

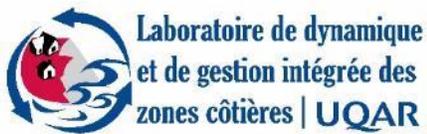


Suivi de l'érosion côtière à la suite de travaux de stabilisation des berges en bordure de routes à l'Isle-aux-Coudres (projet R757.1) : rapport final

Rapport final de recherche remis au ministère des Transports du Québec



Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.



2019



AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec (MTQ), qui a financé ce projet.

Le MTQ n'est pas responsable de l'exactitude, de l'actualité et de la fiabilité du contenu de ce mémoire. Les points de vue exprimés dans ce rapport émanent de l'auteur et ne coïncident pas nécessairement avec ceux du ministère des Transports du Québec.

Chercheur principal

Pascal Bernatchez, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski

Département de biologie, chimie et géographie

Chaire de recherche en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)

Centre d'études Nordiques

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

Téléphone : (418) 723-1986, poste 1206 (laboratoire)

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

<http://dgizc.uqar.qc.ca/>

Chercheurs associés

Francis Bonnier Roy, B. Sc.

Université du Québec à Rimouski

Chaire de recherche en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

Téléphone : (418) 723-1986, poste 1206

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : francis.bonnier-roy@uqar.ca

Adrien Lambert, Ph. D.

Université du Québec à Rimouski

Chaire de recherche en géoscience côtière

Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

Téléphone : (418) 723-1986, poste 1206

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : adrien.lambert@uqar.ca

Chargé de projet au ministère des Transports du Québec (MTQ)

Martin Lafrance, biologiste

Ministère des Transports du Québec

Direction générale de la Capitale-Nationale

475, boul. de l'Atrium, 4^e étage

Québec (Québec) G1H 7H9

Téléphone : (418) 380-2003, poste 29686

Télécopieur : (418) 627-5072 Courriel : Martin.Lafrance@transportsgouv.qc.ca

Comité de suivi

Pascal Bernatchez, UQAR

Martin Lafrance, MTQ

Michel Michaud, MTQ

Benoît Vigneault, MTQ

François Delaître, MELCC

François Godin, MELCC

Isabelle Nault, MELCC

Jean-Denis Bouchard, MSP

Yvon Jodoin, MSP

Michèle Tremblay, MELCC

Simone Gariépy, MELCC

Andréanne Masson, MFFP

Christian Poirier, MTQ

Nathalie St-Hilaire, Pêches et Océans Canada

Dominic Tremblay, Maire de la municipalité de l'Isle-aux-Coudres

Pamela Harvey, municipalité de l'Isle-aux-Coudres

Stéphanie Pelletier, MRC Charlevoix

Équipe de recherche

Levés terrain, instrumentation, traitement des données

David Didier, M. Sc., candidat au doctorat en Sciences de l'environnement, LDGIZC, UQAR

Francis Bonnier Roy, B. Sc., étudiant à la maîtrise en géographie, LDGIZC, UQAR

Levés SMLT, traitement des données

Stéphanie Van-Wiersts, M. Sc., candidate au doctorat en Sciences de l'environnement, LDGIZC, UQAR

Louis Cormier, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Joëlle Voglimacci-Stéphanopoli, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Nicholas Marion, B. Sc., LDGIZC, UQAR

Relecture et co-supervision du rapport

Guillaume Marie, Ph. D. LDGIZC, UQAR

Assistants de terrain et laboratoire

Éric Fillion, Frédéric Banville-Côte, Roch Guevremont, Philippe Berthiaume, Jérôme Dubé, Pierre-André Lalanne, Cyril Ros, Nicholas Marion, Ariane Levert-Longpré.

Analyse minéralogique

Jean-Carlos Montero Serrano, Ph.D., Institut des sciences de la mer, UQAR
Francis Bonnier Roy, B. Sc., étudiant à la maîtrise en géographie, LDGIZC,
UQAR

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Bonnier Roy, F., Bernatchez, P., Lambert, A. Marie, G. et Montero Serrano, J.S. 2019. 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 du Québec, 255 p.+ Annexes.

Photographies de la page de couverture : Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, 2014

SYNTHÈSE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les berges de l'île aux Coudres sont en érosion sur certains secteurs du linéaire côtier, ce qui pourrait affecter l'intégrité de la route côtière construite immédiatement sur l'arrière-plage. Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a donc procédé à l'automne 2014 à l'enrochement de la berge en bordure de plusieurs tronçons de route sur près de 2,5 km. Dans ce contexte, le MTQ a mandaté le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski pour réaliser une étude sur le suivi du littoral sur une période de trois ans. Ce suivi avait pour but d'évaluer les impacts potentiels des ouvrages de protection sur la morphosédimentologie de la plage et sur les herbiers à spartine alterniflore situés sur le bas estran à proximité de la plage sablo-graveleuse.

