microfalaises (hauteur <1,5 m) ;
- La limite de la végétation permanente dans les secteurs en accumulation ;
- La limite de la végétation dans les zones rocheuses ;
- La limite supérieure des ouvrages de protection, des quais et des remblais le long des routes, dans les secteurs artificialisés.

Les photographies aériennes ont été orthorectifiées à l'aide du logiciel DVP-Orthomosaic, des modèles numériques de terrain disponibles sur le site GÉOBASE (gouvernement du Canada), de cartes topographiques vectorielles à l'échelle de 1 : 20 000 (BDTQ) et de données vectorielles routières du ministère des Transports du Québec (MTQ). Ensuite, les photographies aériennes orthorectifiées ont été importées dans le logiciel MapInfo. Pour chacune des dates, la numérisation des lignes de rivage a été faite, puis le type et l'état de la côte ont été enregistrés dans la table d'attributs des fichiers vectoriels.

3.1.2. Orthophotographies de 2012

La série de photographies aériennes orthorectifiées de 2012 utilisée dans l'analyse historique a été produite par la firme Cliché photographique en date du 10 juillet 2012. Elle a une résolution au sol de 30 cm et une échelle de 1 : 18 000.

Le traçage de la ligne de rivage a été réalisé manuellement à l'aide du logiciel *ArcGIS 10.1* à une échelle de 1 : 400 suivant les mêmes critères que la firme Poly-Géo Inc. L'état de la côte (naturel ou artificialisé) a été noté dans la table d'attributs ainsi que le type d'ouvrage associé le cas échéant.

3.1.2.1. Sources d'erreurs et marge d'erreur

La marge d'erreur peut être associée à 3 éléments :

- a) erreur reliée à la résolution des images ;
- b) erreur de géoréférencement ;
- c) erreur d'interprétation lors du traçage.

D'après l'information disponible dans les métadonnées des photographies aériennes de Poly-Géo Inc. (1964, 1981 et 2002), la marge d'erreur est de 0 à 4 m en planimétrie (a + b). Il faut ajouter la marge d'erreur résultant de la largeur du trait de crayon (0,1 à 0,2 mm sur les photos), donc 1,5 à 3 m sur le terrain pour des photos au 1 : 15 000 (c). Donc la marge d'erreur maximale est évaluée entre 1,5 et 7 m pour les photographies aériennes obtenues de Poly-Géo Inc. Pour la photographie aérienne de 2012, la marge d'erreur associée généralement est de 0,2 m (a) + 1 m (b) + 0 à 0,5 m (c) ce qui donne 1,2 à 1,7 m (LDGIZC).

Étant donné la qualité de la résolution (1 m) des images numérisées à 600 dpi (1964, 1981 et 2002), le géoréférencement a été fait le plus précis possible en prenant comme points de référence les mêmes éléments fixes du paysage présents sur les photos entre 1964 et 2012.

3.1.3. Identification de la ligne de rivage

À l'aide de photographies aériennes existantes (1964, 1981, 2002 et 2012), un portrait de la dynamique naturelle du littoral a été fait grâce à un système d'information géographique (ArcGIS 10.1). Une fois géoréférencées, les photographies ont permis le traçage de la ligne de rivage, définie par la méthodologie du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières. La numérisation de la ligne de rivage est réalisée à la limite de la végétation d'herbacée dense sur les côtes basses sans falaise (ex : terrasse de plage), sur le sommet de la falaise pour les côtes basses possédant un abrupt supérieur à 5 m et à la limite supérieure des ouvrages de protection sur les secteurs artificialisés (Bernatchez et Drejza, 2015) (figure 25).

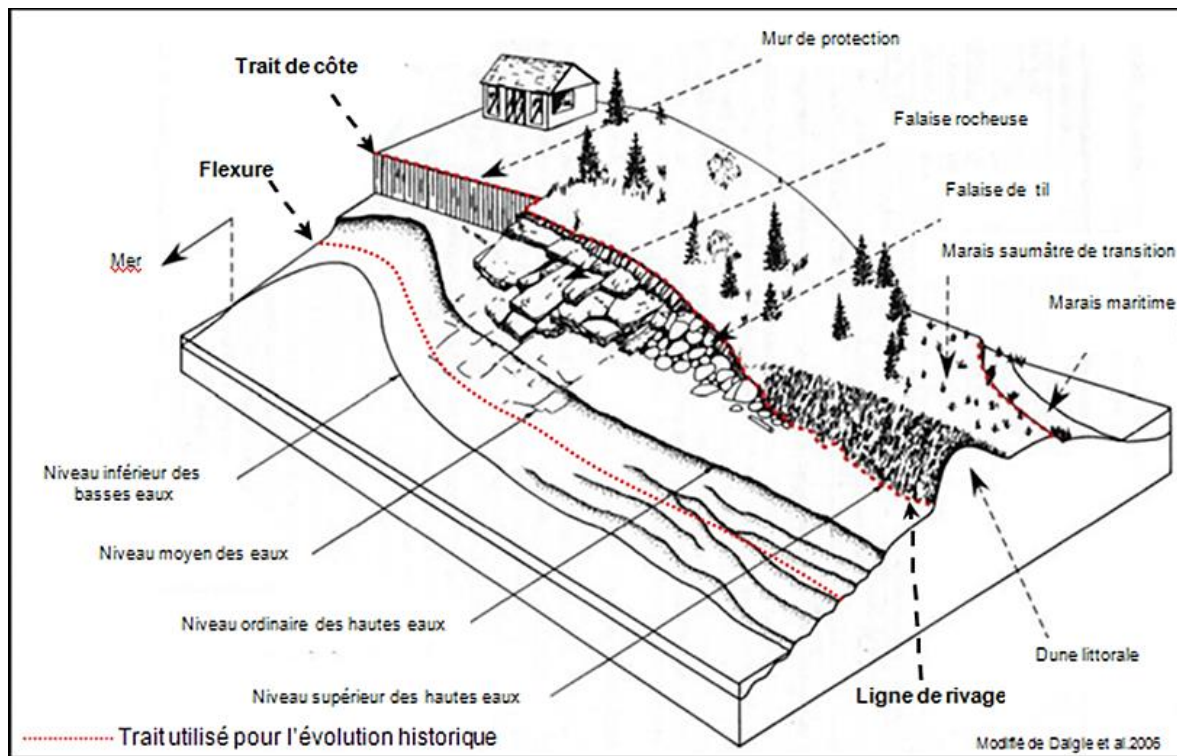


Figure 25. Ligne de rivage utilisée pour tracer l'évolution historique du littoral. (Bernatchez et Drejza, 2015 d'après Daigle *et al.*, 2006)

Lors de la numérisation, une segmentation du linéaire côtier est faite pour identifier les secteurs naturels et artificialisés. Cette reconstitution de l'évolution historique de la côte permet de comprendre le fonctionnement du système côtier à moyen et long termes et d'avoir une meilleure compréhension des éléments qui seront suivis à court terme. D'ailleurs, l'évolution de la largeur de plage est un élément important afin d'évaluer la variation du bilan sédimentaire dans la cellule hydrosédimentaire. Cette approche permettra de mieux identifier les causes des changements mesurés et s'ils sont véritablement associés à l'implantation des ouvrages ou bien à d'autres phénomènes naturels (Lambert et Bernatchez, 2014). Cette méthodologie sert aussi à estimer les variations en volume de plage et à déterminer les sources qui peuvent alimenter la plage en prenant en compte la direction du transport sédimentaire.

3.1.4. Traitement et analyses DSAS

Les traitements ont été réalisés entièrement à l'aide du logiciel *ArcGIS 10.1*. Pour chaque ligne de rivage, la ligne vectorielle a été segmentée en fonction de l'état de la côte. Ceci a permis de calculer la longueur des segments par catégorie (naturel et artificialisé) et faire une évolution historique de l'état de la côte entre 1964 et 2012.

Ensuite, l'ensemble des lignes de rivage numérisées a été analysé à l'aide de l'extension DSAS 4.3 (*Digital Shoreline Analysis System*) de l'USGS (*United States Geological Survey*). Cet outil a besoin d'une ligne de base de référence derrière l'ensemble des lignes de rivage pour générer des lignes perpendiculaires appelées « transects » à intervalle de distance fixe déterminé par l'utilisateur, soit 5 m dans le cas de cette étude (figure 26). Une fois ces éléments rassemblés, le logiciel calcule un taux de migration (m/an) selon la distance entre la date la plus ancienne et la plus récente, divisée par le nombre d'années entre ces deux dates. L'incertitude liée à la marge d'erreur est jointe aux résultats et rappelée dans l'interprétation de ceux-ci.

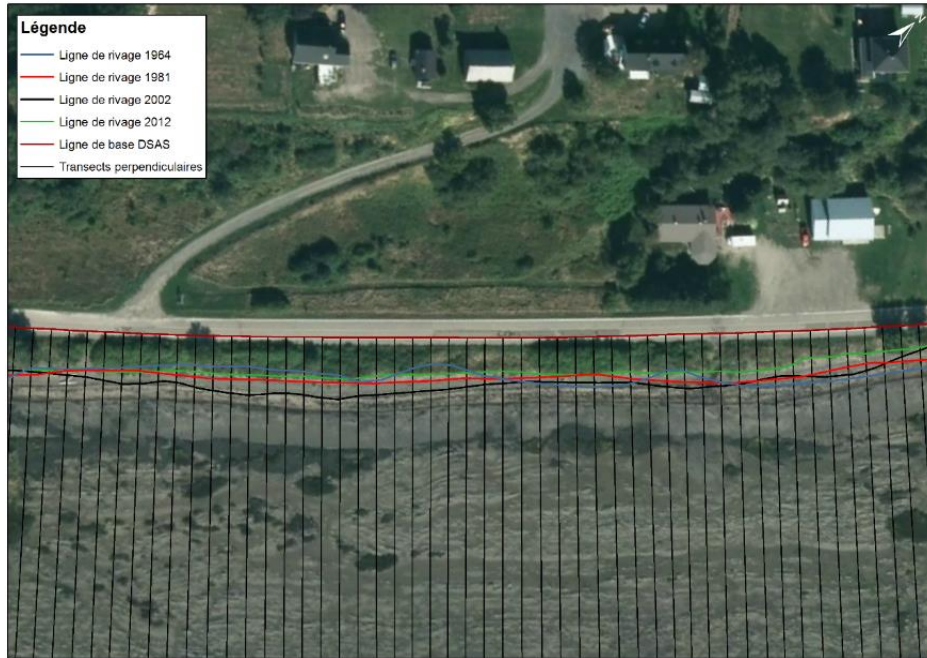


Figure 26. Exemple de l'utilisation de l'outil DSAS sur ArcGIS 10.1.

3.2. Segmentation côtière

La méthode de caractérisation côtière permet de déterminer des segments homogènes selon plusieurs composantes, le tout étant intégré dans un système d'information géographique (SIG). La caractérisation sur le terrain a été faite chaque année du suivi lors du mois d'août (2014, 2015 et 2016). Elle sert à dresser un état des lieux des différentes composantes de la côte, en plus d'être une méthode indispensable afin d'évaluer les effets potentiels des ouvrages de protection sur la morphosédimentologie de la plage et les herbiers à spartine alterniflore.

La méthode consiste à positionner des points le long du littoral en début et en fin de segment homogène à l'aide d'un GPS différentiel (D-GPS) d'une précision verticale théorique est de 0,01 m et de 0,005 m en planimétrie en mode statique (Van-Wierst, 2012). Par exemple, le premier point levé au D-GPS qui débute le premier segment sera nommé « seg_01 » tandis que celui qui ferme le segment sera nommé « seg_02 ». Ainsi, le segment 01-02 est créé. Les composantes et leurs variables (tableau 2) permettent de caractériser la

côte pour chaque segment homogène. Lorsqu'une de ces variables change de manière significative sur plus de 5 m de linéaire côtier, le segment en cours est terminé et un nouveau segment est créé.

Tableau 2. Composantes de la ligne de rivage et leurs variables utilisées pour la segmentation et caractérisation côtière (Source : Drejza *et al.*, 2014).

Composantes	Variables	
Type de côte	Terrasse de plage	
État de la côte	Active	Moins de 25 % de végétation. Processus d'érosion actifs. La falaise est vive.
	Semi-active	25 à 75 % de végétation, processus d'érosion actifs.
	Stable	Pas de processus d'érosion actifs. Végétalisée à plus de 75 %. Inclus les ouvrages en bon état.
Artificialisation	Enrochement, mur de béton, gabion, épi, etc.	
État de l'artificialisation	Bon état	> 75 %. Pas de signes apparents d'altération de l'infrastructure.
	Partiellement endommagé	50 à 75 %. L'infrastructure est ponctuellement altérée (affaissement).
	Très endommagée	25 à 50 %. L'infrastructure est altérée sur 50 à 75 % de sa surface et ne protège plus la côte.
	Complètement endommagée	Moins de 25 %. La structure est complètement affaissée. Ne protège plus la côte.
Haut de plage	Présence ou absence	
Microfalaise	Hauteur (centimètre)	
Remarques	Autres remarques pertinentes observées	

Il est important de préciser que les tronçons de berges avec ouvrage de protection en bon état sont définis comme stables, car ces derniers maintiennent une stabilité de la côte. Les secteurs semi-actifs sont ceux qui présentent des traces d'érosion, avec une microfalaie évidente par exemple, mais qui sont végétalisés, montrant ainsi un certain ralentissement, voire un arrêt, du recul de la ligne de rivage. Les secteurs actifs présentent une microfalaie en érosion visible et aucune végétation n'est présente sur le haut de plage.

Dans le cas des microfalaies et falaises, les dimensions présentées au tableau 3 servent de balises pour la caractérisation. Les microfalaies ont été divisées en cinq catégories, soit l'absence de microfalaie sur une berge naturelle, l'absence de microfalaie sur une berge artificielle, les microfalaies dont la hauteur se situe entre 20 et 50 cm, les microfalaies dont la hauteur se situe entre 50 à 100 cm et les microfalaies dont la hauteur est entre 100 à 150 cm.

Tableau 3. Nomenclature des microfalaies.

Absence (0 à 20 cm)	Absence (0 à 20 cm)	Petite	Moyenne	Grande
Côte naturelle	Côte artificielle	20 à 50 cm	50 à 100 cm	100 à 150 cm

Les points D-GPS sont ensuite intégrés dans *ArcGIS 10.1*. Afin de représenter les segments sous forme de longueur (m). La ligne de rivage tracée par photo-interprétation sur les photographies aériennes de 2012 a été utilisée. Celle-ci a été divisée en segments grâce à l'outil *Split line at point*. Chaque segment est numéroté dans l'ordre. Les données recueillies sur le terrain sont ensuite importées dans la table d'attributs de la ligne de rivage. La segmentation de la côte nord-est commence avec le premier segment 01-02 à l'anse à Mailloux et se termine dans l'anse du ruisseau rouge avec le segment 19-20 (figure 27). La segmentation continue sur la côte sud avec le segment 21-22 près de la pointe à Simon et se termine avec le segment 85-86 à proximité de l'Hôtel Cap-aux-Pierres.

La figure 27 permet de visualiser la segmentation avec la composante microfalaie sur l'ensemble de la côte caractérisée lors de la première campagne terrain en août 2014. Cette carte représente l'état de référence avant les travaux d'énrochement à l'automne 2014.



Figure 27. Segmentation côtière en août 2014 représentée par les catégories de microfalaïse.

3.3. Profils topographiques

Les profils ont été déterminés afin d'avoir des sites artificialisés et témoins naturels. Les profils 1, 5, 7 et 8 étaient naturels lors de l'état de référence et ont été enrochés lors des travaux à l'automne 2014 (figure 28). Les profils 2, 3 et 6 sont les sites témoins en avant d'une côte naturelle (sans artificialité). La côte en arrière du profil 4 était déjà artificialisée par un enrochement lors du début du projet, tandis que celle en bordure des profils 1, 7 et 8 l'a été à l'automne 2014.

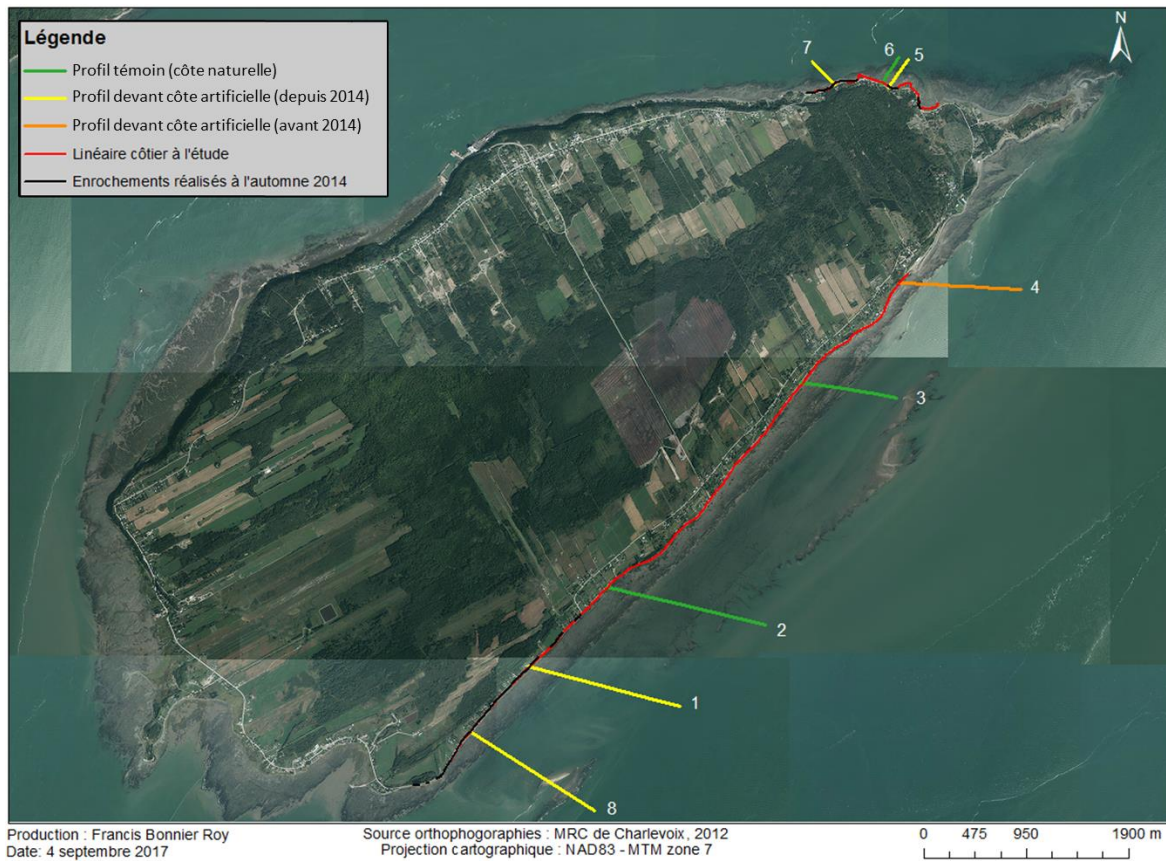


Figure 28. Profils topographiques suivis.

L'orientation des profils a été choisie en fonction de l'angle d'incidence des vagues à la côte. Les profils 1 à 6 servent à la fois pour les suivis topographiques et hydrodynamiques (avec des capteurs à pression). Les profils 7 et 8 sont seulement suivis pour la topographie,

car ils ont été ajoutés afin d'augmenter le suivi des caractéristiques morphosédimentaires de ces secteurs nouvellement enrochés. Il existe aussi deux profils 4, un topographique et l'autre hydrodynamique. Le profil 4 hydrodynamique (non cartographié sur la figure 28) a été localisé 100 m plus à l'ouest des épis de la descente de bateaux Dufour pour éviter une perturbation des données de vagues par l'ouvrage perpendiculaire à la côte.

L'utilisation du D-GPS est nécessaire pour les profils topographiques. Les premiers points topographiques sont pris sur la terrasse de plage ou au sommet de l'enrochement (tous les mètres), puis des points rapprochés (moins d'un mètre) sont levés pour bien prendre en compte les ruptures topographiques (ex. la microfalaise lorsqu'elle est présente). Ensuite, le haut de plage et le haut estran comprennent des points à tous les 1 à 2 m. Un point est pris sur la flexure puis les points sur le bas estran (plateforme rocheuse) sont pris aux 15 m. Les levés du bas estran sablo-vaseux se font aux 50 à 150 m puisque cette section est très homogène topographiquement. Sur les profils de la côte sud, des points topographiques ont été réalisés sur le cordon de basse mer où cela était possible.

Les points ont ensuite été alignés parfaitement sur chaque profil et interpolés grâce au logiciel GME (*Geospatial Modelling Environment*) afin d'avoir des mesures aux 10 cm. La représentation graphique a été réalisée sur le logiciel R et les délimitations de l'estran ont été ajoutées.

3.4. Modèle numérique de terrain

Les modèles numériques de terrain sont pertinents, car ils permettent de numériser la ligne de rivage et la flexure sur l'ensemble de la côte étudiée entre 2014 et 2016. Ainsi, en connaissant ces limites, il est possible de calculer le bilan sédimentaire de la plage et d'interpréter les changements entre les saisons sur plusieurs années.

3.4.1. Levés terrain

Les données ont été acquises depuis le haut estran par le système mobile de LiDAR terrestre du LDGIZC de l'UQAR (Van Wiersts et Bernatchez, 2016). Ce sont 300 000 points

qui sont captés par ce système chaque seconde avec un angle de balayage de 360°. Il est doté d'antennes GPS permettant le positionnement géographique de l'appareil en mode différentiel. Les données sont corrigées à partir d'une plateforme inertielle. L'étendue de la zone captée s'étend de l'arrière-plage ou du sommet de la structure jusqu'à environ 100 m vers le large (figure 29).



Figure 29. Exemple de modèle tridimensionnel LiDAR avant post-traitement réalisé sur le littoral de l'île aux Coudres (Chemin de la Bourroche) durant la campagne du 12 au 16 mai 2014. Source : Lambert et Bernatchez, 2014.

Ces données ont été relevées une fois par saison, sauf l'hiver, afin d'observer les variations saisonnières morphologiques de la plage. Les dates des levés sont les suivantes :

- 15 mai 2014
- 27 août 2014
- 7 novembre 2014
- 21 mai 2015
- 1^{er} septembre 2015
- 10 mai 2016

3.4.2. Traitement des données

La validation de ces données est effectuée à partir de points de contrôle pris à l'aide d'un D-GPS RTK R8 de Trimble sur des structures, ou cibles, permettant aussi la calibration des données LiDAR lors du post-traitement. Cette technique permet d'avoir une précision en x, y, z d'environ 5 cm (Lambert et Bernatchez, 2014). Les données sont ensuite filtrées grâce à l'extension *LP360* sur *ArcGIS 10.1* pour n'obtenir que les points au sol et supprimer les points indésirables relatifs notamment à la végétation ou à d'autres interférences. Puis, les données sont converties en données surfaciques (modèles numériques de terrain) avec un maillage à résolution spatiale de 10 cm.

3.4.3. Traçage des limites de la plage

La ligne de rivage et la flexure ont été tracées manuellement à l'aide d'indices visuels sur le logiciel *Trident* permettant une visualisation en 3D des points levés. En ayant ces deux limites pour chaque levé, il est possible d'avoir l'étendue maximale de la zone sédimentaire que constitue la plage (haut estran). Le traçage de la ligne de rivage et de la flexure s'est fait à une échelle comprise entre 0,5 m et 1 m. Étant donné la grande qualité et précision des levés, l'incertitude liée au positionnement des limites lors de la numérisation n'est pas considérée. Les limites étaient facilement identifiables dans le logiciel et il est jugé qu'elles étaient numérisées au bon endroit avec une précision centimétrique. En effet, les lignes sont constituées de points (vertex) dont la distance entre chacun était en moyenne de 10 cm.

Étant donné la variabilité de la ligne de rivage et de la flexure, deux ordres de décision ont été établis pour tracer ces deux limites.

Ordre de décision pour le traçage de la ligne de rivage :

1. Bas du talus d'érosion ou pied de l'ouvrage de protection;
2. Si les marqueurs en 1 ne sont pas repérables, la limite de la végétation dense annuelle est utilisée;

3. Dans une côte basse rocheuse où la plage est absente ou présente un volume presque nul, il n'y a pas de traçage de ligne de rivage.

Ordre de décision pour le traçage de la flexure :

1. Bris de pente (limite entre haut estran et bas estran) et le changement granulométrique;
2. Les affleurements rocheux qui apparaissent sur la plage ne constituent pas un facteur de décision pour le traçage de cette limite à moins que derrière eux (c'est-à-dire vers le bas de la plage) il n'y ait pas de sédiment de plage. Dans ce cas, la flexure est tracée de façon à exclure l'affleurement rocheux de la plage;
3. Si un herbier à spartine alterniflore est rencontré, la ligne est tracée à sa limite supérieure de manière à l'exclure;
4. Sur une côte basse rocheuse où la plage est absente ou présente un volume presque nul, il n'y a pas de traçage de flexure.

Les limites retenues pour effectuer les calculs de volumes de plage sont la ligne de rivage du 7 novembre 2014 et la ligne de flexure respective des levés. Cette ligne de rivage a été choisie, car elle correspond à la date du levé suivant la fin des travaux et permet de calculer les volumes de plage à partir de la même limite supérieure de la plage. La notion de volume de plage fait référence au contenu à l'intérieur des deux limites, soit les sédiments qui constituent la plage, mais aussi la roche en place sous ces derniers.

Il est à noter que pour calculer l'empiètement des ouvrages sur la plage, les lignes de rivage du 27 août 2014 et du 7 novembre 2014 ont été sélectionnées.

Pour chaque levé, ces deux limites (ligne de rivage et ligne de flexure) sont combinées avec l'outil *Merge* dans le logiciel ArcGIS 10.1. Puis, une segmentation est faite aux 5 m sur la ligne de rivage, ce qui permet de couper les polygones pour que chacun reste au même endroit sur l'ensemble de l'étude (figure 30). Seul l'emplacement de la ligne de flexure fait varier la superficie totale du polygone, selon les levés (voir l'exemple ci-dessous avec les lignes de flexure bleue et rouge).

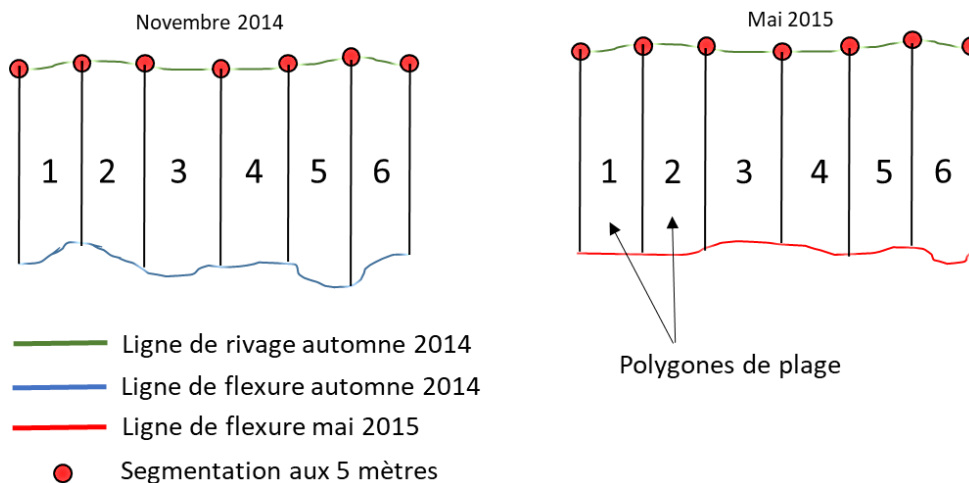


Figure 30. Croquis de la méthode de segmentation des polygones des MNE. Exemple en utilisant deux dates de levé terrain novembre 2014 et mai 2015.

Ces polygones de plage sont ainsi divisés pour favoriser le calcul de volume de plage par section de côte en fonction de l'état de celle-ci (naturel ou artificiel). Pour chaque levé terrain, la valeur minimale de la matrice dans chaque polygone est extraite et lui est associée dans la table d'attributs sur *ArcGIS 10.1*. La valeur minimale est la valeur d'élévation la plus basse, soit celle à la limite inférieure de la plage qu'est la flexure.

Puis, le volume des prismes de cellule de 10 cm x 10 cm du raster d'altitude à l'intérieur de chaque polygone de 5 m de linéaire côtier est calculé. Pour ce faire, l'altitude minimale de la ligne de flexure a servi de valeur de base pour chaque cellule. La valeur maximale pour chaque cellule représente l'altitude du raster d'élévation. La figure 31 montre de manière simplifiée comment est calculé le volume de plage.

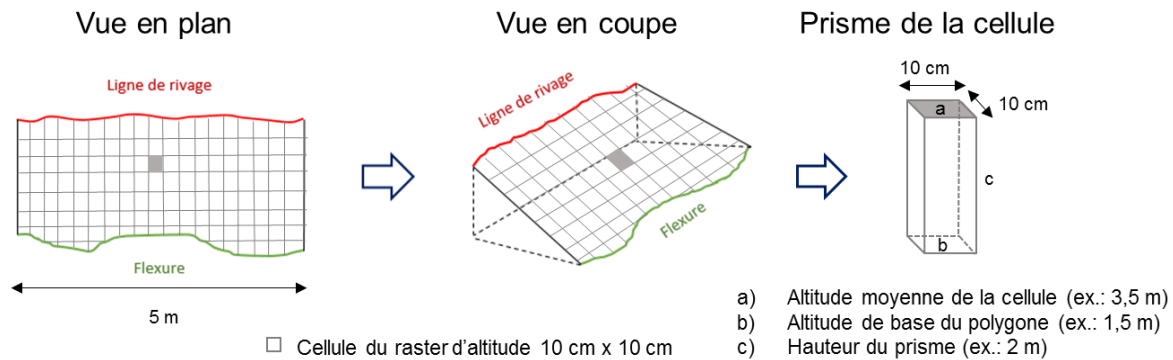


Figure 31. Croquis représentant la démarche du calcul du volume de plage pour chaque polygone.

Par exemple, si l'altitude la plus basse du polygone est de 1,5 m et que l'altitude moyenne de la cellule est de 3,5 m, la hauteur du prisme est de 2 m. Donc, en considérant les côtés de la base à 10 cm, le volume de ce prisme est de $0,02 \text{ m}^3$. Tous les volumes des prismes à l'intérieur du polygone de 5 m linéaires côtiers sont calculés et additionnés pour faire le volume total du polygone.

Les volumes de plage sont représentés sur 6 secteurs, 3 au sud et 3 au nord-est. Au sud, le secteur 1 se situe entre la pointe à Simon et le chemin de la Baleine (polygones 1 à 386). Le secteur 2 est entre le chemin de la Baleine et le chemin de la Traverse (polygones 387 à 504). Le secteur 3 est entre le chemin de la Traverse et l'Hôtel Cap-aux-Pierres (polygones 505 à 1 242). Sur la côte nord-est, le secteur 4 est situé dans l'anse à Mailloux et se termine à l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle (polygones 1 à 60). Le secteur 5 est situé entre l'Hôtel-Motel et la pointe de l'anse à Buttemont (polygones 61 à 141). Le secteur 6 est situé dans l'anse du Ruisseau rouge (polygones 142 à 198).

3.4.4. Données manquantes et source d'erreur

Sur l'ensemble du linéaire côtier à l'étude au nord-est, certaines zones n'avaient pas ou très peu de sédiments meubles constituant une plage. C'est pourquoi à quelques endroits, notamment aux secteurs 4 et 6, il y a des zones sans plage où les calculs de volumes n'ont

pas été réalisés. Au sud, la même chose se produit vers le centre du secteur 2, là où les affleurements rocheux remontent sur la plage et où aucun sédiment de plage n'est présent.

De plus, les levés de mai 2014 et août 2014 sont raccourcis au début du secteur 1, au sud, de 75 m et 45 m respectivement, dû à l'incapacité du véhicule d'instrumentation de s'y rendre lors de ces deux levés et à des problèmes techniques lors de l'acquisition des points LiDAR.

Une surestimation du volume peut aussi être attribuée à la présence de matière organique sur le haut estran lors des levés, principalement ceux en mai. Néanmoins, ce ne sont que quelques portions de plage qui présentaient ces dépôts de végétaux. Le volume associé est estimé entre 7 m^3 et 11 m^3 par polygone, soit $0,10$ à $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^2$ (épaisseur du dépôt organique de 30 cm).

Selon Van-Wierts (2012), l'erreur moyenne de l'altitude varie entre $0,09$ et $0,1$ m pour les secteurs de plage. Les polygones de plage ayant une superficie moyenne de 70 m^2 , la marge d'erreur en volume se situe entre $6,3 \text{ m}^3$ et 7 m^3 ou $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

3.4.5. Représentation des résultats

Le volume de plage a été calculé en normalisant le volume (m^3) du polygone par sa superficie (m^2). Cela permet d'éviter de sous-estimer les volumes de plage des secteurs avec enrochements, car ceux-ci empiètent généralement sur la partie supérieure de la plage et réduisent la portion de plage à traiter. Ceci étant dit, leur superficie est donc moins grande, donc proportionnellement leur volume est moins grand. En normalisant le volume par rapport à la superficie, ce volume (m^3/m^2) permet de mieux comparer les polygones de plage entre eux et de réduire l'erreur d'interprétation. Les résultats spécifiques à l'empiètement des ouvrages sur la plage sont présentés à la section 4.3 Bilan récent de la ligne de rivage (2014 à 2016).

L'ensemble des valeurs de volume (m^3/m^2) des 3 années de suivi obtenues ont été séparées en 5 classes de façon à homogénéiser la cartographie sur l'ensemble des secteurs à

l'étude. Afin de parvenir à cette classification, il a fallu utiliser l'ensemble des volumes (m^3/m^2) de tous les levés pour produire les mesures statistiques au tableau 4.

Tableau 4. Mesures statistiques sur l'ensemble des secteurs et pour tous les levés en m^3/m^2 (mai 2014 à mai 2016). n = 1440.

Moyenne	0,98
Min	0,26
Max	1,69
Écart-type	0,28
Demi écart-type	0,14
Coefficient d'asymétrie	-0,07

Puis, c'est avec ces mesures statistiques que limites des classes de volumes (m^3/m^2) ont été calculées selon la méthode standardisée (tableau 5).

Tableau 5. Limites des classes des volumes (m^3/m^2) de plage (mai 2014 à mai 2016).

Moyenne - demi écart-type	0,84
Moyenne + demi écart-type	1,12
Moyenne - demi écart-type - écart-type	0,55
Moyenne + demi écart-type + écart-type	1,41

Le tableau 6 présente les classes de volumes de plage telles qu'elles seront affichées dans toute la cartographie des volumes de plage.

Tableau 6. Classes des volumes de plage (m^3/m^2) (mai 2014 à mai 2016).

Très faible	0,26 à 0,55
Faible	0,55 à 0,84
Moyen	0,84 à 1,12
Élevé	1,12 à 1,41
Très élevé	1,41 à 1,69

3.5. Granulométrie

Les échantillons sédimentaires ont été récoltés pendant huit saisons (de l'été 2014 à l'automne 2016, excluant les hivers) sur l'ensemble des huit profils topographiques à l'étude (figure 32). D'autres échantillons ont aussi été recueillis sur les pointes est (Bout d'en Bas) et ouest ainsi que sur le cordon de basse mer au sud de l'île pour répondre à l'objectif visant à définir les sources sédimentaires de la plage.

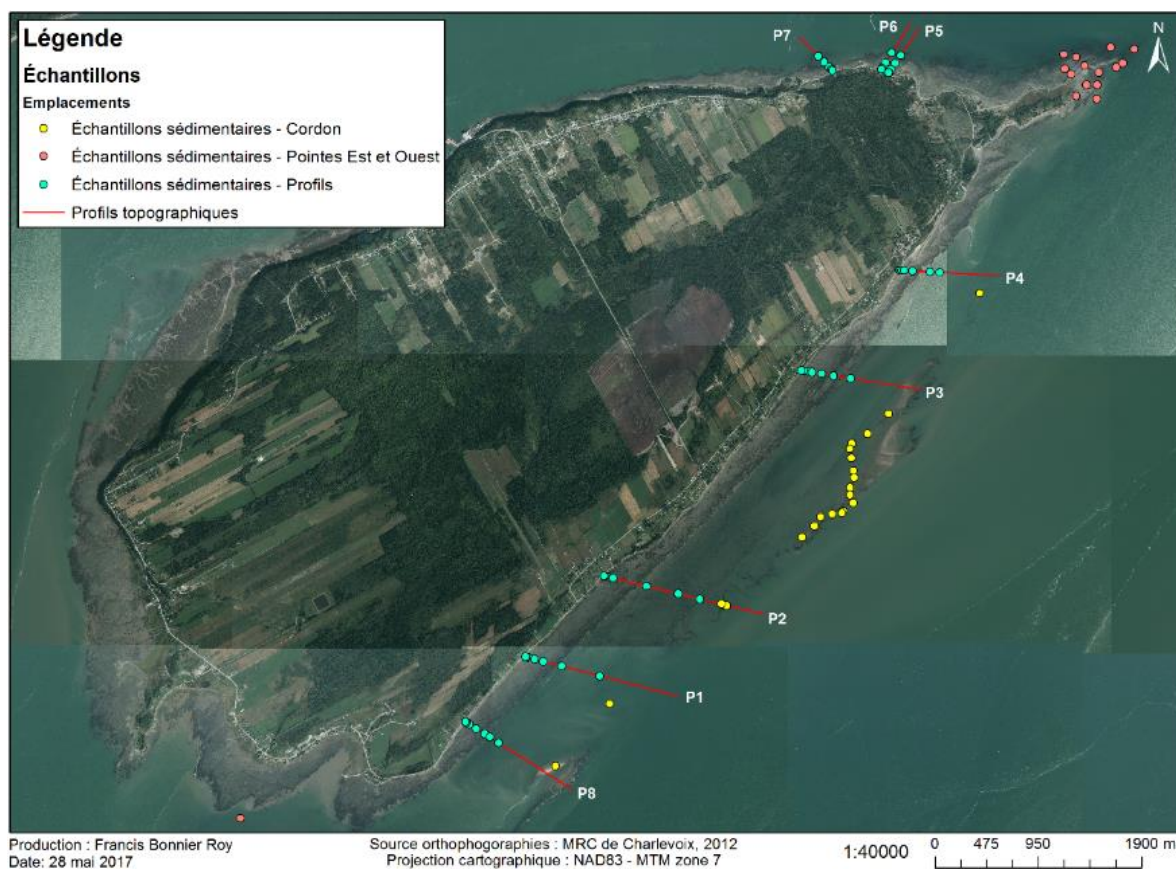


Figure 32. Emplacements des échantillons granulométriques des profils topographiques et hydrodynamiques pour la période du suivi 2014 à 2016.

Le positionnement des échantillons sur les profils a été déterminé selon les différentes parties de la zone côtière : un premier échantillon sur le haut de plage ainsi que deux échantillons sur le haut estran, soit un au 1/3 et l'autre au 2/3 de sa largeur. Sur le bas estran, un échantillon est pris dans les 5 premiers mètres suivant la flexure (rupture de pente et

changement granulométrique). Ensuite, l'échantillonnage se fait aux 100 à 300 mètres pour couvrir l'ensemble de la plateforme rocheuse, de la zone sablo-vaseuse et du cordon de basse mer. La figure 33 présente un exemple du positionnement des échantillons granulométriques de surface sur un profil topographique.

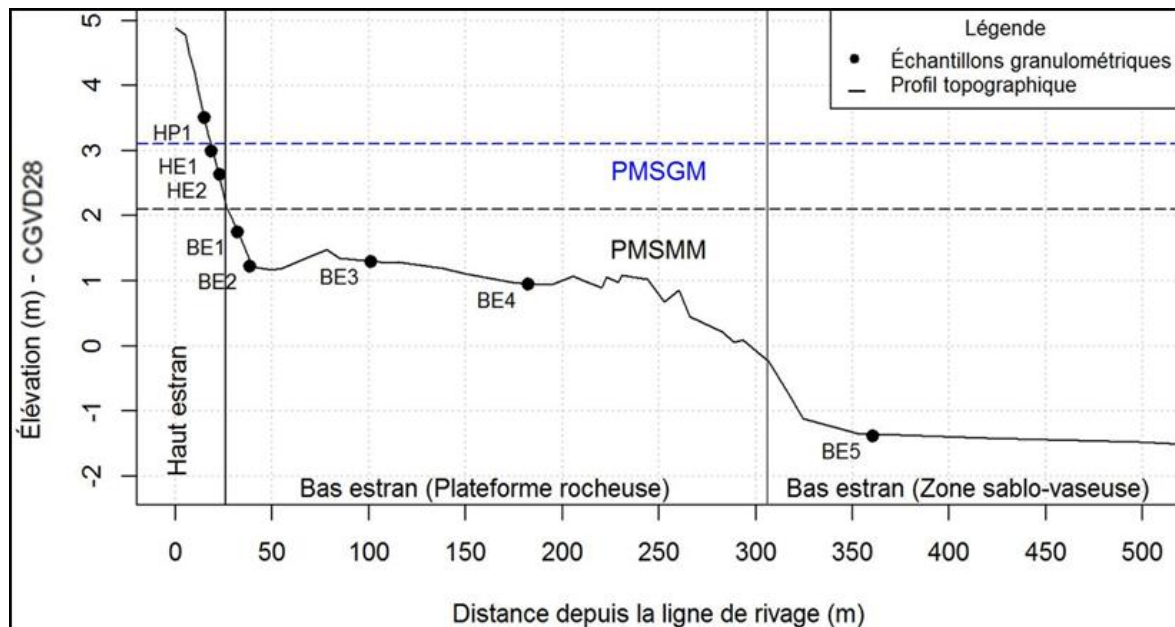


Figure 33. Exemple de positionnement des échantillons granulométriques sur un profil topographique.

L'échantillonnage de surface a été fait avec une truelle sur les 15 premiers centimètres de la surface. Les sédiments sont mis dans des sacs plastiques et identifiés selon le profil auquel il appartient ainsi que leur position sur le profil. Par exemple, le premier échantillon du profil 1 sur le haut estran est nommé P1-HE1. La chronologie des chiffres attribués sur les profils suit l'ordre de la prise des échantillons, soit du haut de plage vers la fin du bas estran. Chacun des emplacements d'échantillonnage a été relevé au GPS afin de permettre la prise de sédiments aux mêmes endroits pour chacune des saisons suivantes du suivi. De cette façon, il est possible qu'un échantillon ne se trouve plus exactement dans la portion du profil qui le décrit. Par exemple, un échantillon sur le bas estran dans les 5 premiers mètres suivant la flexure peut se retrouver dans la portion haut estran si la plage devient plus large. L'intérêt de cette méthodologie est de comparer l'état de référence d'août 2014 avant les travaux et les

échantillons de la zone intertidale suivant la mise en place des enrochements. Ainsi, si le nouvel ouvrage de protection engendre un élargissement de la plage, il y aurait une augmentation de la taille granulométrique d'un échantillon près de la flexure sur le bas estran.

En laboratoire, l'essentiel des analyses est effectué sur la matrice fine (<2 mm). Ainsi, un tamis de 2 mm est utilisé pour séparer les deux fractions granulométriques et une pesée est faite sur chacune d'elles. Ceci permet de déterminer la proportion inférieure au gravier (argile-limon-sable) et supérieure au sable (graviers, petits blocs) (Blott et Pye, 2001). Il n'y a pas eu d'élimination de la matière organique puisque ce processus par destruction au H₂O₂ désagrège les particules de schiste argileux et produit une erreur dans les résultats en surestimant la composition de l'échantillon en matière fine (argile et limon). Une quantité de 20 g des sédiments inférieurs à 2 mm est ensuite sélectionnée et versée dans un bécher avec 100 ml d'eau. Afin d'éliminer les carbonates, de l'acide chlorhydrique (HCl à 10% de concentration) est versé dans le récipient chauffé par une plaque électrique jusqu'à cessation de l'effervescence. Ensuite, le contenant était déposé dans un four chauffant à 60 degrés Celsius pour faire évaporer le surplus de solution. Avant de faire les analyses, les échantillons contenant des sédiments fins ont été brassés pendant au moins trois heures sur un rotateur-maison afin de défloculer les particules fines agglomérées ensemble. Finalement, elles sont ensuite versées dans l'analyseur de taille des particules par diffraction laser LS 13320 de la compagnie Beckman Coulter. Cet appareil couvre un large éventail de classes granulométriques (0,04 à 2 000 µm). Chaque échantillon parcourt le circuit qui dure 90 secondes, six fois, afin de s'assurer d'une cohérence des résultats des 3 derniers parcours.

3.5.1. Analyses statistiques

Le 4^e parcours (*run*) est sélectionné pour générer les statistiques, car c'est à partir de celui-ci que les résultats deviennent généralement stables. Les résultats du 4^e *run* sont utilisés dans un tableur *Excel* utilisant les macros de l'extension Gradistat afin de générer l'ensemble des statistiques nécessaires basées sur la classification modifiée d'Udden et Wentworth (Blott

et Pye, 2001). Les données retenues sont les différents pourcentages de chaque classe texturale (sable, limons et argile), la médiane (D50) et la moyenne.

La représentation des classes texturales a été faite sous forme de diagramme ternaire sur le logiciel statistique R grâce au *package* « *The Soil Texture Wizard* » de Moeys (2012). Le diagramme à trois côtés généré (figure 34) représente trois divisions de la classe des sables, soit les sables fins (63 μm à 250 μm), les sables moyens (250 μm à 500 μm) et les sables grossiers (500 μm à 2000 μm). Il est adapté pour présenter les résultats granulométriques des échantillons majoritairement sableux.

Exemple diagramme ternaire - Sables (63 μm à 2000 μm)

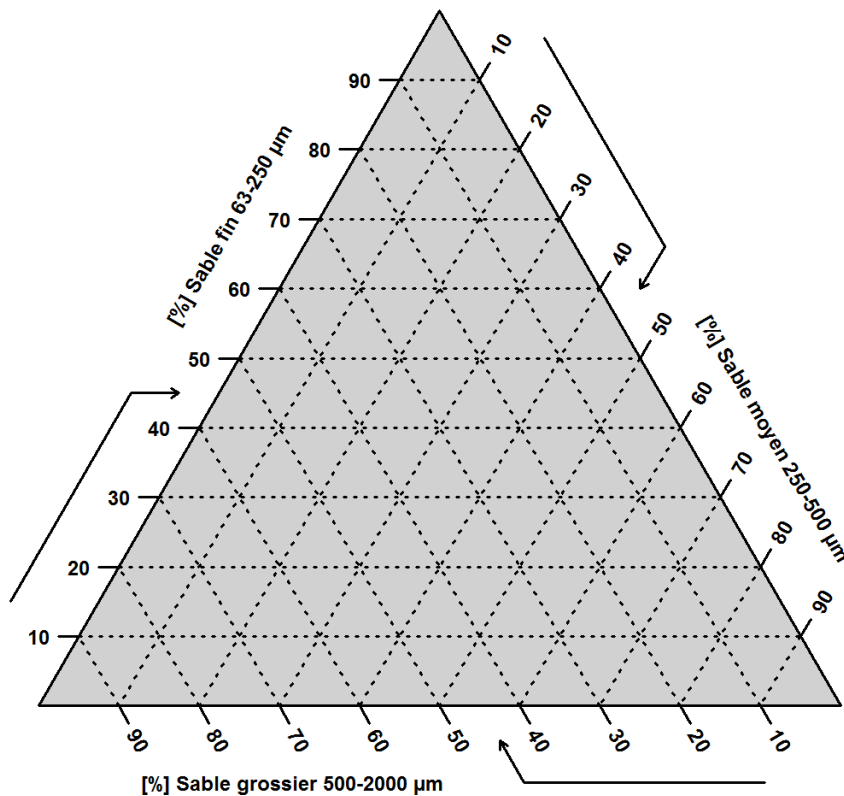


Figure 34. Exemple d'un diagramme ternaire pour les sables 63 μm à 2000 μm .

3.6. Minéralogie

Dans l'objectif ultime de proposer une approche de gestion des stocks sédimentaires des littoraux de l'île aux Coudres, la compréhension des sources qui alimentent les plages est primordiale. Ainsi, des analyses sur la composition minérale des échantillons de sédiments de plage ont été réalisées. Les résultats ont ensuite été comparés avec la composition minérale d'échantillons récoltés en rivière provenant de la rivière du Gouffre à Baie-Saint-Paul (Bouclier canadien) et de plusieurs rivières sur la rive sud du Saint-Laurent (Appalaches). L'intérêt est de trouver la provenance des sédiments qui composent le haut estran des profils d'intérêt et de déterminer les sources à proximité ou anciennes qui ont pu contribuer à construire ces rivages.

Pour chaque profil, les échantillons sélectionnés pour ces analyses sont les échantillons prélevés sur le haut estran 1, le bas estran 1, le bas estran 3, le bas estran 5. À noter que le profil 6 n'a pas été analysé en raison de sa proximité par rapport au profil 5, qui a été retenu. Aussi, l'échantillon du bas estran 4 (BE4) a été choisi au lieu de celui du bas estran 5 (BE5) pour le profil 2, car BE4 était situé au même endroit que BE5 sur les autres profils de la côte sud, soit sur la zone sablo-vaseuse après la plateforme rocheuse. De plus, d'autres échantillons sédimentaires ont été récoltés à certains endroits sur l'île identifiés comme sources potentielles de sédiments pour les plages. Ainsi, le cordon de basse mer, les pointes est (Pointe du Bout d'en Bas) et ouest (Pointe à Simon) ont été échantillonnés et analysés. De plus, des échantillons de roc ont été prélevés sur le Grand Pilier (grand écueil rocheux au niveau du profil 8), sur la plateforme rocheuse (entre les profils 3 et 4, Aff4-1) et sur une falaise rocheuse au nord-ouest de l'île (AFFroc-1 et AFFroc-3). L'intérêt est d'identifier et de valider la formation géologique à laquelle les échantillons de roc et de sédiments des sources potentielles des plages sont associés. Cela se fait grâce à une comparaison minéralogique entre la composition minérale obtenue et celle de la minéralogie des roches dont l'origine est connue. La figure 35 présente l'ensemble des échantillons de sédiments et d'échantillons de roc utilisés pour cette analyse minérale. La liste complète des échantillons présentant leur date de récolte sur le terrain et leur position se trouve en annexe 1.

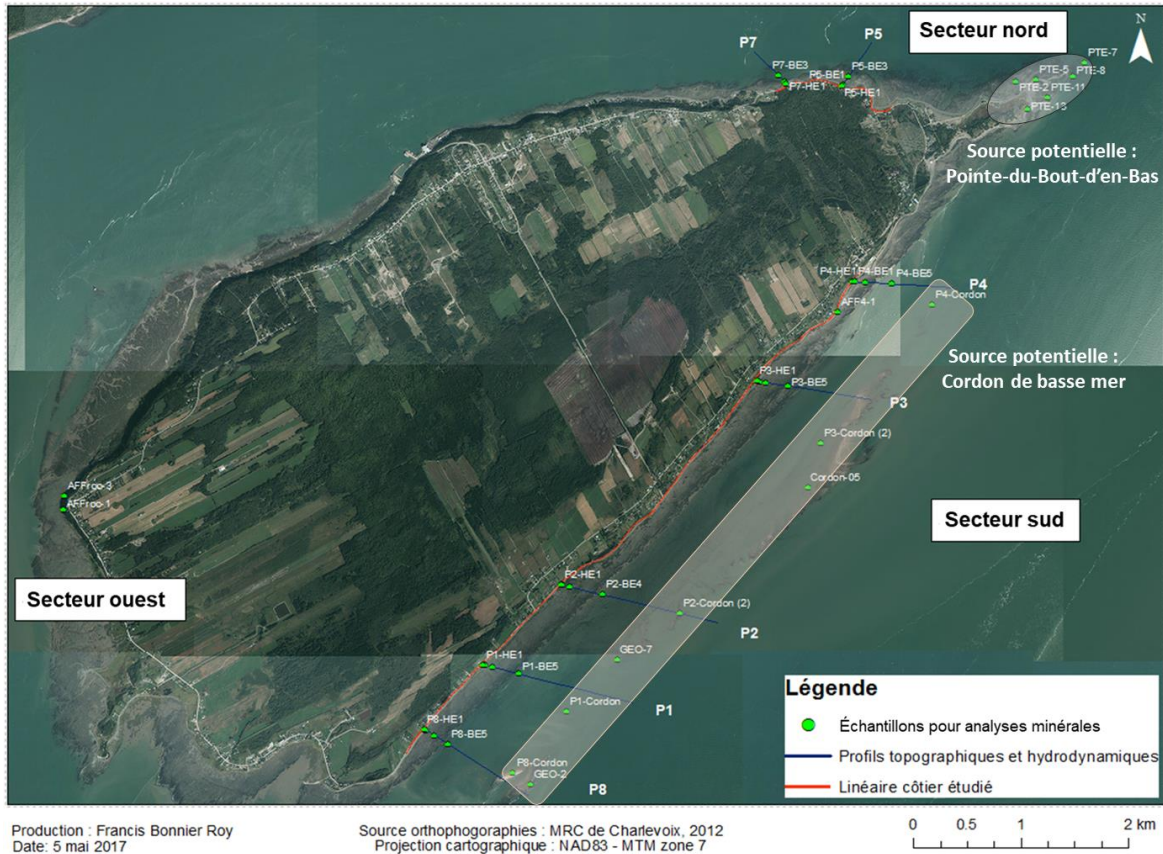


Figure 35. Emplacements des échantillons utilisés pour les analyses minérales et des sources potentielles d'apports sédimentaires (zones grisées).

Chaque échantillon de sédiment meuble prélevé sur les profils et sur la plateforme rocheuse a été analysé à 2 ou 3 dates différentes pour évaluer le potentiel de variabilité minéralogique selon les saisons. La méthodologie de préparation des échantillons pour la quantification des minéraux par diffraction au rayon-X est empruntée de Eberl (2003).

Chaque échantillon sédimentaire a été tamisé à 2 mm pour ne garder que la matrice fine. Par la suite, 5 g de sédiments fins ont été prélevés et mis dans un bécher de 500 ml afin d'y ajouter de l'eau et 5 ml de HCl concentré à 10 % (acide chlorhydrique) pour détruire les carbonates biogéniques. Après la destruction de ces éléments, 10 ml de H₂O₂ (peroxyde d'hydrogène) concentrés à 30 % a été ajouté pour détruire la matière organique restante. Lorsque cette étape fut terminée, l'échantillon a été séché dans une étuve à 70°C. En ce qui

concerne les échantillons de roc, ces derniers ont été broyés sans passer par les mêmes étapes que les sédiments meubles puisqu'ils ont été considérés sans contaminants (ex : coquillages, débris organiques, etc.). Ensuite, un sous-échantillon de 1 g de sédiment ou de poudre de roc fut récolté sur les 5 g initiaux pour chaque échantillon sec. Une quantité de 0,111 g d'oxyde de zinc (standard ou *spike* pour la quantification des minéraux) a été ajoutée à chaque sous-échantillon ainsi que 5 ml d'éthanol pour liquéfier le mélange (s'évapore rapidement pour le séchage). Les sédiments furent ensuite broyés par un processus de micronisation à l'aide d'une broyeuse McCrone pendant 10 minutes afin d'obtenir une poudre homogène. Le tout a été séché dans une étuve à 60°C durant la nuit, puis homogénéisé avec un mortier d'agate afin de prévenir les agglomérations des particules fines durant le séchage.

La poudre obtenue pour chaque échantillon a été analysée grâce à la diffraction des rayons-X de l'instrument *PANalytical X'Pert Powder diffractometer* au Laboratoire de géologie marine de l'Institut des sciences de la Mer. Cette méthode permet d'avoir une semi-quantification de l'ensemble de la minéralogie des sédiments avec une précision de $\pm 5\%$ des phyllosilicates et de $\pm 2\%$ pour les minéraux non-phyllosilicates (Casse *et al.* 2017). Les principaux minéraux quantifiés par cette technique sont : quartz, feldspath potassique (microcline et orthoclase), feldspath de plagioclase (albite + anorthite), magnétite, hématite, goethite, dolomite et phyllosilicates (biotite, muscovite, illite, chlorite et kaolinite).

L'ensemble des résultats des échantillons a été analysé grâce à la méthode statistique par *clusters* ou partitionnement de données qui permet de diviser l'ensemble des données en groupes homogènes de caractéristiques minéralogiques communes. Cette première analyse permet d'évaluer la robustesse des résultats et de déterminer combien de regroupements constituent l'ensemble des échantillons analysés. Dans le cas où les sources potentielles sont soit d'origine de la formation de roches métamorphiques de Grenville du Bouclier canadien ou des roches sédimentaires paléozoïques des Appalaches, il y a ainsi trois regroupements possibles en incluant un groupe de mélange. Ensuite, il a fallu déterminer quels étaient les minéraux les plus significatifs statistiquement pour discriminer les échantillons entre eux.

Des analyses en composantes principales ont été faites sur 4 minéraux clés puisqu'ils représentent en moyenne 96% de la composition des échantillons. Puis, l'analyse et l'interprétation des résultats ont été réalisées en fonction du ratio des trois minéraux les mieux corrélés, soit en prenant les phyllosilicates divisés par la somme des feldspaths potassiques et des plagioclases ($\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$), ce qui permet de déterminer l'origine des sédiments analysés (Appalaches ou Bouclier). Selon Casse *et al.* (2017), un échantillon qui a un ratio inférieur à 0,5 provient du Bouclier canadien (tableau 7). Si ce ratio est supérieur à 1, l'échantillon provient des Appalaches. S'il est entre 0,5 et 1, c'est un mélange des deux sources. Cette méthodologie permet d'affiner l'analyse antérieure.

Tableau 7. Ratio $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ et l'origine minéralogique associée.

Ratio $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$	Origine minéralogique
Plus petit que 0,5	Bouclier canadien
Entre 0,5 et 1	Mélange (Bouclier canadien et Appalaches)
Plus grand que 1	Appalaches

Le logiciel SEDUNMIX MC (Andrews et Eberl, 2012; Andrews *et al.*, 2015) a été utilisé pour lier les composantes minérales des échantillons sédimentaires de ce suivi avec les sources potentielles des substratums rocheux du Bouclier canadien et des Appalaches (Casse *et al.*, 2017).

La méthode utilisée de ratio $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ permet de bien distinguer l'origine des sédiments dans le contexte de l'estuaire du Saint-Laurent (Jaegle, 2015; Casse *et al.*, 2017). Cependant, notez que les échantillons de la zone intertidale utilisés comme sources sont composés d'un ensemble des sédiments issu de l'altération de différentes roches avec différentes compositions chimiques et minéralogiques (Loring et Nota, 1973; Dickin, 2000; Culshaw *et al.*, 2000; Farmer *et al.*, 2003; Phan *et al.*, 2018; Jaegle, 2015). Dans ce contexte, cette méthode a des limites au niveau de l'exactitude des résultats des échantillons d'une roche en particulier.

3.7. Cartographie et caractérisation des herbiers

Les herbiers de l'île aux Coudres sont des agglomérations de plantes qui colonisent le littoral et sont majoritairement constitués de spartine alterniflore (*Spartina alterniflora*), mais aussi peuplés de scirpe d'Amérique (*Schoenoplectus pungens*), l'île se trouvant à la limite des deux espèces dans l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Ils ont été cartographiés le 14 août 2014 sur deux zones au sud de l'île, la première entre le profil 8 et le profil 2 et la deuxième à l'est du profil 3 (figure 36).



Figure 36. Emplacements des herbiers à spartine alterniflore cartographiés.

Les herbiers suivis sont ceux localisés sur le bas estran en bordure de la flexure de la plage, car ce sont ceux qui sont les plus susceptibles d'être affectés par un changement morphosédimentaire associé à la mise en place des enrochements (figure 37). Les autres herbiers présents sur la plateforme rocheuse n'ont pas été cartographiés puisque les premiers

herbiers sur la flexure sont considérés suffisants comme indicateur d'impacts potentiels des enrochements.

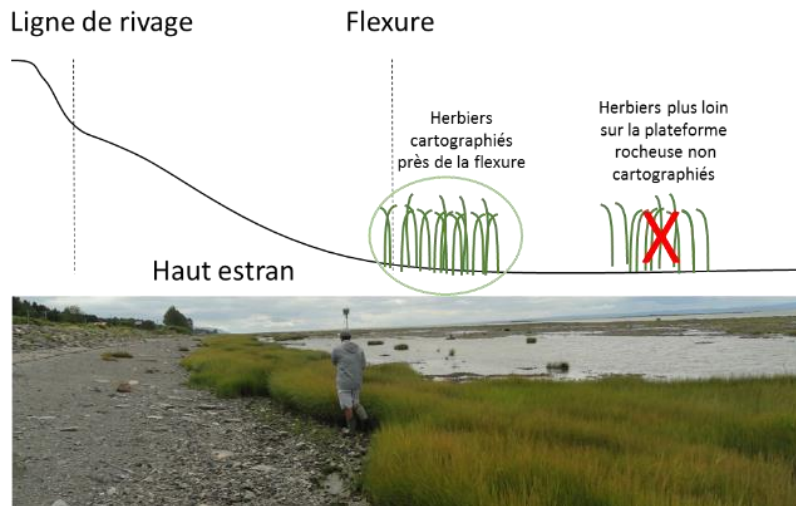


Figure 37. Illustration montrant l'emplacement des herbiers cartographiés sur le profil.

À noter qu'il n'y a pas d'herbiers sur la côte nord-est à l'étude. De plus, le suivi des herbiers a été fait seulement sur ceux qui sont à proximité des profils topographiques et des nouveaux travaux d'enrochement. C'est pourquoi les herbiers entre les profils 2 et 3 n'ont pas été considérés dans l'étude. Les herbiers ont été mesurés et caractérisés lors de l'état de pleine croissance, soit au mois d'août.

Les herbiers sont cartographiés à l'aide d'un D-GPS en suivant leur contour. La fonction « point en continu » du D-GPS permet de régler la prise de points à chaque pas de distance désiré. Celui-ci est ajusté à 50 cm pour avoir une ligne de points détaillée pour l'ensemble de l'herbier. Le pourcentage de recouvrement des herbiers est un élément évalué visuellement pour chacun d'entre eux. Le tableau 8 montre les classes du pourcentage de recouvrement qui a été évalué pour chaque polygone d'herbier. En cas de pourcentage de recouvrement discontinu dans l'herbier, la limite du contour des herbiers a été tracée là où il y avait une démarcation significative entre la portion de l'herbier où le pourcentage de recouvrement est plus important et la zone discontinue. Par exemple, si l'herbier a un pourcentage de recouvrement d'ensemble évalué supérieur à 75 % et qu'en faisant le traçage

du contour de l'herbier il y ait une zone peu végétalisée évaluée à moins de 25 %, cette zone était exclue de la cartographie. De cette façon, chaque herbier possède les mêmes caractéristiques sur l'ensemble de sa superficie. De plus, les herbiers évalués à moins de 5 m² n'ont pas été cartographiés.

Tableau 8. Classes du pourcentage de recouvrement des herbiers déterminés par leurs critères

< 25 %	<ul style="list-style-type: none"> • Forte présence de zones de substrat nu • Herbier hétérogène (différentes hauteurs, pousses jeunes à plus âgés) • Plants dispersés en faible densité
25 à 50 %	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de zones de substrat nu • Herbier plus homogène (peu de plants de différentes hauteurs) • Plants dispersés en moins faible densité
50 à 75 %	<ul style="list-style-type: none"> • Présence de quelques zones de substrat nu • Herbier majoritairement homogène (faibles différences de hauteurs des plants) • Plants dispersés plus densément
> 75%	<ul style="list-style-type: none"> • Peu de zones de substrat nu • Herbier très homogène (hauteurs similaires des plants) • Plants dispersés très densément avec forte couverture foliaire

Ensuite, la hauteur moyenne des plants de spartine alterniflore de l'herbier est mesurée à l'aide d'un ruban à mesurer. De plus, chaque herbier possède son propre numéro, l'herbier 1 étant le premier rencontré à partir du profil 8 jusqu'à l'herbier 29 près du profil 4. Finalement, les points géoréférencés sont transférés dans *ArcGIS 10.1* afin de les convertir en polygones et de calculer la superficie (m²) des herbiers.

Afin d'analyser l'évolution de la morphologie des herbiers à spartine alterniflore entre 2014 et 2016, la même méthodologie a été utilisée pour cartographier à nouveau les herbiers le 2 septembre 2015 et le 20 août 2016. Leur superficie individuelle a été calculée. Afin de

voir l'évolution des polygones d'herbiers entre 2014 et 2016, une analyse spécifique a été effectuée en utilisant la fonction « *intersect* » sur *ArcGIS 10.1*. Ainsi, il est possible d'avoir la superficie commune entre deux polygones de dates différentes (figure 38).

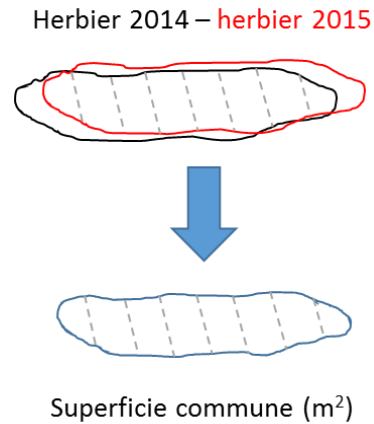


Figure 38. Croquis de l'utilisation de l'outil *intersect*.

De plus, le centroïde de chaque herbier a été généré sur *ArcGIS* grâce à l'outil « *Shapes to Centroid* » de l'extension *XTools Pro 10.2*. Par la suite, la distance a été calculée entre chaque point à l'aide de la position géographique pour chaque période. Une direction du déplacement du centroïde lui a ensuite été attribuée. Cette méthode donne un sens général approximatif du déplacement de l'herbier puisque, par exemple, si un herbier perd de la superficie au sud, mais en gagne au nord-est, cela veut dire qu'il s'est déplacé vers le nord-est. Un herbier s'est déplacé légèrement si son centroïde est à moins d'un mètre de l'année précédente, entre 1 m et 2,5 m ce déplacement est considéré comme moyen et il est fort s'il est supérieur à 2,5 m.

Il est aussi important de mentionner que la hauteur moyenne a été calculée de deux façons différentes durant le suivi. En 2014, une seule mesure était faite par herbier alors qu'en 2015 et 2016, plusieurs mesures ont été réalisées le long de l'herbier et du côté terre et mer. Cette procédure a été modifiée pour observer la morphologie des herbiers. Elle permet de mieux évaluer la hauteur moyenne des plants. Ainsi, la méthode d'une seule mesure par herbier en 2014 peut avoir surévalué ou sous-évalué la hauteur moyenne des herbiers.

3.8. Conditions hydrodynamiques

3.8.1. Mesure des niveaux d'eau et des vagues

Les paramètres de vagues et de niveaux d'eau ont été mesurés à l'aide de capteurs de pression piezo-résistifs autonomes RBR Virtuoso (figure 39). Les capteurs sont installés dans des supports subhorizontaux fixés sur la roche de la plateforme rocheuse ou dans des vis à sable verticales dans les plages ou la zone sablo-vaseuse. Ils ont été positionnés le plus proche possible du fond, avant et dans la zone de déferlement sur les profils topographiques (et hydrodynamiques) 1 à 6, devant des côtes artificialisées et d'autres naturelles. La fréquence élevée (4 Hz) en continu permet une bonne résolution des vagues, et ce, pendant la totalité des cycles de marée (Lambert et Bernatchez, 2014).



Figure 39. Capteur de pression déployé sur l'estran de L'Isle-aux-Coudres. Source : Lambert et Bernatchez, 2014.

Les positions des capteurs et des prises de pression (membrane) sont mesurées en X,Y (MTM7) et en Z (CGVD28) au D-GPS. Les altitudes ont été converties en profondeurs relativement au zéro des cartes marines.

Les capteurs mesurent un courant électrique dont la tension « c » est fonction de la déformation d'une membrane métallique sous l'effet d'une pression hydrostatique « p », déformation due dans notre cas au poids d'une colonne d'eau de hauteur variable, plus le

pois de la colonne d'air atmosphérique au niveau de la surface. La tension mesurée est convertie en pression par une fonction de transfert $p=f(c)$ correspondant à une fonction polynôme de troisième degré dont les coefficients, propres à chaque capteur, sont obtenus lors de la calibration en usine. Ainsi, une mesure de la pression atmosphérique est réalisée dans le même intervalle de temps à partir de sondes barométriques type *HOBO* positionnées à terre, à proximité des capteurs de pression. Cette mesure permet une correction de la pression absolue en soustrayant la pression atmosphérique de la pression mesurée dans la colonne d'eau par les capteurs afin d'obtenir la pression relative. Cette pression relative est convertie en hauteur d'eau « h » par la formule $h=p/(\rho \cdot g)$ avec « g » l'accélération gravitationnelle et « rho », la masse volumique de l'eau de mer. La hauteur d'eau est ensuite corrigée de l'amortissement de la pression en fonction de la fréquence et de la profondeur pour obtenir une série chronologique de la hauteur d'eau.

3.8.2. Analyse des ondes de gravité (2 à 20 secondes) et d'infragravité (20 secondes à 5 minutes)

Les ondes de gravité constituent les vagues et la houle et sont liées à l'influence du vent sur une surface d'eau libre. Les ondes longues ou ondes d'infragravité sont formées par la superposition de deux trains d'ondes courtes dont la fréquence et la longueur d'onde sont similaires (Aucan et Ardhuin, 2013). Elles peuvent être piégées par réfraction sur les côtes peu profondes à large estran de faible pente. Ce phénomène conduit à l'apparition d'« ondes de bord » (*edge waves*) qui contribuent à une modulation locale, périodique, du niveau d'eau à la côte pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres. Leur présence constitue une part non négligeable de la surélévation du niveau d'eau en période de tempête d'où l'importance de les intégrer dans les formules.

Les données de pression corrigées de hauteur d'eau à 4Hz ont été traitées par analyse spectrale afin de produire la distribution fréquentielle de l'énergie des vagues (spectres de densité d'énergie des vagues). Ces analyses ont été réalisées dans un premier temps sur une fenêtre de 4 096 points (soit 17,06 mn @4Hz, fenêtre temporelle standard utilisée pour

l'analyse spectrale des ondes de gravité, 1 Hz – 0,05 Hz). L'échantillonnage en continu plutôt qu'en rafale (*burst*) permet de disposer de la totalité du signal pour chaque cycle de marée. Cet échantillonnage permet la conduite d'analyse spectrale sur des fenêtres plus longues afin d'étudier la présence d'ondes d'infragravité (0,05 Hz – 0,003 Hz).

Pour chaque pas de temps, les spectres de vagues mesurés en chaque point du profil ont été comparés afin de mettre en évidence les effets de la morphologie sur la dissipation et les transferts d'énergie lors de la propagation des vagues jusqu'à la côte.

Les paramètres de vagues (hauteur significative, période) ont été également calculés sur la bande de fréquence des ondes incidentes pour chaque capteur de pression au pas de 20 mn. À partir de ces séries chronologiques de paramètres de vagues produites sur trois ans, il a été possible d'analyser les périodes de retour des vagues en chaque point de mesure, permettant de déterminer les niveaux d'exposition des différents secteurs de la côte de l'île aux Coudres pour cet intervalle de temps.

Les paramètres des ondes d'infragravité ont été calculés de la même manière, sur leur bande de fréquence propre. Ainsi, le résultat permet d'étudier la contribution de ces ondes à la surélévation du niveau d'eau à la côte.

3.8.3. Mesure des courants côtiers

Un courantomètre Nortek ADV a été déployé pour une année (hors période des glaces, 18/05/2015 au 15/12/2015) sur la face sud-est du cordon sableux à l'est du profil 3 afin de quantifier les dynamiques marines à cette position avant leur réfraction sur le sommet du cordon (figure 40).

Cet instrument acquiert des données de courants ponctuelles à une hauteur de 0,34 m au-dessus du fond sableux, à une profondeur de -1,81 m du modèle géodésique CGVD28. Ces données sont acquises à 4 Hz et comportent les vitesses de courants sur les axes nord, est et vertical ainsi que des données de pression. Les paramètres directionnels de vagues ont

été mesurés par l'ADV déployé au sud-est de l'île à -1,81 m d'élévation relative au CGVD28, entre le 20/05/2015 et le 15/12/2015. L'instrument est déployé.



Figure 40. ADV positionné au sud-est de l'île du 18/05/2015 au 15/12/2015

Afin d'avoir une meilleure compréhension globale de l'hydrodynamisme du secteur, les niveaux d'eau de la station marégraphique de Saint-Joseph-de-la-Rive, sur le continent à environ 3 km au nord de l'île, ont été compilés pour avoir une vision à long terme des tendances des niveaux d'eau de l'île aux Coudres.

L'étude des données météo-marines a permis de comprendre le comportement morphodynamique intra-annuel (saisonnier) et interannuel (d'une année à l'autre) pendant la durée du projet. Elle permet ainsi de quantifier et de comparer les dynamiques affectant des secteurs aménagés et non aménagés, et d'observer l'existence ou l'absence de différence dans les dynamiques saisonnières à la côte du fait de la construction des ouvrages et de leurs processus associés. Ainsi, l'interprétation de ces résultats permet de répondre aux objectifs de compréhension de la dynamique hydrosédimentaire tels que la connexion sédimentaire entre le cordon de basse mer et le littoral sud de l'île.

3.9. Figure synthèse méthodologique

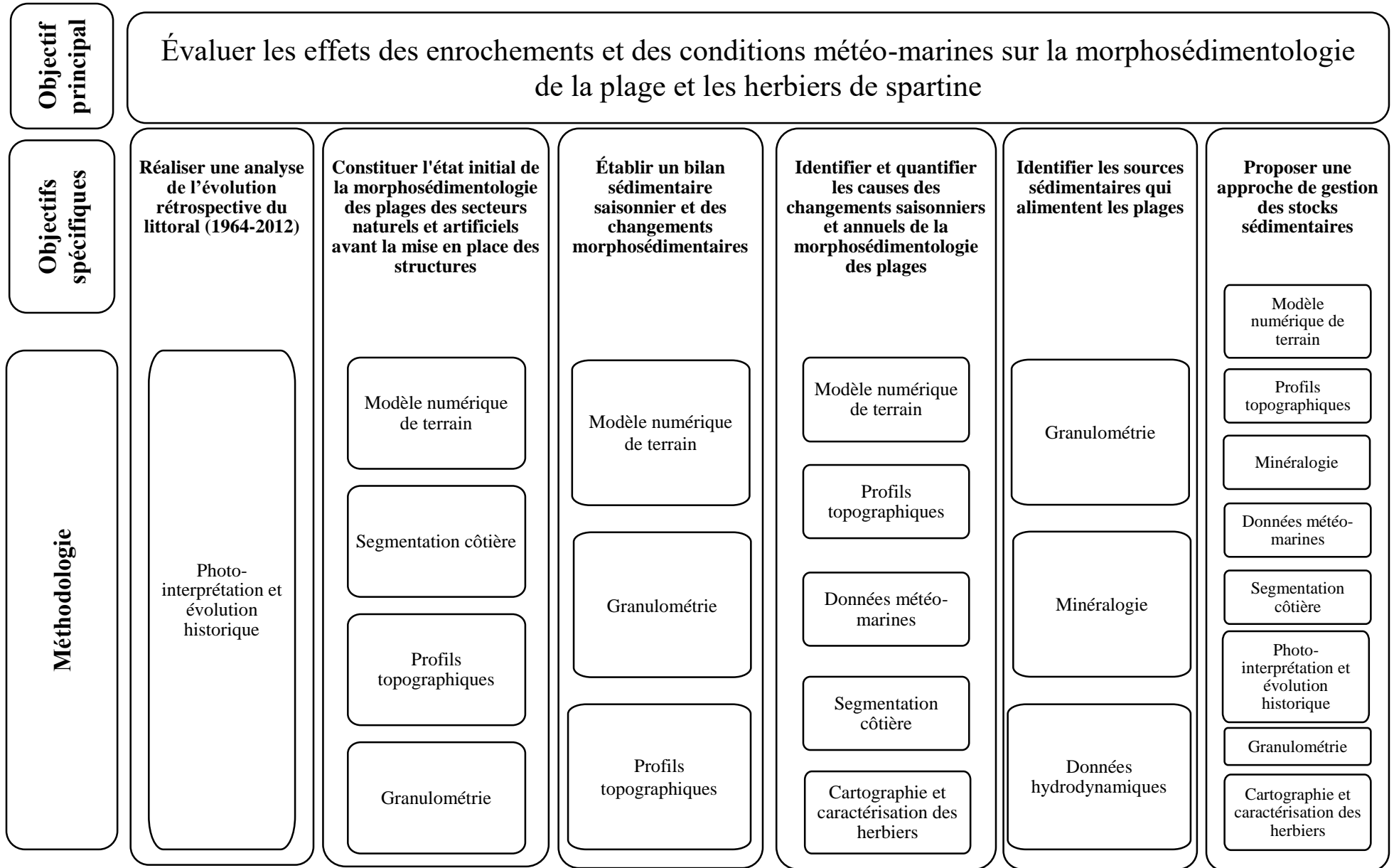


Figure 41. Synthèse des objectifs spécifiques et des méthodes d'acquisitions de données associées

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Les résultats sont présentés en deux temps pour chaque méthode. En premier lieu l'état de référence (avant les travaux) est abordé et en second lieu, l'évolution des indicateurs suivis après l'implantation des enrochements est présentée pour la période du suivi de 2 ans. Ainsi, il est possible d'avoir un état comparatif pour chaque indicateur.

4.1. Évolution historique de l'état de la côte (1964 à 2012)

4.1.1. Artificialisation de la côte

Les berges à l'étude de la municipalité de L'Isle-aux-Coudres ont connu, depuis la deuxième portion du XX^e siècle, une artificialisation de plus en plus importante. La figure 42 montre un faible pourcentage de la côte artificialisée en 1964 (3 %), alors que celui-ci atteint 37 % en 2012.

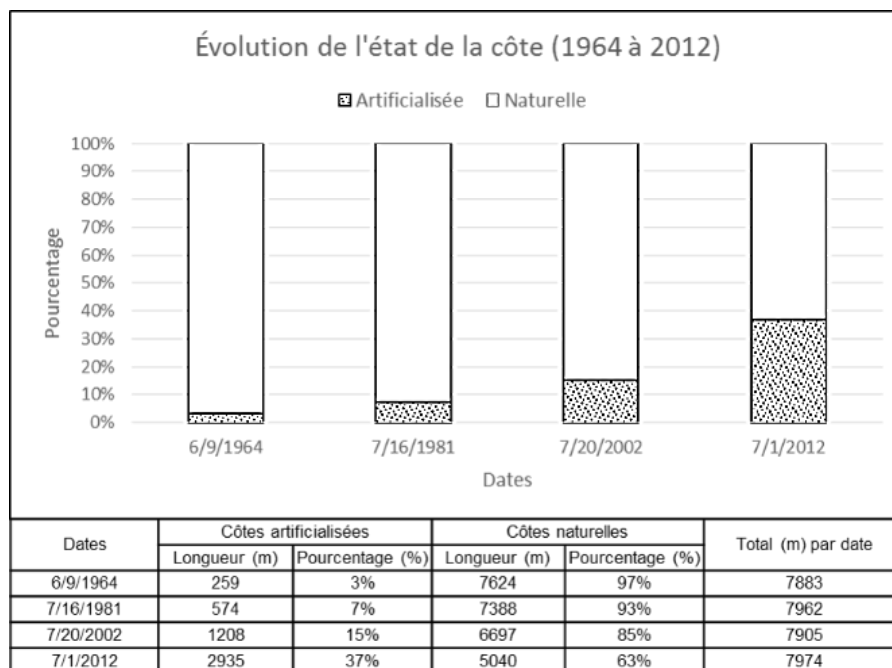


Figure 42. Évolution du pourcentage du littoral artificialisé entre 1964 et 2012.

L'explication de l'augmentation de l'artificialité résiderait en partie dans le changement de l'utilisation des sols. Autrefois, les terres près du rivage de la côte sud étaient en majorité vouées à l'agriculture et quelques habitations étaient présentes. En 1964, 8 bâtiments étaient construits près du linéaire côtier sur la côte sud à l'étude et 3 le long de la côte nord-est étudié (figure 43). En 2012, il y avait 49 maisons sur la côte sud et 23 sur la côte nord-est. Selon ce même graphique, la tendance est continue sur la côte sud tandis que sur la côte nord-est de l'île, le nombre de bâtiments stagne à 23 depuis 2002. Cela s'explique par le fait qu'il ne reste que peu d'endroits libres pour construire sur le littoral de la côte nord-est, contrairement à la côte sud où de récentes constructions sont visibles.

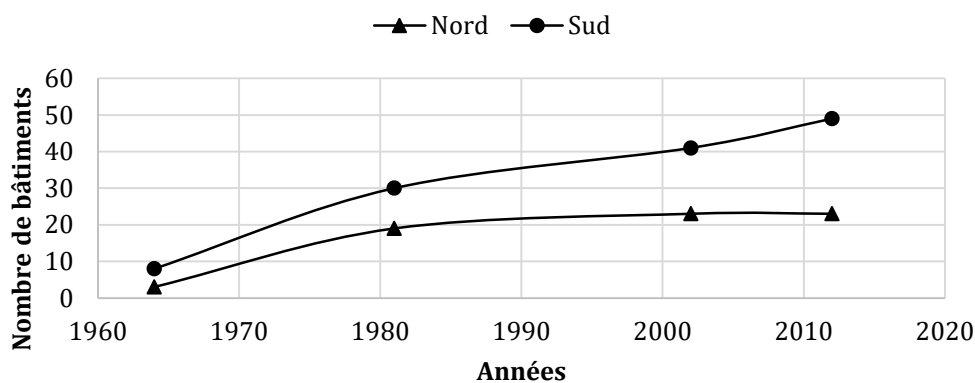


Figure 43. Nombre de bâtiments près du linéaire côtier à l'étude entre 1964 et 2012. À noter que la côte nord-est a une longueur de 1 487 m et que la côte sud de 6 339 m.

En 1964, les berges de la côte nord-est étaient légèrement plus artificialisées (4 %) que celles de la côte sud (3 %). D'ailleurs, la majorité de l'artificialisation des berges au sud à cette époque consistait en du remblai (qui est végétalisé aujourd'hui). Depuis les années 1980, le nombre croissant de constructions près du rivage et la consolidation de la route par de l'asphalte a engendré une demande accrue de la protection des rives face aux aléas côtiers. En 1981, le pourcentage de côtes artificialisées monte à 20 % sur la côte nord-est et reste faible à 4 % pour l'ensemble de la côte sud. D'ailleurs, certains propriétaires ont fait des travaux d'enrochement ou de muret devant leur propriété afin de se protéger. L'utilisation des ouvrages de protection rigides vers le tournant des années 2000 s'est

accélérée sur les deux secteurs, passant à 30 % sur la côte nord-est et 12 % au sud. Entre 2002 et 2012, les interventions d'urgence ayant pour but de protéger la route ont fortement contribué à augmenter l'artificialisation des berges à l'île aux Coudres, en particulier sur la côte sud où le pourcentage de côte artificielle a plus que triplé durant cette période, atteignant 38 %. Sur la côte nord-est, le pourcentage s'est plutôt stabilisé avec à 31 % en 2012. L'anthropisation de la côte à l'étude entre 1964 et 2012, bien que concentrée sur certaines portions de côte, est présentée sur la figure 44.



Figure 44. État de la côte (naturelle et artificielle) entre 1964 et 2012.

4.1.2. Taux de migration historique de la côte

Les résultats de l'évolution historique montrent une ligne de rivage généralement stable dans le temps avec une moyenne globale de 0,02 m/an pour l'ensemble du littoral étudié entre 1964 et 2012. Le tableau 9 présente la longueur des segments côtiers selon différentes classes de taux de migration du littoral. On peut constater que 79 % des valeurs sont comprises entre - 0,15 et 0,15 m/an pour la période de 1964 à 2012. Les 21 % restants représentent les taux de déplacement les plus importants répertoriés.

Tableau 9. Longueur et pourcentage des segments par classes du taux de migration historique (1964 à 2012).

Classes (m/an)	Longueur des segments (m)	Pourcentage du total
- 0,300 à - 0,150	300	4 %
- 0,149 à - 0,050	1 125	15 %
- 0,049 à 0,050	3 485	45 %
0,051 à 0,150	1 475	19 %
0,151 à 0,450	1 315	17 %
Total	7 700	100 %

La figure 45 présente plus précisément les taux de déplacement historiques (1964-2012) sur les 1 540 transects de mesures des 7 700 m de la ligne de rivage. La marge d'erreur maximale de 7 m, équivalente à 0,145 m/an, est représentée par la bande grise. Des cartes détaillées du taux de migration historique sont disponibles aux annexes 2 à 7.

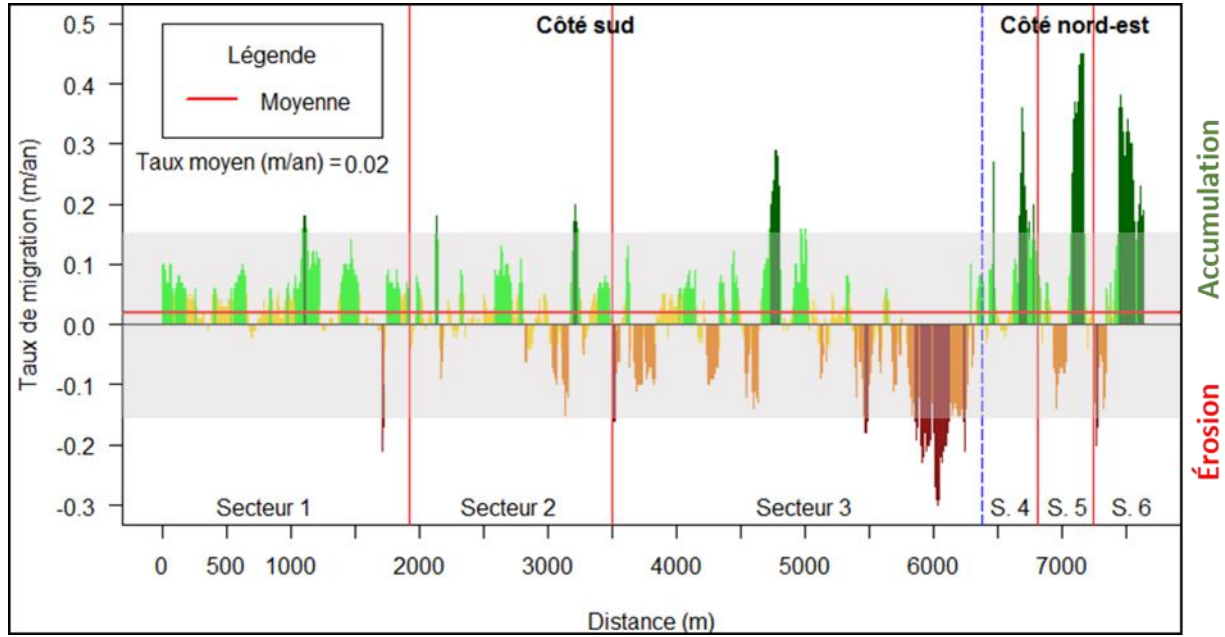


Figure 45. Taux de migration (m/an) et leur position sur la ligne de rivage (1964 à 2012). Marge d'erreur maximale de 0,145 m/an est représentée par la bande grise.

La figure 46 est une carte complémentaire à la figure 45 qui localise les taux de migration historiques le long de la ligne de rivage de 2012. La distance par rapport au point de référence (au sud-ouest de l'île) est également indiquée.

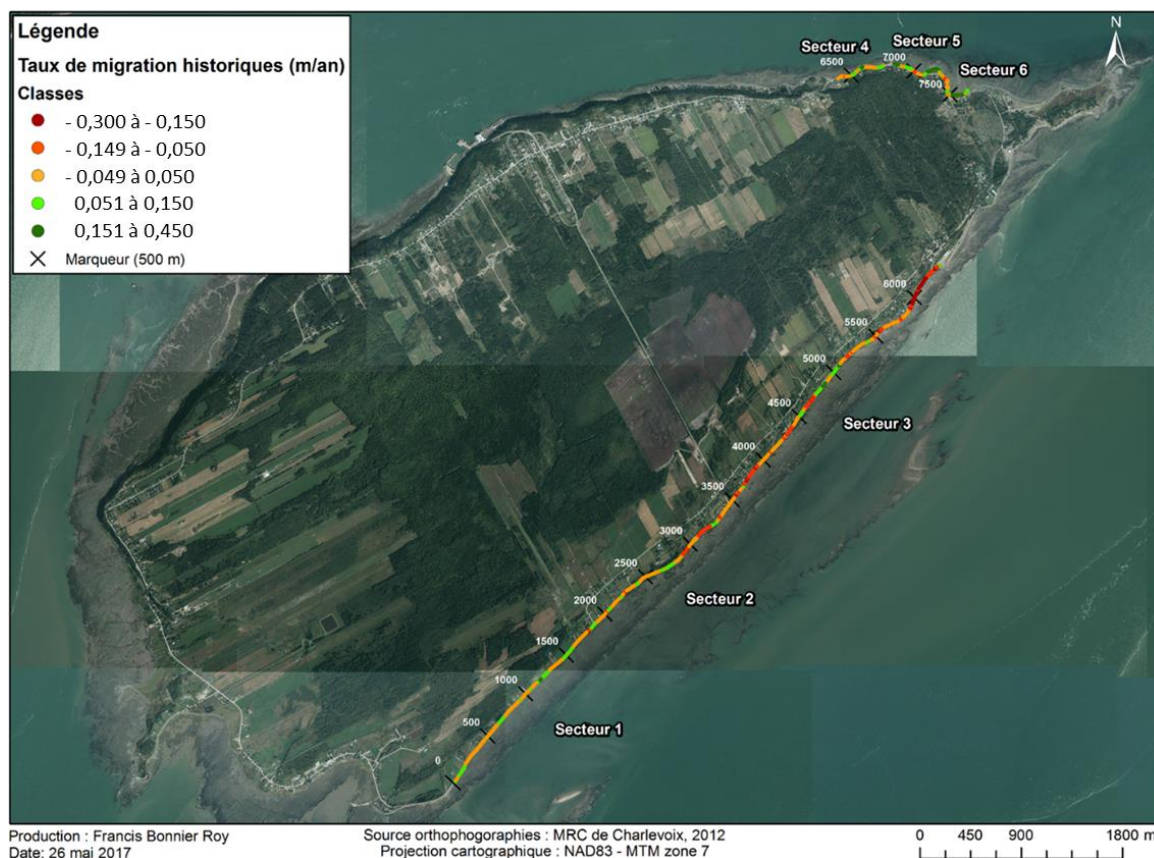


Figure 46. Taux de migration historiques (m/an) séparés en 5 classes (1964 à 2012). Le secteur 1 va de 0 m à 1 930 m, le secteur 2 de 1 930 m à 3 500 m, le secteur 3 de 3 500 m à 6 375 m, le secteur 4 de 6 375 m à 6 815 m, le secteur 5 de 6 815 m à 7 250 m et le secteur 6 de 7 250 m à 7 685 m.

Malgré le contexte général assez stable, certains secteurs ont présenté des taux plus importants, représentés par les couleurs rouge foncé et vert foncé sur la carte de la figure 46. Les taux de migration négatifs les plus forts (-0,300 à 0,15 m/an), 4 % du total, sont situés à proximité de la distance 6 000 m, dans le secteur 3, qui est l'un des secteurs fortement touchés par l'érosion. D'ailleurs la route à cet endroit est aujourd'hui très proche, entre 1,7 m et 5 m, des ouvrages de protection et de la microfalaise. De plus, cette portion de la côte sud est celle qui a connu les plus fortes vagues enregistrées par les capteurs de pression durant le suivi.

La figure 47 présente de manière détaillée les 1 540 transects de mesures du taux de déplacement par intervalle de dates sur l'ensemble du littoral étudié. Les zones grisées représentent une ligne de rivage artificialisée à la date la plus récente de l'intervalle.

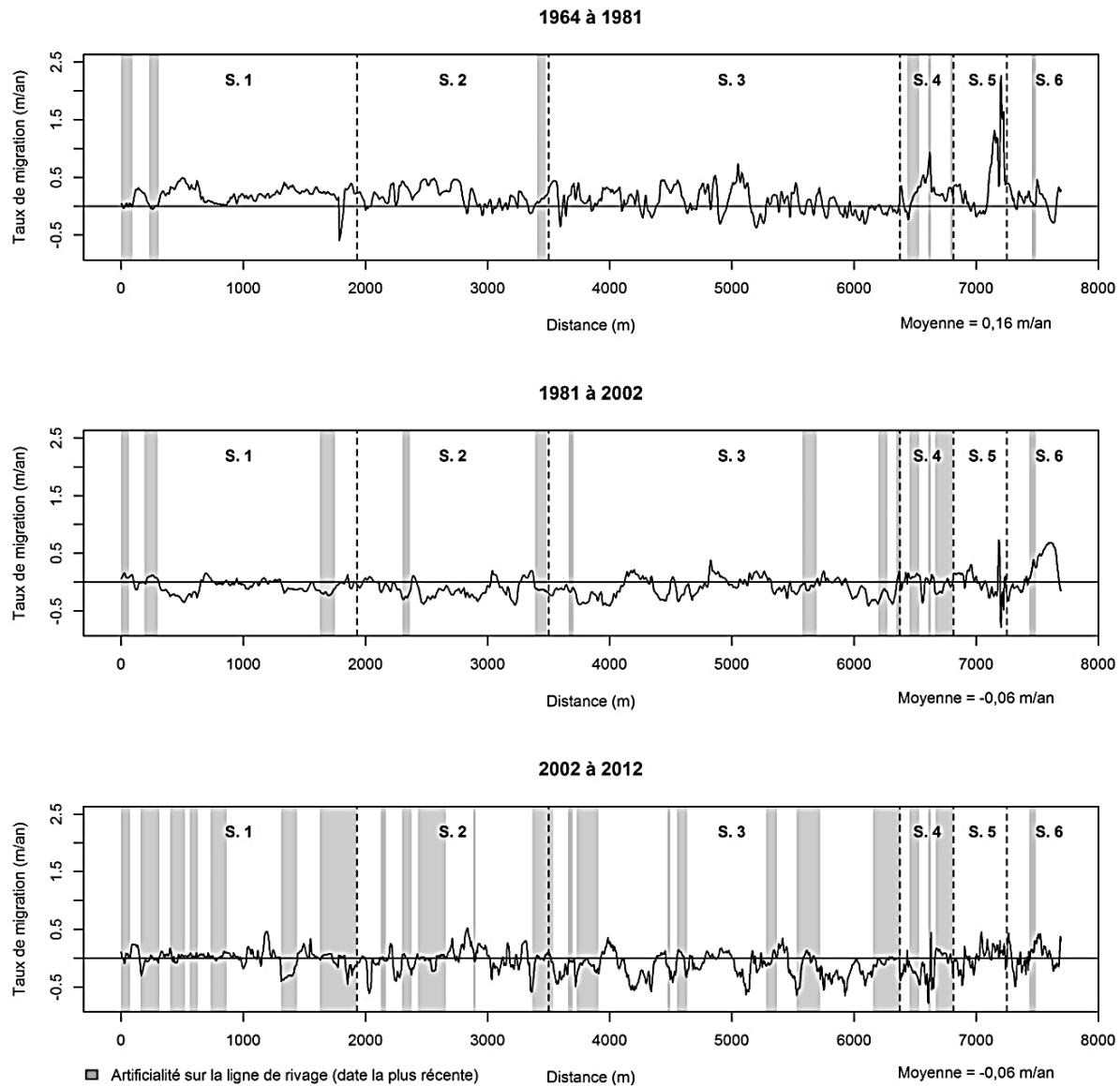


Figure 47. Taux de déplacement historiques (m/an) de la ligne de rivage et leur position sur le linéaire côtier délimité par secteurs pour quatre périodes entre 1964 et 2012. Les interventions de protection des berges sont illustrées par les zones grisées et représentent l'état de la côte de la date la plus récente de l'intervalle.

Les taux de déplacement historiques moyens des secteurs montrent une tendance plutôt positive sur l'ensemble du linéaire côtier à l'étude pour l'intervalle 1964 à 1981 (tableau 10). Sur la côte sud, la ligne de rivage est majoritairement en accrétion dans les secteurs 1 et 2 tandis qu'un plus grand dynamisme est remarquable au secteur 3, où la moyenne est la plus faible en raison de tronçons du littoral en érosion parmi ceux en accrétion. Sur la côte nord-est, le constat est similaire avec une avancée de la ligne de rivage pour les secteurs 4, 5 et 6.

Tableau 10. Moyenne du taux de déplacement de la ligne de rivage (m/an) et l'écart-type pour chaque période et par secteur.

Secteurs	Moyenne (m/an) 1964 à 1981	Moyenne (m/an) 1981 à 2002	Moyenne (m/an) 2002 à 2012
1 (n = 387)	0,19 ± 0,15	-0,06 ± 0,11	0,01 ± 0,14
2 (n = 314)	0,17 ± 0,16	-0,12 ± 0,14	-0,02 ± 0,19
3 (n = 575)	0,09 ± 0,21	-0,10 ± 0,16	-0,13 ± 0,20
4 (n = 87)	0,25 ± 0,21	-0,02 ± 0,12	-0,15 ± 0,22
5 (n = 88)	0,39 ± 0,55	0,01 ± 0,23	0,02 ± 0,18
6 (n = 89)	0,11 ± 0,18	0,21 ± 0,32	0,03 ± 0,21
Côte sud	0,14 ± 0,19	-0,09 ± 0,14	-0,06 ± 0,19
Côte nord-est	0,25 ± 0,37	0,07 ± 0,26	-0,03 ± 0,22

Entre 1981 et 2002, la tendance s'inverse et l'érosion est beaucoup plus présente sur la côte sud alors que le taux moyen est de - 0,09 m/an. Pour le même intervalle de la côte nord-est, seul le secteur 4 présente une moyenne négative tandis que le secteur 5 montre une plus grande stabilité de la ligne de rivage et que le secteur 6 a des signes de progradation importants. Puis, pour l'intervalle le plus récent, la ligne de rivage en érosion est de plus en plus stabilisée par les ouvrages de protection. Cela se traduit dans les moyennes du taux de déplacement des secteurs près de zéro. Néanmoins, les tronçons non protégés en érosion aux secteurs 3 et 4 font baisser la moyenne à -0,13 et -0,15 m/an, ce qui correspond aux taux de recul les plus importants sur l'ensemble de l'île.

Dans le secteur 1, le taux était de 0,19 m/an entre 1964 et 1981, avec une côte entièrement naturelle en 1964. En 1981, c'est 185 m (10 %) de berges qui sont enrochées au tout début de ce secteur, près de la distance 0 m. Entre 1981 et 2002, l'érosion est plus

présente alors que le taux moyen est près de - 0,06 m/an. En réaction au recul de la berge, l'artificialisation augmente à 16 % en 2002 jusqu'à atteindre 53 % en 2012. Le taux de migration moyen quant à lui devient stable à 0,01 m/an avec quelques tronçons présentant des signes de progradation, particulièrement autour de la distance 1 000 m.

Dans le secteur 2, le taux moyen de déplacement est similaire à celui du premier secteur lors du premier intervalle. La ligne de rivage est plutôt en progradation et seulement 5 % du linéaire est artificialisé, soit 80 m d'enrochement à la distance 3 500 m, à la fin du secteur. Cela change entre 1981 et 2002 alors que le taux moyen devient négatif avec - 0,12 m/an et que 84 m d'ouvrages de protection sont ajoutés. Entre 2002 et 2012, plusieurs travaux de stabilisation des berges ont lieu faisant grimper l'artificialisation du secteur à 34 % (530 m). Malgré un contrôle de l'érosion par ces nouvelles mesures, de l'effet de bout semble se produire aux extrémités de ces ouvrages de protection.