L'ensemble du linéaire côtier étudié est de 7 709 mètres, soit 28,7 % du littoral de l'île (26,8 km). Il constitue presque entièrement le tronçon sud du chemin des Coudriers de la Pointe à Simon à l'Hôtel Cap-aux-Pierres (6442 m) ainsi qu'une petite portion du côté nord-est allant du début du chemin de la Bourroche dans l'anse à Mailloux jusqu'à l'anse du ruisseau rouge (1 267m). L'étude a consisté d'abord à établir l'état de référence basé sur une analyse de l'évolution rétrospective du littoral entre 1964 et 2012, une segmentation et une caractérisation géomorphologique et sédimentologique du littoral avant la mise en place de l'enrochement et une cartographie surfacique des herbiers de spartine alterniflore. Sur la période de 2014 à 2016, des analyses sédimentologiques de la plage et du bas estran ont été réalisées à partir d'échantillons prélevés de manière saisonnière lors de 8 périodes. Ces analyses ont été complétées par des analyses minéralogiques d'échantillons prélevés dans différents secteurs afin d'identifier les sources sédimentaires qui alimentent les plages. Pour ces mêmes périodes, des profils topographiques ont été réalisés à l'aide d'un DGPS sur 8 profils. De plus, des levés LiDAR de la plage ont permis de quantifier l'évolution du volume sédimentaire lors de 6 périodes. À chaque année (fin août-début septembre), une cartographie surfacique des herbiers a été effectuée à l'aide d'un DGPS. Enfin, le suivi a été complété par l'analyse des niveaux d'eau et des vagues effectuée à partir de données provenant de capteurs de pression RBR localisés sur 6 profils, des basses mers jusqu'à la plage, permettant ainsi d'évaluer l'atténuation de l'énergie des vagues en fonction de la géomorphologie de l'estran.

L'analyse de l'évolution des photographies aériennes montre que l'artificialité du littoral étudié est passée de 3 % à 7 % de 1964 à 1981, puis à 15 % en 2002 et 37 % en 2012. En 2014, la proportion de berges artificielles était de 39 % avant les travaux de l'automne, puis de 54 %, soit près de 4,3 km linéaire de côtes artificielles. Les résultats de l'évolution historique indiquent une ligne de rivage généralement stable entre 1964 et 2012 avec une moyenne globale de 0,02 m/an. Ainsi 79 % des valeurs mesurées sont comprises entre - 0,15 et 0,15 m/an. Les taux moyens de déplacement de la ligne de rivage mesurés à

l'aide des stations de suivi du LDGIZC entre 2007 et 2016 indiquent que les valeurs peuvent varier entre -0,87 m/an et + 3,20 m/an.

Le principal impact de l'enrochement est l'empiètement et la disparition du haut de plage végétalisé. Ainsi, plus de 87 % des secteurs avec des ouvrages de protection ne possèdent pas de haut de plage alors que la proportion est de moins de 13 % pour les côtes naturelles. Ce haut de plage végétalisé est important car il atténue l'énergie lors de la phase finale du jet de rive et permet de réduire le régime de collision des vagues contre la microfalaise qui est responsable du recul de la berge et dans le cas de la présence d'un ouvrage de réduire le franchissement. La recharge de la plage avec les sédiments de la clé a certes contribué à maintenir un haut de plage aux profils 1 et 7 et à atténuer les impacts. On constate toutefois au profil 5 (anse à Buttemont) que l'empiètement a aussi entraîné une réduction de la largeur de la plage, ce qui augmente le temps de contact entre l'ouvrage et les niveaux d'eau, et ce qui a favorisé l'affouillement au pied de l'ouvrage particulièrement observable sur les levés des profils de 2015.

On ne constate pas d'effet de la mise en place des enrochements sur la texture des sédiments de la matrice fine (< 2 mm) tant sur le haut de plage que sur le haut estran. Il ne semble pas non plus y avoir de lien direct entre la mise en place des enrochements et l'évolution de la texture des sédiments sur le bas estran près de la flexure de la plage. L'évolution de la texture est davantage liée au cycle naturel saisonnier et à la présence des herbiers qui favorisent le piégeage des sédiments fins. Néanmoins, les profils dont la granulométrie a été le plus affectée par les enrochements correspondent aux endroits où le climat des vagues est le plus important : le profil 5 dans l'anse à Buttemont avec le fetch le plus grand et le profil 4 (celui-ci était déjà artificiel en 2014) au sud-est où le climat des vagues enregistré a été le plus important. Les vagues ont atteint directement les ouvrages de ces deux secteurs et il y a même eu franchissement de l'enrochement au profil 5. Pour les six profils suivis, les plus fortes valeurs d'érosion verticale sont observées devant les trois profils équipés d'un ouvrage de défense construit sur la section supérieure du haut estran. Il est également important de noter que les évolutions observées au pied des ouvrages sont le résultat d'événements statistiquement rares. Les évolutions négatives observées ont principalement eu lieu entre novembre 2014 et mai 2015. 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.

Les enrochements ne semblent pas avoir eu d'impacts négatifs sur la superficie des herbiers à spartine alterniflore. En effet, la majorité des herbiers a connu une augmentation en surface de 2014 à 2016.