Le secteur 3, présentant le taux moyen de déplacement le plus faible entre 1964 et 1981, dissimule une grande variabilité sur la ligne de rivage. La première partie du secteur entre la distance 3 500 et 5 000 m est plutôt stable avec quelques tronçons en progradation tandis que la deuxième partie entre la distance 5 000 et 6 375 m montre plus de signes d'érosion. Plus particulièrement, la zone naturelle adjacente aux épis rocheux de l'actuel chantier de bateaux Dufour (en face de l'Hôtel Cap-aux-Pierres, distance 6 300 m) affichait un taux moyen de déplacement de -0,10 m/an. Entre 1981 et 2002, le taux a grimpé à - 0,22 m/an et la côte était toujours naturelle. C'est entre 2002 et 2012 que les premiers ouvrages furent installés à cet endroit. Grâce aux nouvelles structures de protection, le taux de migration a légèrement baissé pour atteindre - 0,12 m/an puisque l'érosion continue de se produire sur le linéaire non protégé à proximité. L'ensemble de ce secteur connaît, lors des 2^e et 3^e périodes, une érosion de plus en plus dominante et l'artificialisation qui s'en suit représente 10 % du secteur en 2002 et 32 % en 2012.

Dans le secteur 4, au nord-est de l'île, la tendance est positive entre 1964 et 1981, avec une valeur moyenne de 0,24 m/an. La création d'un remblai avec mur de protection sur

l'estran entre les secteurs 4 et 5 favorise l'accrétion sédimentaire à proximité, ce qui explique ce taux élevé. En 1964, une portion de 36 m est constituée d'un enrochement, tout près de l'actuel Hôtel-Motel Écumé par la Houle, ce qui représente 8 % du secteur. Puis, en 1981, plusieurs enrochements et un muret sont installés ce qui fait bondir ce pourcentage à 37 %. Entre 1981 et 2002, le taux de migration est quasiment nul (-0,01 m/an) tandis que l'artificialisation des berges devient majoritaire avec 57 %. Quelques travaux se rajoutent entre 2002 et 2012, car la côte devient artificialisée à 61 % et le taux de migration devient négatif à -0,15 m/an, taux principalement causé par un recul important de la petite pointe naturelle à terrasse de plage à la distance 6 600 m. La nouvelle infrastructure sur l'estran de l'hôtel-motel semble avoir amplifié les problèmes d'érosion de ce secteur au cours des dernières décennies en interceptant le transit sédimentaire. En effet, le recul de la ligne de rivage est passé de léger à moyen et ainsi causé la nécessité d'une stabilisation par de l'empierrement.

Le secteur 5 est entièrement naturel de 1964 à 2012 et se situe dans l'anse à Buttemont. L'hôtel-motel est exclu de ce secteur dans l'analyse. Le taux moyen entre 1964 et 1981 est de 0,39 m/an. Ce taux élevé est dû à deux segments. Le premier segment, adjacent au nouvel hôtel-motel, se situe entre 6815 m et 6935 m. Il a connu un taux moyen positif de 0,24 m/an. Ce secteur a progradé par l'augmentation de la largeur de plage, due au blocage partiel du transit sédimentaire par la pointe située immédiatement à l'ouest. Le deuxième segment se trouve vers la fin du secteur, entre les distances 7 100 m et 7 240 m, où se trouve la pointe de sable qui a progradé entre 1964 et 1981 avec un taux de migration moyen de 1 m/an. En 1964, la microfalaise était près de la route. Jusqu'à 1981, la pointe s'est ensablée et végétalisée, tandis que la zone centrale de la pointe est devenue marécageuse. De 1981 à 2002, le taux de migration moyen du secteur 5 était de 0,01 m/an. Le premier segment a connu une plus faible avancée de la ligne de rivage, mais reste positif à 0,12 m/an. Le deuxième segment d'intérêt est quant à lui en érosion avec -0,12 m/an. Entre 2002 et 2012, le secteur entier a une moyenne similaire à la séquence précédente, soit 0,02 m/an. Le tronçon près de l'hôtel-motel est alors en érosion avec -0,12 m/an en moyenne et la pointe sableuse

a connu une légère avancée de 0,11 m/an pour l'intervalle le plus récent. Le tronçon ciblé par un enrochement en 2014, qui se situe de la distance 6995 m à la distance 7105 m, avait des taux d'érosion de -0,05 m/an pour les périodes de 1964 à 1981 et de 1981 à 2002. Cependant, entre 2002 et 2012, une légère avancée de la ligne de rivage de 0,14 m/an a été observée, probablement due à une végétalisation de la microfalaise et du haut de plage.

Le secteur 6, dans l'anse du ruisseau rouge, a connu une artificialisation croissante, passant de 5 % en 1964 à 9 % en 1981, jusqu'à se stabiliser à 12 % en 2012. Cette constante nécessité de stabiliser la portion du pont du ruisseau s'est traduite par de nouveaux enrochements aux extrémités à travers les années. Le taux moyen de déplacement de la ligne de rivage était de 0,10 m/an entre 1964 et 1981, de 0,15 m/an entre 1981 et 2002, pour finalement diminuer à 0,02 m/an entre 2002 et 2012. Il est à noter que la plage à l'est du ruisseau rouge a connu une nette avancée de près de huit mètres en moyenne entre 1964 et 2012. La côte à l'ouest du ruisseau rouge a quant à elle été en moyenne stable sur 48 ans.

4.2. Taux de déplacements annuels récents (2007 à 2016)

Sur l'île aux Coudres, pour l'ensemble des 105 stations de mesures suivies par le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR, la moyenne du taux de migration présente une progradation de + 0,53 m/an entre 2007 et 2016 sur l'ensemble de l'île. Plus précisément, la moyenne des taux de déplacement annuel n'est que de + 0,047 m/an pour les 42 stations de mesures réparties sur les 8 km de linéaire côtier à l'étude du présent projet. La figure 48 présente les taux moyens récents par station de mesure sur l'ensemble du littoral à l'étude.

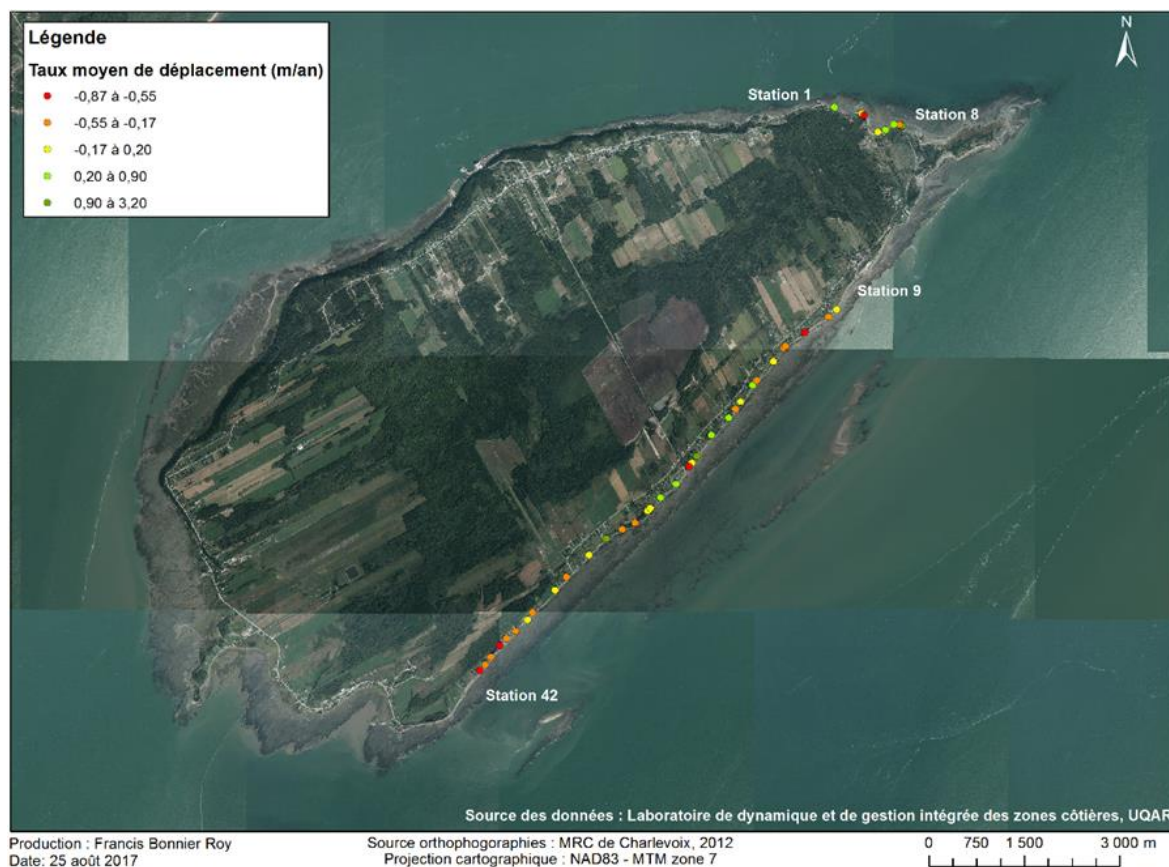


Figure 48. Taux moyens annuels de déplacement de la ligne de rivage (Stations de mesure du LDGIZC entre 2007 et 2016).

La figure 49a montre que des épisodes d'avancée et d'érosion périodiques peuvent se produire sur les berges de l'île, comme l'illustrent les stations 1, 16, 26 et 36 avec des taux annuels d'avancée entre 3 et 4,8 m. La même station 26 a aussi connu un recul de 3,25 m en une seule année. Cette érosion ponctuelle peut expliquer le besoin d'effectuer les travaux de protection des berges réalisés au cours des années pour protéger la route à proximité de la côte. La figure 49b présente le nombre d'années de mesure puisque certaines bornes ont été abandonnées et d'autres nouvelles ont été créées à travers les années.

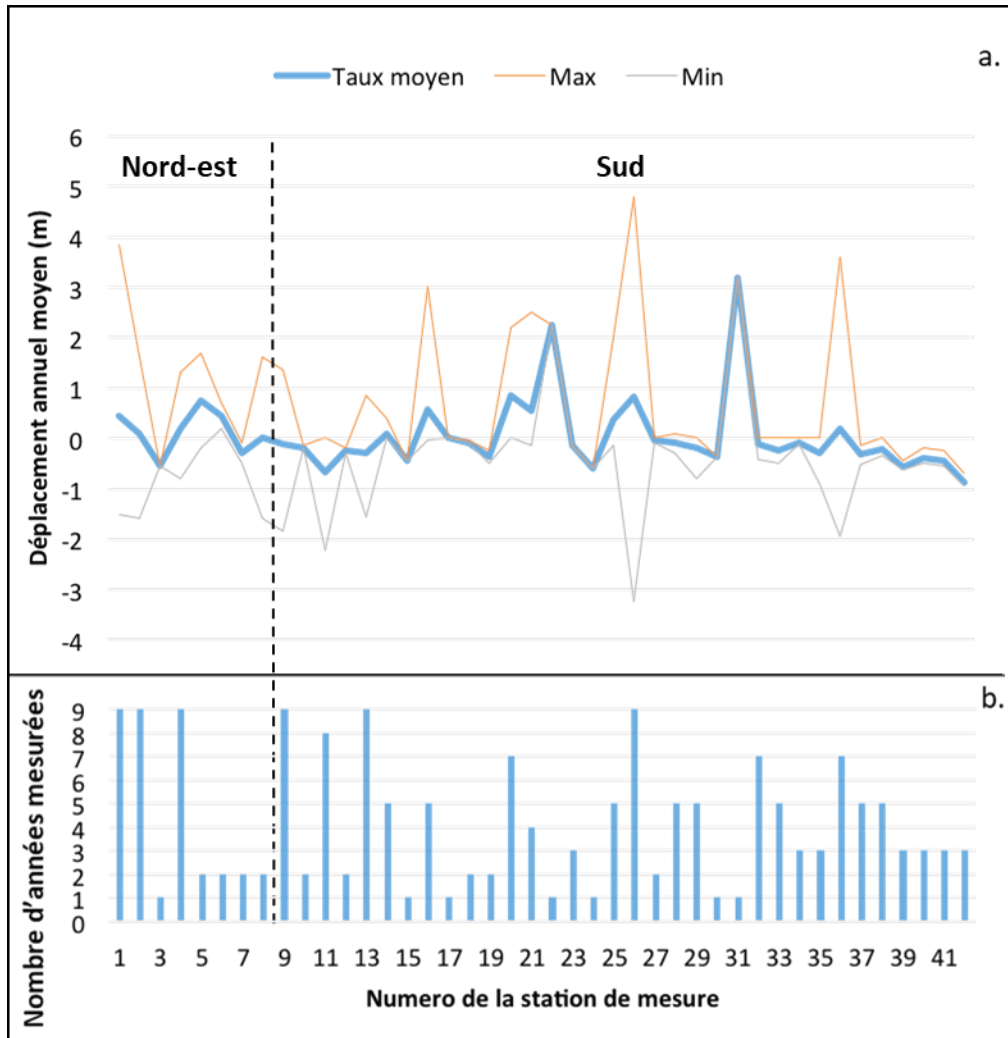


Figure 49. a. Taux de déplacement annuel mesuré sur les berges à l'étude grâce au réseau de stations de mesures d'érosion du LDGIZC. b. Nombre d'années de mesures par station.

4.3. Bilan récent de la ligne de rivage (2014 à 2016)

4.3.1. Artificialisation des berges

La figure 50 présente la ligne de rivage artificielle avant les travaux d'énrochements à l'automne 2014 ainsi que l'emplacement des nouveaux ouvrages. Les ouvrages de protection ont majoritairement été implantés au secteur 1 de la côte sud et au secteur 4 de la côte nord-est.



Figure 50. Ligne de rivage déjà artificielle avant les travaux de 2014 (trait rouge) et enrochements réalisés lors des travaux de 2014 (cercles noirs).

Les ouvrages de protection en août 2014 ont été comptabilisés pour produire le tableau 11. Les berges artificialisées représentaient 39 % de l'ensemble des 7 826 m de linéaire côtier, soit 3 023 m de structure de protection de diverses compositions. Ce

pourcentage est légèrement plus faible au nord-est avec 37 % des 1 487 m de côte, ce qui représente 544 m pour ce secteur. Au sud, c'est 2 479 m de berges qui étaient artificielles sur 6 339 m au total, soit 39 % de la côte sud.

Tableau 11. État de la côte selon l'orientation nord-est et sud (août 2014).

État de la côte	Nord-est	Sud
Naturelle	63 %	61 %
Artificialisée	37 %	39 %
Total	1 487 m	6 339 m

Le tableau 12 montre l'état de l'artificialisation de la côte après les travaux d'engrochement réalisés à l'automne 2014 (figure 50). Le niveau d'artificialisation du littoral est passé de 37 % à 52 % au nord-est de l'île et de 39 % à 54 % au sud. C'est un bond de 15 points de pourcentage à la fois pour la côte nord-est (230 m d'artificialisation) et la côte sud (972 m).

Tableau 12. État de la côte après les travaux d'engrochement de l'automne 2014 sur la côte nord-est et sud.

État de la côte	Nord-est	Sud
Naturelle	48 %	46 %
Artificialisée	52 %	54 %
Total	1 487 m	6 339 m

Le tableau 13 présente la superficie (m²) et le volume de plage (m³) affectés par la mise en place des ouvrages de protection sur le haut de plage des plages à l'étude.

Tableau 13. Impacts de l'empiètement sur la plage des nouveaux engrochements de 2014.

Côte	Superficie (m ²)	Volume (m ³)
Nord-est	569	467
Sud	4 142	1 637
Total	4 711	2 105

4.3.1.1. Types d'artificialités

Sur les 39 % de côtes artificialisées en août 2014, les enrochements sont les types d'ouvrages les plus représentés avec 83,4 % du linéaire côtier, dont 66,1 % au nord-est et 87,2 % au sud (tableau 14). Les murets de toutes sortes arrivent seconds avec 9,3 % du total, dont la majorité provient du muret de protection de l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle. Le gabion (casier constitué de fils de fer tressés et rempli de pierres), qui occupe 88 m, est situé sur la côte sud et était partiellement endommagé en 2014. Dans l'ensemble, 87 % des ouvrages étaient en bon état, 9 % étaient partiellement endommagés et 4 % étaient complètement endommagés (un enrochement près du chemin de la Baleine et le muret dans l'anse à Mailloux).

Tableau 14. Type d'artificialité sur l'ensemble de la ligne de rivage étudiée - août 2014.

Types d'artificialité	Nord-est		Sud		Total
	Pourcentage (%)	Longueur (m)	Pourcentage (%)	Longueur (m)	
Enrochement	66,1 %	360	87,2%	2 162	83,4%
Remblais de petits blocs	-	-	5,3%	131	4,3%
Muret de pierre	-	-	2,3%	56	1,9%
Gabion	-	-	3,6%	88	2,9%
Muret de blocs de béton	-	-	1,6%	41	1,3%
Muret de béton	19,0 %	104	-	-	3,4%
Muret de béton et enrochement	14,9 %	81	-	-	2,7%
Total	100 %	544	100 %	2 479	100 %

Puisque la solution adoptée pour protéger les berges lors des travaux de l'automne 2014 a été l'enrochement, il va de soi que le pourcentage des enrochements a augmenté de 83,4 % à 90,5 % (tableau 15). Les autres types d'artificialités (muret, gabion et blocs déversés) restent négligeables en tant que solution de protection des berges en érosion avec 9,5 %. Au

nord-est, le muret représente tout de même 20,2 % des types d'artificialité, car il s'agit de la portion de côte artificialisée par l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle.

Tableau 15. Type d'artificialité sur l'ensemble de la ligne de rivage étudié – août 2015.

Types d'artificialité	Nord-est		Sud		Total
	Pourcentage (%)	Longueur (m)	Pourcentage (%)	Longueur (m)	
Enrochement	79,8 %	617	92,9 %	3205	90,5 %
Enrochement avec gabion	-	-	0,7 %	25	0,6 %
Gabion	-	-	3,1 %	106	2,5 %
Mur de blocs de béton	-	-	1,2 %	41	1,0 %
Muret	20,2 %	157	-	-	3,7 %
Muret de blocs de pierre	-	-	1,1 %	38	0,9 %
Muret de pierre	-	-	0,5 %	18	0,4 %
Blocs déversés	-	-	0,5 %	18	0,4 %
Total	100 %	774	100 %	3 451	100 %

4.3.2. État de la ligne de rivage

En août 2014, la ligne de rivage était stable à 72 % (5 649 m), 24 % de la côte (1 847 m) était semi-active et 4 % (330 m) était active. Plus spécifiquement, le secteur nord-est avait légèrement plus de berges stables (76 %) que la côte sud (71 %) (figure 51).

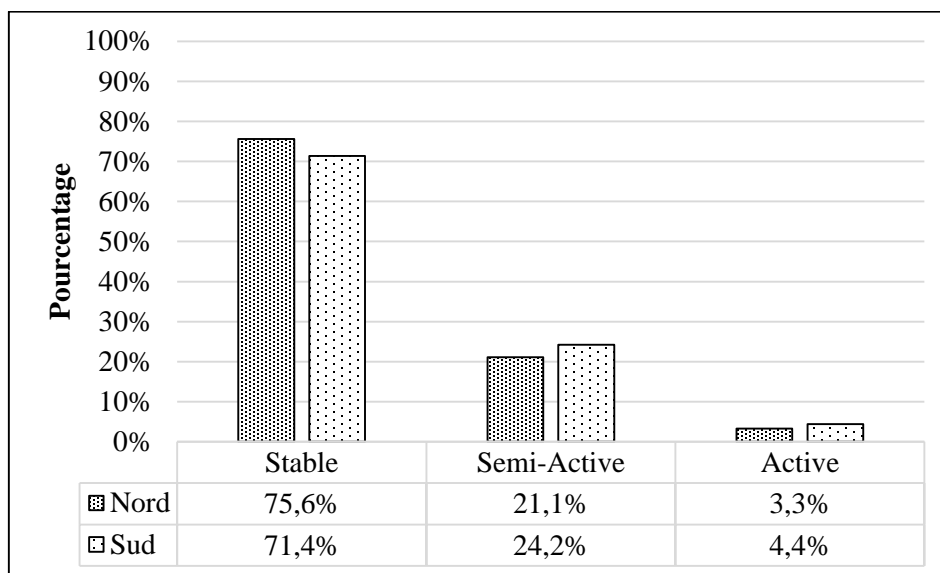


Figure 51. État de la ligne de rivage en août 2014.

Sur la côte nord-est, 48 % du littoral stable était attribué à une berge artificialisée tandis que 52 % était naturelle. Sur la côte sud, c'est 59 % du littoral stable qui était naturel, contre 41 % de côte artificialisée.

Au nord-est, la totalité de la côte semi-active était naturelle, tandis qu'au sud 60 % des côtes semi-actives étaient artificielles contre 40 % de côtes naturelles. Les berges actives sont entièrement associées aux berges naturelles.

À la suite des travaux d'engrochement sur plusieurs tronçons du littoral à l'étude, le pourcentage de côte stable a augmenté passant de 72 % à 81 % entre 2014 et 2015. Ce sont surtout les berges actives et semi-actives en 2014 ayant été protégées par les engrochements qui entraînent une diminution du littoral en érosion en 2015.

4.3.2.1. Côte sud

La figure 52 montre l'évolution de l'état de la ligne de rivage de la côte sud sur les trois années de suivi. La proportion des berges stables a bondi de 19 % entre 2014 et 2015. Tandis que les côtes semi-actives ont diminué de 10 % entre 2014 et 2015, celles actives ont légèrement augmenté de 1 %. En août 2016, près de 2 ans après les travaux, il y avait moins

de segments de côte stable qu'en 2014 (diminution de 5 %), tandis que la longueur totale des tronçons semi-actifs et actifs a augmenté de 9 % et 32 % respectivement.

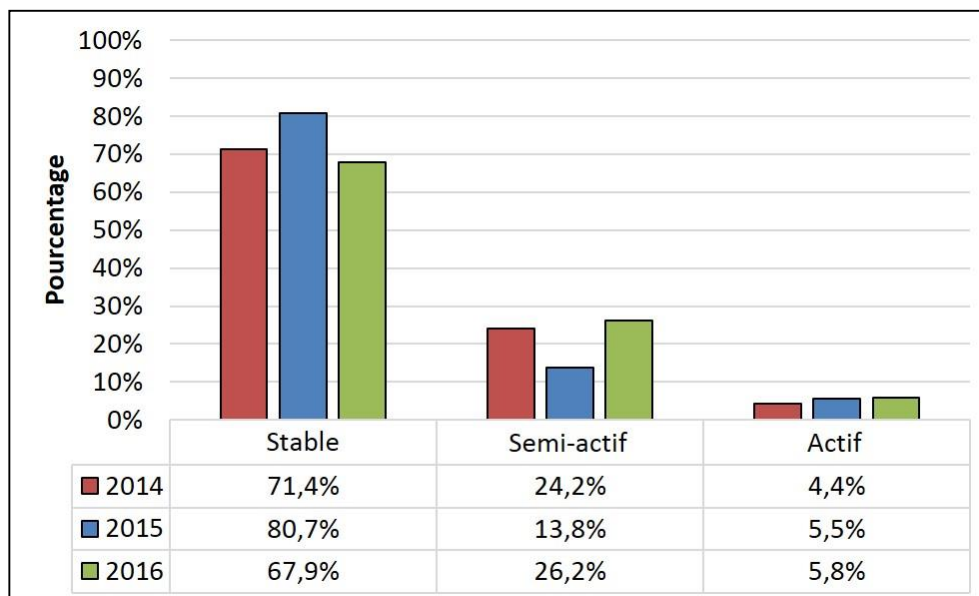


Figure 52. État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côte sud).

Après les travaux d'enrochement, les berges du secteur 1 sont devenues stables et le sont restées jusqu'en 2016 puisque les ouvrages étaient toujours en bon état (tableau 16).

Tableau 16. Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur sur la côte sud entre 2014 et 2016.

Secteurs	Années	Stable	Semi-actif	Actif
Secteur 1	2014	58,0 %	39,1 %	2,9 %
	2015	100 %	0 %	0 %
	2016	100 %	0 %	0 %
Secteur 2	2014	64,9 %	20,8 %	14,3 %
	2015	55,2 %	30,2 %	14,6 %
	2016	47,5 %	44,2 %	8,3 %
Secteur 3	2014	84,1 %	15,9 %	0 %
	2015	81,7 %	14,0 %	4,2 %
	2016	57,4 %	34,1 %	8,4 %

Dans le secteur 2, les berges étaient stables à 64,9 % lors de la caractérisation côtière d'août 2014 alors que ce chiffre a diminué pour atteindre 55,2 % à l'été 2015. Certains tronçons naturels stables ayant changé d'état, le pourcentage des berges semi-actives entre 2014 et 2015 a augmenté de 9 points. Ce sont quelques segments dans la première moitié du secteur qui ont connu des modifications dans leur état, tels que les tronçons situés entre deux enrochements à environ 300 m à l'est du chemin de la Baleine ainsi que ceux à l'ouest de l'enrochement devant le chemin de la Traverse. Au milieu du secteur, le gabion s'est détérioré, ce qui a fait augmenter de 1 % les côtes en érosion active. Par contre, à l'extrémité est du gabion, 40 m de berges ont été considérées stables alors qu'elles étaient semi-actives en 2014. Une petite portion de côte de 18 m a aussi eu des blocs déversés sur le haut de plage, ce qui a changé l'état d'active à stable. En 2016, ce secteur a connu une baisse de la stabilité des berges, une augmentation de l'état semi-actif et une baisse de l'érosion active. C'est plutôt les berges près du gabion qui étaient considérées instables en 2015 qui ont été recolonisées jusqu'en 2016 par de la végétation, lui redonnant le caractère semi-actif. Le premier tronçon naturel du secteur à l'est de la fin du nouvel enrochement (en face de l'intersection avec le chemin de la Baleine) s'est toutefois aggravé avec une érosion accélérée par effet de bout, passant de semi-actif à actif (Figure 53). Plusieurs tronçons stables adjacents aux enrochements en 2015 ont été catégorisés semi-actifs en 2016, ce qui explique l'augmentation des berges semi-actives de ce secteur.

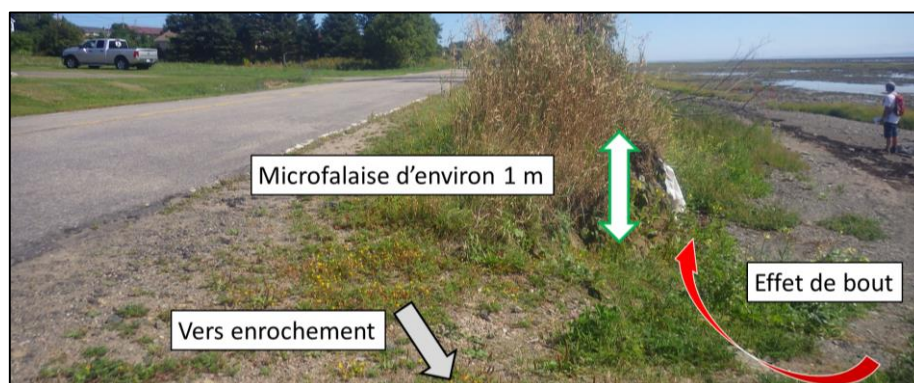


Figure 53. Érosion accélérée par l'effet de bout à l'est du nouvel enrochement (côte sud). Photo prise le 19 août 2016.

Dans le secteur 3, les segments de côtes stables ont connu une diminution de 3,4 points de pourcentage entre 2014 et 2015, passant de 84,1 % à 80,7 %. Les berges semi-actives sont restées stables à 16 % tandis que les berges actives ont augmenté de 4 à 8 points de pourcentage en un an. C'est un tronçon naturel à environ 100 m à l'est du chemin de la Traverse, situé entre deux vieux enrochements, qui a connu un changement d'état de semi-actif à actif entre 2014 et 2015, dont l'érosion de la microfalaise et du haut de plage a mis à nu leur surface précédemment végétalisée. Un autre tronçon 55 m plus loin, aussi entre deux vieux enrochements, a connu un changement de stable à semi-actif en 2015 à cause de l'effet de bout à l'extrémité ouest de l'enrochement. Environ 850 m à l'est du chemin de la Traverse, une série de vieux enrochements semble avoir eu un impact sur l'état de la ligne de rivage d'un segment de côte naturelle, car celui-ci était stable et semi-actif en 2014 pour devenir semi-actif et actif en 2015. En 2016, un constat plus grave est visible. La stabilité de la côte a chuté de 24,3 points de pourcentage en un an pour des gains dans les catégories semi-actives (20,1 points) et actives (4,2 points). Premièrement, un tronçon naturel à l'est du chemin de la Traverse a été complètement désigné comme actif tandis qu'une portion était semi-active en 2015. Ce sont plusieurs tronçons adjacents aux enrochements sur l'ensemble du secteur 3 qui ont connu des changements d'état de la ligne de rivage, passant de stables à actifs entre 2015 et 2016.

Dans l'ensemble, le secteur 1 est plus stable en raison de l'enrochement de la côte. Par contre, dans les secteurs 2 et 3, les enrochements semblent créer des effets de bout, visibles surtout par une réactivation de l'érosion des secteurs semi-actifs à proximité.

4.3.2.2. Côte nord-est

La figure 54 montre l'évolution de l'état de la ligne de rivage de la côte nord-est entre 2014 et 2016. La proportion des berges stables a augmenté de 9 points entre 2014 et 2015. Celle des côtes semi-actives a diminué de 5,7 points tandis qu'il n'y avait plus de segments considérés actifs. Près de 2 ans après les travaux de 2014, la stabilité de la côte n'a cessé

d'augmenter pour atteindre 85,8 % en 2016 tandis que les berges semi-actives étaient au plus bas pourcentage de l'étude avec 14,2 %.

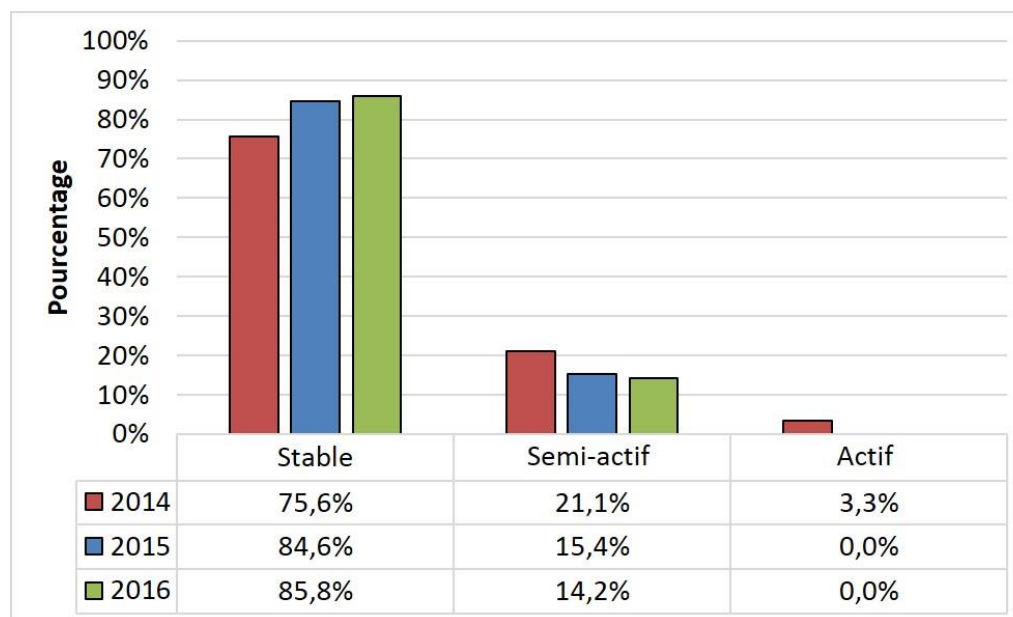


Figure 54. État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côte nord-est).

Au secteur 4, l'ensemble de la côte a été enrochée, faisant passer la stabilité à 100 % pour la caractérisation de 2015 et 2016 (tableau 17).

Tableau 17. Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur de la côte sud entre 2014 et 2016.

Secteurs	Années	Stable	Semi-actif	Actif
Secteur 4	2014	81,0 %	19,0 %	0,0 %
	2015	100 %	0 %	0 %
	2016	100 %	0 %	0 %
Secteur 5	2014	76,1 %	15,0 %	8,9 %
	2015	82,2 %	17,8 %	0 %
	2016	90,0 %	10,0 %	0 %
Secteur 6	2014	68,4 %	31,6 %	0 %
	2015	69,2 %	30,8 %	0 %
	2016	63,2 %	36,8 %	0 %

Au secteur 5, la portion de côte active a été enrochée faisant passer cette catégorie de 8,9 % à 0 % entre 2014 et 2015. Une portion de ce secteur enroché ayant été considérée semi-active en 2014 est devenue stable à cause de l'implantation de l'ouvrage. Néanmoins, la berge adjacente à l'est est devenue semi-active alors qu'elle était stable lors de l'état initial. En 2016, cette portion de côte s'est à nouveau stabilisée par une végétalisation du haut de plage et de la microfalaise ainsi qu'une diminution de la hauteur de microfalaise. Par contre, le tronçon à l'ouest qui était déjà semi-actif en 2014 et 2015 s'est allongé en 2016 de 10 mètres.

Au secteur 6, l'état de la côte n'a pas tellement évolué entre 2014 et 2015, sauf au niveau de l'enrochement fait au pont du ruisseau rouge, où l'état est passé de semi-actif à stable. En 2016, une portion de la terrasse de plage à écueil rocheux près de la pointe de l'anse à Buttemont a connu un changement, passant de stable à semi-active. Le segment de berge à l'est du ruisseau est resté stable durant tout le suivi.

Sur l'ensemble de la côte nord-est, la situation de l'état de la côte des berges à l'étude s'est améliorée. Il reste toutefois à surveiller le potentiel effet de bout créé par les nouveaux enrochements du secteur 5 dans l'anse à Buttemont et au secteur 6. En ce qui concerne les enrochements, ils ont rempli leur fonction en permettant d'arrêter le recul de la berge au nord-est et dans le secteur 1. En revanche, dans le secteur 2 et de manière plus importante dans le secteur 3, les enrochements mis en place durant les vingt dernières années ont déstabilisé la dynamique côtière avec des effets de bout et une augmentation de l'érosion.

4.3.3. Hauteur des microfalaises

Sur la côte nord-est, 44 % des berges naturelles sont sans microfalaise tandis que ce chiffre est de 16 % pour la côte sud en 2014, avant les récents travaux d'enrochement (tableau 18). À noter qu'une partie des côtes artificielles, 4,6 % ou 363 m, possède une microfalaise en arrière de l'artificialité, preuve de leur inefficacité dans certains cas comme celui d'un gabion déstructuré.

Tableau 18. Relation entre l'état de la côte et la catégorie de microfalaise – août 2014.

Catégorie de microfalaise	Nord-est	Sud
Absence - Naturelle	44 %	16 %
Absence - Artificielle	35 %	34 %
20 à 50 cm	17 %	38 %
50 à 100 cm	2 %	11 %
100 à 150 cm	2 %	1 %

Le pourcentage de berges artificielles sans microfalaise est similaire sur tout le linéaire avec 34-35 %. Environ 4 % du littoral artificialisé présente une microfalaise de hauteur variable derrière les ouvrages. En proportion, c'est la côte sud qui présente le plus de petites et moyennes microfalisées (inférieures à 1 m) avec 49 %, comparativement à 19 % sur la côte nord-est. Au nord-est, 2 % de la côte ayant des microfalisées dépasse les 1 m contre 1 % au sud. Les petites microfalisées sont généralement présentes partout au sud tandis qu'au nord-est, elles sont présentes près de l'anse de Buttemont. Les microfalisées entre 50 à 100 cm de hauteur sont surtout au niveau de l'enrochement construit à l'automne 2014 vis-à-vis du profil 5 (anse à Buttemont, secteur 5). Les berges adjacentes à ce segment ont des microfalisées de 20 à 50 cm de hauteur. Au sud, ces traces d'érosion de taille moyenne (50-100 cm) sont surtout présentes entre la pointe à Simon et le chemin de la Traverse, soit sur les secteurs 1 et 2. Une petite portion du secteur 3, près du chemin de la Traverse, possède aussi une microfalaise de taille moyenne. La grande microfalaise (supérieure à 1 m) située au nord-est se trouve dans l'anse à Mailloux dans le secteur 4, derrière le muret de béton endommagé. Au sud, une portion de grande microfalaise est positionnée au centre du secteur 2. Il est intéressant de souligner que 40 % des microfalisées moyennes de la côte sud apparaissent derrière les berges artificialisées. C'est ce qui s'est produit sur les berges protégées par le gabion en mauvais état au centre du secteur 2. C'est un bon exemple puisqu'il ne permet plus d'arrêter efficacement l'érosion provoquée par les vagues lors de haut niveau d'eau.

Il est important de préciser que la hauteur moyenne par tronçon est calculée à l'aide d'un galon à mesurer et que la hauteur du tronçon est variable le long de celui-ci. C'est

pourquoi il y a des différences minimales entre les années pour un même segment. La catégorisation d'une hauteur moyenne se joue parfois de très peu entre une catégorie ou une autre. Mais ce sont surtout la mise en place des enrochements qui modifient la classe des hauteurs des microfalaises. Néanmoins, des constats importants peuvent être exposés grâce à ces résultats.

4.3.3.1. Secteur sud

De la côte sud, le pourcentage de la côte naturelle caractérisée par l'absence d'une microfalaise est relativement stable entre 2014 et 2016 (figure 55). La part des microfalaises de 20 à 50 cm a diminué brusquement entre 2014 et 2015, certaines d'entre elles ayant été transférées dans les catégories absence – artificielles à la suite des travaux en 2014 et quelques-unes dont l'érosion s'est accentuée (désormais dans la classe 50 à 100 cm). La proportion de microfalaises dans cette dernière catégorie n'a pas cessé d'augmenter tandis que celles supérieures à 1 m, qui était peu nombreuses en 2014, étaient plus fréquentes en 2015 et absentes en 2016.

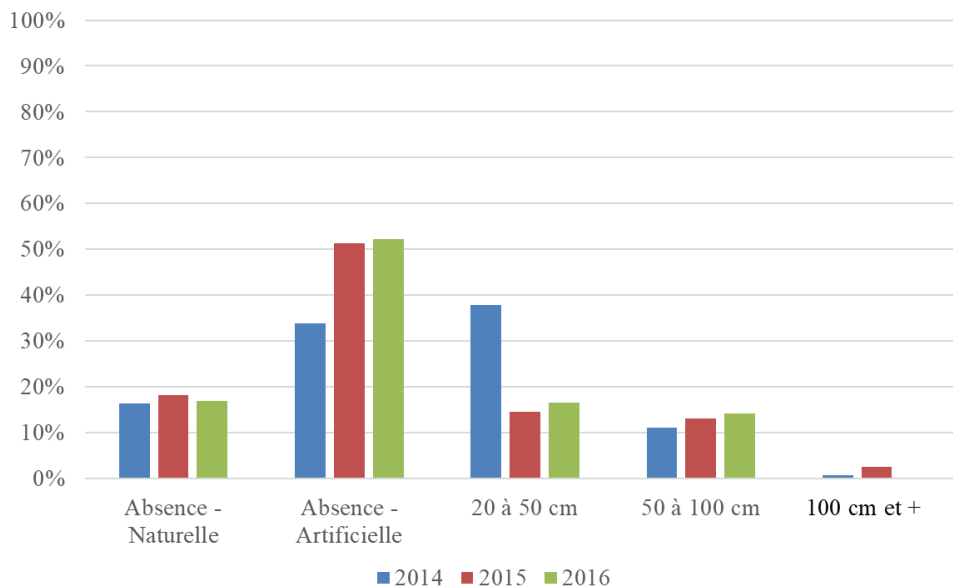


Figure 55. Catégories de microfalaises de la côte sud de 2014 à 2016.

À partir des travaux de 2014, l'ensemble du secteur 1 est devenu sans microfalaises à l'exception d'une portion de 55 m ayant une microfalaise entre 20 et 50 cm de hauteur derrière l'enrochement situé à 620 m à l'ouest du chemin de la Baleine.

Dans le secteur 2, un tronçon de berges où est situé le gabion était caractérisé par une microfalaise moyenne en 2014 alors qu'en 2015, celle-ci a dépassé 100 cm pour être transférée dans la catégorie 100 cm +. Un peu plus loin à l'est de ce segment, 100 m de berges avait des microfalaises entre 20 à 50 cm de hauteur ont vu leur commandement augmenté pour se retrouver dans la catégorie des 50 à 100 cm de hauteur. De plus, une augmentation de la taille de la marque d'érosion a été observée à l'ouest de l'enrochement devant le chemin de la Traverse (passant d'une microfalaise de 20 à 50 cm à une microfalaise de 50 à 100 cm). En 2016, il n'y avait plus de segments associés aux plus hautes microfalaises, ce pourcentage étant alors transféré dans les segments de classe moyenne (50 à 100 cm). Ainsi la microfalaise supérieure à 100 cm derrière le gabion a diminué pour être caractérisée entre 50 et 100 cm de hauteur. Cela s'explique par une accumulation de sédiments au pied de la microfalaise et une végétalisation de celle-ci diminuant sa hauteur moyenne de la base au sommet. A contrario, il a été observé que les segments adjacents aux enrochements ont subi une augmentation de la hauteur des microfalaises.

Au secteur 3, plusieurs segments, dont celui où la microfalaise s'est accentuée, ont changé de classe passant de la catégorie 20 à 50 cm à celle de 50 à 100 cm, ou passant de la catégorie 50 à 100 cm à celle de 100 à 150 cm. Ces changements se sont produits majoritairement sur les secteurs adjacents aux enrochements déjà présents avant les travaux de 2014. En 2016, la microfalaise catégorisée entre 100 et 150 cm plus près du chemin de la Traverse a vu son commandement diminuer et a été classée dans la catégorie inférieure (50 à 100 cm). Les côtes naturelles ont connu plus d'érosion, en passant d'aucune microfalaise à la catégorie 20 à 50 cm. Certains tronçons de catégorie 50 à 100 cm ont aussi été transférés dans la catégorie 20 à 50 cm.

4.3.3.2. Secteur Nord-est

Sur la côte nord-est, la catégorie absence de microfalaise sur une côte naturelle est passée de 44 % à 35 % de 2014 à 2015, puis le pourcentage est redescendu à 42 points en 2016 (figure 56). La catégorie absence de marque d'érosion sur des berges artificielles est passée de 35 % à 52 % après les travaux d'enrochement. Les segments de côte avec des microfalaises de 20 à 50 cm ont diminué constamment entre 2014 et 2016. Ce pourcentage a été transféré dans la catégorie absence – artificielles à la suite des travaux en 2014 et par la suite dans la catégorie naturelle entre 2015 et 2016. Les microfalaises supérieures à 50 cm ont été enrochées lors des travaux de 2014 et aucune n'a été repérée lors de la segmentation côtière en 2015 et 2016.

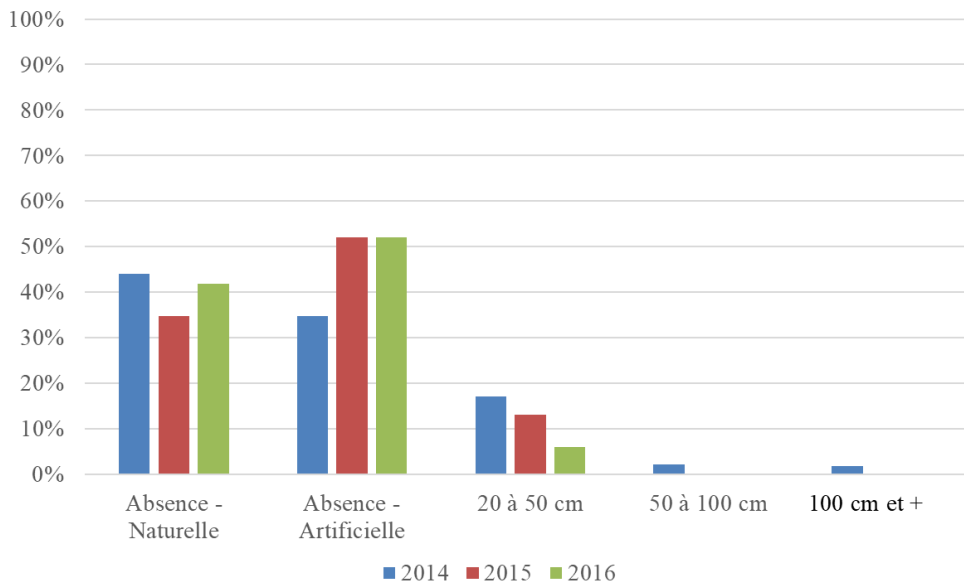


Figure 56. Catégories de microfalaises de la côte nord-est de 2014 à 2016.

Au secteur 4, la mise en place des enrochements sur les plages naturelles a fait en sorte que ces segments étaient désormais considérés comme faisant partie de la catégorie absence de microfalaise avec artificialité lors de la caractérisation de 2015 et 2016.

Au secteur 5, une microfalaise de la catégorie 20 à 50 cm a été rapportée en 2015 de part et d'autre du nouvel enrochement, sur 24 m à l'ouest et sur 51 m à l'est de cet ouvrage.

La même situation s'est produite à l'ouest d'un enrochement réalisé à 85 m à l'ouest du pont, où une microfalaise entre 20 à 50 cm est apparue. Les microfalaises entre 20 à 50 cm des secteurs 5 et 6 repérées en 2015 n'ont pas été assez importantes pour être considérées comme petites microfalaises lors de la segmentation de 2016. C'est pourquoi là où les berges sont naturelles au secteur 5, elles n'ont aucun signe d'érosion significatif. Au secteur 6, la portion de 25 m qui avait été désignée avec des microfalaises entre 20 et 50 cm était en 2016 caractérisée comme sans microfalaise, leur hauteur étant inférieure à 20 cm.

4.3.4. Relation haut de plage et artificialité

Généralement, le haut de plage (ou haute-plage) est la portion végétalisée située sur la section supérieure du haut estran d'une côte basse sableuse, au pied d'une microfalaise souvent héritée de l'action des vagues lors d'événements de tempête.

La figure 57 montre que les berges artificielles ayant un haut de plage végétalisé ne représentent que 20 % tandis que 80 % d'entre elles sont dépourvus de cette végétation. Puisque la plupart des ouvrages de protection de l'île sont situés sur le haut de plage, l'empiètement qui est créé empêche à plusieurs endroits la formation d'un haut de plage végétalisé.

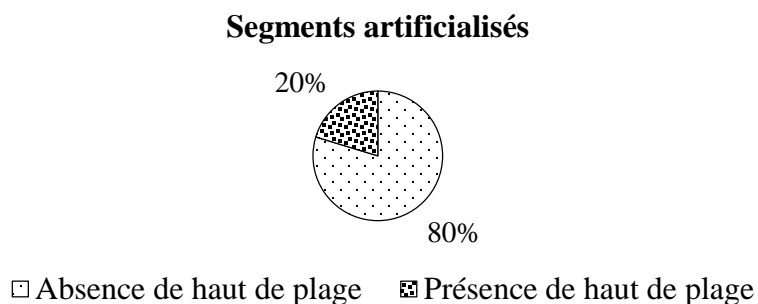


Figure 57. Relation entre les segments sans haut de plage et l'artificialité de la côte – août 2014.

En 2014, cette relation n'est pas aussi marquée dans les secteurs 5 et 6 que dans les autres secteurs (tableau 19). Dans le secteur 5, seulement 63 % du linéaire côtier sans haut de plage est ainsi associé à une côte artificielle. Dans le secteur 6, ce pourcentage est faible (34%), la majorité des côtes sans haut de plage étant naturelle. Ceci est expliqué par le type de côte, car une grande partie du linéaire de ce secteur est constituée d'une terrasse de plage à estran rocheux, où un haut de plage peut difficilement s'implanter en raison des affleurements rocheux qui empêchent la formation de plage. Pour le reste des secteurs, la grande majorité des côtes sans haut de plage est associée à une côte artificielle.

Tableau 19. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2014.

État de la côte	Secteurs					
	1	2	3	4	5	6
Artificielle	100 %	100 %	97 %	91 %	63 %	34 %
Naturelle	0 %	0 %	3 %	9 %	37 %	66 %

La figure 58 montre l'évolution de la relation entre l'absence de haut de plage végétalisé et l'artificialisation de la côte. La tendance pour 2015 et 2016 est similaire à celle observée en 2014. L'empiètement de l'ouvrage de protection sur le haut de plage est la principale cause de ces résultats. Par contre, une légère augmentation de l'absence de haut de plage est remarquée dans les secteurs naturels. Toutefois, dans la grande majorité des secteurs naturels un haut de plage est observé contrairement aux secteurs artificiels.

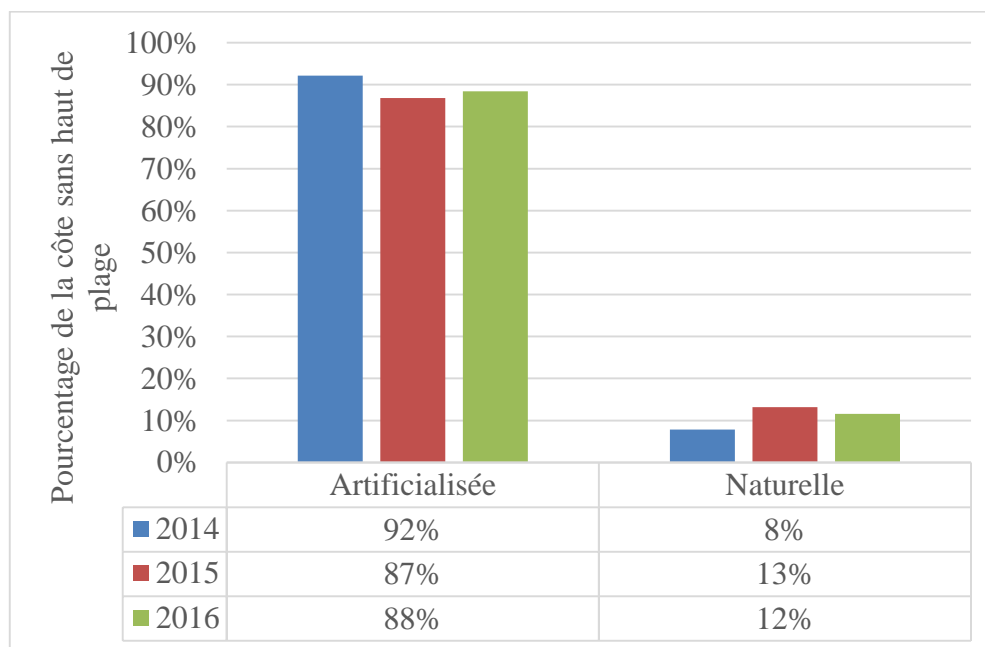


Figure 58. Relation entre l'absence de haut de plage et l'état de la côte de 2014 à 2016.

En 2015, cette relation est toujours moins marquée dans les secteurs 5 et 6, mais la proportion de l'absence de haut de plage devant une artificialité a augmenté de 8 et 10 points respectivement (tableau 20). Cette augmentation est due aux travaux d'engrochement réalisés dans ces secteurs à l'automne 2014. Le secteur 3 a vu cette relation diminuer de 97 % à 69 %. Cela signifie qu'il y a plus de berges naturelles dans ce secteur de la côte sud dont la végétation de haut de plage est absente. Les secteurs 1, 2 et 4 sont toujours à près du 100 % de côtes artificielles sans haut de plage.

Tableau 20. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2015.

État de la côte	Secteurs					
	1	2	3	4	5	6
Artificielle	100 %	94 %	69 %	100 %	71 %	44 %
Naturelle	0 %	6 %	31 %	0 %	29 %	56 %

En 2016, la situation des secteurs 3 et 4 est similaire à celle de 2015 (tableau 21). Au secteur 5, la végétation de haut de plage devant les berges artificielles qui existait lors des

levés 2014 et 2015 a presque entièrement disparu. C'est une tendance qui semble être en progression pour ce secteur. Au secteur 6, la tendance est stable avec presque autant de segments sans haut de plage en présence et en l'absence d'artificialité.

Tableau 21. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2016.

État de la côte	Secteurs					
	1	2	3	4	5	6
Artificielle	100 %	100 %	70 %	100 %	90 %	44 %
Naturelle	0 %	0 %	30 %	0 %	10 %	56 %

En somme, puisque les enrochements sur les berges de l'île aux Coudres sont installés sur le haut de plage, il est rare de voir un haut de plage végétalisé se former au-devant des ouvrages de protection, comme le montre les pourcentages de tous les secteurs. Néanmoins, selon l'emplacement et la largeur de l'artificialité, il est possible qu'une végétalisation se produise sur des segments enrochés. C'est le cas du secteur 1 où un haut de plage s'est formé devant certains segments d'enrochements. La formation d'un haut de plage devant l'enrochement semble avoir été favorisée par la recharge de sédiments provenant de la clé de l'enrochement. Ceci semble favoriser la résilience du milieu après ce changement important sur la côte. La même chose est remarquée sur certains segments où le haut de plage devant des enrochements a été végétalisé entre 2014 et 2016. En ce qui concerne le secteur 6, la configuration du littoral est particulière en raison des affleurements rocheux sur le haut estran, de la présence de l'enrochement lié au pont du ruisseau Rouge et du secteur en progradation à l'est de celui-ci. Ce dernier possède une ligne de rivage très dense en végétaux permanents et ne possède pas de haut de plage tel que vu ailleurs sur l'île. Ce tronçon est stable et ne présente aucun signe d'érosion, même s'il ne comporte pas de haut de plage végétalisé.

4.4. Évolution récente de la sédimentologie de la plage

4.4.1. État initial de la proportion des sédiments de moins de 2 mm et des graviers - petits blocs – Août 2014

Cette section fait préambule aux résultats de la granulométrie sur les sédiments dont le diamètre est inférieur à 2 mm. Elle permet d'évaluer la composition de l'état initial, avant la mise en place des enrochements, des échantillons dans leur totalité en fonction du poids respectif des deux groupes de taille, soit les sédiments dits grossiers (graviers à petits blocs supérieurs à 2 mm de diamètre) et les sédiments fins (sables, limons et argiles) inférieurs à 2 mm de diamètre.

Sur les profils de la côte nord-est, le haut de plage est composé à forte majorité de sédiments fins avec une moyenne de 87 % (figure 59). Les échantillons du haut estran sur le premier tiers (HE1) sont généralement plus fins que celui du deuxième tiers plus près de la flexure (HE2), s'approchant de 50 %. Les échantillons du bas estran présentent, comme le HE2, une proportion de sédiments fins autour de 50 %, sauf sur le profil 5 qui présentait une faible proportion de sédiments fins avec seulement 17 %. Le BE2 du profil 7 a une proportion de sédiments fins plus importante (91 %) que les échantillons des deux autres profils, qui montrent près de 50 % de sédiments fins. Le profil 7, étant plus court et plongeant plus rapidement dans le chenal nord de l'île, présente moins de graviers de schiste au bas du profil. Le roc de la zone intertidale est souvent à nu avec quelques blocs erratiques provenant de la côte nord (Bouclier canadien). Les particules fines en suspension dans l'eau se déposent quand l'eau se retire lors de la marée basse, composant un placage de sédiments fins dans ce secteur. Dans l'anse à Buttemont (profil 5 et 6), la plateforme rocheuse étant plus grande qu'au profil 7, elle permet une accumulation de petits graviers de schistes provenant de la météorisation de cette dernière, expliquant la présence de matériaux supérieurs à 2 mm de diamètre. Les échantillons BE3, avec près de 50 % de sédiments fins, n'ont été récoltés que sur les profils 5 et 6 en raison de l'accessibilité.

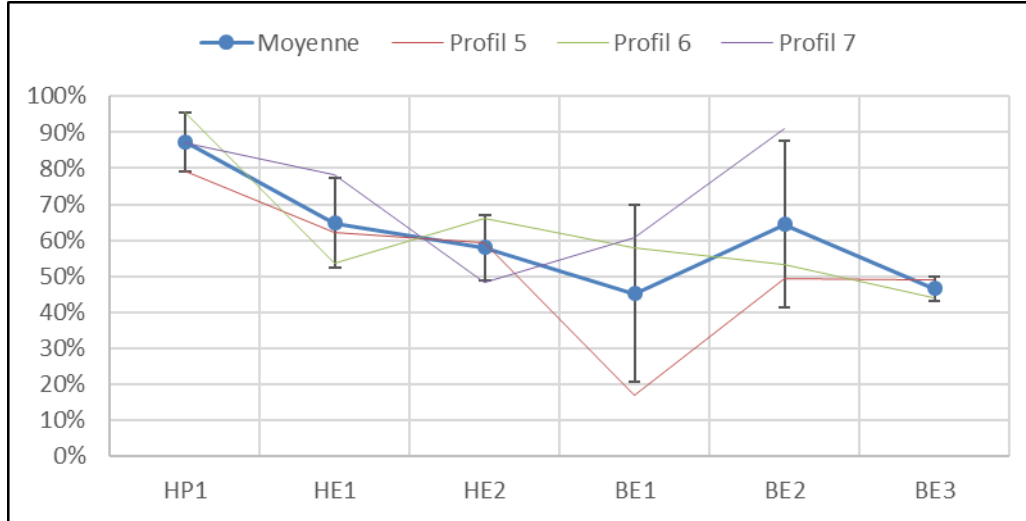


Figure 59. Moyenne des proportions et pourcentages par profil de la matrice fine (<2 mm de diamètre) des échantillons sur l'ensemble des profils (5, 6, 7) de la côte nord-est- août 2014.

Sur la côte sud, la moyenne de la fraction fine du haut de plage est de 83 %, ce qui se rapproche du résultat obtenu sur la côte nord-est. Par contre, le profil 8 obtient une proportion plus faible (51 %), expliqué par une plage moins large, une présence des signes d'érosion plus marqués et un haut de plage plus court que sur les autres profils du sud. Le haut estran contient en général une proportion de graviers plus élevée par rapport au total de la masse de l'échantillon (figure 60). Néanmoins, le haut estran est proche de 50 % en termes de sédiments fins et grossiers, ce qui indique un mauvais triage des sédiments de la plage lié à des apports sédimentaires différents (cordon de basse mer et plateforme rocheuse). Le profil 4 (déjà artificialisé) présente des résultats sur le haut estran différent des plages naturelles. Il y a davantage de sédiments fins au bas de la plage (96 %) qu'en haut (35 %), plus près de l'enrochement. Il est possible que ce granoclassement atypique soit expliqué par un effet de réflexion de l'énergie des vagues sur l'ouvrage. Sur le bas estran, la proportion de sédiments fins est plus importante. Plus précisément, les sédiments du BE1 sont composés davantage de particules fines que sur la côte nord-est, probablement en raison du captage des limons par les herbiers, d'une moins grande exposition aux vagues, mais aussi des courants de marée particulièrement élevés autour de l'île transportant des sédiments fins. D'ailleurs, les herbiers sont aussi une barrière aux graviers et sables qui sont transportés par la nappe de retrait vers

le bas de plage, et sont retenus par les plants de spartine alterniflore. De cette façon les herbiers aident à maintenir le matériel qui compose la plage. Les particules fines sont prédominantes tout le long des profils sur le bas estran, mais connaissent des variations au centre de la plateforme rocheuse (BE2 et BE3), probablement en lien avec une présence plus marquée de graviers de schistes et de blocs de grès. Les sédiments au niveau de BE4 se trouvent dans la zone sablo-vaseuse entre la plateforme rocheuse et le cordon de basse mer donc ils sont assez fins. Les échantillons BE5 et BE6 sont plus près du cordon de basse mer, qui est sableux, ce qui explique de bonnes concentrations de sables moyens à grossiers.

La position sur le profil a un rôle déterminant sur la granulométrie. Le phénomène de granoclassement fait en sorte que plus on est élevé sur le profil, près de la zone végétalisée du haut de plage, plus l'échantillon est fin. Vers le bas de la plage, les proportions de matrice fine et de graviers-petits blocs deviennent similaires, alors que sur le bas estran, les sédiments fins sont à nouveau prédominants.

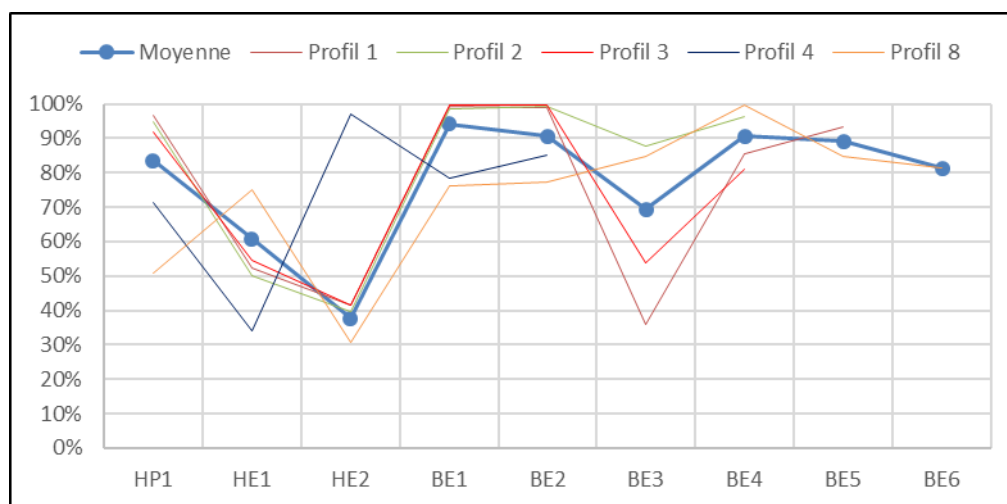


Figure 60. Moyenne des proportions et pourcentages par profil de la matrice fine (<2 mm de diamètre) des échantillons sur l'ensemble des profils (1, 2, 3, 4, 8) de la côte sud - août 2014.

À titre comparatif, le tableau 22, permet d'avoir une vue d'ensemble de la composition moyenne de la matrice fine des échantillons selon l'état de référence de la côte, la position sur le profil et l'orientation (côte nord-est ou sud).

Tableau 22. Moyenne de la proportion des sédiments fins en fonction de la position de l'échantillon sur le profil et l'état de la côte, août 2014.

Profils	Position sur le profil	Nord-est	Sud	Moyenne générale
Artificiels	Haut estran	-	53 %	53 %
	Bas estran	-	87 %	87 %
Naturels	Haut de plage	76 %	83 %	80 %
	Haut estran	61 %	48 %	54 %
	Bas estran	53 %	86 %	76 %
Total	Moyenne générale	61 %	76 %	71 %

Il est important de noter qu'il y a une différence marquée entre les moyennes des profils naturels de la côte nord-est et sud. Le haut de plage est plutôt similaire sur les deux côtes avec une légère différence dans la moyenne de 7 points de pourcentage. Pour le haut estran, c'est une différence de 13 points, permettant de démontrer que la côte sud présente une plage avec plus de matériaux grossiers qu'au nord-est. Sur le bas estran, c'est là que la plus grande différence est affichée avec 33 points d'écart, illustrant que la zone sous le niveau moyen des mers est constituée d'une plus grande quantité de sédiments fins au sud (86 %) qu'au nord-est (53 %). C'est sur cette portion des profils de la côte nord-est où il y a plus de graviers et de petits blocs, tandis qu'au sud, les échantillons récoltés sur la zone sablo-vaseuse, c'est-à-dire entre la plateforme rocheuse nue et le cordon, ont tendance à influencer la moyenne vers un pourcentage de sédiments fins plus élevé.

4.4.2. Évolution de la proportion de la matrice fine (moins de 2 mm de diamètre) de l'ensemble de l'échantillon

Cette section comprend les données granulométriques des échantillons des mois de novembre 2014, mai 2015, août 2015, octobre 2015 et novembre 2016. Un problème en laboratoire n'a pas permis de calculer le poids total des matrices supérieur et inférieur à 2 mm des échantillons de mai 2016 et août 2016. Il est important de préciser que l'évolution de la proportion de la matrice fine (< 2 mm) et celle de la matrice grossière (> 2 mm) ne doit pas être confondue avec l'analyse de la section suivante sur l'analyse spécifique de la matrice fine. Ainsi, leur interprétation est complémentaire.

Le tableau 23 présente la moyenne de la proportion de la matrice fine des échantillons prélevés entre novembre 2014 et novembre 2016 de façon à représenter la granulométrie des différentes zones sur les profils (haut de plage, haut estran et bas estran). Par exemple, pour connaître la représentation de la portion associée à la matrice fine du haut estran sur les profils de la côte sud après les travaux de l'automne 2014, les proportions (%) des échantillons du haut estran (HE1 et HE2) des profils de la côte sud sont moyennées. Le même processus a été fait pour chaque ensemble de profils naturels et artificiels, selon la position sur le profil et l'orientation (nord-est et sud).

Tableau 23. Pourcentage de la proportion de l'échantillon inférieure à 2 mm de diamètre selon l'état de la côte sur le profil d'échantillonnage (novembre 2014 à novembre 2016). Le profil d'échantillonnage 4 est celui qui était déjà artificialisé en 2014. Les profils 1, 5, 7 et 8 sont les profils qui ont été artificialisés en 2014. Les profils 2,3 et 6 sont les profils qui sont restés devant une côte naturelle.

Profils d'échantillonnage	Position sur le profil	Nord-est	Sud	Moyenne générale
Déjà artificialisé en 2014	Haut estran	-	61 %	61 %
	Bas estran	-	71 %	71 %
Devant les nouveaux enrochements de 2014	Haut de plage	33 %	87 %	60 %
	Haut estran	52 %	48 %	50 %
	Bas estran	49 %	74 %	64 %
Devant une côte naturelle	Haut de plage	92 %	84 %	86 %
	Haut estran	65 %	55 %	59 %
	Bas estran	51 %	81 %	73 %
Moyenne générale		53 %	72 %	66 %

Sur la côte sud, les profils devant une côte naturelle présentent des moyennes de la matrice fine sur le haut de plage, le haut estran et le bas estran relativement similaires à ceux de l'état de référence d'août 2014. Les profils nouvellement artificialisés montrent un haut de plage aussi fin que les plages naturelles avec une moyenne de la proportion de la matrice fine des échantillons à 87 %. Le haut estran est un peu moins riche en matrice fine car la moyenne de cette proportion est de 48 %, légèrement plus faible que les secteurs naturels affichant 55 %, indiquant une matrice sédimentaire de surface plus grossière. Le profil 4,

déjà artificialisé en 2014, a eu une moyenne de la proportion de la matrice fine du haut estran qui s'est légèrement accrue de 53 à 61 points de pourcentage, ce qui indique une légère augmentation de la proportion de sédiments fins à cet endroit qu'à l'état initial.

Au nord-est, les plages qui ont été artificialisées ont connu une baisse générale de la proportion des échantillons dont la granulométrie est inférieure à 2 mm de diamètre, ce qui signifie que la moyenne granulométrique globale du haut estran a augmenté. Les plages nouvellement artificielles au nord-est possèdent donc plus de matériaux grossiers supérieurs à 2 mm en surface qu'à leur état initial naturel de 2014. Les échantillons du bas estran devant les berges qui ont été artificialisées (profils 5 et 7) et qui sont restées naturelles (profil 6) n'ont pas de différence significative entre eux, avec des moyennes de 49 % et 51 %. Le profil 6 (naturel témoin) est par contre largement plus fin sur le haut de plage et sur le haut estran (proportion de la matrice fine de 92 % et 65 % respectivement). Cela permet d'estimer que la matrice sédimentaire de surface devant les plages naturelles de la côte nord-est a tendance à être plus fine que grossière.

Il existe toutefois une variabilité significative dans les proportions de la matrice fine des échantillons à travers le temps et entre les profils. Les tableaux 24 et 25 présentent quelques mesures de dispersion statistique permettant d'évaluer la variabilité dans les résultats. L'ensemble des résultats pour chaque échantillon sont disponibles aux annexes 8 à 15.

Tableau 24. Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons de la côte sud.

Sud				
Zone	Écart-type	Minimum	Maximum	Étendue
Haut de plage	16%	51%	100%	49%
Haut estran	20%	16%	96%	80%
Bas estran	17%	27%	100%	73%

Tableau 25. Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons de la côte Nord-est.

Nord-est				
Zone	Écart-type	Minimum	Maximum	Étendue
Haut de plage	20%	33%	96%	63%
Haut estran	20%	5%	91%	86%
Bas estran	12%	17%	91%	74%

Ce qui est à retenir, c'est que sur la côte sud, le haut de plage et le bas estran ont présenté des résultats de la proportion de la matrice fine montrant une variabilité moins importante que sur le haut estran. En effet, la proportion des sédiments fins sur le haut estran est assez variable dans le temps, autant pour les profils naturels qu'artificiels. Cependant, malgré les effets d'engraissement et d'érosion saisonniers, les secteurs artificialisés ont vu leur pourcentage de matériaux fins diminuer de manière plus importante que les plages non anthropisées, où une saisonnalité naturelle n'est pas perturbée par la présence des enrochements.

Sur la côte nord-est, c'est plutôt le bas estran qui présente peu de variabilité, ce qui signifie que les apports des sédiments de surface proviennent majoritairement de la même source, soit de la météorisation de la plateforme rocheuse de géologie différente, plus friable, qu'au sud. De plus, l'absence d'une zone sablo-vaseuse et d'un cordon de basse mer au nord permet de proposer ce postulat.

Les profils 5 et 6 dans l'anse à Buttemont ont connu des variabilités saisonnières sans toutefois s'éloigner des valeurs initiales, malgré la présence du nouvel enrochement (P5).

C'est toutefois au niveau du profil 7 nouvellement enroché, dans l'anse à Mailloux, où les résultats furent les plus variables dans le temps. Tout de suite après les travaux de 2014, une perte nette de sédiments fins a été observée sur ce profil. Par contre, un retour vers l'état initial semble se produire sur le haut estran. Le bas estran est cependant de plus en plus sous représenté par les sédiments inférieurs à 2 mm.

4.4.3. État initial de la matrice fine (moins de 2 mm de diamètre) – Août 2014

La matrice fine (moins de 2 mm ou 2 000 μm) peut être divisée en plusieurs classes texturales granulométriques distinctes (tableau 26).

Tableau 26. Taille en millimètre et microns des classes granulométriques de la matrice fine.

Taille en mm	Taille en μm	Classe granulométrique
0,5 à 2	500 à 2 000	Sable grossier
0,25 à 0,5	250 à 500	Sable moyen
0,063 à 0,25	63 à 250	Sable fin
0,002 à 0,063	2 à 63	Limon
0 à 0,002	0 à 2	Argile

La figure 61 présente quelques exemples d'échantillons selon leurs proportions de matrice grossière et de matrice fine, ainsi que la composition de cette matrice fine en sables, limons et argiles. Il est intéressant de noter que ce n'est pas parce que la matrice grossière (supérieure à 2 mm) représente une grande proportion de l'échantillon total que la composition de la matrice fine sera plus grossière (plus grande présence de sables et moins de limons et d'argiles). Il existe des cas où une grande hétérogénéité existe dans un échantillon sur l'ensemble de la granulométrie. Entre autres, certains échantillons peuvent présenter beaucoup de petits blocs et de graviers sans avoir de sables. Il n'existe pas toujours un continuum granulométrique. Ce mauvais triage peut parfois s'exprimer par une composition granulométrique avec des sédiments de classes non contiguës. Par contre, il y a des cas où la granulométrie est homogène et peu de variabilité existe dans les classes

granulométriques. Tel que mentionné précédemment, le mauvais triage d'un échantillon est le résultat de sources sédimentaires différentes, dont la granulométrie est différente, mais aussi des plaquettes de schistes qui ont tendance à se désagréger en limons. Ainsi, le triage granulométrique peut être un indicateur appréciable de la composition minérale et des conditions hydrodynamiques du milieu.

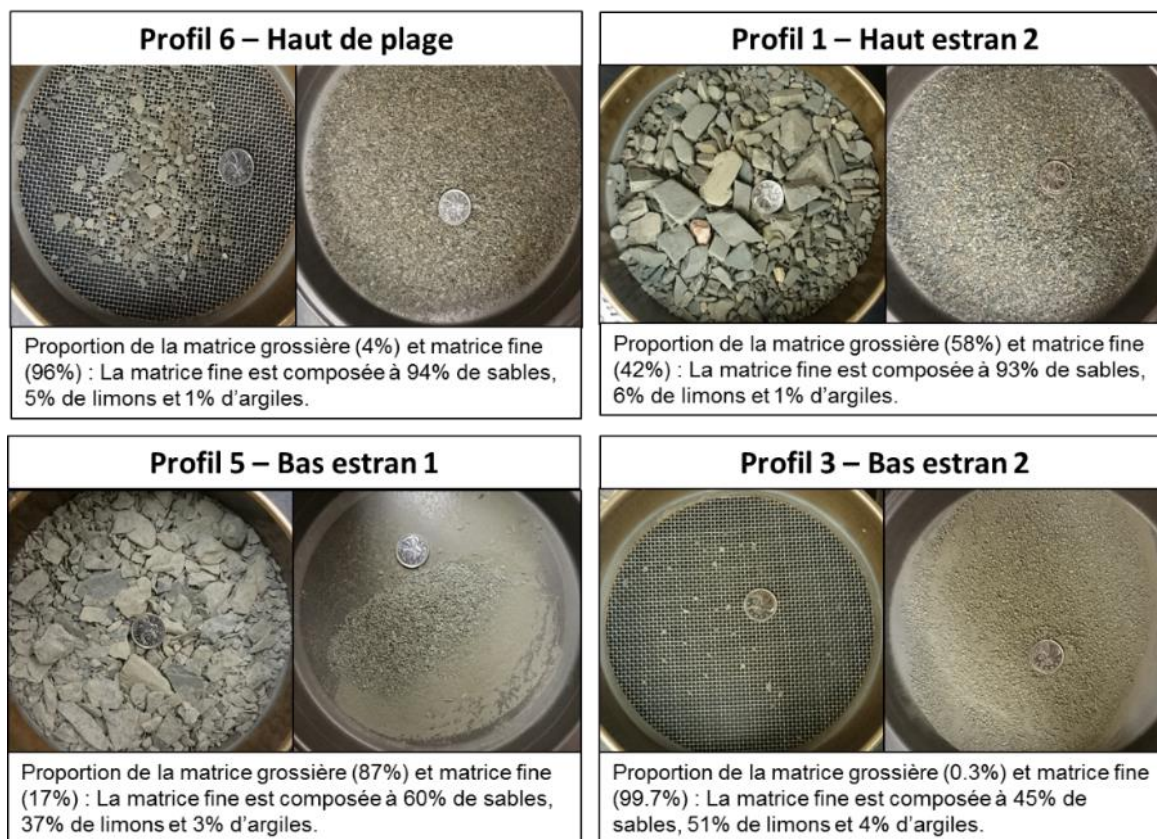


Figure 61. Exemples d'échantillons et des pourcentages de matériel grossier et fin ainsi que la composition détaillée de la matrice pour les trois classes texturales. Échelle : pièce de 25 ¢ canadienne (diamètre de 23,81 mm).

Sur la côte nord-est, la composition moyenne des échantillons des trois classes texturales est montrée au tableau 27. La matrice fine du haut de plage est essentiellement composée de sable (92 %), avec moins de 7 % de limon et 2 % d'argile. Le haut estran est très similaire à ces valeurs tandis que le bas estran présente en moyenne des sédiments plus fins avec seulement 68 % de sable, 29 % de limon et 3 % d'argile.

Tableau 27. Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côte nord-est, août 2014.

Emplacement de l'échantillon	Argile (< 2 µm)	Limon (2 µm à 63 µm)	Sable (63 µm à 2 000 µm)
Haut de plage	2 %	6 %	92 %
Haut estran	2 %	7 %	92 %
Bas estran	3 %	29 %	68 %
Moyenne générale	2 %	16 %	82 %

Sur la côte sud, la composition des trois classes est présentée au tableau 28. Globalement, la matrice de moins de 2 mm de diamètre de ces échantillons y est plus fine au sud qu'au nord-est de l'île. La matrice fine du haut de plage est essentiellement composée de sable (99 %), davantage que sur la côte nord-est (92%). La composition du haut estran est semblable à celle du haut de plage, avec un peu plus de limon, comme pour la composition granulométrique de la plage de la côte nord-est. Le bas estran est quant à lui totalement différent avec un mélange presque à parité de sable et de limon, plus fin de la côte sud qu'au nord-est de l'île.

Tableau 28. Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côte sud, août 2014.

Emplacement de l'échantillon	Argile (< 2 µm)	Limon (2 µm à 63 µm)	Sable (63 µm à 2 000 µm)
Haut de plage	0 %	1 %	99 %
Haut estran	1 %	6 %	93 %
Bas estran	4 %	46 %	50 %
Moyenne générale	3 %	30 %	67 %

4.4.4. Évolution de la matrice fine (moins de 2 mm de diamètre)

Cette section vise à analyser le comportement des trois classes granulométriques (sables, limons et argiles) des échantillons sur le haut de plage (HP), le haut estran (HE1 et HE2) et le bas estran 1 (BE1) des profils témoins naturels, nouvellement artificialisés et déjà artificialisés. Ces trois zones sur le profil ont été choisies puisqu'en cas d'impacts des

ouvrages de protection sur la morphosédimentologie de la plage, c'est à ces endroits qu'il sera possible de les observer.

4.4.4.1. Côte sud

4.4.4.1.1. Haut de plage

La figure 62 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons de haut de plage situés sur les profils 2 et 3 où la ligne de rivage est naturelle.

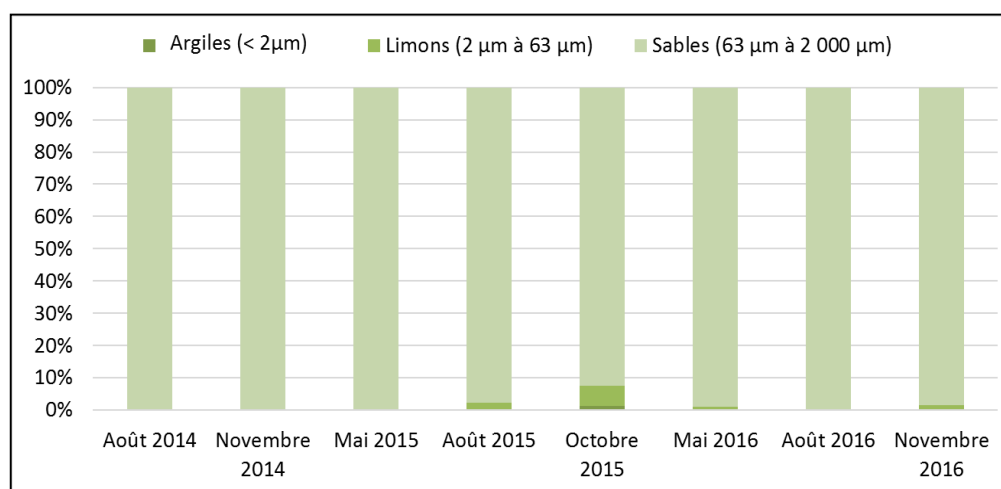


Figure 62. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côte sud.

Les trois premiers échantillonnages montrent que la matrice fine est constituée entièrement de sable. En août et octobre 2015, la proportion des limons monte de 2 et 6 % respectivement. Les argiles atteignent un faible 1 % en octobre 2015. Dans l'ensemble, la matrice fine du haut de plage est à très grande majorité constituée de sable et a connu peu de changements pendant près de 2 ans et demi.

La figure 63 présente l'évolution des 3 classes granulométriques inférieures à 2 mm pour les échantillons du haut de plage situés sur le profil 1 ayant fait l'objet de la mise en place d'un enrochement à l'automne 2014.

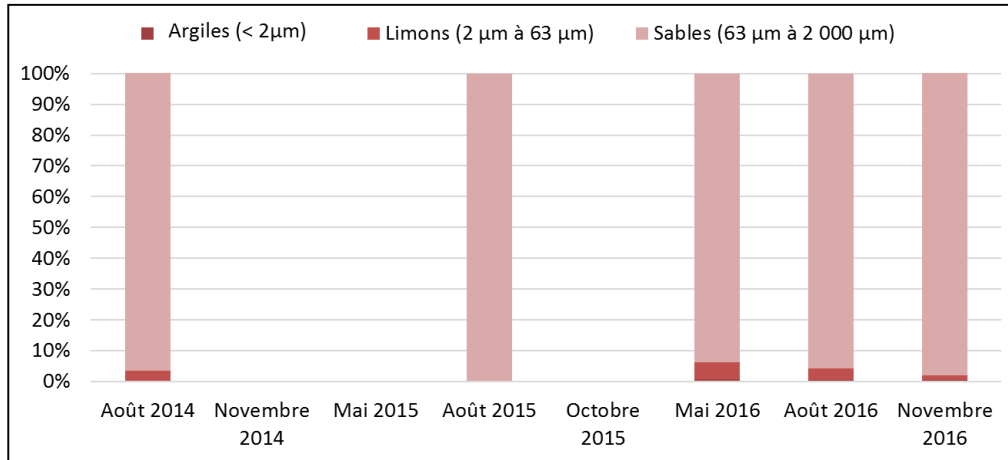


Figure 63. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur le profil 1 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte sud.

L'état initial montre un pourcentage des sables assez élevé avec 97 % de la composition de la matrice fine. Les échantillons sur le haut de plage ont été récoltés lorsque la végétalisation du haut de plage était présente, soit à partir d'août 2015. À l'été 2015, c'est le seul échantillon composé à 100 % de sable. Les autres échantillons montrent un retour d'un faible pourcentage des limons à partir de mai 2016. À la suite de l'empiètement de l'enrochement sur le haut de plage au profil 1, la recharge en sédiments de la plage au front de l'ouvrage avec les matériaux de la clé a permis de maintenir un haut de plage. Cette approche a permis de limiter les perturbations sédimentaires par rapport à son état initial puisqu'un haut de plage végétalisé s'est formé et que la composition de la matrice fine est semblable à celle observée avant les travaux. Concernant le profil 8 (aussi enroché lors des travaux de 2014), l'enrochement a complètement empiété sur le haut de plage et il n'a pas été possible de poursuivre l'échantillonnage sur le haut de plage. Il est à noter qu'à la suite des travaux, il n'y avait pas de haut de plage lors de la campagne terrain de novembre 2014. De plus, un haut de plage était présent devant l'enrochement en mai 2015 et octobre 2015, mais un imprévu en laboratoire n'a pas permis l'analyse des données pour ces échantillons.

La granulométrie de la matrice fine du haut de plage dépend aussi de la position des profils sur la côte, en raison des sources sédimentaires, ainsi que des différentes

caractéristiques morphologiques de la plage. L'anthropisation de la côte semble plutôt jouer un rôle secondaire sur le haut de plage du profil 1.

4.4.4.1.2. Haut estran

La figure 64 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du haut estran situés sur les profils 2 et 3 témoins naturels.

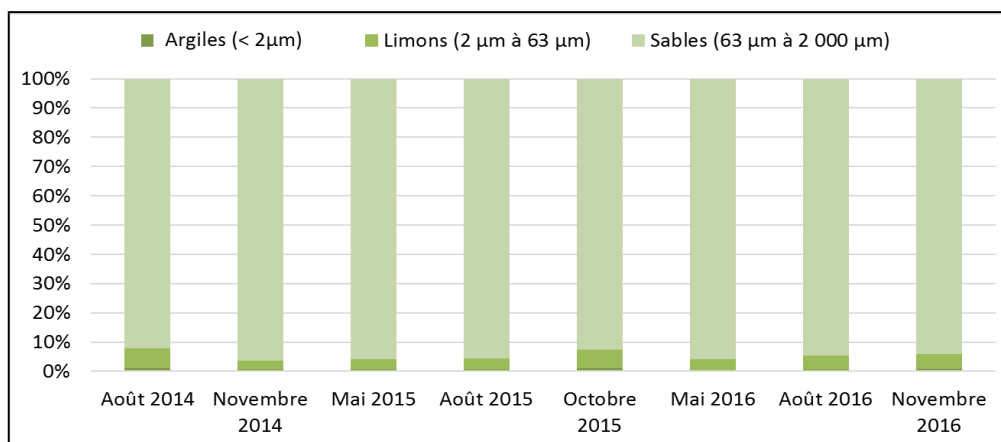


Figure 64. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côte sud.

En août 2014, les sables constituaient 92 % de la matrice fine, les limons 7 % et les argiles 1 %. Peu de changements sont remarqués dans l'évolution de ces trois classes pour les saisons d'échantillonnage suivantes. Les pourcentages des limons ont varié entre 3 et 7 points (minimum et maximum) tandis que ceux des argiles étaient assez stables entre 0,5 et 1 point (idem).

La figure 65 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du haut estran situés sur les profils 1 et 8 où la ligne de rivage a été artificialisée en 2014.

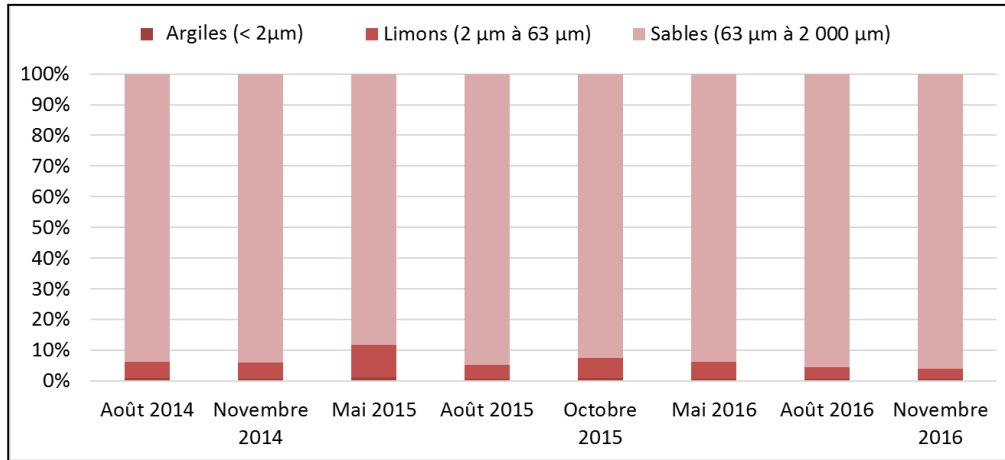


Figure 65. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 1 et 8 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte sud.

La composition de la plage est en moyenne de 94 % de sable sur la durée du suivi depuis l'état initial en août 2014. Les limons sont quant à eux autour de 6 % et les argiles à 1 %. Mai 2015 représente la saison où il y a le plus de changements avec 11 % de limon et 88 % de sable. La proximité de l'herbier, où la composition fine est plus importante a probablement dû influencer la composition granulométrique de l'échantillon. En effet, au printemps l'absence de feuilles permet sans doute aux vagues de remanier et transporter plus facilement les sédiments fins vers le haut estran. Puisque les pourcentages des trois classes granulométriques sont assez stables, il est possible d'affirmer que les enrochements ne semblent pas avoir influencé la composition de la matrice fine.

La figure 66 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons de haut estran situés sur le profil 4 où la ligne de rivage était déjà enrochée en 2014.

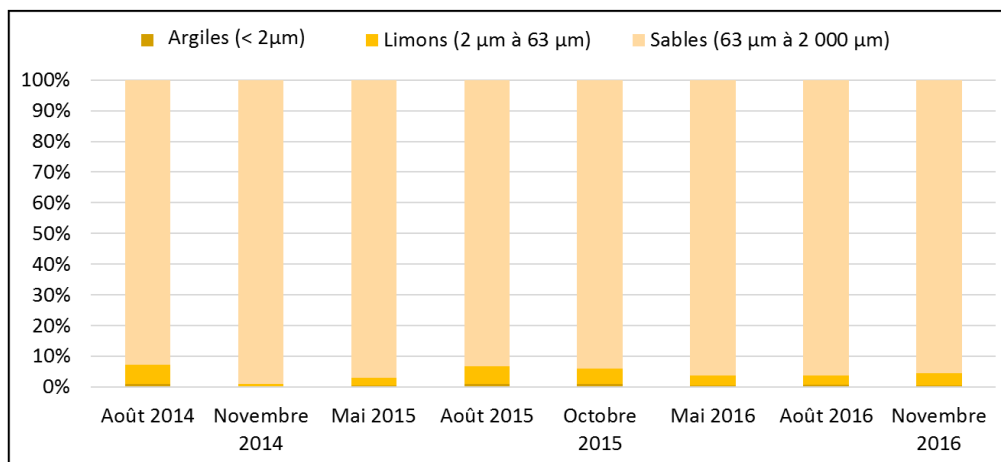


Figure 66. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côte sud.

En août 2014, la composition de la matrice fine était constituée de 93 % de sable, 6 % de limon et 1 % d'argile. La fraction limoneuse est plus variable sur cette plage que sur les autres profils, variant entre 1 à 6 % de l'échantillon. Les argiles sont quasiment absentes avec moins d'un pourcent par échantillon. Un certain cycle semble ressortir puisque l'été est le moment de l'année où il y a plus de limons tandis qu'au printemps et à l'automne, cette classe est moins représentée. Les argiles sont aussi presque absentes sur le haut estran du profil 4. Les conditions hydrodynamiques estivales plus douces peuvent favoriser un apport sédimentaire plus fin sur la plage, provenant du bas estran.

En somme, les caractéristiques granulométriques du haut estran sont assez similaires entre les profils de la côte sud avec une majorité de sédiments sableux à plus de 90 % et moins de 10 % de limons. La présence de sédiments limoneux et argileux montre des conditions hydrodynamiques plutôt calmes.

4.4.4.1.3. Bas estran 1

La figure 67 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 2 et 3 où la ligne de rivage est naturelle. L'échantillon

du profil 2 est réalisé dans un herbier tandis que celui du profil 3 est fait dans une petite cuvette d'accumulation de sédiments fins.

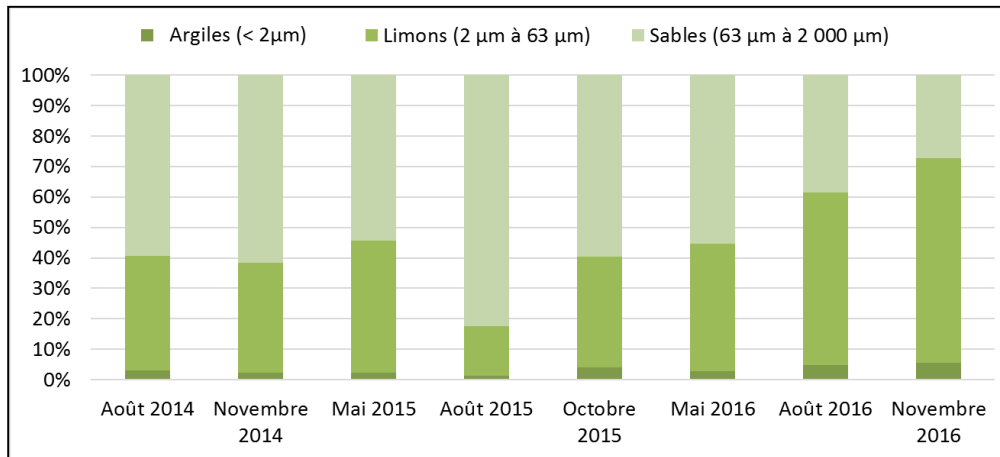


Figure 67. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côte sud.

À l'état initial, les profils 2 et 3 avaient en moyenne une composition de 59 % de sable, 38 % de limon et 3 % d'argile. Ces taux sont assez similaires à l'automne, mais en mai 2015, il y a un peu plus de limon (43 %). À l'été 2015, les sables sont plus présents, avec une proportion de 82 % contre 16 % de limon. Sur les deux profils, l'accumulation de sédiments fins était beaucoup moins importante dans l'herbier et dans la cuvette comparativement aux autres périodes d'échantillonnage. Il est possible que du sable provenant de la dérive littorale ou du large ait migré vers la plage par temps estival clémente. En octobre 2015, l'assemblage de la matrice fine ressemble à ce qu'il était à l'état initial. À partir de mai 2016, la portion de sable n'a cessé de diminuer, premièrement de 17 points de pourcentage en août 2016 puis de 11 points en novembre 2016. De cette façon, les limons ont atteint 57 % en août et 67 % en novembre 2016. C'est une augmentation de 29 points de pourcentage entre août 2014 et novembre 2016. Les argiles, qui présentent une partie plus importante que ceux sur le haut estran, ont augmenté de 3 points de pourcentage sur la durée du suivi. Une bonne année de croissance pour les herbiers devant le profil 2 et une accumulation sédimentaire fine dans la

cuvette de plusieurs dizaines de centimètres sur le profil 3 sont les principaux responsables de cette augmentation de sédiments fins.

La figure 68 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 1 et 8 où la ligne de rivage a été artificialisée en 2014. L'échantillon du profil 1 est situé dans l'herbier et celui du profil 8 est situé en périphérie de plusieurs herbiers de taille plus modeste.

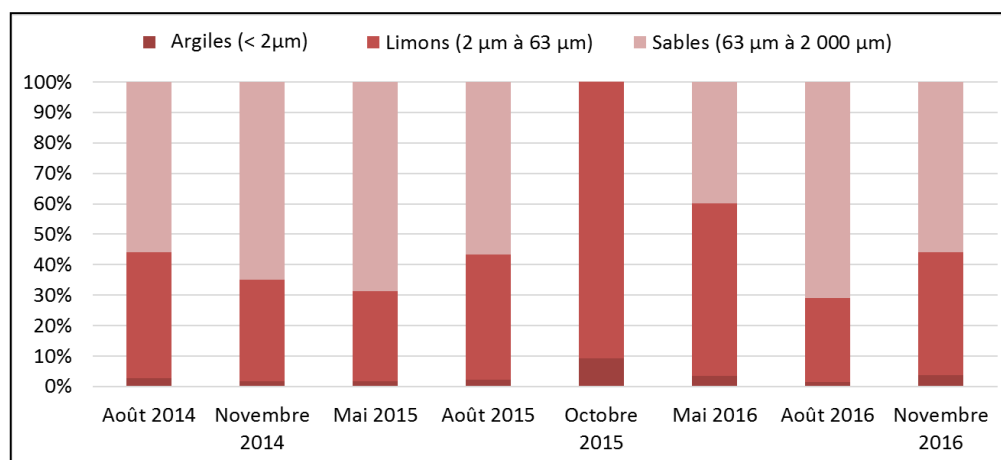


Figure 68. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 1 et 8 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte sud.

À l'été 2014, les sables constituaient 56 % de la matrice fine, les limons 41 % et les argiles 3 %. Ces chiffres sont assez similaires à ceux obtenus à l'état de référence des profils naturels témoins. Suite aux travaux d'engrènement en novembre 2014, la part des sables a augmenté de 9 points de pourcentage, celle des limons a perdu 8 points et celle des argiles était d'un pourcent. En mai 2015, le pourcentage des sables avait encore augmenté à 69 points contre 29 points pour les limons et toujours 2 points pour les argiles. En août 2015, la tendance revient à ce qu'elle était en août 2014, un an auparavant, avec la même composition des classes granulométriques. Octobre 2015 est complètement différent, car le bas estran était constitué que de sédiments fins (91 % de limon et 9 % d'argile). Une première hypothèse voudrait que seul un dépôt de surface de sédiments fins à ces endroits puisse expliquer de

tels résultats. Une accumulation de sédiments fins au travers des herbiers à spartine alterniflore durant cette période sur ces profils permet d'expliquer ces chiffres. En effet, le captage de sédiments fins grâce à la barrière physique que forment les plants de l'herbier semble être très efficace. Une sédimentation peut aussi s'expliquer par un climat de vague plutôt calme quelques jours avant la prise des échantillons, favorisant les dépôts de limon et d'argile. Toutefois, il est peu probable que cet échantillon ait été réellement sans sable et une erreur de manipulation en laboratoire a pu surestimer la quantité de limons et d'argiles pour ce mois. En mai 2016, la composition de la matrice fine revient à des pourcentages similaires à ceux de l'état initial avec 57 % pour les sables, les limons à 40 % et les argiles avec un peu moins de 4 %. En août 2016, les sables redeviennent fortement majoritaires à 71 %, les limons à 27 % et les argiles 2 %. En novembre 2016, les argiles et les limons sont plus importants avec respectivement 4 % et 27 % contre 56 % de sable.

Puisque ces échantillons sont situés dans et près d'herbiers, la variabilité est assez importante en termes de sédiments captés par ces derniers. Et puisque les échantillons sont récoltés en surface sur les 10 premiers centimètres, il est parfois possible que cette première couche soit fortement constituée de sédiments fins (argiles et limons) qui recouvrent les sables. C'est ce qui peut expliquer la grande hétérogénéité de la composition de l'échantillon bas estran 1 sur les profils 1 et 8. Néanmoins, il est possible que les sédiments de la clé de l'enrochement mis au-devant de l'ouvrage aient pu migrer vers le bas estran, mais cela semble être dans des proportions minimales et temporaires. Le système semble s'être rééquilibré puisque les composantes granulométriques de la matrice fine des derniers levés ne montrent pas de signes significatifs d'augmentation de la portion sableuse.

La figure 69 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 4 où la ligne de rivage était déjà artificielle en 2014. Cet échantillon se situe à travers des affleurements rocheux et sans présence d'herbiers autour. Il est à noter que l'échantillon de mai 2015 est manquant dans la série de données dû à un imprévu en laboratoire.

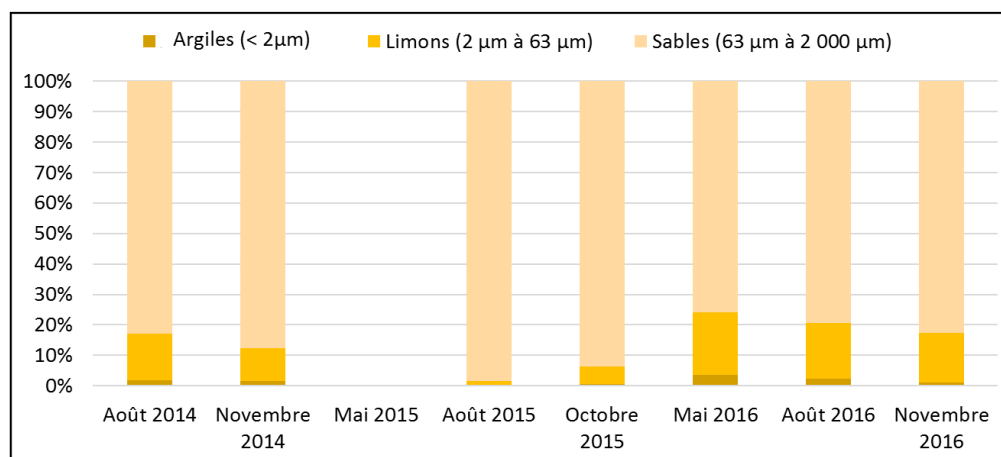


Figure 69. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côte sud.

À l'état initial d'août 2014, les sables sont à 83 %, les limons à 15 % et les argiles à 2 %. Ces proportions sont différentes de celles obtenues dans les quatre autres profils naturels et nouvellement artificiels du secteur sud, qui comportent moins de sédiments sableux et plus de limons. La composition de la matrice fine est similaire en novembre 2014, mais est presque complètement sableuse en août 2015 avec seulement 2 % de limon. En octobre 2015, le pourcentage des limons monte de 4 points et la classe des argiles gagne 1 % sur cet emplacement. Mai 2016 est la saison où la présence de limon et d'argile est la plus importante avec 21 % et 3 % respectivement. Ces deux classes diminuent légèrement en août et novembre 2016 pour atteindre une composition presque identique à celle d'août 2014.

Ce site comporte une grande variabilité intra-annuelle ce qui suppose une possible perturbation de l'épi du chantier naval Dufour à proximité (150 m). Néanmoins, la dérive littorale et les forts courants de marée peuvent emporter périodiquement des sédiments de différentes tailles sur la plateforme rocheuse. Puisque le site d'échantillonnage est situé au milieu d'écueils rocheux, la granulométrie peut être variable en fonction des conditions hydrodynamiques présentes avant l'échantillonnage. Cette zone semble chercher un nouvel équilibre dynamique morphosédimentaire dû aux nombreuses interventions récentes d'enrochement et d'exploitation du chantier maritime naval à proximité.

4.4.4.2. Côte nord-est

4.4.4.2.1. Haut de plage

La figure 70 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour l'échantillon du haut de plage situé sur le profil 6 où la ligne de rivage est naturelle.