Considérant le régime des vagues plutôt calme, la moyenne des hauteurs de vagues significatives aux capteurs le plus au large ne dépassant pas 0,17 m et la forte atténuation de l'énergie des vagues sur les larges plates-formes et le

haut estran, il est possible de considérer à l'avenir des solutions plus douces que l'enrochement ou la combinaison de solutions. D'ailleurs, la remise sur la plage des sédiments excavés sur le haut de plage pour la clé de l'enrochement constitue une bonne méthode d'atténuation des impacts dans la mesure où la granulométrie est similaire à celle de la plage. Les secteurs les plus à l'est de l'île demeurent toutefois ceux les plus exposés et les plus vulnérables aux agents hydrodynamiques, la valeur maximale de la hauteur significative des vagues mesurée au large étant de 1,47 m (profil 4). Un suivi annuel du bilan sédimentaire de la plage de ces secteurs est à considérer.

TABLE DES MATIERES

1. MISE EN CONTEXTE DU PROJET	16
1.1 PROBLÉMATIQUE	16
1.2 OBJECTIFS DU PROGRAMME DE SUIVI	17
1.3 PRÉSENTATION DU RAPPORT	18
2. ÉTAT DE RÉFÉRENCE DES CARACTÉRISTIQUES MORPHOSÉDIMENTAIRES ET DES HERBIERS À SPARTINE ALTERNIFLORE DE LA ZONE CÔTIÈRE	19
2.1 ÉVOLUTION RÉTROSPECTIVE DU LITTORAL (1964-2012)	19
2.1.1 <i>Méthodologie</i>	21
2.1.2 <i>Résultats et interprétation</i>	23
2.2 SEGMENTATION ET CARACTÉRISATION CÔTIÈRE	36
2.2.1 <i>Méthodologie</i>	36
2.2.2 <i>Résultats et interprétation</i>	39
2.3 GRANULOMÉTRIE.....	46
2.3.1 <i>Méthodologie</i>	46
2.3.2 <i>Résultats et interprétation</i>	48
2.4 PROFILS TOPOGRAPHIQUES.....	54
2.4.1 <i>Méthodologie</i>	54
2.4.2 <i>Résultats et interprétation</i>	55
2.5 MORPHOLOGIE ET VOLUMES DE PLAGE	61
2.5.1 <i>Méthodologie</i>	61
2.5.3 <i>Résultats et interprétation</i>	67
2.6 CARTOGRAPHIE ET CARACTÉRISATION DES HERBIERS.....	76
2.6.1 <i>Méthodologie</i>	76
2.6.2 <i>Résultats et interprétation</i>	79
3. BILAN ÉVOLUTIF DES CHANGEMENTS MORPHOSÉDIMENTAIRES DE LA ZONE CÔTIÈRE ET RÔLE DES INFRASTRUCTURES	83
3.1 SEGMENTATION CÔTIÈRE.....	83
3.1.1 <i>Artificialisation des berges</i>	83
3.1.2 <i>Types d'artificialités</i>	85
3.1.3 <i>État de la ligne de rivage</i>	85
3.1.4 <i>Hauteur des microfalaises</i>	91
3.1.5 <i>Relation haut de plage et artificialité</i>	93
3.1.6 <i>Synthèse</i>	96
3.2 ÉVOLUTION SÉDIMENTAIRE	97
3.2.1 <i>Évolution de la proportion de la matrice fine (moins de 2 mm de diamètre) de l'ensemble de l'échantillon</i>	97
3.2.2 <i>Analyse de la matrice fine (moins de 2 mm de diamètre)</i>	100
3.2.3 <i>Analyse de la composante sable</i>	112
3.2.4 <i>Synthèse</i>	130
3.3 ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DES PLAGES	131
3.3.1 <i>Évolution verticale et volumique</i>	131
3.3.2 <i>Évolution de la largeur de la plage</i>	152

3.3.3	<i>Synthèse</i>	161
3.4	RÉSULTATS DE L'ÉVOLUTION VOLUMIQUE	162
3.4.1	<i>Côté sud</i>	162
3.4.2	<i>Côté nord-est</i>	166
3.4.3	<i>Synthèse</i>	169
3.5	SYNTHÈSE GLOBALE DE L'ÉVOLUTION MORPHOSÉDIMENTAIRE.....	175
4.	ÉVOLUTION DES HERBIERS DE SPARTINE ALTERNIFLORE	177
4.1	PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE UTILISÉE.....	177
4.2	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION	178
4.2.1	<i>Zone 1</i>	178
4.2.2	<i>Zone 2</i>	183
4.3	SYNTHÈSE.....	188
5.	IDENTIFICATION DES SOURCES SÉDIMENTAIRES QUI ALIMENTENT LES PLAGES	189
5.1	PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS POUR LES ANALYSES MINÉRALOGIQUES	189
5.2	RÉSULTATS DES ANALYSES MINÉRALES	191
5.3	SYNTHÈSE.....	202
6.	DONNÉES DE NIVEAUX D'EAU, DE VAGUES ET DE COURANTS CÔTIERS	208
6.1	DESCRIPTION DES MÉTHODES D'ACQUISITION DE DONNÉES	208
6.1.1	<i>Mesure de la dénivellation de la surface libre</i>	208
6.1.2	<i>Mesure des courants côtiers</i>	209
6.1.3	<i>Rappel méthodologique : traitements et analyses réalisées sur les données</i>	210
6.1.4	<i>Caractéristiques des déploiements réalisés entre mai 2014 et novembre 2016</i>	211
6.2	QUANTIFICATION DES DYNAMIQUES À LA CÔTE	214
6.2.1	<i>Évaluation des conditions de niveaux d'eau et de vagues pour la période de suivi</i> <i>214</i>	
6.2.2	<i>Évaluation de la direction des vagues</i>	228
6.2.3	<i>Synthèse</i>	231
6.3	ÉVALUATION DE LA MODIFICATION DU RÉGIME MORPHODYNAMIQUE DU HAUT-ESTRAN LIÉ AU POSITIONNEMENT DES OUVRAGES	233
6.3.1	<i>Profil 1 (artificiel)</i>	233
6.3.2	<i>Profil 2 (naturel)</i>	235
6.3.3	<i>Profil 3 (naturel)</i>	236
6.3.4	<i>Profil 4 (déjà artificiel)</i>	237
6.3.5	<i>Profil 5 (artificiel)</i>	238
6.3.6	<i>Profil 6 (naturel)</i>	239
6.3.7	<i>Synthèse</i>	240
6.4	QUANTIFIER LES EFFETS DE LA GÉOMORPHOLOGIE DE L'ESTRAN SUR LES CONDITIONS DE NIVEAUX D'EAU ET DE VAGUES À LA CÔTE	241
6.4.1	<i>Amortissement des hauteurs de vagues sur la plateforme des basses-mers (-2 à -1 m CGVD28)</i>	243
6.4.2	<i>Effet de l'escarpement du niveau marin moyen</i>	244
6.4.3	<i>Amortissement des hauteurs de vagues sur la plateforme des hautes-mers (+ 1m CGVD 28)</i>	245
6.4.4	<i>Amortissement des hauteurs de vagues sur l'estran</i>	247
6.4.5	<i>Synthèse</i>	249
7.	PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE GESTION DES STOCKS SÉDIMENTAIRES.....	250

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE
ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

8. CONCLUSION GÉNÉRALE	252
9. RÉFÉRENCES.....	253
ANNEXES 1 À 54	256

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Longueur et pourcentage des segments par classes du taux de migration historique (1964 à 2012).	27
Tableau 2.	Moyenne du taux de déplacement de la ligne de rivage (m/an) pour chaque intervalle de date par secteur.....	31
Tableau 3.	Composantes de la ligne de rivage et les variables utilisées pour la segmentation et la caractérisation côtière.	37
Tableau 4.	Nomenclature des microfalaises.....	38
Tableau 5.	État de la côte selon l'orientation nord-est et sud (août 2014).	40
Tableau 6.	Type d'artificialité sur l'ensemble de la ligne de rivage étudiée - août 2014.	41
Tableau 7.	Relation entre l'état de la côte et la catégorie de microfalaise – août 2014.	43
Tableau 8.	Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2014.	45
Tableau 9.	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.....	49
Tableau 10.	Taille en millimètres et microns des classes granulométriques de la matrice fine.....	51
Tableau 11.	Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côte nord-est, août 2014.	53
Tableau 12.	Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côté sud, août 2014.	53
Tableau 13.	Distance entre la route et la ligne de rivage, août 2014.	56
Tableau 14.	Caractéristiques moyennes de la morphologie de la plage selon l'orientation nord-est et sud, août 2014.	59
Tableau 15.	Mesures statistiques sur l'ensemble des secteurs et pour tous les levés en m ³ /m ² (mai 2014 à mai 2016).	65
Tableau 16.	Limites des classes des volumes (m ³ /m ²) de plage (mai 2014 à mai 2016).	65
Tableau 17.	Classes des volumes de plage (m ³ /m ²) (mai 2014 à mai 2016).	66

Tableau 18.	Volumes de plage moyens (m^3/m^2) par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté sud).	70
Tableau 19.	Volumes moyens de la plage (m^3) par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté sud).	70
Tableau 20.	Volume de plage moyen (m^3/m^2) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté nord-est).	72
Tableau 21.	Volume de la plage moyen (m^3) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté nord-est).	72
Tableau 22.	Volumes de plage moyens (m^3/m^2) par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté sud).	73
Tableau 23.	Volumes moyens de plage (m^3) par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté Sud).	74
Tableau 24.	Volumes de plage moyens (m^3/m^2) par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté nord-est).	74
Tableau 25.	Volumes moyens de plage (m^3) par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté nord-est).	75
Tableau 26.	Classes du pourcentage de recouvrement des herbiers déterminés par leurs critères	78
Tableau 27.	Somme des superficies d'herbiers selon l'état de la côte en août 2014.	81
Tableau 28.	Hauteur moyenne pondérée des herbiers de spartine alterniflore, août 2014.	81
Tableau 29.	Pourcentage de recouvrement des herbiers, août 2014.	82
Tableau 30.	État de la côte après les travaux d'enrochement de l'automne 2014 sur la côte nord-est et sud.	83
Tableau 31.	Impacts de l'empiètement des enrochements sur la plage.	84
Tableau 32.	Type d'artificialité sur l'ensemble de la ligne de rivage étudié – août 2015.	85
Tableau 33.	Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur du côté sud entre 2014 et 2016.	87
Tableau 34.	Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur du côté sud entre 2014 et 2016.	90
Tableau 35.	Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2015.	94