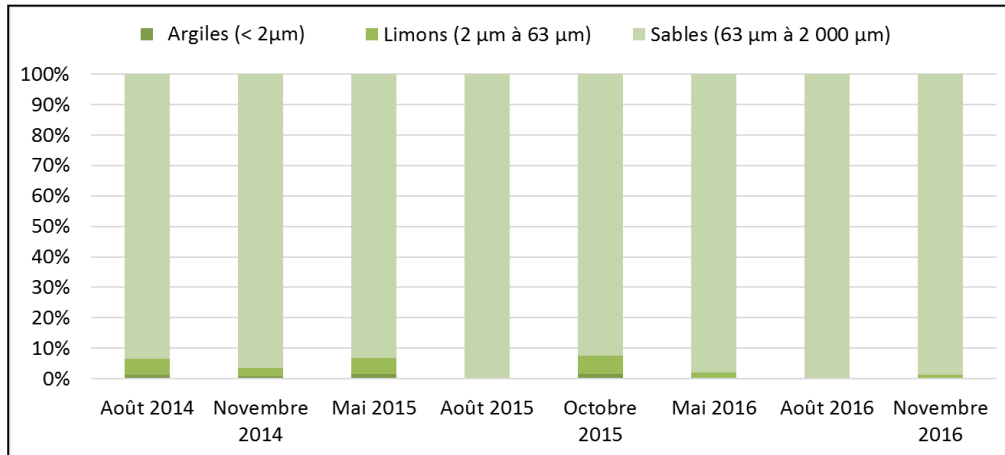


Figure 70. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du haut de plage situé sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.

L'état de référence donne une composition typique du haut de plage de la côte nord-est avec 93 % de sable, 5 % de limon et 1 % d'argile. Cette situation assez similaire pour novembre 2014 et mai 2015. Cependant, en août 2015, l'échantillon est à 100 % constitué de sable. En octobre 2015, la composition redevient similaire à celle de l'état de référence. En 2016, plus aucune argile n'est détectée et les sables prédominent à plus de 98 %.

La variation dans la proportion de sédiments fins limoneux et argileux peut s'expliquer par la qualité du couvert végétal du haut de plage. Il semble que lorsque les échantillons ont été récoltés dans un couvert végétal de haut de plage dense, il y a une présence plus importante de limon et d'argile dans l'échantillon. Un couvert végétal plus dense aura comme particularité de retenir plus de sédiments fins lors des périodes de hauts niveaux d'eau. C'est un processus similaire à ce qui se produit dans les herbiers de la côte sud.

La figure 71 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons de haut de plage situés sur le profil 7 où la ligne de rivage a été enrochée en 2014. Le haut de plage végétalisé n'était présent que vers la fin de la période de croissance, soit en août.

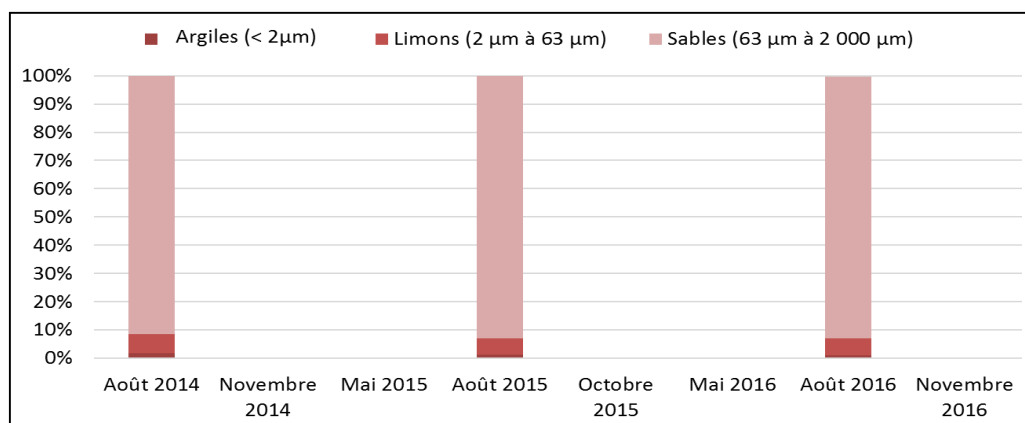


Figure 71. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur le profil 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.

Les trois échantillons estivaux semblent montrer que le secteur du haut de plage n'a pas connu de changements en 2 ans à la suite de la mise en place des ouvrages de protection. Les sables composent la matrice fine à près de 93 %, les limons à environ 6 % et les argiles à 1 %. La présence d'un haut de plage végétalisé tous les étés précise, en s'appuyant sur les résultats granulométriques, que les enrochements ne semblent pas avoir d'impact sur le comportement du haut de plage devant le profil 7.

4.4.4.2.2. Haut estran

La figure 72 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons de haut estran situés sur le profil 6 où la ligne de rivage est naturelle. Dans l'ensemble il y a eu très peu de changements granulométriques depuis l'état initial (92 % de sable, 6 % de limon et 1 % d'argile). Août 2016 est la seule saison où 99 % de l'échantillon était composé de sable.

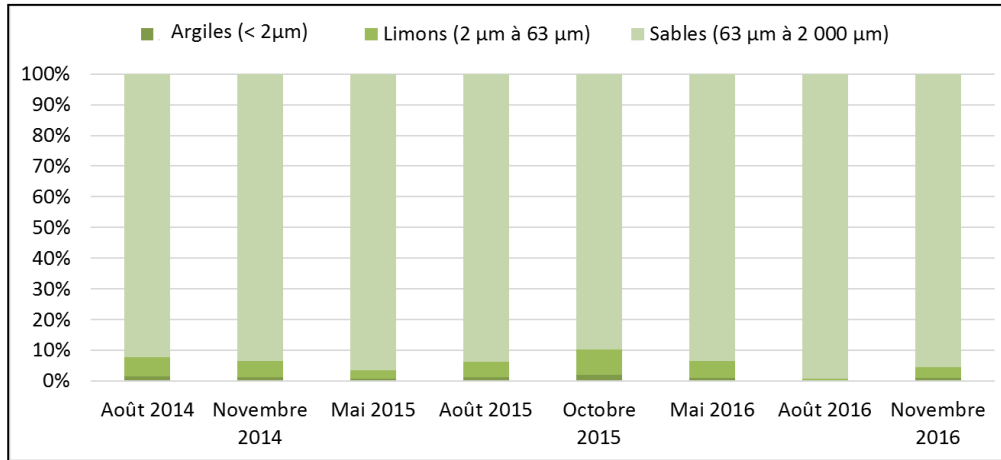


Figure 72. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.

La figure 73 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du haut estran situés sur les profils 5 et 7 où la ligne de rivage est devenue artificielle.

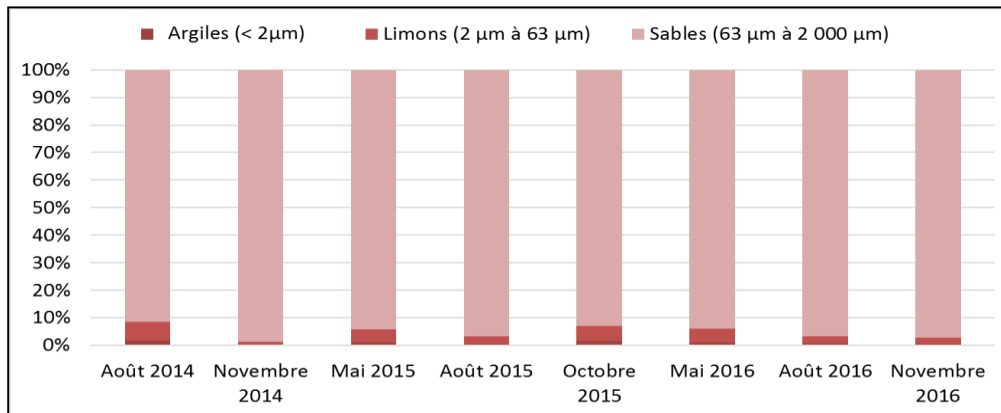


Figure 73. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 5 et 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.

L'état initial de la sédimentologie de la plage comportait 92 % de sable, 7 % de limon et 1 % d'argile. En novembre 2014, suite aux travaux d'encrochement, la proportion des sables a été la plus forte du suivi avec 99 %. Il semble que la mise en place de la clé de l'encrochement devant l'ouvrage ait participé à l'augmentation de la composante sable.

Néanmoins, à partir de mai 2015, un retour à l'équilibre semble se faire puisque la composition de la matrice fine en limon varie entre 2 % et 6 % depuis cette saison.

4.4.4.2.3. Bas estran 1

La figure 74 présente l'évolution des 3 classes granulométriques de la fraction inférieure à 2 mm pour l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 6 où la ligne de rivage est naturelle.

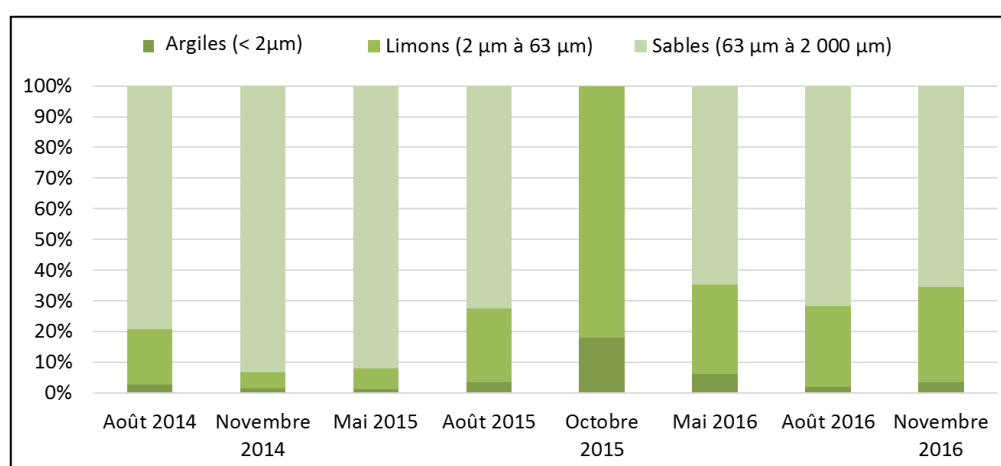


Figure 74. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.

À l'état initial, la composition était de 79 % de sable, 18 % de limon et 3 % d'argile. Une légère diminution des limons se produit à l'automne 2014 et au printemps 2015 pour atteindre 5 et 7 % respectivement. En août 2015, les limons reviennent à 24 %, près des valeurs de l'été précédent. Octobre 2015 est cependant différent des autres où aucun sable n'est présent dans l'échantillon (82 % de limon et 18 % d'argile). L'échantillon était alors composé de plusieurs petits graviers de schiste supérieurs à 2 mm tandis que la matrice fine de surface était constituée de matériaux particulièrement petits. Il est aussi possible qu'il y ait eu surestimation de la quantité de limons et d'argiles pour les mêmes raisons évoquées pour les profils 1 et 8, soit des problèmes de manipulations en laboratoire expliquant ce résultat particulier. Les proportions des limons deviennent ensuite généralement stables en

2016 variant de 26 à 31 %. Depuis les quatre dernières saisons échantillonnées, les limons semblent prendre plus de place dans la composition de la matrice fine du bas estran 1 au profil 6, au détriment des sables.

La figure 75 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 5 et 7 où la ligne de rivage a été anthropisée en 2014.

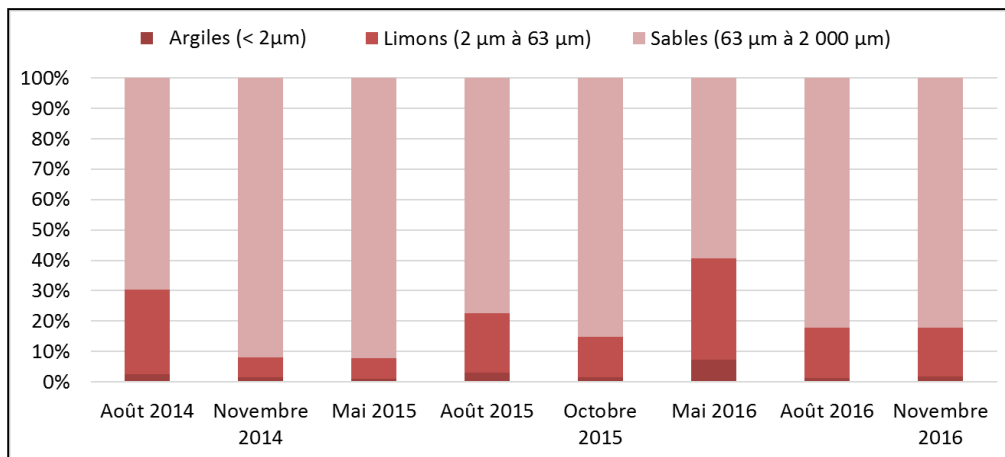


Figure 75. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons bas estran 1 situés sur les profils 5 et 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.

À l'état initial, les échantillons étaient constitués à 70 % de sable, 28 % de limon et de 2 % d'argile. Après les travaux d'engrochements, la portion des sables en novembre 2014 a augmenté de 22 points de pourcentage et les limons ont baissé de 6 points de pourcentage. Cette situation est la même en mai 2015, mais la composition de la matrice fine se rapproche de ce qu'elle était avant les travaux à partir d'août 2015, avec 77 % de sable, 20 % de limon et 3 % d'argile. En mai 2016, le pourcentage de la proportion des limons dépasse celui d'août 2014 (59 % de sable et 33% de limon). Les deux derniers échantillons de 2016 présentent une composition similaire avec 82 % de sable et 16 % de limon.

Le comportement général du bas estran 1 devant les profils naturels et artificiels de la côte nord-est semble suivre des variations similaires dans les baisses et augmentations de la proportion des sables et limons. Cela implique que les changements dans la composition de

la matrice fine sont probablement dus au contexte hydrodynamique et sédimentaire local. Ainsi, il semble peu probable que les nouveaux enrochements aient eu des impacts sur la granulométrie du bas estran près de la flexure de la plage.

4.4.5. Analyse de la composante sable

Puisque la fraction granulométrique du sable (63 μm à 2 000 μm) est ce qui compose la majorité des sédiments de la matrice fine (argile, limon et sable), une analyse plus détaillée sur cette classe granulométrique a été faite sur les échantillons du haut de plage, du haut estran 1 et 2 ainsi que sur le bas estran 1. Un des impacts potentiels de la mise en place d'un enrochement est la réflexion des vagues sur l'ouvrage de protection qui entraîne la mise en suspension des sédiments les plus fins devant celui-ci et les emporte vers le large, augmentant ainsi la proportion des sables et la granulométrie moyenne de la plage (Kraus *et al.*, 1988). Ce phénomène peut prendre du temps avant de se produire et se fait sur une période de plusieurs années. Comme le mentionne Dugan *et al.* (2011), tout cela dépend essentiellement de l'intensité de l'interaction entre la structure et les processus côtiers, l'augmentation de l'âge des structures (accumulation d'effets et des interactions sur le long terme) et la hausse du niveau de la mer. Ce sont ces facteurs que l'on doit garder en tête en analysant les données de l'évolution granulométrique sur une courte période de temps suite à la mise en place des nouveaux ouvrages de protection. Ainsi, la période dite de « transition » qui suit l'artificialisation peut être caractérisée par un état d'équilibre dynamique de la plage déstabilisé pendant lequel le déplacement des sédiments devant l'ouvrage peut se faire vers le bas estran par la nappe de retrait et la réflexion des vagues de tempête contre l'ouvrage. Si un tel phénomène se produisait, les sédiments grossiers comme les sables migreraient vers le bas estran 1 (normalement composé de moins de sable que le haut estran) et une augmentation de la portion sableuse serait perceptible à cet endroit. C'est pour cette raison que le bas estran 1 est présenté avec les résultats de la plage dans cette section.

4.4.5.1. Profil 1 (artificialisé)

La matrice fine du haut de plage est constituée à forte majorité de sables grossiers (plus de 70 %), dont le diamètre est supérieur à 500 μm , tandis qu'une plus faible proportion de sable moyen, dont le diamètre se situe entre 250 à 500 μm , le compose (15 à 30 %) (figure 76). Les échantillons récoltés montrent une légère augmentation des sables grossiers deux ans après les travaux.

Sur le haut estran 1, cette fraction grossière est très similaire aux chiffres du haut de plage pour l'ensemble des levés. Il y a cependant une légère augmentation des sables grossiers et une absence complète des sables fins après les travaux de 2014 jusqu'au printemps 2015. Néanmoins, les résultats montrent peu de changements sur toute la période du suivi pour cette partie de la plage.

Sur le haut estran 2, les résultats sont plus hétérogènes. L'état initial est composé à 70 % de sable grossier, 20 % de sable moyen et 10 % de sable fin. L'échantillon récolté après l'enrochement de ce profil montre le même pourcentage de sable grossier, mais une augmentation de 10 points de pourcentage des sédiments fins. Les échantillons du mois de mai 2015 et 2016 révèlent que les pourcentages de sable moyen et fin sont plus importants au printemps qu'à l'été et l'automne. La concentration de limon et d'argile semble être liée aux apports sédimentaires fins laissés par les glaces d'estran lors de la fonte printanière. Pour les autres échantillons d'été et d'automne 2015 et 2016, la proportion des sables grossiers est supérieure à 70 %, similaire aux résultats du haut estran 1. La proportion de sable fin est toutefois supérieure, soit entre 5 % et 20 %. Les deux derniers échantillons (août et novembre 2016) avaient la granulométrie la plus grossière de tout le suivi.

La composition du bas estran 1 était à 95 % de sable fin et 5 % de sable moyen en août 2014. À la suite des travaux de 2014, la classe des sables grossiers a obtenu 12 % en novembre 2014 et la portion de sable fin a diminué de 13 points de pourcentage. Après l'hiver 2014-2015 les échantillons ont retrouvé une composition similaire à celle de l'état initial, soit 100 % de sable fin. Seul l'échantillon d'août 2016 a présenté une proportion de sable grossier

similaire à celle observée après les travaux (16 % de sable grossier). À noter qu'octobre 2015 n'est pas affiché au bas estran 1, car il n'y avait aucun sable à ce moment dans cet échantillon situé dans un herbier.

Les résultats des analyses granulométriques de la plage montrent que la granulométrie de la plage semble répondre à la mise en place des enrochements devant le profil 1. L'ajout des sédiments de la clé de l'ouvrage au pied de l'enrochement semble avoir eu un effet temporaire sur la plage à l'automne 2014 ayant fait augmenter la quantité de sable grossier à la surface de la plage. Le triage naturel par les vagues a ensuite permis de redistribuer une partie des sédiments par la dérive littorale sur les plages adjacentes. La présence de cycles saisonniers granulométriques est visible pour les échantillons de surface, particulièrement sur le haut estran 2 et bas estran 1, où la granulométrie estivale et automnale est plus grossière qu'au printemps. De plus, la proportion de sable grossier dans la matrice fine semble s'accroître au travers des saisons : la fraction de sable grossier durant les trois étés et automnes n'a cessé d'augmenter pour le haut estran 2.

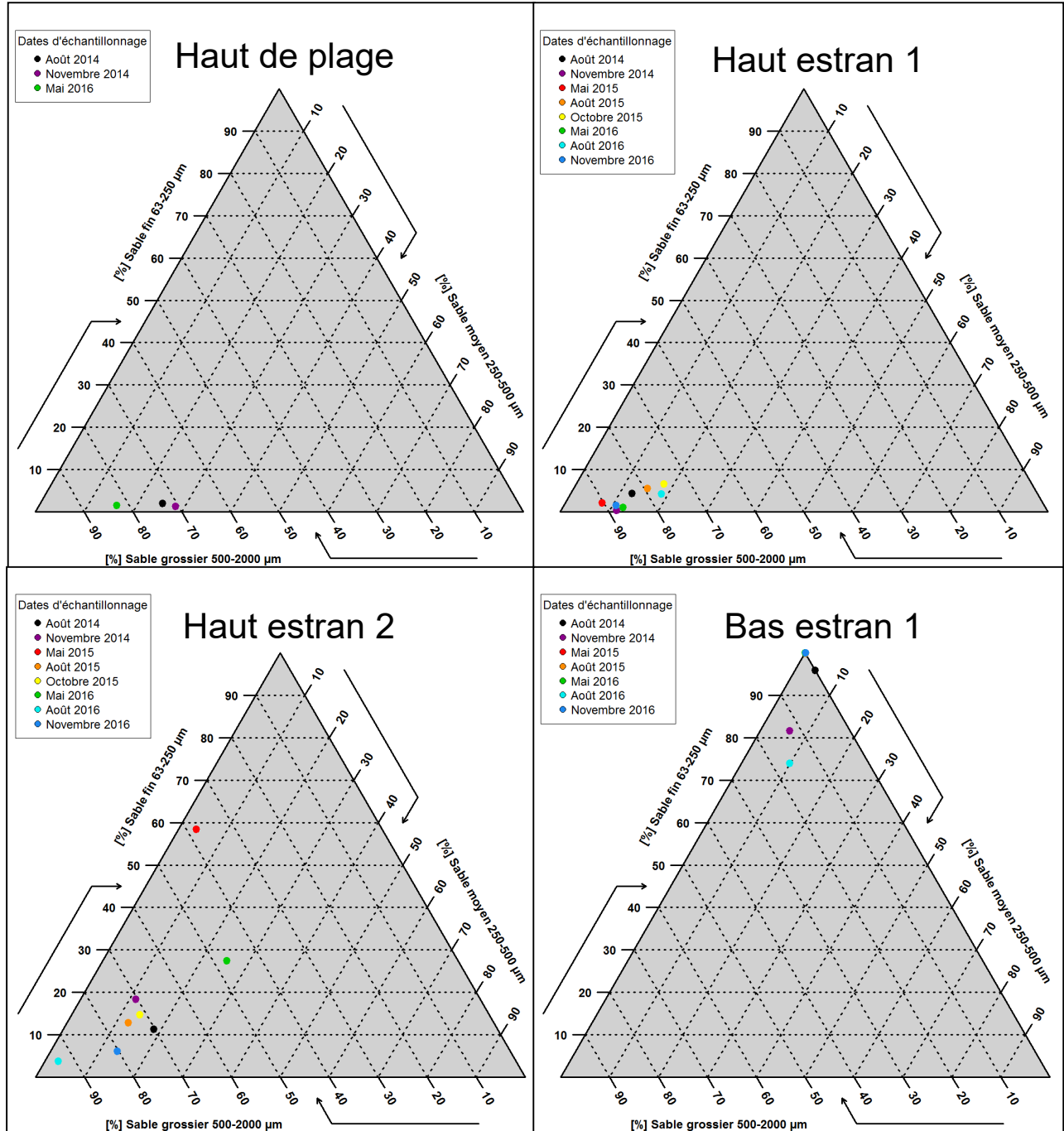


Figure 76. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 μm à 250 μm, sable moyen de 250 μm à 500 μm et sable grossier de 500 μm à 2 000 μm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 1.

4.4.5.2. Profil 2 (naturel)

La portion de sable de la matrice fine du haut de plage est constituée en majorité de sables grossiers, soit entre 57 % et 83 %, tandis que les sables moyens composent entre 16 à 40 % de l'échantillon (figure 77). Très peu de sable fin est présent avec un maximum de 5 %. Les résultats granulométriques présentent une composition similaire à celle du profil 1, mais une tendance croissante du pourcentage des sables grossiers est remarquée depuis l'état initial.

Sur le haut estran 1, la fraction sableuse grossière est très similaire aux chiffres du haut de plage pour l'ensemble des levés. L'échantillon d'août 2015 est celui ayant obtenu le plus de sable grossier (94 %) tandis qu'août 2016 obtenait la composition sableuse la moins grossière (65 %). Les autres échantillons sont plutôt entre 73 et 85 %.

Pour le haut estran 2, la majorité des échantillons était composée de sable grossier (63 à 75 %) et de sable moyen (autour de 20 %). Deux échantillons ont eu des compositions très distinctes, soit août 2015 avec presque 94 % de sable grossier, et octobre 2015 avec 35 % de sable grossier et 52 % de sable moyen. La présence de sédiments plus fins (argile et limon) semble constante, peu importe la proportion de sable grossier.

Sur le bas estran 1, la portion de sable fin était de 97 % et celle du sable moyen s'élevait à 3 % en août 2014. En novembre 2014, les sables grossiers ont été les plus importants de tout le suivi avec une proportion de 13 %, alors que les sables moyens représentaient 10 %. Ensuite, depuis le printemps 2015, la proportion de sable fin revient près de la valeur de l'état de référence.

Les résultats granulométriques de ces quatre échantillons sont davantage homogènes entre eux à travers les saisons qu'au profil 1. Cela peut s'expliquer par un profil naturel en équilibre sédimentaire dynamique à cet endroit. Il existe toutefois des événements ponctuels qui peuvent influencer la granulométrie, particulièrement sur le haut estran où les plus grands écarts dans la proportion des sables grossiers ont été observés. La présence d'herbiers à

proximité et la dérive littorale sont les principaux facteurs ciblés ayant influencé la composition granulométrique. De plus, il est possible que l'augmentation ponctuelle ou constante des sables grossiers observée soit liée à l'ajout de sédiments au pied des enrochements à proximité (360 m au sud-ouest), lesquels auraient été déplacés par les vagues et les marées. Toutefois, le profil présente une certaine stabilité de la fraction sableuse de la matrice sédimentaire fine, si ce n'est de la légère augmentation de sable grossier observée en haut de plage (augmentation de 11 points de pourcentage entre le premier et dernier échantillon).

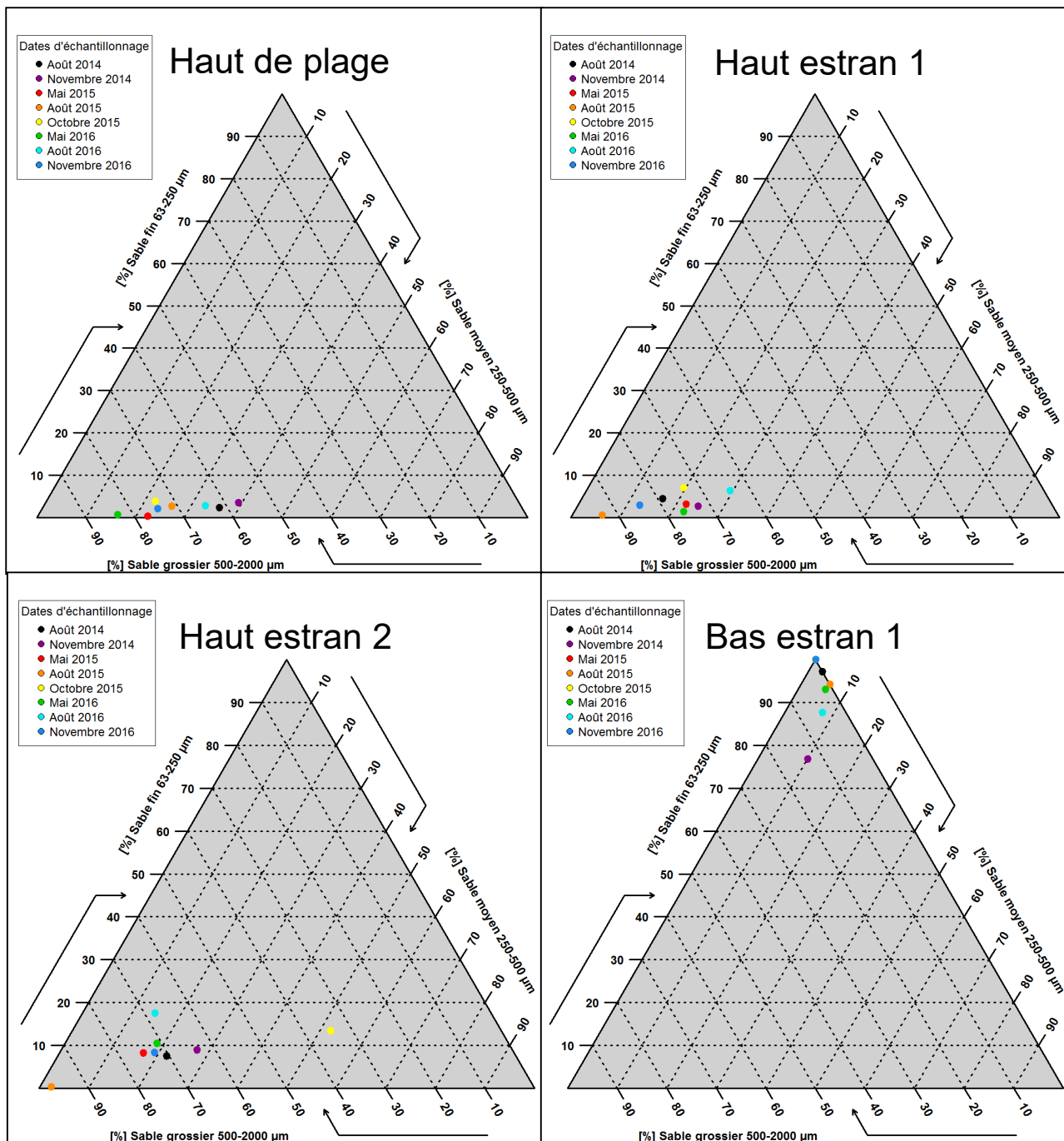


Figure 77. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 2.

4.4.5.3. Profil 3 (naturel)

Le haut de plage présente, en août 2014, une proportion de 69 % de sable grossier et de 29 % de sable moyen (figure 78). Cet emplacement présente un comportement similaire à celui observé pour les trois premiers échantillonnages (août et novembre 2014 et mai 2015) sur le haut de plage du profil 2 : une baisse de la fraction sableuse grossière entre l'état initial et novembre 2014, suivie d'une hausse importante en mai 2015 et d'une relative stabilité de cette fraction pour le restant de l'étude. En effet, l'échantillonnage de novembre 2014 présente la proportion de sable grossier la plus faible (56 %) tandis que l'échantillonnage de mai 2015 est celui où cette fraction est la plus forte (88 %) sur ce profil. Les sables fins sont toujours en faibles proportions avec moins de 5 %. Entre le début et la fin du suivi, la proportion des sables grossiers est restée relativement stable, contrairement au profil 2.

Sur le haut estran 1, la fraction sableuse grossière a varié entre 49 et 79 % sur l'ensemble du suivi. C'est en août 2016 que l'échantillon possédait le moins de sable grossier, soit 49 %, alors que les sables fins s'élevaient à 14 %. Sur le haut estran 2, les résultats des sables grossiers sont similaires au haut estran 1 pour les trois premières saisons. À partir d'août 2015, le deuxième tiers de la plage devient plus grossier que le premier 3 fois sur 4.

Les sables fins composaient 100 % de l'échantillon sur le bas estran 1 en août 2014 et pour toutes les autres dates sauf mai 2015, qui présentait 8 % de sable grossier.

Il est intéressant de noter qu'à l'état de référence, le haut de plage ainsi que les hauts estrans 1 et 2 ont présenté tous les trois la même valeur de sable grossier (près de 70 %). Ces trois emplacements ont été relativement homogènes dans les variations sédimentaires saisonnières, sauf en août 2016 alors que le haut estran 2 était composé de plus de sables grossiers que tous les autres échantillons de la plage de ce profil. Cela indique que la granulométrie de l'ensemble de la plage répond de manière cohérente aux conditions hydrodynamiques saisonnières.

Dans l'ensemble, les résultats granulométriques de cette plage naturelle indiquent des changements saisonniers de la fraction sableuse un peu plus importants qu'au profil 2. Le continuum granulométrique entre le haut de plage, le haut estran et le bas estran 1 est aussi moins homogène, remarquable par des compositions de sable grossier présentant parfois des écarts importants pour les quatre échantillons (étendue sur 20 m) en un même échantillonnage.

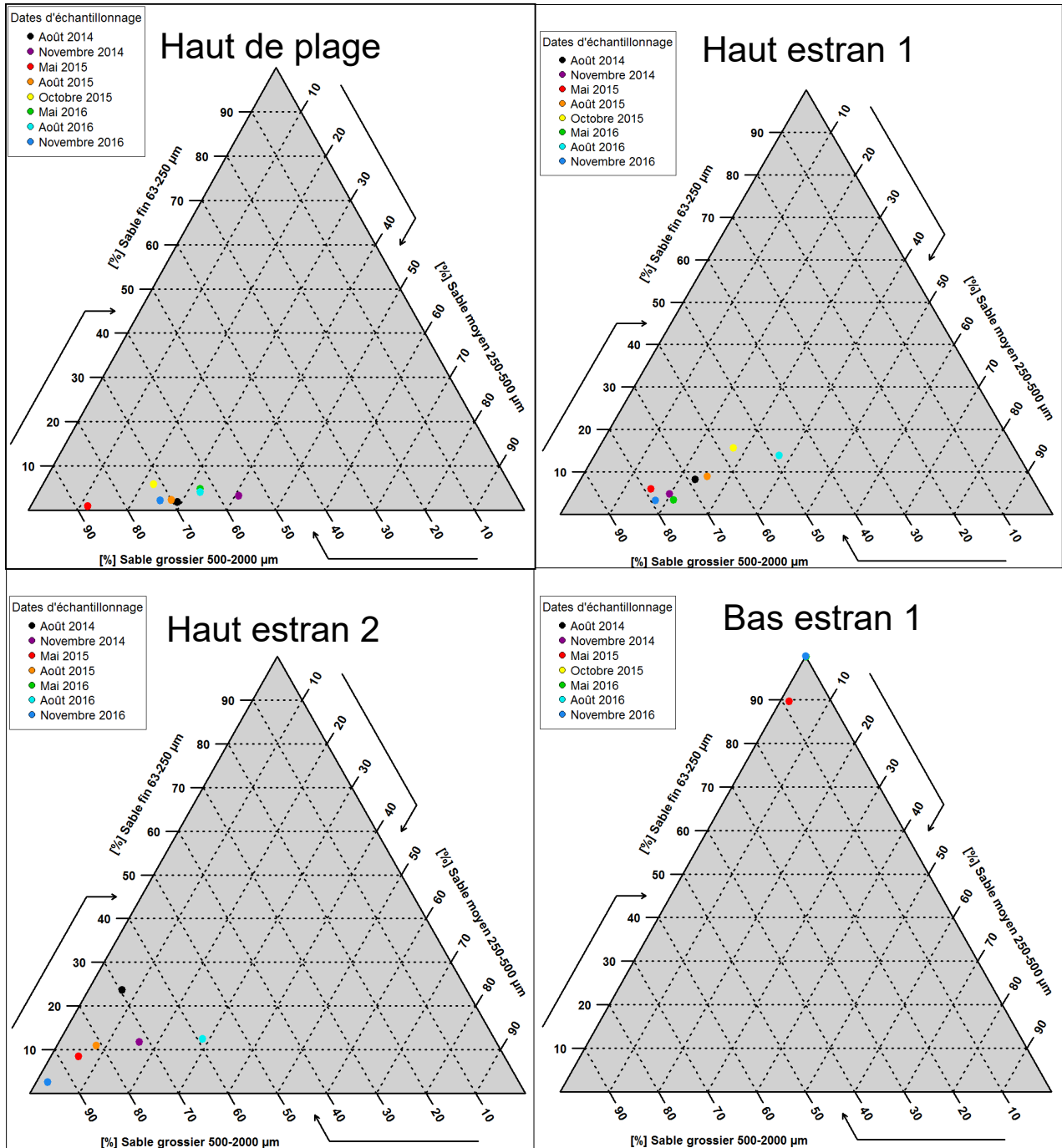


Figure 78. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 3.

4.4.5.4. Profil 4 (déjà artificialisé avant les travaux de 2014)

Il est important de noter qu'il n'y a pas de haut de plage végétalisé sur ce profil dû à l'emplacement de l'enrochement. Sur le haut estran 1, en août 2014, l'échantillon analysé montre une composition de 69 % de sable grossier, 26 % de sable moyen et 5 % de sable fin (figure 79). En novembre 2014, les résultats sont similaires tandis qu'en mai 2015, les valeurs sont complètement différentes avec 32 % de sable grossier, 44 % de sable moyen et 24 % de sable fin. À partir d'août 2015, la composition de la fraction grossière sableuse n'a été qu'en augmentant, dépassant de 15 % la valeur initiale pour l'échantillon de novembre 2016.

Pour le haut estran 2, les résultats en août 2014 sont similaires à ceux du haut estran 1 pour la composition de sable fin, mais avec un peu plus de 10 % de sable moyen. Par la suite, les résultats sont majoritairement retrouvés dans la portion du diagramme la plus grossière, avec près de 100 % de sable grossier, à l'exception de mai 2016 plus proche de l'état initial.

Sur le bas estran 1, la proportion des sables fins est vraiment différente des autres profils de la côte sud de l'île depuis août 2015. À partir de cette période, la portion des sables fins varie entre 20 % et 72 %, les sables moyens entre 28 % et 49 % et les sables grossiers entre 0 % et 31 %.

La proportion des limons et des argiles ne semble pas influencer les résultats des classes de sable dans le continuum granulométrique des échantillons. Ceci indique une hétérogénéité du haut estran entre les classes granulométriques de la matrice fine. Il semble y avoir une tendance pour ce secteur à avoir de plus en plus de sable grossier. Cela veut dire qu'il y a autant de sable, de limon et d'argile dans les échantillons à travers les saisons du suivi, mais que la fraction sableuse grossière est en augmentation. Il y a donc une grande hétérogénéité entre les échantillons et les saisons sur l'ensemble du suivi. Il est possible que le secteur soit perturbé par le chantier maritime Dufour à 150 mètres au nord-est. De plus, cette infrastructure côtière comporte un épi qui bloque le transit sédimentaire.

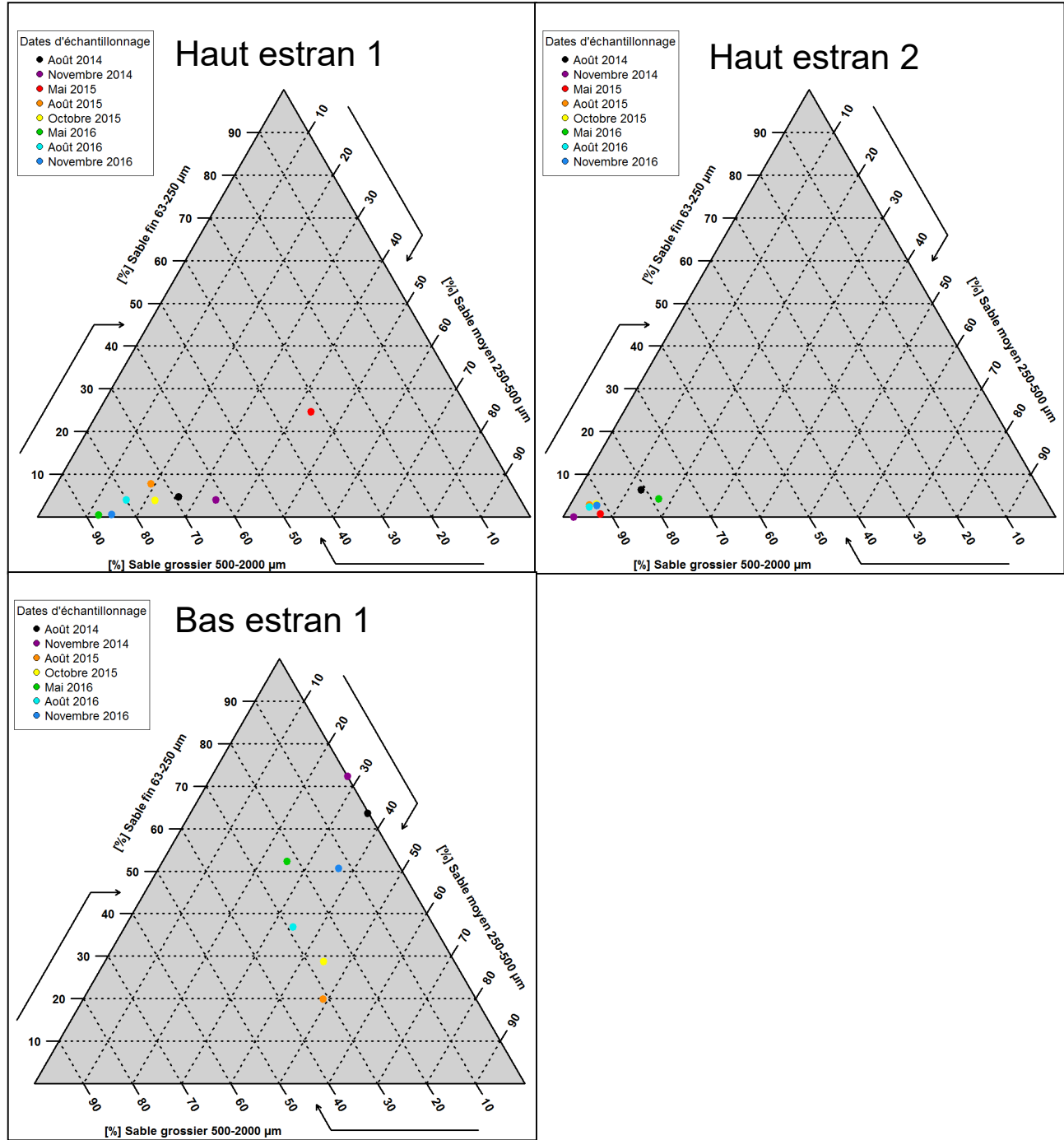


Figure 79. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sables fins de 63 μm à 250 μm, sables moyens de 250 μm à 500 μm et sables grossiers de 500 μm à 2 000 μm) des échantillons sur le haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 4.

4.4.5.5. Profil 5 (artificialisé)

Sur ce profil du nord-est de l'île, le haut de plage végétalisé n'a été analysé qu'à l'été 2014 avant que l'enrochement empiète sur cette partie de la plage. Les résultats montrent que le haut de plage ressemble à ceux observés sur la côte sud, avec une proportion de sable grossier variant entre 77 % et 84 %, de sable moyen variant entre 16 % à 21 % et très peu de sable fin (figure 80).

Sur le haut estran 1, l'état initial présente une composition de 72 % de sable grossier, de 25 % de sable moyen et de 3 % de sable fin. Après la mise en place de l'enrochement, l'échantillon de novembre 2014 montre une légère diminution des sables grossiers de 14 points de pourcentage tandis que les sables moyens obtiennent un gain du même nombre de points. Par la suite, la fraction sableuse grossière varie grandement, entre 47 et 95 %, au profit des sables moyens, les sables fins étant toujours marginaux. Mai 2015, mai 2016 et novembre 2016 sont les dates auxquelles les résultats de la fraction sableuse grossière étaient les plus élevés, entre 82 et 90 %. Chaque saison estivale a présenté des résultats plus faibles de cette classe granulométrique grossière, entre 47 et 72 %. Cela dit, un cycle semble se répéter pour la granulométrie de cette plage où les sables grossiers sont plus présents à l'automne et au printemps (lors des conditions hydrodynamiques les plus fortes) tandis qu'à l'été, cette fraction est moins importante et comporte plus de sable moyen et fin (conditions plus calmes).

Sur le haut estran 2, les résultats d'août 2014 sont légèrement différents de ceux du haut estran 1 avec un peu plus de sable grossier (83 %) et 16 % de sable moyen. Les échantillons des saisons suivantes montrent une très faible différence granulométrique, avec un intervalle pour les sables grossiers et moyens variant de 20 %. Lorsque la proportion des sables grossiers diminue, c'est la proportion des sables moyens qui augmente, et vice versa. Aucune tendance n'était perceptible sur la fraction grossière après l'installation de l'ouvrage, sauf à partir d'août 2016 alors que les deux derniers échantillons ont présenté les plus fortes valeurs, soit entre 90 et 95 %.

Le premier échantillon du bas estran 1 en août 2014 est constitué à 94 % de sable fin et à 6 % de sable moyen. Aucun sable grossier n'était présent dans cet échantillon. En novembre 2014, après les travaux, la fraction sableuse de l'échantillon est alors constituée à 56 % de sable grossier, 22 % de sable moyen et 22 % de sable fin. La fraction sableuse fine a été réduite à 72 % au bénéfice de la fraction sableuse moyenne et grossière. Par la suite, le mois de mai 2015 est celui qui comporte le plus de sable grossier (78 %). Ensuite, la fraction grossière diminue pour atteindre graduellement 23 % de sable grossier en novembre 2016. La composition des sables du bas estran 1 montre clairement qu'un événement s'est produit entre août et novembre 2014. La mise en place de l'enrochement, mais surtout de la recharge de plage devant celui-ci sont les principaux facteurs ayant influencé la granulométrie sur ce profil.

La composition sableuse de la plage et du bas estran 1 près de la flexure semble avoir été perturbée par la mise en place de l'enrochement, mais de manière différente. Variant de manière naturelle à travers les cycles saisonniers, la granulométrie du haut estran n'a pas répondu directement à la mise en place de l'enrochement. C'est plutôt les effets à long terme de l'interaction des vagues avec l'ouvrage qui pourraient avoir remanié les sédiments de la recharge vers le bas de la plage, augmentant ainsi la proportion de sable grossier à l'endroit où ces échantillons ont été pris. Il est aussi probable que les sédiments remis devant l'ouvrage aient été similaires granulométriquement qu'aux sédiments présents à l'état naturel, n'affectant pas la proportion de la fraction grossière et, de ce fait, non perceptibles dans les résultats des premiers mois suivant les travaux. De plus, la composition de la matrice fine du bas estran 1 semble avoir été affectée par les sédiments remis au pied de l'ouvrage par la redistribution de ceux-ci vers le bas de la plage par les vagues.

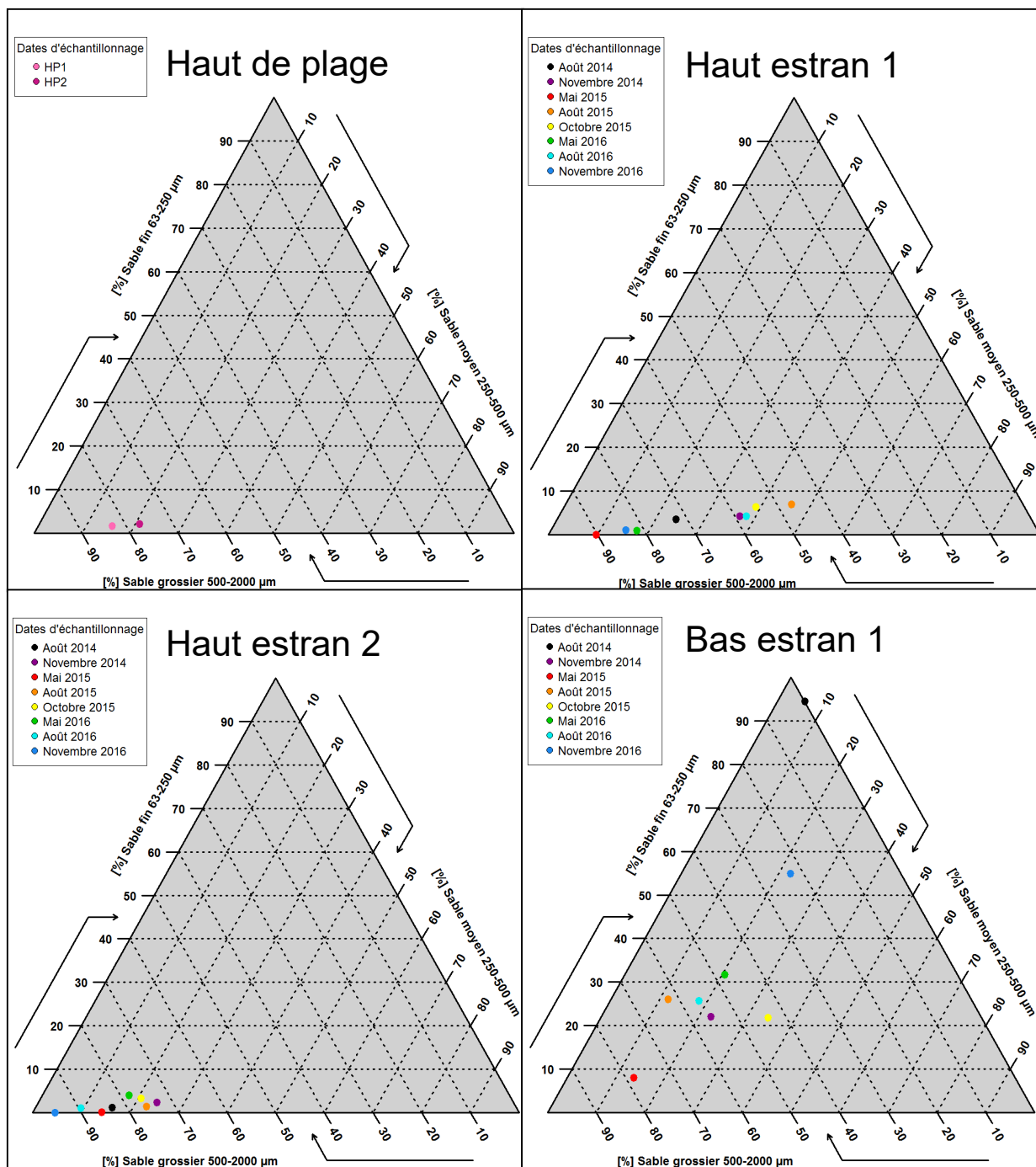


Figure 80. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 5.

4.4.5.6. Profil 6 (naturel)

Le haut de plage végétalisé de ce profil naturel est composé à très forte majorité de sable grossier, entre 83 % et 90 %, à l'exception d'août 2016, où les sables grossiers n'atteignaient que 61 % et les sables moyens, 35 % (figure 81).

Sur le haut estran 1, la fraction sableuse grossière domine comme au profil 5, situé à 75 m à l'est. À l'état initial, les sables grossiers représentent 71 %, les sables moyens 24 % et les sables fins 5 %. À partir de cette date, la proportion de la fraction sableuse grossière a augmenté pour atteindre des valeurs entre 80 % et 92 % et les sables fins ne représentaient plus qu'un faible pourcentage avec à peine plus de 0%. Entre août et novembre 2014, un gain de la fraction sableuse grossière s'est produit et elle est restée relativement stable par la suite. Cette légère hausse de la fraction des sables grossiers ne semble pas signifier une diminution des particules fines (limon et argile) puisqu'elles sont autant présentes dans l'ensemble du suivi pour ce profil (à l'exception d'août 2016).

Sur le deuxième tiers de la plage, l'ensemble des échantillons du haut estran 2 donne une représentation des sables grossiers similaire à celle obtenue à l'échantillon du premier tiers, soit entre 85 à 95 %. Il est clair qu'aucun changement significatif ne s'est produit à cet endroit pendant les trois années du suivi.

Sur le bas estran 1, l'état de référence est à 44 % de sable grossier, 18 % de sable moyen et 38 % de sable fin. Cela ne correspond pas aux résultats obtenus à l'état de référence d'août 2014 du profil 5, dont la granulométrie était beaucoup plus fine que celle du profil 6. Les données de la fraction sableuse ressemblent beaucoup aux résultats du bas estran 1 du profil 5 à partir de novembre 2014, soit un mélange sableux (fin, moyen et grossier) plutôt hétérogène entre les saisons. Parfois, les sables sont plutôt grossiers, d'autres fois ils sont plus fins. Les résultats montrent que la portion des sables moyens est plutôt faible, avec un maximum de 20 % de la composition de cette fraction sableuse.

Sur la plage, la granulométrie a été plutôt stable à travers les trois années du suivi. Sur le bas estran 1, il est intéressant de noter que les augmentations et diminutions de la fraction grossière sur le profil 6 se sont produites pour les mêmes dates au profil 5, mais avec des amplitudes parfois différentes. Cela signifie que le climat de vague qui affecte ces deux profils est le même. De plus, il ne semble pas que la recharge de plage faite au profil 5 ait affecté la granulométrie du profil 6.

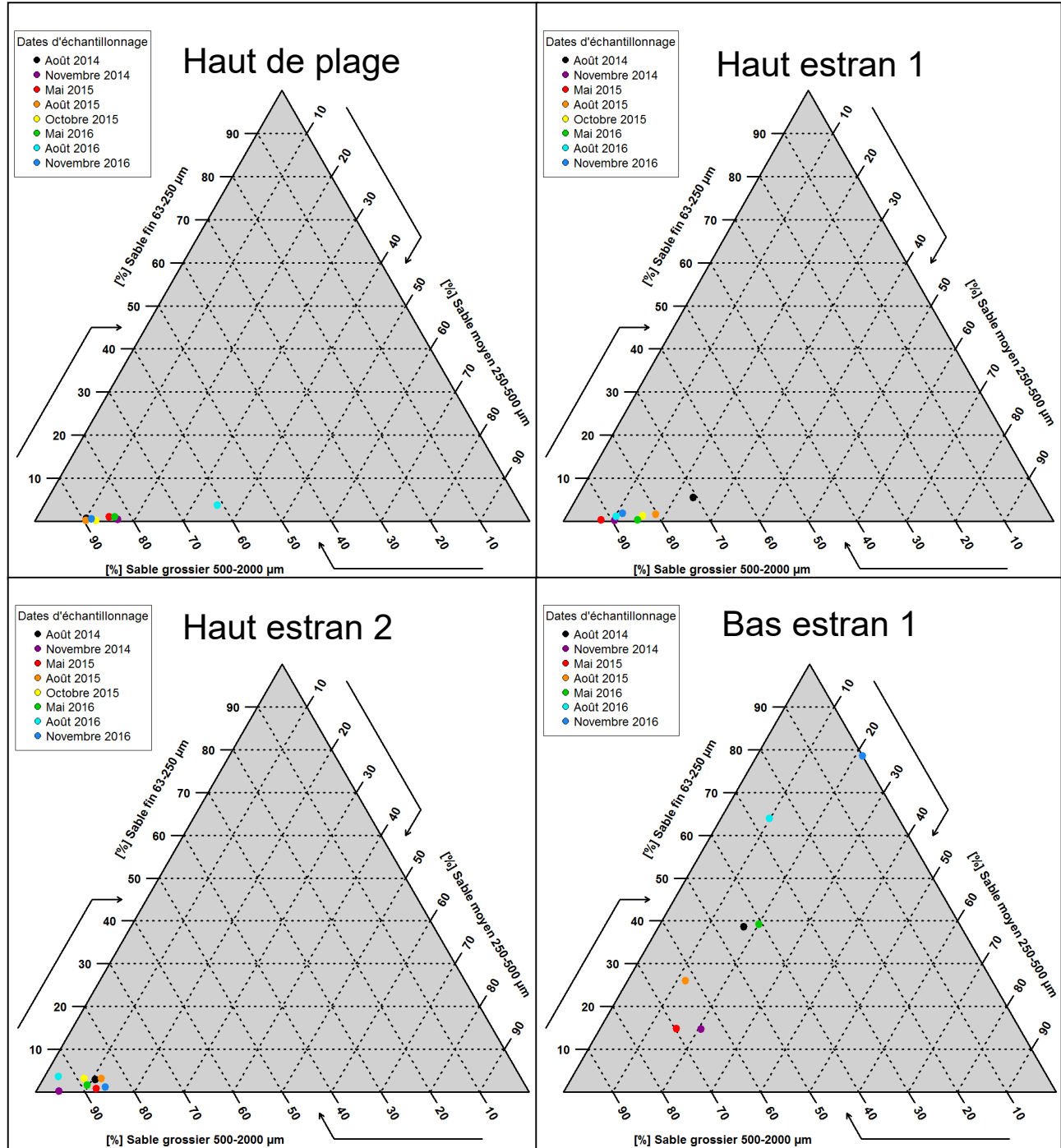


Figure 81. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 6.

4.4.5.7. Profil 7 (artificialisé)

Le haut de plage étant présent uniquement durant la période estivale, il n'a été échantillonné qu'à trois reprises. À l'état initial, il était constitué de sable grossier à 85 % et de sable moyen à 13 %. Les échantillons des deux années suivantes sont toujours grandement composés de sable grossier, avec une proportion de près de 100 % dans la matrice sableuse pour août 2016 (figure 82).

Pour le haut estran 1, les valeurs lors de l'état initial sont de 85 % de sable grossier et de 15 % de sable moyen. Le pourcentage de sable grossier varie entre 65 % (août 2016) et 98 % (octobre 2015) sans aucune tendance claire entre les saisons. Il est intéressant de noter que sur l'ensemble du suivi, presque aucun sable fin n'est présent dans les échantillons de cet emplacement.

Sur le haut estran 2, les valeurs sont très similaires les unes par rapport aux autres, soit entre 82 et 93 % de sable grossier. Il y a donc très peu de changements à cet endroit en ce qui concerne la concentration des classes de sable.

Pour le bas estran 1, l'état de référence donne 11 % de sable grossier, 31 % de sable moyen et 58 % de sable fin. Trois groupes de résultats se distinguent. Un premier plus grossier comprend les échantillonnages de novembre 2014, mai 2015, août 2016 et novembre 2016, alors que les proportions de sable grossier sont autour de 50 %. Le deuxième comprend août 2014, août 2015 et octobre 2015 avec une proportion de sable grossier variant entre 0 et 10 % ainsi que 60 à 70 % de sable fin. Le troisième groupe est constitué par l'échantillon de mai 2016 avec 100 % de sable fin.

Au bas estran 1, il semble qu'il y ait une relation entre la présence de sable fin ainsi que de limon et d'argile dans l'ensemble de la matrice fine. À l'exception d'octobre 2015, lorsqu'il y avait une plus grande proportion de limon et d'argile, les sables grossiers étaient moins présents et les sables fins dépassaient 58 %.

L'ensemble de la fraction sableuse des échantillons de la plage est très similaire à l'état initial. En ce qui concerne les possibles impacts de l'enrochement sur la plage, il ne semble pas y en avoir. La portion sableuse des plages est déjà très grossière et n'a pas connu de tendance générale d'augmentation de la taille granulométrique. Le bas estran étant très variable dans le temps, la granulométrie semble plutôt varier en fonction du climat de vague saisonnier et du transit sédimentaire du littoral.

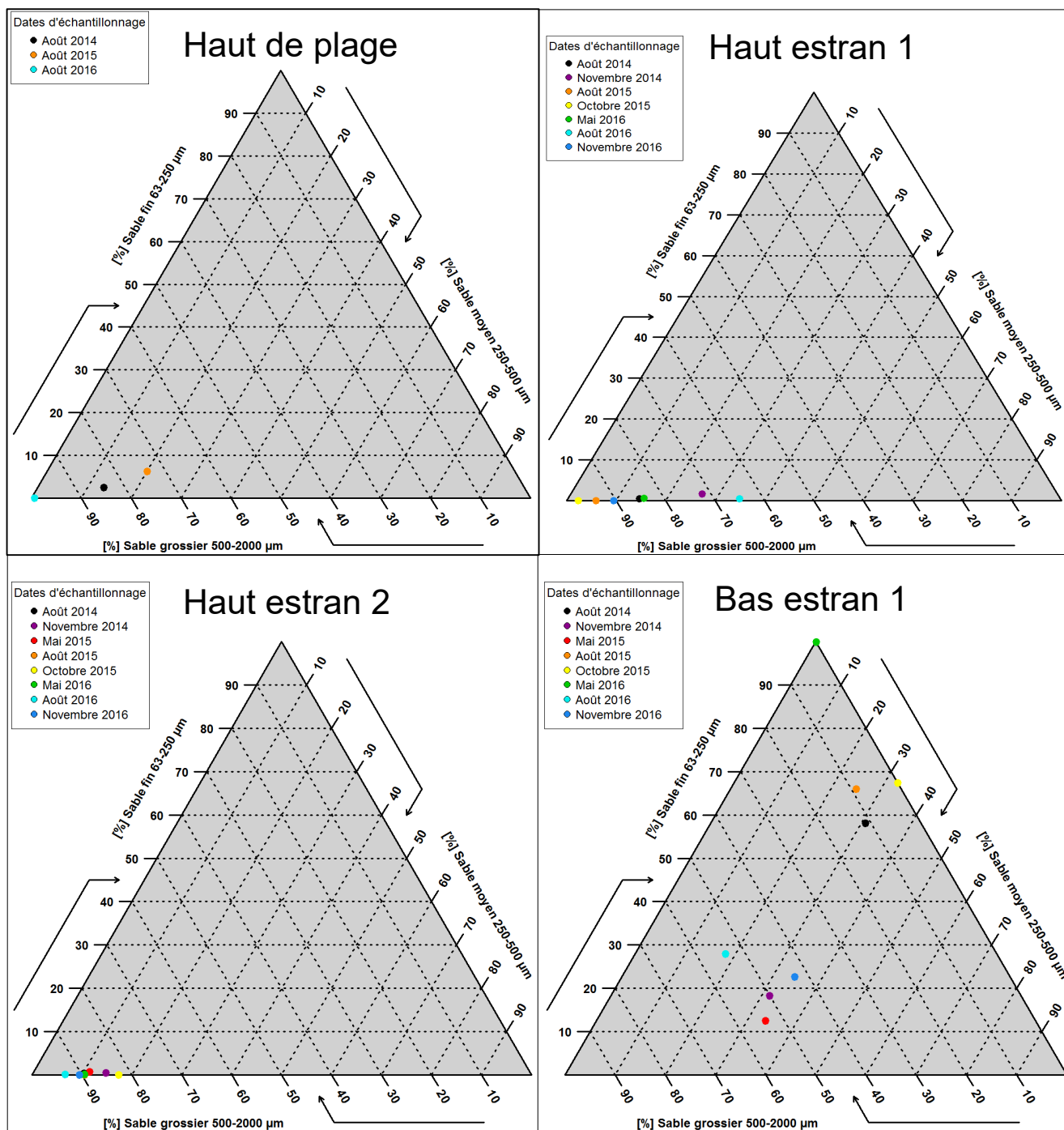


Figure 82. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 7.

4.4.5.8. Profil 8 (artificialisé)

Le haut de plage a seulement été échantillonné en août 2014, avant la mise en place des nouveaux enrochements à l'automne. L'empiètement de l'ouvrage sur cet emplacement a rendu impossible la récolte de sédiments par la suite. Les résultats de l'état de référence montrent une fraction de sable grossier similaire à celle des autres profils de la côte sud, avec 61 % de sables grossiers et 34 % de sables moyens (figure 83). Les sables fins sont toujours représentés en faible proportion sur le haut de plage avec 5 %.

Sur le haut estran 1, l'échantillon de l'état initial est constitué à 66 % de sables grossiers, 28 % de sables moyens et 6 % de sables fins. Suite à l'enrochement de la côte, la fraction grossière a augmenté de 11 points de pourcentage en novembre 2014 et est passée à 85 % en mai 2015 où aucun sable fin n'était présent. À partir de l'été 2015, les valeurs sont similaires à celles observées à l'état de référence, sauf pour août 2016 où cet échantillon était le moins grossier avec 32 % de sables grossiers, 47 % de sables moyens et 21 % de sables fins. Un certain patron est observable dans les résultats des mois d'août qui présentent un pourcentage moins important de sables grossiers que le reste de l'année (par exemple 58 % en août 2015 contre 84 % en mai 2015 et 71 % en octobre 2015).

Sur le haut estran 2, l'état de référence est à 64 % de sables grossiers, 18 % de sables moyens et 18 % de sables fins. À la suite des travaux, cette portion de la plage ne réagit pas comme le premier tiers. Elle est un peu moins grossière de 7 points de pourcentage. Par la suite, les résultats sont très variables avec une proportion de sables grossiers variant entre 34 à 93 %. Il ne semble pas y avoir de patron clair dans la distribution des pourcentages des classes granulométriques. Cet emplacement du profil 8 est très hétérogène.

Sur le bas estran 1, l'état initial montre que 100 % de l'échantillon est constitué de sables fins. Il faut attendre mai 2015 pour que l'état change alors que 12 % de sables grossiers sont présents. Il est intéressant de noter que la première augmentation des sables grossiers s'est aussi produite en mai 2015 sur le haut estran 2. La deuxième fois où il y a eu une composition autre que 100 % de sables fins est à l'été 2016 où 20 % de sables grossiers et

15 % de sables moyens ont été calculés. C'est aussi à cette date où le haut estran 2 a connu sa plus grande concentration de sables grossiers.

Il semble que les enrochements aient influencé la granulométrie de la plage, mais de façon temporaire, puisque les changements sont plutôt visibles sur les premiers échantillonnages (novembre 2014 et mai 2015). Les variations dans la composition de la matrice sableuse du bas estran 1 semblent plutôt liées à un apport sédimentaire provenant du large ou d'un transit sédimentaire lié à la dérive littorale puisque seulement deux échantillons ont présenté des compositions différentes durant le suivi.

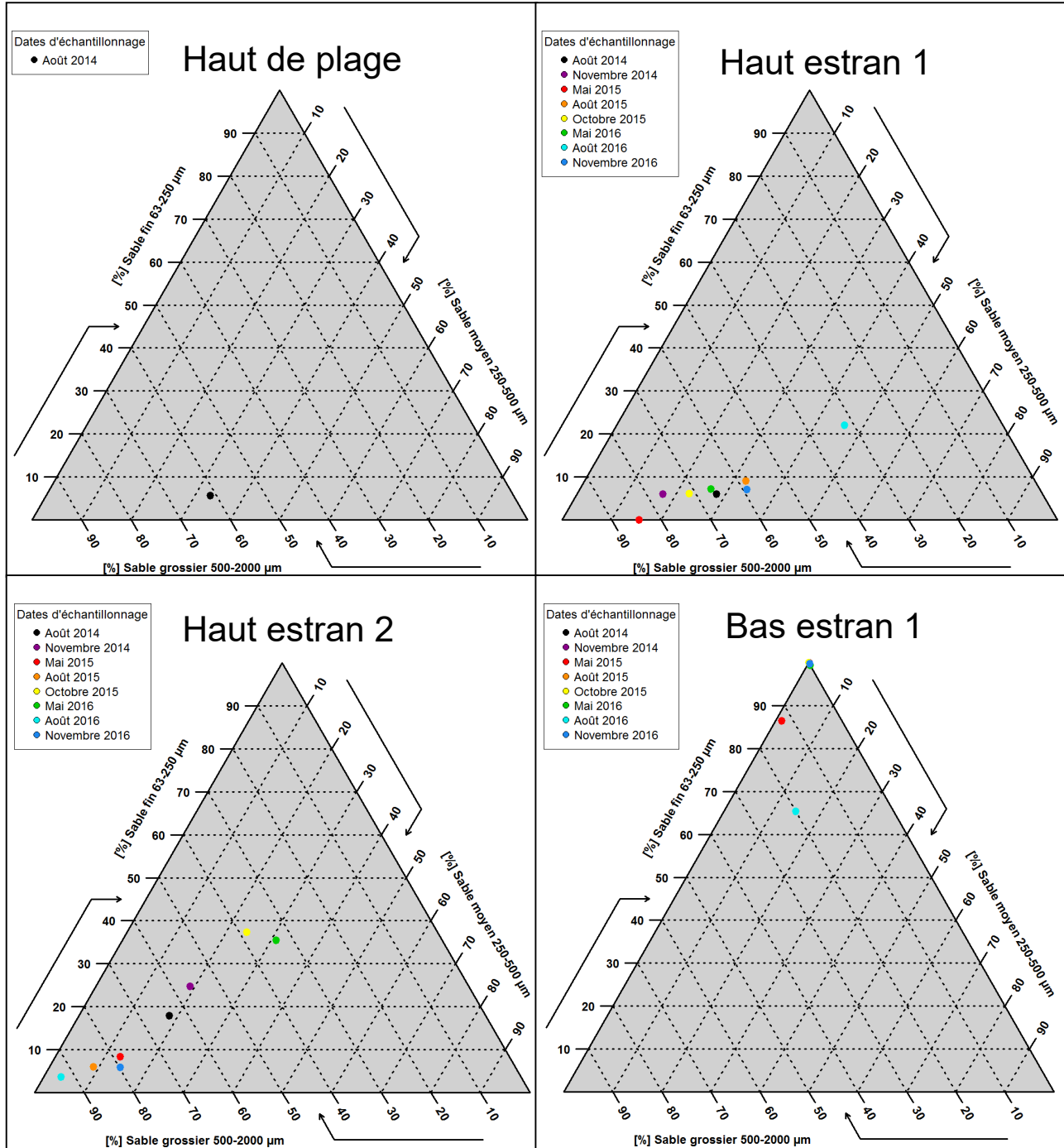


Figure 83. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 8.

4.5. Morphologie générale du littoral

La morphologie du littoral de l'île est variable sur l'ensemble du linéaire à l'étude. Rappelons que les profils 1, 2, 3, 4 et 8 sont ceux de la côte sud, le profil 8 étant le plus au sud-ouest (près de la pointe à Simon) et le profil 4 étant le plus au sud-est (près de l'Hôtel Cap-aux-Pierres). Au nord-est, les profils 5 et 6 sont dans l'anse à Buttemont et le profil 7 est dans l'anse à Mailloux. Seul le profil 4 est déjà artificialisé par un enrochement lors des levés topographiques de l'état de référence d'août 2014.

Le premier constat est que la distance entre la route (ligne blanche de l'accotement) et la ligne de rivage n'est pas la même selon les profils (tableau 29). L'enjeu de protection des infrastructures routières n'a pas le même degré d'urgence selon les cas. La distance la plus courte est celle du profil 4 et la distance la plus grande est celle du profil 3. Trois profils naturels où ces distances étaient courtes (moins de 15 m) ont fait l'objet de travaux d'enrochement réalisés à l'automne 2014 (profils 1, 7 et 8).

Tableau 29. Distance entre la route et la ligne de rivage, août 2014.

Profil	Orientation	État de la côte	Ligne de rivage (m)
P1	Sud	Naturelle	15,3
P2	Sud	Naturelle	14,7
P3	Sud	Naturelle	27,3
P4	Sud	Artificielle	4,4
P5	Nord-est	Naturelle	8
P6	Nord-est	Naturelle	18,5
P7	Nord-est	Naturelle	13,5
P8	Sud	Naturelle	6,8

La figure 84 montre les profils 1, 2, 3, 4 et 8 de la côte sud de l'île levés le 14 août 2014. La ligne horizontale pointillée bleue délimite le niveau d'eau lors de pleines mers supérieures de grandes marées et la ligne pointillée noire délimite le niveau d'eau lors de pleines mers supérieures de marées moyennes (station marégraphique de Saint-Joseph-de-la-Rive). La plage a une largeur de 17,5 m ($\sigma \pm 2,3$ m) et une pente de $5,5^\circ$ ($\sigma \pm 1,1^\circ$). Elle est suivie d'une large plateforme rocheuse aplanie de 300 m ($\sigma \pm 62$ m) constituée de schistes et

de grès à pendage subvertical. Le profil 8 localisé à l'extrémité sud-ouest près de la pointe à Simon, ainsi que le profil 4, à l'extrémité sud-est de l'île, près de l'Hôtel Cap-aux-Pierres, présentent une largeur de plateforme plus étroite qu'au centre (profils 1, 2 et 3), avec respectivement 242 m et 225 m. La surface de la plateforme rocheuse se trouve au-dessus du niveau moyen de la mer, soit environ à 1 m d'altitude en géodésique. Dans sa partie distale, cette plateforme est limitée par un escarpement d'environ 1 m de hauteur. Ensuite, une large zone sablo-vaseuse de faible pente (600-700 m) sépare la plateforme rocheuse du cordon de basse mer (100 m de large), à la limite de basse mer et de la zone infralittorale.

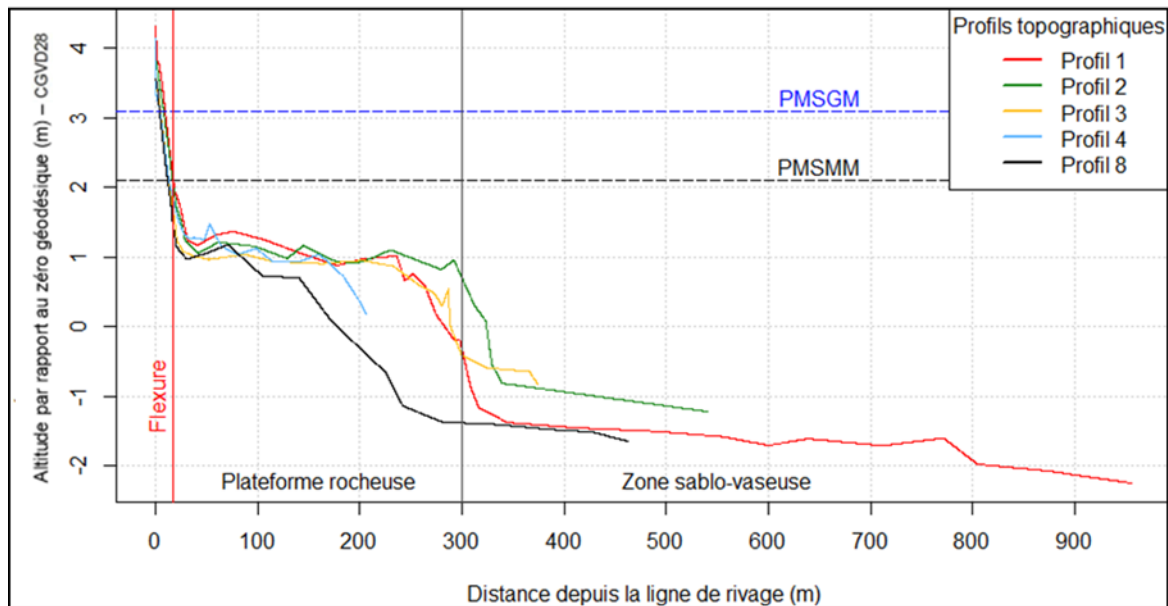


Figure 84. Profils topographiques de la côte sud, août 2014. Exagération verticale 69x.

La figure 85 montre les profils 5,6 et 7 de la côte nord-est qui possèdent en moyenne une plage légèrement plus large qu'au sud avec 18,8 m ($\sigma \pm 3$ m) et d'une pente moyenne de $4,6^\circ$ ($\sigma \pm 1,4^\circ$). La zone du bas estran est plus courte, soit environ 250 m pour les profils 5 et 6 et 200 m pour le profil 7 (données disponibles à partir du levé de novembre 2014). Cette plateforme n'est pas limitée dans sa partie externe par un escarpement et prolongée par une zone sablo-vaseuse, comme au sud de l'île. Son altitude est néanmoins similaire. Au profil 7, c'est plutôt une rampe rocheuse caractérisée par une pente de $3,3^\circ$ et une étendue étroite

qui caractérise le bas estran. Sa limite externe se poursuit sous le niveau de basse mer juste après un léger replat de quelques dizaines de mètres. Ce replat est néanmoins plus bas d'environ 1,5 à 2 m par rapport aux profils 5 et 6 (non visible sur le levé d'août 2014 en raison de l'accessibilité). Il se termine près de la limite du niveau d'eau le plus bas (basse mer inférieure de grande marée) à -3,6 m.

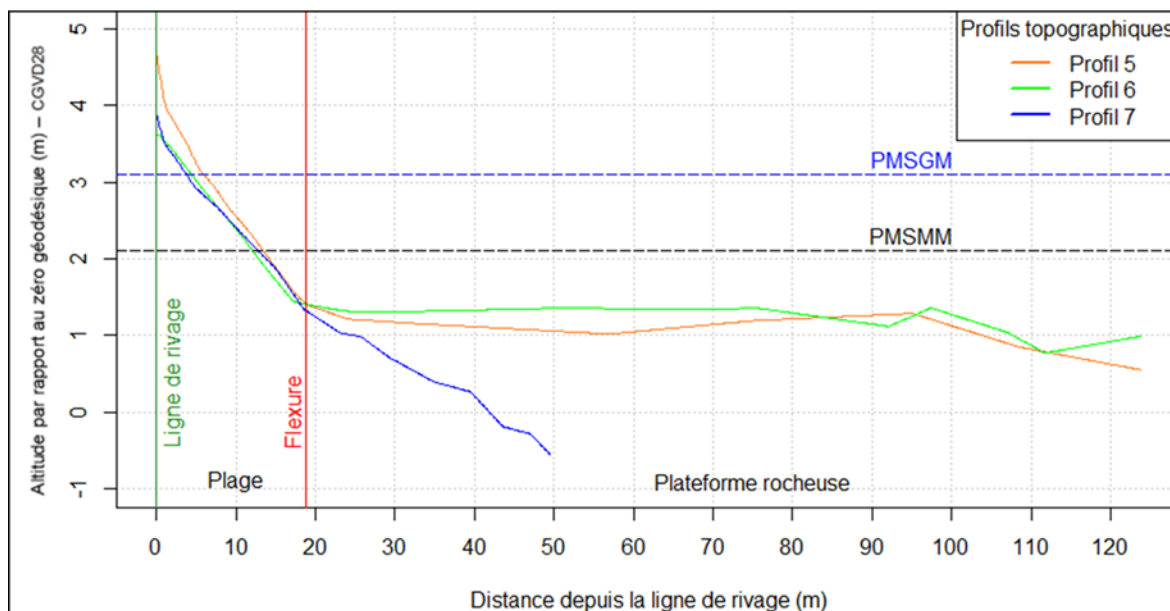


Figure 85. Profils topographiques de la côte nord-est, août 2014. Exagération verticale 10x.

La figure 86 présente la largeur de la plage depuis la ligne de rivage déterminée par la limite de végétation dense dans les secteurs naturels et la base de l'enrochement dans les secteurs artificiels. Ensuite, la plage (haut estran) se termine à la flexure, point de rupture de la pente et du changement granulométrique. La largeur de la plage est aussi variable avec des moyennes de 18,8 m au nord-est et 17,5 m au sud. Les plages les plus larges sont celles des profils 3, 4 et 7 avec plus de 20 m, tandis que la plage la plus courte est au profil 1 avec un peu moins de 13 m. Il ne semble pas y avoir de relation entre les profils ayant eu besoin d'un enrochement et la largeur de plage, sauf pour le profil 1.

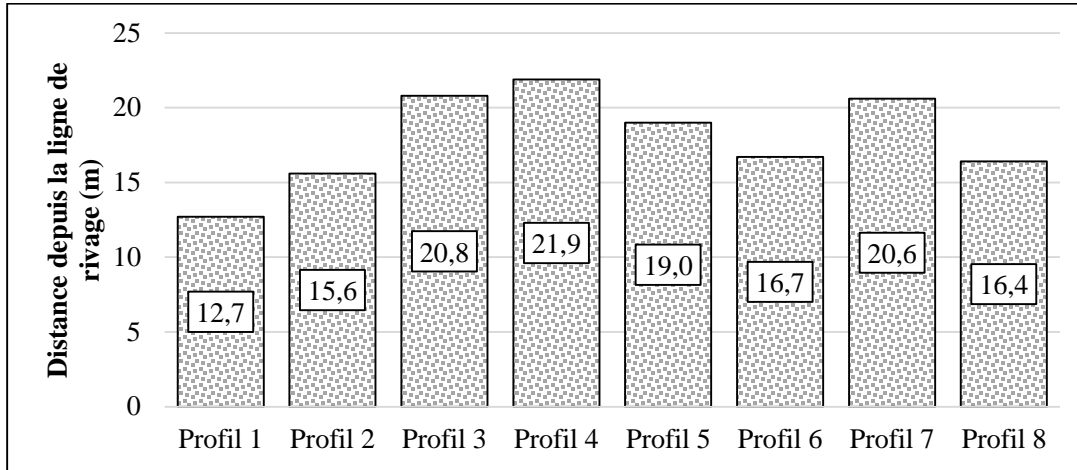


Figure 86. Largeur de plage des profils topographiques (août 2014).

Le tableau 30 présente l'altitude moyenne de la ligne de rivage et de la flexure ainsi que le degré de pente moyen et la largeur moyenne selon l'orientation nord-est et sud. L'altitude moyenne de la ligne de rivage est plus élevée et variable pour les profils de la côte nord-est que pour ceux de la côte sud (respectivement 3,9 m et 3,5 m). La flexure est plus basse au nord-est qu'au sud, en moyenne de 30 cm, potentiellement en lien avec l'altitude de la plateforme rocheuse et la morphologie de la plage. Les pentes des profils au nord-est sont plus fortes (moyenne de 7,5°) que ceux au sud (moyenne à 5,5°), ce qui en fait des profils plus réfléchifs.

Tableau 30. Caractéristiques moyennes de la morphologie de la plage et l'écart-type selon l'orientation nord-est et sud, août 2014.

Orientation	Altitude moyenne de la ligne de rivage	Altitude moyenne de la flexure	Degrés moyens de pente	Largeur moyenne de plage
Nord-est	3,9 (\pm 0,7 m)	1,3 (\pm 0,2 m)	7,5 (\pm 2,1°)	18,8 (\pm 3 m)
Sud	3,5 (\pm 0,1 m)	1,6 (\pm 0,3 m)	5,5 (\pm 1,1°)	17,5 (\pm 2,3 m)
Moyenne générale	3,6 (\pm 0,4 m)	1,5 (\pm 0,3 m)	6,2 (\pm 1,7°)	18 (\pm 2,4 m)

La figure 87 illustre la topographie du haut estran des profils du sud de l'île. Les profils 1 et 2 sont ceux qui possèdent une altitude plus élevée tandis que les profils 3, 4 et 8

sont plus bas. À noter que le niveau d'eau de PMSGM est à environ 50 cm plus bas en altitude de la ligne de rivage pour les profils 3 et 8 et à plus de 80 cm d'altitude pour les profils 1, 2 et 4. Sur les profils nouvellement artificiels, cela expose les enrochements aux dynamiques vagues-ouvrages durant les épisodes de grandes marées.

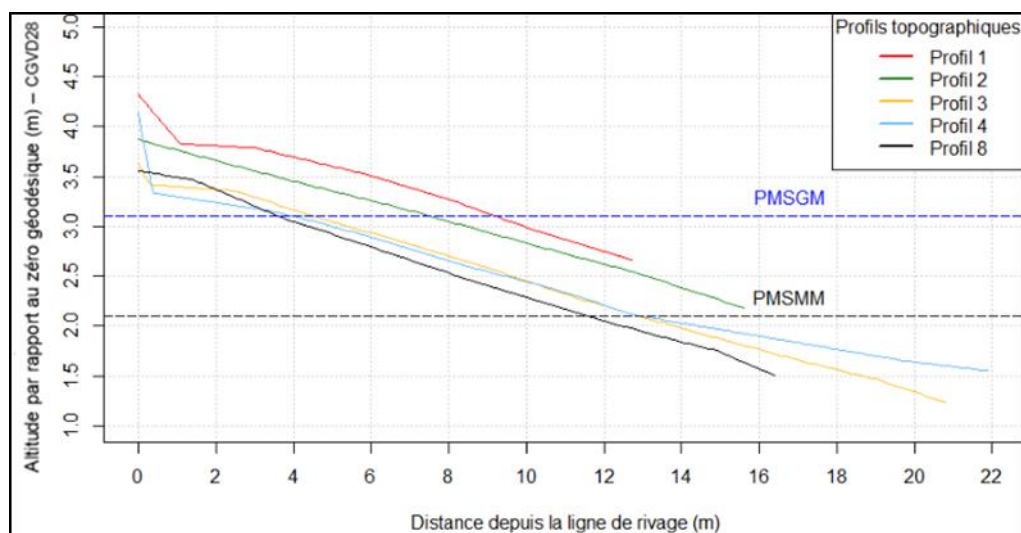


Figure 87. Profils topographiques de la plage côte sud, août 2014. Exagération verticale 2,6x.

La figure 88 montre la topographie de la plage des profils au nord-est de l'île. Le profil 5 est celui qui connaît une altitude plus élevée tandis que les profils 6 et 7 sont plus bas en altitude. Pour ce qui est du niveau d'eau de PMSGM, il est à environ 50 cm plus bas de la ligne de rivage du profil 6, à 80 cm au profil 7 et à 1,5 m au profil 5. Puisque les lignes de rivage des profils 5 et 7 sont plus élevées, cela signifie que les processus d'érosion ont fait reculer la position de cette ligne plus haut sur le profil. La ligne de rivage du profil 6 est plus basse en altitude en raison de la végétation qui colonise le haut de plage, la rapprochant du niveau PMSMM.

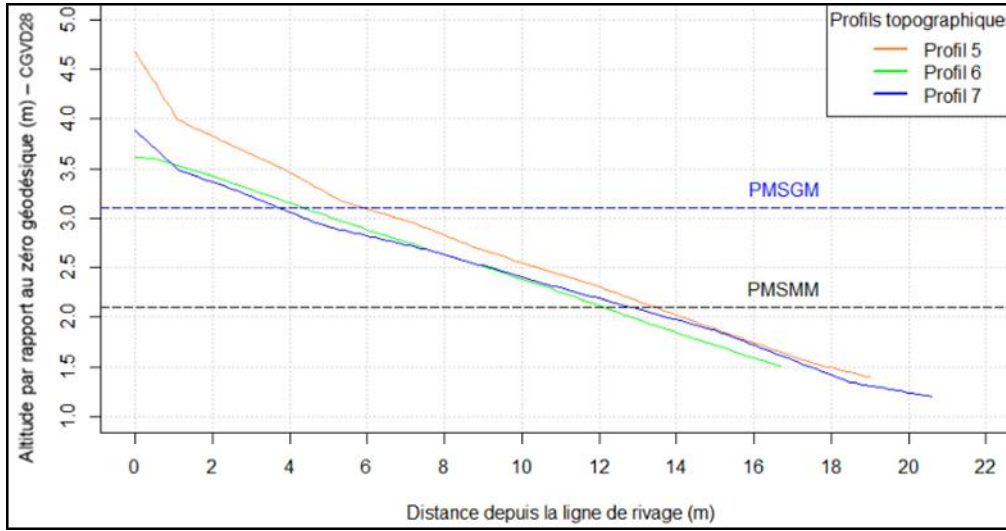


Figure 88. Profils topographiques de la plage côte nord-est, août 2014. Exagération verticale 2,6x.

4.6. Évolution verticale et horizontale récente des plages

Pour chaque profil, l'ensemble des huit levés sont présentés dans une première figure sur laquelle l'amplitude maximale de l'évolution verticale de la plage sableuse est donnée par la courbe rouge. L'incertitude de ces résultats représente la marge d'erreur verticale théorique de 0,01 m du D-GPS ayant servi à faire les profils topographiques. Une deuxième figure représentant l'évolution volumique de la plage sur trois portions égales afin d'apprécier la dynamique du profil sur une largeur empirique d'un mètre de large multipliée par l'élévation de la plage permettant d'obtenir un résultat en volume (m³). Puis, une troisième figure présente l'évolution de la largeur de plage avant et après les travaux d'engrènement.

4.6.1. Profil 1 (artificialisé)

La figure 89 présente les huit levés du profil topographique 1. La ligne de rivage moyenne est située à 9 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement de la route. La mise en place de l'engrènement entre le levé d'août 2014 et novembre 2014 est visible entre les distances 2 à 9 m. Le gain en élévation pour cette zone engrèchée culmine à

60 cm. Après la ligne de rivage, le gain sédimentaire s'est fait par la mise en place des sédiments de la clé de l'enrochement devant celui-ci lors des travaux. La plage se termine à la limite maximale atteinte de la flexure, soit à 28 m depuis l'origine du profil.

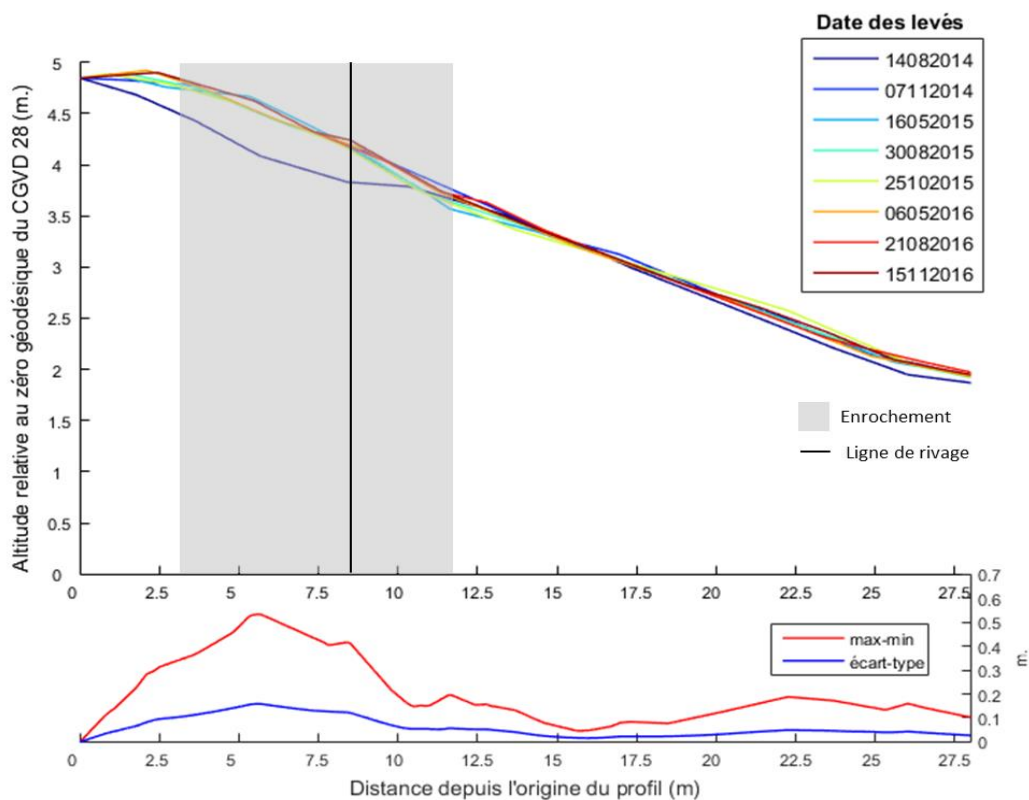


Figure 89. Évolution du profil topographique 1 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 90 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 1 calculé sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 9 à 28 m (19 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale dans le temps. Le premier tiers de la plage (0 à 6 m) est en rouge, le deuxième tiers (6 à 12 m) est en bleu et le troisième tiers (12 à 19 m) est en vert.

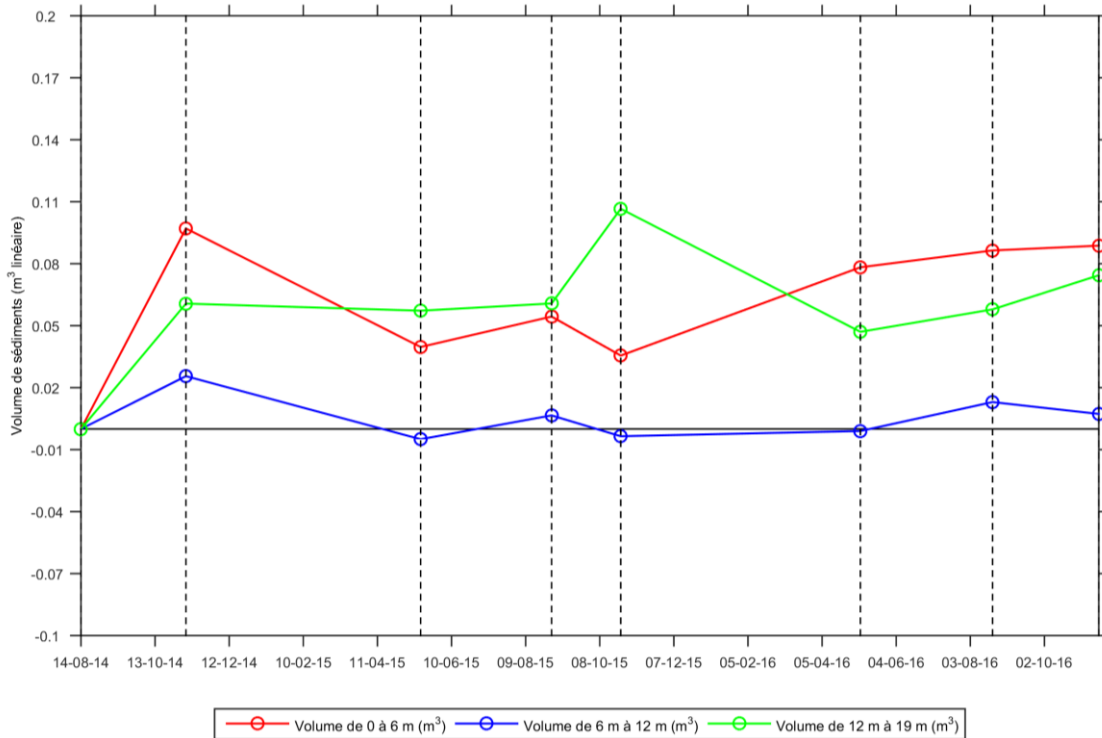


Figure 90. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 1.

Le premier tiers de la plage présente une augmentation de $0,10 \text{ m}^3$ à la suite des travaux, due à la recharge sédimentaire au pied de l'ouvrage de protection. Un gain sédimentaire de $0,06 \text{ m}^3$ est aussi repérable sur le troisième tiers. Le 2^e tiers n'a que très peu augmenté en volume. À la suite de l'hiver, le levé de mai 2015 présente une perte de volume de $0,06 \text{ m}^3$ sur les 6 premiers mètres de la plage par rapport à l'automne précédent, ce qui indique que la berme de recharge de plage faite au-devant et dont une partie recouvrait le bas de l'enrochement a été remaniée par les vagues et les glaces. Le volume sur la deuxième portion a légèrement diminué de $0,02 \text{ m}^3$ tandis que les 10 derniers mètres n'ont pas connu d'érosion. C'est un bilan globalement négatif après le premier hiver. Durant l'été 2015, les vingt premiers mètres de la plage ont légèrement gagné en volume, ce qui est normal pour la saison estivale tandis que bas de la plage était encore stable. À l'automne 2015, le haut de la plage et la partie médiane perdent des sédiments qui semblent être transférés vers la partie inférieure de la plage. Après le deuxième hiver, le levé de mai 2016 présente une augmentation de $0,04 \text{ m}^3$ sur la zone supérieure de la plage tandis que bas de plage diminuent

de 0,07 m³. Cela indique qu'une partie des sédiments de la plage a été remontée vers le haut de la plage par les vagues et les glaces. À l'été 2016, l'ensemble de la plage gagne en volume sédimentaire et atteint un niveau similaire à ce qui avait été calculé à l'automne 2014, à la suite des travaux d'enrochement. Novembre 2016 voit le premier tiers se stabiliser, mais le centre de la plage perd et semble être transféré vers le bas de plage.

À la suite des travaux d'enrochement et de recharge de plage, les sédiments ajoutés sur la plage semblent être restés devant celle-ci. La topographie du haut estran a connu des variations saisonnières normales, soit un démaigrissement durant l'hiver et un gain graduel entre le printemps et l'automne. Au final, c'est un gain sédimentaire qui est observé sur ce profil, qui se traduit dans l'altitude et le volume de la plage.

La figure 91 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 1. Les limites des levés topographiques ont été calculées à partir du même point d'origine (0 m), soit le pied de l'enrochement en novembre 2014. L'intérêt de procéder de cette façon est de montrer l'évolution des déplacements des limites de la plage à partir du même point d'origine.

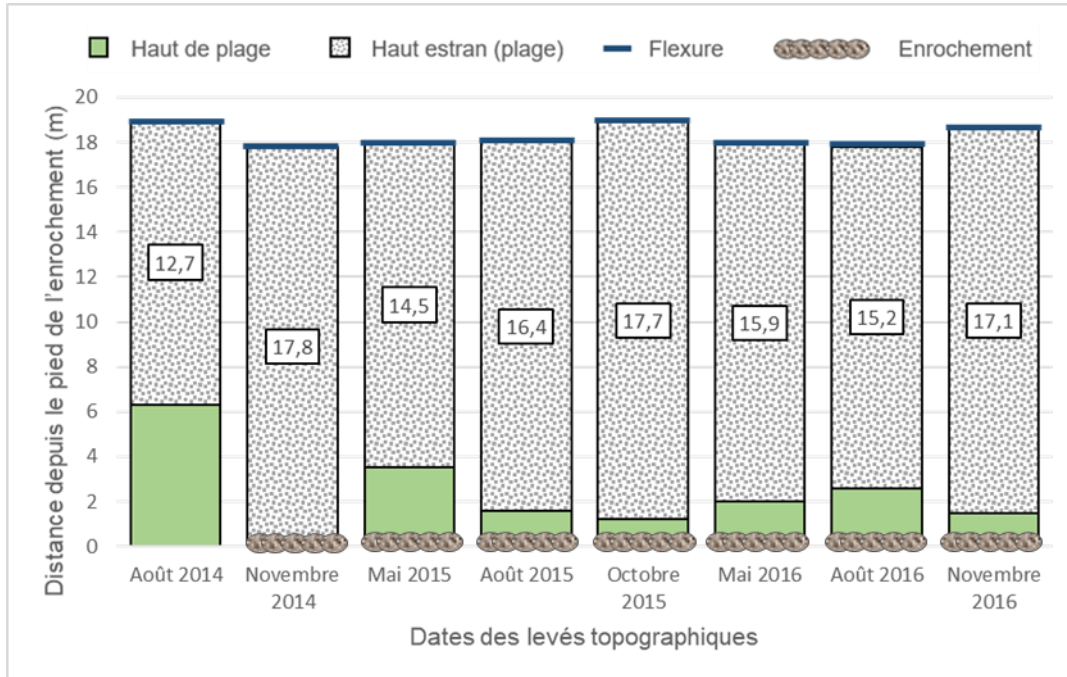


Figure 91. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure depuis le pied de l'encrochement pour le profil topographique 1.

Ce profil étant naturel lors de l'état de référence, la ligne de rivage, où se terminait le haut de plage en août 2014, était située à 6,3 m de l'emplacement du pied du nouvel encrochement. Ainsi, la ligne de rivage a reculé lors de la mise en place de l'encrochement. Il est important de mentionner qu'une partie des sédiments excavés lors de la mise en place des encrochements sur le haut de plage a été déposée devant ceux-ci, formant une berme recouvrant le réel pied de l'ouvrage. C'est pourquoi aucun haut de plage ne fut observé en novembre 2014. Lors de l'hiver 2014-2015, une bonne partie de cette berme a été remaniée et distribuée en partie sur l'estran. À partir du levé de mai 2015, la ligne de rivage est située entre 1,5 et 3,5 m du pied de l'ouvrage signifiant qu'un haut de plage s'est reconstitué malgré l'empiètement de l'ouvrage, sans toutefois être aussi étendu qu'à l'état initial. À l'état initial, la plage était de 12,7 mètres de large alors que la ligne de flexure était située à 19 m de l'origine du profil. Tout de suite après les travaux, la largeur de plage était plus grande de par le nouvel emplacement de la ligne de rivage. La flexure s'est légèrement déplacée durant le suivi et la ligne de rivage s'est stabilisée pour revenir approximativement à la situation de

l'état de référence. La plage montre aussi une résilience aux changements anthropiques apportés à la côte.

4.6.2. Profil 2 (naturel)

La figure 92 présente les huit levés du profil topographique 2. L'ensemble des lignes de rivage mesurées se situaient autour de 12 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement de la route. Aucuns travaux n'ont été réalisés sur ce profil et il est complètement naturel. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est plus grande en avant de la ligne de rivage, soit sur la portion de plage finissant à 35 m, soit à la limite de la flexure.