Tableau 36.	Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2016.	95
Tableau 37.	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.	97
Tableau 38.	Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons du côté sud.	99
Tableau 39.	Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons du côté nord-est.	99
Tableau 40.	Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côté sud.	172
Tableau 41.	Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côté sud.	174
Tableau 42.	Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 1.	182
Tableau 43.	Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2015 et 2016 pour la zone 1.	182
Tableau 44.	Hauteur moyenne des herbiers de spartine alterniflore de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.	183
Tableau 45.	Proportion d'herbiers de spartine alterniflore par pourcentage de recouvrement de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.	183
Tableau 46.	Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2014 et 2015 pour la zone 2.	186
Tableau 47.	Déplacement des centroïdes d'herbiers entre 2015 et 2016 pour la zone 2.	187
Tableau 48.	Hauteur moyenne des herbiers de spartine alterniflore de la zone 2 en août 2014, 2015 et 2016.	187
Tableau 49.	Proportion d'herbiers de spartine alterniflore par pourcentage de recouvrement de la zone 2 en août 2014, 2015 et 2016.	188
Tableau 50.	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).	195
Tableau 51.	Ratio $Phy/(Kfs+Plg)$ et l'origine minéralogique associée.	195

Tableau 52.	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.....	197
Tableau 53.	Position et durée des déploiements d'instruments de mesure des paramètres de vagues et de niveaux d'eau sur le littoral de l'Isle-aux-Coudres pour les années 2014 et 2015.....	212
Tableau 54.	Position et durée des déploiements d'instruments de mesure des paramètres de vagues et de niveaux d'eau sur le littoral de l'Isle-aux-Coudres pour l'année 2016.....	213
Tableau 55.	Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 1.....	217
Tableau 56.	Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 2.....	219
Tableau 57.	Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 3.....	221
Tableau 58.	Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 4.....	223
Tableau 59.	Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 5.....	225
Tableau 60.	Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 6.....	227
Tableau 61.	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.).....	229
Tableau 62.	Comparaison des fréquences des classes de hauteurs significatives pour les vagues provenant des secteurs nord-est et sud.	230
Tableau 63.	Influence des différents secteurs morphologiques de la zone intertidale sur l'amortissement des distributions de hauteurs significatives pour les années 2014, 2015 et 2016.....	249

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Emplacement de l'île aux Coudres, des travaux d'enrochements, des toponymes délimitant les secteurs et du linéaire côtier à l'étude.....	20
Figure 2.	Exemple de l'utilisation de l'outil DSAS sur ArcGIS 10.1.	23
Figure 3.	Évolution du pourcentage du littoral artificialisé entre 1964 et 2012.	24
Figure 4.	Nombre de bâtiments près du linéaire côtier à l'étude entre 1964 et 2012.	25
Figure 5.	État de la côte (naturelle et artificielle) entre 1964 et 2012.	26
Figure 6.	Taux de migration (m/an) et leur position sur la ligne de rivage (1964 à 2012).....	28
Figure 7.	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.	29
Figure 8.	Taux de déplacement historiques (m/an) de la ligne de rivage et leur position sur le linéaire côtier délimité par les secteurs de chaque intervalle de dates 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.	30
Figure 9.	Localisation des stations de suivi par région administrative (2016). Source : LDGIZC, 2017.	34
Figure 10.	Taux de déplacement annuel mesuré sur les berges à l'étude grâce au réseau de stations de mesures d'érosion du LDGIZC.....	35
Figure 11.	Taux moyen de déplacement de la ligne de rivage mesuré à l'aide des stations de mesures entre 2007 et 2016 (LDGIZC).	36
Figure 12.	Segmentation côtière en août 2014 représentée par les catégories de microfalaise.	39
Figure 13.	Ligne de rivage déjà artificielle avant les travaux de 2014 (trait rouge) et enrochements réalisés lors des travaux de 2014 (cercles noirs).	40
Figure 14.	État de la ligne de rivage en août 2014.	42

Figure 15.	Profil type de plage sableuse à l'état stable. Source : modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006	44
Figure 16.	Relation entre les segments sans haut de plage et l'artificialité de la côte –août 2014.	45
Figure 17.	Emplacements des échantillons granulométriques des profils topographiques et hydrodynamiques pour la période de suivi 2014 à 2016.	46
Figure 18.	Exemple de positionnement des échantillons granulométriques sur un profil topographique.	47
Figure 19.	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.....	50
Figure 20.	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.	51
Figure 21.	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).....	52
Figure 22.	Profils topographiques suivis.	54
Figure 23.	Profils topographiques du côté sud, août 2014.	57
Figure 24.	Profils topographiques de la côte nord-est, août 2014.	58
Figure 25.	Morphologie de la plage des profils topographiques (août 2014).....	58
Figure 26.	Profils topographiques de la plage côté sud, août 2014.....	60
Figure 27.	Profils topographiques de la plage côté nord-est, août 2014.	60
Figure 28.	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.....	61
Figure 29.	Croquis représentant la démarche du calcul du volume de plage pour chaque polygone.	64
Figure 30.	Volume de plage (m ³ /m ²) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 1).....	67
Figure 31.	Volume de plage (m ³ /m ²) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 2).....	68