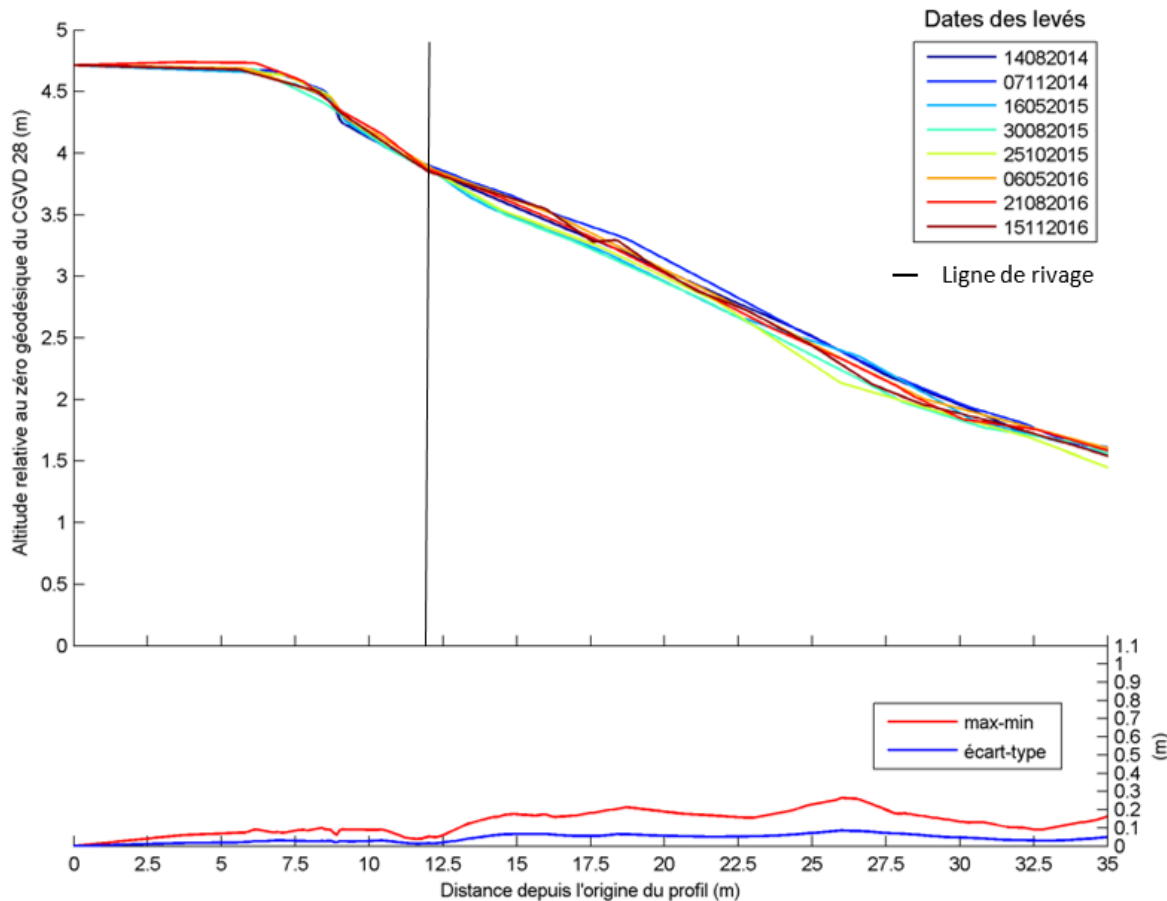


Figure 92. Évolution du profil topographique 2 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 93 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 2 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 12 à 35 m (23 m de largeur). Le premier tiers de la plage (0 à 8 m) est en rouge, le deuxième tiers (8 à 15 m) est en bleu et le troisième tiers (15 à 23 m) est en vert.

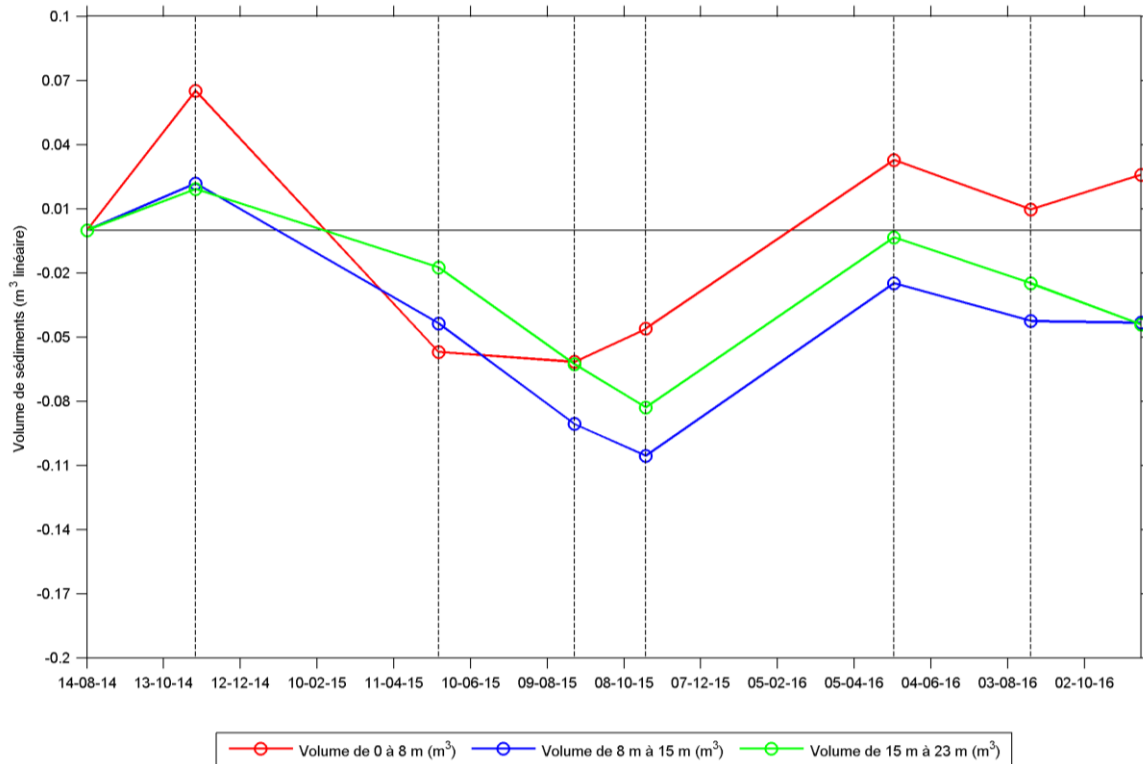


Figure 93. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 2.

Entre l'été et l'automne 2014, le premier tiers de la plage présente une augmentation de $0,07 \text{ m}^3$, mais les gains sédimentaires furent plus modestes sur les deux autres tiers, soit de $0,02 \text{ m}^3$. À la suite de l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume de $0,13 \text{ m}^3$ sur les huit premiers mètres de la plage. Le deuxième tiers a perdu $0,06 \text{ m}^3$ tandis que les huit derniers mètres ont présenté des pertes plus faibles de $0,035 \text{ m}^3$. Jusqu'au levé de l'été 2015, les huit premiers mètres de la plage se sont stabilisés, ce qui est normal pour la saison estivale. Néanmoins, la partie médiane et inférieure de la plage ont encore perdu en volume de $0,04 \text{ m}^3$. À l'automne 2015, le haut de la plage a gagné en sédiments avec près de $0,02 \text{ m}^3$. Par contre, les 2^e et 3^e tiers ont encore perdu en volume, soit de $0,015 \text{ m}^3$. Après le

deuxième hiver, l'ensemble de la plage a eu des gains sédimentaires de $0,08 \text{ m}^3$. À l'été 2016, l'ensemble de la plage perd à nouveau du volume sédimentaire de l'ordre de $0,03 \text{ m}^3$. En novembre 2016, la plage voit son premier tiers légèrement augmenter de $0,02 \text{ m}^3$ ce qui semble avoir été transféré à partir du bas de la plage vers le haut, se traduisant par une diminution d'un peu plus de $0,02 \text{ m}^3$.

Cette plage naturelle répond dans l'ensemble de manière homogène aux cycles saisonniers d'engraissement et d'amaigrissement de la plage. Un balancement naturel se fait à l'automne alors que le haut de la plage s'engraisse au détriment du bas de la plage.

La figure 94 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 2. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage la plus reculée, soit celle de novembre 2016 (0 m). Il est possible de voir que, sur ce profil naturel, la ligne de rivage était relativement stable jusqu'à ce qu'elle recule d'environ 2,5 m en mai et novembre 2016. À l'état initial, la plage avait 15,6 mètres de large et la flexure était située à un peu plus 18 m depuis l'origine des profils. Comme au profil 1, c'est en mai 2015 que les premiers changements apparaissent avec un élargissement important de la plage, alors qu'elle fait 21,6 m de large. En août 2015, la flexure recule de 7 m et la largeur de plage diminue de 8 m. En octobre 2015, la flexure se positionne à nouveau plus loin à plus de 20 m de l'origine du profil, ce qui entraîne un élargissement de la plage à 18 m. En 2016, la flexure se stabilise autour de 17 m pour les trois derniers levés. Néanmoins, la ligne de rivage est à son point le plus reculé des trois années de suivi pour le printemps et l'automne. C'est seulement à l'été 2016 que la largeur du haut de plage est constante avec ce qui a été observé depuis le début du suivi. Sur cette côte naturelle, la ligne de rivage se déplace en fonction de la limite de la végétation dense du haut de plage, ce qui est montré sur ce profil. De plus, la largeur de plage a été relativement stable grâce à des limites (ligne de rivage et flexure) globalement stables. Toutefois un léger recul de la flexure est observable à cet endroit depuis août 2015, qui semble s'être stabilisée. Les conditions hydrodynamiques et glacielles de l'hiver 2015 sur ce profil ont causé des pertes sédimentaires ayant comme conséquences un déplacement des

sédiments de la plage vers le large et donc un élargissement du profil, mais une diminution de la hauteur de la plage. Les plants de spartine alterniflore n'étant pas à maturité au printemps, ces derniers ne peuvent pas jouer le rôle de rétention des sédiments à la flexure comme ils le font en été et à l'automne. De ce fait, les sédiments peuvent migrer plus bas sur l'estran.

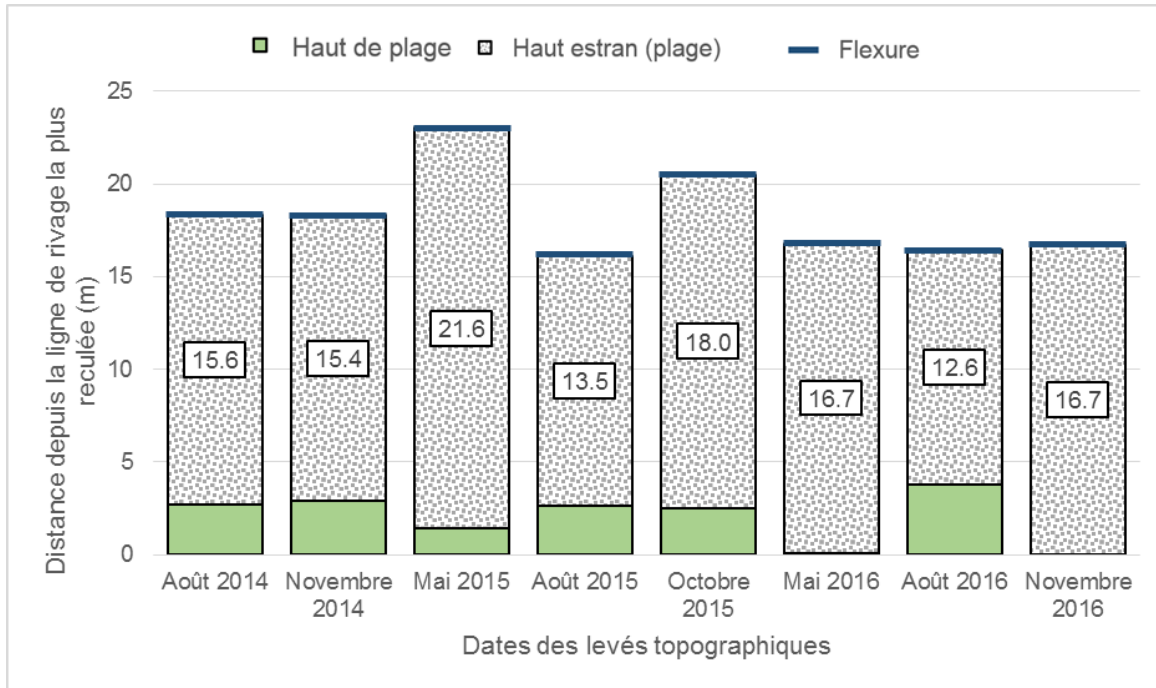


Figure 94. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 2.

4.6.3. Profil 3 (naturel)

La figure 95 présente les huit levés du profil topographique 3. La ligne de rivage moyenne est située directement à l'origine du profil, car l'arrière-côte sur ce profil est trop large avant d'atteindre la route et n'a pas été pris en compte. Aucun enrochement n'a été réalisé sur ce profil et il est complètement naturel. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est plus grande sur le premier et dernier tiers, ce qui indique que le point de bascule d'équilibre sédimentaire de la plage se situe au centre et que les changements de volumes se font aux extrémités de la plage. La plage se termine à la limite de la flexure à 23 m.

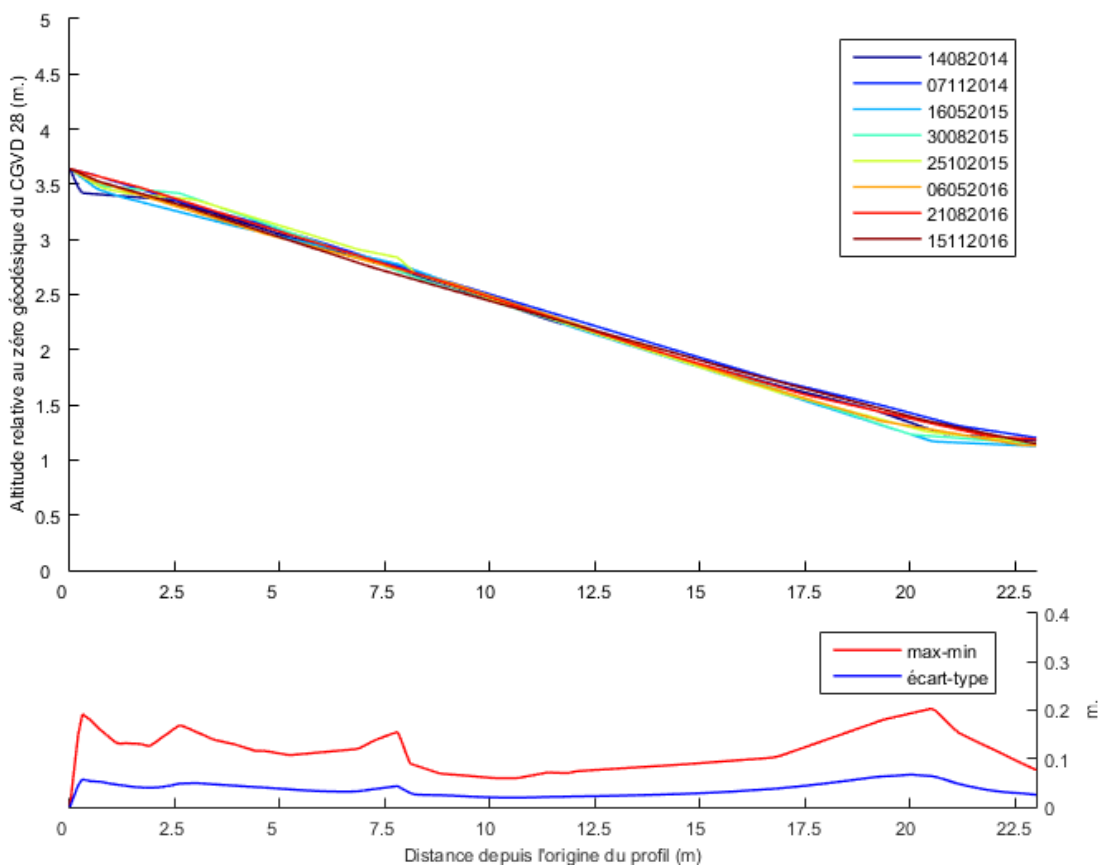


Figure 95. Évolution du profil topographique 3 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 96 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 3 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 0 à 23 m. Le premier tiers de la plage (0 à 8 m) est en rouge, le deuxième tiers (8 à 15 m) est en bleu et le troisième tiers (15 à 23 m) est en vert.

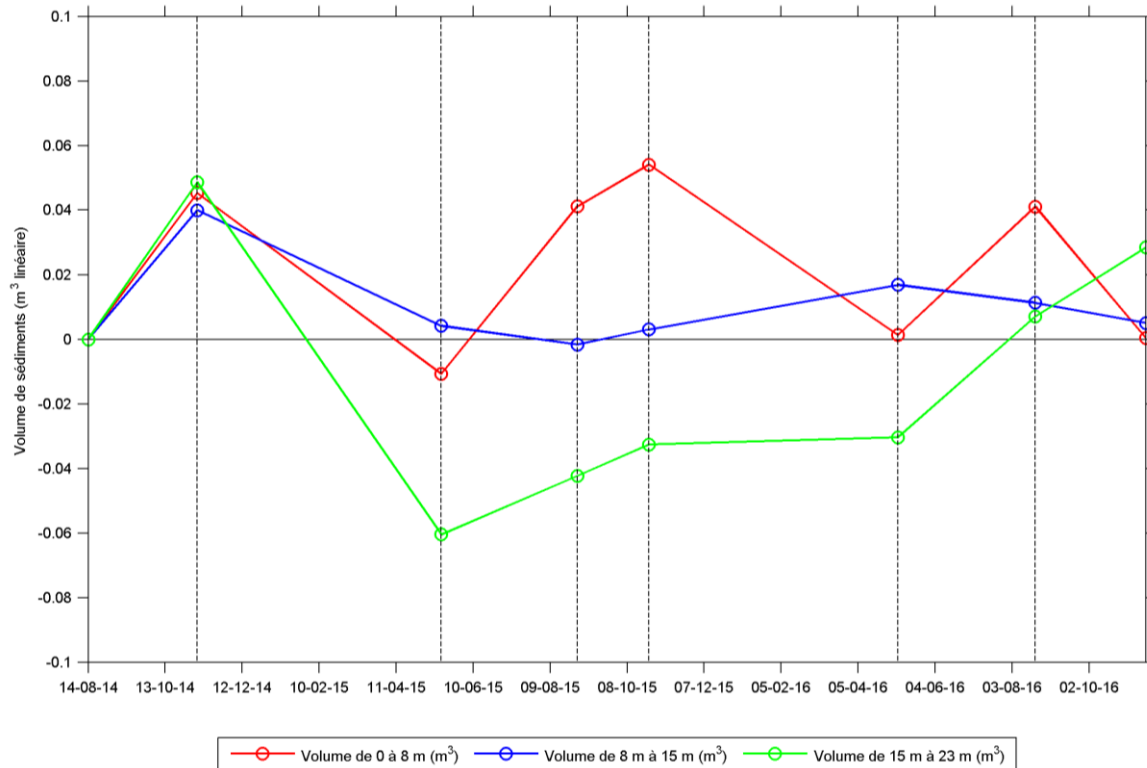


Figure 96. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 3.

Dès l'automne 2014, l'ensemble de la plage présente une augmentation approximative de 0,04 m³. À la suite de l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume de 0,05 m³ sur les huit premiers mètres de la plage et devient négatif comparativement à l'état initial. Le deuxième tiers a perdu 0,035 m³, mais reste toujours positif en comparant à l'été 2014. Cependant, les huit derniers mètres ont connu des pertes importantes de l'ordre de 0,11 m³. Au levé de l'été 2015, les huit premiers mètres de la plage se sont engraisés de 0,05 m³. Le 2^e tiers a atteint la valeur qu'il avait à l'état initial en perdant légèrement du volume sédimentaire. Le bas de la plage a regagné en volume avec près de 0,02 m³. À

l'automne 2015, une tendance à la hausse est visible pour tout le profil de plage avec une augmentation entre $0,005 \text{ m}^3$ et $0,015 \text{ m}^3$. Après le deuxième hiver, les premiers mètres de plage ont perdu près de $0,06 \text{ m}^3$ de plage pour retourner à la valeur de l'état initial. La moitié de la plage a légèrement augmenté de près de $0,02 \text{ m}^3$. Seul le bas de la plage est resté relativement stable. Cela indique que la plage de ce profil a perdu des sédiments qui sont sortis de la zone de la plage et ont pu être déplacés le long du rivage par les glaces ou la dérive littorale. À l'été 2016, le haut de la plage gagne du volume sédimentaire de l'ordre de $0,04 \text{ m}^3$, similaire à ce qui avait été enregistré en novembre 2014. Le centre de la plage a connu une légère baisse de $0,005 \text{ m}^3$ tandis que le bas de plage a connu une forte augmentation, près de $0,05 \text{ m}^3$. En novembre 2016, la plage voit son premier tiers diminuer de $0,04 \text{ m}^3$, volume qui semble avoir été transféré vers le bas de la plage, qui connaît une augmentation de $0,025 \text{ m}^3$.

Cette plage naturelle répond dans l'ensemble de manière homogène aux cycles saisonniers d'engraissement et d'amaigrissement de la plage. L'été et l'automne sont les saisons où la plage s'engraisse et après l'hiver, elle perd en volume.

La figure 97 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 3. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage la plus reculée, soit celle d'août 2014 (0 m). À l'état initial, la plage était de 20,8 m de large alors que la ligne de flexure atteignait 21 m depuis la ligne de rivage. En novembre 2014, l'élargissement le plus important de la plage se produit où elle atteint 22,6 m alors que la flexure se positionne à 23 m vers le large. Depuis le printemps 2015, la situation redevient similaire à l'état de référence, sauf en août 2016, alors qu'un recul de la flexure d'environ deux mètres est observé. Ce profil a connu des variations saisonnières normales pour une côte naturelle alors que sa largeur de plage est globalement demeurée stable. De plus, un haut de plage en bon état est présent sur ce profil.

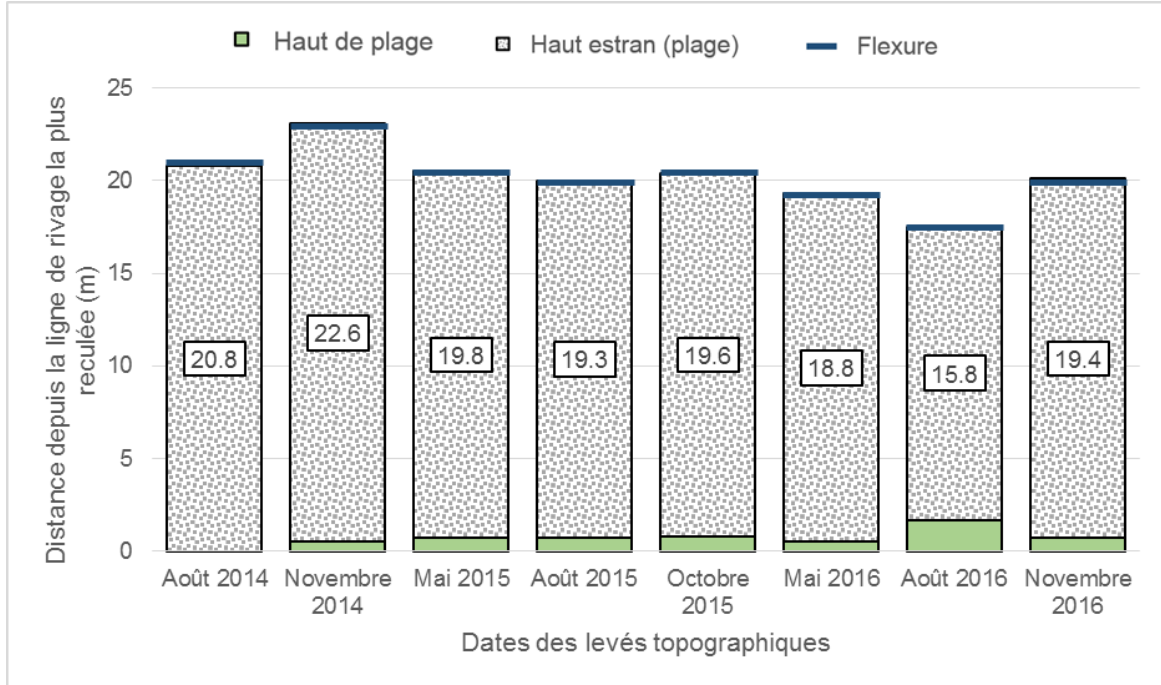


Figure 97. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 3.

4.6.4. Profil 4 (déjà artificialisé avant les travaux de 2014)

La figure 98 présente les huit levés du profil topographique 4. La ligne de rivage moyenne est située à 7 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement. Cette plage se situe devant un enrochement qui était déjà en place avant les travaux de 2014. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est relativement homogène sur l'ensemble de la plage (entre 0,2 et 0,3 m), sauf au pied de l'enrochement à cause d'une recharge en sédiments au début de l'automne 2016 et près de la flexure entre la distance 23 m à 28 m. La plage se termine à la limite de la flexure à 28 m.

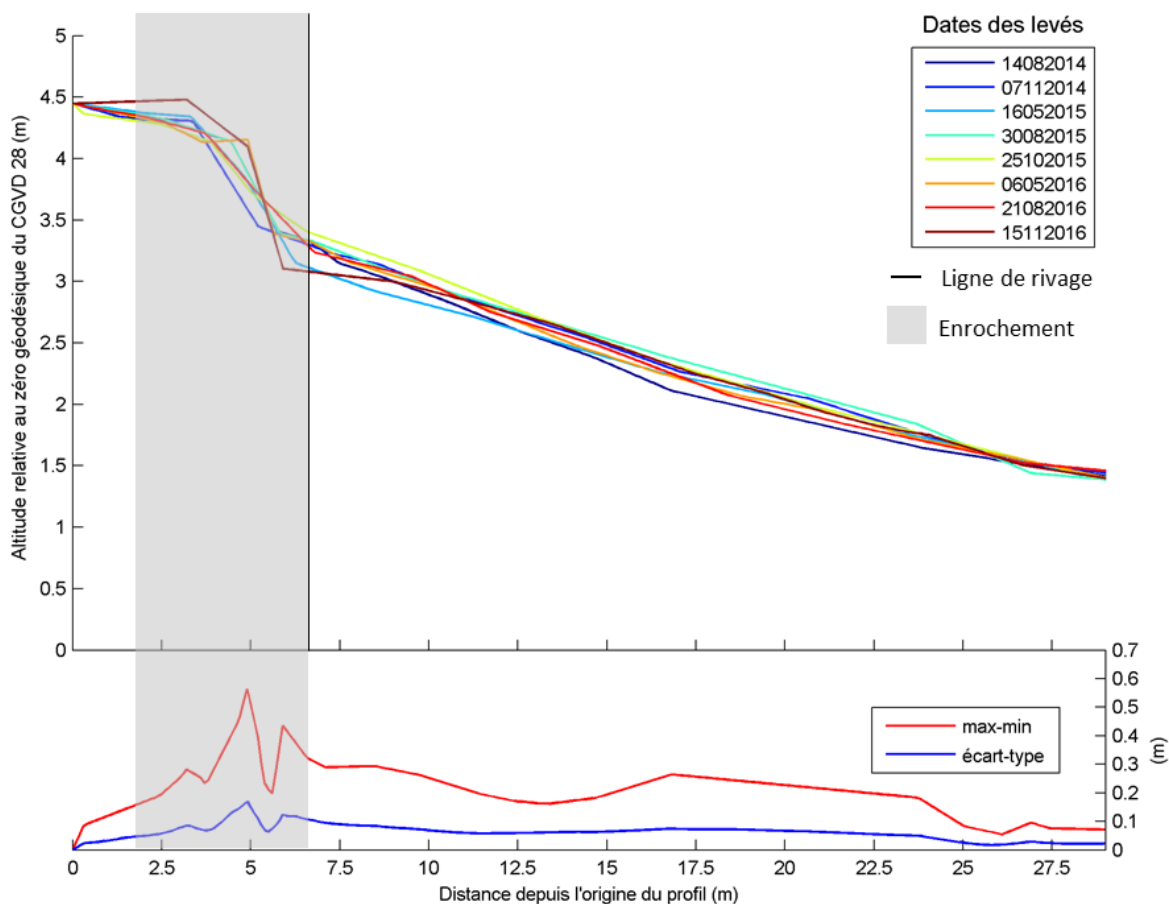


Figure 98. Évolution du profil topographique 4 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 99 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 4 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 7 à 28 m (21 m de largeur). Le premier tiers de la plage (0 à 7 m) est en rouge, le deuxième tiers (7 à 14 m) est en bleu et le troisième tiers (14 à 21 m) est en vert.

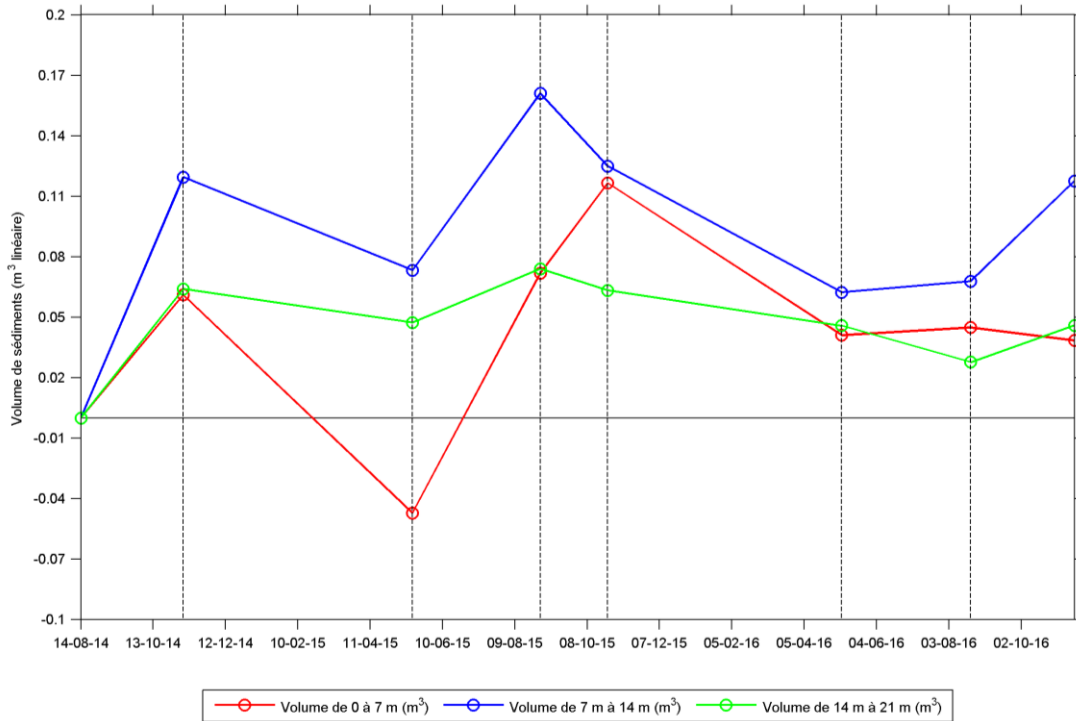


Figure 99. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 4.

Dès l'automne 2014, l'ensemble de la plage présente une augmentation, soit de 0,065 m³ pour le haut et le bas de plage et de 0,12 m³ pour la partie médiane. Cet apport sédimentaire semble provenir du transit sédimentaire lié à la dérive littorale et aux apports du cordon de basse mer. Après l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume importante de près de 0,12 m³ sur les sept premiers mètres de la plage, une diminution de 0,04 m³ sur le deuxième tiers et une légère baisse de 0,01 m³ au troisième tiers. Au levé de l'été 2015, l'ensemble de la plage reprend en volume sédimentaire pour atteindre des valeurs similaires à ce qui avait été évalué à l'automne 2014. À l'automne 2015, le haut du profil a connu une augmentation entre 0,04 m³ dans les huit premiers mètres alors que le milieu et le bas de la plage ont diminué de 0,03 m³ et de 0,02 m³. Après le deuxième hiver, l'ensemble du profil a perdu en volume sédimentaire de l'ordre de 0,08 m³ sur le premier tiers, de 0,05 m³ sur le deuxième tiers et 0,015 m³ au troisième tiers. Cela indique que la plage de ce profil a perdu des sédiments ayant pu être emprisonnés dans les glaces et transportés hors du système. La dérive littorale peut aussi être un facteur ayant transporté les sédiments

qui ont pu s'accumuler près de l'épi du chantier maritime Dufour. À l'été 2016, la situation est relativement stable avec des accumulations d'un peu moins de $0,01 \text{ m}^3$ pour les deux premiers tiers, mais une perte de $0,02 \text{ m}^3$ pour le troisième tiers. Il semble que les sédiments du bas de la plage ont migré vers le haut de la plage durant la saison estivale. En novembre 2016, le premier tiers perd $0,01 \text{ m}^3$ tandis que le deuxième et troisième gagnent près de $0,05 \text{ m}^3$ et $0,02 \text{ m}^3$ respectivement, ce qui se rapproche des valeurs obtenues au levé de novembre 2014.

Cette plage qui était déjà artificialisée depuis plus d'une décennie répond dans l'ensemble de manière homogène aux cycles saisonniers d'engraissement et d'amaigrissement de la plage. Dans l'ensemble, le bilan est positif pour ce profil qui a connu un gain sédimentaire maintenu sur les deux années et demie du suivi.

La figure 100 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 4. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage, soit le pied de l'enrochement en août 2014 (0 m). À l'état initial, la plage était de 19,6 m de large. En novembre 2014, la flexure avance de près de 2 m, ce qui correspond avec l'augmentation volumique observée pour ce levé (figure 99). En 2015, la situation est similaire pour les trois levés tandis qu'en 2016, après l'hiver, un recul de 5 m est enregistré pour la limite du bas de la plage. Ce recul continue à l'été d'un peu plus de 5 m à nouveau. En novembre 2016, la position de la flexure est semblable à celle du début 2016. Les données d'altitude et de volume correspondent généralement à ce qui est observé pour la largeur de plage. En effet, lorsque la plage a connu des gains sédimentaires, la plage s'est agrandie. À l'inverse, les plus grandes pertes de volumes observées dans la section précédente ont été mesurées après l'hiver 2015-2016. C'est aussi en 2016 que la largeur de plage a été la plus étroite de tout le suivi. Quelques mètres en aval de la dérive littorale, des travaux d'enrochement et de recharge de plage ont eu lieu en septembre 2016. Le gain en largeur de plage entre août 2016 et novembre 2016 est possiblement lié à la redistribution des sédiments de cette recharge par les courants côtiers.

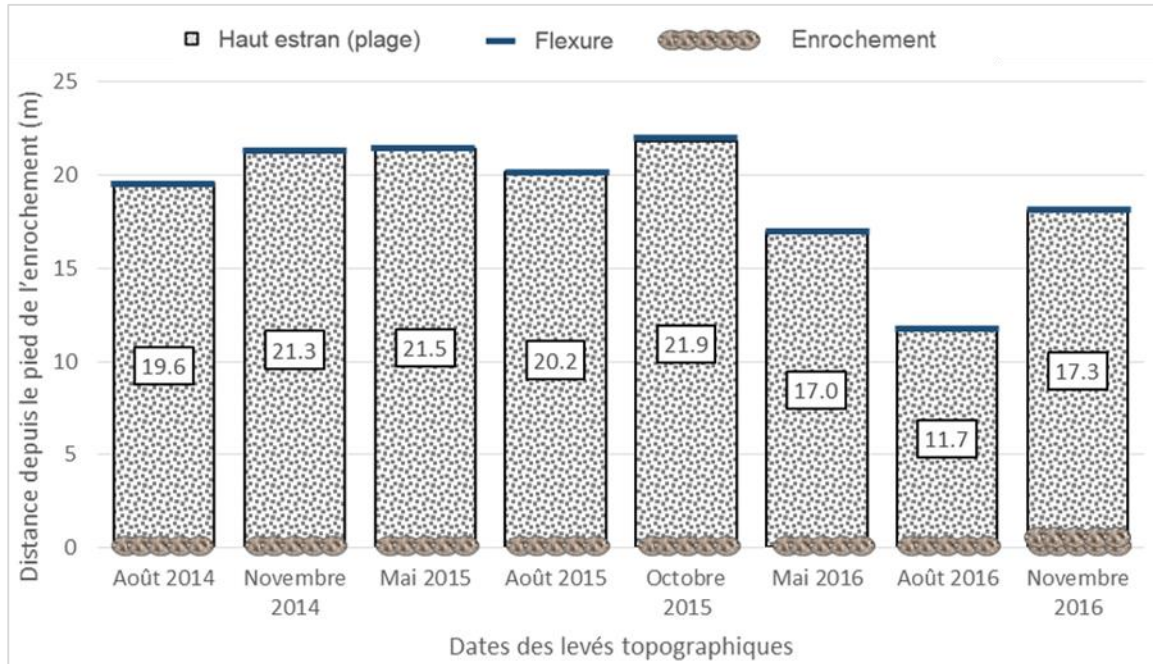


Figure 100. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 4.

4.6.5. Profil 5 (artificialisé)

La figure 101 présente les huit levés sur le profil topographique 5. La ligne de rivage moyenne est située à 8 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement. Ce profil était naturel en août 2014 et a fait l'objet de travaux d'enrochement à l'automne 2014. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est plus grande sur le premier tiers de la plage, ce qui démontre l'emprise de l'enrochement et de la mise en place des sédiments de la clé de l'ouvrage devant celui-ci entre 7 m et 12 m. La plage se termine à la limite de la flexure à 29 m.

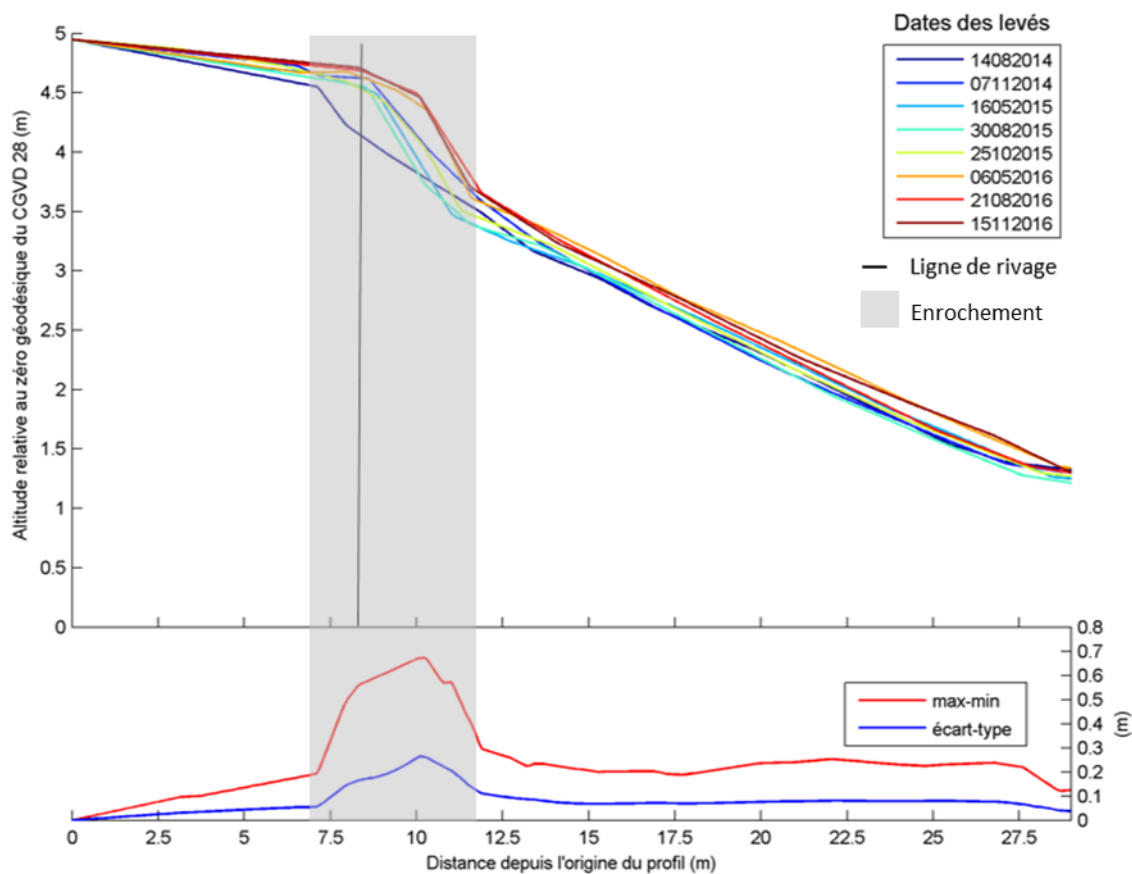


Figure 101. Évolution du profil topographique 5 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

Entre novembre 2014 et mai 2015, le matériel disposé sur le pied de l'enrochement est érodé (8 à 15 m depuis l'origine du profil) sur une profondeur pouvant atteindre 0,3 m, avec une mise à nue de l'enrochement. Ce matériel est redistribué sur la section centrale et inférieure de l'estran (15 à 27,5 m) sous forme d'un dépôt laminaire de faible épaisseur (<0,1m). Entre mai 2015 et août 2015, le profil est stable. Les données montrent une accrétion sur l'ouvrage, mais il s'agit plutôt d'un artefact lié au fait que les profils réalisés sur l'enrochement ne passent pas exactement sur la trace suivie au levé précédent et en raison de la nature irrégulière de l'enrochement ceci induit une certaine variation altitudinale. Le levé suivant (novembre 2015) permet de confirmer cette observation. Les sections centrales et

basses du profil sont néanmoins en érosion entre août et novembre 2015, avec une perte laminaire verticale de 0,07 m de 10 m à 32 m de l'origine du profil.

La figure 102 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 5 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 8 à 29 m (21 m de largeur). Le premier tiers de la plage (0 à 7 m) est en rouge, le deuxième tiers (7 à 14 m) est en bleu et le troisième tiers (14 à 21 m) est en vert.

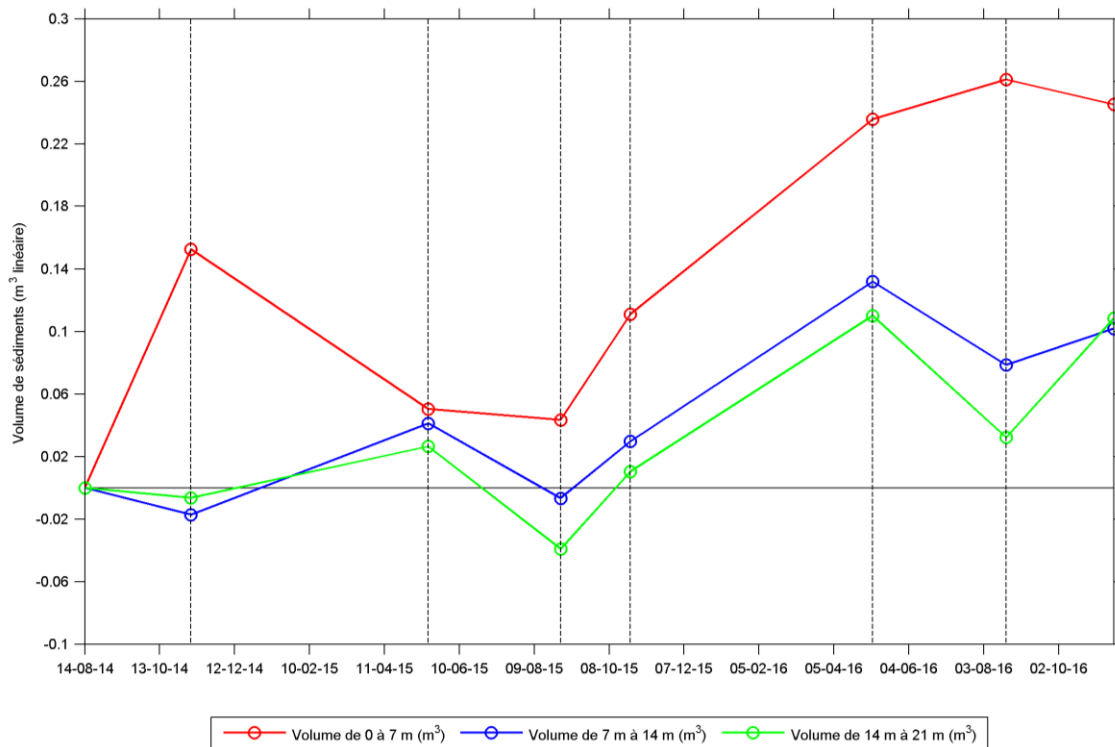


Figure 102. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 5.

Dès l'automne 2014, le premier tiers de la plage connaît une augmentation importante de volume de 0,15 m³, représentée par la mise en place de l'enrochement à cet endroit. Le deuxième et troisième tiers ont perdu 0,02 m³ et 0,005 m³ respectivement. Après l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume de 0,09 m³ sur les sept premiers mètres de la plage, sédiments qui peuvent avoir migré vers le milieu et le bas de la plage, ayant connu une hausse de 0,06 m³ et 0,03 m³ respectivement. Lors du levé de l'été 2015, toute la

plage perd en volume. Les huit premiers mètres de la plage ont été dépourvus d'un faible $0,005 \text{ m}^3$ tandis que le milieu de la plage avait un volume légèrement inférieur à celui de référence. Le 3^e tiers a atteint son plus bas niveau des trois ans de suivi avec une baisse de $0,06 \text{ m}^3$. Il semble que les sédiments qui ont été déposés devant la structure lors des travaux et qui se sont accumulés au bas de la pente ont migré ailleurs le long du littoral. À l'automne 2015, tout le profil gagne en élévation avec un gain entre $0,04$ et $0,07 \text{ m}^3$. Le haut du profil est celui qui a connu la plus grande augmentation. Après le deuxième hiver, l'ensemble du profil a gagné en volume sédimentaire de l'ordre de $0,12 \text{ m}^3$ sur le premier tiers, de $0,11 \text{ m}^3$ sur le deuxième tiers et $0,10 \text{ m}^3$ au troisième tiers. Cela indique qu'un apport sédimentaire par la dérive littorale a pu se produire et rehausser le profil. À l'été 2016, seul le haut de la plage gagne encore du volume sédimentaire de l'ordre de $0,02 \text{ m}^3$. La partie centrale de la plage a connu une baisse de $0,05 \text{ m}^3$ tandis que le bas de plage a perdu $0,07 \text{ m}^3$. En novembre 2016, les sept premiers mètres perdent $0,01 \text{ m}^3$, le deuxième tiers gagne $0,02 \text{ m}^3$ et le bas de la plage prend $0,07 \text{ m}^3$.

Cette plage a connu un gain sédimentaire sur l'ensemble du suivi, ce qui indique qu'un rehaussement de la plage s'est produit à la suite des travaux d'enrochement. Cela montre que la recharge sédimentaire faite au-devant de l'enrochement est restée en place 2 ans après les travaux.

La figure 103 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure et de la largeur du haut estran (plage) du profil 5. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage, soit la base de la microfalaise en août 2014 (0 m). Il est possible de voir que sur ce profil artificialisé lors des travaux de 2014, la ligne de rivage a avancé de plus de 2 m par la mise en place de l'enrochement. À l'état initial, la plage était de 19 m de large alors qu'elle était de 16,8 m en novembre 2014. L'empiètement de l'enrochement sur le haut de plage est visible et est la cause de ce rétrécissement de la largeur de plage. La flexure est toutefois au même endroit. En mai 2015, l'affouillement des sédiments au pied de l'ouvrage a permis de positionner la ligne de rivage un peu plus loin de 0,7 m. Au même moment, la largeur de plage est plus grande de 0,6 m et la flexure a été

repoussée à plus de 20 m de l'origine des profils. La largeur de plage est alors relativement constante à partir de l'été 2015. La flexure présente des déplacements inférieurs à 1,5 m pour les deux dernières années du suivi. La ligne de flexure la plus loin vers le bas estran a été enregistrée en novembre 2016, à 21 m. L'élargissement de la plage coïncide avec l'augmentation du volume de plage mise en évidence à la section précédente (figure 102). Ces changements morphologiques sont attribués au remaniement et à la redistribution des sédiments de la clé de l'ouvrage sur la plage.

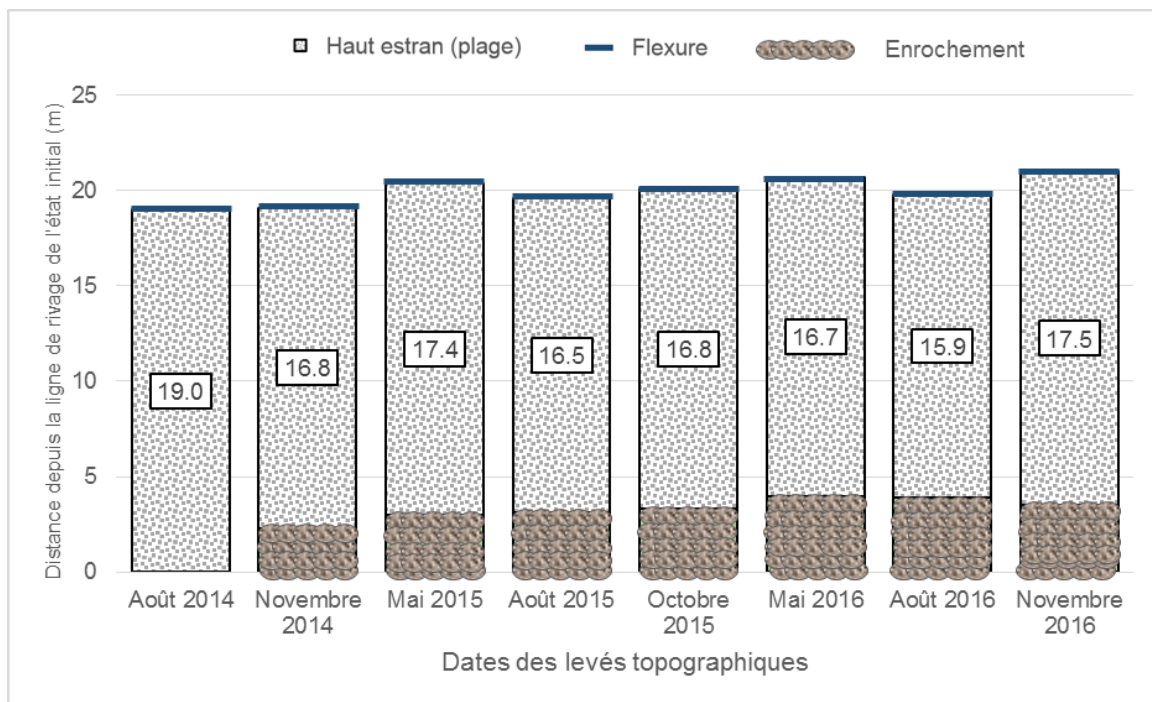


Figure 103. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 5.

4.6.6. Profil 6 (naturel)

La figure 104 présente les huit levés du profil topographique 6. La ligne de rivage moyenne est située à 18 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement. Ce profil est resté naturel sur l'ensemble du projet. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est constante avec des valeurs de 0,2 à 0,3 m de commandement sur cette plage, démontrant par les différentes pentes, les changements morphologiques saisonniers de cette plage naturelle. La plage se termine à la limite de la flexure à 38 m. Dans l'ensemble, la plage a connu un gain depuis le début du suivi en août 2014.

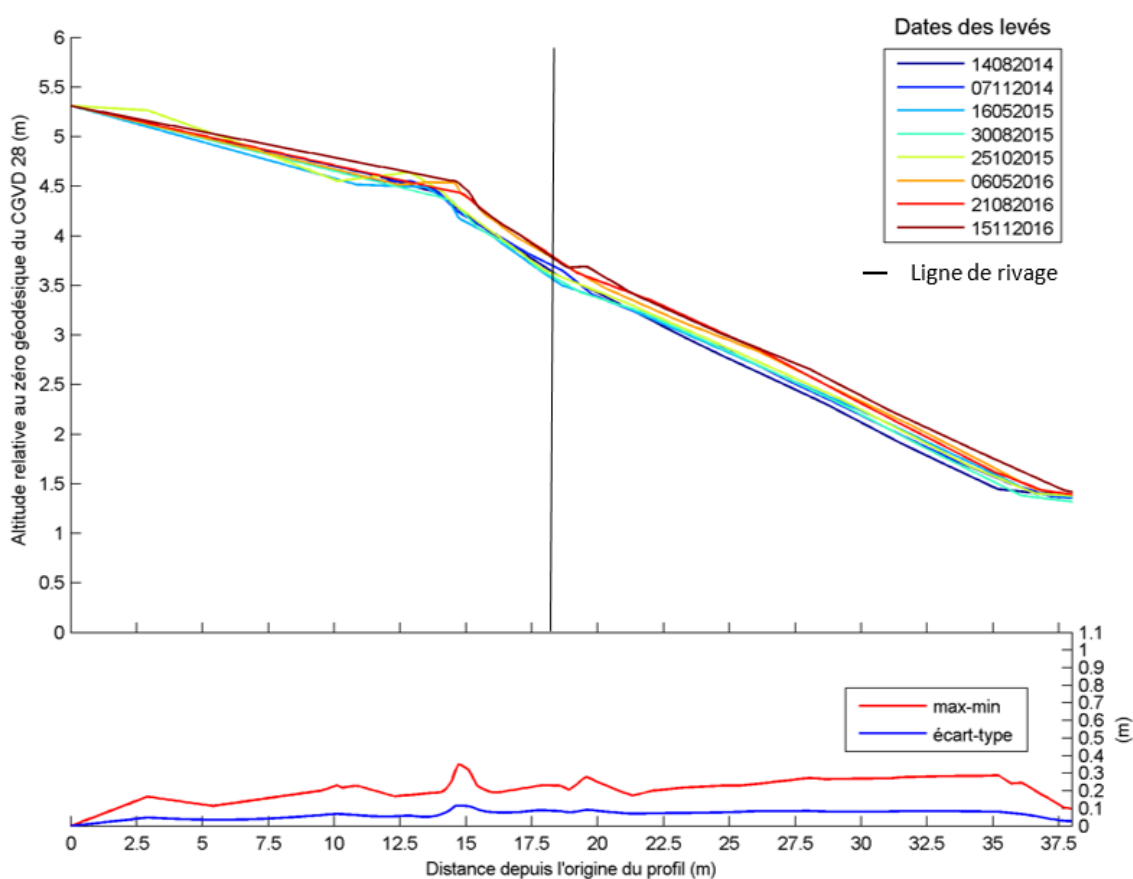


Figure 104. Évolution du profil topographique 6 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 105 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 6 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 18 à 38 m (20 m de largeur). Le

premier tiers de la plage (0 à 7 m) est en rouge, le deuxième tiers (7 à 13 m) est en bleu et le troisième tiers (13 à 20 m) est en vert.

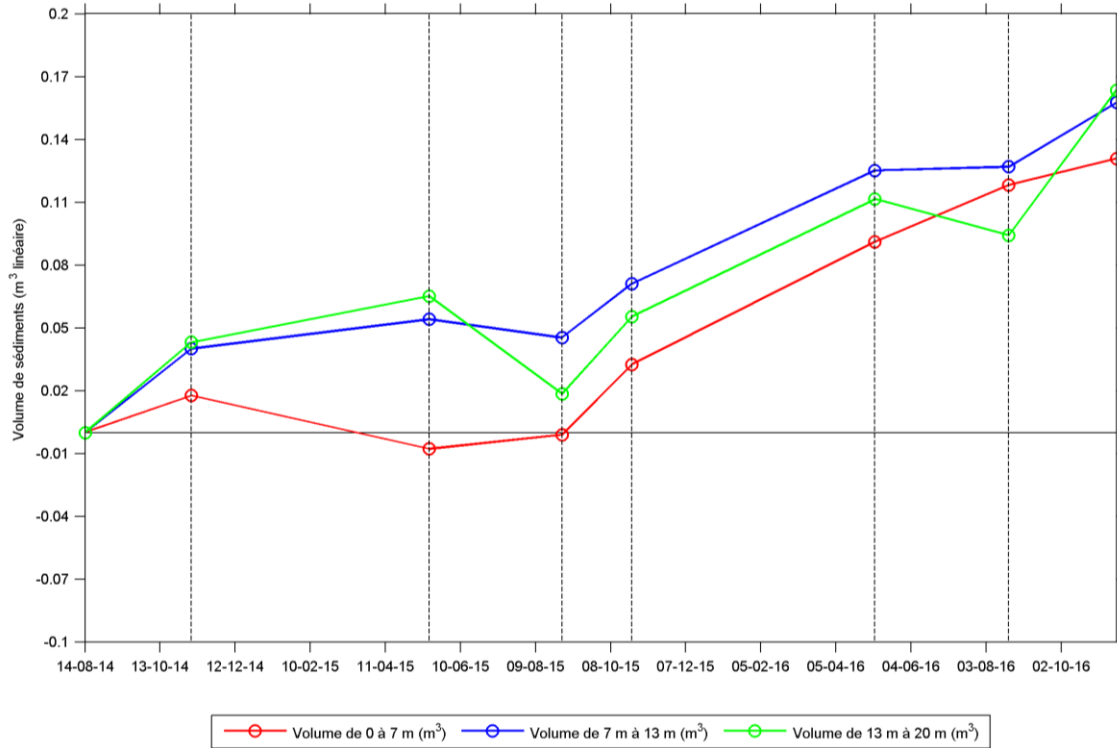


Figure 105. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 6.

À l'automne 2014, le premier tiers de la plage connaît une augmentation de près de 0,02 m³. Le milieu et le bas de la plage connaissent la même augmentation de 0,04 m³. Après l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume de 0,03 m³ sur les huit premiers mètres de la plage amenant le niveau légèrement sous celui de l'état de référence. Le milieu de la plage reste relativement stable avec une augmentation de près de 0,01 m³. Le bas de la plage a connu une hausse un peu plus grande de 0,02 m³. Au levé de l'été 2015, les sept premiers mètres de la plage ont retrouvé l'état initial d'il y a un an. Le milieu de la plage a connu une légère baisse de 0,01 m³ tandis que le 3^e tiers a perdu 0,04 m³. En un an, ce profil a dans l'ensemble gagné en volume par rapport à l'état initial, sauf dans les premiers mètres. À l'automne 2015, tout le profil gagne en volume avec un gain entre 0,02 et 0,03 m³. Après le deuxième hiver, l'ensemble du profil reçoit à nouveau 0,05 m³ de volume sédimentaire. À

l'été 2016, le haut de la plage gagne encore du volume sédimentaire de l'ordre de 0,03 m³. Le milieu de la plage s'est stabilisé tandis que le bas de plage a perdu 0,02 m³. En novembre 2016, les sept premiers mètres gagnent 0,01 m³, le deuxième tiers gagne 0,03 m³ et le bas de la plage récolte 0,07 m³. Cette plage a connu ses gains sédimentaires lors des périodes de dynamique côtière plus importante, soit durant l'automne et après l'hiver. L'été est une période durant laquelle l'altitude de la plage était plus stable.

Dans l'ensemble du suivi, cette plage a connu un gain substantiel en élévation, malgré l'absence de travaux devant celui-ci. Il est possible que la recharge au niveau du profil 5, en amont de la dérive littorale, ait joué un rôle important dans cet apport sédimentaire.

La figure 106 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 6. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage la plus reculée, soit la base de la microfalaise en mai 2015 (0 m). Il est possible de voir que sur ce profil naturel la ligne de rivage était assez stable sur l'ensemble du suivi, sa position variant sur moins d'un mètre selon la végétation du haut de plage. Lors de l'état de référence, la plage avait 16,7 m de large alors qu'en novembre 2014, la plage s'élargit permettant à la flexure de se positionner 2 m plus loin. Par la suite, la plage garde cette largeur d'environ 18 m, avec quelques variations saisonnières. Ce comportement est confirmé par l'évolution des volumes de la plage du profil qui a connu des gains importants depuis le début du suivi (figure 105). L'autre fait intéressant est que 2015 est l'année durant laquelle la végétation du haut de plage était moins importante, comparativement à 2014 et 2016. Il est possible que ce soit les sédiments ayant migré de l'amont (profil 5) vers l'aval-dérive (profil 6) qui ont pu ensabler le haut de plage. Par la suite, ce dernier a été recolonisé par la végétation en 2016. Dans l'ensemble, ce profil a gagné en largeur et en hauteur par rapport à l'état initial.

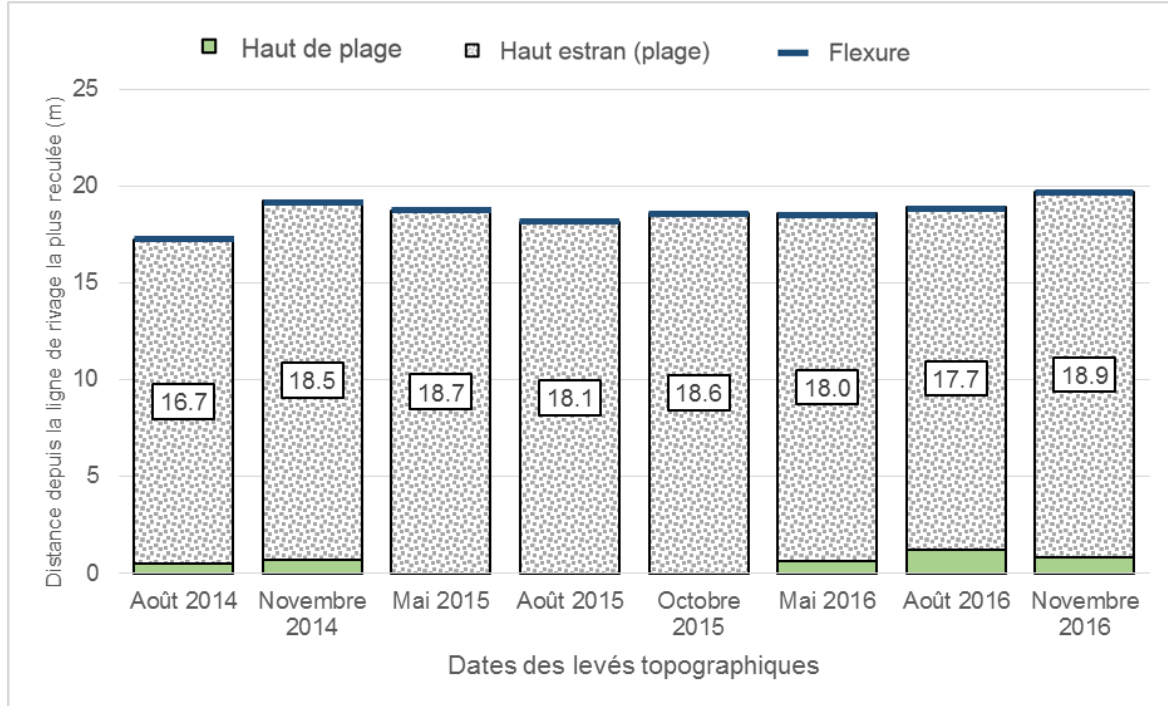


Figure 106. Évolution de la largeur de plage et du haut de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 6.

4.6.7. Profil 7 (artificialisé)

La figure 107 présente les huit levés du profil topographique 7. La ligne de rivage moyenne est située à 11 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement. Ce profil était naturel en 2014 et a été enroché à l'automne 2014. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est plus importante, de 1,2 m, là où l'enrochement a été installé. L'enveloppe du changement de l'élévation sur cette plage est en moyenne entre 0,3 m et 0,4 m. La plage se termine à la limite de la flexure à 35 m. On constate que de manière générale le bilan sédimentaire de la plage a été positif.

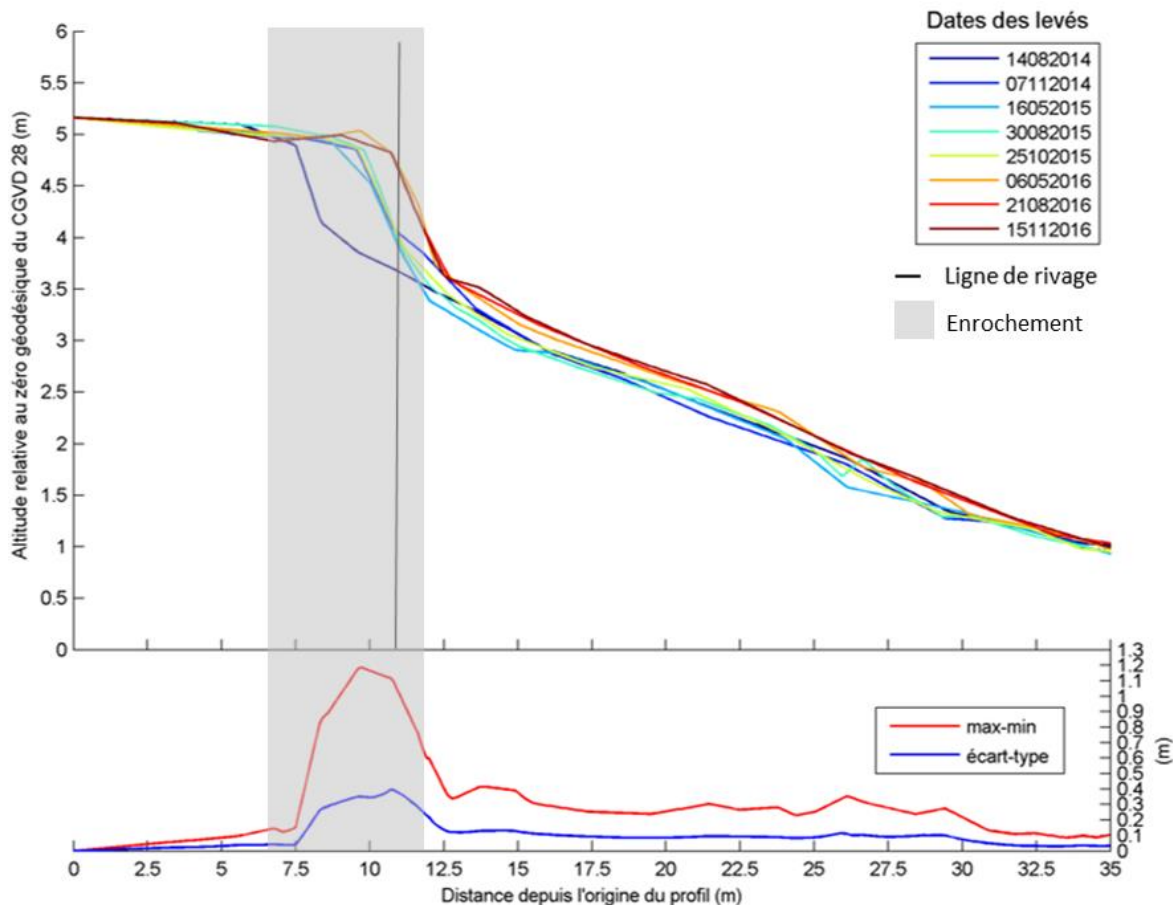


Figure 107. Évolution du profil topographique 7 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 108 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 7 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 11 à 35 m (24 m de largeur). Le premier tiers de la plage (0 à 8 m) est en rouge, le deuxième tiers (8 à 16 m) est en bleu et le troisième tiers (16 à 24 m) est en vert.

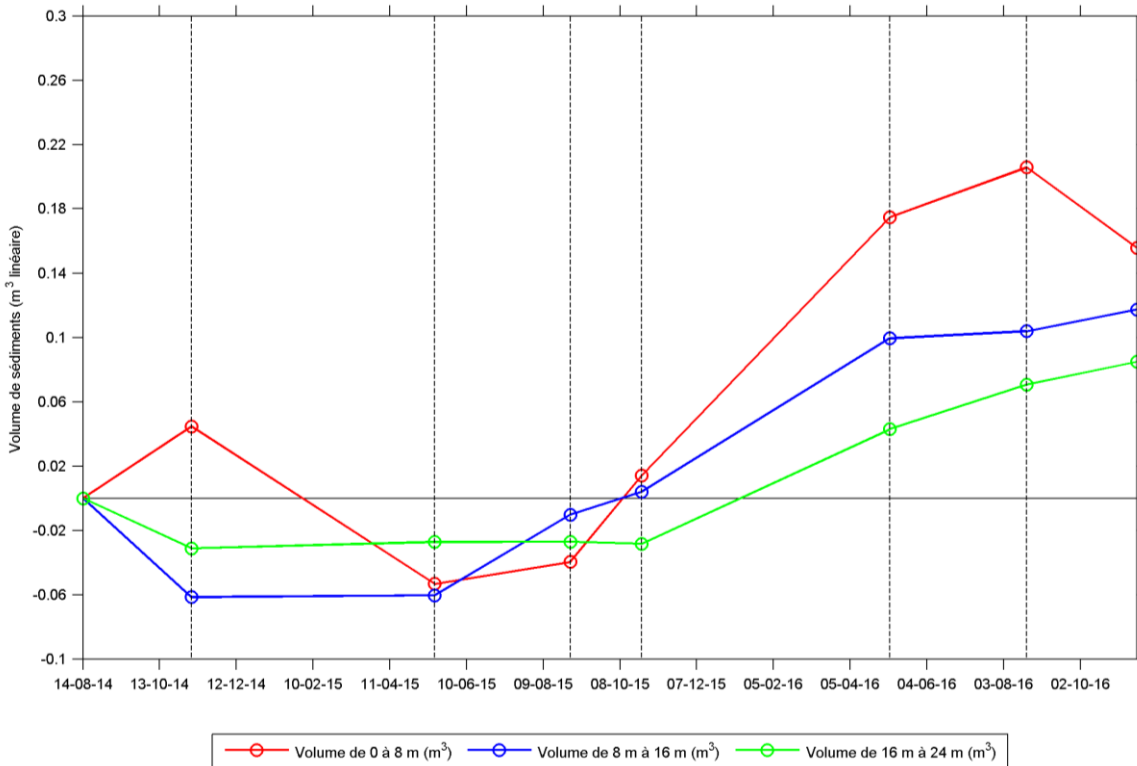


Figure 108. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 7.

À l'automne 2014, le premier tiers de la plage connaît une augmentation de près de 0,045 m³, attribuée aux sédiments de la clé mis devant l'enrochement. Le milieu et le bas de la plage connaissent une baisse de 0,06 m³ et de 0,03 m³ respectivement. Après l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume de 0,09 m³ sur les huit premiers mètres de la plage tandis que le milieu et le bas de la plage restent relativement stables. Au levé de l'été 2015, les huit premiers mètres de la plage ont connu une légère augmentation de 0,01 m³, mais avec un volume toujours inférieur à celui de l'état initial d'il y a un an. Le milieu de la plage a connu une augmentation de 0,05 m³ tandis que le 3^e tiers est encore resté stable. À l'automne 2015, les deux premiers tiers du profil gagnent en élévation avec un gain entre 0,02 et 0,06 m³. Après le deuxième hiver, l'ensemble du profil gagne en volume sédimentaire. Le premier tiers a gagné 0,17 m³, le deuxième 0,1 m³ et le troisième 0,08 m³. À l'été 2016, l'ensemble du profil continue de gagner en élévation avec 0,03 m³ sur le haut de la plage, une stabilité sur la moitié de la plage et un gain de 0,03 m³ au bas de la plage. En

novembre 2016, les huit premiers mètres perdent 0,05 m³, le deuxième et le troisième tiers gagnent 0,01 m³. Cette plage a connu des gains sédimentaires sur les premiers mètres de la plage à la suite des travaux d'engrochement. Par la suite, le profil a connu un abaissement, évolution qui s'est ensuite inversée à partir de 2016. Cette tendance à la hausse du volume pour la 3^e année du suivi a été observée pour les deux autres profils (5 et 6) du nord-est de l'île. Néanmoins, la plage à cet endroit est sur une terrasse de plage où les affleurements rocheux sont nombreux. Il se peut que les sédiments qui migrent sur la côte soient pris au piège par moments entre deux affleurements rocheux, dans un creux topographique. Ainsi, une grande variabilité de l'élévation est possible à cause de l'irrégularité du haut estran.

La figure 109 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 7. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage, soit le pied de l'engrochement en novembre 2014 (0 m). Il est possible de voir sur ce profil artificialisé lors des travaux de 2014, que la ligne de rivage (limite du haut de plage végétalisé) a reculé de plus de 2,5 m par la mise en place de l'engrochement. À l'état initial, la plage était de 20,6 m de large alors qu'elle était de 53,1 m en novembre 2014. Ce gain important est expliqué par deux facteurs. Le premier est attribué à la mise en place des sédiments de la clé de l'engrochement devant l'ouvrage lors des travaux de l'automne 2014 qui ont été redistribués sur l'estran par les vagues. Le deuxième est la configuration de la côte, des affleurements rocheux ont permis à la faible couche sédimentaire de la recharge de plage de contribuer à l'élargissement du haut estran. En mai 2015, un nouveau haut de plage végétalisé se forme et permet de positionner la ligne de rivage un peu plus loin, soit au même niveau qu'à l'état de référence. La flexure est encore au même endroit qu'à l'automne précédent, ce qui en fait une plage large de près de 51 m. À partir de l'été 2015, une partie des sédiments qui avaient constitué l'élargissement de la plage s'est soit déplacée ailleurs sur les plages adjacentes, soit vers le haut du profil. Cette dernière hypothèse peut être vérifiée par le gain altitudinal continu et croissant de la plage à partir de l'été 2015. La flexure est plutôt stable sur

l'ensemble du suivi, mis à part en novembre et mai 2015, ce qui indique une résilience morphologique face aux changements anthropiques à la côte.



Figure 109. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 7.

4.6.8. Profil 8 (artificialisé)

La figure 110 présente les huit levés du profil topographique 8. La ligne de rivage moyenne est située à 7 m du point de départ du profil, soit le début de l'accotement de la route. Ce profil était naturel en août 2014 et a fait l'objet de travaux d'encrochement à l'automne 2014. Il est possible de voir que l'enveloppe maximum-minimum est plus grande sur le premier tiers de la plage, ce qui montre l'emprise de l'encrochement et de la mise en place des sédiments de la clé de l'ouvrage devant celui-ci, dans les sept premiers mètres depuis la route. La plage se termine à la limite de la flexure à 25 m. On constate que de manière générale, la plage a été déficitaire depuis août 2014.

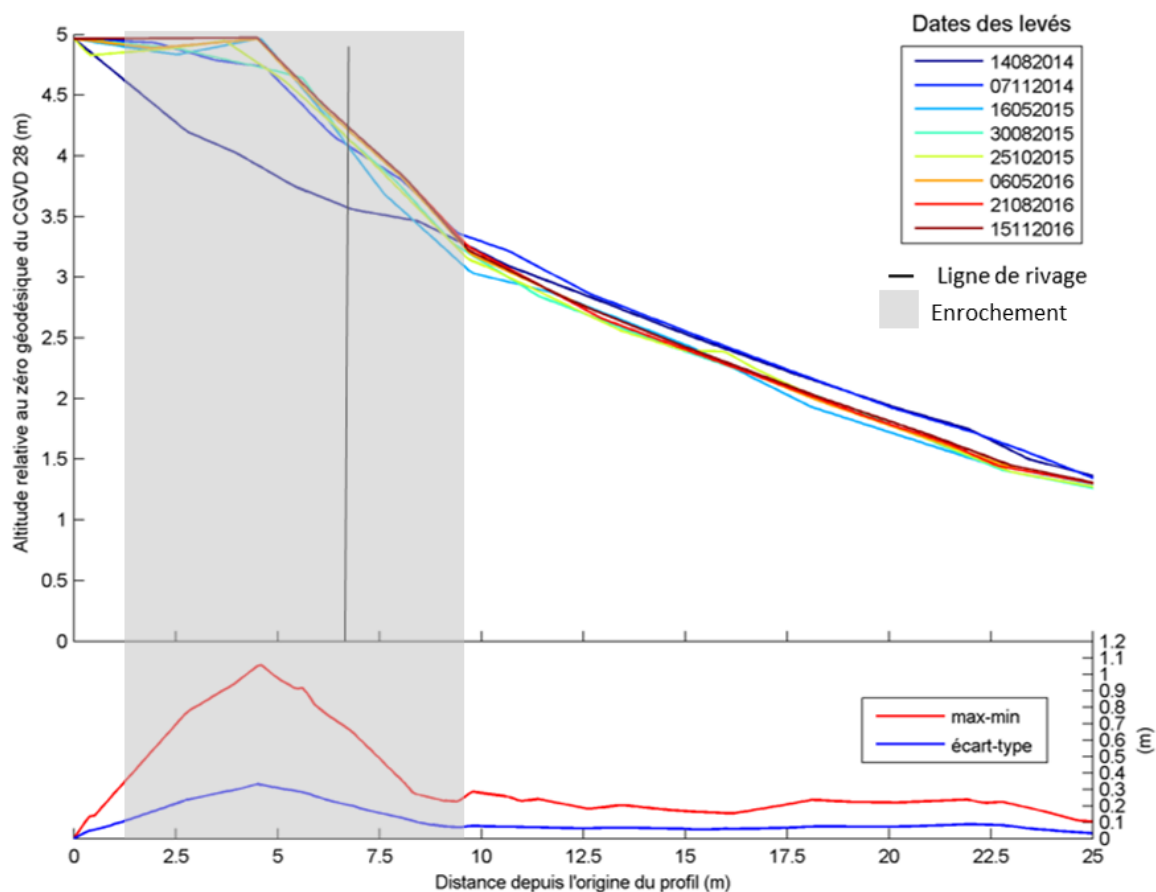


Figure 110. Évolution du profil topographique 8 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 111 présente les volumes d'un mètre cube linéaire le long du profil 8 calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 7 à 25 m (18 m de largeur). Le premier tiers de la plage (0 à 6 m) est en rouge, le deuxième tiers (6 à 12 m) est en bleu et le troisième tiers (12 à 18 m) est en vert.

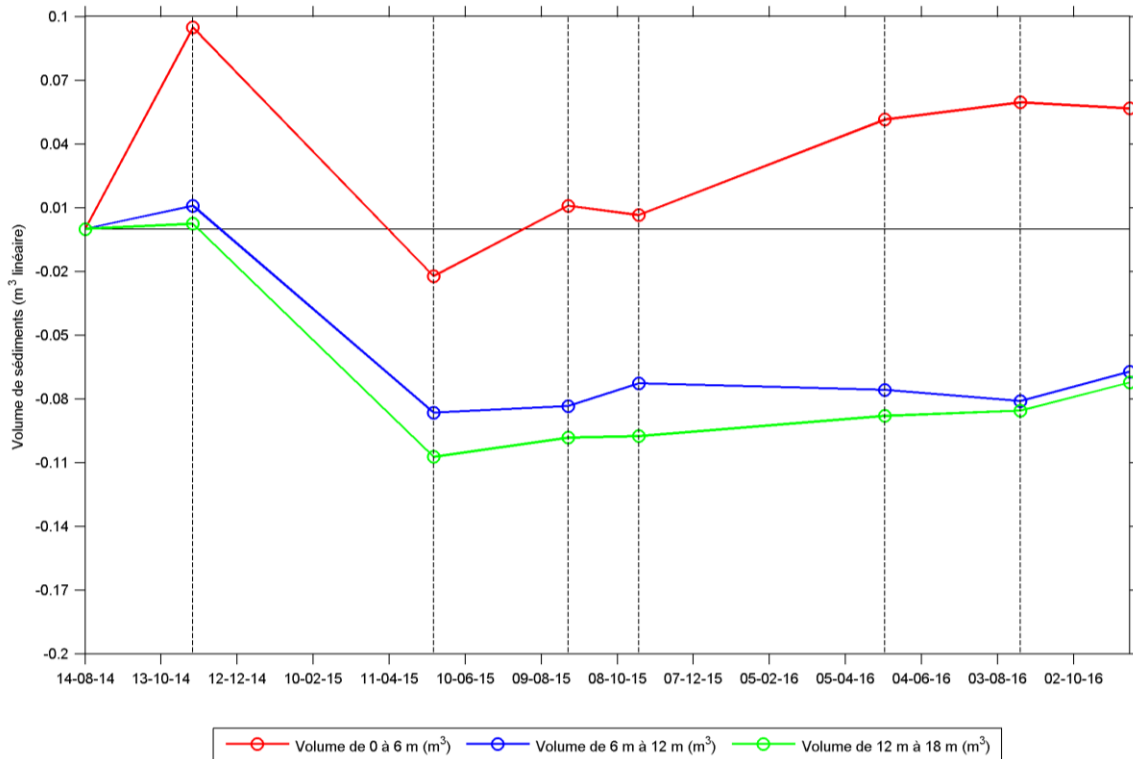


Figure 111. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 8.

Dès l'automne 2014, le premier tiers de la plage connaît une augmentation importante de près de 0,1 m³, représentée par la mise en place des sédiments de la clé de l'enrochement à cet endroit. Le deuxième tiers a légèrement augmenté de 0,01 m³ tandis que le bas de la plage est resté stable. Après l'hiver, le levé du printemps 2015 présente une perte de volume de 0,12 m³ sur les sept premiers mètres de la plage. Le milieu et le bas de la plage ont perdu un équivalent de 0,1 m³. Au levé de l'été 2015, le premier tiers regagne 0,03 m³ et les deux autres portions de la plage sont restées stables. À l'automne 2015, le haut du profil perd 0,005 m³ et la partie médiane semble gagner ce même volume. Le volume du bas de plage n'a quant à lui pas évolué. Après le deuxième hiver, le premier tiers de la plage est le seul à voir son volume changer, gagnant 0,06 m³. En 2016, il peut être affirmé que la situation s'est stabilisée dans l'ensemble du profil.

Après les travaux d'enrochement et une recharge sédimentaire sur le premier tiers de la plage, celui-ci a connu un gain sédimentaire qui est resté à cet endroit. Toutefois, pour les

deux autres tiers de la plage, c'est une perte ponctuelle de volume de plage qui a été enregistrée après le premier hiver 2014-2015. Par la suite, le profil a légèrement augmenté en volume au fil des saisons étudiées (0,02 à 0,03 m³), mais n'a jamais atteint le niveau de 2014.

La figure 112 présente l'évolution de la morphologie de la plage par le positionnement de la ligne de rivage, de la flexure, de la largeur du haut de plage et du haut estran (plage) du profil 8. L'origine des profils est la position de la ligne de rivage, soit la base de la microfalaise en août 2014 (0 m). Il est possible de voir que sur ce profil artificialisé lors des travaux de 2014, la nouvelle position de ligne de rivage fut déplacée de 3 m par la mise en place de l'enrochement, indiquant un empiètement important du haut de plage (18 % de la largeur de plage initiale). À l'état initial, la plage était de 16,4 m de large alors qu'elle n'était que de 15,2 m en novembre 2014. Cependant, la ligne de flexure était positionnée à 1,6 m plus loin vers le large comparativement à l'état de référence. Cette avancée de la flexure est probablement liée à la recharge de plage réalisée devant l'ouvrage lors des travaux d'enrochement. En mai 2015, un rétrécissement de la plage se produit de l'ordre de 2,7 m. Lors de l'été 2015, la plage s'élargit et la flexure se positionne plus loin vers le large de 6 m. Par la suite, depuis octobre 2015, la largeur de la plage se stabilise autour de 13 m et la flexure reste positionnée à 16 m depuis l'origine des profils. En somme, une période d'environ un an après les travaux fut nécessaire pour que la plage retrouve un aspect similaire à celui d'état de référence. Par la suite, la plage s'est stabilisée et la flexure est revenue au même point qu'avant les travaux. Cependant, l'altitude du milieu et du bas de la plage est plus basse qu'au départ, ce qui implique qu'un rétrécissement de la largeur de la plage est possible à cet endroit dans les années à venir si le stock sédimentaire accumulé en haut de plage ne se répartit pas sur le reste du profil ou qu'il n'y a pas d'autres apports sédimentaires.

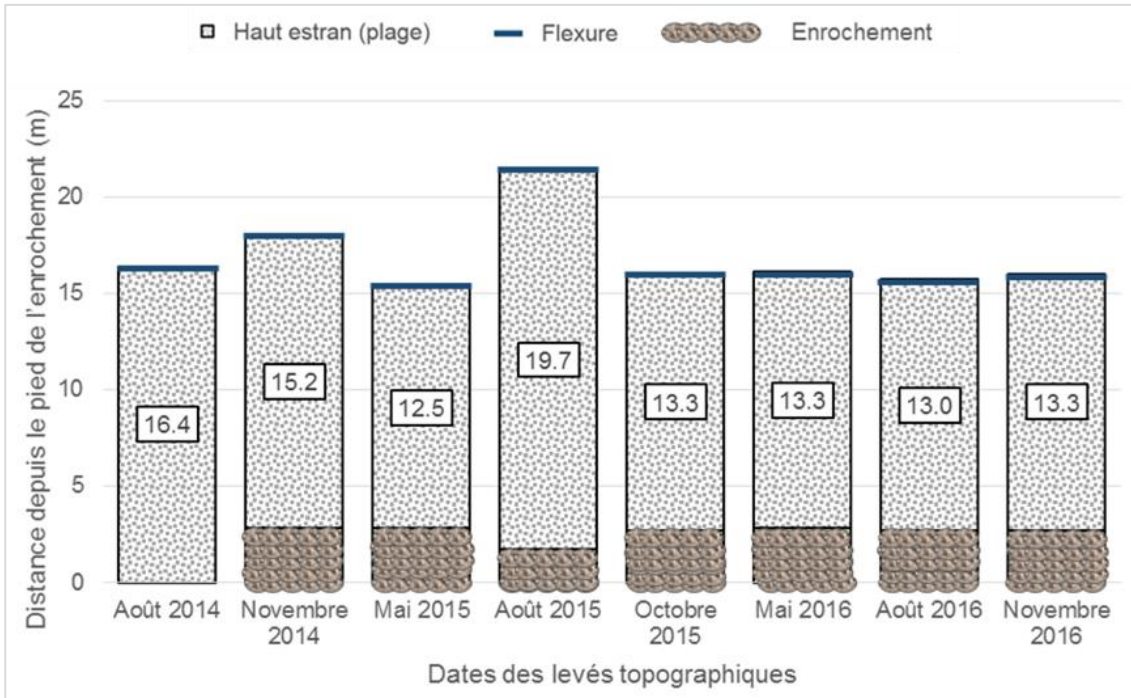


Figure 112. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 8.

4.7. Évolution récente du volume des plages

4.7.1. État initial du volume des plages

Les deux levés de mai et août 2014 avant les travaux d'enrochement sont pertinents, car ils permettent d'avoir une vue d'ensemble au printemps et en été de la morphologie initiale des plages à l'étude de l'île et ainsi d'avoir l'évolution du bilan sédimentaire pendant la période estivale. Cela permet d'établir une base de compréhension du comportement du corps sédimentaire sur le haut estran avant les perturbations anthropiques engendrées par les ouvrages de protection installés sur le haut de plage. Ainsi, une comparaison du comportement estival sera possible pour les trois années du suivi. Les cartes de volumes de plage du 27 août 2014 sont présentées aux annexes 16 à 19.

4.7.1.1. Côte sud

La figure 113 présente les volumes de plage (m^3/m^2) par polygone durant le mois de mai 2014 sur le secteur 1 (1 932 m), entre la pointe à Simon et le chemin de la Baleine, pour les polygones 16 à 386. Sur les 371 polygones, 192 sont devant une côte artificielle, 7 devant une côte composite (moitié naturelle et artificielle) et 172 devant une côte naturelle.

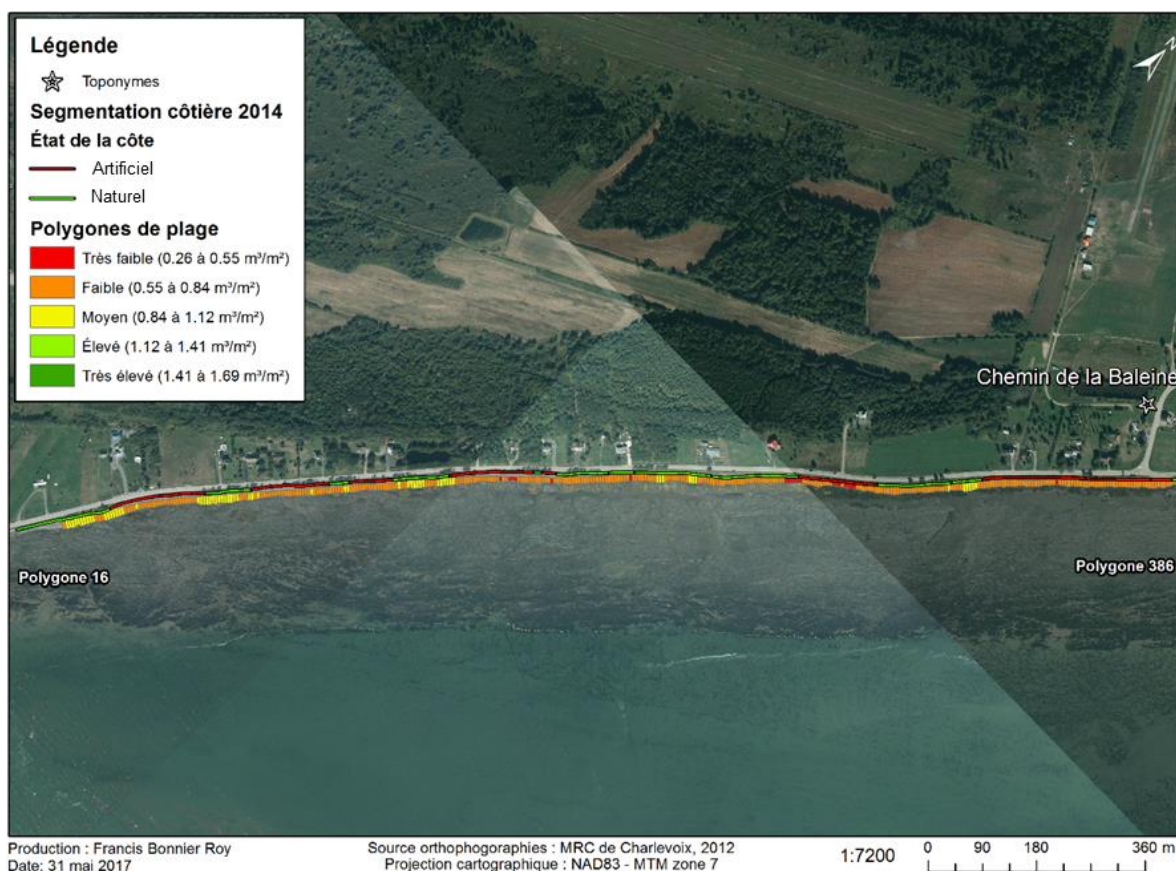


Figure 113. Volume de plage (m^3/m^2) des polygones lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 1).

La figure 114 présente les volumes de plage (m^3/m^2) par polygone sur le secteur 2 (1 583 m), entre le chemin de la Baleine et le chemin de la Traverse, pour les polygones 387 à 679. Sur les 293 polygones, 82 sont devant une côte artificielle, 8 devant une côte composite et 203 devant une côte naturelle.

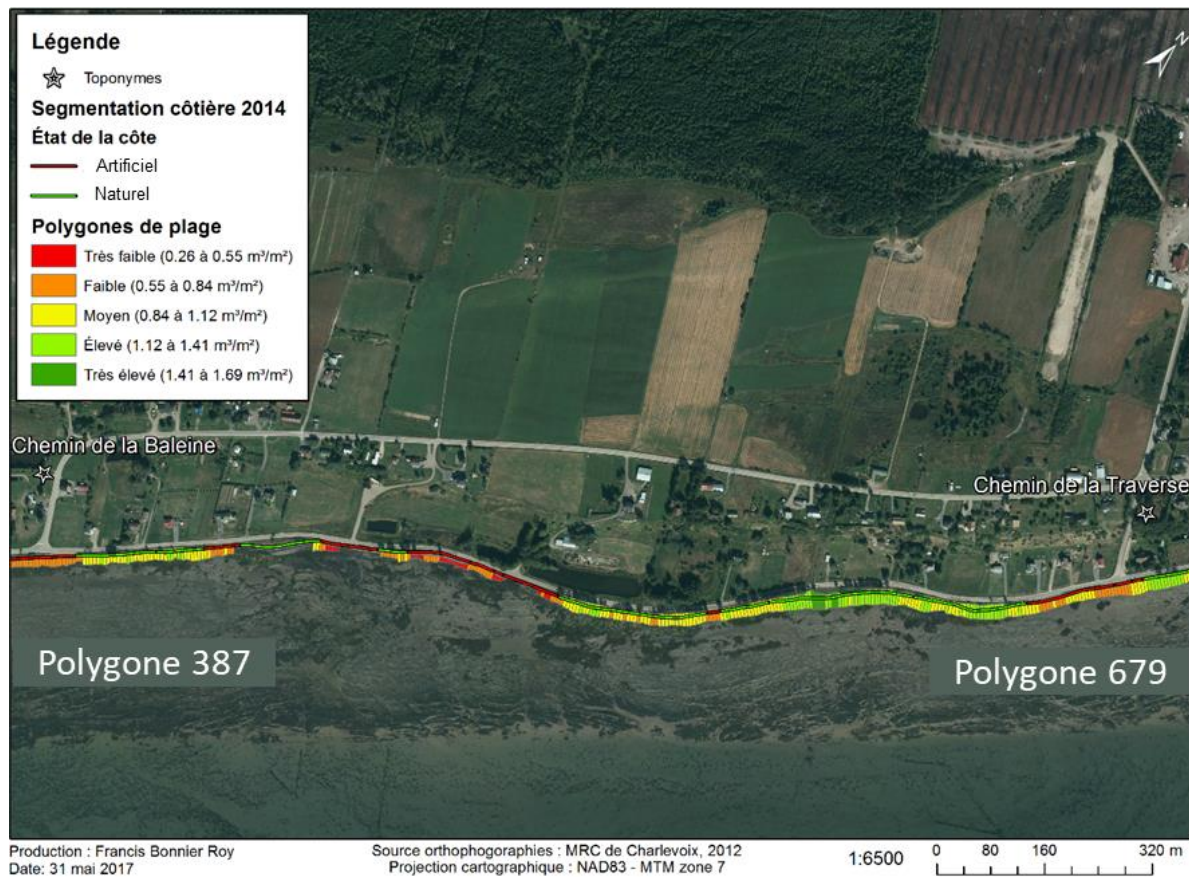


Figure 114. Volume de plage (m³/m²) des polygones lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 2).

La figure 115 présente les volumes de plage par polygone sur le secteur 3 (2 825 m), entre le chemin de la Traverse et l'Hôtel Cap-aux-Pierres, pour les polygones 670 à 1 242. Sur les 563 polygones, 185 sont devant une côte artificielle, 15 devant une côte composite et 363 devant une côte naturelle.

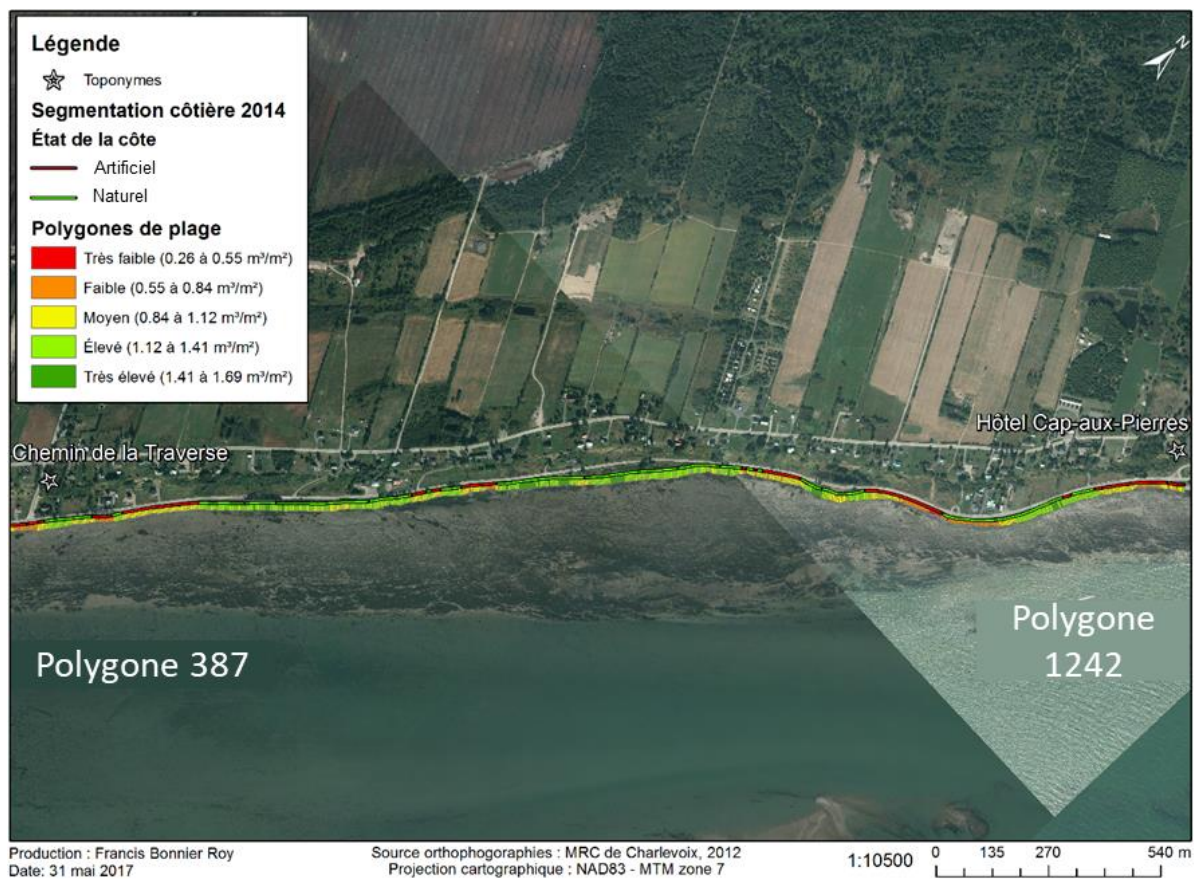


Figure 115. Volume de plage (m^3/m^2) par polygone lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 3).

Au mois de mai 2014, 69 % des plages étudiées de la côte sud étaient devant une côte naturelle contre 31 % devant les berges artificielles. Le tableau 31 présente les volumes de plage (m^3/m^2) des polygones pour les 3 secteurs au sud de l'île en fonction de l'artificialité de la côte.

Tableau 31. Volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type des polygones par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1 (n = 386)	$0,7 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$	$0,8 \pm 0,1$
2 (n = 293)	$0,7 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,3$
3 (n = 563)	$0,9 \pm 0,2$	$1,0 \pm 0,2$	$1,3 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$
Moyenne par état de la côte	$0,8 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,3$	Moyenne globale : $1,0 \pm 0,3$

La moyenne des polygones est de $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$ sur l'ensemble de la côte sud. Le secteur 1 est celui qui possède une moyenne inférieure aux autres secteurs avec $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2$. En mentionnant que 50 % des polygones de plage de ce secteur sont artificiels, la moyenne des volumes (m^3/m^2) est la plus faible de la côte sud, entre $0,7$ et $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Les plages du secteur 2, au centre de la côte sud étudiée, sont en moyenne $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ plus volumineuses que celles du secteur 1 avec $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Les plages devant les berges artificielles et composites sont aussi moins volumineuses, entre $0,7$ et $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$, que celles devant une ligne de rivage naturelle ($1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Le secteur 3 est celui qui contient les polygones de plages les plus volumineux de l'ensemble de la côte sud. Pour chaque catégorie d'état de la côte, c'est dans ce secteur que les polygones de plage ont les volumes les plus importants. Il est intéressant de noter qu'il s'agit du secteur où la proportion de segments côtiers naturels est la plus importante. Les polygones devant les plages artificialisées ont un volume de $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$, les composites $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$ et les naturelles $1,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Globalement, à l'échelle du sud de l'île, ce sont les plages naturelles qui possèdent un volume de plage (m^3/m^2) plus grand par rapport aux plages artificialisées.

Le tableau 32 montre les volumes moyens des polygones de plage par secteur et en fonction de l'état de la côte en mai 2014. La moyenne globale pour l'ensemble de la côte sud est de 81 m^3 . Une différence fortement marquée existe entre les volumes de plage des côtes naturelles et artificielles, avec une moyenne respective de 102 m^3 contre 50 m^3 . Il n'y a pas de différence significative entre les plages artificielles du secteur 1 et 2, tandis que celles du

secteur 3 ont près de 30 m³ de plus en moyenne. Les plages composites sont peu volumineuses au secteur 1 (42 m³) et augmentent graduellement du secteur 2 (61 m³) au secteur 3 (85 m³). La plus grande différence se situe devant les plages naturelles avec au secteur 1 un volume de 46 m³ par polygone contre 101 m³ et 128 m³ pour les secteurs 2 et 3. Les plages composites, situées aux extrémités des ouvrages de protection, possèdent une moyenne entre les deux, soit de 69 m³. Globalement, le secteur 1 a la plus faible moyenne avec un volume de 41 m³, le secteur 2 a des plages d'en moyenne 82 m³ et elles sont de 107 m³ dans le secteur 3.

Tableau 32. Volume moyen de la plage (m³) et l'écart-type des polygones par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1 (n = 386)	37 ± 10	42 ± 11	46 ± 13	41 ± 13
2 (n = 293)	38 ± 20	61 ± 26	101 ± 31	82 ± 40
3 (n = 563)	69 ± 24	85 ± 36	128 ± 33	107 ± 41
Moyenne par état de la côte	50 ± 24	69 ± 34	102	Moyenne globale : 81 ± 45

Il est possible de constater que les plages les moins volumineuses sont à l'ouest, là où les travaux d'enrochements de l'automne 2014 ont eu lieu et où la côte est plus artificielle, tandis que les plages les plus volumineuses sont à l'est du chemin de la Traverse. Entre les deux se trouve une zone de transition où le volume des plages devient plus important entre le chemin de la Baleine et le chemin de la Traverse. Le secteur 3, au sud-est de l'île, est le secteur ayant les plages les plus volumineuses, ce qui semble indiquer un transit sédimentaire favorisant l'accumulation dans cette zone où la présence de plages naturelles est dominante.

En août 2014, le volume sédimentaire (en m³/m²) des polygones dans le secteur 1 a légèrement diminué de 0,1 m³/m² (tableau 33). Le secteur 2 et le secteur 3 n'ont pas connu de changement concernant la moyenne du secteur. Dans le secteur 1, tandis que les plages artificielles n'ont pas connu de changements significatifs, les plages composites et naturelles ont quant à elles perdu 0,1 m³/m². Dans le secteur 2, les plages artificielles ont diminué de

0,1 m³/m², les plages composites possèdent le même volume qu'en mai 2014 et les plages naturelles ont augmenté de 0,1 m³/m². Dans le secteur 3, peu de changements ont été observés sur les volumes sauf une légère augmentation de 0,1 m³/m² devant les plages composites.

Tableau 33. Volume de plage moyen (m³/m²) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1 (n = 386)	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1	0,7 ± 0,1
2 (n = 293)	0,6 ± 0,2	0,9 ± 0,2	1,2 ± 0,2	1,0 ± 0,3
3 (n = 563)	0,9 ± 0,3	1,1 ± 0,2	1,3 ± 0,2	1,1 ± 0,3
Moyenne par état de la côte	0,7 ± 0,2	0,9 ± 0,2	1,1 ± 0,3	Moyenne globale : 1,0 ± 0,3

Les volumes moyens des polygones de plage présentés au tableau 34 montrent que la moyenne globale a toutefois diminuée de 3 m³, ce qui n'est pas significatif compte tenu de la marge d'erreur associée à la méthode. L'ensemble des plages artificielles ont perdu 5 m³, les plages composites ont diminué de 3 m³ et les plages naturelles de 4 m³. Au secteur 1, la moyenne montre que c'est l'ensemble de la côte qui a perdu du volume de plage, soit entre 5 et 6 m³, par polygone. Au secteur 2, seules les plages naturelles ont augmenté en volume de 2 m³ tandis que les plages artificielles et composites ont perdu 2 à 3 m³ en moyenne. Au secteur 3, le constat est semblable à celui du secteur 1, avec des pertes moyennes entre 1 à 7 m³ selon l'état de la côte.

Tableau 34. Volume moyen de plage (m³) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1 (n = 386)	32 ± 10	36 ± 11	40 ± 13	36 ± 12
2 (n = 293)	35 ± 24	59 ± 31	103 ± 36	83 ± 45
3 (n = 563)	62 ± 32	84 ± 33	124 ± 32	103 ± 43
Moyenne par état de la côte	45 ± 28	66 ± 34	98 ± 45	Moyenne globale : 78 ± 47

Les pertes de volume de plage affectant l'ensemble de la côte sud peuvent être attribuées à plusieurs facteurs. Elles peuvent être liées à un déficit sédimentaire global, avec

plus de pertes que de gains. Les sédiments peuvent être transportés vers le large et certains ouvrages peuvent bloquer la dérive sédimentaire. Les gains sédimentaires provenant du large, plus spécifiquement du cordon, de la côte et de l'érosion de la plateforme rocheuse, sont quant à eux moins importants. Les plages les plus volumineuses sont celles qui sont naturelles et au centre de la côte sud de l'île, là où les herbiers sont présents en grande superficie et où la plateforme rocheuse est plus large qu'aux deux extrémités de la côte sud.

4.7.1.2. Côte nord-est

La figure 116 présente les volumes (m^3/m^2) de plage des secteurs 4 (307 m), 5 (399 m) et 6 (265 m) en mai 2014. La ligne de rivage est tracée en rouge pour les berges artificielles et en vert pour les berges naturelles lors du levé LiDAR.

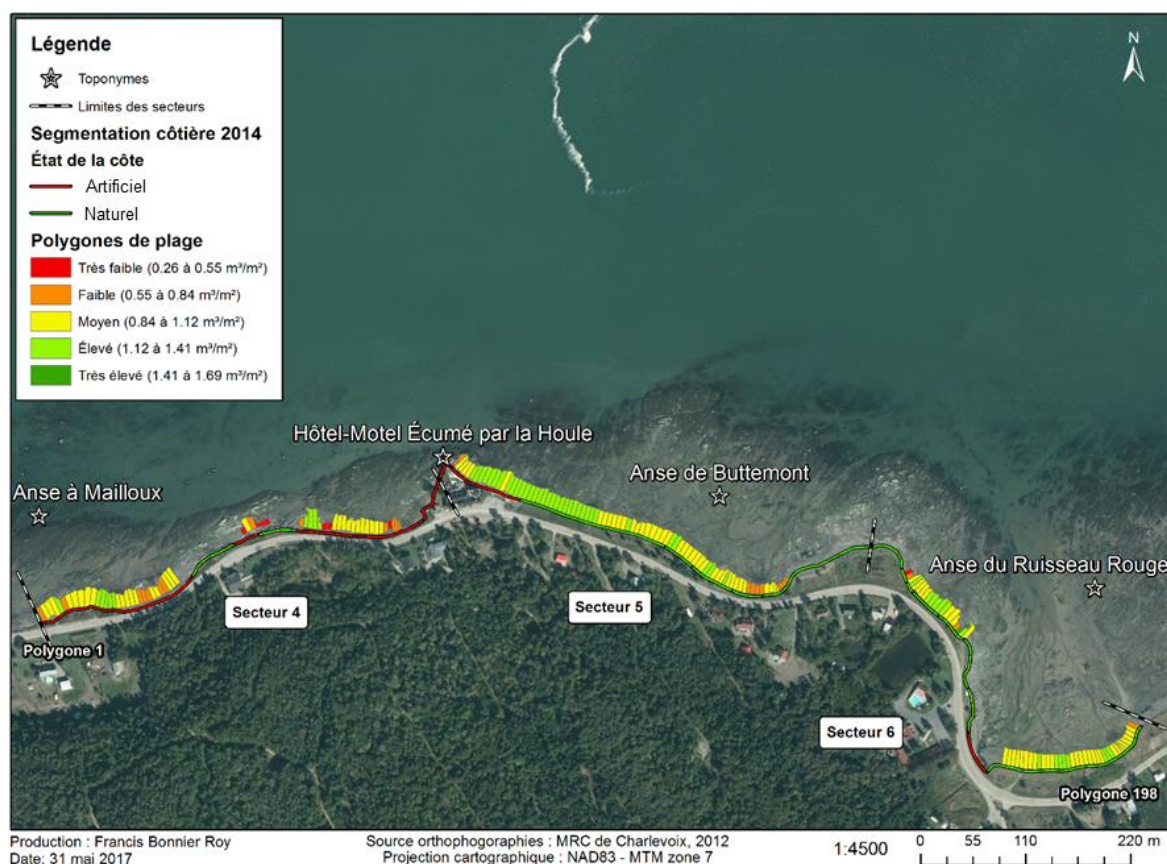


Figure 116. Représentation cartographique du volume de plage (m^3/m^2) des polygones lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (Côte nord-est).

Le tableau 35 présente les volumes de plage moyens (m^3/m^2) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé de mai 2014. Avant les travaux d'automne 2014, 63 % des plages étudiées de la côte nord-est étaient devant une côte naturelle contre 37 % de berges artificielles. La moyenne globale de volume est de $1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$, soit, légèrement supérieur de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ par rapport au sud de l'île. La moyenne des volumes par état de la côte montre que la plage devant les berges naturelles est légèrement plus volumineuse, $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de plus, que celle devant les berges artificielles. Le secteur 4 est celui dont la moyenne est plus faible, d'autant que les plages naturelles ont en moyenne seulement $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de volume. Les plages artificialisées du secteur 5 connaissent une moyenne de volume plus élevée, car elles sont devant l'Hôtel-Motel qui retient le transit sédimentaire le long de la côte, qui se fait majoritairement vers l'ouest ce qui entraîne une progradation de la plage à cet endroit. Au secteur 6, les plages naturelles ressemblent à celles du secteur 5. Ces premiers résultats montrent qu'au printemps 2014, il y a peu de différence volumique moyenne entre les polygones de plage devant les secteurs naturels et artificiels, si ce n'est pour le secteur 4 en raison d'une configuration particulière (haut estran avec affleurement rocheux).

Tableau 35. Volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type des polygones par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte nord-est).

Secteurs	Artificielle	Naturelle	Moyenne par secteur
4 (n = 60)	$1,0 \pm 0,2$	$0,4 \pm 0,1$	$0,9 \pm 0,2$
5 (n = 81)	$1,2 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$
6 (n = 57)	-	$1,1 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$
Moyenne selon l'état de la côte	$1,0 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$	Moyenne globale : $1,1 \pm 0,2$

Le tableau 36 montre les volumes de plage moyens par secteur et en fonction de l'état de la côte en mai 2014. La moyenne globale au nord-est est de 79 m^3 , soit légèrement inférieure à celle de la côte sud de 2 m^3 . Cependant, il y a une grande variabilité le long de la côte et entre les secteurs. Le secteur 4 est la portion de la côte nord-est qui possède les plages les moins volumineuses avec une moyenne de 73 m^3 par polygone devant les berges

artificielles et une moyenne de 11 m³ au-devant des berges naturelles. Cette section de plage naturelle de 15 m de long est la seule avec aussi peu de volume sédimentaire sur l'ensemble de la côte nord-est de l'île. Le secteur 5 est celui qui est le plus engraisé avec une moyenne de 88 m³. Le secteur 6 arrive 2^e avec 76 m³.

Tableau 36. Volume de la plage moyen (m³) et l'écart-type des polygones par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côte nord-est).

Secteur	Artificielle	Naturelle	Moyenne par secteur
4	73 ± 30	11 ± 2	70 ± 32
5	100 ± 30	85 ± 30	88 ± 31
6	-	76 ± 22	76 ± 22
Moyenne par état de la côte	79 ± 32	79 ± 29	Moyenne globale : 79 ± 30

L'analyse des données du 27 août, 3 mois après le 1^{er} levé, montre des résultats similaires à ceux présentés de mai 2014. Ce sont les mêmes secteurs qui ont le plus de sédiments et les volumes n'ont pas changé selon l'état de la côte (tableau 37).

Tableau 37. Volumes de plage moyens (m³/m²) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).

Secteurs	Artificielle	Naturelle	Moyenne par secteur
4	1,0 ± 0,2	0,4 ± 0,1	0,9 ± 0,2
5	1,2 ± 0,3	1,1 ± 0,2	1,1 ± 0,2
6	-	1,1 ± 0,2	1,1 ± 0,2
Moyenne par état de la côte	1,0 ± 0,2	1,1 ± 0,2	Moyenne globale : 1,1 ± 0,2

Dans le tableau 38, il est possible de voir que le volume sédimentaire des polygones du secteur 4 a légèrement diminué de 1 m³. Le secteur 5 a augmenté de 2 m³ en moyenne et le secteur 6 a diminué en moyenne de 3 m³. La plage artificialisée devant l'Hôtel-Motel dans le secteur 5 a connu une augmentation de volume pour chaque polygone, en moyenne de 8 m³. Les plages naturelles pour ce même secteur n'ont pas connu de changement volumique.

Tableau 38. Volumes moyens de plage (m^3) et l'écart-type des polygones par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).

Secteurs	Artificielle	Naturelle	Moyenne par secteur
4	73 ± 30	11 ± 5	69 ± 33
5	108 ± 38	85 ± 31	90 ± 34
6		73 ± 24	73 ± 24
Moyenne par état de la côte	81 ± 35	78 ± 30	Moyenne globale : 79 ± 32

L'engraissement qu'a connu la plage devant les aménagements de l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle peut provenir soit d'un apport le long du rivage par transit sédimentaire, donc du secteur 6 qui a connu une perte de sédiments de plage, d'une migration des sédiments du bas estran ou de l'avant-plage infralittorale vers la plage. Somme toute, la saisonnalité joue un rôle marginal sur le volume sédimentaire des plages entre le printemps et l'été sur la côte nord-est.

4.7.2. Suivi de l'évolution volumique des plages

4.7.2.1. Côte sud

La figure 117 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges naturelles qui n'ont pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent aux secteurs 2 (995 m) et 3 (1 815 m).

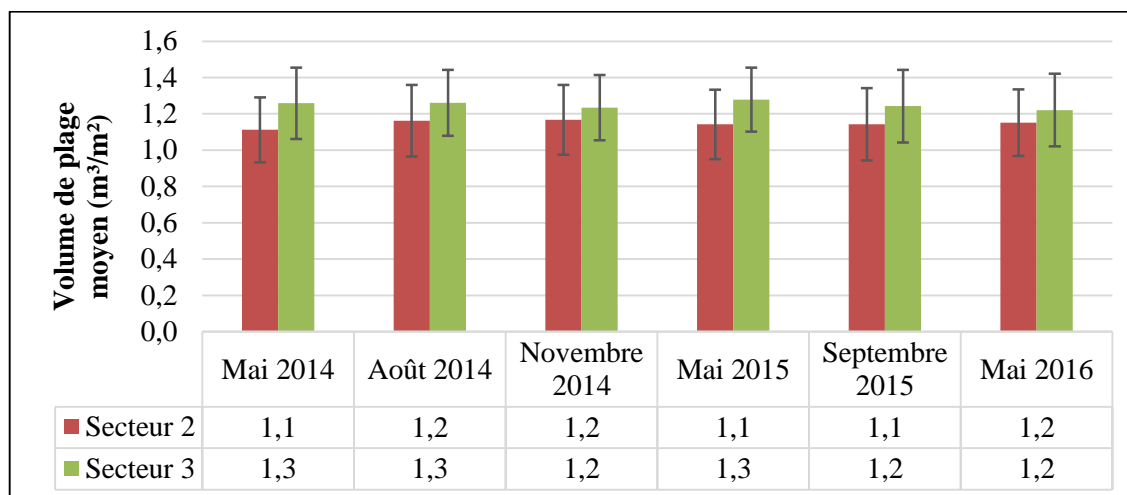


Figure 117. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) et l'écart-type (barre d'erreur) par polygone des plages naturelles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Au secteur 2, le volume moyen des plages naturelles est resté relativement stable sur l'ensemble du suivi avec quelques fluctuations, variant entre $1,1$ et $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Au secteur 3, la tendance est similaire avec quelques pertes de volume moyen de l'ordre de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ en moyenne par polygone de plage.

La figure 118 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges naturelles qui ont fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent aux secteurs 1 (935 m) et 2 (20 m).

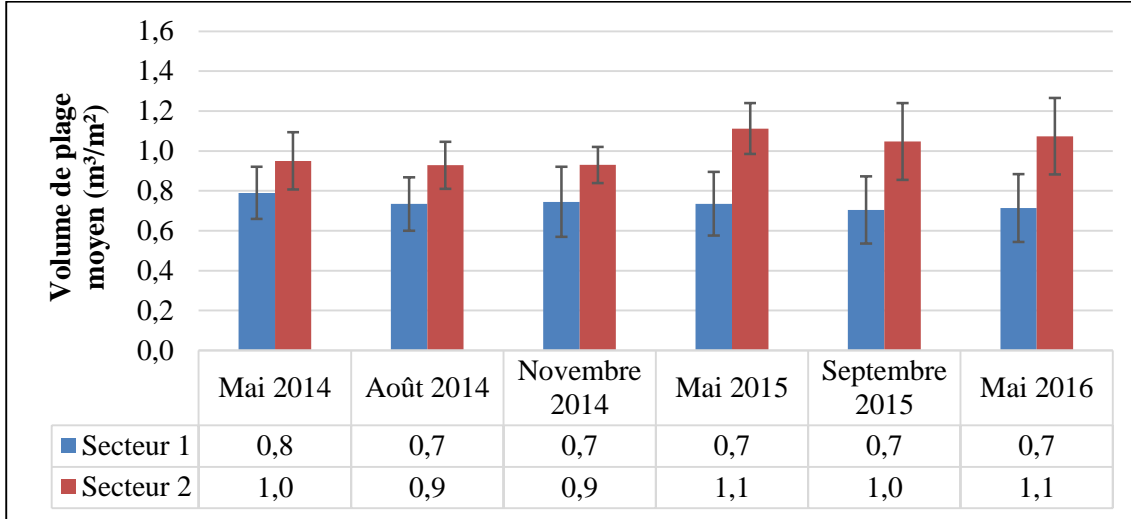


Figure 118 Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles ayant fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Au secteur 1, la moyenne du volume de ces polygones de plages du mois de mai 2014 est de $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ alors qu'elle est un peu plus faible pour août 2014 avec $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$. En novembre 2014, le volume moyen est demeuré similaire à celui calculé durant la période estivale, malgré la mise en place de la recharge sédimentaire provenant de la clé de l'ouvrage devant celui-ci. En mai 2015, le volume moyen est moins grand qu'un an auparavant au printemps 2014, avec $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ de moins. Le volume moyen demeure similaire jusqu'au dernier levé en mai 2016. Une légère perte de volume de plage est ainsi observable devant ces plages nouvellement artificielles.

La tendance est différente au secteur 2 alors que le gain en trois ans est de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Un cycle saisonnier est visible aussi sur ce secteur alors que le mois de mai est plus volumineux que les saisons estivales ou automnales. Il n'y a pas eu de gain sédimentaire à la suite des travaux, mais une forte augmentation du volume moyen par polygone de plage a été enregistrée au printemps 2015, soit un gain de $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$ comparativement au levé de l'automne 2014. Il est possible que ce gain de volume soit lié à la présence de débris végétaux sur le haut estran au printemps, tel que mentionné préalablement dans la section méthodologie au chapitre 2 (marge d'erreur entre $0,1$ et $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^2$). Néanmoins, ce ne sont

pas toutes les plages naturelles qui en avaient, ce qui veut dire qu'une source sédimentaire doit expliquer ces résultats. Il se peut que ce soit les sédiments de la recharge déplacés par les courants ; des apports sédimentaires provenant du large ont aussi pu contribuer à ces gains volumiques. À l'été 2015, une légère perte de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ a été calculée alors qu'au printemps 2016, le volume moyen est de nouveau évalué à $1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. En somme, il semble que les ouvrages de protection mis en place à l'automne 2014 ont eu des impacts négatifs différenciés sur les volumes de plages aux secteurs 1 et 2. Sur le secteur 1, le volume moyen des plages semble légèrement en baisse tandis que celui des plages sur le secteur 2 est supérieur qu'à l'état initial, probablement en raison de la recharge sédimentaire faite au-devant des ouvrages qui a fort probablement migré vers l'aval par la dérive littorale, soit le centre de la côte sud.

La figure 119 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges artificielles qui n'ont pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent sur l'ensemble des secteurs de la côte sud de l'île.

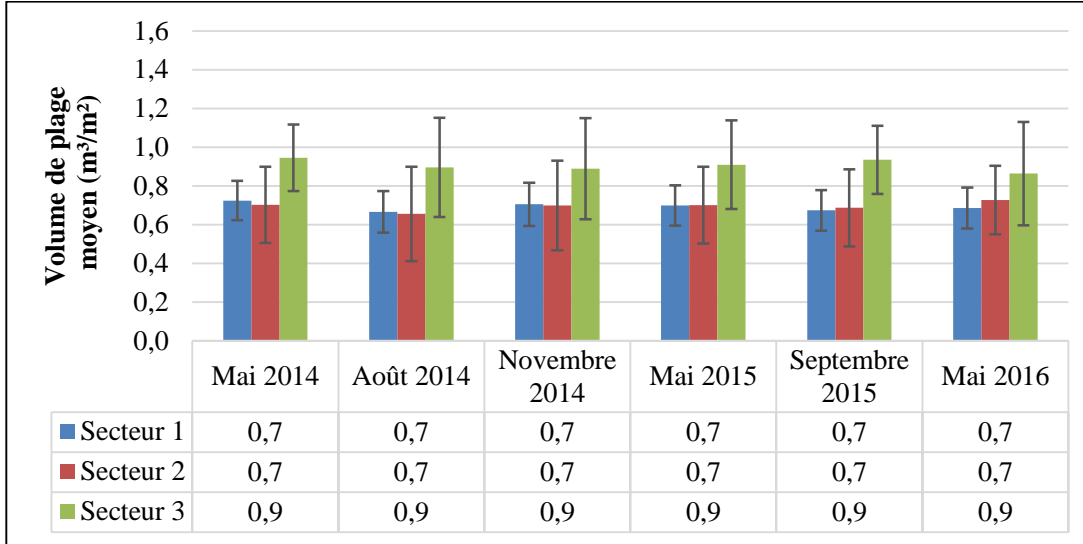


Figure 119. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages déjà artificielles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

Au secteur 1 (980 m), la moyenne des volumes de plage est de $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$ et ce chiffre est demeuré constant durant tout le suivi. Au secteur 2 (450 m), le même constat s'observe avec une moyenne volumique de $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Au secteur 3 (1 000 m), le volume moyen est plus élevé, mais tout aussi stable avec $0,9 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Ces berges déjà artificielles depuis des années semblent connaître une stabilité de leur stock sédimentaire. Ainsi, un équilibre dynamique du stock sédimentaire de la plage s'observe grâce à ces résultats. Néanmoins, une grande variabilité existe dans les résultats exprimés par la barre d'erreur (écart-type), signifiant une hétérogénéité des volumes pour un même type de côte. De plus, même si les volumes moyens demeurent stables entre les levés, les sédiments sont déplacés par la dérive littorale et certaines plages peuvent perdre en volume et d'autres en gagner, ce qui fait qu'en somme, le stock sédimentaire reste équivalent, mais des gains et des pertes de volumes sont possibles pour des polygones de plage du même type de côte.

La figure 120 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges artificielles qui ont fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent au secteur 1 (15 m) devant des anciens enrochements qui nécessitaient réparation.

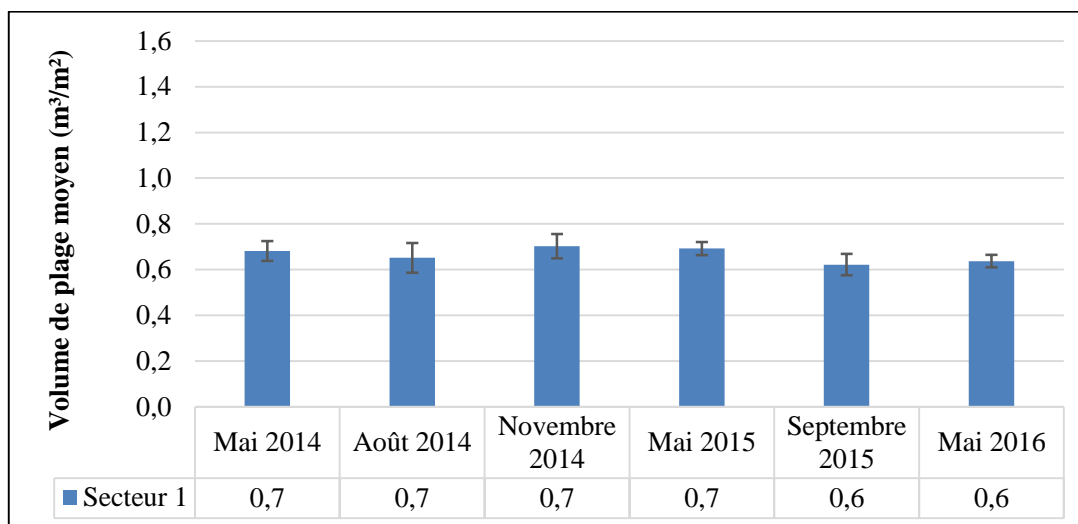


Figure 120. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages artificielles ayant fait l'objet de réfection lors des travaux de l'automne 2014, côte sud. À considérer la marge d'erreur additionnelle de la méthode LiDAR de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$.

L'état initial montre qu'en moyenne, le volume de plage par polygone était de $0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2$. À la suite des travaux, le volume reste identique jusqu'à l'été 2015 où le volume de plage diminue de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Il est possible que ces plages aient pu bénéficier d'un apport sédimentaire par la recharge de plage réalisée au-devant des nouveaux ouvrages de façon temporaire par la dérive littorale. Comme il a été mentionné préalablement, le secteur 1 comporte les plages les moins volumineuses de la côte sud. Il semble que les enrochements n'aient pas d'impacts sur certaines plages, peut-être à cause de la recharge de plage réalisée devant ceux-ci. Cependant, il n'est pas encore clair que ces structures de défense côtière ont un réel impact négatif à court et moyen termes sur les plages de la côte sud de l'île, hormis l'empiètement direct sur le haut de plage.

La figure 121 montre les différences cumulées des volumes de plages de la côte sud pour les trois secteurs. Pour cette synthèse, les volumes sont présentés en m^3 afin d'apprécier le volume total gagné ou perdu des plages sur l'ensemble du suivi. Il est possible de voir en annexe les cartes de l'évolution volumique de chacun des secteurs (annexes 20 à 22).

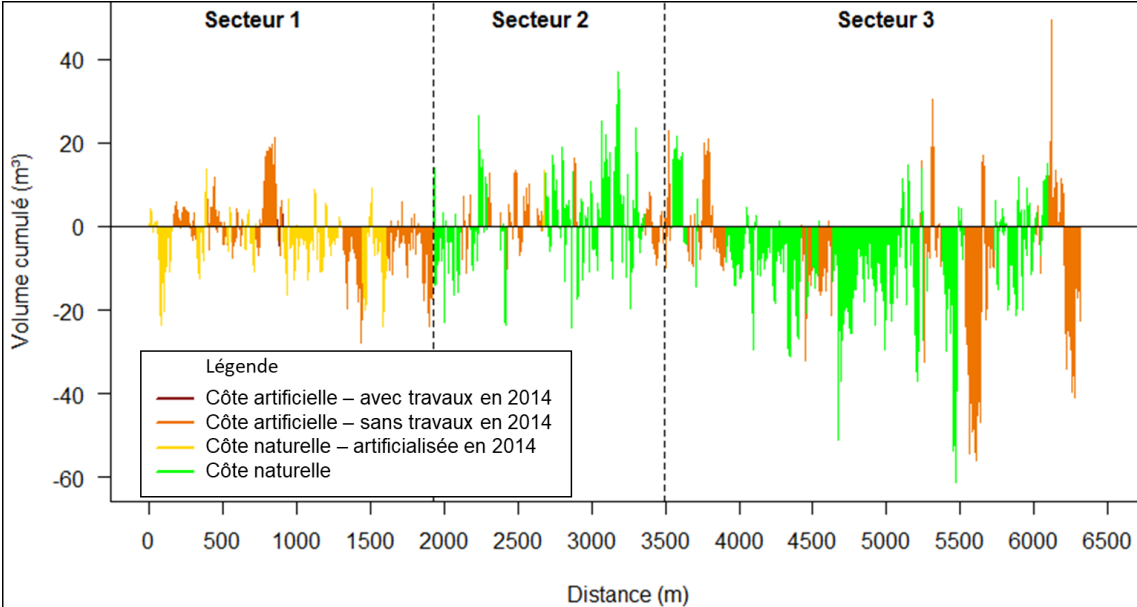


Figure 121. Différences cumulées des volumes (m^3) des plages de la côte sud entre août 2014 et mai 2016.

Il est possible de voir que, sur le secteur 1, l'évolution volumique est globalement négative devant ses berges artificialisées, même si le volume des plages s'est accru dans l'ensemble de la première moitié de ce secteur, et ce de manière importante autour de 800 m, où des gains jusqu'à 20 m^3 par polygone ont été enregistrés au terme du suivi. Sur la deuxième moitié du secteur 1, des pertes volumiques sont observables sur l'ensemble du suivi, peu importe si les enrochements sont nouveaux ou non. Globalement, les berges du secteur 1 qui étaient naturelles et qui ont été enrochées ont en grande majorité connu des baisses de volume sédimentaire devant les enrochements. Cette tendance à la baisse semble s'étendre quelques centaines de mètres après le début du secteur 2, sur les plages naturelles. Puis, de 2 300 à 3 500 m (au niveau du chemin de la Traverse), les plages ont, dans l'ensemble, connu une accumulation sédimentaire. Les variations volumiques vont de -25 m^3 à 40 m^3 pour ce secteur, ce qui indique une grande variabilité, peu importe l'état de la côte. Sur les 350 premiers mètres du secteur 3, la même tendance de gains sédimentaires qu'au secteur 2 semble s'observer. Cependant, le reste du secteur a des pertes volumiques assez importantes. Ces déficits sédimentaires ne semblent pas être liés à l'état de la côte, car

autant les berges naturelles qu'artificielles ont été affectées. Ces pertes ont été chiffrées jusqu'à 60 m³ pour un seul polygone de 5 m de large alors que la moyenne du volume total pour une côte naturelle de ce secteur était entre 124 m³ et 128 m³. Toutefois, des gains importants ont quand même été montrés pour quelques polygones vers la fin du secteur avec près de 50 m³.

En moyenne, les plages de la côte sud ont connu des pertes sédimentaires durant la période du suivi, et ce peu importe l'état de la côte. Néanmoins, l'exposition de la côte aux vagues et la morphologie de l'estran sont deux facteurs qui semblent jouer un rôle important dans l'explication de cette évolution volumique. Les secteurs 1 et 3 sont les deux secteurs les plus exposés aux vagues, mais aussi beaucoup plus enrochés comparativement au secteur 2. D'ailleurs, ce sont ceux qui connaissent le plus grand démaigrissement de plage sur l'ensemble du littoral. Le secteur 2 est plutôt stable, voire positif, étant donné sa position centrale et davantage protégée par une large plateforme rocheuse, la présence du cordon de basse mer et des herbiers à spartine.

Sur la figure 122, le volume de plage total est présenté par secteur pour les trois années de suivi. Le secteur 1 a perdu 1 233 m³ de sédiments de plage sur la durée du suivi, le secteur 2 a connu un gain de 469 m³ (0,3 m³/m) et le secteur 3 a perdu 4 859 m³ (- 1,7 m³/m). En somme, c'est 5 624 m³ (0,9 m³/m) de sédiments qui ont été perdus entre mai 2014 et mai 2016.

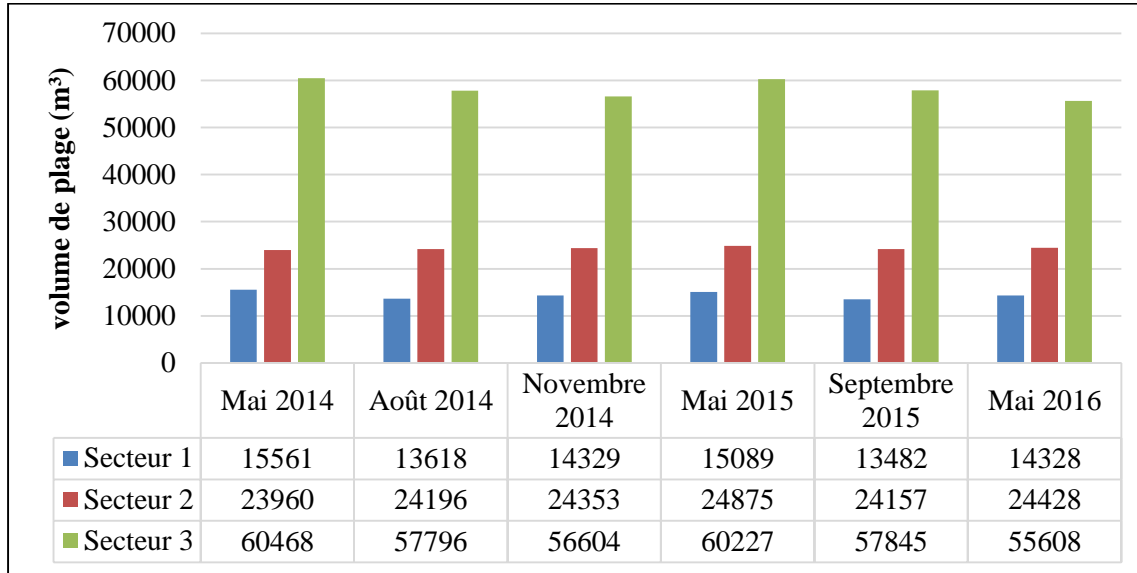


Figure 122. Évolution du volume de plage total (m³) par secteur entre mai 2014 et mai 2016 pour la côte sud. À noter que sur les levés du printemps et l'été 2014, 39 et 9 polygones respectivement étaient manquants de par des imprévus techniques sur le terrain. Leur volume a été estimé grâce à d'autres levés et ajouté dans les secteurs respectifs.

Le tableau 39 montre le changement de volume sédimentaire entre les levés saisonniers pour chaque secteur. Sur l'ensemble de la côte sud, les volumes du printemps à l'été sont presque toujours négatifs, ce qui peut être expliqué en partie par les débris de végétaux qui se retrouvent essentiellement sur la plage lors des levés du mois de mai chaque année et se dégradent ou sont remobilisés durant cette période. Ce phénomène ne semble pas se produire sur la côte nord-est, car aucun débris de végétaux n'a été remarqué lors des levés LiDAR.

Tableau 39. Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côte sud.

Secteurs	Printemps à été 2014	Été à automne 2014	Automne 2014 à printemps 2015	Printemps à été 2015	Été 2015 à printemps 2016
1	-12 %	5 %	5 %	-11 %	6 %
2	1 %	1 %	2 %	-3 %	1 %
3	-4 %	-2 %	6 %	-4 %	-4 %

4.7.2.2. Côte nord-est

La figure 123 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges naturelles qui n'ont pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent aux secteurs 5 (215 m) et 6 (285 m).

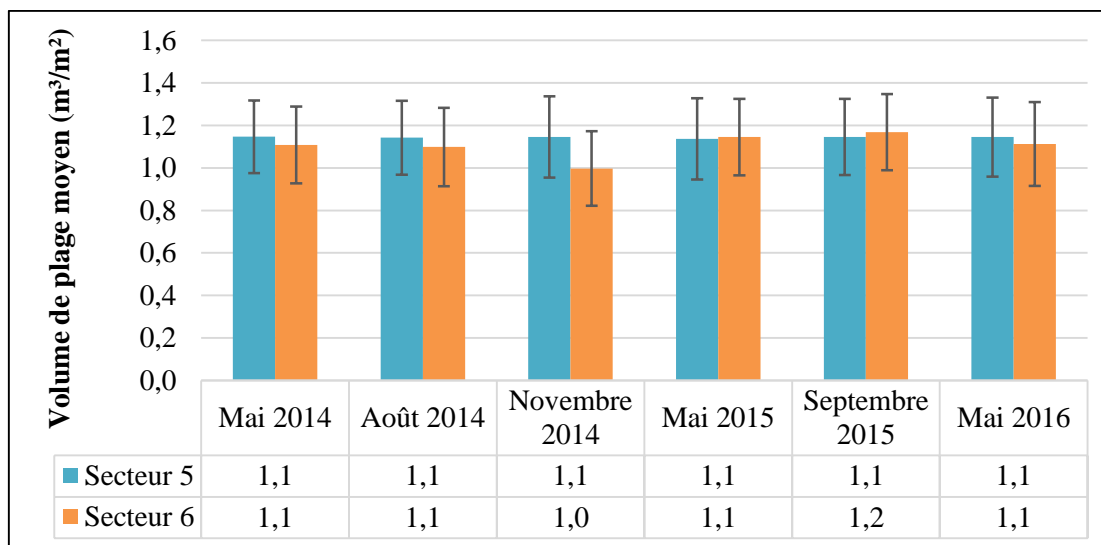


Figure 123. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.

Au secteur 5, les volumes de plages sont demeurés stables à $1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ sur l'ensemble du suivi. Sur le secteur 6, le volume moyen a connu de légères variations. À l'état initial, le volume moyen des plages a été estimé à $1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Ce chiffre a diminué de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à l'automne 2014, mais était à nouveau à $1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ au printemps 2015 et 2016. Septembre 2015 est le levé où le volume de plage a été le plus important avec $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Les plages du secteur 6 sont plus sujettes à des modifications sédimentaires de par leur position adjacente à l'embouchure du ruisseau Rouge. C'est aussi le secteur qui est en progradation dans l'évolution historique (tableau 10). Des apports sédimentaires provenant de la rivière ainsi que de la dérive littorale et des courants sont probablement les conditions responsables de ces gains volumiques.

La figure 124 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges naturelles qui ont fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent aux secteurs 4 (15 m) et 5 (105 m).

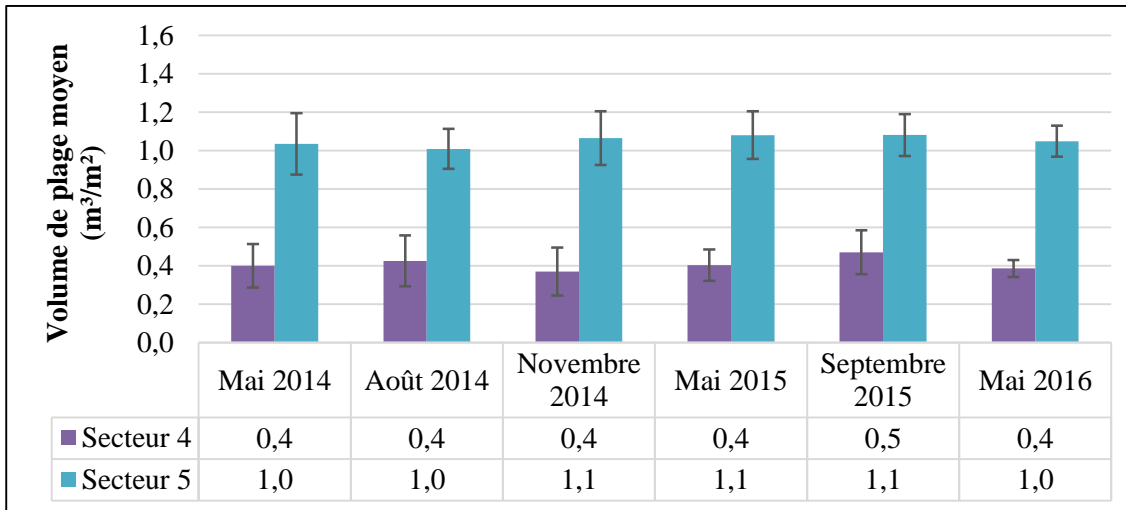


Figure 124. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles ayant fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.

Le premier constat est que les plages du secteur 4 sont beaucoup moins volumineuses avec $0,4$ à $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ que les plages du secteur 5 ayant $1,0$ à $1,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Après la mise en place des structures de protection sur la portion supérieure du haut estran en novembre 2014, le volume moyen n'a pas connu de changement important, si ce n'est qu'une légère baisse de volume de moins de $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$. C'est en septembre 2015 que le volume moyen des plages est le plus élevé avec $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$. L'année suivante, en mai 2016, environ $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2$ des plages est retranché du volume moyen.

Pour la plage devant le nouvel enrochement du secteur 5 situé dans l'anse à Buttemont, l'état de référence indiquait un volume moyen par polygone de $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pour mai et août 2014. L'évolution volumique a connu un gain en novembre 2014, puis se stabilise et revient à l'état initial en mai 2016. Cette augmentation est probablement liée à la recharge sédimentaire réalisée en même temps que les nouveaux enrochements. Cela concorde avec l'évolution du profil topographique observée à la figure 102.

La figure 125 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges artificielles qui n'ont pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014. Ces plages (85 m) se trouvent dans le secteur 5, devant les murets de protection de l'Hôtel-Motel.

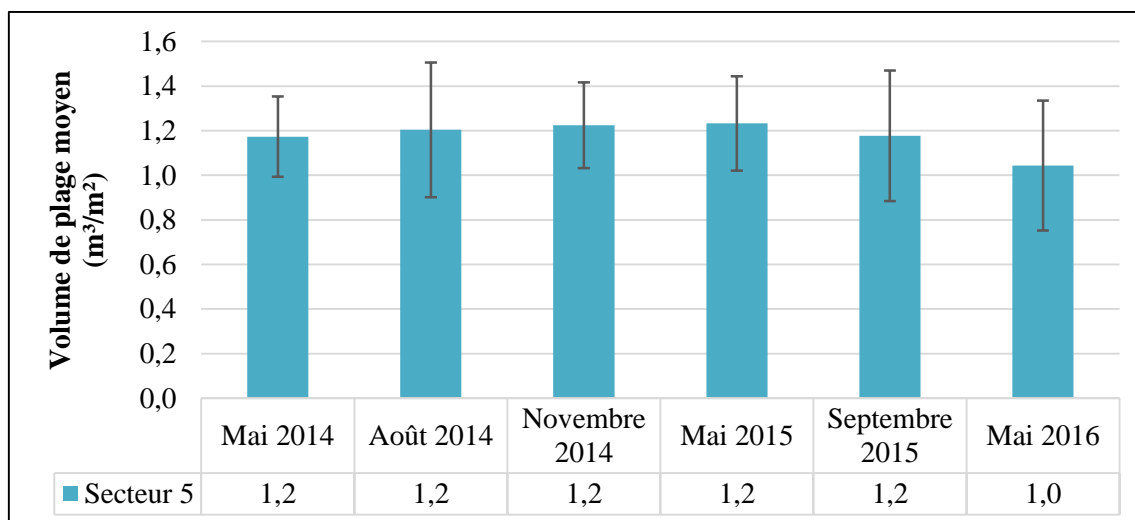


Figure 125. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages déjà artificielles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.

Lors de l'état de référence en mai et août 2014, le volume moyen était de $1,2 \text{ m}^3/\text{m}^2$. De légères fluctuations de volume sédimentaire ont été enregistrées jusqu'en septembre 2015, mais c'est en mai 2016 que le volume moyen a été le plus faible avec $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Dans l'ensemble du suivi, le volume moyen pour ce type d'état de la côte était généralement stable. Au printemps 2016, la plage devant ces ouvrages a dû perdre en stock sédimentaire après la période hivernale. Il est fort possible que la plage ait regagné en sédiments puisque cette portion du secteur 5 est bloquée par les infrastructures de l'Hôtel-Motel. Ainsi, le transit sédimentaire est interrompu à cet endroit et c'est ce qui a été observé pour cette portion de la côte historiquement.

La figure 126 présente l'évolution du volume moyen (m^3/m^2) des polygones de plages devant les berges artificielles qui ont fait l'objet de réfection lors des travaux à l'automne 2014. Ces plages se trouvent au secteur 4 (285 m) dans l'anse à Mailloux.

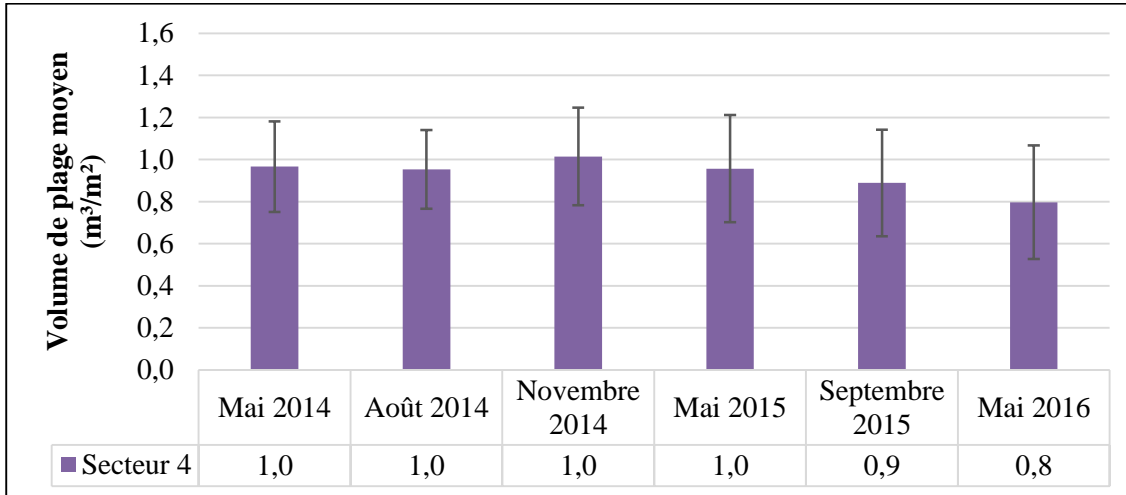


Figure 126. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages artificielles ayant fait l'objet de réfection lors des travaux de l'automne 2014, côte nord-est.

Les plages artificialisées avaient en moyenne un volume de plage de $1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2$ lors de l'état initial en mai et août 2014. À partir de novembre 2014, le volume moyen a légèrement augmenté pour ensuite revenir en mai 2015 à ce qui était observé initialement en mai 2014. À partir de septembre 2015 et mai 2016, les volumes moyens des plages ont diminué pour atteindre $0,9$ et $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ respectivement. En somme, les plages devant les ouvrages de protection ayant fait l'objet de réfection en novembre 2014 ont perdu des sédiments. Ainsi, les enrochements réalisés au secteur 4 semblent avoir un impact sur le volume des plages, même à court terme.

La figure 127 montre la différence cumulée des volumes de plage selon l'état de la côte suivant les travaux d'enrochement de l'automne 2014. Il est possible de voir la carte de détaillée à l'annexe 23.

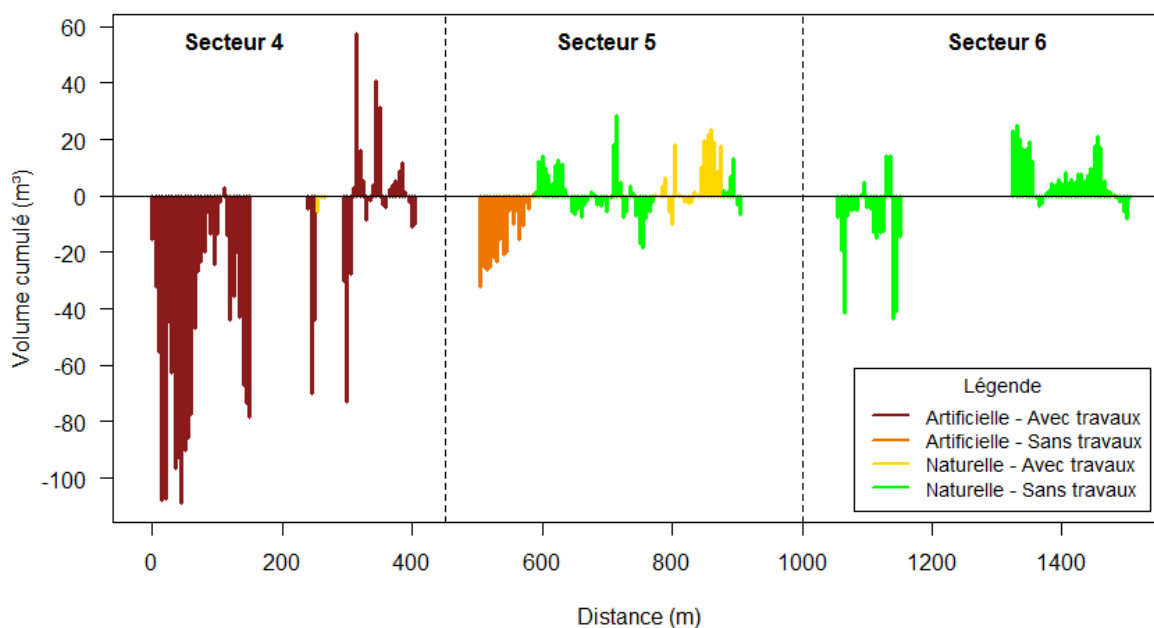


Figure 127. Différences cumulées des volumes (m³) des plages de la côte nord-est.

Au secteur 4, presque toute la côte à l'étude était déjà artificielle lors de l'état de référence et elle fut l'objet de réfection lors des travaux. Une petite portion était naturelle et a aussi été enrochée. Dans l'ensemble, ce secteur a connu une grande perte de volume de plage en trois ans (jusqu'à près de 110 m³), sauf pour les plages près de l'hôtel-motel entre 300 et 400 m (gain allant à près de 60 m³). Ce démaigrissement de plage est le plus important de la côte nord-est, mais aussi de l'ensemble de la zone d'étude. Les sédiments de la plage de ce secteur sont situés par endroit sur des affleurements rocheux qui apparaissent sur le haut estran. Tel que mentionné précédemment, les sables constituent sur ces affleurements une mince couche de sédiments qui de par l'action des vagues sur les ouvrages, sont facilement mobilisables dans la colonne d'eau. Ainsi, les enrochements à cet endroit causent ce qu'on appelle un coincement côtier et empêche la côte de s'ajuster face à l'érosion. En conséquence, la plage déjà précaire diminue de volume. Au secteur 5, la côte artificielle sans travaux, devant les murets et enrochements de l'hôtel-motel, a perdu en moyenne plus de volume de plage que les plages naturelles sans et avec travaux. La plage naturelle sans travaux de ce secteur s'est engraisée à quelques endroits, mais a aussi diminué à d'autres. Les plages naturelles enrochées ont connu majoritairement une augmentation de volume de

l'ordre de 20 m³ liée à la recharge de plage faite au-devant des nouveaux ouvrages. Au secteur 6, la première zone naturelle sans travaux a connu des pertes sur l'ensemble du suivi entre 5 m³ et 45 m³. Cette portion du secteur est située sur une côte basse rocheuse où la même situation se produit qu'au secteur 4. La portion de plage au nord-est du pont du ruisseau Rouge entre 1 300 et 1 500 m a été en constante augmentation de volume sur les trois années de suivi.

La figure 128 présente le volume de plage total par secteur pour les trois années de suivi. Les secteurs 4 et 6 sont deux secteurs de volume semblable avant les travaux de 2014 tandis que le secteur 5 est le plus volumineux. À la suite des trois années de suivi, le secteur 4 a perdu 1 628 m³ (5,3 m³/m) de sédiments, le secteur 5 en a perdu beaucoup moins avec 91 m³ (0,2 m³/m) et le secteur 6 en a gagné 39 m³ (0,15 m³/m).

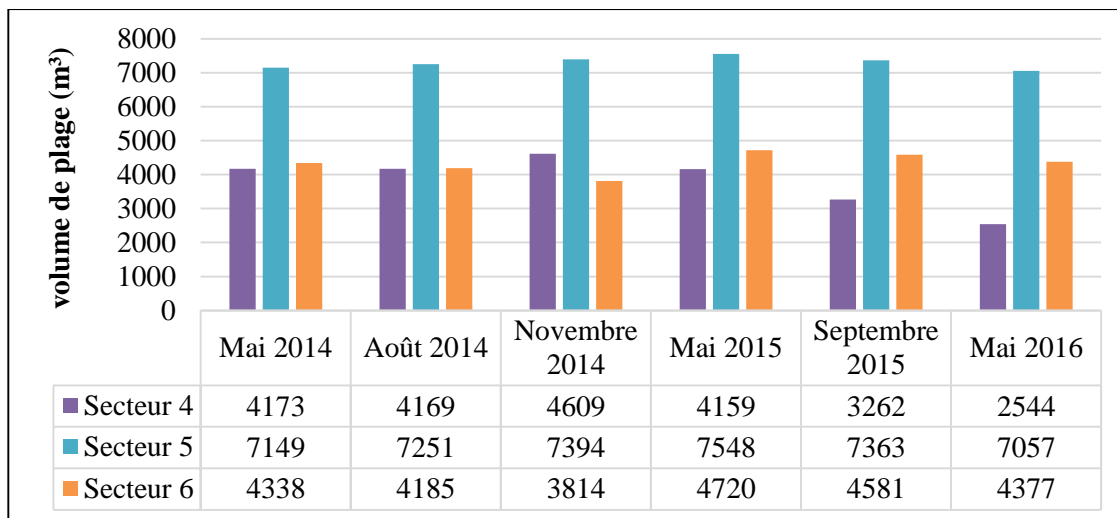


Figure 128. Évolution du volume de plage total (m³) par secteur entre mai 2014 et septembre 2015 pour la côte sud.

Le tableau 40 montre le changement de volume sédimentaire entre les levés saisonniers pour chaque secteur. Le secteur 4 était en gain sédimentaire en 2014 alors qu'à partir de 2015, son stock sédimentaire n'a cessé de diminuer. Le secteur 5 quant à lui est resté relativement stable avec des gains de 1 % à 2 %, mais aussi des pertes de 2 % et 4 % entre les saisons à

partir de l'été 2015. Au secteur 6, le gain de 24 % entre l'automne 2014 et le printemps 2015 est en partie expliqué par les débris organiques sur le bas de la plage.

Tableau 40. Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côte sud.

Secteurs	Printemps à été 2014	Été à automne 2014	Automne 2014 à printemps 2015	Printemps à été 2015	Été 2015 à printemps 2016
4	0 %	11 %	-10 %	-22 %	-22 %
5	1 %	2 %	2 %	-2 %	-4 %
6	-4 %	-9 %	24 %	-3 %	-4 %

4.8. Comportement récent des herbiers à spartine alterniflore

4.8.1. État initial des herbiers à spartine alterniflore

La figure 129 montre les herbiers 1 à 18 présents sur la première zone d'herbiers ainsi que leur superficie (en m²). L'herbier le plus vaste est l'herbier 13 avec plus de 7 000 m² suivi par l'herbier 12 de 3 000 m². Le secteur 1 est le plus important en termes de superficie avec un total de 17 282 m², soit 90,8 % des herbiers suivis. La superficie des herbiers est moins grande entre les profils 8 et 1 (herbiers 1 à 11), tandis que les herbiers entre les profils 1 et 2 présentent de grandes superficies continues (herbiers 12 à 18).

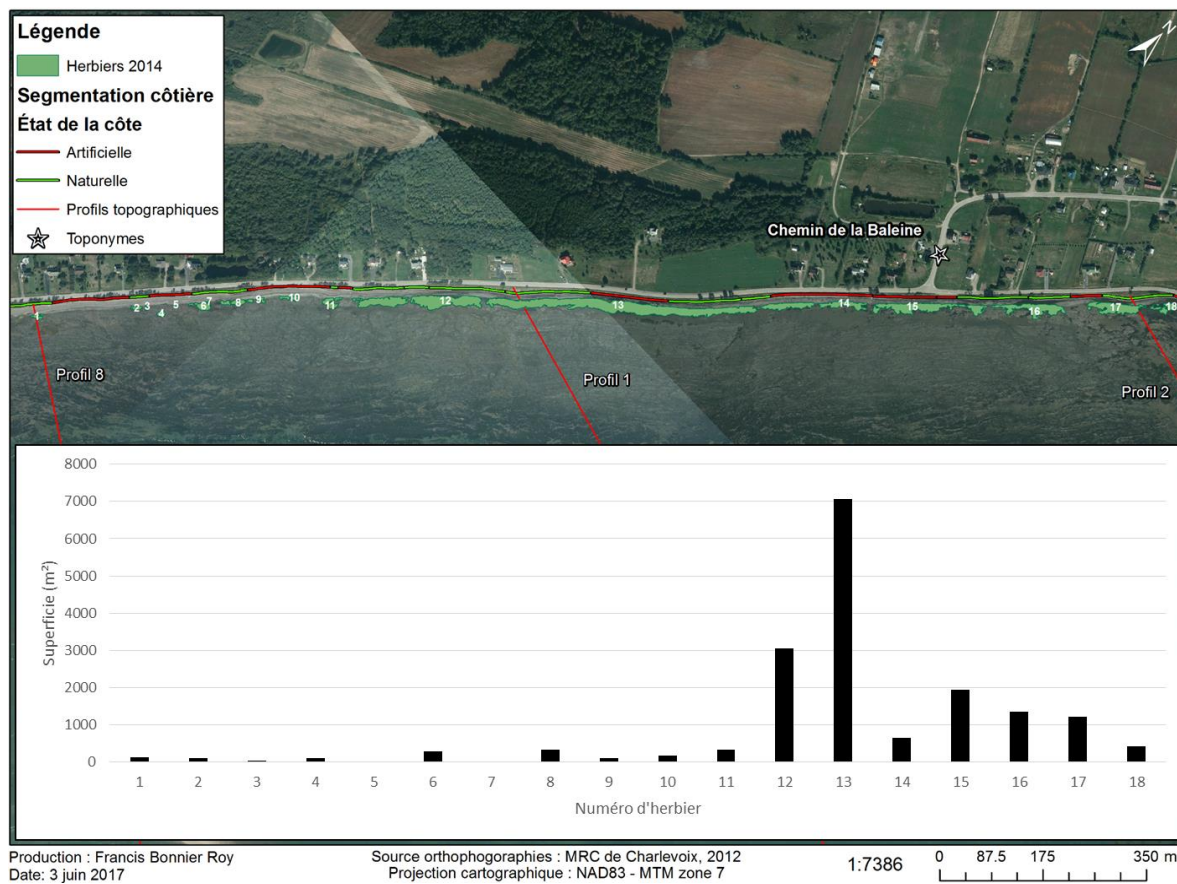


Figure 129. Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m²) de la zone 1 en août 2014.

La figure 130 montre les herbiers 19 à 29 présents sur la zone 2 ainsi que leur superficie (en m²). L'herbier le plus vaste est l'herbier 23 avec 484 m² suivi par l'herbier 27 de 410 m². Ce secteur est moins important en termes de superficie, un total de 1 747 m² et les herbiers sont plus dispersés les uns des autres.

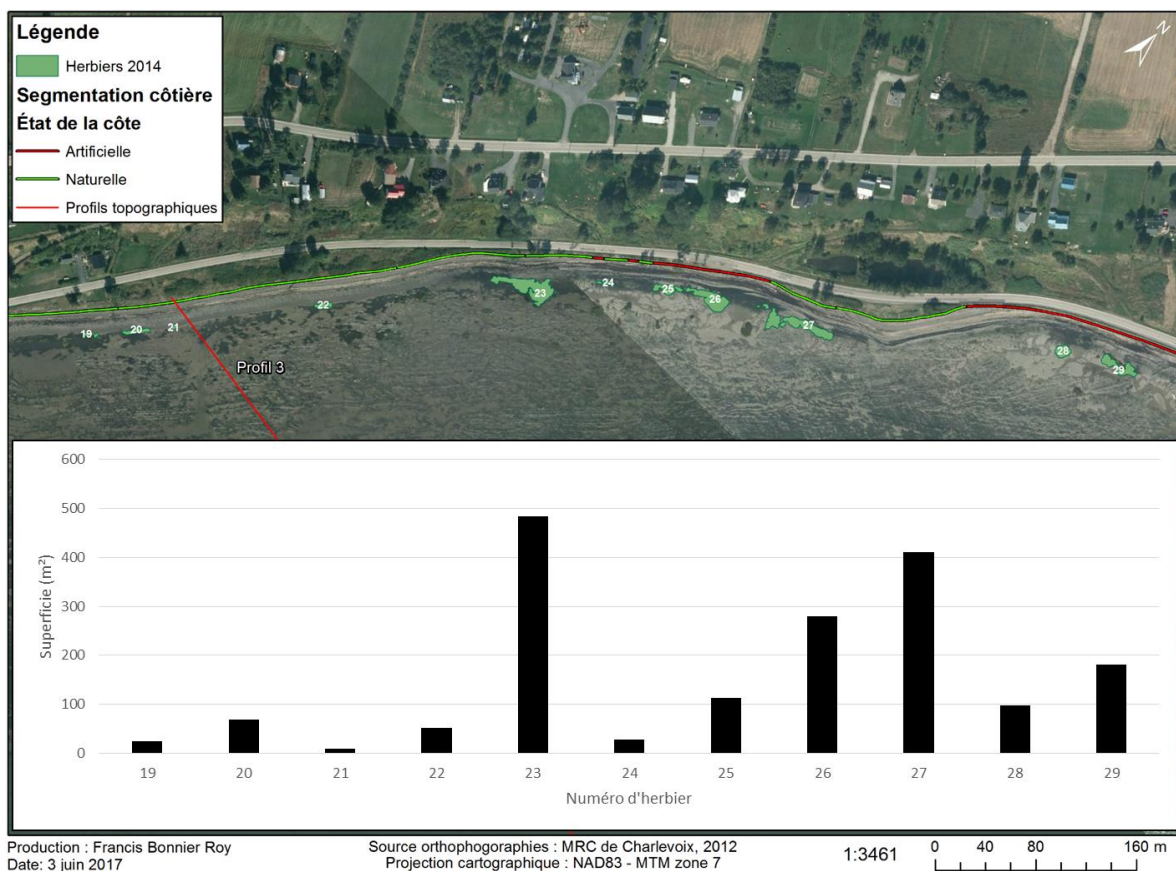


Figure 130. Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m²) de la zone 2 en août 2014.

Le tableau 41 montre que 65 % de la superficie des herbiers en 2014 est devant des berges naturelles contre 35 % des herbiers qui sont devant les côtes artificielles. Sur la zone 1, 65 % des herbiers sont devant une côte naturelle contre 35 % devant une côte artificielle. Les pourcentages pour la zone 2 sont assez similaires avec 61 % et 39 %.

Tableau 41. Somme des superficies d'herbiers selon l'état de la côte en août 2014.

Zones	Superficie (m ²) devant les côtes naturelles	Superficie (m ²) devant les côtes artificielles	Total de la zone (m ²)
Zone 1	11 219 (65 %)	6 062 (35 %)	17 282
Zone 2	1 066 (61 %)	681 (39 %)	1 747
Total global	12 285	6 744	19 029

Chaque herbier ayant une valeur de hauteur moyenne, une pondération a été faite en fonction de la superficie de l'herbier sur le total de sa zone. La proportion de chaque herbier des deux zones est multipliée par sa hauteur moyenne respective, puis le total de la zone donne la hauteur moyenne pondérée. Ainsi, plus un herbier est étendu, plus sa hauteur moyenne aura une influence sur la moyenne de la zone à laquelle il appartient. Le même procédé a été retenu pour la moyenne générale sur l'ensemble des herbiers.

La plupart des herbiers ont en moyenne des plants d'une hauteur de 76 cm (tableau 42). Néanmoins, une grande variabilité de la hauteur moyenne est remarquable sur l'ensemble des deux zones, puisque celle-ci varie entre 30 et 100 cm. 62 % des herbiers possèdent une hauteur moyenne de plus de 70 cm. Il est à remarquer que la hauteur moyenne est plus faible dans la zone 2.

Tableau 42. Hauteur moyenne pondérée des herbiers à spartine alterniflore, août 2014.

Zones	Hauteur moyenne (cm)	Min	Max
Zone 1	76	30	85
Zone 2	70	50	100
Moyenne générale	76		

Les résultats présentés au tableau 43 montrent qu'aucun herbier ne présente un pourcentage de recouvrement de 25 % et moins. Dans la première zone, 6 % des herbiers ont une densité de plants entre 25 et 50 %, 39 % d'entre eux possèdent une densité de 50 à 75 % et 56 % ont une densité de 75 % et plus. Dans la deuxième zone, la totalité des herbiers ont un pourcentage de recouvrement supérieur à 75 %.

Tableau 43. Pourcentage de recouvrement des herbiers, août 2014.

Zones	0 à 25	25 à 50	50 à 75	75 et plus
Zone 1	0 %	6 %	39 %	56 %
Zone 2	0 %	0 %	0 %	100 %

4.8.2. Évolution des herbiers à spartine alterniflore à la suite des travaux

Cette section présente les résultats obtenus de l'évolution des herbiers à spartine alterniflore sur les trois années étudiées. Il est possible de voir le détail de l'évolution des herbiers entre 2014 et 2015 à l'annexe 24 et entre 2015 et 2016 à l'annexe 25.

4.8.2.1. Zone 1

La figure 131 présente l'évolution de la superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 1 (entre les profils 8 et 2). En 2014, 65 % de la superficie des herbiers se trouvait devant les côtes naturelles et 35 % devant les plages artificielles. Après les travaux de 2014, seulement 17 % des herbiers étaient alors présents devant les plages naturelles. Malgré les craintes d'impacts négatifs indirects des enrochements sur les herbiers, des gains totaux de 145 m² ont été enregistrés entre 2014 et 2015. Entre 2015 et 2016, les herbiers devant les enrochements ont connu une augmentation de surface totale de 776 m² tandis que les herbiers devant les berges naturelles ont connu un gain de 214 m². Les enrochements n'ont pas eu d'impacts négatifs sur la croissance de ces plantes halophiles durant le suivi.

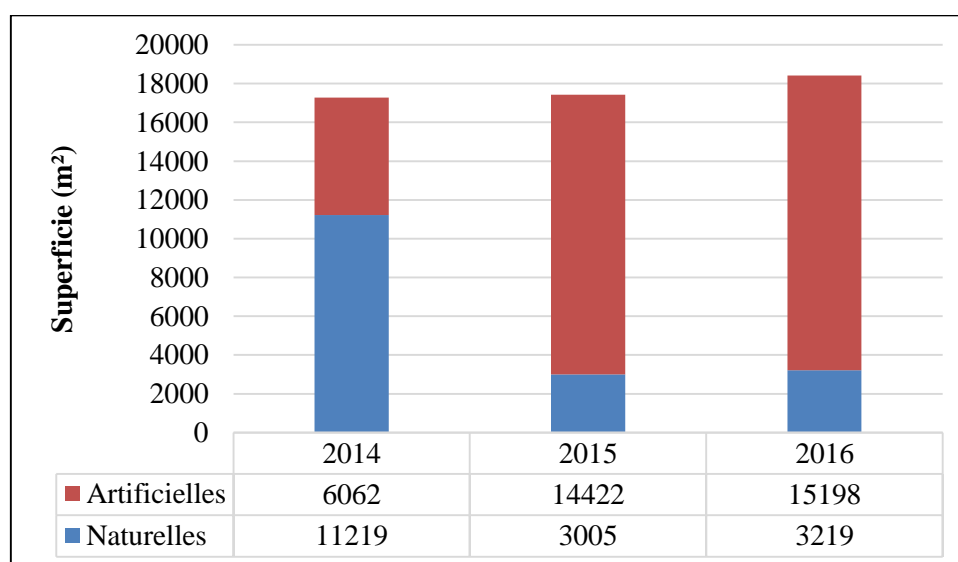


Figure 131. Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 1.

La figure 132 présente l'évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 1. La majorité des herbiers ont alors connu des gains individuels en superficie allant jusqu'à 20 % par rapport à l'état initial. L'herbier 4 est le seul avec une perte de superficie aussi importante alors qu'en 2014 elle était de 108 m² et qu'en 2015 elle est passée à 72 m². En somme, les gains les plus importants se sont produits sur les herbiers de petite à moyenne taille. Les grands herbiers comme le numéro 13 a connu une baisse de 1 %. Le deuxième plus étendu, le numéro 12, a eu une augmentation de 1 % par rapport à sa superficie initiale. Il semble que la présence d'enrochement n'ait pas eu d'impacts sur la croissance des herbiers, car il n'y a pas de patrons distincts sur l'augmentation et la diminution de la superficie entre les côtes naturelles et artificielles.

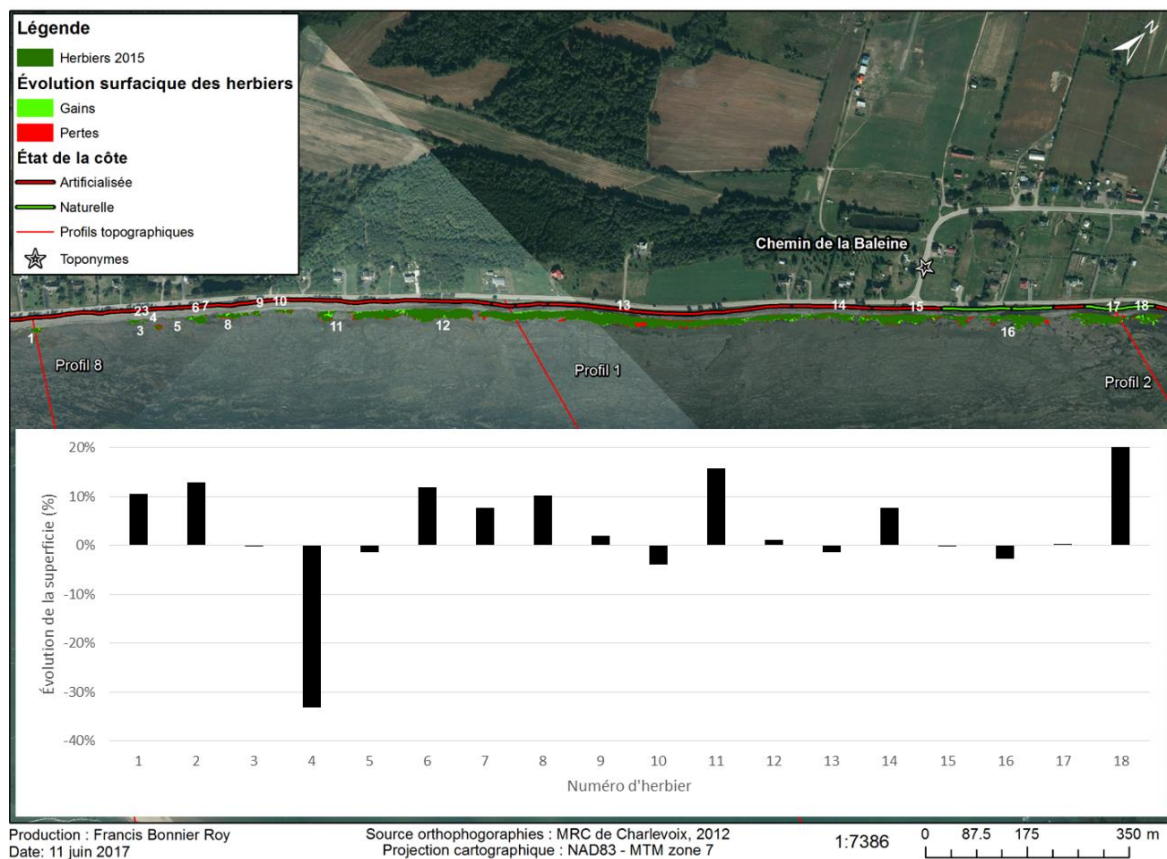


Figure 132. Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 1.

La figure 133 présente l'évolution des superficies des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 1. La grande majorité des herbiers de ce secteur a connu une hausse de superficie allant jusqu'à 34 % de la superficie de 2015. Encore une fois, les hausses les plus importantes sont associées aux herbiers de faible et moyenne taille, comme celles observées entre les herbiers 1 à 10. L'herbier 7 est le seul à avoir eu une baisse importante de sa superficie, qui passe de 11 m² à 5 m². Les augmentations de surface ont été plus importantes entre 2015 et 2016 qu'entre 2014 et 2015. Cela dit, les herbiers à spartine alterniflore en avant des ouvrages de ce secteur ne semblent pas être dérangés depuis l'implantation des ouvrages à l'automne 2014.

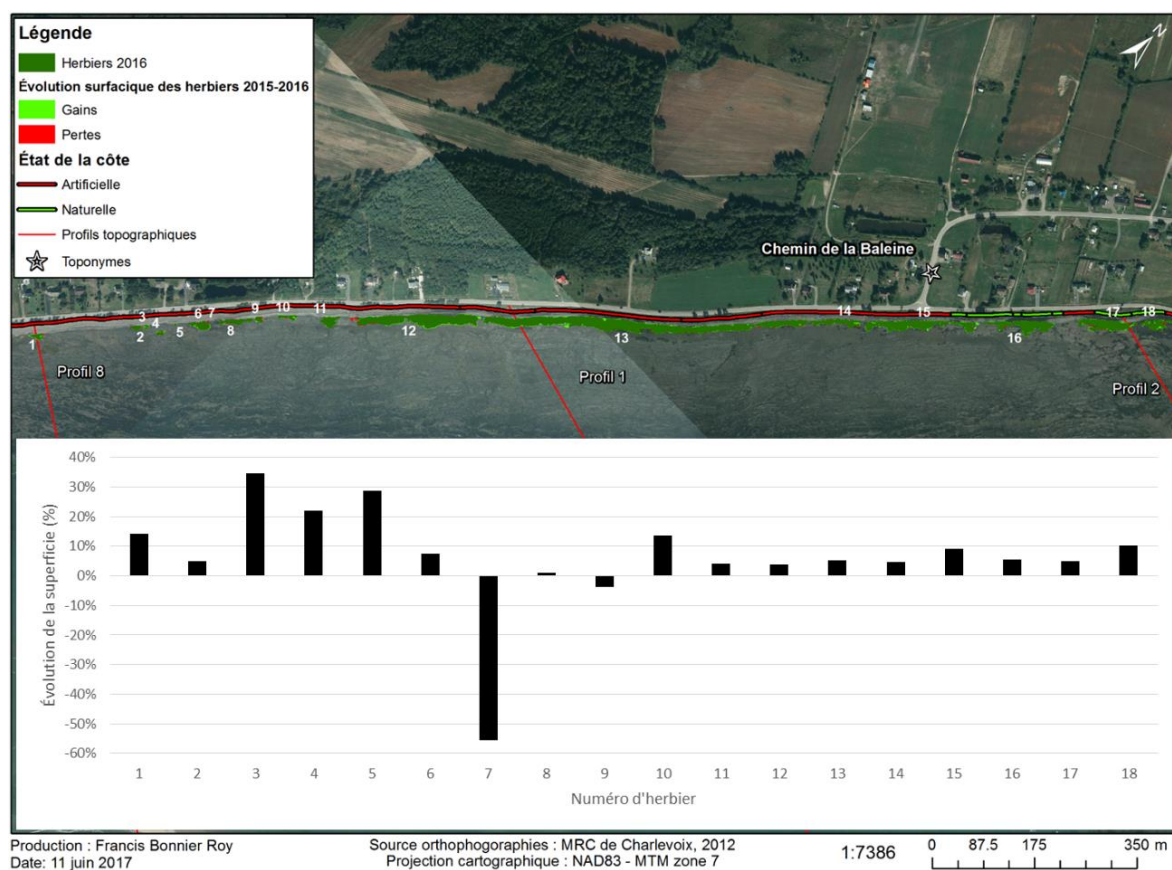


Figure 133. Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 1.

Sur cette zone, 50 % des herbiers se sont déplacés vers le nord-est avec une moyenne de déplacement du centroïde de 1,1 m (tableau 44). Ensuite, 28 % des herbiers de la zone se

sont déplacés vers le sud-ouest d'une distance moyenne de 0,7 m. Les deux autres directions sont négligeables à 11 % et des déplacements moyens plus faibles de 0,2 m et 0,5 m. La majorité des herbiers se déplacent donc vers le nord-est et le sud-ouest, soit parallèlement à la côte.

Tableau 44. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 1.

Direction du déplacement du centroïde	Pourcentage des herbiers déplacés	Moyenne du déplacement (m)
Nord-est	50 %	1,1
Nord-ouest	11 %	0,2
Sud-est	11 %	0,5
Sud-ouest	28 %	0,7

Entre 2015 et 2016, le nord-est est encore la direction de déplacement la plus importante des herbiers avec une moyenne de 0,9 m (tableau 45). Cette fois-ci, moins d'herbiers se sont déplacés vers le nord-ouest (vers la plage) ainsi que vers le sud-ouest tandis qu'une augmentation de 11 points a été décelée par rapport à l'année précédente dans la direction sud-est (vers le large). Il est intéressant de noter que les 2/3 des herbiers ont conservé le même sens de déplacement durant les trois années de suivi et que ce sont majoritairement les herbiers les plus volumineux qui gardent ce sens de déplacement. Les herbiers plus petits ont eu tendance à changer de direction de déplacement.

Tableau 45. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2015 et 2016 pour la zone 1.

Direction du déplacement du centroïde	Pourcentage des herbiers déplacés	Moyenne du déplacement (m)
Nord-est	50 %	0,9
Nord-ouest	6 %	0,5
Sud-est	22 %	0,4
Sud-ouest	22 %	0,9

La hauteur moyenne des plants des herbiers de la zone 1 a diminué de 21 cm entre 2014 et 2015 et est restée stable par la suite en 2016 (tableau 46). Ces résultats peuvent être

expliqués par des températures plus élevées en juin et juillet 2014 que durant les mêmes mois en 2015 et 2016 (tableaux des stations météorologiques de Charlevoix (MRC) et La Pocatière en annexes 26 et 27). Ainsi, la croissance des plants de spartine alterniflore a été davantage favorisée la première année du projet par des conditions climatiques plus chaudes. Le minimum est resté toutefois semblable avec une légère baisse de 10 cm notée en 2016. Le maximum était plus haut en 2014 avec 85 cm tandis qu'après les travaux sur ce secteur, le maximum n'a pu être atteint à nouveau.

Tableau 46. Hauteur moyenne des herbiers de spartine alterniflore de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.

Années	Hauteur moyenne (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)
2014	76	30	85
2015	55	30	70
2016	57	20	75

Le pourcentage de recouvrement a aussi été différent en 2015 alors que les herbiers dont le recouvrement s'élevait à 75 % et plus sont passés de 56 % de la zone 1 à 39 % en un an (tableau 47). Il y eut un gain sur les deux catégories inférieures de 11 points (recouvrement de 25 à 50%) et 5 points (recouvrement de 50 à 75%). Par la suite, en 2016, un retour à un état similaire à celui de 2014 est observé.

Tableau 47. Proportion d'herbiers à spartine alterniflore par pourcentage de recouvrement de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.

Années	0 à 25 %	25 à 50 %	50 à 75 %	75 % et plus
2014	0 %	6 %	39 %	56 %
2015	0 %	17 %	44 %	39 %
2016	6 %	6 %	39 %	50 %

4.8.2.2. Zone 2

La figure 134 présente l'évolution de la superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 2. En 2014, 61 % de la superficie des herbiers se trouvait devant des côtes naturelles alors que 39 % d'entre eux étaient devant les plages artificielles. En 2015, 63 % de la superficie des herbiers était devant des plages naturelles alors que les herbiers au-devant des berges artificielles avaient perdu 2 % de leur superficie. Une augmentation de la superficie des herbiers devant les plages naturelles fut remarquée en 2016 pour atteindre 64 %. En somme, cela représente des gains surfaciques de 273 m² enregistrés entre 2014 et 2016 devant les plages naturelles de ce secteur. Entre 2014 et 2016, les herbiers devant les enrochements ont connu une augmentation de surface totale de 58 m² malgré une légère baisse de 4 m² entre 2014 et 2015.

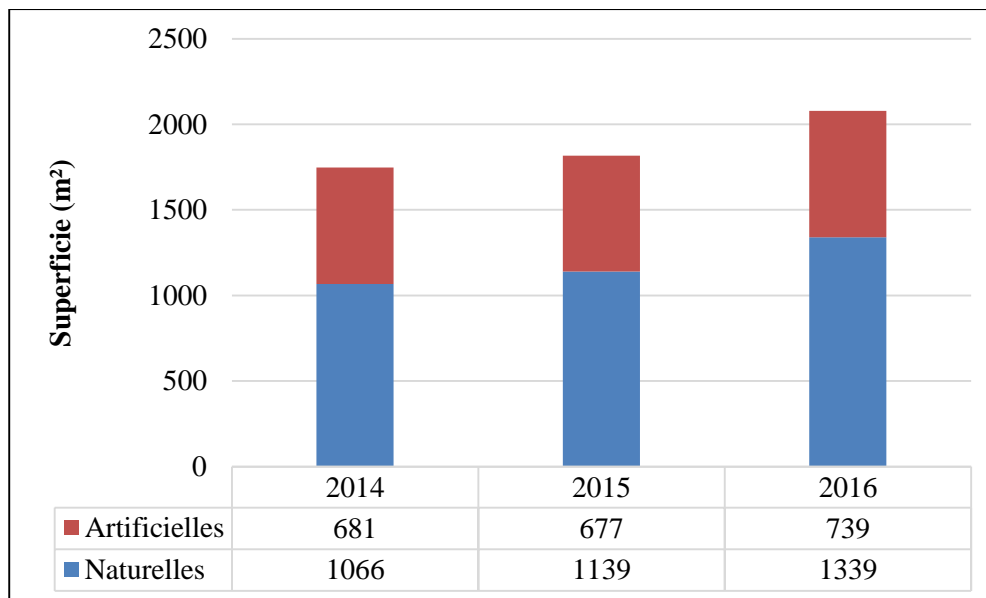


Figure 134. Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 2.

La figure 135 présente l'évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 2. La majorité des herbiers ont alors connu des gains individuels en superficie allant jusqu'à 20 % par rapport à l'état initial. Les herbiers 22, 28 et 29 sont ceux qui ont enregistré une perte de superficie allant de 10 à 32 % de la surface initiale respective. L'herbier 22 est

devant une berge naturelle tandis que les deux autres sont devant un enrochement. Bien que les herbiers 24 à 26 soient devant un secteur artificialisé, leur superficie a augmenté de 13 à 20 %. Ainsi, les gains et les pertes de surface ne semblent pas nécessairement associés à la présence d'un ouvrage de protection.



Figure 135. Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 2.

La figure 136 montre que l'ensemble des herbiers a connu une augmentation de superficie entre 2015 et 2016. La plus grande augmentation de surface s'est produite sur l'herbier 21, qui passe de 11 m² à 21 m². Les plus gros herbiers ont eu des augmentations plutôt modestes entre 10 et 18 points. Cette fois-ci, les pertes d'herbiers ont été plus que comblées par les gains, faisant en sorte que l'ensemble de la zone a connu un gain de surface de 261 m² en un an.



Figure 136. Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 2.

Il ne semble pas y avoir de patrons particuliers de déplacement des herbiers sur cette zone entre 2014 et 2015 (tableau 48). Aucun herbier ne s'est déplacé dans la direction sud-est. Les herbiers se sont déplacés relativement équitablement dans les trois autres directions avec près du tiers chacun. Par contre, le nord-est présente la plus grande moyenne de déplacement avec 1,3 m. Les deux autres directions ont eu des taux de déplacement plus petits avec 0,2 m et 0,4 m.

Tableau 48. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 2.

Direction du déplacement du centroïde	Pourcentage des herbiers déplacés	Moyenne du déplacement (m)
Nord-est	36 %	1,3
Nord-ouest	27 %	0,2
Sud-est	-	-
Sud-ouest	36 %	0,4

Le tableau 49 présente un déplacement différent pour 2015 à 2016 alors que le déplacement majoritaire des herbiers est vers le sud-ouest. C'est aussi la direction dont la moyenne est la plus élevée avec 1 m. La direction du déplacement vers le nord-est a présenté le même nombre d'herbiers, mais leur déplacement est plus faible (0,8 m). C'est aussi près des 2/3 des herbiers qui ont conservé le même sens de déplacement entre 2014 et 2016.

Tableau 49. Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2015 et 2016 pour la zone 2.

Direction du déplacement du centroïde	Pourcentage des herbiers déplacés	Moyenne du déplacement (m)
Nord-est	36 %	0,8
Nord-ouest	-	-
Sud-est	9 %	0,3
Sud-ouest	55 %	1,0

La hauteur moyenne des plants des herbiers de la zone 2 a diminué de 18 cm entre 2014 et 2015 et s'est rehaussée par la suite en 2016 (tableau 50). Cela peut s'expliquer par les mêmes conditions climatiques mentionnées précédemment. Le minimum a chuté de 10 cm, mais est retourné à l'état initial en 2016. Le maximum était plus grand en 2014 avec 100 cm, ce qui indique une baisse de 30 cm en 2015 tandis qu'à la dernière année du suivi, le maximum de référence a pu être atteint à nouveau.

Tableau 50. Hauteur moyenne des herbiers à spartine alterniflore de la zone 2 en août 2014, 2015 et 2016.

Années	Hauteur moyenne (cm)	Minimum (cm)	Maximum (cm)
2014	70	50	100
2015	52	40	70
2016	65	50	100

Le pourcentage de recouvrement est complètement différent en 2015 alors que 64 % des herbiers de la zone possèdent entre 50 à 75 points de pourcentage de recouvrement (tableau 51). À noter que 100 % des herbiers étaient recouverts à plus de 75 % en 2014. En 2016, 73 % des herbiers avaient un recouvrement de 75 % et plus, un pourcentage plus près de l'état de référence de 2014. C'est aussi la première fois qu'un herbier présente 25 à 50 % de recouvrement sur cette zone.

Tableau 51. Proportion d'herbiers à spartine alterniflore par pourcentage de recouvrement de la zone 2 en août 2014, 2015 et 2016.

Années	0 à 25 %	25 à 50 %	50 à 75 %	75 % et plus
2014	0 %	0 %	0 %	100 %
2015	0 %	0 %	64 %	36 %
2016	0 %	9 %	18 %	73 %

4.9. Climat de vagues et interactions avec les ouvrages de protection

Cette section s'inspire du rapport de Bonnier Roy *et al.* (2018) remis au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports du Québec.

4.9.1. Évaluation de la direction des vagues

Les résultats de la direction des vagues sont présentés à la figure 137 sous forme d'une spatialisation de la distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral du côté sud-est de l'île. L'ensemble de la distribution des hauteurs significatives et directions de vagues de l'ADV est disponible à l'annexe 28.

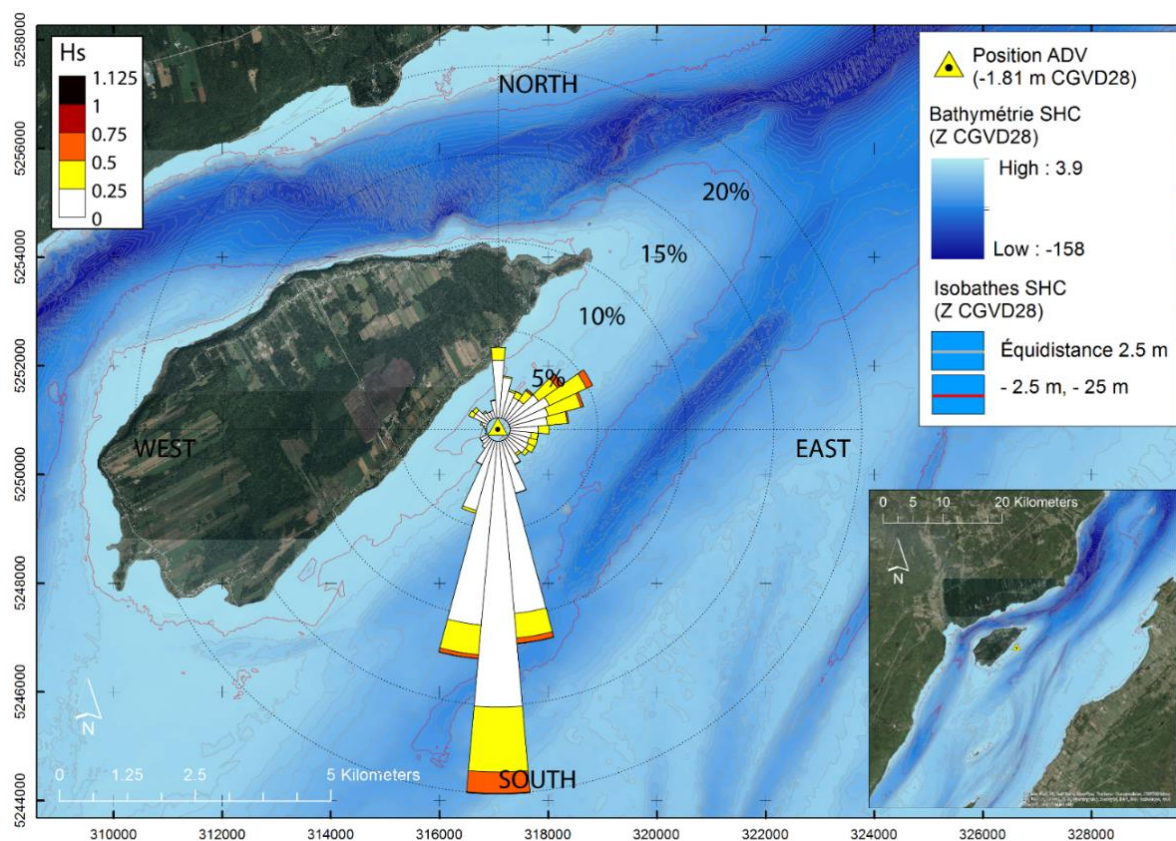


Figure 137. Distribution des hauteurs significatives en fonction de la direction des vagues sur le littoral du côté sud-est de l'île, mesurée à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015.

De l'ensemble des vagues mesurées par l'ADV (9204 occurrences totales), la majorité proviennent des secteurs sud (44 % des observations) et du secteur nord-est (19 % des observations), ce qui correspond aux deux distances de fetch les plus longues, situées dans l'axe de l'estuaire (tableau 52).

Les observations du secteur sud sont peu étalées directionnellement, elles sont distribuées sur 30° entre 165° et 195°. Les vagues du secteur nord-est sont beaucoup plus étalées ; elles sont distribuées sur 50°, entre 35° et 85°.

La distribution des hauteurs est dominée par les petites vagues : les occurrences de vagues inférieures à 0,25 m représentent 75% de la distribution, soient 1 963 heures et 20 minutes sur 2 617 heures mesurées. Ces vagues proviennent majoritairement du secteur sud, qui représente 35 % des occurrences de cette classe. Les vagues du secteur nord-est (35° à 85°) inférieures à 0,25 m ne représentent que 10 % des occurrences de la distribution.

Les occurrences de vagues de hauteurs significatives supérieures à 0,75 m représentent 0,14 % de la distribution totale, soit 3h et 40 minutes sur 2 617 heures mesurées. Neuf observations proviennent du secteur sud, 4 du secteur nord-est.

Les vagues provenant du nord-est sont moins fréquentes que celles du sud (19% contre 44 %), elles sont néanmoins plus élevées en moyenne : 0,25 m contre 0,18 m pour le sud.

Tableau 52. Comparaison des fréquences des classes de hauteurs significatives pour les vagues provenant des secteurs nord-est et sud.

Secteurs	Classes de hauteurs significatives (m)					Occurrence
	[0 - 0,25[	[0,25 - 0,5[	[0,5 - 0,75[	[0,75 - 1,0[	[1,0 - 1,125[
Nord-est (45°-85°)	56,92	37,74	5,14	0,21	0,00	1 542
Sud (175° - 195°)	80,45	15,40	3,92	0,20	0,02	4 052

En effet, la fréquence des vagues de hauteurs significatives inférieures à 0,25 m est plus élevée pour le secteur sud (80,45 %) que le secteur nord-est (56,92 %) tandis que la

fréquence des vagues de hauteurs significatives supérieures à 0,25 m est plus élevée pour le secteur nord-est (43 %) que pour le secteur sud (19,55 %).

Ainsi, il est possible d'affirmer que pour cette période, les vagues du secteur nord-est, bien que moins fréquentes que celles du secteur sud, sont en proportion plus hautes que celles provenant du sud. Néanmoins, en raison de la fréquence plus élevée des vagues du sud, le nombre d'occurrences de vagues supérieures à 0,25 m est quasiment égal pour les deux secteurs.

4.9.2. Évaluation des conditions de niveaux d'eau et de vagues sur le haut estran

Pour chaque profil hydrodynamique (profil 1 à 6), la climatologie conjointe de vagues et de niveaux d'eau mesurée par le capteur du haut estran des années 2014 (15 mai au 12 décembre), 2015 (4 mai au 15 décembre) et 2016 (4 mai au 13 décembre) est présentée au tableau 53. Il fournit les informations sur les moyennes, moyennes des 10% des valeurs les plus élevées, du 99^e percentile ainsi que les maxima des hauteurs significatives des ondes incidentes et niveaux d'eau sur l'ensemble de la période du projet.

Tableau 53. Moyennes et maximum des distributions de hauteurs significatives (Hm0) et de niveaux d'eau (d) enregistrés par le capteur du haut estran sur les profils hydrodynamiques 1 à 6.

Profils	Moyennes		Moyennes des 10% supérieurs		Moyennes du 99 ^e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
1 (artificiel)	0,02	2,42	0,13	2,84	0,26	3,12	0,47	3,83
2 (naturel)	0,03	2,46	0,16	2,87	0,34	3,08	0,51	3,83
3 (naturel)	0,01	2,50	0,07	2,84	0,15	3,12	0,32	3,85
4 (artificiel)	0,03	2,50	0,15	2,84	0,33	3,03	0,58	3,86
5 (artificiel)	0,01	2,60	0,06	2,86	0,16	2,95	0,29	3,89
6 (naturel)	0,02	2,63	0,13	2,90	0,42	3,06	1,02	3,88

Des graphiques présentant les données de hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par chaque capteur du haut estran durant les 3 ans de suivi sont disponibles aux annexes 29 à 46.

Ces résultats montrent qu'il y a peu de différences entre la hauteur significative des vagues et des niveaux d'eau sur le haut estran des profils 1 (artificiel) et 2 (naturel). Le profil 3 (naturel) présente des moyennes de hauteur significative de vagues et de niveaux d'eau moins importantes que sur les deux profils à l'ouest. Le profil 4 (artificiel) obtient des résultats similaires, voire supérieurs, aux profils 1 et 2. En effet, le haut estran de ce profil artificiel présente la hauteur significative de vague la plus forte enregistrée de la côte sud. Les profils 5 (artificiel) et 6 (naturel) de la côte nord-est ont obtenu des résultats sur le haut estran très différents malgré seulement une centaine de mètres qui les distance. Bien que leurs moyennes globales soient similaires, les moyennes des plus grandes hauteurs significatives de vagues et des niveaux d'eau enregistrées illustrent que les conditions hydrodynamiques sur le haut estran du profil 5 ont été moins importantes que celles sur le profil 6. Effectivement, le profil 6 est celui qui a enregistré les vagues les plus fortes sur l'ensemble des profils durant toute l'étude.

4.9.3. Évaluation des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut estran et les ouvrages de protection

Cette section présente les courbes de dépassement de l'enrochement ou la ligne de rivage des niveaux d'eau atteints sur auxquelles le *runup* (altitude maximale atteinte par le jet de rive des vagues sur la plage) a été calculé selon la relation empirique établie pour les côtes à plateforme rocheuse et haut estran sableux du Bas-Saint-Laurent (Lambert *et al.*, 2015). Cette formule intègre les données de hauteur de vagues incidentes, d'ondes longues et de niveaux d'eau mesurés au niveau du capteur situé à la flexure de chaque profil (capteur x.2), pour chaque pas de temps.

Il est important de noter que la distribution de ces courbes n'est pas linéaire puisque l'axe des heures est logarithmique. Ainsi, les hauteurs d'eau enregistrées et le *runup* calculé les plus élevés se produisent que quelques heures et sont donc situés à la droite de l'axe du temps. Ce faisant, lors de la lecture du graphique les évènements présentés sont très fréquents à gauche et deviennent de plus en plus rares vers la droite de l'axe. De plus, il est aussi

important de remarquer que les valeurs maximums obtenues ne sont pas toujours les moins fréquentes.

4.9.3.1. Profil 1 (artificiel)

Le profil 1 est positionné sur le secteur sud-ouest de l'île sur lequel un enrochement a été construit à l'automne 2014. Le pied de l'ouvrage est situé à +3,71 m d'altitude du niveau moyen des mers (CGVD28) et le capteur était situé à +1,3 m. La courbe de dépassement (figure 138) indique que la hauteur maximale atteinte par les vagues pendant la période de mesures a été de 4,4 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique (marée astronomique et surcote du plan d'eau) maximum de 3,83 m.

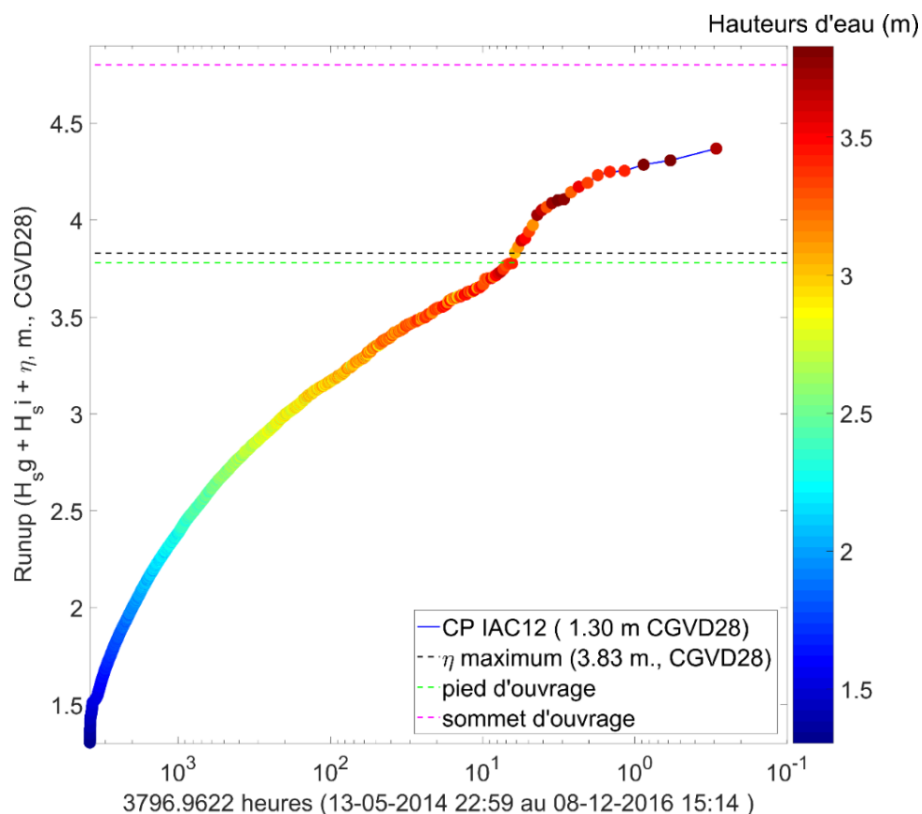


Figure 138. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut estran du profil 1 ($runup$ calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation du sommet de l'ouvrage sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique l'élévation du pied de l'ouvrage.

Le *runup* a atteint ou dépassé le pied de l'ouvrage (+ 3,71 m NMM) durant 5h40 pour une durée de mesure de 3 797 heures. Le niveau le plus haut atteint est situé 0,6 m au-dessus du pied de l'ouvrage. Cela indique que l'ouvrage étant positionné sur le sommet de la plage n'a été que quelques fois atteint par les vagues à cet endroit durant la période de mesures. Des impacts (effet de bout et réflexion de l'énergie des vagues, etc.) lors de ces interactions vagues-ouvrage au-devant du profil 1 ont potentiellement eu lieu, tel qu'un léger abaissement de profil au pied de l'ouvrage. Néanmoins, cela ne s'est produit que durant une période temps trop courte pour avoir des effets significatifs sur la morphosédimentologie de la plage et les herbiers à spartine alterniflore. Ainsi, les effets de cette interaction ont probablement été limités.

4.9.3.2. Profil 2 (naturel)

La courbe de dépassement (figure 139) indique que la hauteur maximale atteinte par les vagues est de 4,25 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3,83 m, non concomitant. Le *runup* n'a pas atteint le haut de plage situé à +4,31 m. Un constat intéressant à faire est que la limite du haut de plage est plus haute que celui du pied de l'ouvrage du profil 1. Puisque l'enrochement empiète sur le haut de plage, l'ouvrage est ainsi soumis aux plus hautes vagues qui atteignent la côte, contrairement au profil 2 naturel où le jet de rive n'atteint pas ou presque le début du haut de plage. Le haut de plage végétalisé agit comme une zone tampon naturelle en cas de déferlement de vagues de tempêtes exceptionnelles.

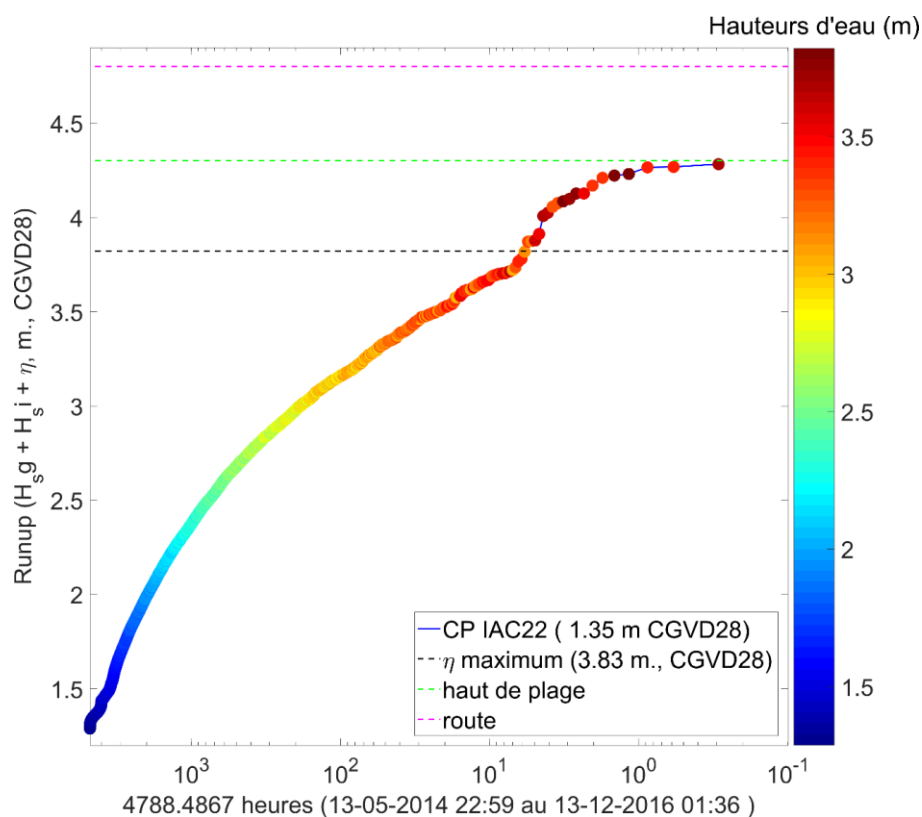


Figure 139. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 2 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation de la route sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique le début du haut de plage.