Figure 32.	Volume de plage (m^3/m^2) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 3).....	69
Figure 33.	Représentation cartographique des volumes de plage (m^3/m^2) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (Côté nord-est).....	71
Figure 34.	Emplacements des herbiers à spartine alterniflore.....	76
Figure 35.	Illustration démontrant l'emplacement des herbiers cartographiés sur le profil.....	77
Figure 36.	Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m^2) de la zone 1 en août 2014.....	79
Figure 37.	Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m^2) de la zone 2 en août 2014.....	80
Figure 38.	État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côté sud).....	86
Figure 39.	État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côte nord-est).....	89
Figure 40.	Catégories de microfalaises du côté sud de 2014 à 2016.....	91
Figure 41.	Catégories de microfalaises de la côte nord-est de 2014 à 2016.....	93
Figure 42.	Relation entre l'absence de haut de plage et l'état de la côte de 2014 à 2016.....	94
Figure 43.	Carte synthèse des éléments marquants de la segmentation côtière en 2016.....	96
Figure 44.	Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côté sud.....	101
Figure 45.	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, côté sud.....	102
Figure 46.	Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côté sud.....	102
Figure 47.	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, côté sud.....	103
Figure 48.	Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côté sud.....	104

Figure 49.	Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côté sud.....	105
Figure 50.	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, côté sud.	106
Figure 51.	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, côté sud.....	107
Figure 52.	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.	108
Figure 53.	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.....	109
Figure 54.	Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.	109
Figure 55.	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.....	110
Figure 56.	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.	111
Figure 57.	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.....	112
Figure 58.	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.	114
Figure 59.	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.	116
Figure 60.	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.	118
Figure 61.	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.	120
Figure 62.	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.	123
Figure 63.	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.	125
Figure 64.	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.	127
Figure 65.	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.	129
Figure 66.	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.	132
Figure 67.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 1.	133
Figure 68.	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.	134
Figure 69.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 2.	135
Figure 70.	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.	136
Figure 71.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 3.	137

Figure 72.	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.....	139
Figure 73.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 4.	140
Figure 74.	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.....	142
Figure 75.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 5.	143
Figure 76.	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.....	145
Figure 77.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 6.	146
Figure 78.	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.....	147
Figure 79.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 7.	148
Figure 80.	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.....	150
Figure 81.	Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 8.	151
Figure 82.	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.	153
Figure 83.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 2.....	154
Figure 84.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 3.....	155
Figure 85.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 4.....	156
Figure 86.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 5.....	157
Figure 87.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 6.....	158
Figure 88.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 7.....	159

Figure 89.	Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 8.....	160
Figure 90.	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, côté sud.....	162
Figure 91.	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, côté sud.....	163
Figure 92.	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, côté sud.....	164
Figure 93.	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, côté sud.....	165
Figure 94.	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.	166
Figure 95.	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.	167
Figure 96.	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.	168
Figure 97.	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.	169
Figure 98.	Différences cumulées des volumes (m^3) des plages du côté sud.	170
Figure 99.	Évolution du volume de plage total (m^3) par secteur entre mai 2014 et mai 2016 pour le côté 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.....	171
Figure 100.	Différences cumulées des volumes (m^3) des plages du côté nord-est.	172
Figure 101.	Évolution du volume de plage total (m^3) par secteur entre mai 2014 et septembre 2015 pour le côté sud.	173
Figure 102.	Croquis de l'utilisation de l'outil <i>intersect</i>	177

Figure 103.	Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 1.	179
Figure 104.	Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 1.	180
Figure 105.	Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 1.	181
Figure 106.	Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 2.	184
Figure 107.	Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 2.	185
Figure 108.	Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 2.	186
Figure 109.	Emplacement des échantillons utilisés pour les analyses minérales.....	190
Figure 110.	Silhouette des groupes d'échantillons en fonction de la composition minéralogique.....	192
Figure 111.	Graphique montrant la relation entre les concentrations (%) de quartz, de feldspah potassique, de plagioclase et de phyllosilicate pour les différents clusters. Cercle noir (cluster 1), cercle rouge (cluster 2) et cercle vert (cluster 3).	193
Figure 112.	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).	194
Figure 113.	Appartenance des échantillons de sédiment meuble et de roc de l'ensemble de l'île selon le ratios $Phy/(Kfs+Plg)$	196
Figure 114.	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.	199
Figure 115.	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.	200
Figure 116.	Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la zone sablo-vaseuse située entre la plateforme rocheuse et le cordon infralittoral pour chaque profil du	

	côté sud sur les périodes d'échantillonnage d'octobre 2015 et août 2016.	201
Figure 117.	Rides de courant dans la zone sablo-vaseuse sur le profil 1, 15 novembre 2016.	202
Figure 118.	Cordon infralitoral composé de sable et de blocs de diverses tailles (entre les profils 3 et 4), 19 mai 2015.	203
Figure 119.	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).....	204
Figure 120.	Plateforme rocheuse devant le profil 6. Vue vers l'est. Photo prise le 21 août 2016.	205
Figure 121.	Dépôts de sable et de petits blocs. Photo de l'échantillon P7-BE4 prise le 30 août 2015.	205
Figure 122.	Photo de l'échantillon P1-HE2 prise sur la plage du profil 1 le 9 novembre 2014.	206
Figure 123.	Photo de l'échantillon P2-HE1 prise sur la plage du profil 2 le 5 mai 2016.	207
Figure 124.	Capteur fixé sub-horizontalement sur la plateforme rocheuse. La membrane est positionnée le plus proche possible du fond.....	208
Figure 125.	ADV positionné au sud-est de l'île du 18/05/2015 au 15/12/2015.....	210
Figure 126.	Exemple de déploiement de capteur de pression sur la plateforme rocheuse réalisé lors de la campagne C1 (12 au 16 mai 2014)	214
Figure 127.	Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 1 et niveaux d'eau concomitants.	216
Figure 128.	Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants	218
Figure 129.	Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 3 et niveaux d'eau concomitants	220
Figure 130.	Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 4 et niveaux d'eau concomitants	222
Figure 131.	Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 5 et niveaux d'eau concomitants	224
Figure 132.	Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 6 et niveaux d'eau concomitants	226