4.9.3.3. Profil 3 (naturel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 3 (figure 140) indique que la hauteur maximale atteinte par les vagues est de 4,46 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3,85 m, non concomitant. Le haut de plage étant positionné à une altitude légèrement plus basse (+4,2 m) que celui du profil 2, il a été atteint par les vagues du jet de rive durant 2h30 sur 5 232 heures d'immersion du capteur 3.2. Ce profil naturel présente toutefois des caractéristiques morphologiques similaires au profil naturel 2. Sa large zone tampon que constitue le haut de plage et l'arrière-

plage entre la route et la plage permet de déterminer que ce secteur est résilient aux assauts des vagues de tempêtes extrêmes.

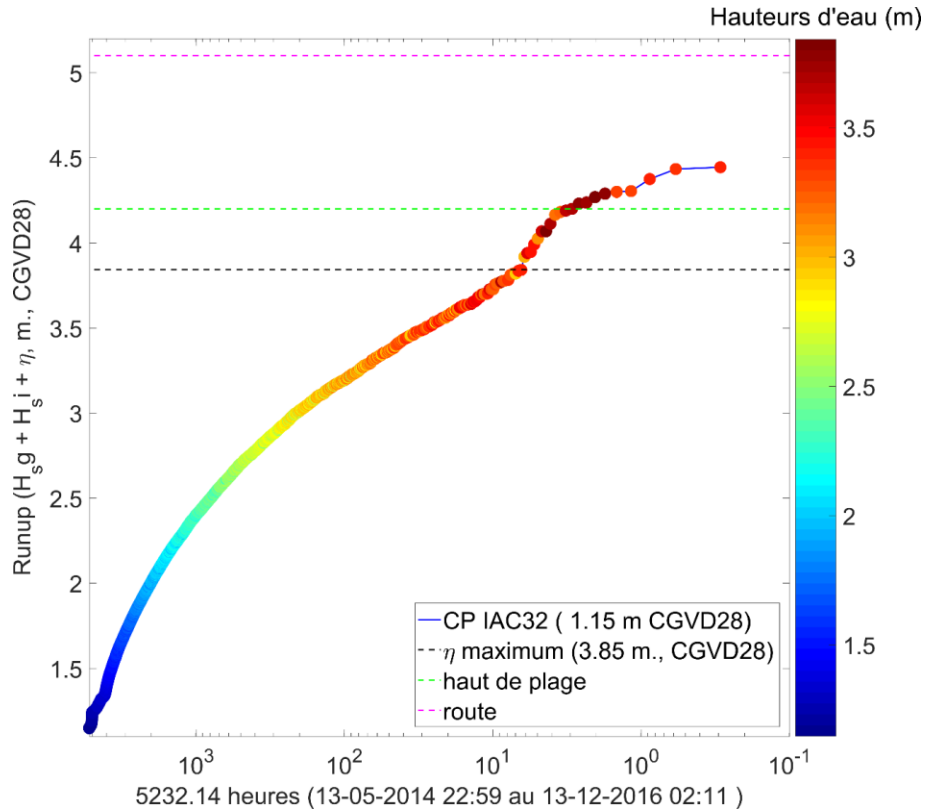


Figure 140. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 3 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation de la route sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique le début du haut de plage.

4.9.3.4. Profil 4 (déjà artificiel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 4 (figure 141) indique que la hauteur maximale atteinte par les vagues est de 4,64 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3,86 m, non concomitant. Le *runup* a atteint le pied du muret de soutènement de la route situé au sommet du haut estran sableux (+4,2 m) durant 3 h et 40 minutes sur 3 966 heures d'immersion du capteur 4.2. Le niveau de *runup* le plus élevé a dépassé le pied du muret de plus de 0,4 m. Cela indique que l'ouvrage

étant positionné sur le sommet de la plage, n'a été que peu de fois atteint par les vagues à cet endroit durant la période de mesures. Des impacts lors de ces interactions vagues-ouvrage au-devant du profil 4 ont potentiellement eu lieu, tel qu'un léger abaissement de profil au pied de l'ouvrage. Néanmoins, cela ne s'est produit que durant une trop courte période de temps pour avoir eu des effets significatifs sur la morphosédimentologie de la plage. La dérive littorale et l'apport par les sources sédimentaires des plages ont probablement été suffisants pour contrer ces effets et permettre une forme de résilience à cette plage artificialisée.

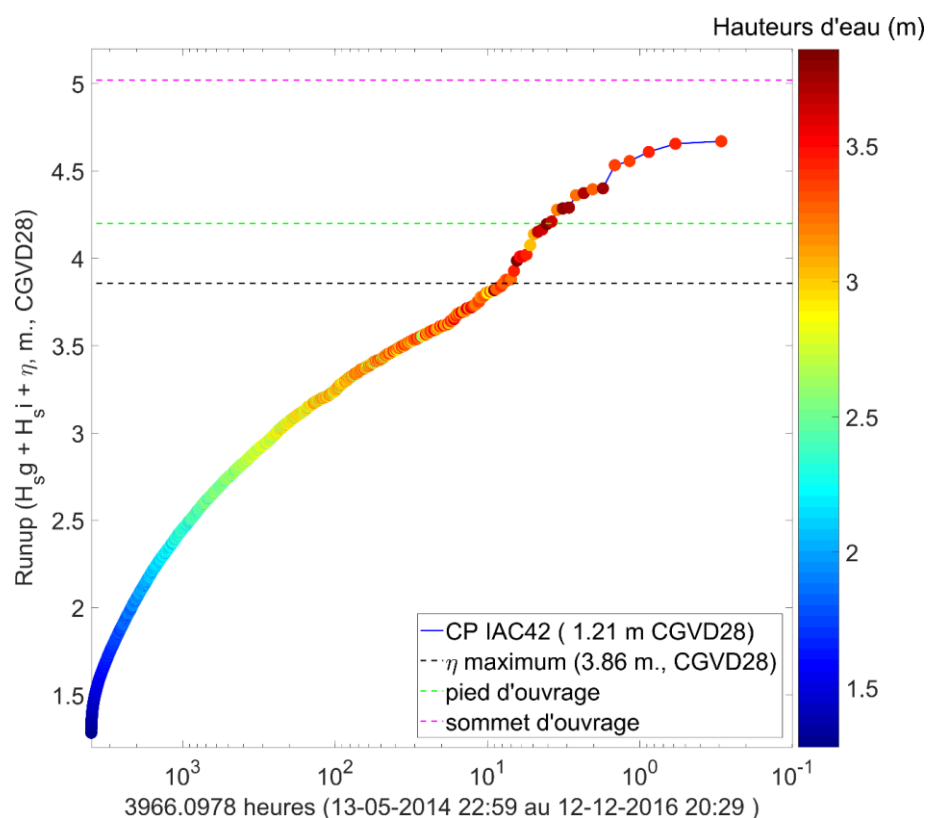


Figure 141. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 4 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation du sommet de l'ouvrage sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique l'élévation du pied de l'ouvrage.

4.9.3.5. Profil 5 (artificiel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 5 (figure 142) indique que la hauteur maximale atteinte par les vagues est de 4,72 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3,89 m, non-concomitant. Le *runup* a atteint le pied de l'enrochement qui protège la route positionnée sur la section supérieure du haut estran sableux (+ 3,5 m) durant 32h sur 4 480 heures d'immersion du capteur 5.2. Le niveau d'eau le plus élevé a dépassé le sommet de l'enrochement à plus de 0,10 m. Cela indique que ce profil artificialisé en novembre 2014 présente l'enrochement le plus souvent atteint par les vagues durant la période de mesures. Ces résultats ne sont pas surprenants, car le climat de vagues dans l'anse à Buttemont montre les hauts niveaux d'eau et les plus fortes vagues enregistrés pendant la période de mesures. Lors des travaux à cet endroit, les sédiments de la clé de l'enrochement ont été mis au-devant, utilisés comme une recharge sédimentaire. Pendant les 32 h où le jet de rive a été en contact avec cette recharge au niveau altimétrique de l'enrochement, cela a permis aux vagues de remanier les sédiments sur l'ensemble du profil et vers le large. C'est pourquoi une partie des sédiments a été retrouvée en bas de la plage élargissant ainsi le profil (section 4.5. Évolution verticale et horizontale récente des plages). Durant la période d'étude, la recharge a permis de contrer les effets négatifs de l'interaction vague-ouvrage. Toutefois, si les apports naturels en sédiments ne sont pas suffisants et lorsque les vagues auront déplacé l'ensemble des sédiments de la recharge, l'ouvrage de protection sera en contact direct avec les vagues de tempêtes. Cela serait néfaste pour la morphosédimentologie de la plage si les niveaux d'eau atteignaient plus souvent l'enrochement.

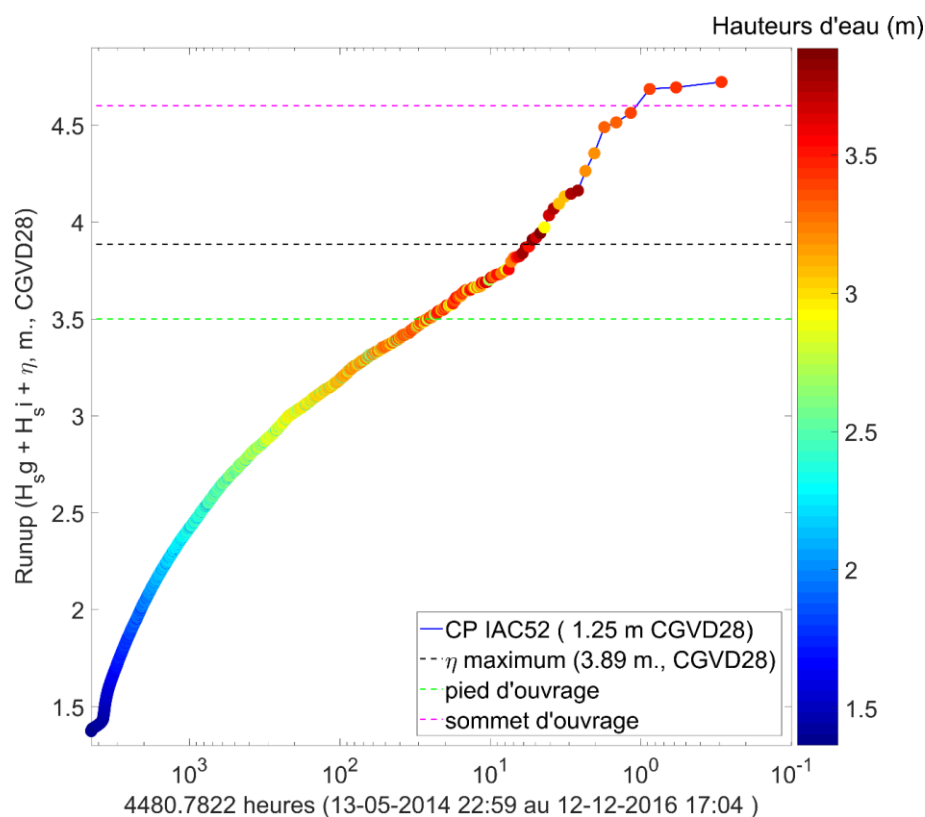


Figure 142. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 5 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation du sommet de l'ouvrage sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique l'élévation du pied de l'ouvrage.

4.9.3.6. Profil 6 (naturel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 6 (figure 143) indique que la hauteur maximale atteinte par les vagues est de 4,5 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3,88 m, non concomitant. Les calculs montrent que le *runup* a quasiment atteint la ligne de rivage sur le haut de plage, située en amont du sommet de l'estran (+ 4,6 m). Les observations de laisses de tempête faites sur place montrent un épandage de débris sur l'arrière-plage, jusqu'à une distance de trois mètres en amont du sommet de l'estran. Quelques événements de houle de tempête ont donc dépassé la limite calculée, néanmoins, compte tenu de l'absence de pente de l'arrière-plage, la faible

extension de la zone submergée suggère une tranche d'eau relativement mince. Il est possible que le *runup* associé au jet de rive des vagues les plus fortes ait dépassé nos estimations de 0,1 à 0,3 m. De plus, un constat important à faire est que la limite du haut de plage sur ce profil naturel est à la même altitude que la route derrière le profil 5. Ceci étant dit, ce secteur de l'anse à Buttemont est légèrement plus élevé et semble plus résilient aux assauts des vagues les plus importantes enregistrées. L'arrière-plage est large de plusieurs mètres avant de rejoindre la route. Le haut de plage végétalisé délimite bien la pleine mer supérieure de grande marée.

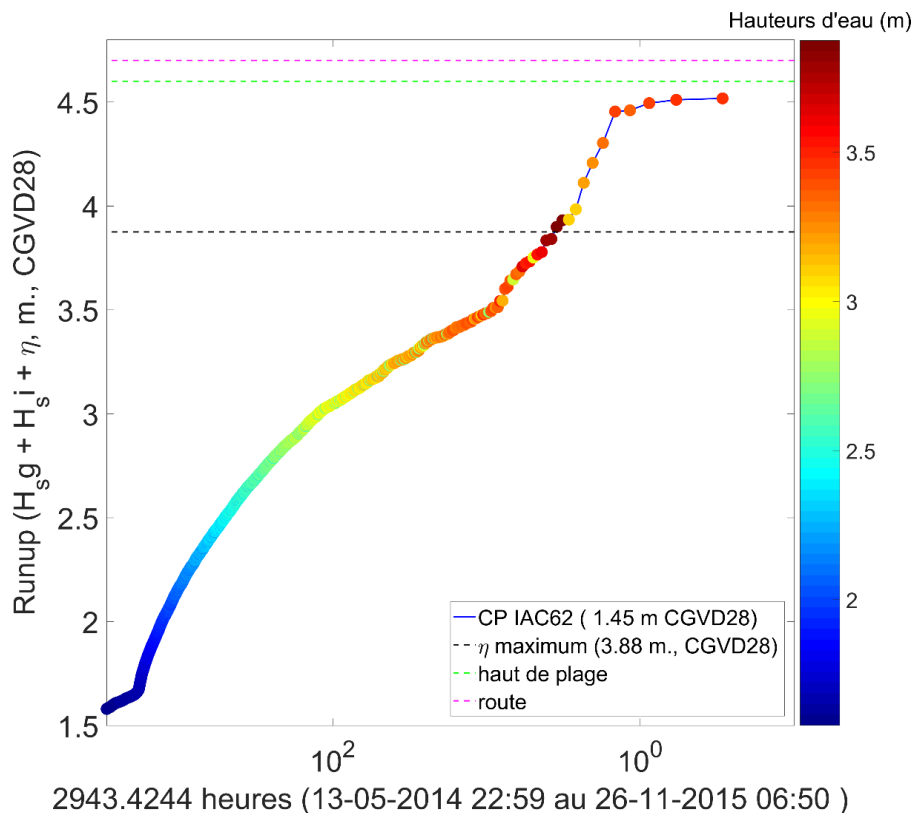


Figure 143. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues gravitaires sur le haut-estran du profil 6 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité. La ligne pointillée rose indique l'élévation de la route sur le profil, la ligne pointillée noire indique le niveau d'eau statique maximum atteint et la ligne pointillée verte indique le début du haut de plage.

4.10. Minéralogie

La figure 144 montre la consistance des échantillons à l'intérieur des trois groupes obtenus par l'analyse par clusters. La largeur moyenne des silhouettes de 0,4 indique que chaque groupe de clusters d'échantillons distincts est bien représenté. La silhouette permet d'indiquer si les échantillons sont bien appariés entre eux dans un même groupe. La silhouette varie entre -1 (non appariés) et 1 (parfaitement appariés).

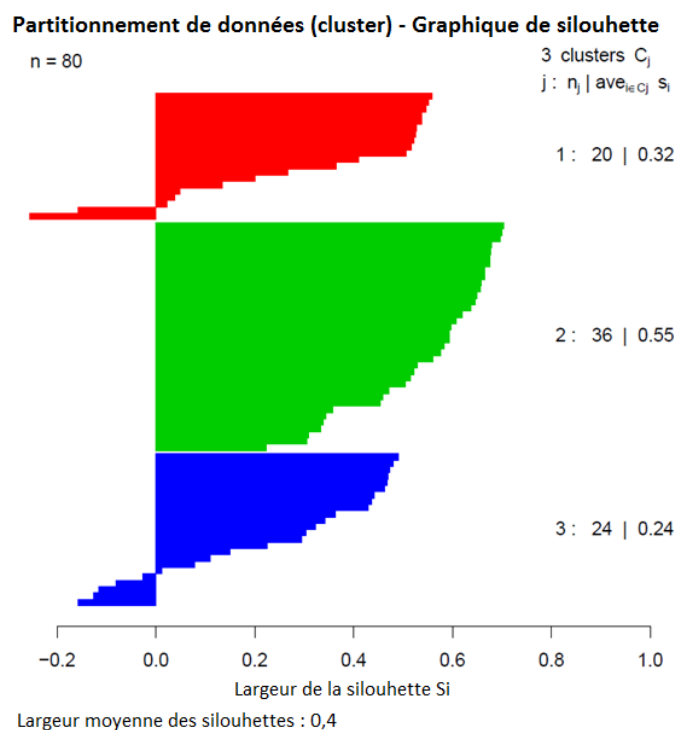


Figure 144. Silhouette des groupes d'échantillons en fonction de la composition minéralogique.

Deux échantillons dans le premier regroupement et cinq dans le troisième regroupement ont une silhouette négative (figure 144). Cela indique que ces échantillons ont une composition légèrement différente que celle des échantillons de ces groupes. Si le nombre de regroupements avait été doublé à 6, ils auraient fait partie de regroupements distincts avec une meilleure silhouette. Cependant, un choix de trois groupes a été retenu puisque la généralisation à trois groupes est suffisante et convient à l'explication de l'origine

de la composition minérale, soit des Appalaches, du Bouclier canadien ou un mélange des deux. En conséquence, ces sept échantillons ont été attribués dans ces regroupements, car c'est avec ces derniers qu'ils ont la meilleure ressemblance minéralogique.

La figure 145 présente les analyses en composantes principales permettant de déterminer les relations entre les quatre minéraux les plus susceptibles d'être utilisés afin de différencier les échantillons entre eux et trouver des correspondances avec les sources sédimentaires potentielles. Les feldspaths potassiques (feldspath-K), les plagioclases et les phyllosilicates sont les trois catégories de minéraux qui ont obtenu les corrélations les plus fortes entre elles.

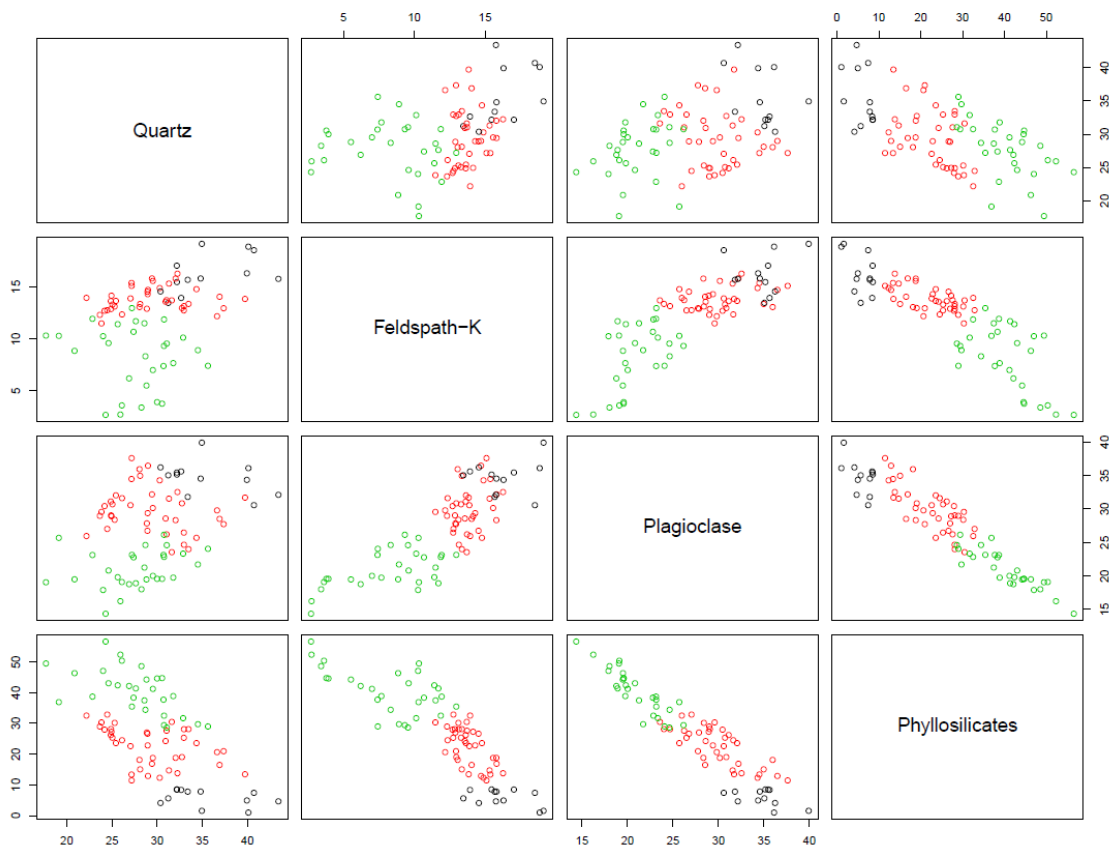


Figure 145. Graphique montrant la relation entre les concentrations (%) de quartz, de feldspath potassique, de plagioclase et de phyllosilicate pour les différents clusters. Cercle noir (cluster 1), cercle rouge (cluster 2) et cercle vert (cluster 3).

À la figure 146, le diagramme ternaire montre les groupes d'échantillons obtenus par *clusters* organisés en fonction des feldspaths potassiques, plagioclases et phyllosilicates sur les axes des composantes principales 1 et 2. Cette figure montre que les trois groupes distincts obtenus par les clusters peuvent être expliqués par un mélange entre phyllosilicates et feldspaths (composante principale 1). Il est possible de voir que la composante principale 1 explique bien la discrimination des trois groupes. En effet, la concentration en phyllosilicates *versus* celle du feldspath-K et de plagioclase permet de trier les résultats des échantillons en deux groupes d'origine distincte et un groupe de mélange.

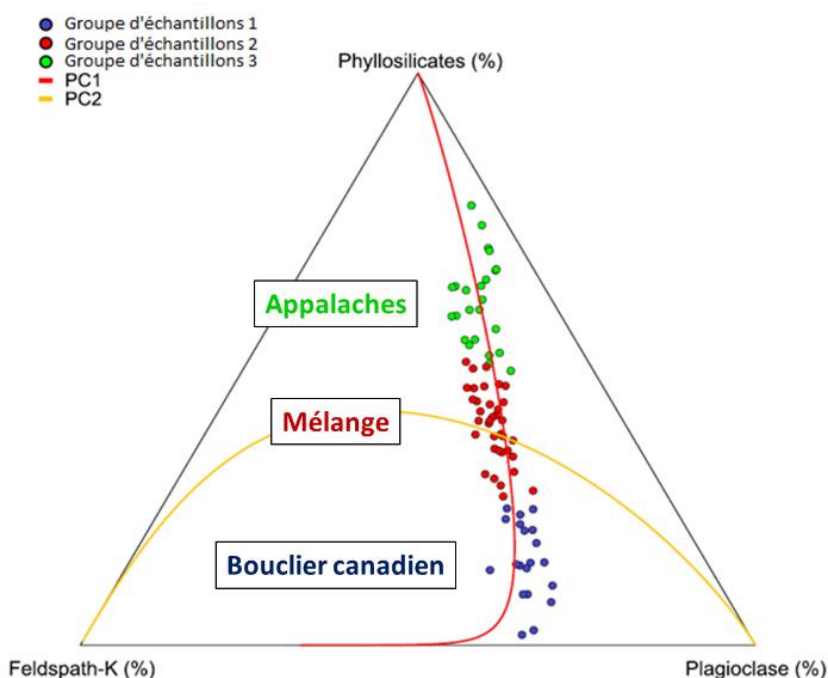


Figure 146. Diagramme ternaire des groupes d'échantillons en fonction des minéraux choisis pour discriminer leur origine sédimentaire. Les courbes correspondent aux analyses en composante principale des trois concentrations de minéraux (phyllosilicates, feldspath-K et plagioclase).

Des échantillons d'alluvions de rivière dont le bassin versant se trouve soit dans le Bouclier canadien, soit dans les Appalaches ont été utilisés pour identifier les sources sédimentaires des échantillons récoltés sur la zone intertidale de l'île. Ces échantillons d'alluvions ont été comparés avec les échantillons potentiellement similaires récoltés sur l'île

aux Coudres (tableau 54). Les échantillons du cordon de basse mer ont une concordance quasi parfaite avec les échantillons des rivières du Bouclier canadien alors que les échantillons du bas estran (BE), sur la plateforme rocheuse (AFFroc) et à la pointe est (PTE) sont identiques en termes de minéralogie aux sédiments de rivières des Appalaches.

Cette étape est nécessaire pour valider la concordance minérale entre les alluvions dont l'origine géologique est connue et les sources sédimentaires potentielles des plages de l'île aux Coudres.

Tableau 54. Similarité de la composition minéralogique entre les échantillons de sources potentielles de l'île aux Coudres et les échantillons de rivière du Bouclier canadien (BC) et des Appalaches (AP).

Nom de l'échantillon	Source 1 (BC)	Source 2 (AP)	Total	Qualité de l'ajustement
P8-CORDON	1,000	0,000	1,0	0,18
P1-CORDON-A14	1,000	0,000	1,0	0,09
P2-CORDON-A14	0,952	0,063	1,0	0,20
CORDON-05-A14	0,984	0,069	1,1	0,14
P3-CORDON(2)-M15	0,889	0,111	1,0	0,02
P4-CORDON-M16	1,000	0,130	1,1	0,19
PTE-5	0,101	1,000	1,1	0,22
P2-BE3-A16	0,100	1,000	1,1	0,38
P1-BE3-A16	0,085	1,000	1,1	0,46
AFFroc-3	0,073	1,000	1,1	0,30
P5-BE1-A15	0,017	1,000	1,0	0,31

La figure 147 présente sur une carte les ratios moyens $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ obtenus pour l'ensemble des échantillons de l'île (sédiments meubles et roc). Des cartes détaillées sont disponibles aux annexes 47 et 48.

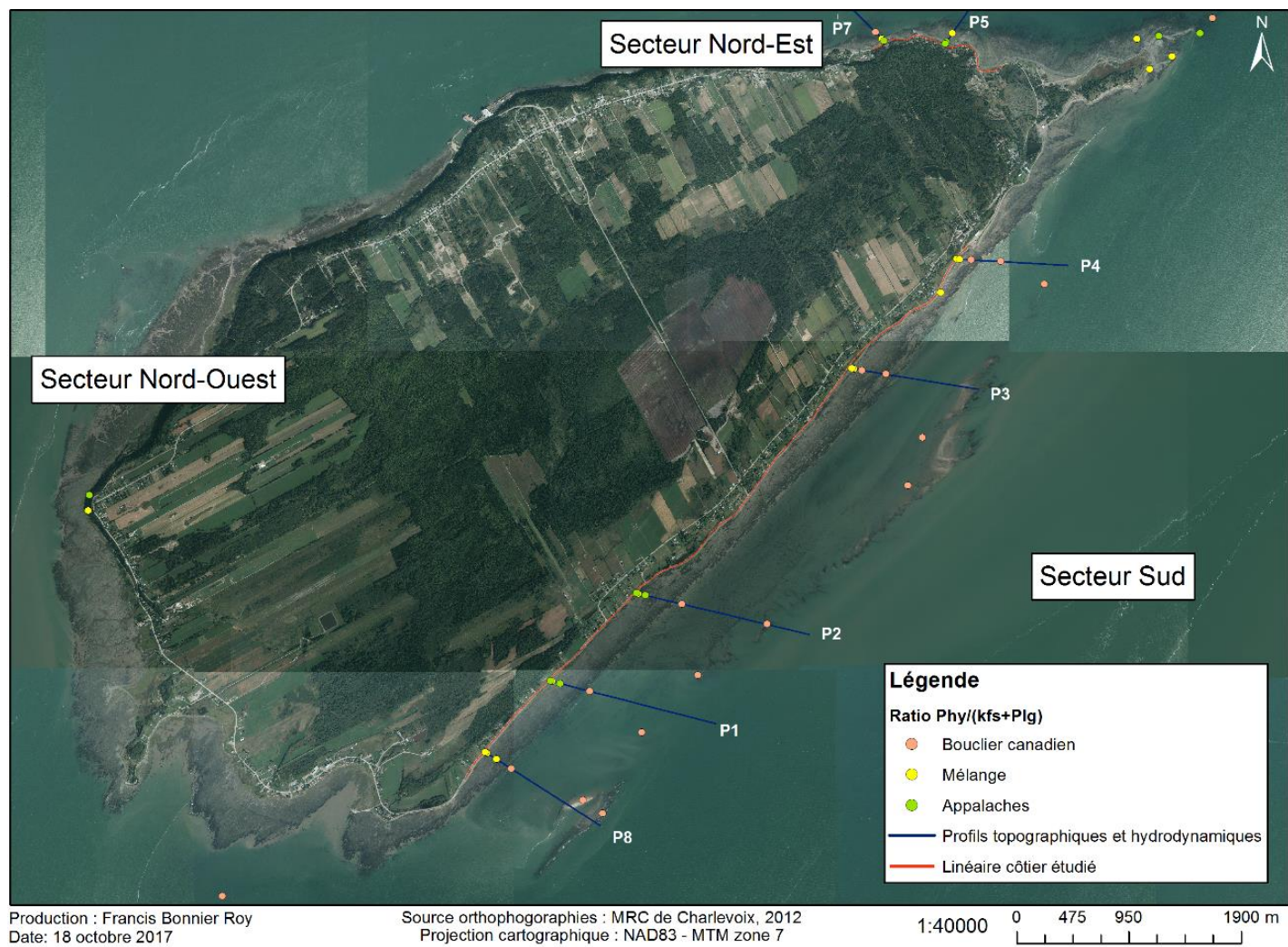


Figure 147. Ratios $Phy/(Kfs+Plg)$ des échantillons de sédiments meubles et de roc de l'ensemble de l'île.

Sur le tableau 55, la moyenne des ratios $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ des échantillons est présentée pour l'ensemble des emplacements de l'île.

Tableau 55. Moyenne des ratios $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ des échantillons selon sa position sur l'île. La couleur orange indique une origine du Bouclier canadien, en vert une origine des Appalaches et en jaune un mélange des deux.

Moyenne des ratios $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$						
Position	Emplacement des échantillons					Type d'échantillon
	Nord-est	Pointe Est	Falaise du nord-ouest	Pointe ouest	Sud	
Sources potentielles						
Cordon de basse mer					0,08	Sédiments meubles
Cordon de basse mer					0,29	Roches
Falaise rocheuse			1,43			Roc
Grand Pilier					0,37	Roc
Pointe Est		0,94				Sédiments meubles
Pointe ouest				0,17		Sédiments meubles
Plateforme rocheuse					0,80	Roc
Échantillons sédimentaires						
Plage (Haut estran 1)	1,96				0,96	Sédiments meubles
Plateforme rocheuse (Bas estran 1 et 3)	1,01				0,71	Sédiments meubles
Zone sablo-vaseuse (Bas estran 4 et 5)					0,27	Sédiments meubles

Les ratios des échantillons des sédiments meubles et des roches du cordon de basse mer prouvent que la source sédimentaire de cette forme au large provient du Bouclier canadien. Le cordon de basse mer est formé de sédiments reliques datant vraisemblablement du Quaternaire. En effet, des coupes stratigraphiques réalisées sur l'île aux Coudres révèlent l'existence de dépôts glaciaires hétérométriques principalement d'origine précambrienne

(Brodeur *et al.*, 1985). Mentionnons aussi sur la côte dans Charlevoix, la présence de grandes battures formées de blocs et galets glaciaires résiduels dégagés par l'érosion (Dionne et Poitras, 1996).

Le roc de la falaise à nue au nord-ouest de l'île est d'origine sédimentaire, soit des Appalaches. Cela concorde avec la genèse de l'île composée de deux séquences de roches détritiques cambro-ordoviciennes (≈ 500 Ma) (Brodeur et Allard, 1985).

En ce qui concerne les résultats des concentrations en minéraux des fragments de roches analysés (Grand Pilier et de la plateforme rocheuse au sud), la méthode utilisée de ratio $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ atteint des limites puisque les sources ne correspondent pas à ce qui était pressenti (origine appalachienne) (tableau 55). Afin d'obtenir des résultats davantage précis, il serait possible de faire d'autres analyses complémentaires que ce soit la composition élémentaire (Pratte *et al.*, 2017) ou isotopique (ex., isotopes du Nd et Sr; Farmer *et al.*, 2003) afin d'affiner la précision des résultats.

Les échantillons de sédiments meubles de la pointe est ont un ratio moyen de 0,94, ce qui indique un mélange des deux formations, mais avec une concentration de minéraux plus près de ceux retrouvés dans les échantillons d'origine appalachienne. L'échantillon de la pointe ouest est cependant similaire à ce qui est retrouvé sur le cordon de basse mer, soit associé au Bouclier canadien.

La minéralogie des plages de la côte sud est organisée selon un patron ouest-est particulier. À l'ouest, au niveau du profil 8, la minéralogie de la plage est plutôt constituée d'un mélange des deux formations géologiques avec un ratio moyen de 0,81. Plus au centre, aux profils 1 et 2, les deux ratios moyens sont similaires avec 1,38 et 1,30 respectivement, ce qui indique une composition minérale appalachienne. Vers l'est, les profils 3 et 4 présentent un ratio moyen similaire à ce qui a été observé au profil 8, soit 0,8 et 0,51 (mélange Bouclier canadien et Appalaches). Ainsi, il semble qu'aux extrémités est et ouest de la côte sud de l'île, des apports sédimentaires provenant du cordon de basse mer mélangé à des sédiments issus de l'érosion de la plateforme rocheuse constituent le stock sédimentaire des plages.

L'érosion de la terrasse de plage (terrasse Mitis) constitue probablement un des stocks sédimentaires historiquement viables pour l'édification de la plage.

Les échantillons de sédiments meubles de la plateforme rocheuse confirment cette hypothèse. En effet, si l'érosion de la plateforme rocheuse qui génère des sédiments composés de minéraux typiques des Appalaches était la seule source de sédiments meubles à cet endroit, cela se refléterait dans les résultats obtenus. Or, aux profils 8, 3 et 4 (minéralogie similaire sur la plage), les ratios des échantillons de sédiments récoltés sur la plateforme rocheuse montrent une origine mixte (P8) et du Bouclier canadien (P3 et P4). Les profils 1 et 2 qui étaient différents dans la composition des plages le sont aussi dans la minéralogie des échantillons sur la plateforme rocheuse, toujours d'origine sédimentaire (Appalaches). La zone sablo-vaseuse, située entre la plateforme rocheuse et le cordon de basse mer appuie ce constat, avec un ratio moyen de 0,27. Ainsi, les vagues les plus hautes, provenant du sud-ouest et du nord-est, transportent les sédiments du cordon de basse mer vers les plages, en déposant des sédiments sur la zone de transition, soit la plateforme rocheuse et la zone de faible pente sablo-vaseuse.

Les plages au nord-est de l'île sont uniquement composées de sédiments provenant des formations des Appalaches avec un ratio moyen de 1,96. Cela indique que la source sédimentaire actuelle des plages provient de l'érosion de la plateforme rocheuse de l'estran, comme le montre le ratio des sédiments meubles à cet endroit. L'érosion de la terrasse de plage (terrasse Mitis composée de sables et graviers littoraux) est aussi une source en sédiments. Toutefois, l'érosion de la microfalaise lors des événements de tempête importants génère des apports sédimentaires faibles aux plages (Brodeur et Allard, 1983).

La figure 148 présente la variabilité interannuelle et saisonnière de la composition minérale des échantillons de la plage en fonction de leur degré d'appartenance (%) à la source minéralogique du Bouclier canadien issu des ressemblances statistiques de la composition minéralogique. Ainsi, plus l'échantillon est près de 100% plus son origine est entièrement

associée au Boulier canadien. Plus il est près de 0% plus il est associé à une source appalachienne.

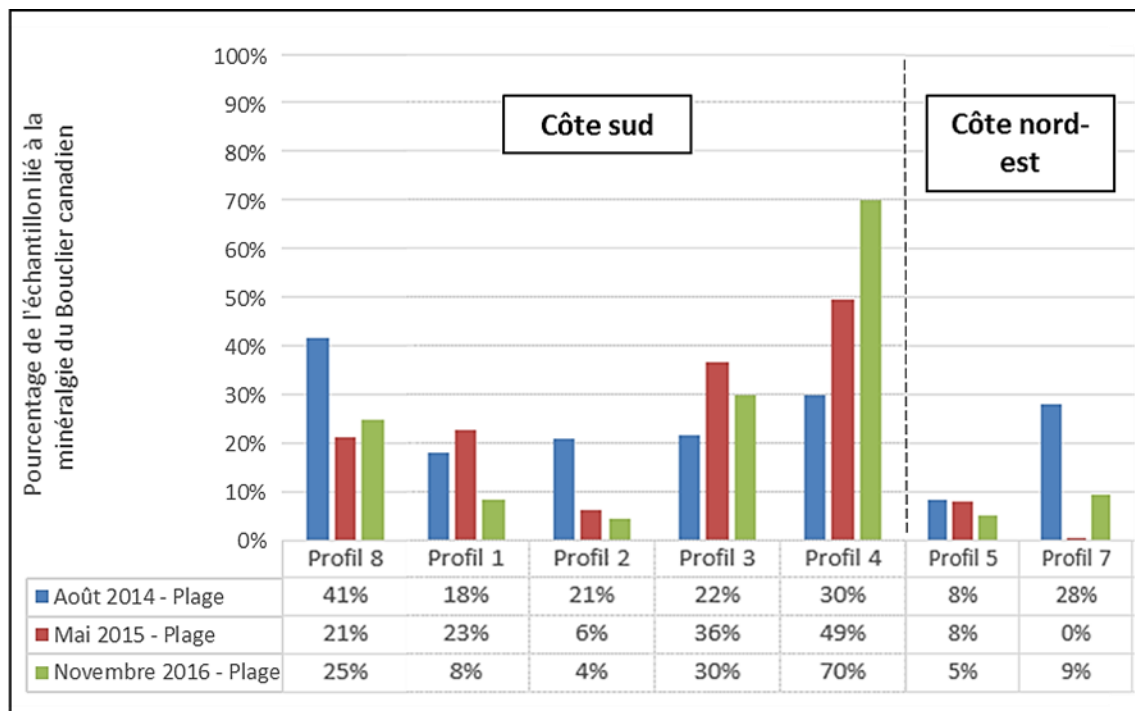


Figure 148. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Boulier canadien de la plage pour chaque échantillon sur les profils durant les campagnes d'échantillonnage août 2014, mai 2015 et novembre 2016.

La plage des profils 1 et 2 sur la côte sud présente une faible similitude avec le Boulier canadien, étant plutôt associée à la formation des Appalaches. Les sédiments de la plage des profils 3, 4 et 8 ont une connexion plus forte avec le Boulier canadien, mais cette proportion reste toutefois inférieure à 41 % (mélange), sauf pour le profil 4 où une connexion sédimentaire avec le cordon de basse mer semble être la cause d'un apparemment plus grand entre août 2014 et novembre 2016 avec le Boulier canadien. Au nord-est de l'île, la majorité des échantillons sont d'origine appalachienne alors que les pourcentages d'association à la minéralogie du Boulier canadien n'affichent que 28 % au plus fort, soit au profil 7. Ainsi, il est possible d'avoir de grandes variations pour un même endroit d'échantillonnage de saison en saison (40 points pour le profil 4, 28 pour le profil 7 particulièrement), ce qui indique que

les apports des sources sédimentaires varient dans le temps et l'espace, probablement en fonction des cycles interannuels et des courants marins.

La figure 149 montre la correspondance minérale entre les sédiments meubles récoltés sur la plateforme rocheuse à proximité des profils entre novembre 2014 et août 2016 et la minéralogie du Bouclier canadien.

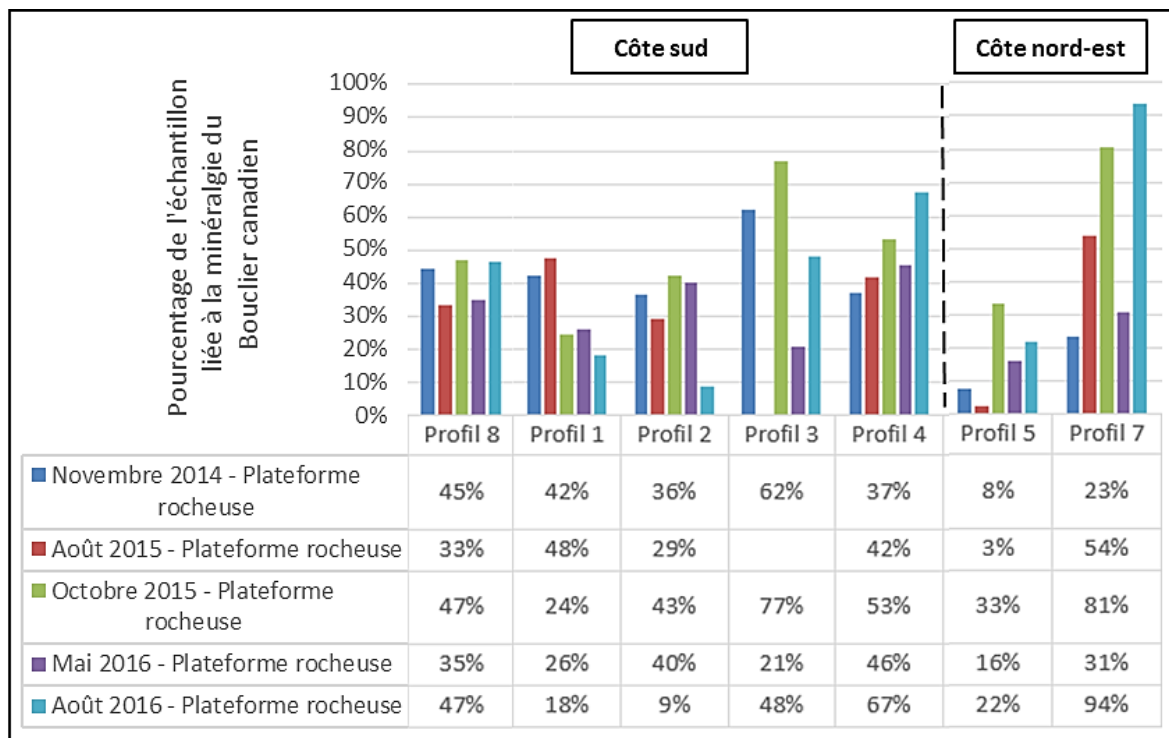


Figure 149. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la plateforme rocheuse pour chaque profil sur les périodes d'échantillonnage de novembre 2014, août 2015, octobre 2015, mai 2016 et août 2016.

L'ensemble de la zone de plateforme rocheuse présente une variabilité entre les profils, mais aussi parfois sur le même profil de saison en saison. Sur les profils 1 et 2, c'est entre 9 % et 48 % de la minéralogie des sédiments de la plateforme rocheuse qui sont associés au Bouclier canadien. Sur le profil 3, ces valeurs sont plus élevées pour novembre 2014 et octobre 2015 avec 62 % et 77 % de la minéralogie associée au Bouclier canadien. En mai 2016, les échantillons de ce profil sur la plateforme rocheuse sont plutôt proches de la

minéralogie des Appalaches avec 21 % alors qu'en août 2016, 48 % de l'échantillon est associé au Bouclier canadien. Au profil 4, la correspondance est plus stable entre 37 % et 67 % de l'échantillon associé à la minéralogie du Bouclier canadien. Au profil 5, la correspondance des échantillons est faible et alors plutôt près de la formation des Appalaches que du Bouclier canadien. Au niveau du profil 7, une grande variabilité est visible avec des valeurs entre 23 % et 94 %, indiquant que des dépôts de matériel provenant du Bouclier canadien se trouvent sur le bas estran dans l'anse à Mailloux et qu'ils se déplacent en fonction des courants locaux. Sur le profil 8, les échantillons de la plateforme rocheuse montrent une plus grande stabilité dans la correspondance avec le Bouclier canadien, soit entre 33 % et 47 %.

La figure 150 présente le pourcentage des échantillons sur la zone sablo-vaseuse associé à la minéralogie du Bouclier canadien.

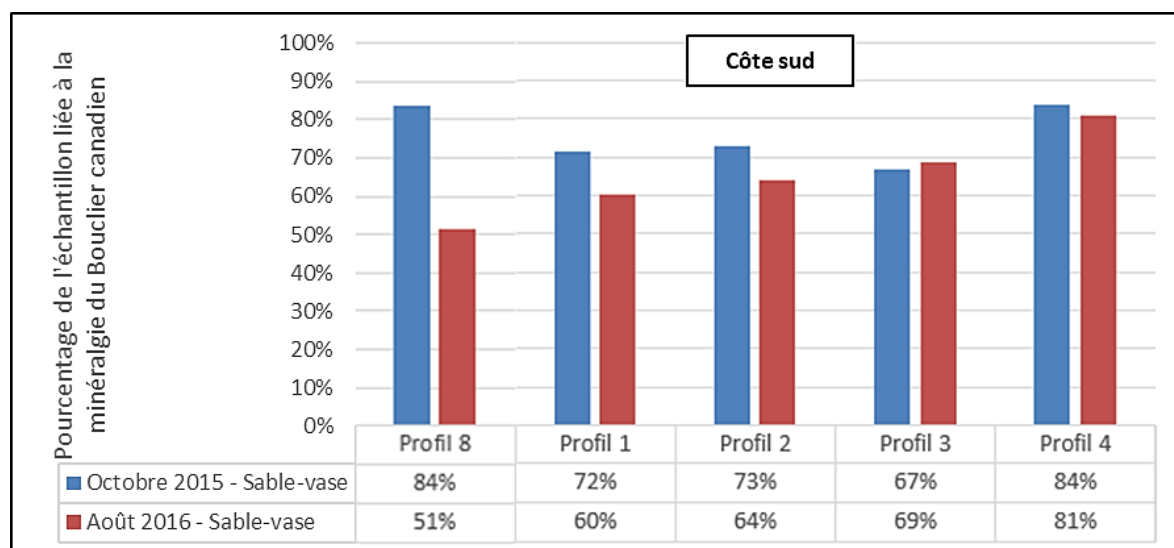


Figure 150. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la zone sablo-vaseuse située entre la plateforme rocheuse et le cordon de basse mer pour chaque profil de la côte sud sur les périodes d'échantillonnage d'octobre 2015 et août 2016.

L'ensemble des profils montre qu'une grande proportion des échantillons de cette zone est minéralogiquement proche du Bouclier canadien. Seul le profil 8 lors de la campagne

d'août 2016 présente une proportion plus faible à 51 %. Néanmoins, il peut être affirmé que le sable à cet endroit provient de la même source que le cordon de basse mer. De plus, les sédiments issus de l'érosion de la plateforme rocheuse ou du cordon de basse mer (dont une faible portion de sédiments appalachiens y est incluse) se retrouvent sur cette zone, car 30 % à 40 % de la composition minérale des échantillons de la zone sablo-vaseuse est associée à celle des Appalaches. Ainsi, les sédiments de la zone intertidale sont donc bien redistribués par les courants côtiers autant vers le large que vers la plage.

CHAPITRE V

INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Ce chapitre a pour but de synthétiser les résultats obtenus et de les discuter afin de répondre clairement aux objectifs de recherche. Cette étude a permis, grâce à trois années de récolte de données sur le terrain et plusieurs méthodes d'analyses en laboratoire et à l'aide d'un SIG, de dresser un portrait de l'évolution du littoral à différentes échelles spatiales et temporelles dans l'intérêt de comprendre son fonctionnement naturel. Ensuite, une évaluation des impacts des ouvrages de protection côtière sur la morphosédimentologie des plages et des herbiers à spartine alterniflore a été réalisée, mais aussi une réflexion sur la pertinence des enrochements sur les secteurs étudiés à l'île aux Coudres. Enfin, la compréhension de ce littoral joint à l'analyse des impacts récents et potentiels futurs a permis de proposer une gestion préconisée des stocks sédimentaires dans l'optique d'assurer une meilleure pérennité du littoral de cette île face aux changements climatiques.

5.1. Dynamique du littoral

La dynamique du littoral est un sujet complexe dont plusieurs éléments sont en perpétuelle interaction et d'intensité variable. En effet, les conditions météo-marines dont font partie le climat, les vagues, les courants côtiers, le jeu des marées et les glaces, exercent des forces sur les littoraux amenant, à l'intérieur d'une cellule hydrosédimentaire, le déplacement de sédiments de façon parallèle et perpendiculaire à la côte créant ainsi sur différentes échelles spatiales et temporelles, de l'accrétion ou de l'érosion sur les différentes parties de la zone intertidales.

La méthodologie employée dans cette étude a permis de mesurer et d'analyser ces différentes composantes qui sont à l'œuvre sur la zone côtière afin d'en comprendre les processus de transport de sédiments à l'intérieur des compartiments que sont les cellules hydrosédimentaires.

Sur l'ensemble du linéaire côtier à l'étude, l'analyse de l'évolution historique entre 1964 et 2012 a permis de dresser un portrait historique des transformations du littoral afin de comprendre les dynamiques côtières, mais aussi d'avoir un comparatif à l'évolution récente. Cette étape initiale a été cruciale, car elle a permis une meilleure compréhension globale afin de répondre aux hypothèses de recherche.

Au terme cette revue historique, plusieurs constats sont identifiables. Le taux moyen de déplacement de la côte à l'étude, majoritairement à terrasse de plage, est assez faible, voire nul. Ces taux de migration varient historiquement selon les secteurs entre -0,15 et +0,39 m/an, valeurs globalement faibles comparativement au contexte régional de l'estuaire moyen du Saint-Laurent (Dionne, 1999; Bernatchez et Dubois, 2004; Bernatchez et Drejza, 2015). Le taux de migration moyen de 0,02 m/an calculé sur la zone à l'étude se rapproche du taux de 0,03 m/an calculé sur les terrasses de plage de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, entre Rimouski et Sainte-Anne-des-Monts, entre 1938 et 2012 (Marie et al., 2014, Pinsonnault, 2017). Cependant, dans les deux cas, la côte peut être sujette à des épisodes de recul soudains et importants : 14,2 m au maximum sur la rive sud du Saint-Laurent et 3,25 m entre 2010 et 2011 pour un secteur de la côte sud de l'île aux Coudres près du chemin de la Traverse (données du réseau de stations de suivi d'érosion du LDGIZC).

Cette érosion ponctuelle explique le besoin d'effectuer des travaux de protection des berges réalisés au cours des années pour protéger la route à proximité de la côte. En effet, les faibles taux calculés indiquent la stabilisation de la côte de plus en plus présente par des ouvrages de protection (37 % en 2012), mais la certaine résilience du littoral naturel face aux conditions hydrodynamiques auxquelles les plages sont assujetties. Cette érosion épisodique est ce qui semble avoir motivé les coudrois à protéger leur route qui ceinture l'île des assauts de la mer durant les dernières décennies. En effet, le taux d'artificialisation de la côte pour la zone d'étude est passé de 3% en 1964 à 37 % en 2012. Un engouement pour protéger le rivage avec des enrochements des menaces d'érosion et de submersion a été instigué par plusieurs facteurs, dont la construction d'habitations près du littoral et l'utilisation de plus en

plus fréquente de la route côtière par différents usagers (automobilistes, marcheurs, cyclistes, etc.).

Malgré ces épisodes d'érosion, ces côtes semblent plus résilientes que les autres côtes meubles de la région de Charlevoix. La morphologie de l'estran, particulièrement la présence de grandes plateformes rocheuses (Brodeur et Allard, 1983), joue un rôle important dans l'atténuation de l'énergie des vagues qui arrivent à la côte (Trenhaile, 1987). Tel que le mentionnent Marshall et Stephenson (2011), une plateforme rocheuse au-dessus du niveau moyen des mers, comme c'est le cas sur l'île, favorise l'atténuation de l'énergie des vagues qui arrivent à la côte.

Entre 1964 et 1981, les taux moyens étaient positifs sur la côte sud (0,14 m/an) et sur la côte nord-est (0,25 m/an). Entre 1981 et 2002, des épisodes d'érosion ont fait reculer la ligne de rivage en moyenne de -0,09 m/an (côte sud) tandis que ce taux sur la côte nord-est était toujours positif à 0,07 m/an. Entre 2002 et 2012, les taux moyens de déplacement étaient légèrement négatifs avec -0,06 et -0,03 m/an pour la côte sud et nord-est. Ces résultats dissimulent une grande variabilité des taux de déplacement selon les secteurs et les intervalles de dates. Cette fluctuation dans le positionnement de la ligne de rivage peut être expliquée par les cycles d'érosion-accrétion sur les côtes sableuses se traduisant par des périodes d'érosion durant les épisodes de tempêtes et ensuite, par la dynamique sédimentaire naturelle, un réengraissement les saisons ou années suivantes (Fox et Davis, 1978; Paskoff, 2012). Ce mouvement des sédiments, généré entre autres par la dérive littorale et les courants côtiers, joue un rôle important sur la distribution des sédiments des plages de l'île.

Sur le secteur sud, la figure 151 présente une interprétation faite à partir des photographies aériennes historiques du sens de la dérive littorale. Les ouvrages perpendiculaires au trait de côte sont des obstacles au transit sédimentaires et permettent d'observer une accumulation des sédiments transportés en amont de la dérive littorale (US Army Corps of Engineers, 1984; Greenwood et Orford 2007; Mwakumanya et al. 2009; Marghany *et al.*, 2010; Mishra *et al.*, 2011; Paskoff, 2012). C'est ce qui explique que les épis

du quai devant l'hôtel Cap-aux-Pierres créent une accrétion visible à l'est du quai et une érosion à l'ouest. Des indices similaires ont été remarqués sur un autre quai au sud-ouest de l'île confirmant l'affirmation du sens de la dérive littorale.

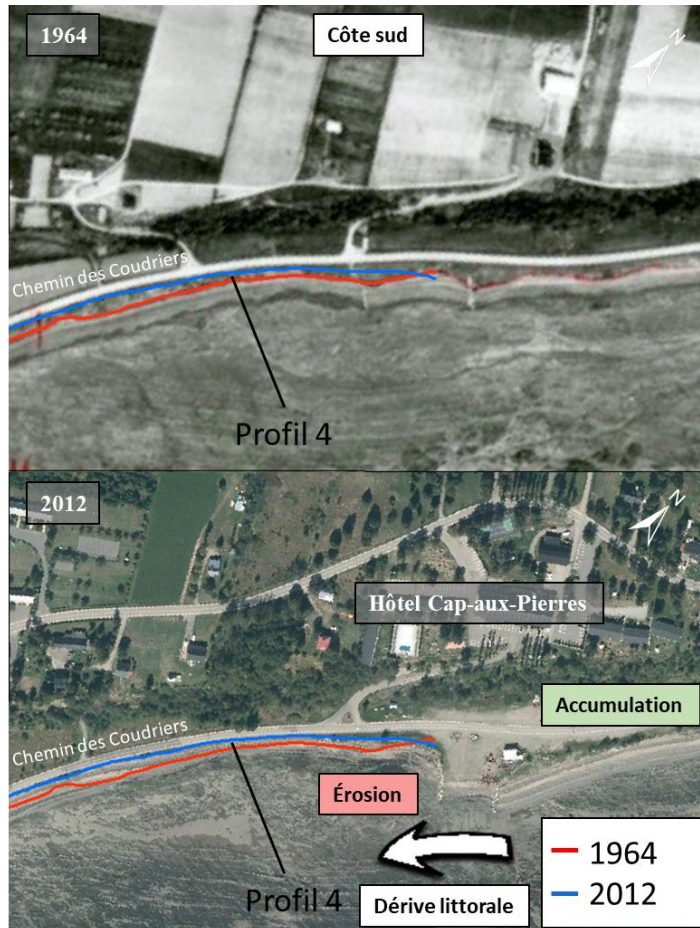


Figure 151. Sens de la dérive littorale de la côte sud de l'île grâce à la photo-interprétation des photographies aériennes de 1964 et 2012.

Les données de volumes sédimentaires récoltées entre 2014 et 2016 donnent aussi des indices sur le sens de la dérive littorale. En effet ces résultats montrent que les plages deux extrémités de la côte sud sont en érosion et qu'ils sont en grande majorité artificialisés par toute sorte de moyens tels que des enrochements ou des murets. Le littoral du centre de la côte sud l'île est celui qui est le moins artificialisé et possède les plages où le volume cumulé

fut positif sur la période de suivi. Il semble donc que l'orientation de ces secteurs et de la largeur de l'estran joue un rôle déterminant sur le climat de vagues enregistré. En effet, les vagues les plus fortes ont été sur la portion sud-est de l'île, au niveau du profil 4. Le centre est l'ouest de la côte sud avaient un climat de vague plutôt similaire.

Sur la côte nord-est, les vagues provenant du nord-est tel que l'ont démontré les résultats de l'ADV, sont plus fortes que celles du sud. Ces vagues du nord-est ont des impacts significatifs sur l'érosion de la plateforme rocheuse et le transport des sédiments sur les plages. La dérive littorale se remarque d'est en ouest sur la photographie aérienne (figure 152).

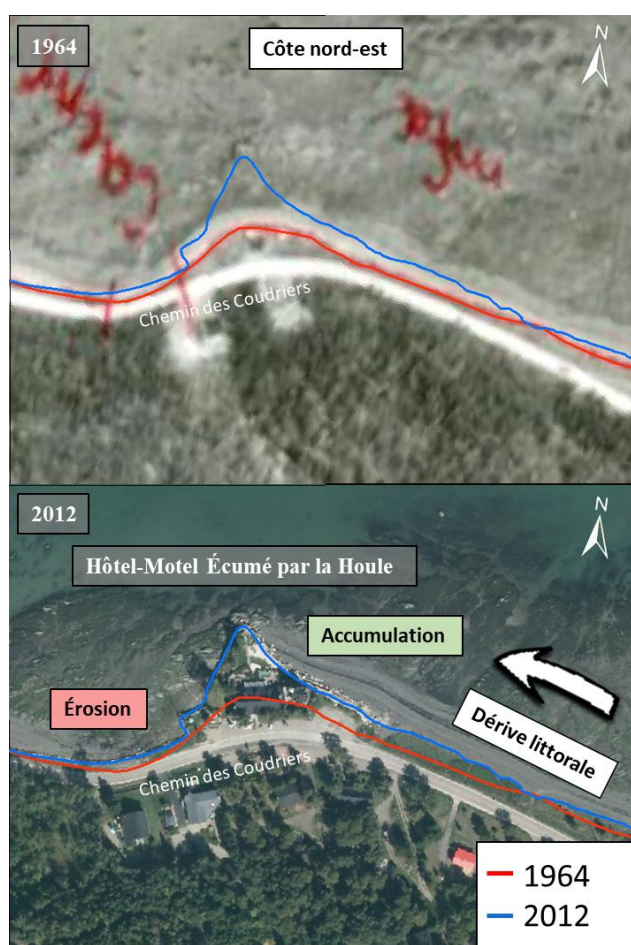


Figure 152. Sens de la dérive littorale de la côte nord-est de l'île grâce à la photo-interprétation des photographies aériennes de 1964 et 2012.

L'obstacle artificiel, qu'est l'hôtel-motel Écumé par la Houle au transit sédimentaire, a permis d'observer une accumulation des sédiments à l'est de cette avancée artificielle et une érosion à l'ouest, résultat à une érosion accentuée et une nécessité d'artificialiser cette portion de côte. Cette hypothèse semble se vérifier puisque l'artificialisation de cette côte atteint 100 % depuis les derniers travaux. Encore plus important, les volumes de plages ont été largement réduits depuis l'état de référence, faisant de cette plage une zone où la plage risque de disparaître si la tendance se maintient. De l'autre côté de cet épi, les volumes sédimentaires sont globalement positifs avec quelques pertes selon les secteurs, supposant que la dérive littorale et/ou les vagues et courants transportent ces sédiments ailleurs ou plus loin suivant le sens de dérive principale.

En rassemblant les résultats de cette étude, trois cellules hydrosédimentaires ont été décrites dans les zones d'étude (figure 153). Les mécanismes hydrodynamiques et sédimentaires qui s'y produisent sont similaires dans toute la cellule. De plus, les échanges sédimentaires entre les cellules sont limités, voir inexistantes puisque des obstacles artificiels tels des quais ou naturels les empêche.

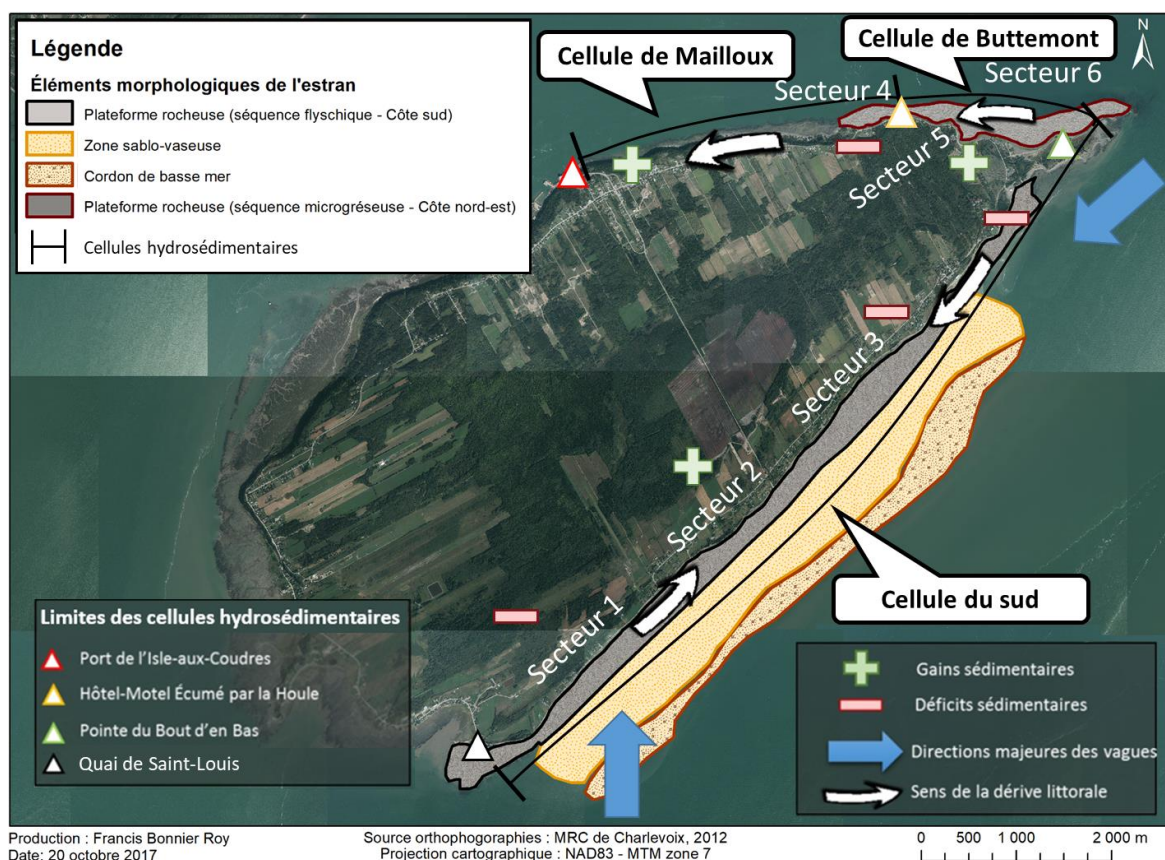


Figure 153. Cellules hydrosédimentaires des zones à l'étude de l'île aux Coudres.

Au sud, une dérive convergente vers le centre de la côte sud est identifiable, régie par les vagues les plus fortes provenant du nord-est et du sud et les courants de marée. Ses limites sont le quai de Saint-Louis au sud-ouest et la pointe du Bout d'en Bas au nord-est. Une dérive principale ce fait de l'est vers l'ouest, tandis qu'une autre dérive principale est générée par le vent du sud, amenant la dérive littorale à transporter les sédiments de la plage de l'ouest vers l'est, spécifiquement au niveau du secteur des profils 8 et 1, au sud-ouest (près de la Pointe à Simon). Ces deux dérives littorales principales amènent un démaigrissement des plages aux extrémités de la côte sud, tandis que le centre connaît des gains sédimentaires.

Les résultats supposent que les dérives littorales de la cellule convergente du sud de l'île remanient les sédiments des parties sud-ouest et sud-est de l'île vers le centre de la côte sud. La recharge sédimentaire faite au-devant des ouvrages semble avoir été en partie

transportée par ce courant vers le centre, faisant augmenter le volume sédimentaire des plages. D'ailleurs, sur le haut estran du profil 2 situé au centre de la côte sud, une augmentation de la taille granulométrique comparativement à l'état de référence porte à croire à des apports de sédiments de taille grossière par la dérive littorale des plages adjacentes. Les résultats du courantomètre montrent que les deux directions majeures des vagues sont du sud et du nord-est, essentielles à cette dérive littorale convergente. De plus, les courants de marées autour de l'île sont de grande intensité et régulés par le battement des marées ce qui peut déplacer de grande quantité de sédiments dans la zone intertidale. Ainsi, lors du jusant, les courants sont d'est en ouest tandis que durant le flot, ils sont d'ouest en est. Ces deux phénomènes sont les agents hydrodynamiques les plus importants dans la dynamique des sédiments du littoral.

Au nord-est, deux cellules ont été identifiées, soit la cellule de Mailloux et la cellule de Buttemont pour lesquelles le sens de la dérive littorale se fait d'ouest en est. La première est limitée à l'ouest par le port de l'Isle-aux-Coudres et à l'est par l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle qui constitue une avancée vers la mer presque infranchissable pour le transit sédimentaire, provenant de la cellule voisine. La cellule de Buttemont comprend les plages situées entre le promontoire de l'Hôtel-Motel et la Pointe du Bout d'en Bas.

5.2. Origine des sédiments

Les analyses minérales ont permis de confirmer l'hypothèse spécifique selon laquelle les sources sédimentaires qui alimentent les plages sont les sédiments issus de l'érosion de la plateforme rocheuse de schiste et du cordon sablo-graveleux de basse mer.

Étant donné le contexte post-glaciaire de l'île, la plateforme rocheuse en érosion est la source principale actuelle de sédiments des plages. Les apports provenant de l'érosion de la plateforme rocheuse sont non négligeables, car les processus de gélifraction, d'abrasion par les glaces et le remaniement par les courants et les vagues sont prédominants (Brodeur et Allard, 1983). De plus, les schistes argileux seraient aussi affectés en été par des alternances d'humidification et d'assèchement lors des cycles de marée (Brodeur et Allard, 1983).

L'autre élément morphologique de l'estran identifié comme source sédimentaire des plages est le cordon de basse mer. Les analyses minérales de ces sources potentielles et leur comparaison avec les échantillons de rivières du Bouclier canadien et des Appalaches ont confirmé cette hypothèse. Puisque le socle rocheux de l'île aux Coudres est d'origine appalachienne et que les dépôts de sable et de blocs provenant du Bouclier canadien se trouvent sur l'estran sud, il est possible que les blocs composant le cordon de basse mer proviennent de l'érosion d'un till tel qu'observé aussi sur la batture dans la région de Charlevoix (Dionne et Poitras, 1996). Les bancs de sable au large de la côte sud de l'île proviennent du fond de l'estuaire du Saint-Laurent entre l'île d'Orléans et l'île aux Coudres où se trouve une zone pas plus profonde de 30 mètres couverte de bancs sableux en migration déplacés par les forts courants de marée pouvant atteindre 300 cm/s (Dionne, 1986; d'Anglejan, 1990). Des échantillons prélevés dans les dunes de sable sous-marines autour de l'île ont montré que le matériel était composé de sables moyens à très grossiers dans lesquels on retrouve une abondance de minéraux de quartz et de feldspath, ce qui s'apparente aux résultats de la minéralogie du cordon de basse mer (d'Anglejan, 1981). Selon ce chercheur, ces sédiments proviennent d'un ancien dépôt glaciaire remanié par les vagues et courants ou qu'ils ont été dérivés à partir des zones au sud de l'île dans le chenal nord par l'action des courants de marée. Une autre possibilité est qu'ils sont issus de la rivière du Grouffre, particulièrement lors de fort débit. La zone sablo-vaseuse située entre la plateforme rocheuse et le cordon de basse mer est une zone de transition d'altitude plus basse où les sédiments fins et grossiers provenant des deux sources potentielles viennent s'y accumuler.

En connaissant la composition minérale de ces diverses sources sédimentaires potentielles et des échantillons de plage sur les huit profils topographiques, il est possible de créer une carte synthèse (figure 154) des transports sédimentaires des zones à l'étude de l'île en y intégrant les courants de surface et une rose des vagues (données enregistrées en 2015).

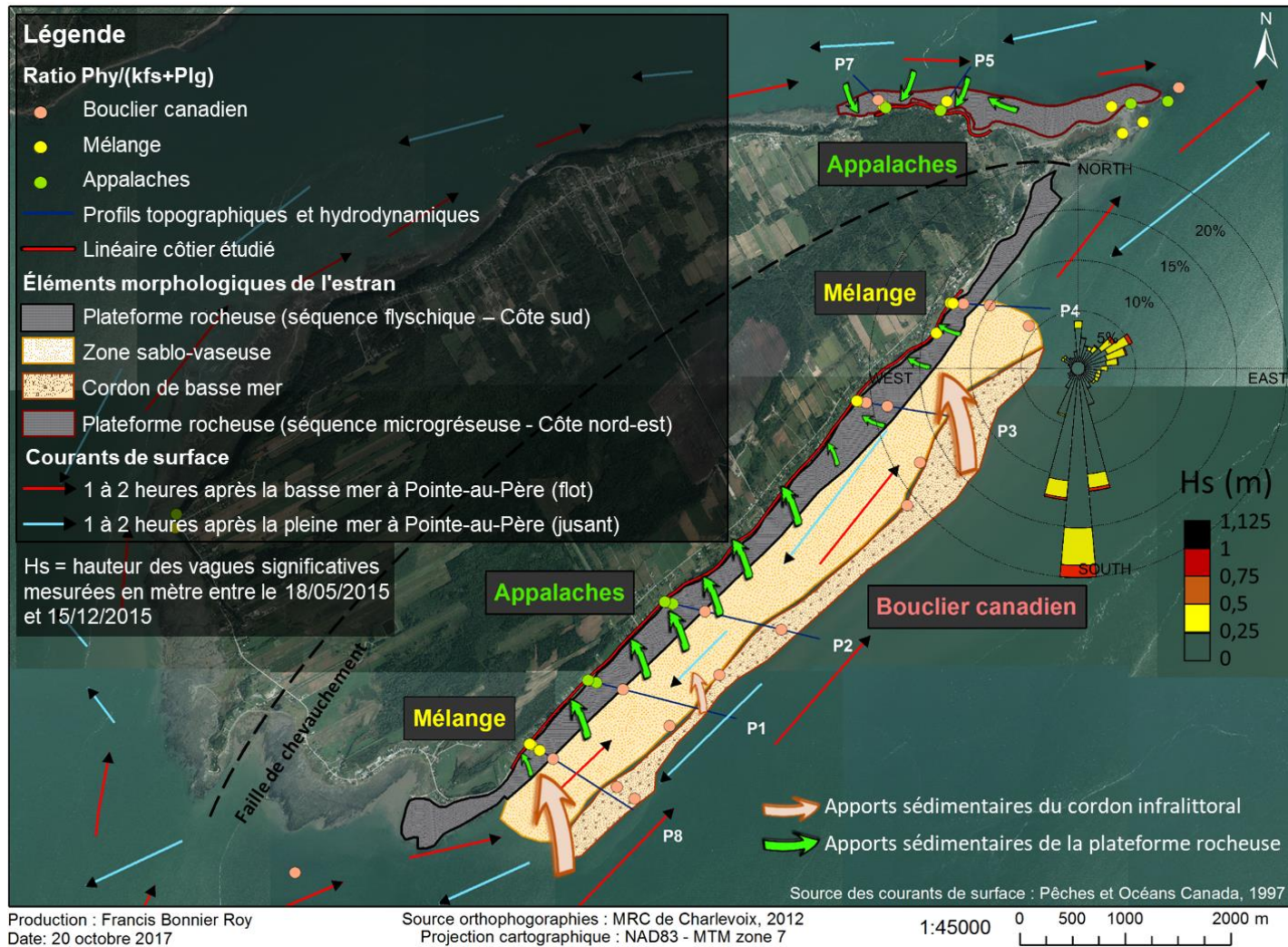


Figure 154. Carte synthèse des sources sédimentaires des plages à l'étude de l'île, incluant les courants de surface. La direction des courants a été estimée selon la moyenne des cinq premiers mètres de profondeur depuis la surface entre juin et septembre (voir l'Atlas des courants de marée, Pêches et Océans Canada, 1997).

Sur le secteur nord-est (profil 5, 6, 7), la plage est essentiellement constituée de graviers de schistes provenant de la courte plateforme rocheuse. Le taux d'érosion vertical de la plateforme rocheuse a été estimé à 0,22 à 0,53 cm/an pour le secteur nord-est (Brodeur et Allard, 1983). Les vagues les plus fortes proviennent du nord-est, ce qui est propice pour l'érosion de la plateforme rocheuse alimentant les plages. Les plages du secteur 4 où se situe le profil 7 sont en érosion, car le transit sédimentaire est bloqué par le promontoire artificiel de l'hôtel-motel et par la très courte plateforme rocheuse de pente abrupte. À cet endroit, les apports sédimentaires pour combler les impacts de l'érosion des vagues ne sont pas suffisants. Ainsi, en 2014, toute la côte de ce secteur qui était encore naturelle fut enrochée.

Sur la côte sud, une dynamique différente est observée. Les plages des profils 8, 3 et 4 sont constituées principalement de sédiments provenant du Bouclier canadien ou d'un mélange avec des sédiments d'origine appalachienne. Cela indique un apport sédimentaire provenant du cordon de basse mer ainsi que de l'érosion de la plateforme rocheuse. Les vagues les plus importantes proviennent du sud et du nord-est, ce qui rend le transit sédimentaire du cordon de basse mer vers les plages plus efficace sur les deux extrémités du littoral, au sud (quai de Saint-Louis) et au nord-est (Pointe du Bout d'en Bas). Cependant, les plages du centre de la côte sud de l'île sont davantage protégées par la plateforme rocheuse qui est plus large. De plus, le cordon de basse mer est moins volumineux devant le profil 2, ce qui peut influencer les apports sédimentaires de cet élément morphologique. Ainsi, les plages des profils 1 et 2 sont composées en majorité de sédiments provenant de l'érosion de la plateforme rocheuse (figure 154).

Le secteur sud possède un granoclassement négatif d'est en ouest. Vers l'ouest (profils 1 et 8), la plage contient davantage de galets de grès arrachés de la plateforme rocheuse. Ceux-ci sont assez anguleux et de tailles variables (5 à 20 cm sur le sens de la longueur). Au centre (profil 2-3) et à l'est (profil 4), ces galets se font plus rares et la composition sédimentaire du haut estran est plus fine. Elle possède aussi un bon pourcentage de sable provenant de la zone sud-ouest de l'île où se trouve un important cordon de sable à la limite de basse mer. Ce dernier doit provenir des hauts-fonds du fleuve Saint-Laurent et migrer

selon les courants de marée. Le sable doit ainsi migrer le long de la limite de la zone infralittorale et se déposer sur la zone sablo-vaseuse entre le cordon de basse mer et la plateforme rocheuse. On le retrouve aussi à travers le cordon infralittoral (till délavé). Ce till est formé de blocs subarrondis, couvert d'algues, signe qu'ils sont en place depuis quelque temps. Ce plaquage de blocs est par endroit recouvert des sédiments sableux qui voyagent le long de cette zone au large.

5.3. Rôle des conditions hydrodynamiques et de la morphologie de l'estran

Les résultats des conditions hydrodynamiques ont permis de répondre entièrement ou en partie à deux hypothèses spécifiques de cette étude, soit que les conditions météo-marines ont des effets significatifs saisonniers sur la morphosédimentologie des plages et que les sources sédimentaires qui alimentent les plages sont l'érosion de la plateforme rocheuse de schiste et le cordon sablo-graveleux de basse mer. En effet, il a été possible de déterminer la direction des vagues provenant du large, l'effet d'atténuation de la morphologie de l'estran sur l'énergie des vagues (Bonnier Roy *et al.*, 2018) ainsi que la présence d'interaction entre les niveaux d'eau et les ouvrages. En combinant ces résultats avec ceux des autres méthodes, il est possible d'affirmer que les vagues et les courants côtiers jouent un rôle important sur la distribution des sédiments de la plage, mais aussi sur l'ensemble de l'estran de l'île aux Coudres en fonction des saisons.

Les vagues qui proviennent du sud sont les plus fréquentes, mais sont rarement associées à de hautes vagues tandis que les vagues provenant du nord-est sont moins fréquentes en proportion, mais davantage morphogènes. Ainsi, la zone côtière est un environnement dynamique où la morphologie de la plage est constamment à la recherche d'un équilibre en fonction des conditions hydrodynamiques changeantes (Dubois, 1988; Proddger, 2016). Dionne (1996b) mentionnait que c'était l'action morphogène des vagues de tempête qui modifiait par l'érosion de façon épisodique, la terrasse de plage Mitis sur la rive nord du moyen estuaire du Saint-Laurent à Pointe aux Alouettes. Toutefois, l'énergie qui est

transférée à la côte dépend de la morphologie de l'estran, de sa nature, son historique et des conditions météo-marines et hydrodynamiques (Trenhaile, 1997)

En ce qui concerne le rôle de la topographie sur l'énergie de la houle, il a été déterminé que la zone sablo-vaseuse contribuait à l'amortissement des hauteurs de vagues par réfraction sur cette surface (plus de 800 m par endroit au sud de l'île) (Bonnier Roy *et al.*, 2018). Ainsi, elle contribue majoritairement à une dissipation non-turbulente de l'énergie des vagues atteignant la côte. Au niveau du profil 2, cet amortissement de la hauteur des vagues est de 18 %. Par la suite, l'escarpement structural en gradins successifs (pente de 4,2° en moyenne) présent sur la quasi-totalité du littoral sud de l'île semble être responsable de la réflexion vers le large d'une proportion de l'énergie des ondes incidentes des vagues. En effet, ce talus distal peut causer le déferlement des vagues lorsque la hauteur d'eau est peu profonde (Trenhaile et Kanyaya, 2007; Didier, 2014). Au niveau du profil 1, cet amortissement représentait 21 %. Au niveau du profil 3, l'amortissement n'est pas constant : il est de 32,5% pour les vagues inférieures à 0,7 m et de 20 % en moyenne pour les vagues supérieures à 0,7 m.

L'énergie restante des vagues rencontre ensuite la plateforme rocheuse, surface rocheuse subhorizontale de pente très faible, voire nulle, dont les écueils sont une source de rugosité qui engendre de la diffraction et réfraction des vagues (Didier, 2014). Ainsi, le relief et l'étendue des plateformes rocheuses ont des effets significatifs sur la dissipation de l'énergie des vagues (Ogawa *et al.*, 2011 et 2012; Limber et Murray, 2014). Puisqu'elle se trouve à une faible profondeur, cette surface contribue à l'amortissement par réfraction des vagues les plus faibles et à l'amortissement par friction sur le fond des vagues les plus fortes. Au niveau du profil 1, l'amortissement est hétérogène : il est de 50 % pour les vagues inférieures à 0,5 m et en moyenne de 13% pour les vagues supérieures à 0,7m. Au niveau du profil 2, l'amortissement de la hauteur des vagues est globalement homogène avec 16 %.

La dernière portion de l'estran atteinte par les vagues est le haut estran, recouvert en totalité uniquement durant les pleines mers de vives-eaux. Il constitue une surface plane de

pente fortement réflexive (10%), caractéristique morphologique ayant une influence importante sur le déferlement des vagues (Battjes, 1974). En raison de sa forte pente et de la faible hauteur des vagues, les vagues y dissipent leur énergie principalement lors du déferlement. Durant les pleines-mers de vives eaux, en raison du fort marnage et du climat de vague modéré, il n'y a pas de déferlement avant l'estran, ce qui rend le déferlement très énergétique en raison de la dissipation turbulente sur une distance très courte (régulièrement entre 15 et 20 m) de l'énergie de vagues faiblement amorties sur la plateforme. On observe généralement des déferlements plongeant (*plunging breaker*) directement sur le haut estran (*shore break*). En cas de très haut niveau d'eau et de hauteur de vagues fortes, la dissipation de l'énergie des vagues sur le haut de plage ou les infrastructures peut causer des impacts directs importants (Ruggiero et al., 2001 ; Didier, 2014). Ainsi, le haut estran du profil 4 est responsable de la dissipation terminale de l'énergie des vagues de l'ordre de 46 %. Ces chiffres sont similaires à ce que Carini *et al.* (2015) ont trouvé sur les plages de Duck en Caroline du Nord, soit un amortissement de l'énergie des vagues déferlantes variant entre 40 et 69%. Elgar et Herbers (1994) ont d'ailleurs fait mention que la réflexion de l'énergie des vagues était plus importante sur les plages à pente forte à grand marnage et un climat dominé par des vagues courtes.

Effectivement, les plus fortes contributions à l'atténuation des dynamiques de vagues à la côte sont dues aux secteurs présentant les plus fortes pentes, malgré leurs faibles extensions. L'escarpement de la plateforme rocheuse et celui du haut estran présentent les taux d'amortissement ramenés à leur extension (m) les plus élevés de l'ensemble des unités. De plus, la configuration de l'estran de l'île fait en sorte que le centre de la côte sud de l'île (profils 2 et 3) est plus protégé de l'énergie des vagues par sa morphologie que les deux extrémités (profils 8, 1 et 4) (Bonnier Roy *et al.*, 2018). Les résultats des niveaux d'eau ont d'ailleurs montré que l'ensemble des ouvrages de protection suivis (profils 1, 4 et 5) ont été atteints par les vagues durant plusieurs heures par années (sans compter la saison hivernale). Sur la côte nord-est, l'estran est plus court et le cordon de basse mer ainsi que la zone sablo-vaseuse sont absents, ce qui fait en sorte que l'énergie des vagues atteignant la côte est moins

atténuée par des obstacles morphologiques qu'au sud. Il est intéressant de constater que pour des conditions hydrodynamiques similaires, le profil 6 n'a pas connu de franchissement de la ligne de rivage, contrairement au profil 5. Cela peut s'expliquer par l'élévation du bas estran plus faible au niveau du profil 5. Le profil 6 se situe dans un secteur de l'anse à Buttemont légèrement plus élevé, ce qui semble le rendre plus résilient aux assauts des vagues. Il est aussi à noter que l'arrière-plage est très large contrairement au profil 5 où le nouvel enrochement est très près de la route.

En ce qui concerne le rôle des conditions hydrodynamiques sur le transport sédimentaire, les vagues et les courants de marée sont des agents de transport de sédiments de la zone intertidale par saltation au fond ou en suspension dans la colonne d'eau (Drapeau et Morin, 1981; Paskoff, 2012). En connaissant la direction des courants côtiers et de la dérive littorale issue de l'angle d'incidence des vagues mesurée par l'ADV, il est possible d'évaluer les mouvements sédimentaires perpendiculaires et parallèles à la côte. C'est ainsi que les matériaux qui composent le cordon de basse mer et la plateforme rocheuse sont érodés et transportés dans ces directions et peuvent atteindre les plages. Le phénomène inverse peut se produire lorsque les vagues de tempêtes mobilisent les sédiments de la plage, ceux-ci peuvent être transportés au large par les courants là où il n'y a pas d'herbiers à spartine alterniflore qui ont la capacité de retenir une partie sédiments.

5.4. Différences saisonnières et spatiales

L'ensemble des techniques utilisées ont permis de déceler des cycles saisonniers autant morphologiques, granulométriques qu'hydrodynamiques. Tout comme l'évolution historique, elles ont permis d'avoir une vision d'ensemble de l'évolution récente sur toute la côte étudiée et de comprendre la dynamique littorale à la suite des travaux d'enrochement en 2014. Ces changements ne se font pas tous de la même façon sur le littoral de l'île. Ainsi, des patrons différents ont été observés selon les différentes saisons, mais aussi en fonction de la localisation sud et nord-est. Cela s'explique en partie par l'hydrodynamisme et la morphologie de l'estran et son exposition. Au sud, ce sont les secteurs 1 (profil 8, 1 et 2) et

3 (profil 4) qui sont les plus exposés. D'ailleurs, c'est au secteur 4 que l'on a enregistré la hauteur significative de vague la plus importante. Au nord-est, les vagues les plus hautes ont été enregistrées au profil 6. Le secteur 5 en fait la portion de la côte étudiée la plus exposée en raison de son exposition nord-est, d'une courte plateforme rocheuse et d'un couloir préférentiel pour les vagues où le relief est plus bas et avec moins d'obstacles naturels tels des écueils rocheux ou blocs glaciels (figure 155).



Figure 155. Zone de l'estran (polygone orange) où la topographie est légèrement plus basse et moins rugueuse devant le profil 5 (ligne pointillée blanche).

Les cellules hydrosédimentaires de l'île aux Coudres permettent aussi de comprendre davantage la dynamique morphosédimentaire des plages. La cellule du sud, la cellule de Buttemont et la cellule de Mailloux sont des entités dans lesquels les échanges sont bloqués par des obstacles, le plus souvent des constructions humaines comme des quais. Puisque la dérive littorale au sud s'effectue vers le centre, certains secteurs se trouvent en déficit sédimentaire tel que les secteurs 1 et 3. Puisque la cellule est convergente vers le centre, les sédiments s'accumulent au secteur 2. Au nord-est, la dérive littorale se fait d'est en ouest, ce qui apporte les sédiments à partir du secteur de la Pointe du Bout d'en Bas vers l'anse du Ruisseau rouge puis l'anse à Buttemont, mais se fait bloquer par l'épi de l'hôtel-motel, privant le secteur 4 en apports sédimentaires.

Des variations saisonnières au niveau de la topographie et du positionnement de la flexure ont été observées pendant les périodes estivale et automnale. En effet, ce sont les saisons durant lesquelles la plage s'engraisse tandis qu'après la période hivernale, la plage perd en volume (Fox et Davis, 1978, Dubois, 1988). Ce cycle d'érosion-accumulation a permis à la plage de rester relativement similaire durant les trois années. De plus, les résultats des volumes de plage ont permis d'observer un démaigrissement en hiver et un gain graduel entre le printemps et l'automne de manière assez constante sur les profils. Il a aussi été permis de confirmer l'hypothèse spécifique selon laquelle les conditions météo-marines ont des effets significatifs saisonniers sur la morphosédimentologie des plages. Sur les plages témoins, un agrandissement de la plage a été observé à plusieurs reprises sur l'ensemble de ces profils naturels. Ainsi, des cycles saisonniers sont associés à ces changements d'élargissement et de rétrécissement de la plage (Griggs et Tait, 1988; Basco *et al.*, 1997). Cependant, sur les profils artificiels, des élargissements plus importants et parfois persistants sur plusieurs saisons ont été remarqués. Cela dit, il est possible d'exclure l'effet cyclique observé sur les plages naturelles comme cause de ces changements et affirmer qu'une partie des sédiments de la recharge sédimentaire au-devant des ouvrages a migré vers le bas de la plage et le bas estran, mais aussi vers les secteurs adjacents par la dérive littorale à la suite des travaux réalisés en 2014.

Les profils naturels de la côte sud ont permis de constater des variations saisonnières au niveau de la topographie et du positionnement de la flexure, entre autres. Il a été possible d'observer que les périodes estivale et automnale sont les saisons durant lesquelles la plage s'engraisse tandis qu'après la période hivernale, la plage perd en volume (Hayes et Boothroyd, 1969; Fox et Davis, 1978; Blott et Pye, 2004). Néanmoins, la morphologie de la plage est restée relativement similaire durant les trois années. Sur la côte nord, la seule plage naturelle a probablement été perturbée par les interventions réalisées à moins de 100 m. Ce profil a connu un gain important en élévation et sur la largeur de plage, possiblement en raison de la recharge en sédiments de plage au pied de l'énrochement.

Des cycles saisonniers ont été remarqués sur la granulométrie des sédiments de surface de la plage. Durant l'été et l'automne, la taille moyenne des sédiments (< 2 mm) est plus grossière qu'au printemps. Plusieurs hypothèses peuvent expliquer ces résultats. Au printemps, lors de la crue printanière, la charge sédimentaire du « bouchon vaseux » dans l'estuaire moyen est beaucoup plus importante et peut alors se retrouver dans la zone intertidale (Drapeau, 1992). Les glaces, étant un agent important dans le transport sédimentaire, peuvent avoir emprisonné les particules fines de la zone sablo-vaseuse et de la plateforme rocheuse et les transporter vers les plages en fondant sur place (Dionne, 1981; Troude et Sérodes, 1988). Ces conditions particulières peuvent être la cause de l'augmentation du ratio argiles-limons vs sables au printemps. De plus, les conditions hydrodynamiques (hauteur significative des vagues) sont plus modérées au printemps qu'à l'automne ce qui est plus propice à l'accumulation sédimentaire sur la plage (annexes 29 à 46).

En outre, la granulométrie des plages naturelles est dans l'ensemble plus stable que celle des plages artificialisées et présente des cycles saisonniers visibles davantage harmonisés entre les échantillons ainsi qu'un meilleur triage. Ces résultats peuvent être expliqués par un climat de vague plus important sur les plages artificialisées pouvant ainsi affecter le triage des sédiments par la capacité de déplacer sur ces côtes un plus grand éventail de taille sédimentaire. Leclerc (2010) avait aussi démontré que sur les plages enrochées de la Baie-des-Chaleurs, le triage sédimentaire était généralement faible. Une autre hypothèse est que la diversité des tailles granulométriques dépendant de la nature des sédiments (Bird, 2008). Ce faisant, les plages naturelles ont eu des résultats minéralogiques de la formation des Appalaches tandis que les plages artificielles du sud étaient majoritairement du Bouclier canadien ou d'un mélange. Ainsi, cette diversité de granulométrie a probablement eu un impact sur le triage sédimentaire et son comportement dans les cycles saisonniers.

5.5. Impacts des ouvrages sur la morphosédimentologie des plages

La mise en place des enrochements lors des travaux à l'automne 2014 a engendré certaines conséquences sur la morphologie et la granulométrie des plages à l'étude sur l'île. Les huit profils topographiques suivis, les volumes de plage et les échantillons ont permis de constater des changements parfois importants dans la distribution de la taille des sédiments, l'altitude et la position des limites de la plage pendant les trois années du projet. Toutefois, la courte période de suivi durant ce projet s'avère limitante pour l'évaluation de l'étendue réelle à moyen et long terme des impacts des nouveaux enrochements.

À l'aide de la segmentation côtière, il a été possible de valider que le principal effet direct des enrochements à court terme est l'empiètement sur le haut de plage. Puisque les enrochements sont directement installés sur le haut de plage, l'impact direct est la perte d'habitat que compose cette portion de plage végétalisée, malgré le gain sédimentaire au-devant des ouvrages en raison de la recharge en sédiments provenant de la clé de l'enrochement. C'est aussi une superficie de 4 711 m², soit 2 105 m³ de plage, qui a été remplacée par de l'empierrement. D'ailleurs, le pourcentage d'artificialité de la côte étudiée est passé de 39 % (3022 m linéaires) à 54 % (4196 m linéaires) à la suite des travaux d'enrochement de 2014.

À la suite de la mise en place des nouvelles structures de protection sur la portion nord-est et sud de l'île, plusieurs autres impacts et tendances ont été observés. D'abord, la segmentation côtière a permis de montrer des signes d'effet de bout évidents aux extrémités de certains enrochements (nouveaux et anciens) (figure 156). L'effet de bout est généralement associé à des microfalaises pouvant atteindre 100 cm et dans quelques cas plus de 100 cm de hauteur. Aux extrémités des ouvrages, la turbulence que crée l'interaction des vagues sur l'enrochement résulte en un affouillement, ce qui fait abaisser le profil de la plage et érode le talus. Griggs et Tait (1988) décrivent que ce phénomène a même rendu inutilisable leurs profils témoins naturels adjacents aux ouvrages dans la baie de Monterey (Californie), impactant une zone jusqu'à 150 m de l'ouvrage en aval de la dérive littorale. Bernatchez et

Fraser (2012) ont évalué des reculs de 8,8 m et 4,6 m dans la zone d'effet de bout d'un enrochement à la plage Ferguson à Sept-Îles en 2005. L'étude géotechnique de Dorval (2007) à l'île aux Coudres faisait déjà mention d'effets de bout aux extrémités des structures à la pointe à Simon.

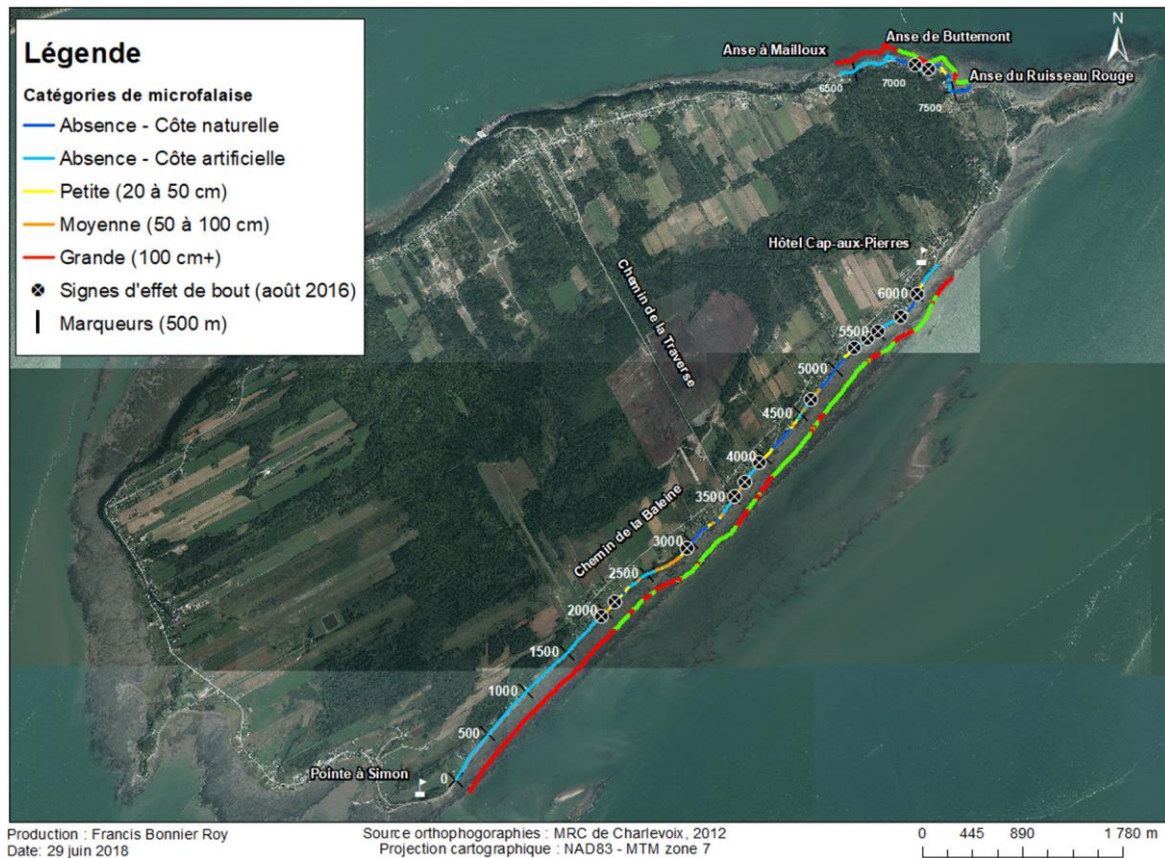


Figure 156. Carte synthèse des éléments marquants de la segmentation côtière en 2016, dont les effets de bout aux extrémités des structures de protection.

Il a aussi été montré que ce n'est pas simplement les nouveaux enrochements qui affectent la dynamique du littoral. Les anciens enrochements ont encore des impacts en empêchant le réajustement de la côte lors des tempêtes ou en période de beau temps (figure 157).



Figure 157. Érosion accentuée (effet de bout) par un enrochement déjà présent avant cette étude à l'est du profil 2 (distance 3 000 m), sur la côte sud de l'île le 1^{er} septembre 2015.

Bernatchez et Fraser (2012) avaient observé de tels phénomènes dans le secteur de la plage Ferguson à Sept-Îles tandis que ce problème n'avait pas été observé dans le secteur de Barachois près de Percé. Cela s'explique par l'emplacement de l'enrochement : ceux de Sept-Îles étaient situés sur la plage tandis que ceux de Barachois sur l'arrière-plage, limitant ainsi l'interaction vagues-ouvrage. Ainsi, ces résultats expriment que l'emplacement de l'implantation de la structure a joué un rôle déterminant sur les impacts de ces ouvrages sur l'érosion de la plage devant et autour (effet de bout). De plus, ils expliquent que ce phénomène se produit de façon plus marquée lorsque les courants côtiers sont forts, comme dans le secteur de la plage Ferguson à Sept-Îles. Ainsi, sur l'île aux Coudres, les nouveaux enrochements situés sur le haut de plage ont des interactions avec les vagues seulement lors d'ondes de tempête, puisqu'ils sont situés près de l'arrière-plage. Néanmoins, certains anciens ouvrages présents sur la zone d'étude sont plus avancés sur la plage et cette dernière est plus courte (configuration naturelle ou due à l'empiètement de la structure). Ainsi, ce phénomène observé autour d'un enrochement par Bernatchez et Fraser (2012), mais aussi d'autres chercheurs comme Walton et Sensabaugh (1979) en Floride suite au cyclone Eloise, Jolicoeur et Carroll (2007) aux Îles-de-la-Madeleine ou par Bernatchez *et al.* (2008) sur un

tombolo à Havre-Aubert (Îles-de-la-Madeleine), se produit à l'île aux Coudres aux endroits marqués sur la carte de la figure 156. De plus, les échanges sédimentaires entre l'arrière-plage et la plage, quoique minimales en raison des taux d'érosion historiques faibles, sont impossibles par la présence de structure de protection, aboutissant à des déficits sédimentaires qui peuvent être observés sur les plages devant les ouvrages et à proximité (Dean, 1987; Kraus, 1988; Nordstrom, 2000; Hill *et al.*, 2004; Bernatchez *et al.*, 2011; Bernatchez et Fraser, 2012; Paskoff, 2012).