Figure 133.	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.....	228
Figure 134.	Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut estran du profil 1 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	234
Figure 135.	Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 2 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	235
Figure 136.	Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 3 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	236
Figure 137.	Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 4 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	237
Figure 138.	Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 5 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	238
Figure 139.	Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 6 (<i>runup</i> calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.	239
Figure 140.	a. morphologie et position des capteurs du profil 2, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 2.4 et 2.3 pour les années 2014, 2015 et 2016.....	243
Figure 141.	a. morphologie et position des capteurs du profil 1, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3b et 1.3a pour les années 2014, 2015 et 2016.	244
Figure 142.	a. morphologie et position des capteurs du profil 3, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3b et 3.3a pour les années 2014, 2015 et 2016.	245
Figure 143.	a. morphologie et position des capteurs du profil 1, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3a et 1.2 pour les années 2014, 2015 et 2016.	246
Figure 144.	a. morphologie et position des capteurs du profil 3, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3a et 3.2 pour les années 2014, 2015 et 2016.	247

- Figure 145.** a. morphologie et position des capteurs du profil 3, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 4.1 et 4.2. 248
- Figure 146.** Cellules hydrosédimentaires des zones à l'étude de l'île aux Coudres..... 250

1. MISE EN CONTEXTE DU PROJET

1.1 Problématique

Les berges de l'île aux Coudres sont en érosion sur certains secteurs du linéaire côtier. Cette érosion 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 l'étude de Roche (2010, 2011, 2013), 12,3 km du linéaire côtier bordant cette route sont en érosion et nécessitent la construction d'un ouvrage de protection à court et moyen termes afin de protéger la route. Près de 2,5 km de berges près de plusieurs tronçons de route ont donc fait l'objet d'un enrochement à l'automne 2014.

L'empiètement de l'enrochement sur l'estran et l'interaction entre celui-ci et les vagues font craindre une modification de la morphodynamique de la plage de graviers de schiste et de sables située en bordure et dans les secteurs adjacents à l'enrochement, ce qui pourrait entraîner le départ de sédiments. Cette modification pourrait être problématique si elle aboutissait à :

1. Une érosion de la plage (diminution du budget sédimentaire) conduisant à une augmentation de la pression des dynamiques sur l'ouvrage (vagues, niveaux d'eau, pied de glace) ;
2. Une modification du profil associée à un élargissement de la plage vers le large conduisant à un enfouissement de l'herbier à spartine alterniflore situé sur le bas estran ;
3. Une modification du profil associée à un stockage de matériel sédimentaire au pied de et sur l'ouvrage conduisant à un risque de franchissement de l'ouvrage (*overtopping*) par les niveaux d'eau et les vagues ;
4. Une accélération de l'érosion de la berge aux extrémités de l'enrochement (effet de bout).

Par ailleurs, les équations servant à modéliser les conditions hydrodynamiques à la côte et la submersion par franchissement ont été développées pour des côtes sablonneuses présentant généralement de courts estrans. Or, le littoral de l'île aux Coudres ainsi que celui de Charlevoix et de la rive sud du Saint-Laurent présentent de larges estrans souvent rocheux. Aucune étude ne prend actuellement en compte les effets potentiels de cette caractéristique géomorphologique sur les conditions de niveaux d'eau et de vagues à l'approche de la plage. Pourtant, la géomorphologie des plateformes rocheuses a clairement une influence sur l'atténuation de l'énergie des vagues et les niveaux d'atteinte par les vagues à la côte (Filippo et al., 2014; Didier et al., 2016). Il devient donc impératif, pour quantifier la réponse morphosédimentaire des plages face aux conditions météo-marines, d'évaluer la sensibilité du littoral à l'érosion ainsi qu'à la submersion en bordure de côtes à large estran et à

plateforme rocheuse, de mesurer les vagues et les niveaux d'eau près de la côte, mais aussi d'obtenir une cartographie haute résolution de la topographie de l'estran.

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a, en conséquence, mandaté le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) pour réaliser un suivi du littoral sur une période de 3 ans.

1.2 Objectifs du programme de suivi

Le programme de suivi visait à répondre aux objectifs et aux sous-objectifs suivants.