Quant aux analyses granulométriques, elles ont permis de réfuter en partie l'hypothèse spécifique 2, énonçant que les enrochements n'auraient pas d'impacts significatifs à court terme sur la morphosédimentologie du bas estran et les herbiers à spartine alterniflore. En effet, certaines plages ont connu une modification de la granulométrie du bas estran à proximité de la ligne de flexure à cause d'une migration des sédiments vers le bas de plage. Ces impacts ont été rencontrés surtout durant la première année sur les profils enrochés suivant les travaux, mais ces effets se sont prolongés pour le profil 5 jusqu'au dernier levé terrain en novembre 2016. Ce genre de conséquence a déjà été observé par Blott et Pye (2004) sur les côtes de Lincolnshire en Grande-Bretagne où avait eu lieu une recharge sédimentaire. Ils ont conclu, après une étude de 5 ans, que les vagues avaient remanié une partie de la recharge sédimentaire en bas de plage et dans la zone infralittorale. Ils avaient aussi remarqué que la granulométrie avait été impactée même sur les zones en dehors de la recharge sédimentaire. Pour les autres profils artificialisés, le retour à l'équilibre précédant les travaux a été observé. Sur une période de suivi de 2 ans après les travaux, aucune tempête de forte intensité (vagues et courants) n'a été enregistrée permettant de mobiliser une grande partie des sédiments et d'interagir avec intensité sur les enrochements, comme a pu le faire la tempête du 6 décembre 2010 dans l'estuaire du Saint-Laurent, créant de l'érosion sur la plage et de la submersion côtière (Quintin *et al.*, 2013). Sur le long terme, malgré que le nombre de tempêtes pourrait diminuer d'ici 2050, une accélération de l'érosion côtière est probable en raison de la hausse relative du niveau marin et d'une diminution importante de la couverture de glace qui fera accroître l'exposition des plages aux vagues de tempête en

menaçant l'équilibre du littoral enroché de l'île aux Coudres (Drapeau, 1992; Dionne, 1996a; Bernatchez et al. 2008; Koohzare *et al.*, 2008). Bernatchez et Fraser (2012) expliquent que dans la région de Sept-Îles et Percé, les ouvrages de protection côtière sont responsables en partie de la réduction des largeurs de plage. Le coincement côtier (*coastal squeeze*) amplifie d'ailleurs ce phénomène, empêchant la plage de migrer vers les terres afin de se réajuster suite aux tempêtes et à la hausse du niveau marin. Devant les côtes artificielles, il en résulte un hydrodynamisme plus important qui fait dériver les sédiments de la plage en aval de la dérive littorale ou vers le large (Bernatchez et Fraser, 2012). De plus, ensablement significatif des herbiers par un élargissement de la plage devant les profils.

Leclerc (2010) mentionnait que sur les plages de Saint-Siméon et de Bonaventure (Baie-des-Chaleurs), le pourcentage de sable grossier était plus important sur les plages artificielles que naturelles. Toutefois, les pourcentages de sable moyen, silt et argile n'était pas significativement différents. Comme le mentionnait la chercheuse, il aurait été intéressant d'analyser l'évolution de l'ensemble des composantes sédimentaires de la plage, de manière à inclure aussi la proportion des graviers, galets et blocs pour voir si ces classes granulométriques étaient impactées. Cependant, comme Leclerc, des choix sur les analyses ont dû être faits en raison du temps disponible. Néanmoins, sans faire ces analyses, la proportion de la matrice grossière supérieure à 2 mm a été pesée et comparée au poids total de chaque échantillon afin d'observer son évolution dans le temps (voir section 4.4.2).

Les analyses granulométriques ont ainsi permis de contribuer, en dressant l'état initial de la morphosédimentologie des plages des secteurs naturels et artificiels avant la mise en place des structures, à évaluer l'impact des ouvrages de protection sur les plages de l'île. En observant le comportement sédimentaire des profils enrochés et en les comparant aux secteurs naturels, des impacts faibles et limités au moment des travaux jusqu'à un an après ont été repérés à certains endroits comme sur les profils 1 et 8 (secteur sud-ouest). Le profil 5 est celui ayant été le plus touché par la mise en place de l'enrochement. Il est d'ailleurs celui, avec le profil 4, où le climat de vague enregistré a été le plus fort du suivi. Le profil 4, étant déjà artificialisé à l'état de référence, est aussi influencé par plusieurs composantes

anthropiques sur le littoral, comme les ouvrages de protection et le chantier de bateaux Dufour à proximité. Seul le profil 7 artificialisé n'a pas semblé avoir été affecté par les enrochements. Puisque ce secteur présente plusieurs écueils rocheux sur la plage, la quantité de sédiments excavés lors de la mise en place de l'ouvrage n'a pas pu être aussi importante que sur les autres profils enrochés et, donc, il n'y a pas eu autant d'influence de ce nouvel apport sédimentaire sur les échantillons récoltés à la suite des travaux.

Dans l'ensemble, le haut de plage et le haut estran sont constitués à majorité de sables grossiers avec un granoclassement allant du haut de plage (plus fin) vers le bas du haut estran (plus grossier). Globalement, les plages devant une côte naturelle sont similaires à celles devant une côte artificielle, que ce soit dans la proportion de fraction grossière que dans la composition de ses fractions sableuses, limoneuses et argileuses. De plus, les profils naturels présentent une meilleure homogénéité de la granulométrie de la plage que les profils artificiels, dont la granulométrie est plus hétérogène. Cela indique un moins bon triage des sédiments.

Il a été remarqué que les profils dont la granulométrie a été le plus affectée par les enrochements correspondent aux endroits où les vagues enregistrées ont été les plus hautes : le profil 5 dans l'anse à Buttemont (site de la zone d'étude où le fetch est le plus grand) et le profil 4 au sud-est où le climat de vague enregistré a été le plus dynamique de la côte sud. De plus, puisque les sédiments de la clé de l'enrochement, utilisés comme recharge de plage au pied de l'ouvrage, étaient de même minéralogie et de diamètre aussi grossier que ceux du haut estran de certains profils artificiels (1 et 5), aucun changement immédiat de la granulométrie n'a été observé après les travaux sur les échantillons du haut estran.

Il est important de mentionner qu'il existe un gradient de volume de plage le long du littoral, mais aussi entre le sud et le nord-est. Au sud, les plages du secteur 1 sont les moins volumineuses tandis que celles des secteurs 2 et 3 sont plus larges et possèdent un plus grand stock sédimentaire. Ainsi, les plages du sud-ouest de l'île sont celles qui auraient besoin d'interventions de recharge de plage en premier. Sur la côte nord-est, ce sont les plages du

secteur 4 qui sont les moins volumineuses, contrairement à celles des secteurs 5 et 6, plus larges. Ce sont les plages de l'anse à Mailloux qui nécessiteraient une recharge sédimentaire.

La face sud de l'île étant moins exposée que la face nord-est, les vagues qui atteignent les profils 1, 2, 3 et 8 sont moins importantes que celles enregistrées sur les profils 4, 5 et 6. Le nombre d'heures durant lesquelles l'ouvrage est atteint par les vagues est plus important sur le profil 5 que sur les profils artificialisés au sud. De plus, le niveau d'eau maximum ayant dépassé le pied de l'ouvrage est plus important sur le profil 5 que sur les autres profils artificialisés à l'étude. Cela indique que la dynamique sédimentaire est davantage susceptible d'être affectée par l'interaction des vagues sur l'ouvrage, provoquant le phénomène d'affouillement de la plage au pied de l'ouvrage. C'est d'ailleurs ce qui s'est produit sur la côte nord-est, dans l'anse à Buttemont. Les conditions hydrodynamiques plus importantes et une interaction vagues-ouvrage ont permis une redistribution des sédiments de la recharge de la clé de l'enrochement vers le large et le long de la côte par la dérive littorale. Ainsi, on constate un élargissement de la plage sur le profil 6.

Les profils artificialisés (1 et 8) au sud de l'île sont atteints par des vagues provenant majoritairement du sud qui ont les plus faibles hauteurs moyennes enregistrées sur l'ensemble de l'île. Cela permet de comprendre le faible impact de l'enrochement sur la morphologie de la plage et la granulométrie. La moyenne de hauteur de vagues significative est plus élevée sur le profil 4 qu'ailleurs au sud de l'île (tableau 51). Il est alors évident que l'intensité des vagues dans ce secteur de la côte sud ait des conséquences sur les taux de migration plus élevés (reculs de la côte les plus importants), un volume de plage plus faible et une artificialisation du littoral de plus en plus importante. Sur les profils 5, 6 et 7 au nord-est, la dynamique est différente, car les profils 5 et 6 subissent les plus fortes vagues étant donné le fetch important de la direction nord-est. Les niveaux d'eau ont d'ailleurs dépassé le sommet de l'ouvrage à plusieurs reprises sur le profil 5 et le sommet de la microfalaise pour le profil 6. Cette interaction entre l'ouvrage et les vagues importantes crée une perturbation hydrodynamique qui a des impacts sur la forme de la plage et la granulométrie. Cependant, ces modifications se traduisent par un réajustement du profil pour le moment, mais pourraient

devenir plus importantes si l'ouvrage est plus souvent en contact avec les niveaux d'eau à l'avenir (affouillement et abaissement du profil de plage). Sur le profil 7 dans l'anse à Mailloux, les courants de marée importants et les vagues du nord-est peuvent impacter les caractéristiques de la plage. C'est ce qui a été observé sur une bonne partie des volumes de plages du secteur. Ce secteur n'a pas été suivi par des capteurs de pression, mais les résultats de la morphologie de la plage montrent que les enrochements sont les seuls remparts contre l'assaut des vagues dans cette anse puisque les plages semblent diminuer de volume à court terme.

En conclusion, il semble que les impacts des enrochements, jumelés à une recharge de plage, aient été limités, du moins à court terme, à un effet négatif d'empiètement sur le haut de plage et un effet positif d'engraissement de la plage qui limite les effets de l'érosion côtière. En effet, la recharge en sédiments est le principal impact positif observé dans les résultats puisque les sédiments de la clé de l'enrochement excavés remis sur et au pied de l'ouvrage ont permis de limiter les possibles effets de l'enrochement sur la plage durant l'étude. Les données obtenues sur la morphologie des plages des profils 1, 5 et 8 montrent que les sédiments de la recharge sont restés sur place et ont permis d'agrandir temporairement la largeur de plage tout en atténuant l'effet d'affouillement au pied de l'enrochement. Toutefois, ces gains peuvent être perdus si une onde de tempête affecte durement ces secteurs.

5.6. Rôle des herbiers et impacts des ouvrages

Les herbiers de l'île aux Coudres sont présents sur la côte sud et leur plus grande biomasse se situe dans les premiers mètres de la zone en dessous de la flexure. Les plantes des herbiers, essentiellement à spartine alterniflore, captent les sédiments fins (limons et argiles) (Carling, 1982; Stumpf, 1983; Drapeau, 1992; Wang *et al.*, 1993; French *et al.*, 1995; Allen et Duffy, 1998; Brown, 1998; Reed *et al.*, 1999; Christiansen *et al.*, 2000; Shi *et al.*, 2000; Van Proosdij *et al.*, 2000; Cooper, 2005; Neumeier et Amos, 2006; Dugan *et al.*, 2011). C'est pour cette raison que les échantillons du bas estran 1 de la côte sud sont

fortement plus limoneux et argileux qu'au nord-est où il n'y a pas d'herbier à spartine alterniflore.

Le rôle de cette barrière de végétaux sur la dissipation de l'énergie des vagues incidentes n'a pas été abordé dans cette étude, mais la capacité qu'elle a à retenir les graviers et sables de la plage qui sont transportés par la nappe de retrait vers le bas de plage a été observée sur le terrain. De cette façon, les herbiers aident naturellement à maintenir en place le matériel qui compose la plage (figure 158). Les herbiers jouent aussi un rôle important pour la faune aviaire et ichtyologique même si ces aspects n'ont pas été étudiés (Dryade, 1980; Gauthier *et al.*, 1980; Pelletier *et al.*, 1990; Centre Saint-Laurent, 1996).



Figure 158. Herbier à spartine alterniflore qui colonise la limite supérieure du bas estran.

Les analyses spatiales utilisées ont permis de confirmer l'hypothèse spécifique selon laquelle les enrochements n'auront pas d'impacts significatifs à court terme sur la morphosédimentologie du bas estran et les herbiers à spartine alterniflore. Toutefois, la période d'étude est trop courte pour obtenir un diagnostic évident sur les impacts que pourraient avoir les nouveaux enrochements sur les herbiers. Elle a aussi permis de contribuer

à répondre à l'objectif spécifique d'identification et la quantification des causes des changements saisonniers et annuels de la morphosédimentologie des plages.

Durant tout le suivi, il y a eu une grande variabilité observée de la moyenne des hauteurs de plants et pourcentages de recouvrement. Ces caractéristiques ne semblent pas être corrélées à la superficie des herbiers. À titre d'exemple, un écart positif de 273 m² a été observé entre 2014 et 2016 pour l'ensemble des herbiers de la zone 2 alors que leurs caractéristiques étaient similaires. Une situation comparable est remarquable à la zone 1 alors qu'un gain de 1136 m² a été enregistré entre 2014 et 2016 et que les caractéristiques des plants n'étaient pas significativement différentes. Ces résultats semblent être expliqués par plus de degrés jours sous 18°C en juin et juillet 2014 que durant les mêmes mois en 2015 et 2016 (Station météorologique de Charlevoix – annexe 27). Ainsi, la croissance des plants de spartine alterniflore a été davantage favorisée durant les années suivantes par des conditions climatiques plus favorables. Selon Moffett *et al.* (2010), plusieurs conditions environnementales influencent la croissance de la spartine alterniflore dans les marais salés dont, les flux d'énergie et les échanges de CO₂ avec l'atmosphère. Ces derniers sont limités, voire absents, lorsque la marée recouvre les plants. Ainsi, la fréquence de submersion joue un rôle dans la croissance de ces végétaux en lien avec les échanges de dioxyde de carbone et de disponibilité de lumière, mais aussi en apport de sédiments fins et d'éléments nutritifs pour les plants (Centre Saint-Laurent, 1996).

Ainsi, à la suite des résultats obtenus, la mise en place des enrochements sur le haut de plage ne semble pas avoir d'impacts négatifs indirects sur la croissance des herbiers à spartine alterniflore des secteurs à l'étude de la côte sud de l'île. En effet, la majorité des herbiers a connu une augmentation en surface depuis le début du suivi en 2014.

Il est intéressant de voir deux sens communs de direction de déplacement des herbiers. En effet, les herbiers voient leur superficie augmenter d'un côté et diminuer de l'autre. En majorité, les herbiers se déplacent vers le nord-est ou le sud-ouest, parallèlement à la côte.

Cela est probablement influencé par la direction d'incidence des vagues à la côte ou encore les courants de marée qui transportent les particules fines.

5.7. Pertinence des ouvrages et gestion préconisée des stocks sédimentaires

Dans l'ensemble, les ouvrages de protection de type enrochement installés à l'automne 2014 sur la portion sud-ouest et nord-est de l'île ont eu des impacts faibles sur l'ensemble de la période du projet tels que l'empiètement, la modification de la granulométrie, l'effet de bout, le coincement côtier et la perte du volume de plage au-devant des ouvrages. Toutefois, ces effets ont été atténués par la recharge sédimentaire faite au moment des travaux et par une résilience naturelle des plages de l'île ainsi qu'un climat de vagues généralement faible en comparaison à d'autres secteurs dans l'estuaire du Saint-Laurent. De plus, considérant la faible énergie des vagues ainsi que l'importance de la plate-forme rocheuse et son escarpement sur l'atténuation de l'énergie des vagues, il est possible d'établir que l'enrochement n'est pas la solution la plus pertinente. La recharge sédimentaire est sans doute une meilleure solution pour ce type d'environnement.

Les sources sédimentaires actuelles qui alimentent ces plages (cordon de basse mer, érosion de la plateforme rocheuse, talus côtier d'érosion, sédiments provenant de la dérive littorale) sont suffisantes pour assurer une viabilité à long terme du stock sédimentaire et réduire les impacts de l'interaction vagues-ouvrage. Brodeur et Allard (1983) mentionnent que le taux d'érosion verticale de la plateforme rocheuse serait situé entre 0,22 et 0,53 cm/an. Puisqu'une grande proportion des matériaux schisteux de la plage provient de la plateforme rocheuse (voir section 5.2), il est possible d'affirmer que la plage actuelle ait été formée, entre autres, par les apports sédimentaires provenant de l'érosion de la plateforme rocheuse sur une longue période. Les échanges sédimentaires entre les sources sédimentaires que sont aussi le cordon de basse mer et la zone sablo-vaseuse ont contribué à l'engraissement des plages, principalement au sud-ouest et sud-est de la côte sud. Néanmoins, si un démaigrissement de la plage se produisait en raison d'impacts de l'enrochement, l'érosion de la plateforme rocheuse ne serait pas en mesure de fournir à la plage le matériel nécessaire

pour combler les pertes de volume même si elle continue à l'alimenter dans un contexte de hausse du niveau marin relatif (+3,96 mm/an entre 2000 et 2013 à Saint-Joseph-de-la-Rive : comm. pers. Bernatchez, 2018). De plus, avec l'artificialisation accrue des berges de l'île au cours des dernières années, les apports provenant de l'érosion de la terrasse sablo-graveleuse sont aussi moins importants. Ainsi, un apport externe de sédiments de même nature et de diamètre semblable à ce qui est trouvé sur les plages actuellement est recommandé. Des recharges de plage aux endroits où les déficits sédimentaires ont été remarqués, soit aux secteurs 1, 3 et 4, seraient pertinentes pour assurer la résilience des berges de l'île aux Coudres. Ces ajouts en sédiments de plage permettraient des gains de volume afin de réduire les impacts futurs tels que l'effet de bout et l'affouillement au pied de l'ouvrage (Daniel, 2001; Fraser et Bernatchez, 2012). De plus, une plage plus large et volumineuse permet de réduire l'énergie des vagues et de limiter le franchissement des enrochements par les vagues (Bird et Lewis, 2015). Cet ajout en sédiments serait aussi bénéfique aux côtes adjacentes par la redistribution des sables par la dérive littorale. De plus, le coût moyen d'une recharge sédimentaire en haut de plage au Québec est de 453\$ le mètre linéaire, ce qui est moins dispendieux pour les petites municipalités que les techniques traditionnelles comme les enrochements où les coûts ont été estimés entre 5 100 \$/m linéaire et 7 000 \$/m linéaire (Ropars, 2007; Roche, 2011; Bachand et Comtois, 2016). Toutefois, redonner un profil d'équilibre à une plage pour réduire l'érosion côtière nécessite des volumes plus importants sur l'ensemble du haut estran et ce genre d'intervention n'est pas pérenne dans le temps et nécessite des recharges subséquentes épisodiques en fonction des conditions hydrodynamiques locales (Dean, 2002; Bachand et Comtois, 2016).

CONCLUSION GÉNÉRALE

La méthodologie utilisée dans cette étude est une des premières du genre dans le domaine de la géomorphologie côtière du Québec maritime. Basé sur une analyse rétrospective historique, ainsi qu'un état initial des paramètres morphosédimentologiques et hydrodynamiques, ce suivi environnemental suite à la mise en place des enrochements a permis d'évaluer avec précision les impacts à court terme de ces nouvelles structures sur le littoral coudrois. En premier lieu, il s'est avéré primordial d'effectuer une analyse historique du littoral afin de dresser un portrait général de l'érosion côtière sur les secteurs à l'étude de l'île. Ensuite, un état de référence de la morphosédimentologie des plages et des herbiers à spartine a permis d'évaluer les changements sur le littoral suite à la mise en place des enrochements grâce à une méthodologie complète et adaptée. L'interprétation de l'ensemble de ces données a permis de dresser un portrait global de l'hydrodynamisme (dérive littorale, courants, marée, transport sédimentaire) et des paramètres morphosédimentologiques (morphologie des plages, sources sédimentaires, granulométrie du littoral à l'étude, patrons spatiaux et cycliques).

Les ouvrages de l'île aux Coudres ne sont susceptibles d'avoir une action sur la morphodynamique que lors de conjonctures de fortes vagues et de niveaux d'eau élevés. Quand ces conditions sont réunies, les mesures montrent que les pieds d'ouvrages sont parfois atteints par les vagues lors des événements de tempêtes et que même le sommet des ouvrages est parfois franchi. Ainsi, à moyen terme, les plages sont susceptibles d'être affouillées par les vagues et deviendront des zones où la sédimentation est impossible. Jusqu'à l'automne 2016, le phénomène d'affouillement a été observé, mais s'est révélé sans conséquence pour le fonctionnement morphodynamique du haut estran. La recharge en sédiments de la plage avec les matériaux de la clé de l'enrochement a d'ailleurs limité le phénomène d'affouillement et de réflexion des vagues. En effet, les sédiments de la recharge déplacés par les vagues de tempêtes ayant atteint les ouvrages étaient excédentaires par rapport au budget préaménagement, permettant une période exempte d'effets négatifs à ce

niveau sur le haut de la plage. Il a été montré, sur certains profils, que les stocks sédimentaires déposés au pied de l'ouvrage se sont déplacés dans la section inférieure du haut estran sableux et ont été redistribués le long de la côte par la dérive littorale.

Pour le secteur 1 (profils 1 et 8), il est important de s'assurer que ce stock sédimentaire ne va pas continuer à migrer vers le large, auquel cas il pourrait potentiellement avoir un impact sur la croissance/développement des mattes d'herbiers à spartine alterniflore situées en bas de la flexure. Jusqu'à maintenant, il ne semble pas y avoir d'effets sur les herbiers. Toutefois, la période d'analyse est beaucoup trop courte pour évaluer les effets potentiels des ouvrages sur les herbiers. Les plus fortes pertes sédimentaires ont été observées en bordure des secteurs protégés par des ouvrages. Cependant, il est difficile de déterminer combien de temps la recharge sédimentaire pourra limiter l'affouillement et les impacts sur le volume sédimentaire par l'interaction des vagues sur l'ouvrage. Enfin, la hauteur des vagues plutôt faible mesurée de 2014 à 2016 combinée à la forte atténuation de l'énergie des vagues sur la plateforme rocheuse et le haut estran permettent de considérer à l'avenir des solutions plus douces que l'enrochement ou la combinaison de solutions.

Dans un contexte de hausse du niveau marin relatif récent dans cette région, d'autres projets d'étude pourraient permettre d'évaluer les impacts sur le long terme de ces ouvrages de protection côtière. L'île aux Coudres pourrait aussi être le site idéal pour un essai de recharge sédimentaire ciblée aux endroits mentionnés jumelée à une étude morphodynamique approfondie afin de proposer des solutions viables et naturelles à l'érosion côtière.

RÉFÉRENCES

- Allard, M. (1981). « L'anse aux Canards, île d'Orléans, Québec : évolution holocène et dynamique actuelle ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, no 2, p. 133-154.
- Allen, J. R. L., et Duffy, M.J. (1998). « Medium-term sedimentation on high intertidal mudflats and salt marshes in the Severn Estuary, SW Britain: the role of wind and tide ». *Marine Geology*, vol. 150, p. 1-27.
- Ancil, F., et Troude, J-P. (1992). « Étude de la remontée relative des niveaux d'eau de l'estuaire du Saint-Laurent ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 19, p. 252-259.
- Andrews, J. T., et Eberl, D. D. (2012). « Determination of sediment provenance by unmixing the mineralogy of source-area sediments: the 'SedUn-Mix' program ». *Marine Geology*, vol. 291-294, p. 24-33.
- Andrews, J. T., Bjørk, A. A., Eberl, D. D., Jennings, A. E., et Verplanck, E. P. (2015). « Significant differences in late Quaternary bedrock erosion and transportation: East vs. West Greenland ~70° N and the evolution of glacial landscapes ». *Journal Quaternary Science*, vol. 30, p. 452-463.
- d'Anglejan, B., Ingram, R. G., et Savard, J. P. (1981). « Suspended-sediment exchanges between the St. Lawrence Estuary and a coastal embayment ». *Marine Geology*, vol. 40, p. 85-100.
- d'Anglejan, B. (1981). « Submarine Sand Dunes in the St. Lawrence Estuary ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 8, p. 1480-1486.
- d'Anglejan, B. (1990). « Recent Sediments and Sediment Transport Processes in the St. Lawrence Estuary ». *Coastal and Estuarine Studies*, vol. 39, p. 110-129.
- Aucan, J., et Arduin, F. (2013). « Infragravity waves in the deep ocean: An upward revision ». *Geophysical Research Letters*, vol. 40, p. 3435-3439.
- Bachand, E., et Comtois, S. (2016). « Recharge en sable et revégétalisation de 2 plages de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec ». *Le Naturaliste Canadien*, vol. 140, no. 2, p. 105-112.

- Barnabé, G. (1974). *Importance économique de l'érosion côtière : Bas-Saint-Laurent et Gaspésie, Québec*. Ministère des Ressources naturelles, Direction générale des eaux, 122 p.
- Basco, D. R., Dolan, R. A., et Sinclair, C. (1992). *Sandbridge Virginia Oceanfront Seawall Arbitration Hearing: Some Lessons Learned for Coastal Engineers*. Actes de colloque de la Coastal Engineering Practice '92, American Society of Civil Engineers, p. 1003-1020.
- Basco, D. R., Bellomo, D. A., Hazelton, J. M., et Jones, B. N. (1997). « The influence of seawalls on subaerial beach volumes with receding shorelines ». *Coastal Engineering*, vol. 30, p. 203-233.
- Basco, D. R. (2006). « Seawall impacts on adjacent beaches: Separating fact from fiction ». *Journal of Coastal Research*, vol. 2, p. 741-744.
- Battjes, J. A. (1974). *Computation of set-up, longshore currents, run-up and overtopping due to wind-generated waves, Report 74-2. Delft, Pays-Bas*. Committee on Hydraulics, Department of Civil engineering, Delft University.
- Bernatchez, P., et Dubois, J.-M. (2004). « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, no 1, p. 45-71.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S., et Morissette, A. (2008). *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 p.
- Bernatchez, P., Fraser, C., et Lefavre, D. (2008). *Effets des structures rigides de protection sur la dynamique des risques naturels côtiers: érosion et submersion*. Actes de colloque de la 4^e conférence canadienne sur les géorisques, Université Laval, Québec, Canada, 20-24 Mai, p. 487-494.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D., et Dugas, S. (2011). « Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards ». *Ocean & Coastal Management*, vol. 54, p. 621-632.

- Bernatchez, P., et Fraser, C. (2012). « Evolution of Coastal Defence Structures and Consequences for Beach Width Trends, Québec, Canada ». *Journal of Coastal Research*, vol. 285, no. 6, p. 1550-1566.
- Bernatchez, P., et Drejza, S. (2015). *Réseau de suivi des infrastructures vulnérables à l'érosion côtière du Québec maritime – Guide pour les utilisateurs*. LDGIZC-UQAR, 54 p.
- Bernatchez, P. et Quintin, C. (2016). « Potentiel de migration des écosystèmes côtiers meubles québécois de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent dans le contexte de la hausse appréhendée du niveau de la mer ». *Le Naturaliste canadien*, vol. 140, no. 2, p. 91-104.
- Bernatchez, P., Dugas, S., Sauvé, P., et Roy, M.-A. (2017). *Cartographie et analyse de l'artificialité du littoral de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent*. 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, 134 p.
- Bernier, S., J.-D. Côte, M. Desrosiers, I. Lemus-Lauzon, et V. Rioux-Pin. (2006). *Étude des effets potentiels des aléas naturels sur les activités socio-économiques et les infrastructures de l'Isle-aux-Coudres. Étude réalisée dans le cadre du cours : Stage II Gestion intégrée de l'Environnement*. Université du Québec à Rimouski. 41 p.
- Bird, E. (1985). *Coastline changes: a global review*. Chichester: Wiley, 219 p.
- (1996). *Beach Management*. Chichester: Wiley, 281 p.
- (2008). *Coastal Geomorphology: An Introduction*, 2^e Édition. West Sussex, Angleterre: Wiley, 411 p.
- Bird, E., et Lewis, N. (2015). *Beach renourishment*. New York: Springer, 137 p.
- Biorex Inc. (1999). *Caractérisation biophysique et des usages d'un secteur retenu pour la détermination d'une zone de protection marine dans l'estuaire du Saint-Laurent : Volume 1 Introduction, Cadre biophysique et anthropique*. Rapport produit pour le ministère des Pêches et des Océans Canada en collaboration avec le Groupe de recherche et d'éducation sur les mammifères marins (GREMM) et la Société Duvetnor ltée.. 55 p.

- Birkemeier, W.A., Bichner, E.W., Scarborough, B.L., Mccarthy, M. A., et Eiser, W.C. (1991). « Nearshore profile response caused by Hurricane Hugo ». *Journal of Coastal Research*, vol. 8, p. 113-127.
- Blott, S. J., et Pye, K. (2001). « GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments ». *Earth Surf. Process. Landforms*, vol. 26, p. 1237–1248.
- Bonnier Roy, F., Bernatchez, P., Lambert, A. Marie, G., et Montero Serrano, J. C. (2018). *Suivi de l'érosion côtière à la suite des travaux de stabilisation des berges en bordure de routes à L'Isle-aux-Coudres : rapport final*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport final remis au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 250 p.+ Annexes.
- Bradbury, A.P., Allsop, N.W.H, Latham, J.P., Mannion, M., et Poole, A.B. (1988). *Rock armour for rubble mound breakwaters, sea walls, and revetment: recent progress, Rapport SR 150*. Wallingford, Hydraulics Research, 90 p.
- Brochu, M. (1960). *Dynamique et caractéristique des glaces de dérive de l'estuaire et de la partie nord-est du golfe du Saint-Laurent*. Ministère des Mines et relevés techniques, Ottawa, Étude géographique, no 24, 93 p.
- Brodeur, D., et Allard, M. (1983). « Les plates-formes littorales de l'île aux Coudres, moyen estuaire du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 37, no 2, p.179-195.
- Brodeur, D., et Allard, M. (1985). « Stratigraphie et Quaternaire de l'île aux Coudres, estuaire moyen du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 39, no 2, p.183-197.
- Brown, S. L. (1998). *Sedimentation on a Humber saltmarsh*, dans K.S. Black, D.M. Paterson et A. Cramp (dir.) *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*, Société géologique de Londres, Publication spéciale 139, p. 69–83.
- Burcharth, H. F., et Hughes, S. A. (2002). *Fundamentals of design*, dans: Vincent, L. et Demirbilek, Z. (dir.) *Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter VI-5-6, Scour and Scour Protection*. Engineer Manual 1110-2-1110, Washington D.C., U.S: US Army Corps of Engineers, 364 p.

- Carini, R. J., Chickadel, C. C., Jessup, A. T., et Thomson, J. (2015). Estimating wave energy dissipation in the surf zone using thermal infrared imagery. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, vol. 120, p. 1-21.
- Carling, P. A. (1982). « Temporal and spatial variation in intertidal sedimentation rate ». *Sedimentology*, vol. 29, p. 17–23.
- Carter, C. H., Monroe, C.B., et Guy, D. E. (1986). Lake Erie shore erosion: the effect of beach width and shore protection structures. *Journal of Coastal Research*, vol. 2, p. 17-23.
- Carter, R. W. G. (1988). *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. Cambridge: Academic Press, 616 p.
- Casse, M., Montero-Serrano, J-C., et St-Onge, G. (2017). « Influence of the Laurentide Ice Sheet and relative sea-level changes on sediment dynamics in the Estuary and Gulf of St. Lawrence since the last deglaciation ». *Boreas*, vol. 46, p. 541-561.
- Centre Saint-Laurent. (1996). Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume 1 : L'écosystème du Saint-Laurent. Environnement Canada – région du Québec; Conservation de l'environnement et Éditions MultiMondes, Montréal. Coll. 'Bilan Saint-Laurent'.
- Charlier, R. H., Chaineux, M.C.P., et Morcos, S. (2005). « Panorama of the history of coastal protection ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no 1. p. 79–111.
- Chauvin, L., Martineau, G., et LaSalle, P. (1985). *Deglaciation of the Lower St. Lawrence Region, Québec*. Dans Borns, H. W., Lasalle, P., Thompson, W. B. (dir), Late Pleistocene History of Northern New England and adjacent Quebec. Geological Society of America, SI 197, p. 111-123
- Christiansen, T., Wiberg, P.L., et Milligan, T.G. (2000). « Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 50, p. 315-331.
- Church, J. A., et White, N. J. (2011). « Sea-Level Rise from the Late 19th to the Early 21st Century ». *Surveys in Geophysics*, vol. 32, no. 4-5, p. 585-602.
- Cooper, N. J. (2005). « Wave dissipation across intertidal surfaces in the Wash Tidal Inlet, Eastern England ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no 1, p. 28-40.

- Coulombier, T. (2011). *Transport sédimentaire dans un marais littoral du Saint-Laurent: Importance de la végétation et des vagues*. Mémoire de maîtrise en océanographie, UQAR, Rimouski, 72 p.
- Culshaw, N., Brown, T., Reynolds, P.H., et Ketchum, J.W. (2000). « Kanairiktok shear zone: the boundary between the Paleoproterozoic Makkovik Province and the Archean Nain Province, Labrador, Canada ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 37, no. 9, p.1245–1257.
- Dagneau, B., et Lévesque, R., Poly-Géo Inc. (2009). *Photo-interprétation et caractérisation du trait de côte de l'Île aux Coudres, moyen estuaire du Saint-Laurent*. Note technique préliminaire présentée au Service de l'atténuation des risques – Direction du développement, ministère de la Sécurité publique, Québec. 5 p. et 1 annexe.
- Daigle, R. (2006). *Les impacts du changement climatique et de l'élévation du niveau de la mer sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick*. Environnement Canada. 646 p.
- Daniel, H. (2001). « Replenishment versus retreat: the cost of maintaining Delaware's beaches ». *Ocean and Coastal Management*, vol. 44, p. 87-104.
- Dean, R. G. (1987). *Coastal armoring: effects, principles and mitigation*, dans Edge, B. L (dir.), Actes de colloque de la 20e conference Coastal Engineering (p. 1843-1857). New York, États-Unis d'Amérique: American Society of Civil Engineers.
- (1991). « Equilibrium Beach Profiles - Characteristics and Applications ». *Journal of Coastal Research*, vol. 7, no. 1, p. 53-84.
- Dean, R. G. et Mauermeyer, E. M. (1983). *Models for beach profiler response: Boca Raton, Floride.*, CRC Press.
- Dickin, A. P. (2000). « Crustal formation in the Grenville Province: Ndisotope evidence ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 37, p. 165–181.
- Didier, D. (2014). *Évaluation de la submersion côtière par l'estimation in situ du wave runup sur les côtes basses du Bas-Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 182 p.

- Didier, D., Bernatchez, P., Boucher-Brossard, G., Lambert, A., Fraser, C., Barnett, R. L., et Van-Wiererts, S. (2015). « Coastal Flood Assessment Based on Field Debris Measurements and Wave Runup Empirical Model ». *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 3, p. 560-590.
- Dionne, J.-C. (1970). *Aspects morpho-sédimentologiques du glaciél, en particulier des côtes du Saint-Laurent*. Laboratoire de Recherches forestières, RIQFX-9, 324 p.
- (1973) « La notion de pied de glace (Icefoot), en particulier dans l'estuaire du Saint-Laurent ». *Cahier de géographie du Québec*, vol. 17, no. 41, p. 221-250.
- (1977). « La mer de Goldthwait au Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 31, p. 61-80.
- (1981). « A boulder-strewn tidal flat, north shore of the Gulf of St. Lawrence, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, no. 2, p. 261-267.
- (1981). « Données préliminaires sur la charge sédimentaire du couvert de glace dans la baie de Montmagny, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, no. 2, p. 277-282.
- (1986). « Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 40, no. 3, p. 307-323.
- (1988). « Holocene Relative Sea-Level Fluctuations in the St. Lawrence Estuary, Québec, Canada ». *Quaternary Research*, vol. 29, no. 3, p. 233-244.
- (1990). « Observations sur le niveau marin relatif à l'Holocène, à Rivière-du-Loup, estuaire du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 44, no. 1, p. 43-53
- (1996a). « Observations sur l'érosion de la basse terrasse à Petite-Rivière, Charlevoix, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50, no 3, p. 407-413.
- (1996b). « La terrasse Mitis à la pointe aux Alouettes, côte nord du moyen estuaire du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50, no. 1, p. 57-72.
- (1997). *Observations sur le delta juxta-glaciaire de Saint-Fabien, côte sud du Saint-Laurent estuarien*. Actes de colloque du 10e Congrès annuel de l'Association professionnelle des géologues et des géophysiciens du Québec. 60 p.

- (1999). *L'érosion des rives du Saint-Laurent : vue d'ensemble et état de la quesiton*. Actes du Colloque sur l'érosion des berges. p. 2-18.
- (2002). « État des connaissances sur la ligne de rivage Micmac de J. W. Goldthwait (estuaire du Saint-Laurent) ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 56, no. 1, p. 97-121.
- Dionne, J.-C., et Poitras, S. (1996). « Observations géomorphologiques sur la batture à méga-blocs, à Petite-Rivière, Charlevoix, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 50, no. 2, p. 221-232.
- Dorland, G. M. (1940). *Equilibrium Sand Slopes in Front of Seawalls*. Thèse de maîtrise non publiée, Département d'ingénierie civile, Université de Californie, Berkely, Californie, 43 p.
- Dorval, P. (2007). *Étude géotechnique* dans ministère des Transports et la municipalité de L'Isle-aux-Coudres. Réponses aux questions et commentaires du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs – 1re série (PR5.1), 35 p. + annexes.
- Douglass, S., et Pickel, B. (1999). « The tide doesn't go out anymore – the effect of bulkheads on urban bay shorelines ». *Shore and Beach*, vol. 67, p. 19–25.
- Drapeau, G., et Morin, R. (1981). « Contribution des vagues au transport des sédiments littoraux dans la région de Trois-Pistoles, estuaire du Saint-Laurent, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 35, no. 2, p. 245-251.
- Drapeau, G. (1992). « Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. » *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 46, no. 2, p. 233-242.
- Drejza, S., Friesinger, S., et Bernatchez, P. (2014). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec, Volume I, Projet X008.1*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, mars 2014, 226 p. + annexes.

- Drejza, S., Friesinger, S., Bernatchez, P., et Marie, G. (2015). *Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Développement d'une approche et d'un indice pour quantifier la vulnérabilité des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques sur 9 sites témoins. Volume III. Projet X008.1*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Remis au ministère des Transports du Québec, 308 p.
- Dryade (Le Groupe). (1980). *Habitats propices aux oiseaux migrateurs le long des rives : de la rivière Richelieu; de la rivière des Outaouais; du fleuve Saint-Laurent; de l'estuaire du Saint-Laurent; de la côte nord du golfe du Saint-Laurent; de la péninsule gaspésienne; des Îles-de-la-Madeleine*. Rapport présenté à Environnement Canada, Service canadien de la faune.
- Dubois, J.-M. (1973). *Essai de classification géomorphologique d'une côte en vue d'une utilisation en génie côtier*. Département de géographie, Université de Sherbrooke, Bulletin de recherche n°10, 96 p.
- Dubois, R. N. (1988). « Seasonal Changes in Beach Topography and Beach Volume in Delaware ». *Marine Geology*, vol. 81, p. 79-96.
- Dugan, J. E., Airoidi, L., Chapman, M. G., Walker, S. J., et Schlacher, T. (2011). « Estuarine and Coastal Structures: Environmental Effects, A Focus on Shore and Nearshore Structures », dans Wolanski, E., et McLusky, D. (dir), *Treatise on Estuarine and Coastal Science*. Waltham, Academic Press, vol. 8, p. 17-41.
- Dyer, K. R. (1986). *Coastal and Estuarine Sediment Dynamics*. Wiley & Sons, Chichester, 342 p.
- Dyke, A. S. et Peltier, W.R. (2000). « Forms, response times and variability of relative sea-level curves, glaciated North America ». *Geomorphology*, vol. 32, p. 315–333.
- Eberl, D. D. (2003). *User guide to RockJock : a program for determining quantitative mineralogy from X-Ray diffraction data, Open final report 03-78*. United States Geological Survey, Washington DC, 40 p.
- EEA (European Environment Agency). (2006). *The changing faces of Europe's coastal areas, Rapport No. 6*. Copenhague, 107 p.

- Elgar, R. T. G., et Herbers, T. H. C. (1994). « Reflection of ocean surface gravity waves from a natural beach ». *Journal of Physical Oceanography*, vol. 24, no. 7, p. 1503-1511.
- Elsayed, M., Younan N., Fanos A., et Baghdady, K. (2005). « Accretion and Erosion Patterns along Rosetta Promontory, Nile Delta Coast ». *Journal of Coastal Research*, vol. 21, no. 3, p. 412-420.
- Environnement et Changement climatique Canada. 2018. *Sommaires climatologiques mensuels* [En ligne] : (http://climat.meteo.gc.ca/climate_normals/results_f.html?searchType=stnProv&lstProvince=QC&txtCentralLatMin=0&txtCentralLatSec=0&txtCentralLongMin=0&txtCentralLongSec=0&stnID=5645&dispBack=0). Page consultée le 3 mars 2018.
- Farmer, G. L., Barber, D., et Andrews, J. (2003). « Provenance of Late Quaternary ice-proximal sediments in the North Atlantic: Nd, Sr and Pb isotopic evidence ». *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 209, p. 227–243.
- Ferrario, F., Beck, M. W., Curt, D., Micheli, S. F., Shepard, C. C., et Airoidi, L. (2014). « The effectiveness of coral reefs for coastal hazard risk reduction and adaptation ». *Nature Communications*, vol. 5, no. 3794, 9 p.
- Fletcher, C. H., Mullane, R. A., et Richmond, B. M. (1997). « Beach loss along armored shorelines on Oahu, Hawaiian Islands ». *Journal of Coastal Research*, vol. 13, no. 1, p. 209-215.
- Fonseca, M. S., et Cahalan, J. A. (1992). « A preliminary evaluation of wave dissipation by four species of seagrass ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 35, p. 565-576.
- Forbes, D. L., et Taylor, R. B. (1994). « Ice in the shore zone and the geomorphology of cold coasts ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, vol. 18, no. 1, p. 59–89.
- Forbes, D. L., Manson, G. K., Chagnon, R., Solomon, S. M., van der Sanden, J. J., et Lynds, T. L. (2002). *Nearshore ice and climate change in the southern Gulf of St. Lawrence*. In *Ice in the environment*. Actes de colloque du 16th IAHR International Symposium on Ice, p. 344-351.
- Fowler, J. E. (1993). *Coastal scour problems and methods for prediction of maximum scour*. Coastal Engineering Research Center, Technical Report CERC-93-8.

- Fox, W. T., et Davis, R. A., Jr. (1978). « Seasonal variation in beach erosion and sedimentation on the Oregon coast ». *Geological Society of America Bulletin*, vol. 89, no. 10, p. 1541-1549.
- Fraser, C., et Bernatchez, P. (2006). *Caractérisation et évaluation des risques d'érosion et de submersion côtière pour le secteur de la pointe Verte, Maria, Québec*. Rapport de recherche remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, UQAR, 44 p.
- French, J.R., Spencer, T., Murray, A.L., et Arnold, N.S. (1995). « Geostatistical analysis of sediment deposition in two small tidal wetlands, Norfolk, U.K. ». *Journal of Coastal Research*, vol. 11, p. 308-321.
- Galbraith, P. S., Chassé, J., Larouche, P., Gilbert, D., Brickman, D., Pettigrew, B., Devine, L., et Lafleur, C. (2013). *Physical Oceanographic Conditions in the Gulf of St. Lawrence in 2012*. Technical report, DFO Canadian Science Advisory Secretariat Research Document 2013/026, 77 p.
- Gauthier, J., Lehoux, D., et Rosa, J. (1980). *Les marécages intertidaux dans l'estuaire du Saint-Laurent*. Ottawa : Environnement Canada, Service canadien de la faune. 91 p.
- Greenwood, B., et Osborne, P. D. (1991). « Equilibrium slopes and cross-shore velocity asymmetries in a storm-dominated, barred nearshore system ». *Marine Geology*, vol. 96, p. 211-235.
- Greenwood, R. O., et Orford, J. D. (2007). « Factors controlling the retreat of drumlin coastal cliffs in a low energy marine Environment - Strangford Lough, Northern Ireland ». *Journal of Coastal Research*, vol. 23, no. 2, p. 285–297.
- Griggs, G. B. (1998). *The armoring of California's coast*, dans Magoon, O.T., Converse, H., Baird, B., Miller-Henson, M. (dir.), Actes de colloque de la California and the World Ocean '97 Conference. American Society of Civil Engineers, Reston, VA. p. 515–526.
- (1999). « The protection of California's coast: past, present and future ». *Shore and Beach*, vol. 67, no. 1, p. 18–28.
- (2005a). *California's retreating coastline: where do we go from here?* Dans: Santa Barbara, C.A., Magoon, O.T., Converse, H., Baird, B., Miller-Henson, M. (Eds.), Actes de colloque du colloque du California and the World Ocean, Octobre 2002. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, p. 121–125.

- (2005b). « The Impacts of Coastal Armoring ». *Shore and Beach*, vol. 73, no. 1, p. 13–22.
- Griggs, G. B., et Tait, J. F. (1988). « The effects of coastal protection structures on beaches along Northern Monterey Bay, California ». *Journal of Coastal Research*: SI. 4, p. 93-111.
- Griggs, G. B., Tait, J. F., Scott, K., et Plant, N. (1991). *The Interaction of Seawalls and Beaches: Four Years of Field Monitoring, Monterey Bay, California*. Actes de colloque du colloque Coastal Sediments '91, American Society of Civil Engineers, p. 1871-1885.
- Hall, M. J., et Pilkey, O. H. (1991). « Effects of hard stabilization on dry beach widths for New Jersey ». *Journal of Coastal Research*, vol. 7, no. 3, p. 771–785.
- Harmsworth, G. C., et Long, S. P. (1986). « An assessment of saltmarsh erosion in Essex, England, with reference to the Dengie Peninsula ». *Biological Conservation*, vol. 35, p. 377–387.
- Hayes, M. O., et Boothroyd, J. C. (1969). *Storms as modifying agents in the coastal environment*, dans Hayes, M. D. (dir.), Coastal environments, NE Massachusetts: Amherst, Université du Massachusetts, Département de géologie, p. 290-315.
- Héquette A., et Hill, P. R. (1993). « Storm-generated currents and offshore sediment transport on a sandy shoreface, Tibjak Beach, Canadian Beaufort Sea ». *Marine Geology*, vol. 113, p. 283-304.
- Héquette, A. (2001). « Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling /Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents ». *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 7, no. 1, p. 5-16.
- Hill, H. W., Kelley, J. T., Belknap, D. F., et Dickson, S. M. (2004). « The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in Southern Maine, USA ». *Marine Geology*, vol. 210, no. 1-4, p. 149-168.
- Houde-Poirier, M., Hétu, B., et Morissette, A. (2014). *La géomorphologie du Quaternaire dans la région de Percé*. Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski (UQAR), Rimouski (Québec), Rapport présenté à la coopérative de solidarité du géoparc de Percé, 25 p. + annexes

- Jaegle, M. (2015). *Nature et origine des sédiments de surface de l'estuaire du Saint-Laurent*. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 83 p.
- Johnston, D. W., Friedlaender, A. S., Torres, L. G., et Lavigne, D. M. (2005). « Variation in sea ice cover on the east coast of Canada from 1969 to 2002: climate variability and implications for harp and hooded seals ». *Climate Research*, vol. 29, no. 3, p. 209–222.
- Jolicoeur, S., et O'Carroll, S. (2007). « Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Québec, Canada) ». *Landscape and Urban Planning*, vol. 81, p. 287–298.
- Koohzare, A., Vanicek, P., et Santos, M. (2008). « Pattern of recent vertical crustal movements in Canada ». *Journal of Geodynamics*, vol. 45, p. 133-145.
- Knutson, P. L., Brochu, R. A., Seelig, W. N., et Inskeep, M. (1982). « Wave damping in *Spartina alterniflora* marshes ». *Wetlands*, vol. 2, p. 87–104.
- Komar, P. D. (1998). *Beach processes and sedimentation*. Prentice Hall, 544 p.
- Komar, P. D., et McDougal, W. G. (1988). « Coastal erosion and engineering structures: The Oregon experience ». *Journal of Coastal Research*, SI. 4, p. 77-92.
- Kraus, N. C. (1988). « The Effects of Seawalls on the Beach: An Extended Literature Review ». *Journal of Coastal Research*, SI. 4, p. 1-28.
- Kraus, N. C., Gravens, M. B., et Mark, D. J. (1988). *Coastal processes at Sea Bright to Ocean Township, New Jersey, Volume 2: Appendices B-G*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center.
- Kraus, N. C., et McDougal, W. G. (1996). « The effects of seawalls on the beach: Part 1, An updated literature review ». *Journal of Coastal Research*, vol. 12, no. 3, p. 691-701.
- Kriebel, D. L., Dally, W.R., et Dean, R. G. (1986). *Beach profile response following severe erosion events*. Coastal and Oceanographic Engineering Department, UF/COEL-86-016, Université de la Floride, Gainesville, Floride.

- Kriebel, D. L., Kraus, N. C., et Larson, M. (1991). *Engineering methods for predicting beach profile response*, dans Kraus, N. C., Gingerich, K. J., Kriebel, D.L. (dir.), *Coastal Sediments '91*. American Society of Civil Engineering, New York, p. 557-571.
- Lambert, A., et Bernatchez, P. (2014). *Suivi de l'érosion côtière suite à des travaux de stabilisation des berges en bordure de routes à L'Isle-aux-Coudres (R 757.1) : Rapport Méthodologique*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport méthodologique remis au ministère des Transports du Québec, 34 p.
- Lambert, A., Bernatchez, P., Didier, D., Arsenault, E., Dumont, D., et Senneville, S. (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 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, Octobre 2015, 124 p. et annexe.
- Landry, B., et Mercier, M. (1992). *Notions de géologie* (3^e éd.). Modulo, Montréal, 565 p.
- Laprise, R., et Dodson, J. J. (1993). « Nature of the environmental variability experienced by benthic and pelagic animals in the St. Lawrence Estuary, Canada ». *Marine Ecology Progress Series*. vol. 94, p. 129-13.
- Larson, M., et Kraus, N. C. (1989). *Sbeach: Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change*. U.S. Army Corps Eng., Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, Tech. Rep. CERC-89-9, 256 p.
- Lasalle, P. (1972). *Interglacial sediments in the Québec city area*. Actes de colloque du 24^e Congrès international de Géologie, p. 372-373.
- Leclerc, A-M. (2010). *Ouvrages de protection du littoral : effets sur la morphologie des plages et sur les communautés benthiques intertidales, région de Saint-Siméon et de Bonaventure, Baie des Chaleurs (Québec, Canada)*. Mémoire déposé au département de Biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski. 141 p.
- Limber, P. W., et Murray, A. B. (2014). « Unraveling the dynamics that scale cross-shore headland relief on rocky coastlines: 2. Model predictions and initial tests ». *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, vol. 119, no. 4, p. 874-891.

- Lipp, D. G. (1995). *Changes in Beach Profiles Due to Wave Reflections off Seawalls at Lanikai, Hawaii*. Thèse de doctorat, Université d'Hawaii, Département d'ingénierie marine, 94 p.
- Locat, J. (1977). « L'émersion des terres dans la région de Baie-des-Sables/Trois-Pistoles, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 31, no. 3-4, p. 297-306.
- Loring, D. H., et Nota, D. J. G. (1973). *Morphology and sediments of the Gulf of St. Lawrence*. Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada, 182, 147 p.
- Lucotte, M., et d'Anglejan, B. (1986). « Seasonal control of the St. Lawrence maximum turbidity zone by tidal-flat sedimentation ». *Estuaries*, vol. 9, no. 2, p. 84-94.
- Luijendijk, A., Hagenars, G., Ranasinghe, R., Baart, F., Donchyts, G., et Aarninkhof, S. (2018). « The State of the World's Beaches ». *Scientific Reports*, vol. 8, no 1. 11 p.
- Marghany, M., Sabu, Z., et Hashim, M. (2010). « Mapping coastal geomorphology changes using synthetic aperture radar data ». *International Journal of the Physical Sciences*, vol. 5, no. 2, p. 1890–1896.
- Marie, G., Bernatchez, P., Dugas, S., Fraser, C., et Drejza, S. (2014). *Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral des MRC de La Mitis et de La Matanie et des municipalités de Cap-Chat et Sainte-Anne-des-Monts*. 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, 74 p.
- Marshall, S. J., Tarasov, L., Clarke, G. K. C., et Peltier, R. W. (2000). « Glaciological reconstruction of the Laurentide Ice Sheet: physical processes and modelling challenges ». *Canadian Journal of Earth Sciences*. vol. 37, p. 769-793.
- Marshall, R. J. E., et Stephenson, W. J. (2011). « The morphodynamics of shore platforms in a micro-tidal setting: Interactions between waves and morphology ». *Marine Geology*, vol. 288, no. 1-4, p. 18-31.
- Martin, D., Bertasi, F., Colangelo, M. A., de Vries, M., Frost, M., Hawkins, S. J., Macpherson, E., Moschella, P. S., Satta, M. P., Thompson, R. C., et Ceccherelli, V. U. (2005). « Ecological impact of coastal defence structures on sediments and mobile infauna: evaluating and forecasting consequences of unavoidable modifications of native habitats ». *Coastal Engineering*, vol. 52, p. 1027–1051.

- Martinez P. A., et Harbaugh J. W. (1993). « Simulating Nearshore Environments ». *Computer Methods in the Geosciences*, vol. 12, Pergamon Press, Oxford, 265 p.
- McDonald, H. V., et Patterson, D. C. (1984). *Beach response to coastal works, Gold Coast, Australia*. Actes de colloque du Coastal Engineering '84, New York, American Society of Civil Engineers, p. 1522-1538.
- Miles, J. R., Russell, P. E., et Huntley, D. A. (2001). « Field measurements of sediment dynamics in front of a seawall ». *Journal of Coastal Research*, vol. 17, no. 1, p. 195–206.
- Ministère des Pêches et des Océans Canada. (1997). *Atlas des courants de marée - estuaire du Saint-Laurent du cap de Bon-Désir à Trois-Rivières*. Ottawa, Ontario, 108 p.
- ministère des Pêches et des Océans Canada. (2009). *La zostère (Zostera marina) remplit-elle les critères d'espèce d'importance écologique ?* Secrétariat canadien de consultation scientifique. Avis scientifique 2009/018. 12 p.
- Mishra, P., Patra, S. K., Ramana Murthy, M. V., Mohanty, P. K., et Panda, U. S. (2011). « Interaction of monsoonal wave, current and tide near Gopalpur, east coast of India, and their impact on beach profile: a case study ». *Natural Hazards*, vol. 59, p. 1145–1159.
- Moeys, J. (2012). *The Soil Texture Wizard: R Functions for Plotting, Classifying, Transforming and Exploring Soil Texture Data*. Lien internet du package R : <https://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/>. (Consulté le 18 octobre 2016).
- Moffett, K. B., Wolf, A., Berry, J. A., et Gorelick, S. M. (2010). « Salt marsh–atmosphere exchange of energy, water vapor, and carbon dioxide: Effects of tidal flooding and biophysical controls ». *Water Resources Research*, vol. 46, 18 p.
- Möller, I., Spencer, T., et French, J. R. (1996). « Wind wave dissipation over saltmarshes surfaces: preliminary results from Norfolk, England ». *Journal of Coastal Research*, vol. 12, no. 4, p. 1009-1016.
- Möller, I. (2006). « Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK East coast saltmarsh ». *Estuarine, coastal and shelf science*, vol. 69, no. 3, p. 337-351.
- Morton, R. A. (1988). « Interactions of storms, seawalls and beaches of the Texas coast ». *Journal of Coastal Research*, SI. 4, p. 113-134.

- Mwakumanya, A. M., Munyao, T. M., et Ucauwun, E. K. (2009). « Beach width analyses in beach erosion hazard assessment and management at Bamburi beach, Mombasa, Kenya ». *Journal of Geography and Regional Planning*, vol. 2, no. 2, p. 299–309.
- Nakashima, L. D., et Mossa, J. (1991). « Responses of natural and seawall backed beaches to recent hurricanes on the Bayou Lafourche headland, Louisiana ». *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 35, no. 2, p. 239-256.
- Neelamani, S., et Sandhya, N. (2004). « Wave reflection, run-up, run-down and pressures on plane, dentated and serrated seawalls ». *Coastal Engineering Journal*, vol. 46, no. 2, p. 141-169.
- Nelson, B. W., et Fink Jr., L. K. (1980). *Geological and botanical features of sand beach systems in Maine*. Maine Critical Areas Program, Maine State Planning Office Planning Report 54, 269 p.
- Neumeier, U., et Amos, C. L. (2006). « The influence of vegetation on turbulence and flow velocities in European salt-marshes ». *Sedimentology*, vol. 53, p. 259-277.
- Niedoroda, A. W., Swift, D., Hopkins, J. P., et Ma, C. M. (1984). « Shoreface morphodynamics on wave-dominated coasts ». *Marine Geology*, vol. 60, p. 331-354.
- Nordstrom, K. F. (2000). *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge: Cambridge University Press, 338 p.
- NRC. (2007). *Mitigating Shoreline Erosion along Sheltered Coasts*. Ocean Study Board, National Research Council. National Academies Press, Washington DC, 188 p.
- Occhietti, S. (1989). *Géologie quaternaire de la sous-région de la vallée du Saint-Laurent et des Appalaches*, dans Fulton, R. J. (dir.), *Le Quaternaire du Canada et du Groenland*. Commission géologique du Canada, Géologie du Canada 1. p. 374-407
- O’Connell, J. F. (2010), *Shoreline armoring impacts and management along the shores of Massachusetts and Kauai, Hawaii*, dans Shipman, H., Dethier, M. N., Gelfenbaum, G., Fresh, K. L., Dinicola, R.S. (dir), *Puget Sound Shorelines and the Impacts of Armoring—Proceedings of a State of the Science Workshop*, U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010-5254, p. 65-76.

- Ogawa, H., Dickson, M. E. et Kench P. S. (2011). « Wave transformation on a sub-horizontal shore platform, Tatapouri, North Island, New Zealand ». *Continental Shelf Research*, vol. 31, no. 14, p. 1409-1419.
- Ogawa, H., Kench, P. et Dickson, M. (2012). «Field Measurements of Wave Characteristics on a Near-Horizontal Shore Platform, Mahia Peninsula, North Island, New Zealand». *Geographical Research*, vol. 50, no. 2, p. 179-192.
- Owen, M. W. (1984). *Effectiveness of saltings in coastal defence*. Actes du colloque MAFF Conference of River and Coastal Engineers, Cranfield.
- Paskoff, R. (2012). *Les littoraux : Impacts des aménagements sur leur évolution* (3^e éd. Rév.). Paris, France, Armand Colin, 260 p.
- Patsch, K., et Griggs, G. B. (2006). *Littoral Cells, Sand Budgets, and Beaches: Understanding California's Shoreline*. Institute of Marine Sciences, University of California, Santa Cruz. 39 p.
- Pelletier M., R. Vaillancourt, S. Hébert, R. Greendale et Vigneault Y. (1990). *Habitats côtiers perturbés dans le réseau Saint-Laurent en aval de l'Île d'Orléans* : Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1754: ixt.,61 p.
- Phan, T.T., Gardiner, J.B., Capo, R.C., et Stewart, B.W. (2018). « Geochemical and multi-isotopic ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, $^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$) perspectives of sediment sources, depositional conditions, and diagenesis of the Marcellus Shale, Appalachian Basin, USA ». *Geochimica et Cosmochimica Acta* 222, p. 187-211.
- Pilkey, O. H. et Wright, H. L. (1988). « Seawalls versus beaches ». *Journal of Coastal Research*, SI. 4, p. 41-66.
- Pinot, J-P. (1998). *La gestion du littoral : Tome I – Littoraux tempérés : côtes rocheuses et sableuses*. Paris, France : Institut océanographique, 399 p.
- Pinsonnault, C. (2017). *Influence des caractéristiques morphosédimentologiques de l'estran sur l'érosion des côtes de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec*. Mémoire de maîtrise du programme de géographie, UQAR, Rimouski, 281 p. + Annexes
- Plant, N. G., et Griggs, G. B. (1992). « Interactions between nearshore processes and beach Morphology near a Seawall ». *Journal of Coastal Research*, vol. 8, no. 1, p. 183-200.

- Pratte, S., De Vleeschouwer, F., et Garneau, M. (2017). « Geochemical characterization (REE, Nd and Pb isotopes) of atmospheric mineral dust deposited in two maritime peat bogs from the St. Lawrence North Shore (eastern Canada) ». *Journal of Quaternary Science*, vol. 32, p. 617–627.
- Prodger, S., Russell, P., Davidson, M., Miles, J., et Scott, T. (2016). « Understanding and predicting the temporal variability of sediment grain size characteristics on high-energy beaches ». *Marine Geology*, vol. 376, p. 109-117.
- Pye, K., et Blott, S. J. (2004). « Particle size analysis of sediments, soils and related particulate materials for forensic purposes using laser granulometry ». *Forensic Science International*, vol. 144, no. 1, p. 19-27.
- Quintin, C., Bernatchez, P., et Jolivet, Y. (2013). *Impacts de la tempête du 6 décembre 2010 sur les côtes du Bas-Saint-Laurent et de la baie des Chaleurs*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, Février 2013, Volume I : 48p. + Volume II : 170 p.
- Quintin, C., Arsenault, E., et Bernatchez, P. (2016). *Caractérisation côtière du territoire de la Table de concertation régionale, zone de Québec*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à la Communauté Métropolitaine du Québec (CMQ), 50 p. + annexes.
- Reed, D. J., Spencer, T., Murray, A. L., French, J. R., et Leonard, L. (1999). « Marsh surface sediment deposition and the role of tidal creeks: implications for created and managed coastal marshes ». *Journal of Coastal Conservation*, vol. 5, no. 1, p. 81–90.
- Rhein, M., et al. (2013). *Observations: Oceans, in Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, dans IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Robitaille, A., et Saucier, J.-P. (1998). *Paysages régionaux du Québec méridional*. Les publications du Québec. 213 p. + 1 carte.

- Roche Itée. (2010). *Stabilisation des berges en bordure de routes à l'Isle-aux-Coudres (N° 57146-100)*. Étude d'impact sur l'environnement présenté au Ministère des Transports du Québec et à la municipalité de l'Isle-aux-Coudres. Québec. 107 p.
- (2011). *Analyse des solutions en érosion côtière dans la Baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine, Étude en hydraulique maritime*, N° 61933. Québec, 219 p. + annexes.
- (2013). *Analyse et impacts des variants de protection de berges envisagés (N° 102197.001)*. Rapport final présenté au Ministère du Développement durable, de l'environnement, de la Faune et des parcs, Québec. 47 p. + annexes.
- Rodrigues, C. G., Ceman, J. A., et Vilks, G. (1993). « Late Quaternary paleoceanography of deep intermediate water mass of Gaspé Peninsula, Gulf of St. Lawrence foraminiferal evidence ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 30, p 1390-1403.
- Rondot, J. (1968). « Nouvel impact météoritique fossile? La structure semi-circulaire de Charlevoix ». *Canadian Journal of Earth Sciences*, vol. 5, p. 1305-1317.
- Rondot, J. (1969). *Rapport préliminaire sur la région de la rivière Malbaie*. Ministère des Richesses Naturelles, 576 p.
- Ropars, Y. (2007). *Érosion des berges : Études techniques et d'opportunité*. Référence : 2432-01-24. Rapport technique remis à la ville de Sept-Îles. 55 p. + annexes.
- Rosati, J-D. (2005). « Concepts in Sediment Budgets ». *Journal of Coastal Research*. vol. 212, p. 307-322.
- Ruggiero, P. (2004). « Wave run-up on a high-energy dissipative beach ». *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, no. 6, p. 1–12.
- Runyan, K., et Griggs, G. B. (2003). « The effects of armorings seacliffs on the natural sand supply to the beaches of California ». *Journal of Coastal Research*, vol. 19, no. 2, p. 336-347.
- Savard, J.-P., Bernatchez, P., Morneau, F., et Saucier, F. (2009). « Vulnérabilité des communautés côtières de l'est du Québec aux impacts des changements climatiques ». *La Houille Blanche*, vol. 2, p. 59-66.

- Senneville, S., St-Onge, G., Drouin, S., Dumont, D., Bihan-Poudec, A-C., Belemalem, Z., Corriveau, M., Bernatchez, P., Bélanger, S., Tolszczuk-Leclerc, S. et Villeneuve, R. (2014). *Rapport final : Modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques*. ISMER-UQAR, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, 373 p.
- Shi, Z., Hamilton, L. J., et Wolanski, E. (2000). « Near-bed currents and suspended sediment transport in saltmarsh canopies ». *Journal of Coastal Research*, vol. 16, p. 909-914.
- Silverberg, N. et Sundby, B. (1979). « Observations in the turbidity maximum of the St. Lawrence Estuary », *Canadian Journal of Earth Science*, vol. 16, no. 4, p. 939-950.
- Stancheva, M., et Marinski, J. (2007). *Coastal defence activities along the Bulgarian Black Sea coast – methods for protection or degradation? Coastal structures 2007*. Actes du 5^e colloque international, Franco, L., Tomasicchio, G., Lamberti, A. (dir), Venice, Italie, p. 480-489.
- Statistique Canada. (2017). *Profil du recensement*. Recensement de 2016. Produit no 98-316-X2016001 au catalogue de Statistique Canada. Ottawa.
- Stone, G. W., et Orford, J. D. (2004). « Storms and their significance in coastal morpho-sedimentary dynamics ». *Marine Geology*, vol. 210, p. 1-5.
- Stumpf, R. P. (1983). « The process of sedimentation on the surface of a salt marsh ». *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 17, p. 495–508.
- Sutherland, J., Brampton, A., Motyka, G., Blanco, B., et Whitehouse, R. (2003). *Beach lowering in front of coastal structures*. Londres, Joint Defra/EA Flood and Coastal Erosion Risk Management R&D Programme, 101 p.
- Svendsen, L. A. (1984). « Mass flux and undertow in a surf zone ». *Coastal Engineering*: vol. 8, p. 347-365.
- Tait, J. F., et Griggs, G. B. (1990). « Beach response to the presence of a seawall ». *Shore and Beach*, vol. 58, p. 11-28.
- Terchunian, A. V. (1988). « Permitting coastal armouring structures: can seawalls and beaches coexist? ». *Journal of Coastal Research*, SI. 4, p. 65-75.

- Trenhaile, A. S. (1987). *The Geomorphology of Rock Coasts*. Coll. Oxford Research Studies in Geography. Oxford, Oxford University Press, 384 p.
- Trenhaile, A. S. et Kanyaya, J. I. (2007). « The Role of Wave Erosion on Sloping and Horizontal Shore Platforms in Macro- and Mesotidal Environments ». *Journal of Coastal Research*, vol. 23, no. 2, p. 298–309.
- Troude, J. P. et Sérodes, J. B. (1988). « Le rôle des glaces dans le régime morpho-sédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent ». *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 15, p. 348-354.
- US Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual: Volume 1, chap.5: Planning Analysis*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, p. 1-72.
- Van Proosdij, D., Ollerhead, J., et Davidson-Arnott, R. G. D. (2000). *Controls on suspended sediment deposition over single tidal cycles in a macrotidal saltmarsh, Bay of Fundy, Canada*, dans Pye K. et Allen J. R. L., (dir) *Coastal and Estuarine Environments: Sedimentology, Geomorphology and Geoarchaeology*, Geological Society of London Special Publication., vol. 175, p. 43–57.
- Van-Wierst, S. (2012). *Développement et application d'un système mobile de laser terrestre pour quantifier le bilan sédimentaire des plages*. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Rimouski, 89 p.
- Van-Wierst, S., et Bernatchez, P. (2016). *Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers : Rapport final*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, mars 2016, 49 p. + Annexes.
- Vigeant, G. (1984). *Cartes climatologiques du Saint-Laurent*. Environnement Canada, Service de l'Environnement atmosphérique.
- Wang, F. C., Lu, T., et Sikora, W. B. (1993). « Intertidal marsh suspended sediment transport processes, Terrebonne Bay, Louisiana, U.S.A ». *Journal of Coastal Research*, vol. 9, p. 209–220.
- Walton, T. L., et Sensabaugh, W. (1979). *Seawall Design on the Open Coast*. Floride, University of Florida press, 24 p.
- Wayne, C. J. (1976). « The effects of sea and marsh grass on wave energy ». *Coastal Research Notes*, vol. 14, p. 6-8.

- Weigel, R. L. (2002a). « Seawalls, seacliffs, beachrock: what beach effects? Part 1 ». *Shore and Beach*, vol. 70, no. 1, p. 17–27.
- (2002b). « Seawalls, seacliffs, beachrock: what beach effects? Part 2 ». *Shore and Beach*, vol. 70, no. 2, p. 13–22.
- (2002c). « Seawalls, seacliffs, beachrock: what beach effects? Part 3 ». *Shore and Beach*, vol. 70, no. 3, p. 2–14.
- Wright, L. D., Boon J. D., Kim S. C, et List J. H. (1991). « Modes of cross-shore sediment transport on the shoreface of the Middle Atlantic Bight ». *Marine Geology*, vol. 96, p. 19-52.

ANNEXES

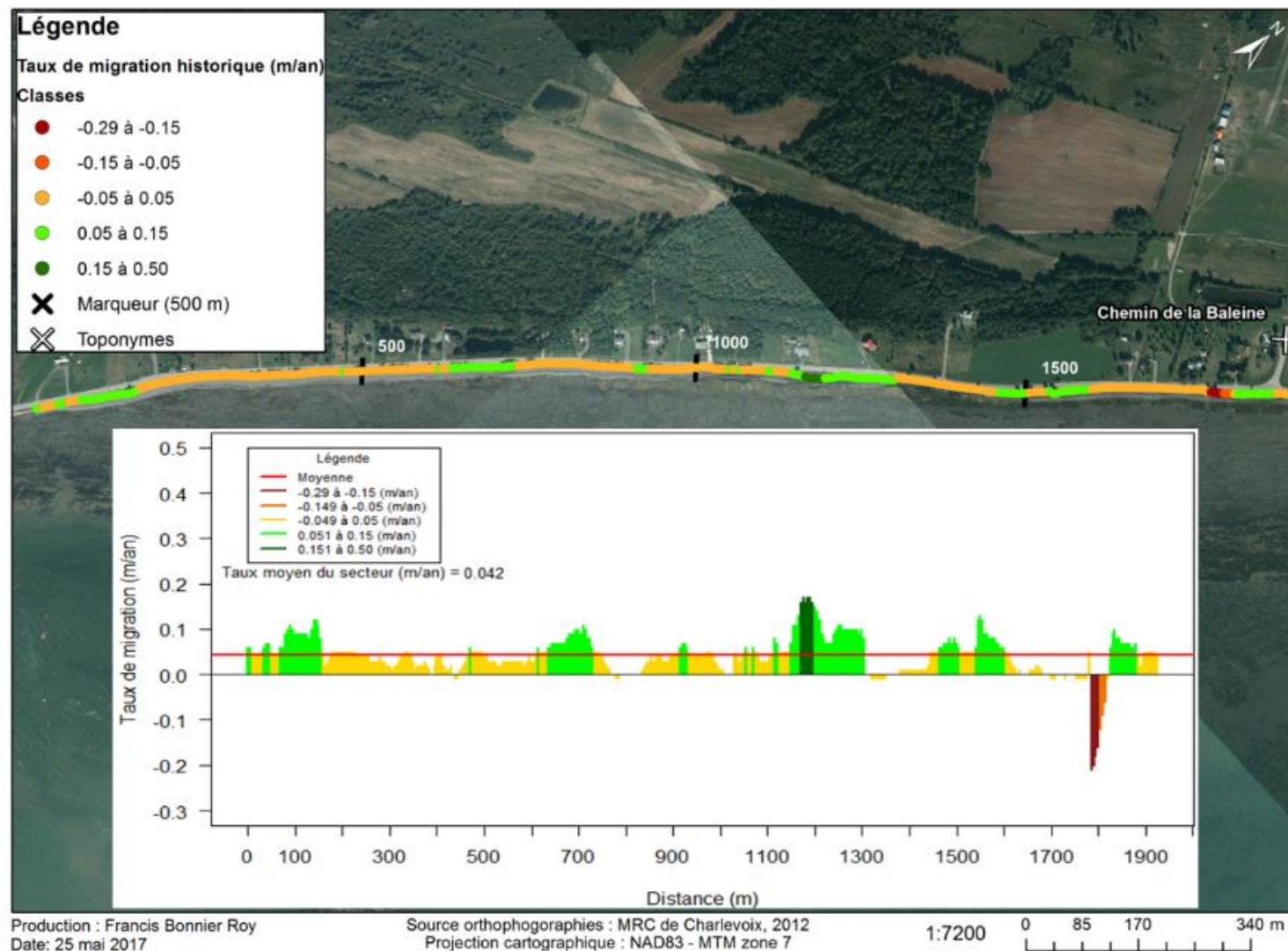
Annexe 1. Liste des échantillons utilisés pour les analyses minéralogiques.

Nom de l'échantillon	Date	Secteur de l'île	Emplacement de l'échantillon
P1-HE1	Août 2014	Sud	Plage
P1-HE1	Mai 2015	Sud	Plage
P1-HE1	Novembre 2016	Sud	Plage
P2-HE1	Août 2014	Sud	Plage
P2-HE1	Mai 2015	Sud	Plage
P2-HE1	Novembre 2016	Sud	Plage
P3-HE1	Août 2014	Sud	Plage
P3-HE1	Mai 2015	Sud	Plage
P3-HE1	Novembre 2016	Sud	Plage
P4-HE1	Août 2014	Sud	Plage
P4-HE1	Mai 2015	Sud	Plage
P4-HE1	Novembre 2016	Sud	Plage
P5-HE1	Août 2014	Nord-est	Plage
P5-HE1	Mai 2015	Nord-est	Plage
P5-HE1	Novembre 2016	Nord-est	Plage
P7-HE1	Août 2014	Nord-est	Plage
P7-HE1	Mai 2015	Nord-est	Plage
P7-HE1	Novembre 2016	Nord-est	Plage
P8-HE1	Août 2014	Sud	Plage
P8-HE1	Mai 2015	Sud	Plage
P8-HE1	Novembre 2016	Sud	Plage
P1-BE1	Août 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P1-BE1	Mai 2016	Sud	Plateforme rocheuse

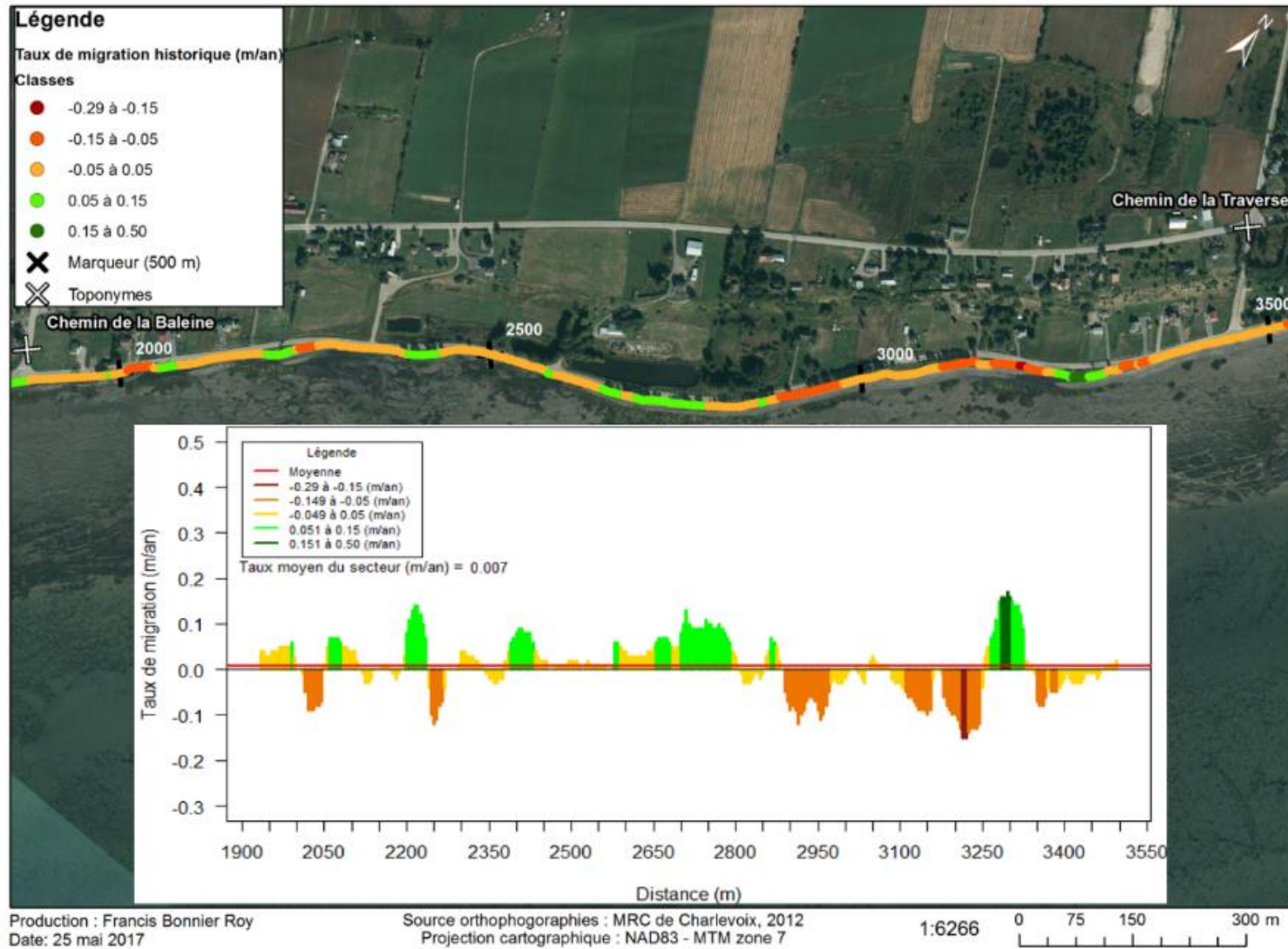
P1-BE1	Novembre 2014	Sud	Plateforme rocheuse
P1-BE3	Août 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P1-BE3	Octobre 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P2-BE1	Août 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P2-BE1	Mai 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P2-BE1	Novembre 2014	Sud	Plateforme rocheuse
P2-BE3	Août 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P2-BE3	Octobre 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P3-BE1	Mai 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P3-BE1	Novembre 2014	Sud	Plateforme rocheuse
P3-BE3	Août 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P3-BE3	Octobre 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P4-BE1	Août 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P4-BE1	Mai 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P4-BE1	Novembre 2014	Sud	Plateforme rocheuse
P4-BE3	Août 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P4-BE3	Octobre 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P5-BE1	Août 2015	Nord-est	Plateforme rocheuse
P5-BE1	Mai 2016	Nord-est	Plateforme rocheuse
P5-BE1	Novembre 2014	Nord-est	Plateforme rocheuse
P5-BE3	Août 2016	Nord-est	Plateforme rocheuse
P5-BE3	Octobre 2015	Nord-est	Plateforme rocheuse
P7-BE1	Août 2015	Nord-est	Plateforme rocheuse
P7-BE1	Mai 2016	Nord-est	Plateforme rocheuse
P7-BE1	Novembre 2014	Nord-est	Plateforme rocheuse
P7-BE3	Août 2016	Nord-est	Plateforme rocheuse
P7-BE3	Octobre 2015	Nord-est	Plateforme rocheuse
P8-BE1	Août 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P8-BE1	Mai 2016	Sud	Plateforme rocheuse

P8-BE1	Novembre 2014	Sud	Plateforme rocheuse
P8-BE3	Août 2016	Sud	Plateforme rocheuse
P8-BE3	Octobre 2015	Sud	Plateforme rocheuse
P1-BE5	Août 2016	Sud	Sable-vase
P1-BE5	Octobre 2015	Sud	Sable-vase
P2-BE4	Août 2016	Sud	Sable-vase
P2-BE4	Octobre 2015	Sud	Sable-vase
P3-BE5	Août 2016	Sud	Sable-vase
P3-BE5	Octobre 2015	Sud	Sable-vase
P4-BE5	Août 2016	Sud	Sable-vase
P4-BE5	Octobre 2015	Sud	Sable-vase
P8-BE5	Août 2016	Sud	Sable-vase
P8-BE5	Octobre 2015	Sud	Sable-vase
CORDON-05	Août 2014	Sud	Cordon de basse mer
P1-CORDON	Août 2014	Sud	Cordon de basse mer
P2-CORDON	Août 2014	Sud	Cordon de basse mer
P3-CORDON(2)	Mai 2015	Sud	Cordon de basse mer
P4-CORDON	Mai 2016	Sud	Cordon de basse mer
P8-CORDON	Mai 2015	Sud	Cordon de basse mer
OUEST-1	Mai 2015	Ouest	Pointe ouest
PTE-11	Mai 2015	Nord-est	Pointe rocheuse est
PTE-13	Mai 2015	Nord-est	Pointe rocheuse est
PTE-2	Mai 2015	Nord-est	Pointe rocheuse est
PTE-5	Mai 2015	Nord-est	Pointe rocheuse est
PTE-7	Mai 2015	Nord-est	Pointe rocheuse est
PTE-8	Mai 2015	Nord-est	Pointe rocheuse est
AFF-4-1	Août 2016	Sud	Roc Plateforme rocheuse
AFFroc-1	Août 2016	Nord-ouest	Falaise
AFFroc-3	Août 2016	Nord-ouest	Falaise
GEO-2	Août 2016	Sud	Grand Pilier (Cordon)
GEO-7	Août 2016	Sud	Roc du Cordon de basse mer

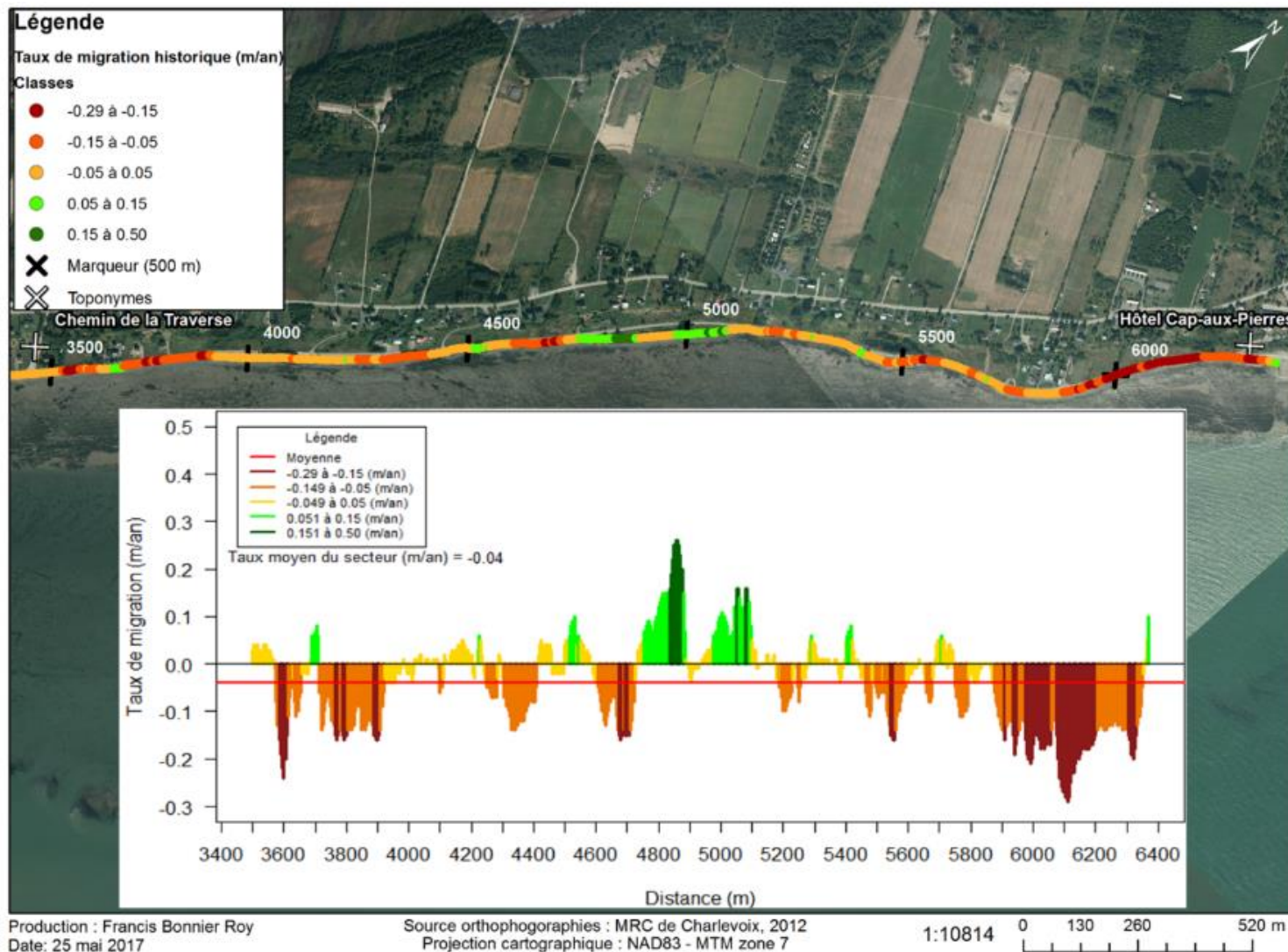
Annexe 2. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 1, côte sud.



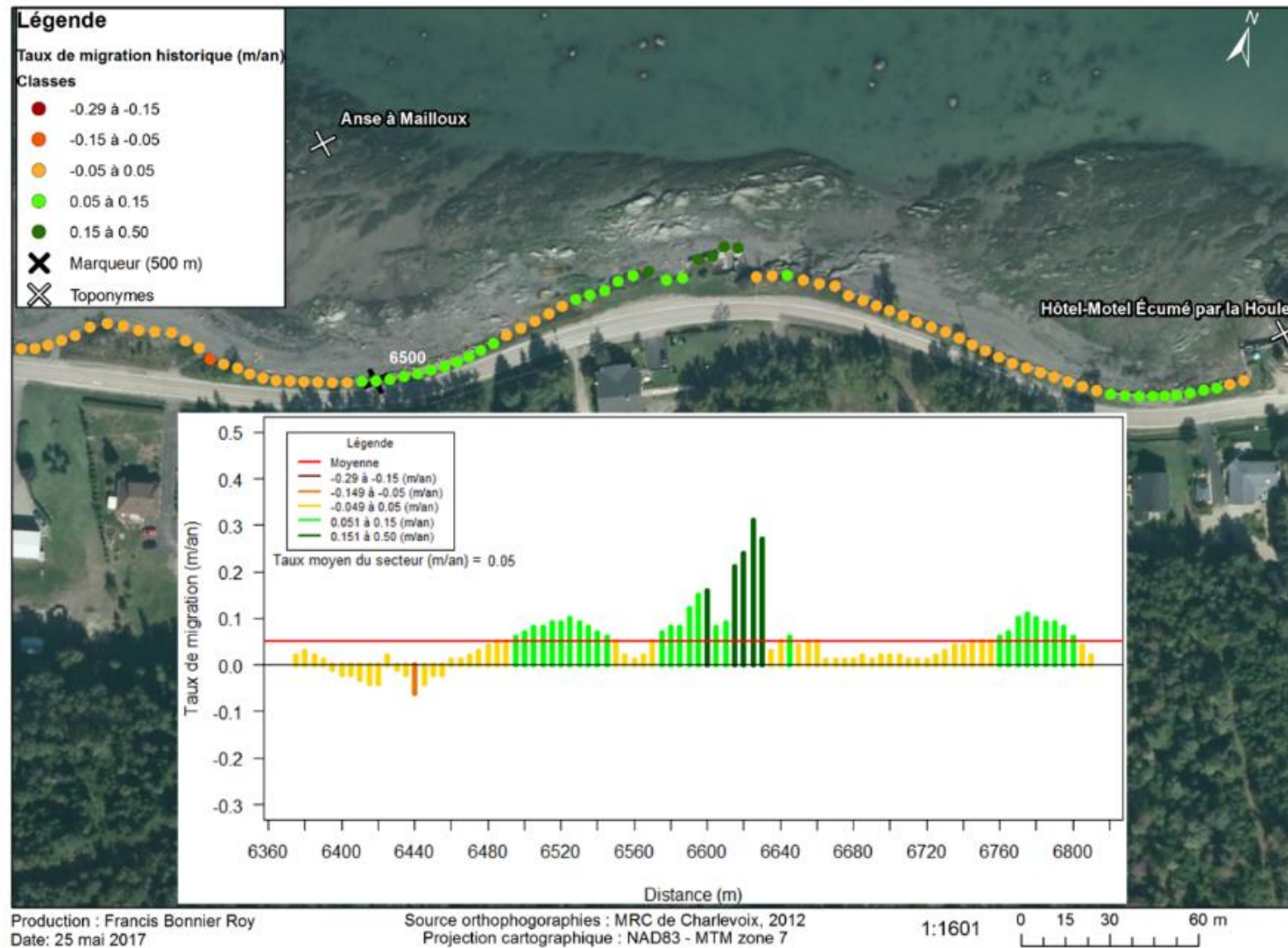
Annexe 3. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 2, côte sud.



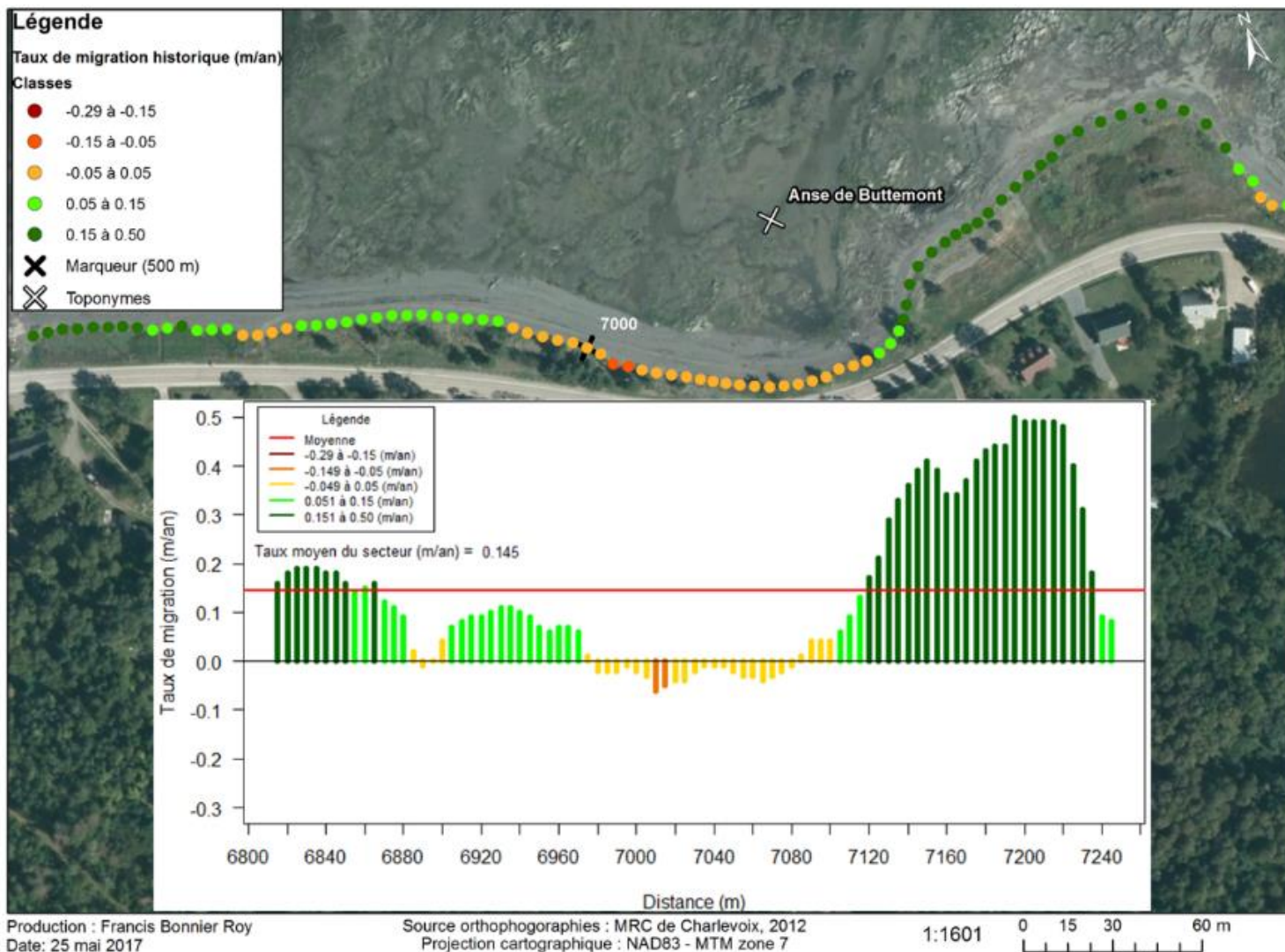
Annexe 4. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 3, côte sud.



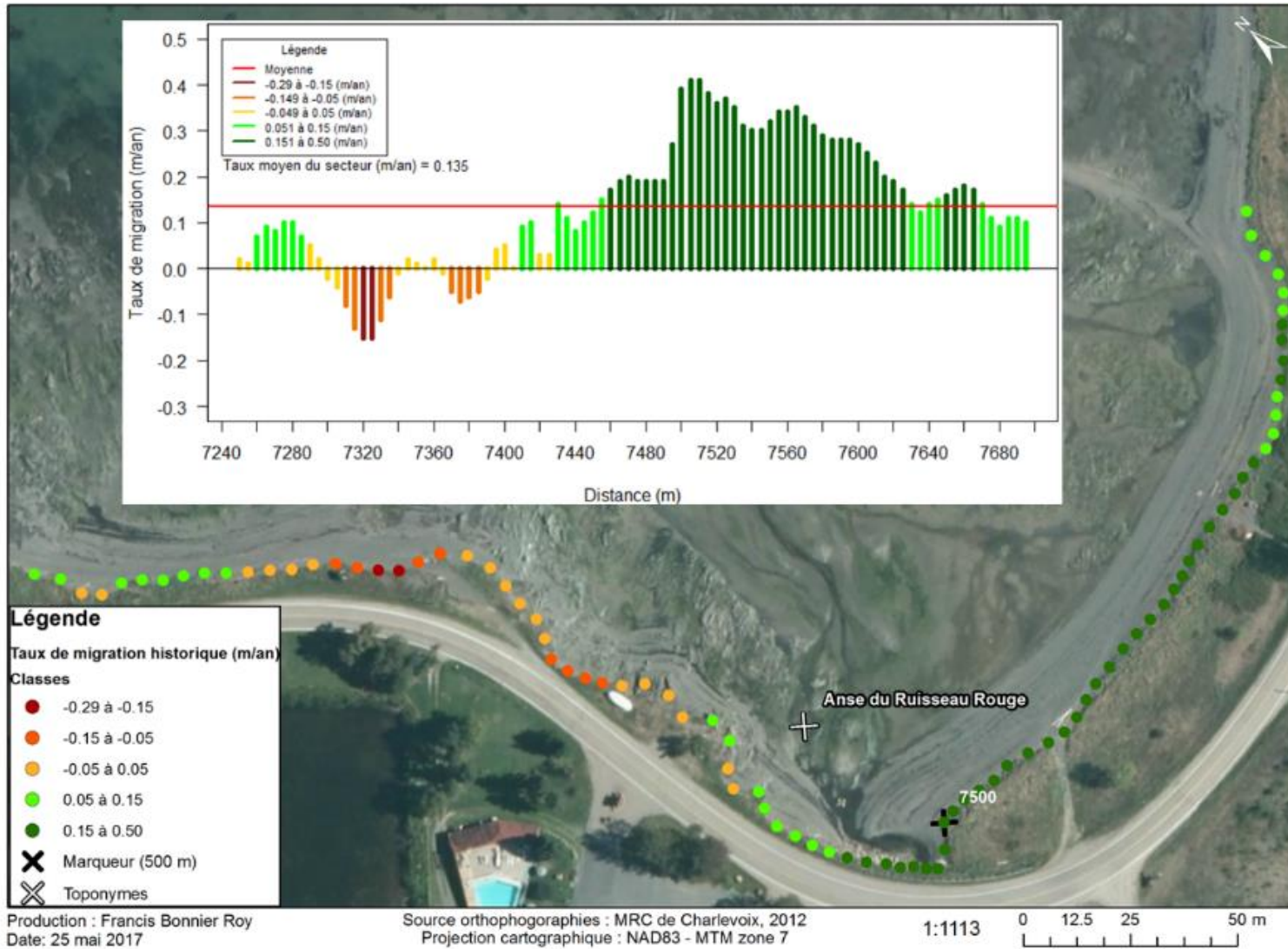
Annexe 5. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 4, côte nord-est.



Annexe 6. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 5, côte nord-est.



Annexe 7. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 6, côte nord-est.



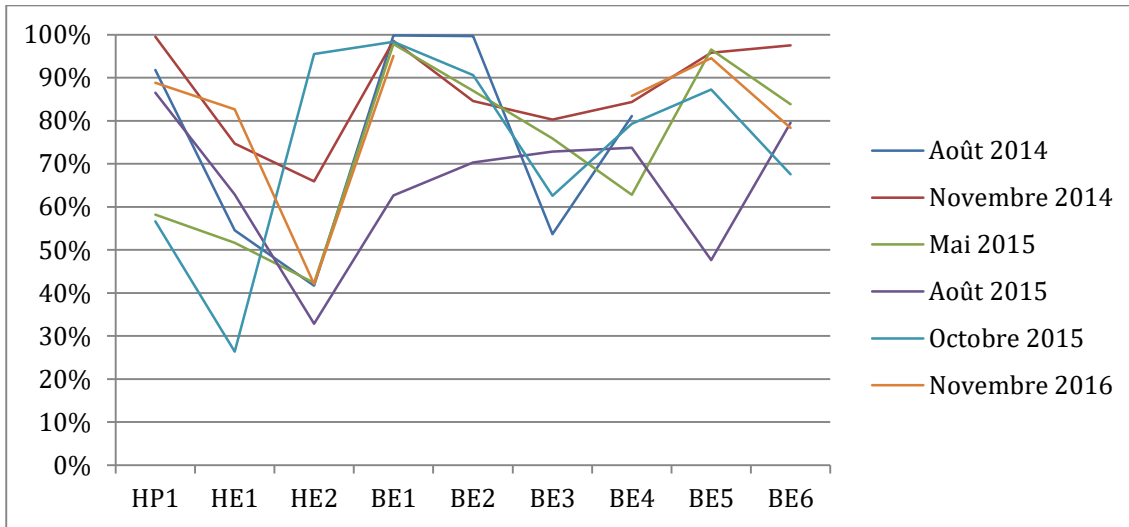
Annexe 8. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 1 (Enroché en 2014).



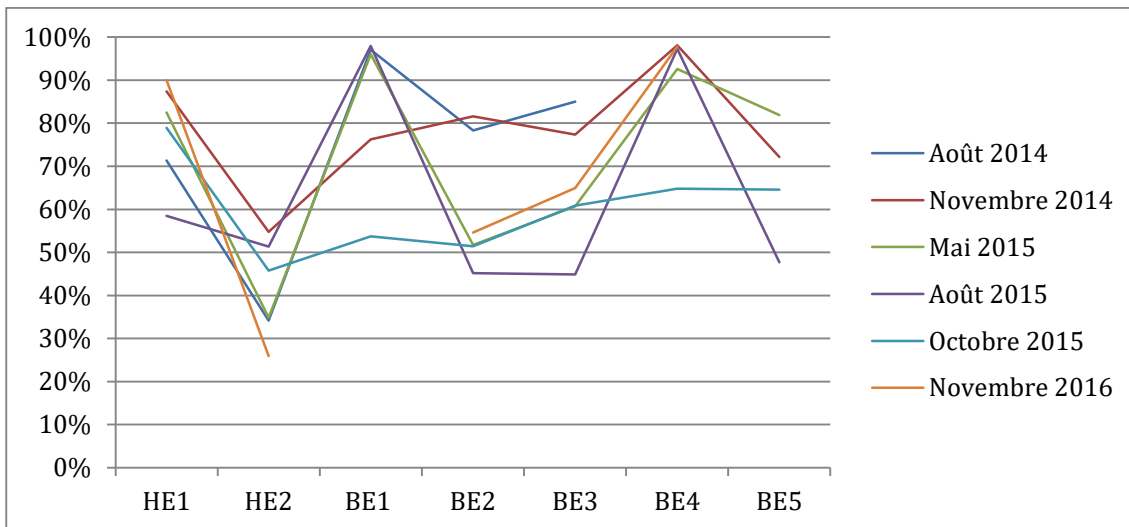
Annexe 9. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 2 (Naturel).



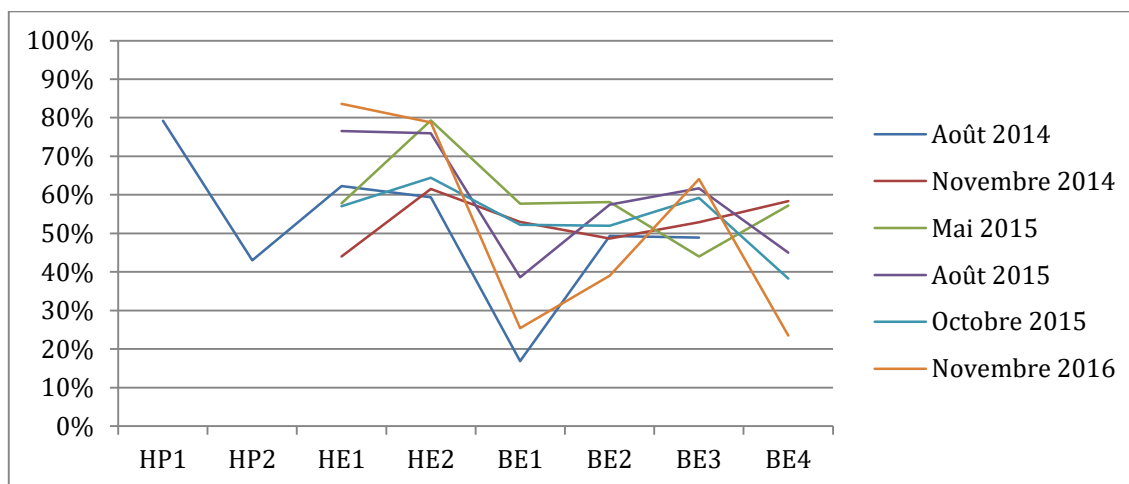
Annexe 10. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 3 (Naturel)



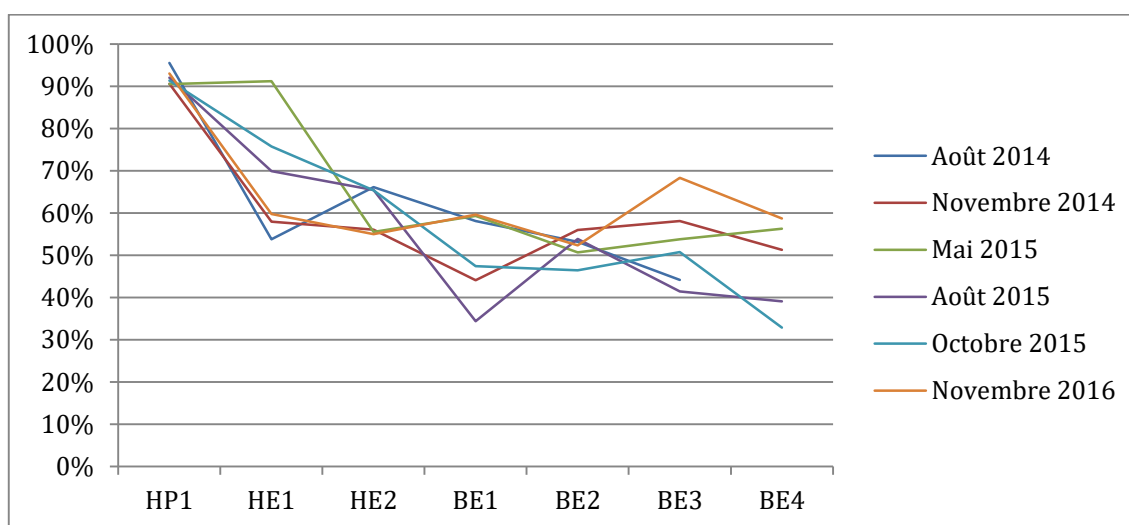
Annexe 11. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 4 (Déjà artificiel en 2014).



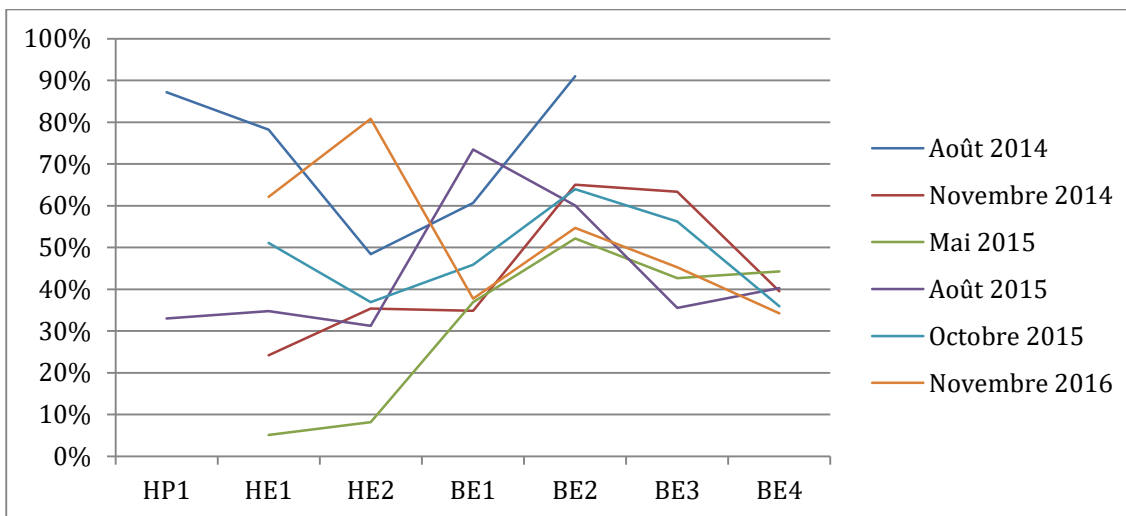
Annexe 12. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 5 (Encoché en 2014).



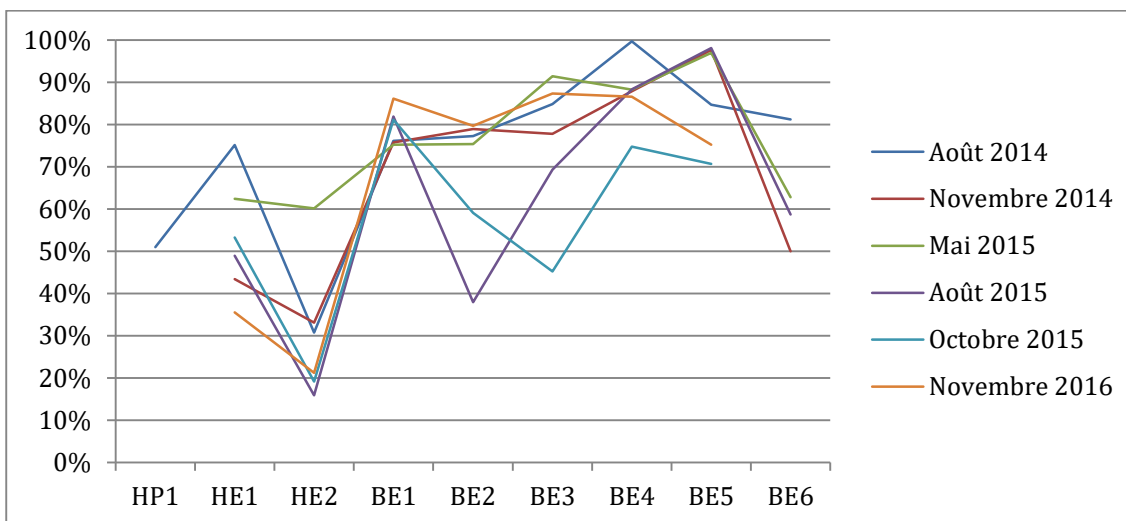
Annexe 13. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 6 (Naturel).



Annexe 14. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 7 (Enroché en 2014).



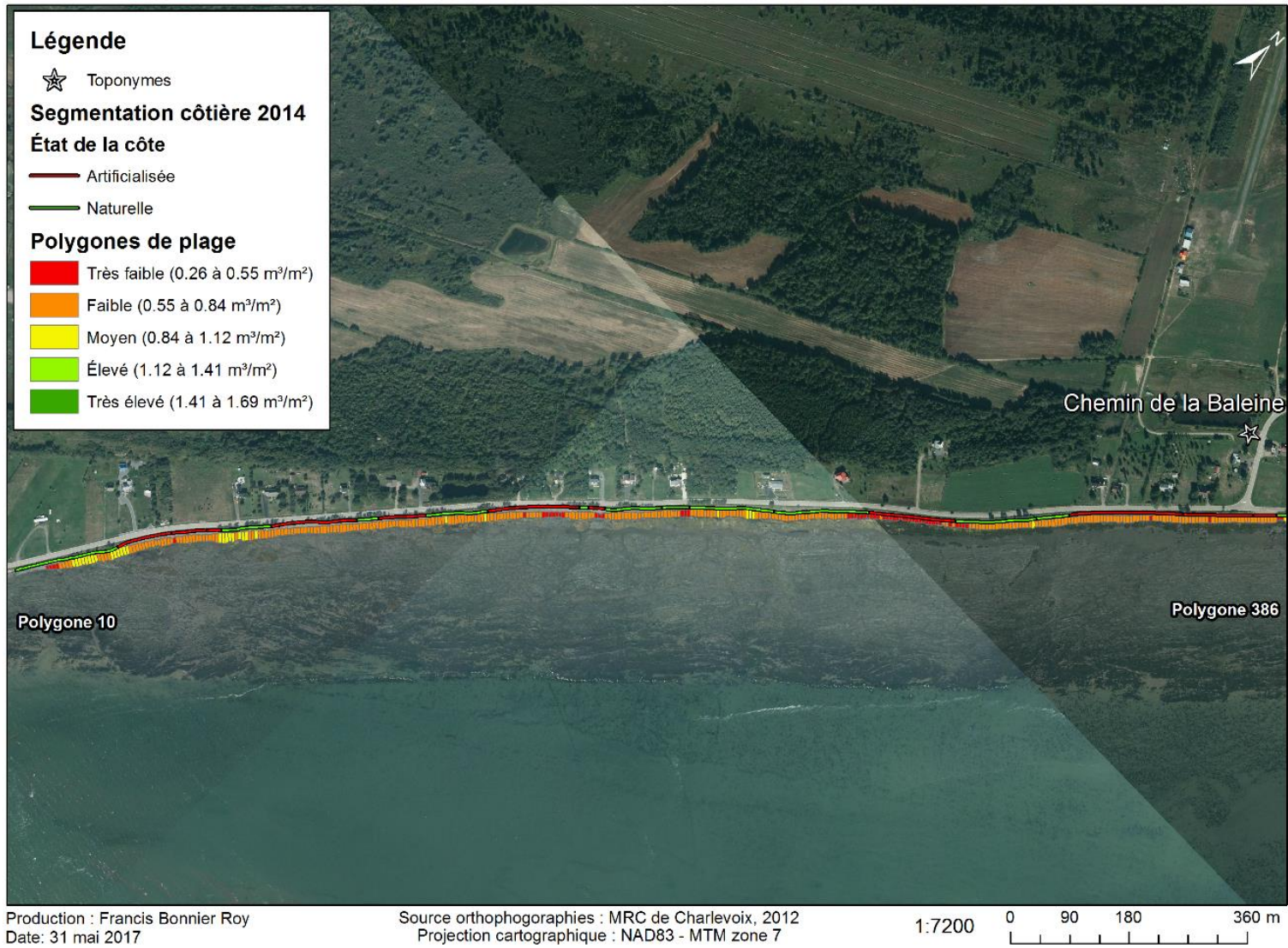
Annexe 15. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 8 (Enroché en 2014).



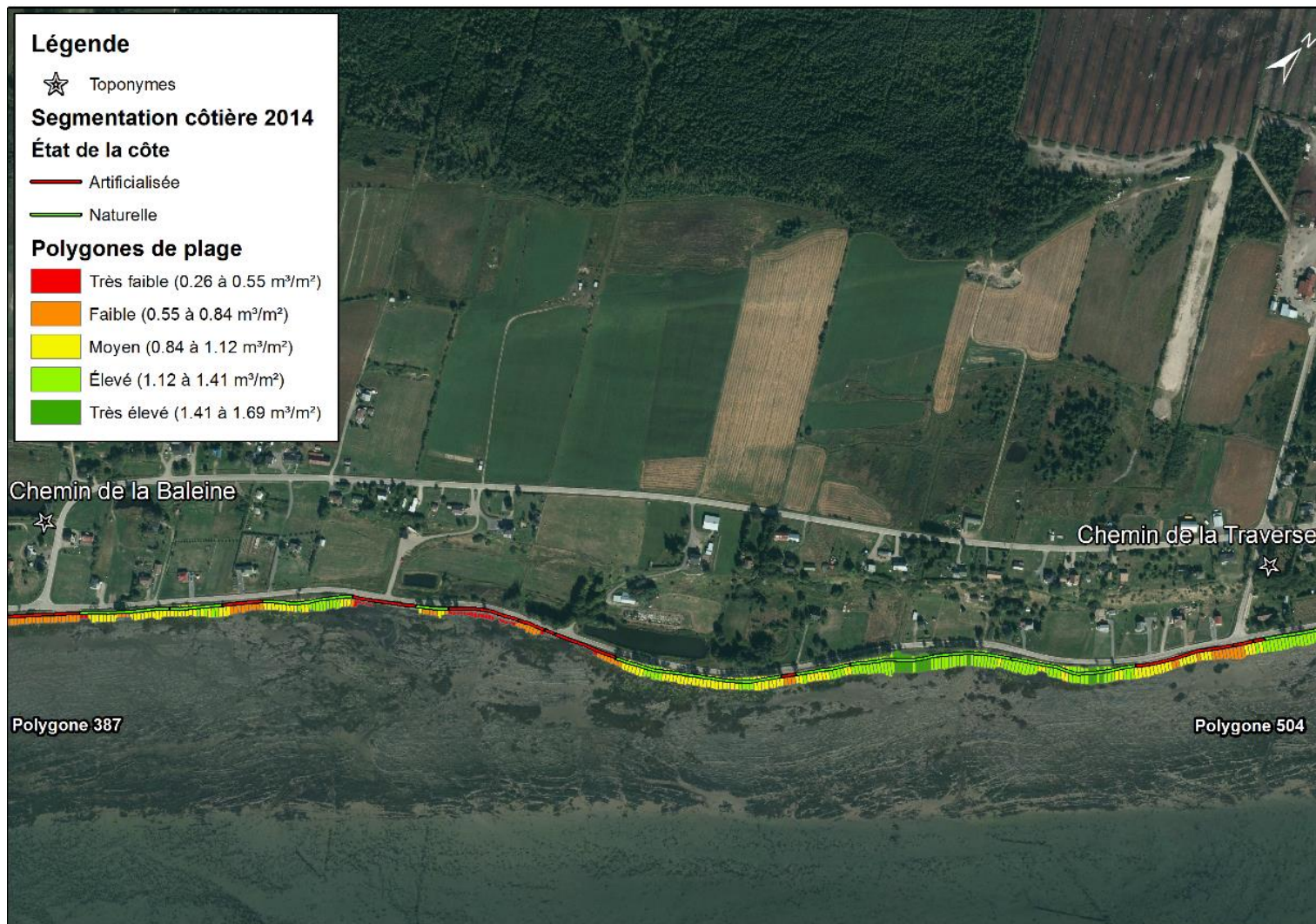
Annexe 16. Volumes de plage (m³/m²) du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).



Annexe 17. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 1).



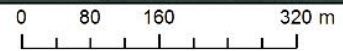
Annexe 18. Volumes de plage (m³/m²) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 2).



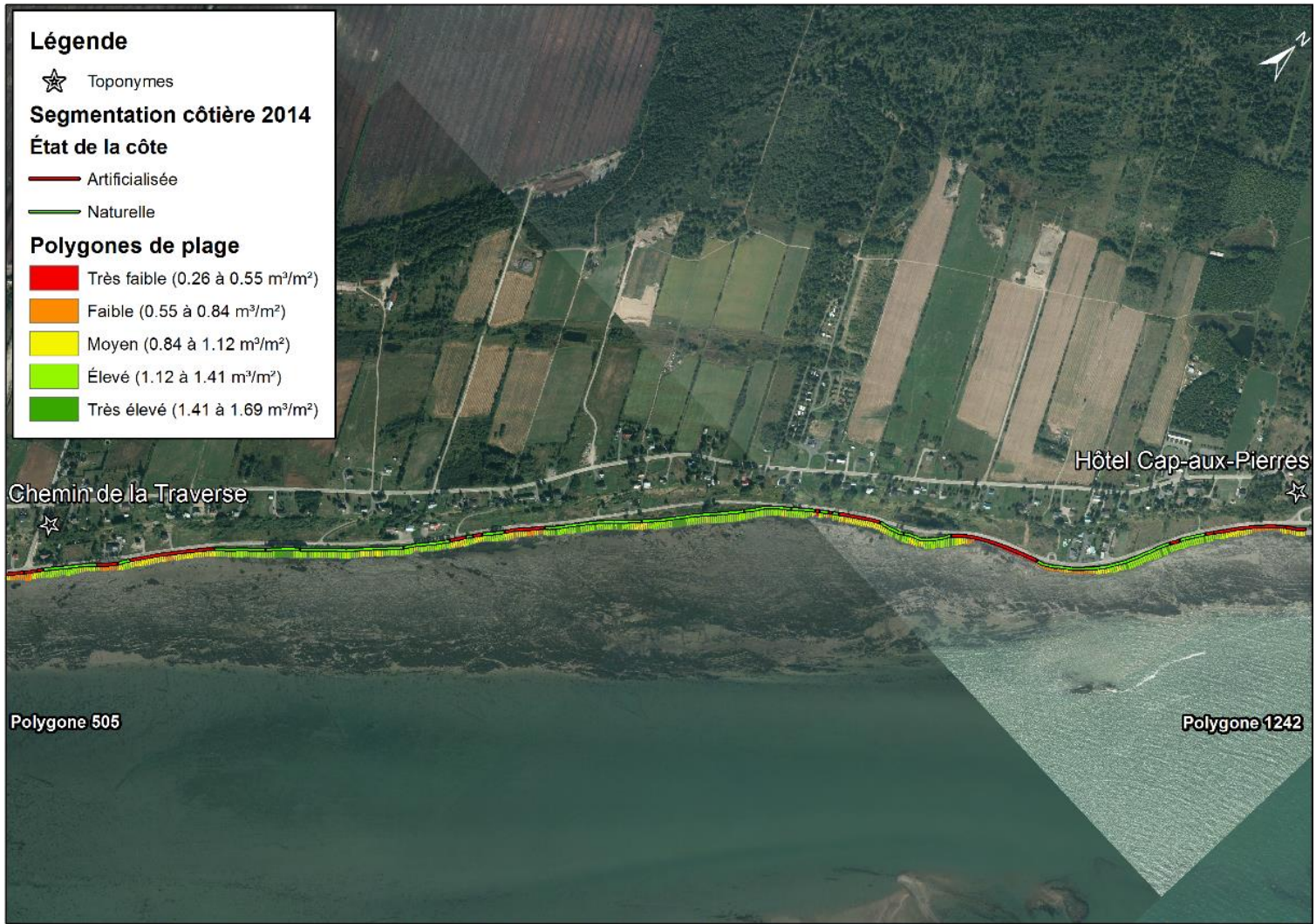
Production : Francis Bonnier Roy
Date : 31 mai 2017

Source orthophotographies : MRC de Charlevoix, 2012
Projection cartographique : NAD83 - MTM zone 7

1:6500



Annexe 19. Volumes de plage (m³/m²) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 3).

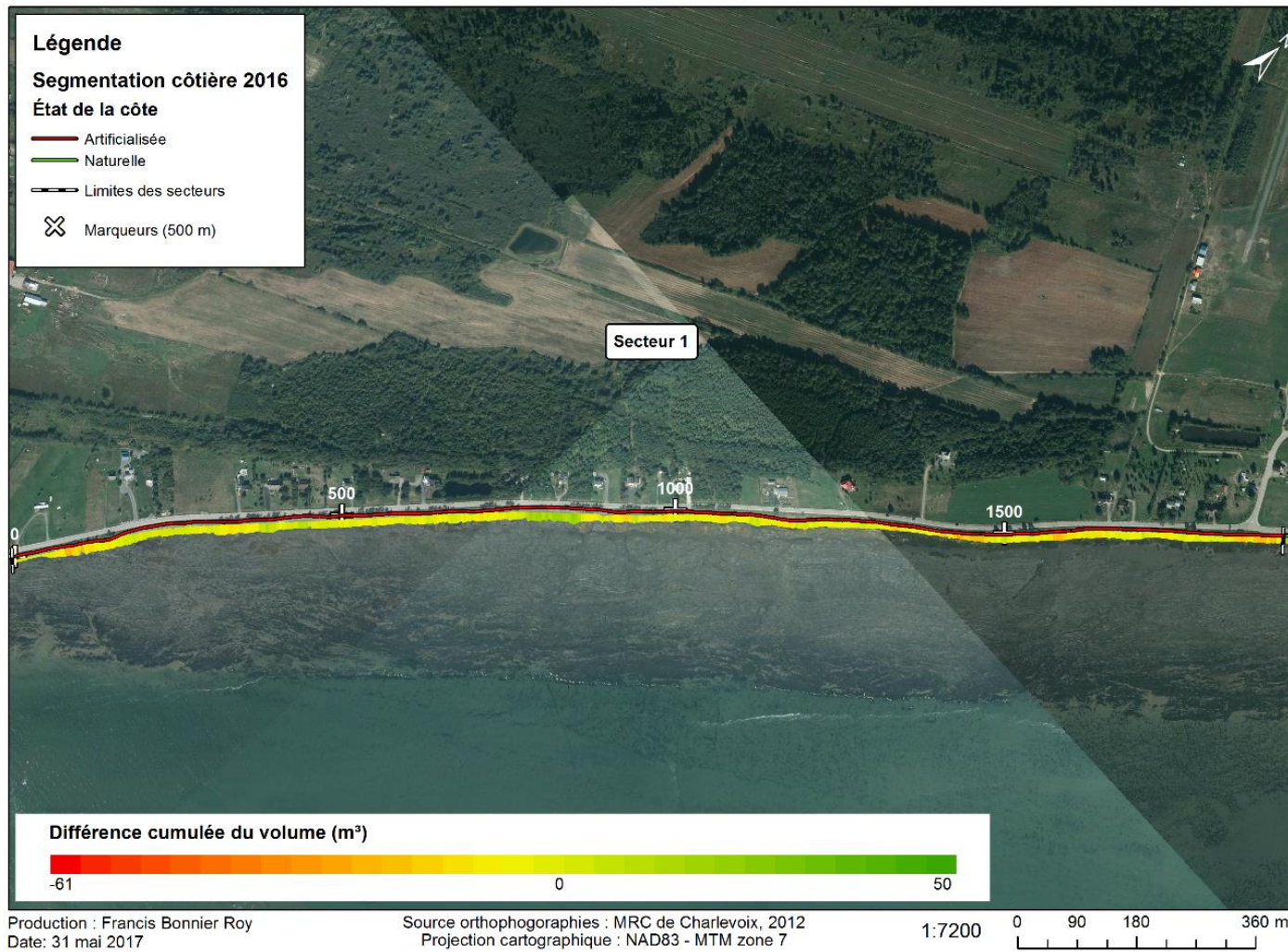


Production : Francis Bonnier Roy
Date: 31 mai 2017

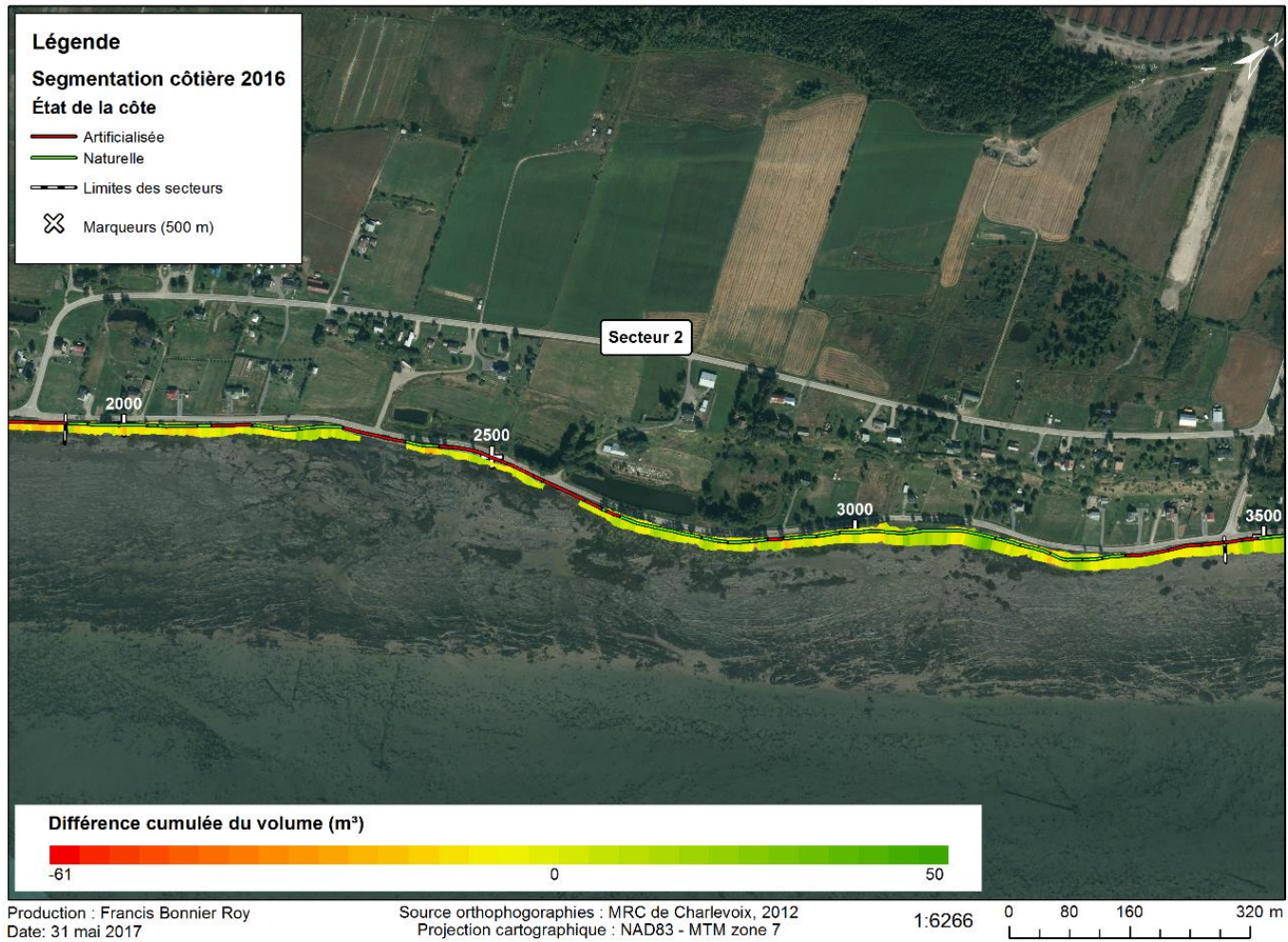
Source orthophogoraphies : MRC de Charlevoix, 2012
Projection cartographique : NAD83 - MTM zone 7

1:10500 0 135 270 540 m

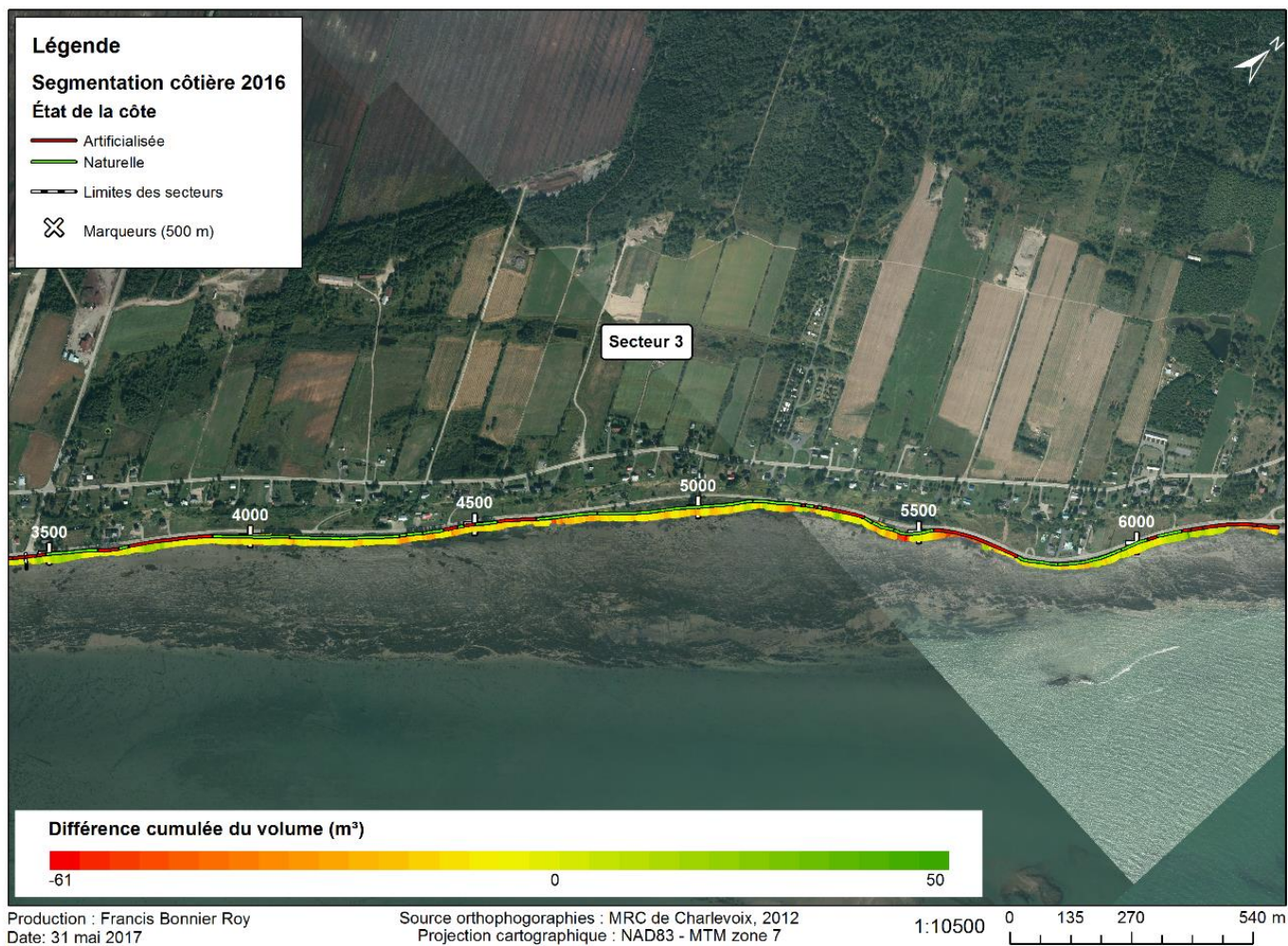
Annexe 20. Différences cumulées des volumes (m³) de plage du secteur 1 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.



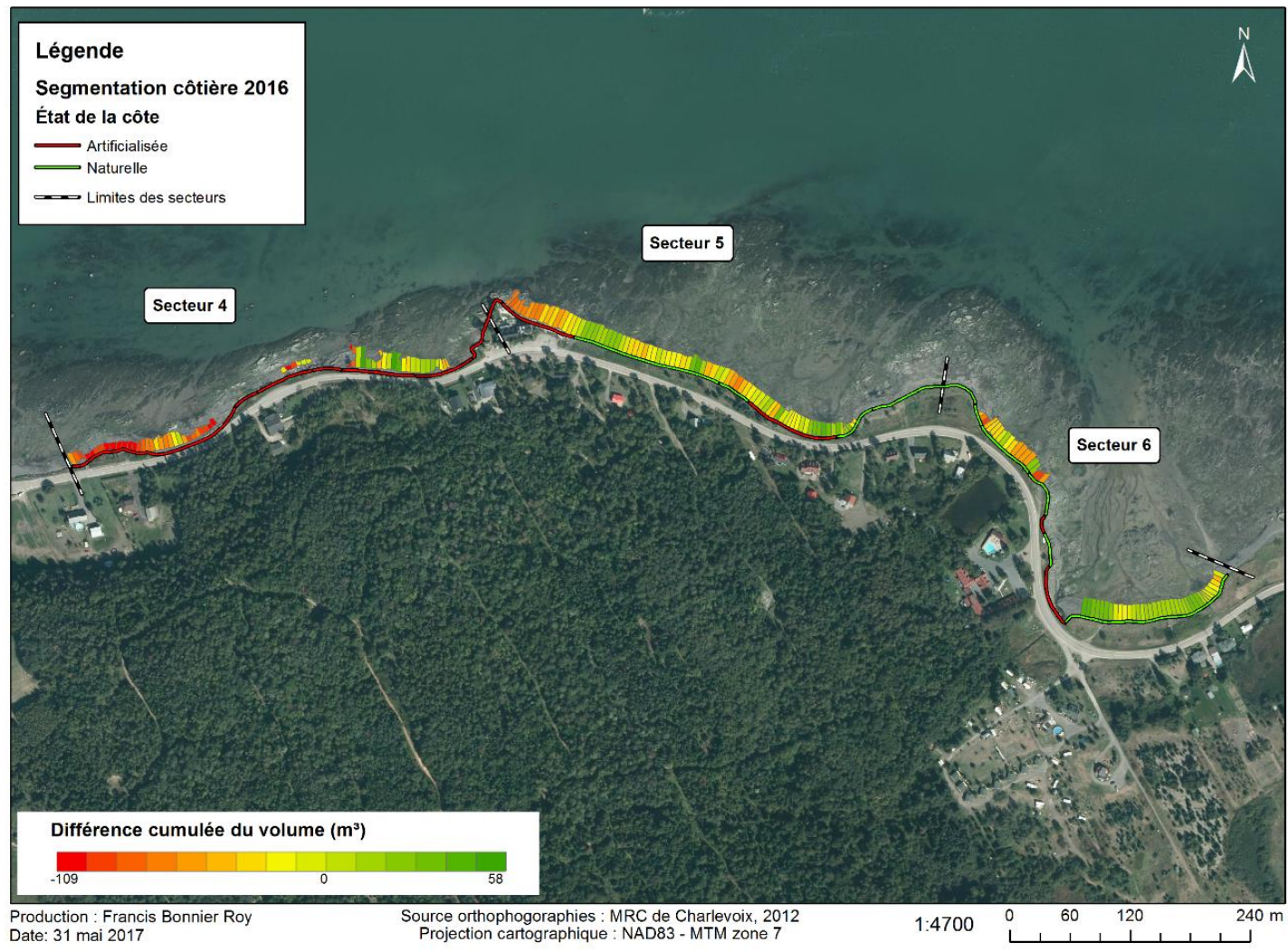
Annexe 21. Différences cumulées des volumes (m³) de plage du secteur 2 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.



Annexe 22. Différences cumulées des volumes (m³) de plage du secteur 3 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.



Annexe 23. Différences cumulées des volumes (m³) de plage des secteurs 4,5 et 6 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.



Annexe 24. Interprétation de l'évolution surfacique des herbiers entre 2014 et 2015.

Herbier	Évolution de la superficie	Emprunte de la superficie	Distance du déplacement (m) 2014-2015	Direction de la croissance végétale
1	11%	92%	0,5	Sud-Ouest
2	13%	100%	0,2	Nord-Est
3	0%	92%	0,1	Sud-Ouest
4	-33%	63%	1,0	Nord-Est
5	-1%	93%	0,0	Nord-Ouest
6	12%	98%	1,0	Nord-Est
7	8%	90%	0,4	Nord-Ouest
8	10%	91%	0,8	Sud-Est
9	2%	93%	0,2	Sud-Est
10	-4%	88%	0,5	Nord-Est
11	16%	93%	1,0	Sud-Ouest
12	1%	96%	0,8	Nord-Est
13	-1%	94%	0,9	Sud-Ouest
14	8%	97%	0,6	Sud-Ouest
15	0%	93%	3,1	Nord-Est
16	-3%	92%	1,4	Nord-Est
17	0%	94%	1,1	Nord-Est

18	20%	91%	0,8	Nord-Est
19	14%	88%	0,6	Sud-Ouest
20	9%	98%	0,1	Nord-Ouest
21	18%	98%	0,2	Sud-Ouest
22	-24%	72%	0,8	Nord-Est
23	2%	96%	0,6	Sud-Ouest
24	20%	97%	0,1	Nord-Ouest
25	17%	98%	0,1	Nord-Est
26	14%	99%	0,4	Nord-Ouest
27	16%	97%	1,2	Nord-Est
28	-10%	90%	0,2	Sud-Ouest
29	-32%	63%	3,4	Nord-Est

Annexe 25. Interprétation de l'évolution surfacique des herbiers entre 2015 et 2016.

Herbier	Évolution de la superficie	Différence de l'emprise surfacique	Distance du déplacement (m)	Direction de la croissance végétale
1	14%	95%	0,7	Sud-Ouest
2	5%	99%	0,2	Nord-Est
3	35%	100%	0,1	Sud-Est
4	22%	94%	0,4	Nord-Est
5	29%	89%	0,5	Nord-Ouest
6	7%	97%	0,3	Sud-Est
7	-55%	42%	0,9	Sud-Ouest
8	1%	97%	0,2	Sud-Est
9	-4%	88%	0,8	Sud-Est
10	14%	98%	0,6	Nord-Est
11	4%	99%	0,1	Nord-Est
12	4%	98%	3,3	Nord-Est
13	5%	99%	1,7	Sud-Ouest
14	5%	97%	0,3	Nord-Est
15	9%	99%	2,0	Nord-Est
16	6%	99%	0,5	Sud-Ouest
17	5%	97%	0,3	Nord-Est

18	10%	96%	0,7	Nord-Est
19	14%	83%	1,0	Sud-Ouest
20	22%	98%	0,8	Sud-Ouest
21	90%	97%	2,0	Sud-Ouest
22	46%	99%	1,3	Sud-Ouest
23	12%	99%	0,3	Sud-Ouest
24	29%	97%	1,1	Nord-Est
25	3%	96%	0,3	Nord-Est
26	1%	96%	0,3	Sud-Est
27	18%	97%	0,2	Nord-Est
28	10%	100%	0,2	Sud-Ouest
29	34%	99%	1,7	Nord-Est

Annexe 26. Données statistiques de la station météorologique de La Pocatière pour les mois d'avril, mai, juin et juillet 2014, 2015 et 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017).

Station La Pocatière				
Date	Température moyenne	Température maximum	Température minimum	Degrés jours sous 18°C
Avril 2014	2,2	16,2	-12	457
Mai 2014	10,5	27,9	-0,5	233
Juin 2014	17,3	30,3	3,9	50,6
Juillet 2014	19,9	31,6	8,7	13,4
Avril 2015	3,1	19,1	-15	446
Mai 2015	12,4	27,7	-1,4	178
Juin 2015	14,7	25,6	4,2	104
Juillet 2015	17,8	30,4	6,7	36
Avril 2016	1,2	19,4	-15	503
Mai 2016	10,5	26,5	-0,8	205
Juin 2016	16,3	31,9	5,4	87,3
Juillet 2016	18,9	30,9	9,1	29,1

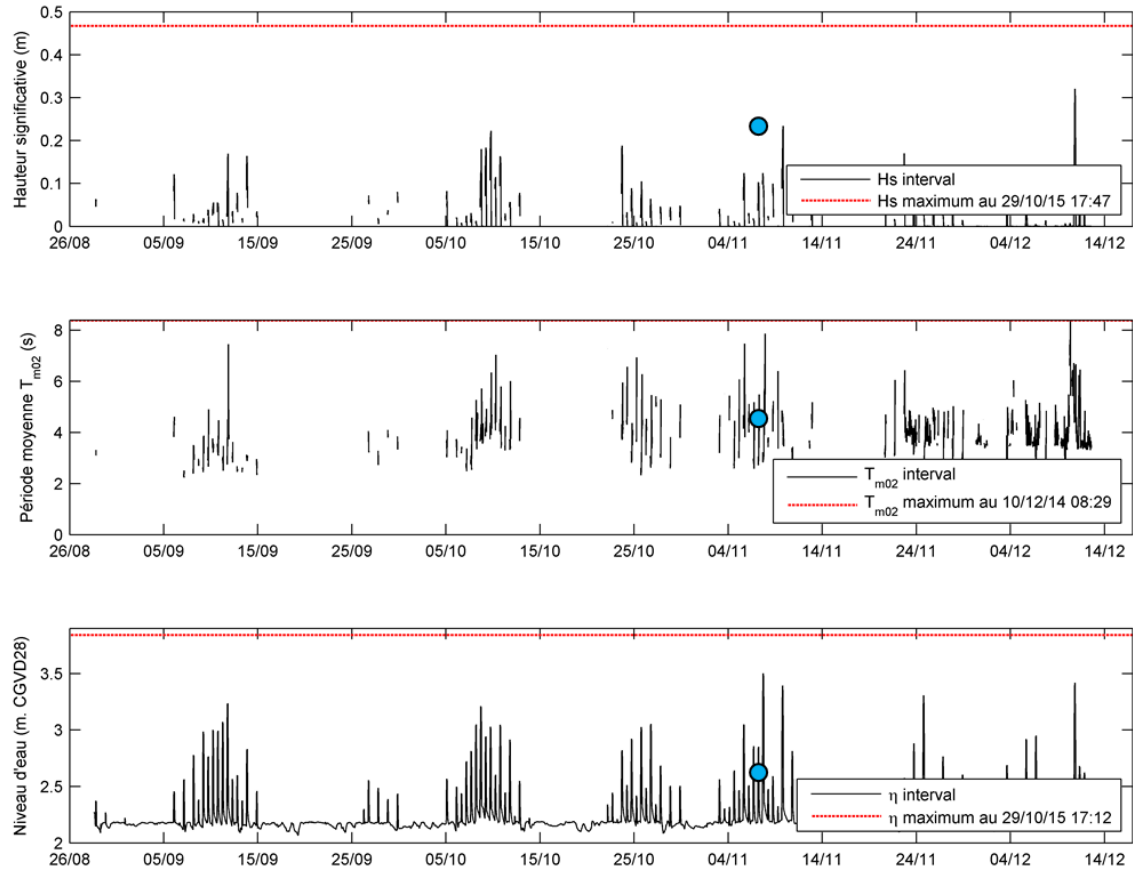
Annexe 27. Données statistiques de la station météorologique de Charlevoix (MRC) pour les mois d'avril, mai, juin et juillet 2014, 2015 et 2016 (Environnement et Changement climatique Canada, 2017).

Station Charlevoix (MRC)				
Date	Température moyenne	Température maximum	Température minimum	Degrés jours sous 18°C
Avril 2014	-1,2	15,8	-16	575
Mai 2014	6,9	23,6	-3,6	344
Juin 2014	13,9	26,2	0,4	127,5
Juillet 2014	15,4	26,4	4,7	92,6
Avril 2015	-1,3	13,8	-22	580
Mai 2015	8,7	21,3	-3,2	279
Juin 2015	11	21,6	0	210,4
Juillet 2015	14,5	25	2,9	110,3
Avril 2016	-3,9	17,8	-24	657
Mai 2016	7,3	24,6	-6,2	331
Juin 2016	12,4	26,5	0,9	175
Juillet 2016	14,8	25,7	5,3	102,8

Annexe 28. Distribution croisée des hauteurs significatives et directions de vagues à la position de l'ADV du 20/05/2015 et le 15/12/2015 (9204 observations de 1024 s).

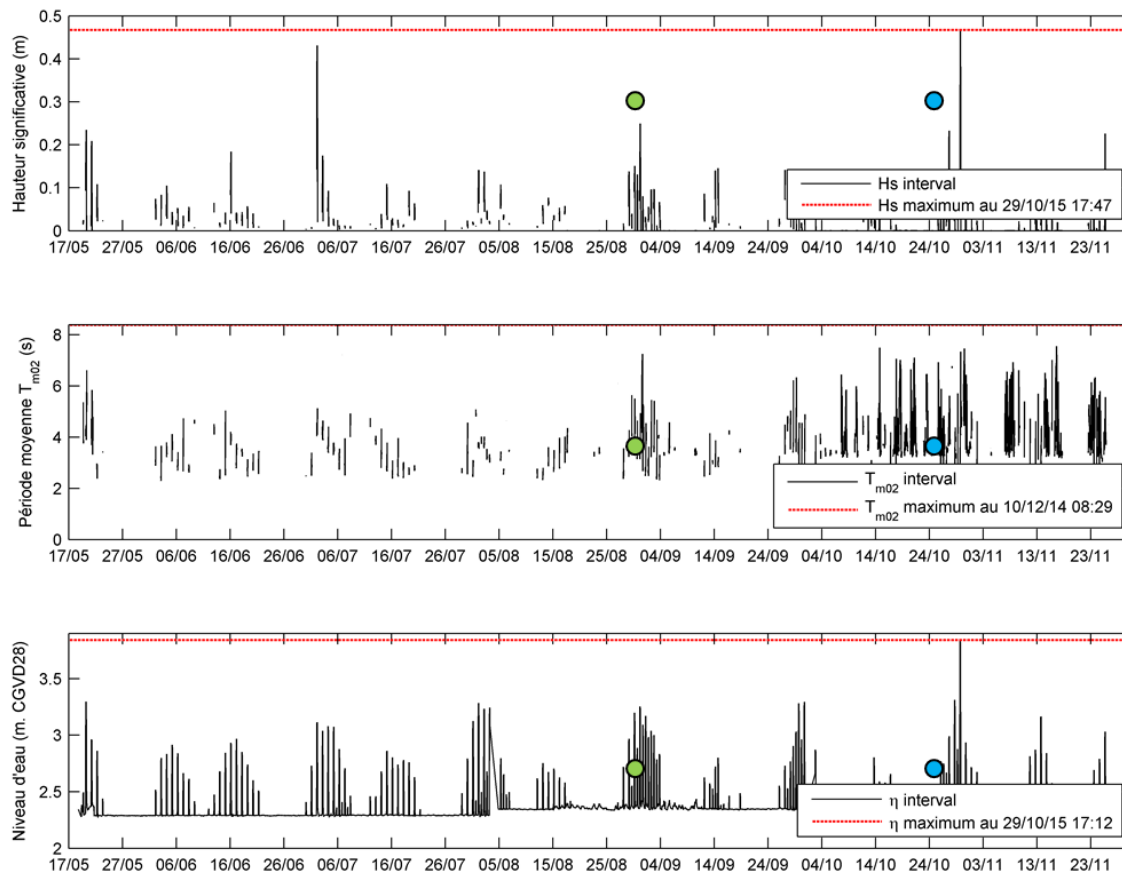
Classes de direction (°)	Classes de hauteurs significatives (m)					Occurrence	Pourcentage
	[0 - 0,25[	[0,25 - 0,5[	[0,5 - 0,75[	[0,75 - 1,0[	[1,0 - 1,125[
[355-5[	212	8	0	0	0	220	2,39
[15-25[	145	9	0	0	0	154	1,67
[25-35[	123	34	1	0	0	158	1,72
[35-45[	125	61	10	1	0	197	2,14
[45-55[	196	120	32	3	0	351	3,81
[55-65[	233	214	36	0	0	483	5,25
[65-75[	209	177	14	0	0	400	4,35
[75-85[	196	105	7	0	0	308	3,35
[85-95[	148	57	1	0	0	206	2,24
[95-105[	111	37	1	0	0	149	1,62
[105-115[	105	46	0	0	0	151	1,64
[115-125[	112	38	0	0	0	150	1,63
[125-135[	111	21	0	0	0	132	1,43
[135-145[	92	13	0	0	0	105	1,14
[145-155[	138	4	0	0	0	142	1,54
[155-165[	283	3	0	0	0	286	3,11
[165-175[	904	129	28	2	0	1 063	11,55
[175-185[	1 391	339	111	4	1	1 846	20,06
[185-195[	965	156	20	2	0	1 143	12,42
[195-205[	377	15	0	0	0	392	4,26
[205-215[	140	2	0	0	0	142	1,54
[215-225[	60	0	0	0	0	60	0,65
[225-235[	44	0	0	0	0	44	0,48
[235-245[	43	1	0	0	0	44	0,48
[245-255[	9	0	0	0	0	9	0,10
[255-265[	3	0	0	0	0	3	0,03
[265-275[	6	0	0	0	0	6	0,07
[275-285[	14	2	0	0	0	16	0,17
[285-295[	27	8	0	0	0	35	0,38
[295-305[	83	26	0	0	0	109	1,18
[305-315[	81	21	0	0	0	102	1,11
[315-325[	48	8	0	0	0	56	0,61
[325-335[	40	0	0	0	0	40	0,43
[335-345[	40	0	0	0	0	40	0,43
[345-355[	91	3	0	0	0	94	1,02
[355-5[	301	67	0	0	0	368	4,00
Occurrence	6 905	1 657	261	12	1	9 204	100
Pourcentage	75,02	18,00	2,84	0,13	0,01	100	-

Annexe 29. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 7 novembre 2014

Annexe 30. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.

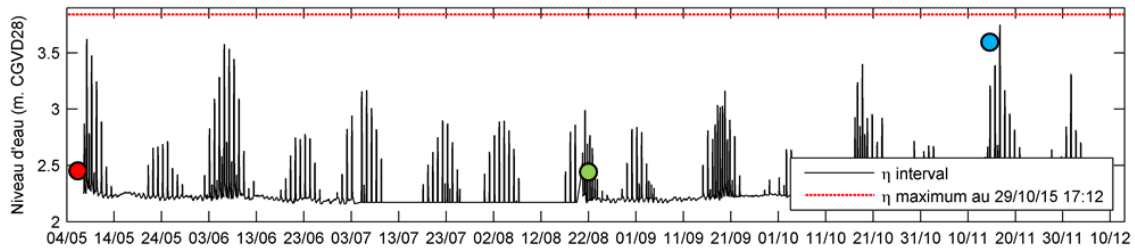
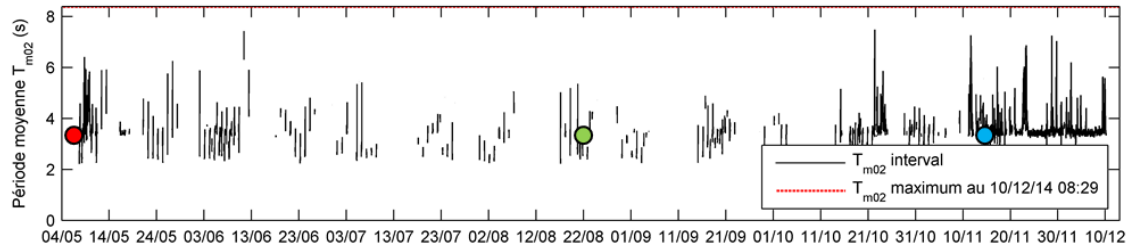
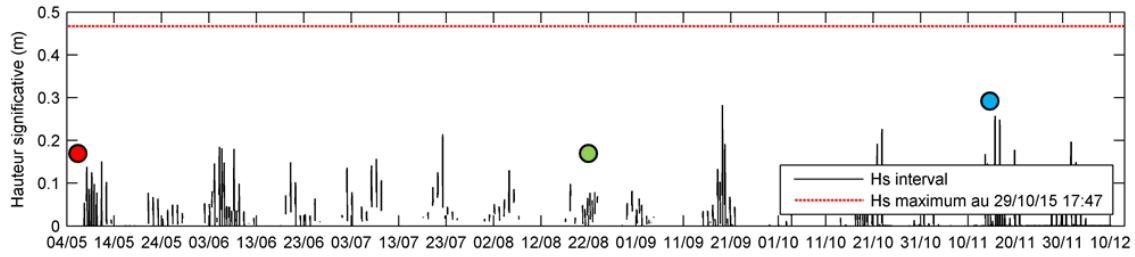


Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

● 30 août 2015

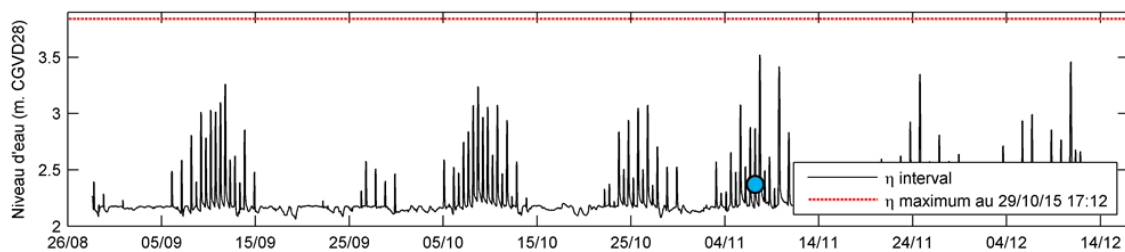
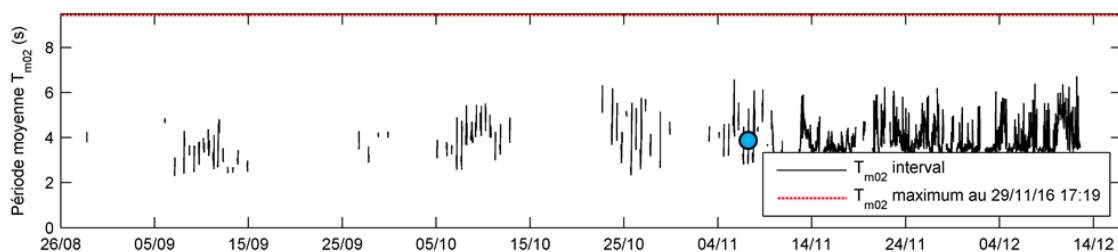
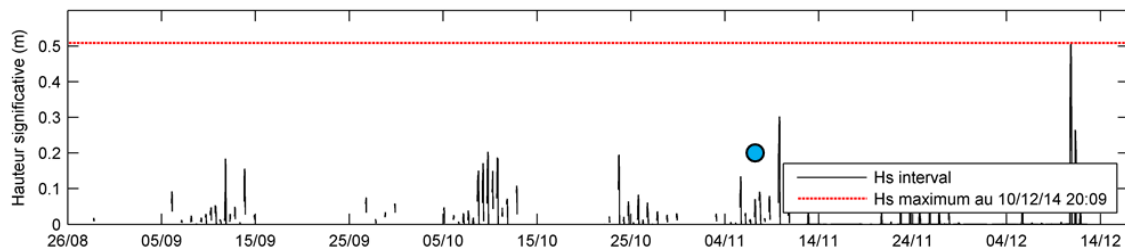
● 25 octobre 2015

Annexe 31. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



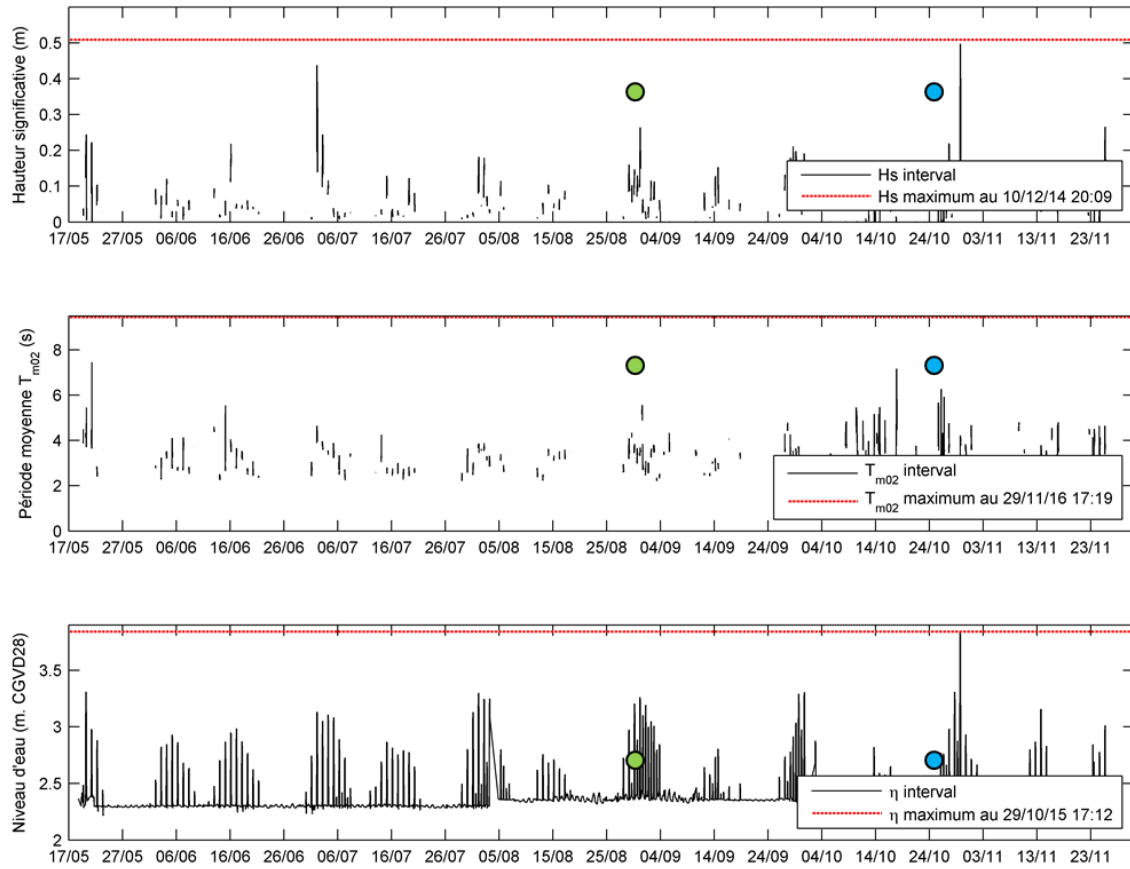
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 6 mai 2016
● 22 août 2016
● 15 novembre 2016

Annexe 32. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
● 7 novembre 2014

Annexe 33. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.

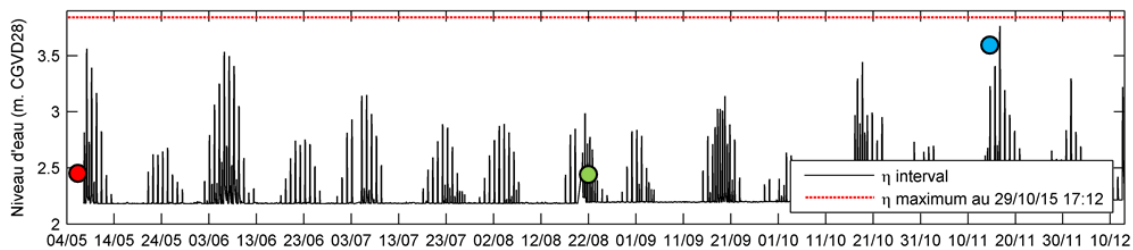
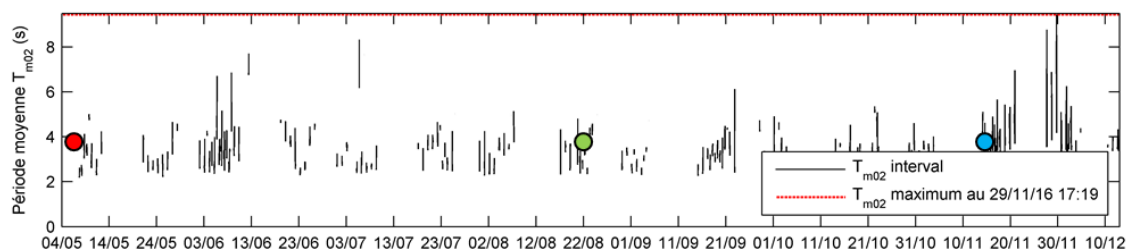
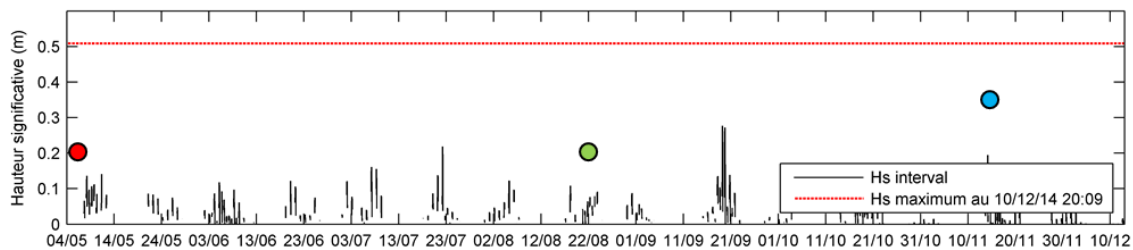


Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

● 31 août 2015

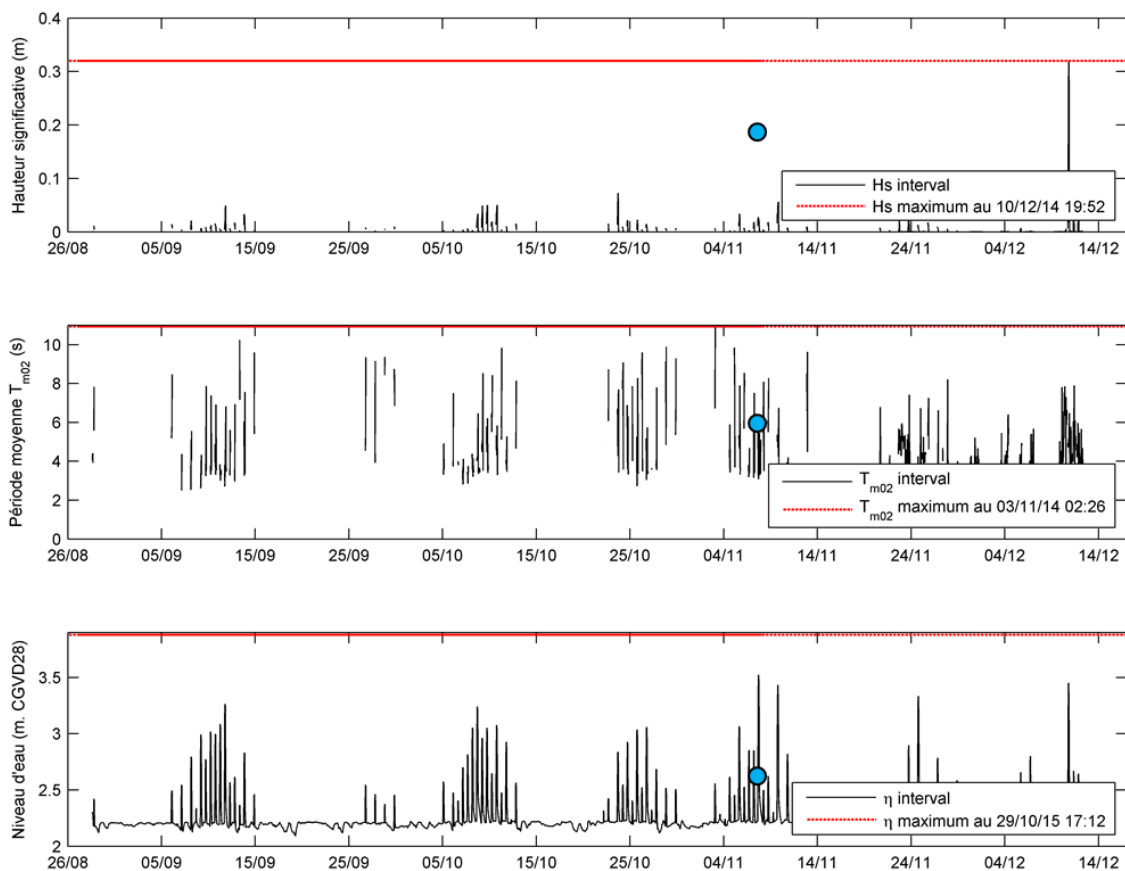
● 25 octobre 2015

Annexe 34. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 6 mai 2016
 ● 22 août 2016
 ● 15 novembre 2016

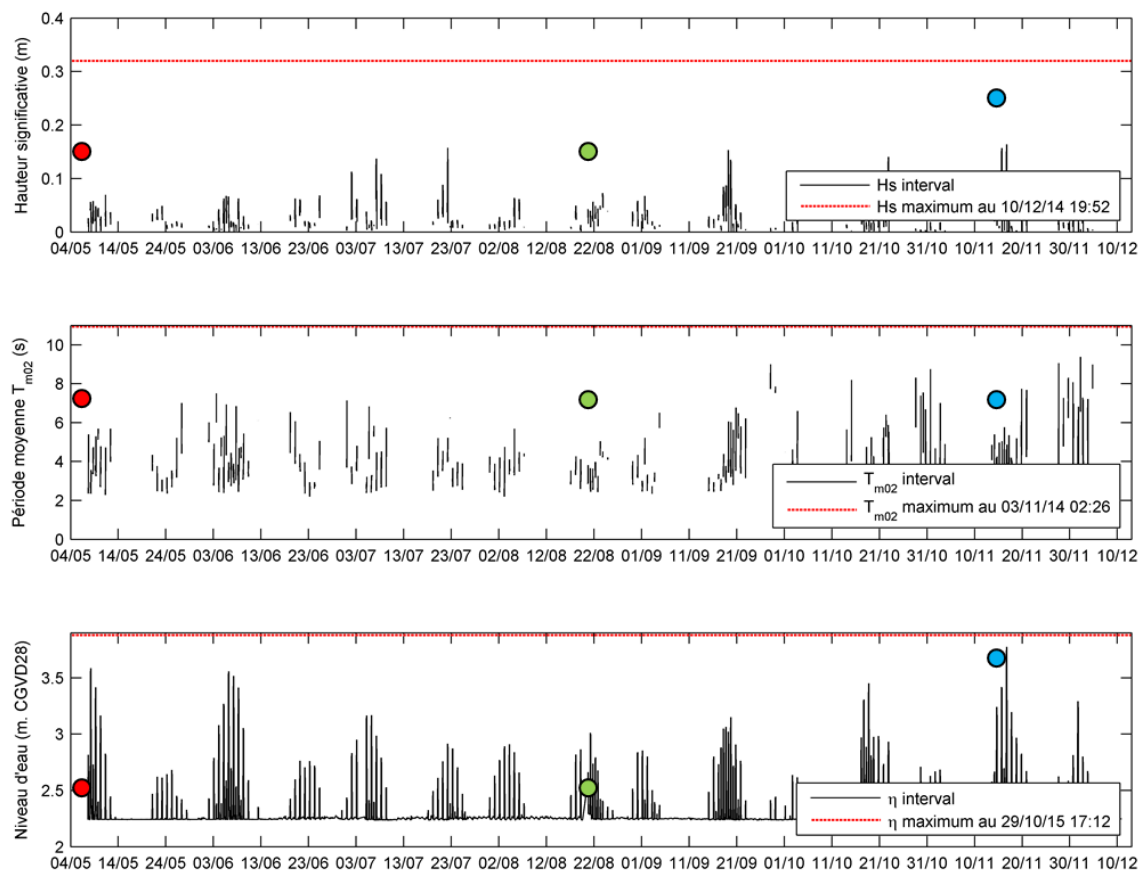
Annexe 35. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)

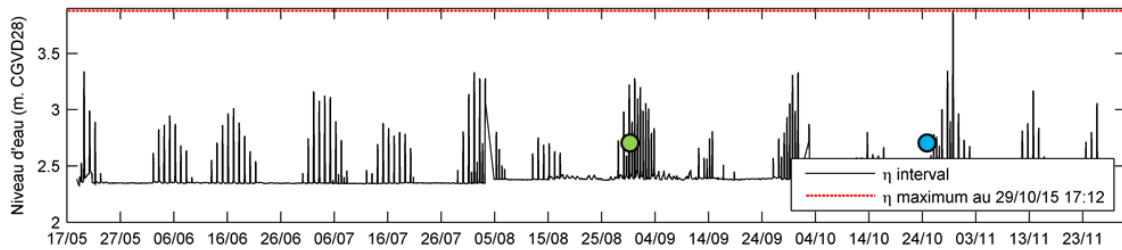
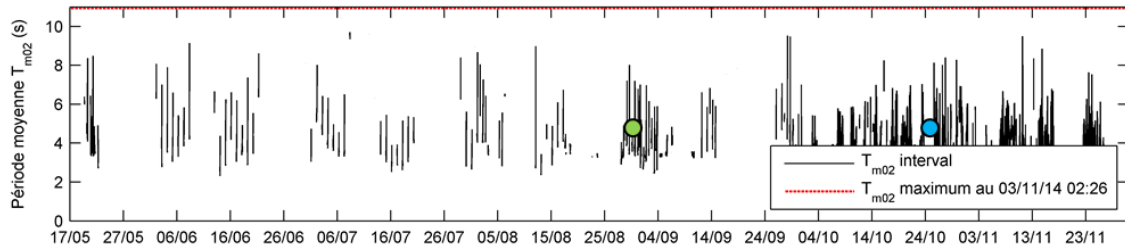
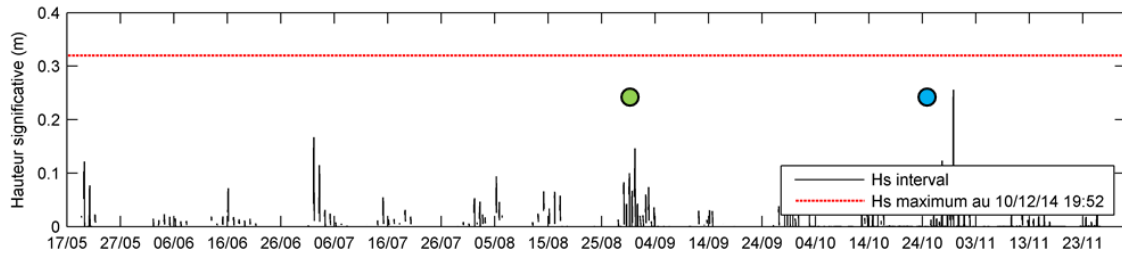
● 8 novembre 2014

Annexe 36. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 6 mai 2016
 ● 21 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 37. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.

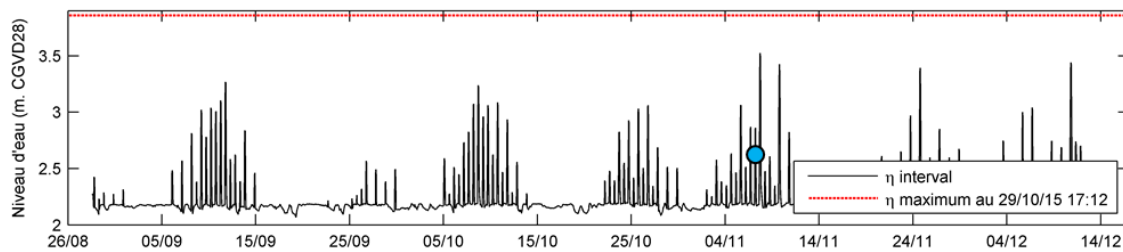
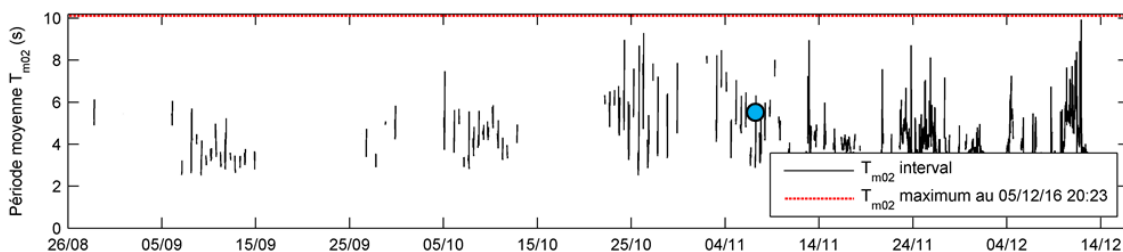
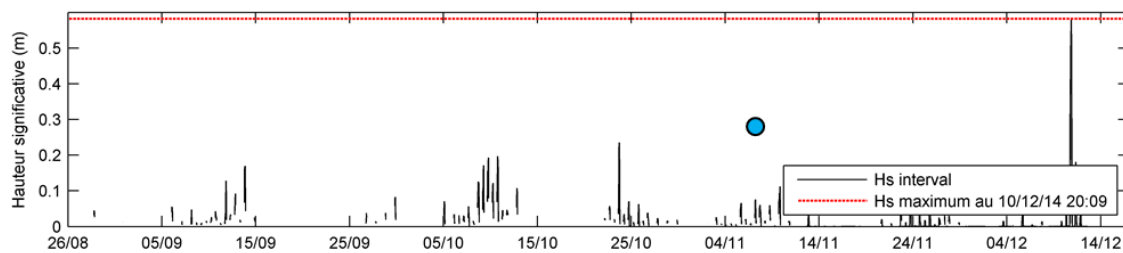


Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

● 31 août 2015

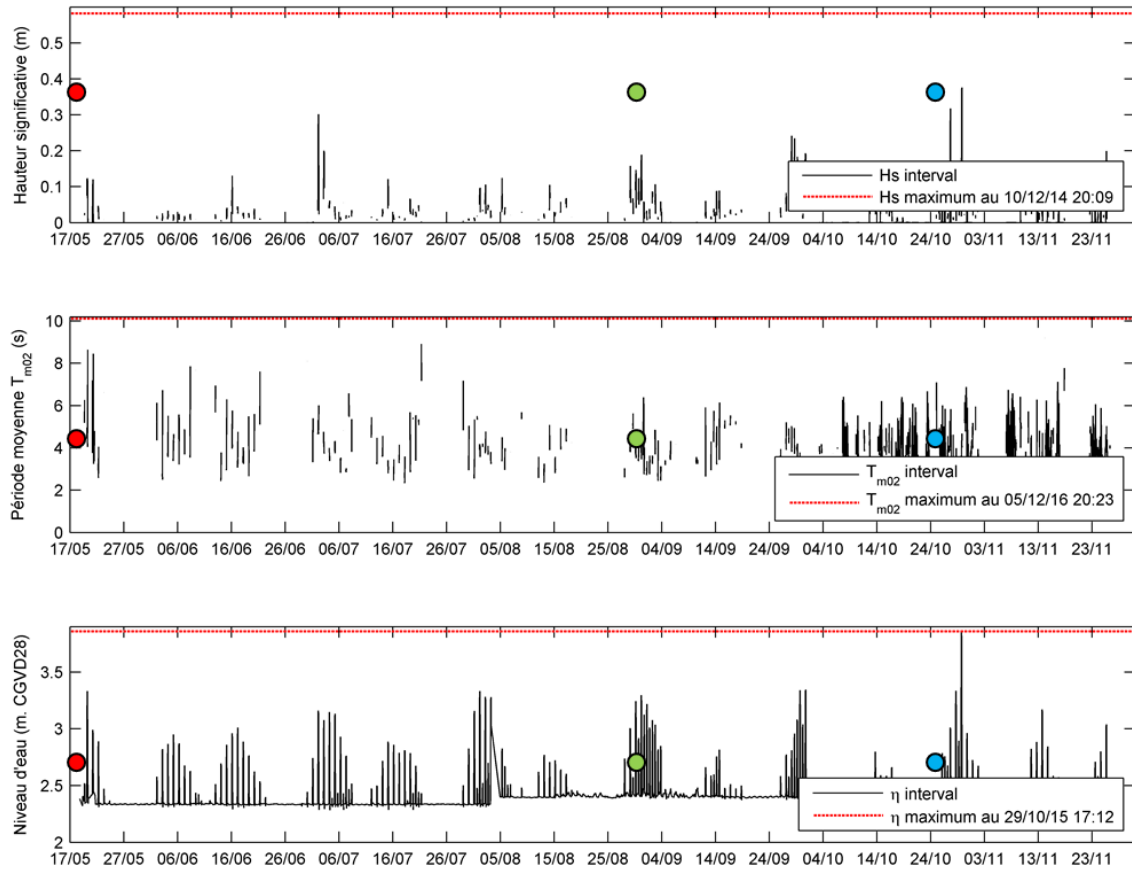
● 25 octobre 2015

Annexe 38. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



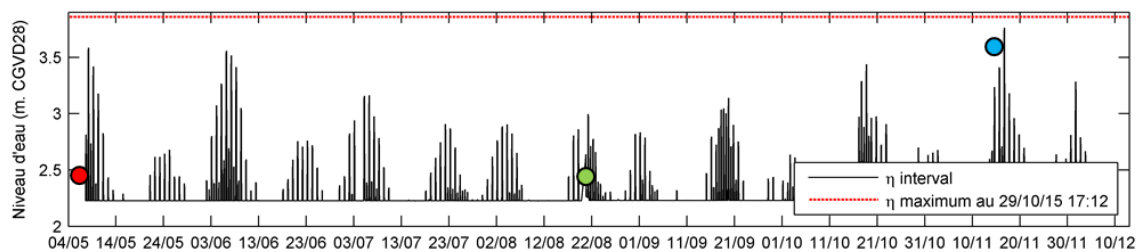
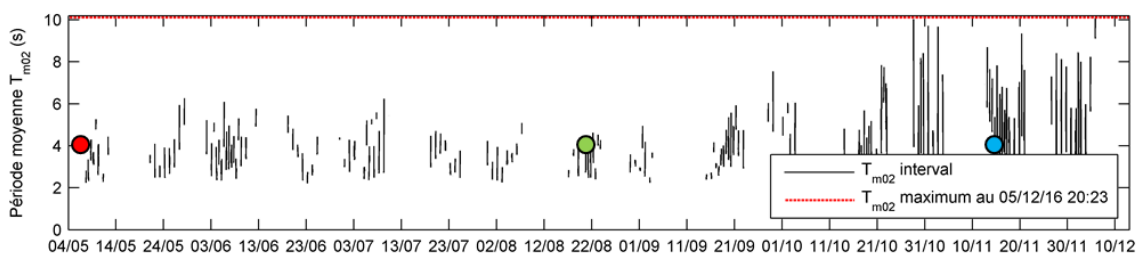
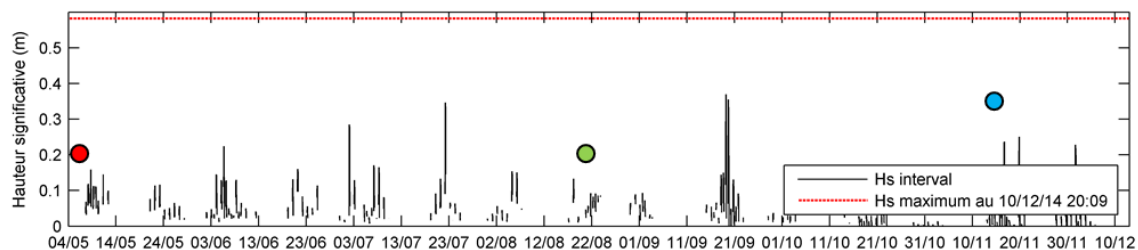
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 8 novembre 2014

Annexe 39. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



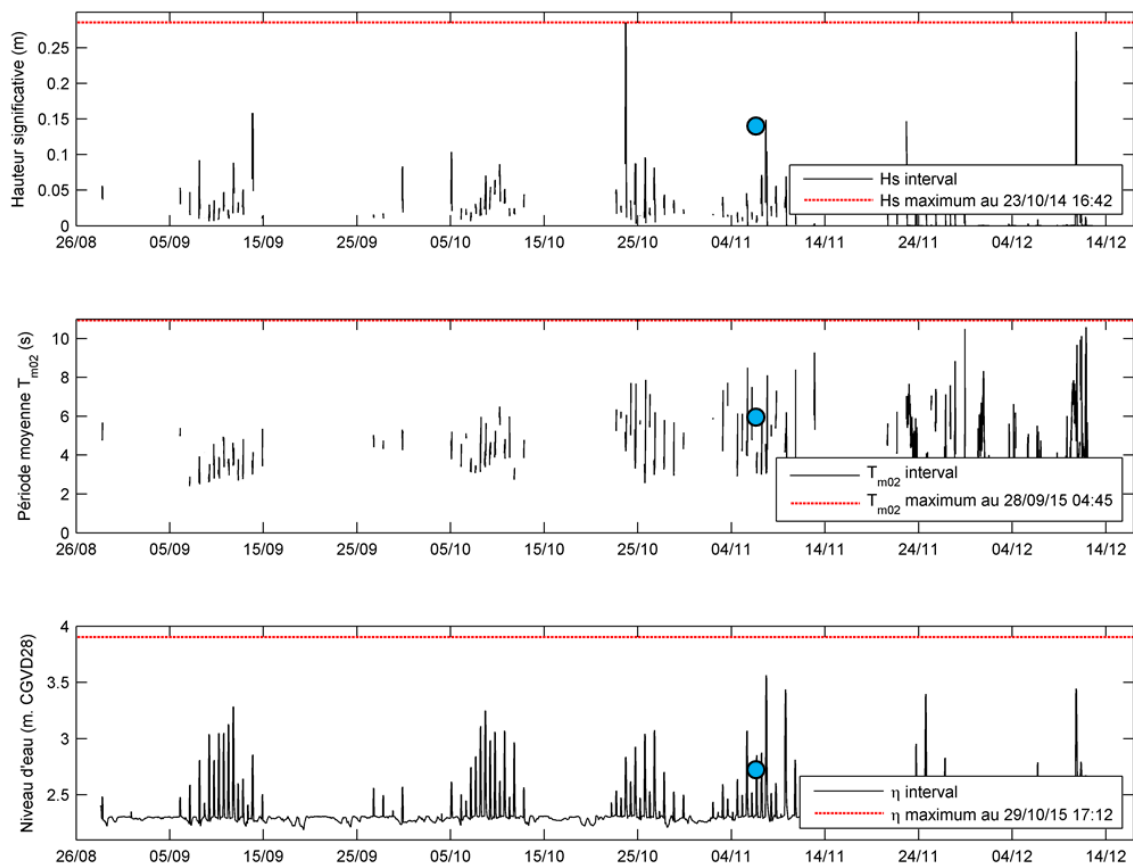
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 17 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 31 août 2015
 ● 26 octobre 2015

Annexe 40. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 5 mai 2016
● 21 août 2016
● 15 novembre 2016

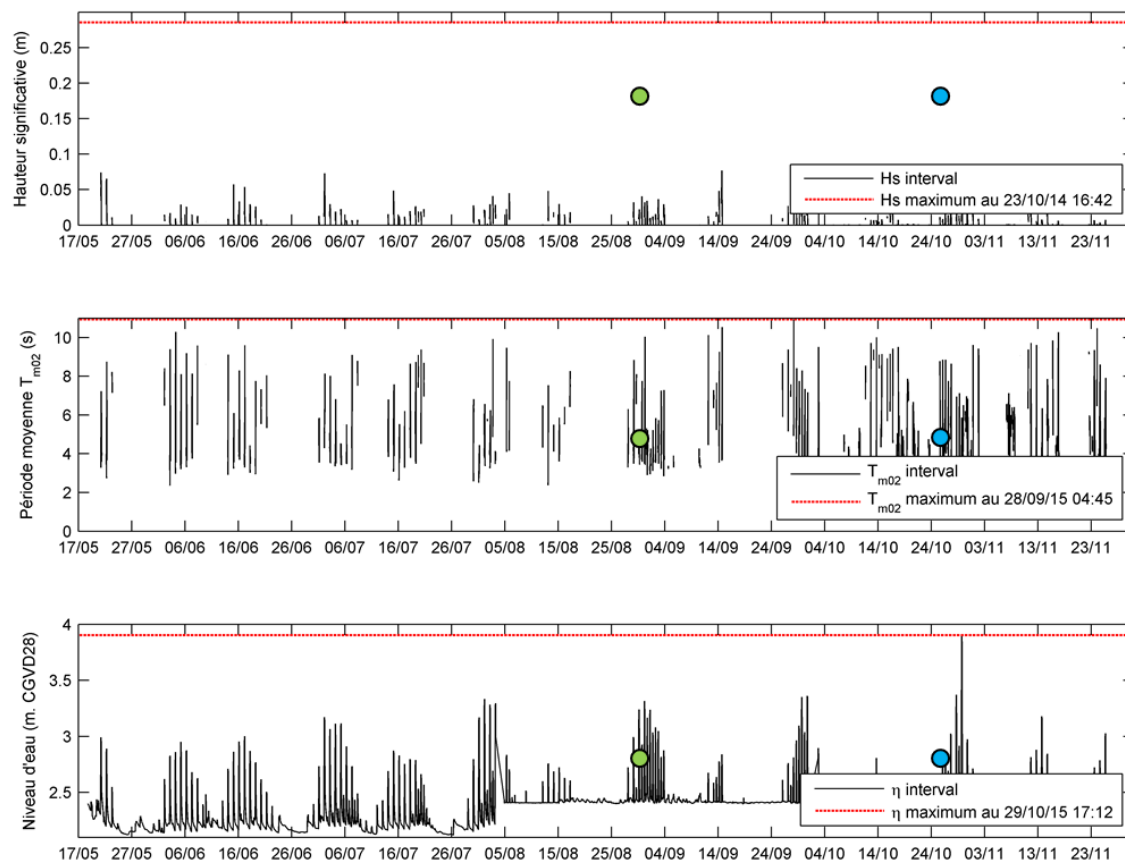
Annexe 41. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 15 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)

● 6 novembre 2014

Annexe 42. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.

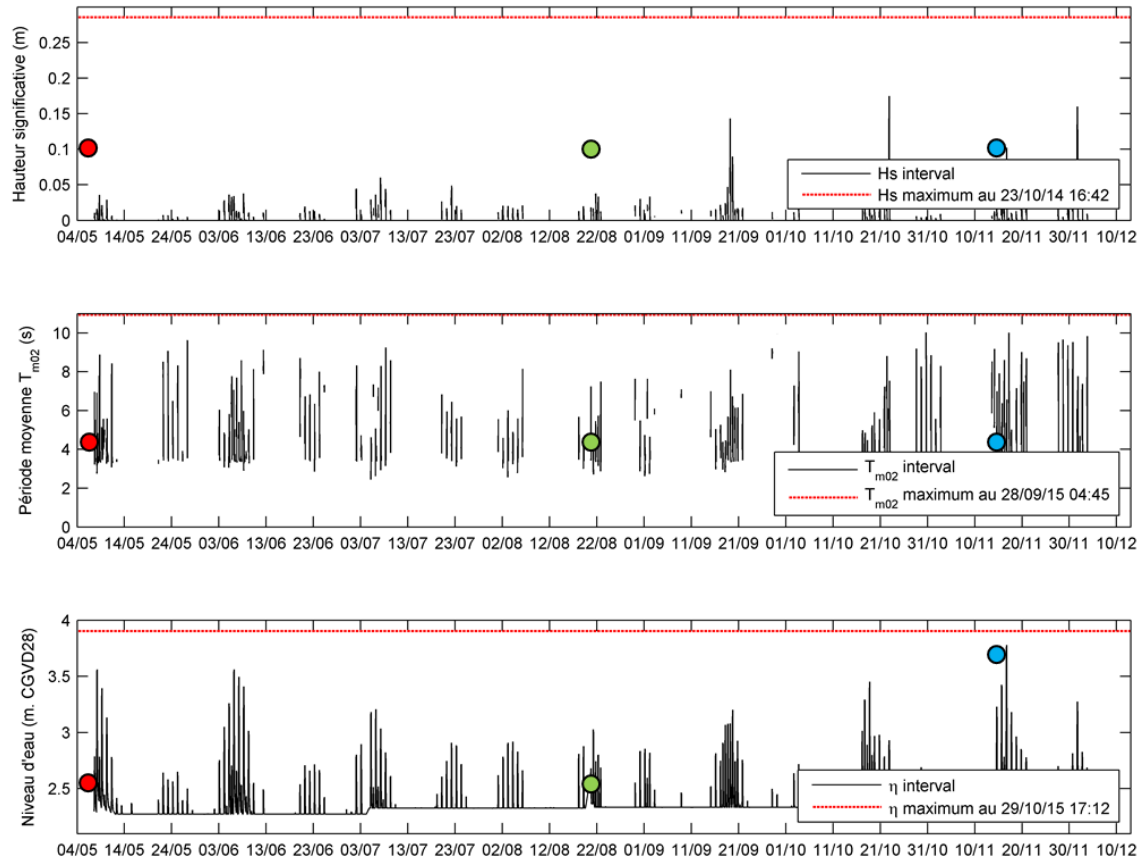


Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

● 30 août 2015

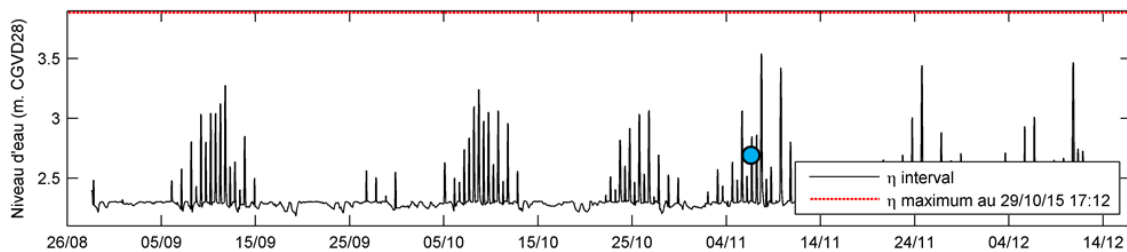
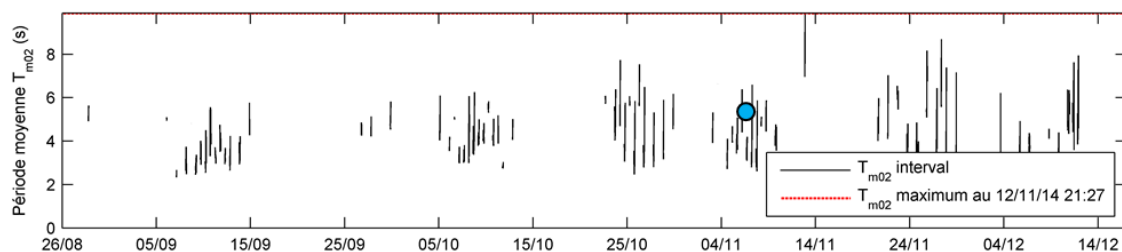
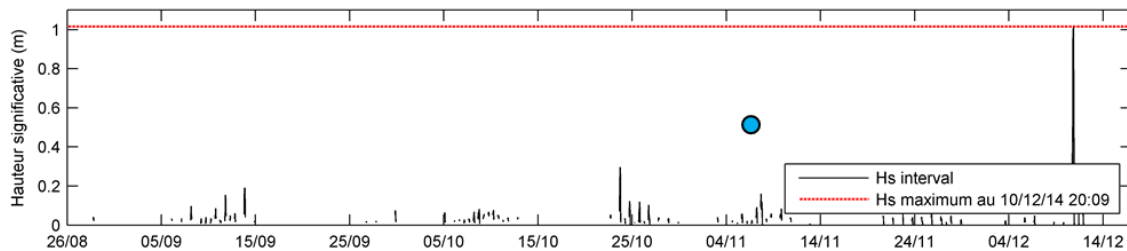
● 26 octobre 2015

Annexe 43. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 5 mai 2016
 ● 21 août 2016
 ● 15 novembre 2016

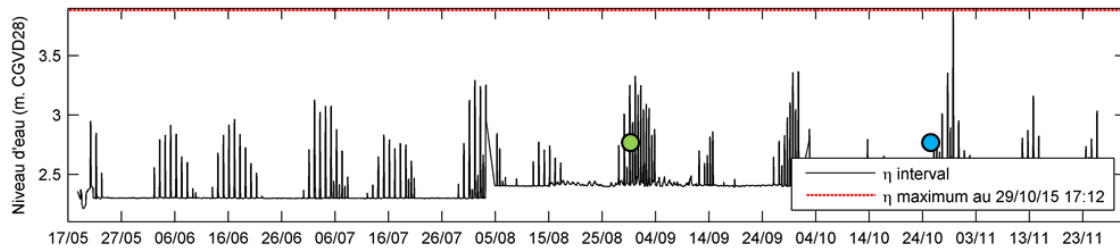
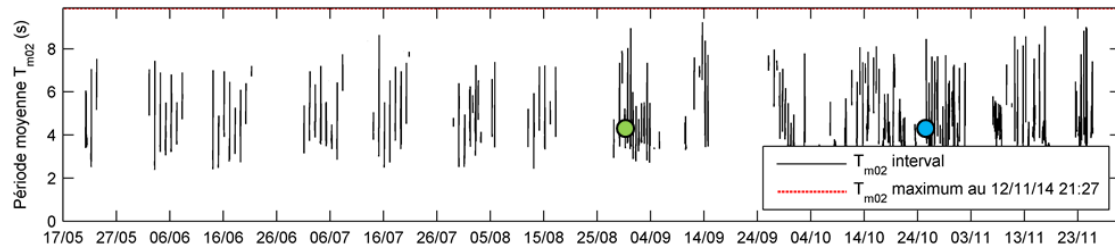
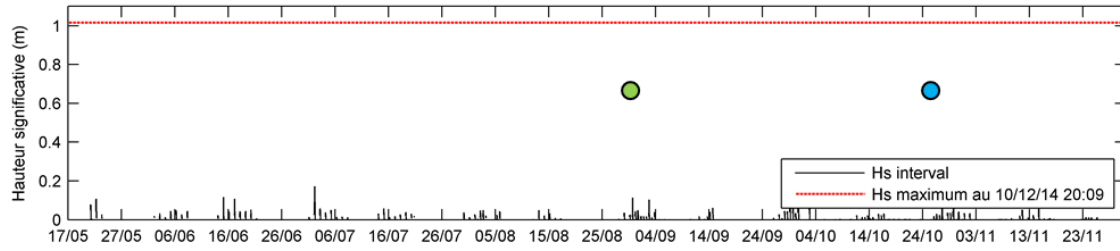
Annexe 44. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 15 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)

● 6 novembre 2014

Annexe 45. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.

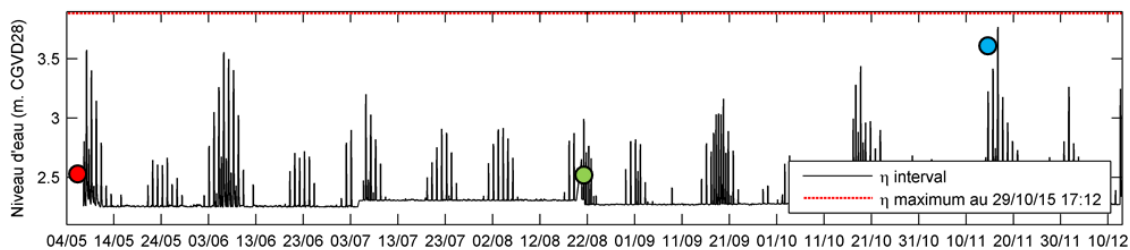
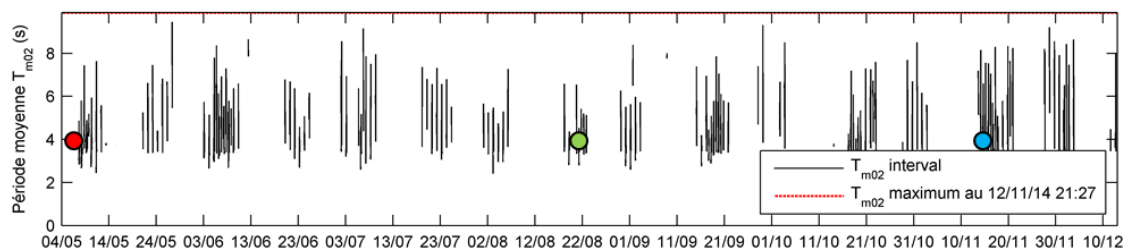
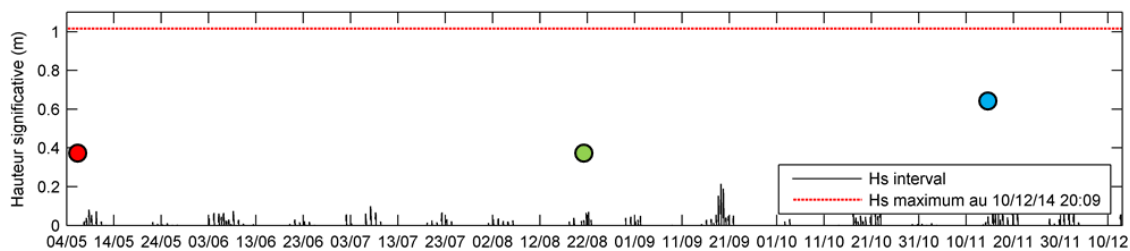


Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

● 30 août 2015

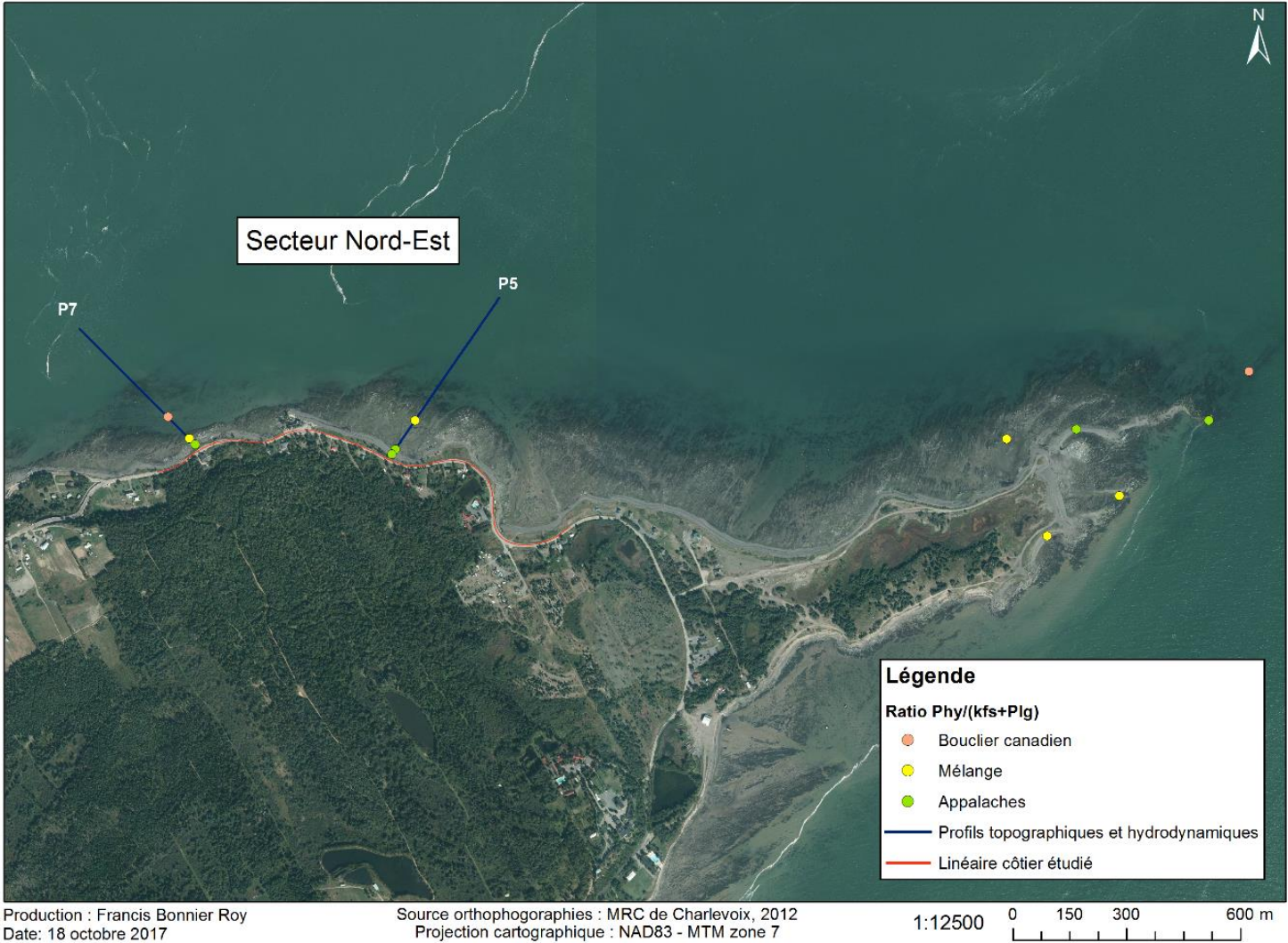
● 26 octobre 2015

Annexe 46. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 5 mai 2016
 ● 21 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 47. Ratios $Phy/(Kfs+Plg)$ des échantillons de sédiments meubles et de roc de la côte sud.



Annexe 48. Ratios $Phy/(Kfs+Plg)$ des échantillons de sédiments meubles et de roc de la côte sud.



Production : Francis Bonnier Roy
Date: 18 octobre 2017

Source orthophogoraphies : MRC de Charlevoix, 2012
Projection cartographique : NAD83 - MTM zone 7

1:23644 0 280 560 1120 m