Objectif 1 :

VÉRIFIER L'ABSENCE D'IMPACT DES OUVRAGES SUR LA MORPHODYNAMIQUE DE LA PLAGE

Sous-objectifs :

1.1. Constituer un état initial de la morphologie et des caractéristiques sédimentologiques de la plage et du talus d'érosion avant l'implantation des ouvrages de protection ;

1.2. Effectuer un suivi morphodynamique des secteurs protégés et de secteurs témoins naturels ;

1.3. Quantifier les effets de la géomorphologie de l'estran sur les conditions de niveaux d'eau et de vagues ;

1.4. Identifier les sources sédimentaires qui alimentent les plages et proposer une approche de gestion des stocks sédimentaires.

Objectif 2 :

VÉRIFIER L'ABSENCE D'IMPACT DES OUVRAGES SUR LA FLORE SITUÉE SUR LE BAS ESTRAN (HERBIERS À SPARTINE ALTERNIFLORE)

Sous-objectifs :

2.1. Constituer un état initial de la géométrie et du peuplement des herbiers avant la mise en place des ouvrages ;

2.2. Réaliser un suivi de la superficie et de l'état des herbiers situés au droit des aménagements et quelques centaines de mètres de part et d'autre des zones aménagées afin d'évaluer l'effet de bout de la structure.

Le LDGIZC de l'UQAR a développé un protocole expérimental de suivi pour répondre aux problématiques précédemment évoquées à des fins opérationnelles, mais également afin d'augmenter la connaissance scientifique du comportement des milieux littoraux en présence de structures de défense côtière et de développer un nouveau modèle morphodynamique pour les côtes présentant de larges estrans. Le type de suivi proposé est le premier du genre au Québec dans un milieu qui est pourtant représentatif, de par sa géomorphologie des systèmes côtiers, des estuaires moyen et maritime du Saint-Laurent.

La compréhension du fonctionnement morphodynamique de ce type de côte constitue un enjeu pour l'adaptation et l'atténuation du risque d'érosion et de submersion côtière au Québec. Les résultats pourront donc servir à mieux identifier et calibrer d'éventuelles solutions d'adaptation pour la rive sud du Saint-Laurent et la région de Charlevoix.

1.3 Présentation du rapport

Ce rapport final vise à présenter les résultats de l'état de référence avant la mise en place des ouvrages de protection ainsi que ceux du suivi entre novembre 2014 et novembre 2016. Les derniers relevés de terrain ont été réalisés en novembre 2016 et les instruments de mesure ont été retirés en bonne partie au même moment. Mentionnons aussi que la méthodologie complète a déjà été présentée (Lambert et Bernatchez, 2014) ; seul un rappel des grandes étapes méthodologiques est donc proposé dans ce rapport.

Nous présentons dans un premier temps l'état de référence de la zone côtière qui consiste en une évaluation de l'évolution rétrospective du déplacement de la ligne de rivage et de l'artificialité sur près de 7,8 km de côte entre 1964 et 2012, une segmentation et une caractérisation côtière (types de côte, état de la côte, caractéristiques sédimentologiques, topographie, volume sédimentaire de la plage, cartographie de la superficie et caractéristiques des herbiers) avant la mise en place de l'enrochement en 2014. Un bilan des changements morphosédimentaires et de la superficie des herbiers post-enrochement est ensuite présenté. Enfin, une analyse des conditions de niveaux d'eau et de vagues mesurées pour la période 2014 à 2016 est présentée ainsi qu'une analyse de la modification du régime morphodynamique du haut estran lié au positionnement des ouvrages et de l'effet de la géomorphologie de l'estran sur les conditions de niveaux d'eau et de vagues à la côte. Nous concluons avec les constats des impacts des ouvrages de protection sur la dynamique morphosédimentaire de la plage et des herbiers, puis nous proposons une approche de gestion des stocks sédimentaires des berges à l'étude pour ce projet.

2. ÉTAT DE RÉFÉRENCE DES CARACTÉRISTIQUES MORPHO-SÉDIMENTAIRES ET DES HERBIERS À SPARTINE ALTERNIFLORE DE LA ZONE CÔTIÈRE

L'évaluation des impacts des ouvrages de protection sur la zone côtière est généralement effectuée à partir d'un état initial ou de référence basé sur une caractérisation du milieu avant la mise en place de ces ouvrages. L'état du milieu au début de la campagne de suivi représente certes les conditions initiales, mais dans les milieux déjà perturbés comme à l'île aux Coudres, cet état initial peut aussi être en partie le résultat des effets cumulés de différentes perturbations du passé. Avant de présenter les caractéristiques du milieu en 2014, soit avant la mise en place de l'enrochement, nous présenterons donc l'évolution historique du déplacement de la ligne de rivage et de l'artificialité du littoral. Cette reconstitution permettra de comprendre le fonctionnement du système côtier à moyen et long termes et d'avoir une meilleure compréhension des causes des changements qui pourront être mesurés. Elle permettra aussi d'évaluer si ces changements sont véritablement associés à l'implantation des ouvrages ou bien à d'autres phénomènes naturels.

2.1 Évolution rétrospective du littoral (1964-2012)

L'ensemble du linéaire côtier étudié est de 7 709 mètres (figure 1), soit 28,7 % du littoral de l'île (26,8 km). Il constitue presque entièrement le tronçon sud du chemin des Coudriers de la Pointe à Simon à l'Hôtel Cap-aux-Pierres (6442 m) ainsi qu'une petite portion du côté nord-est allant du début du chemin de la Bourroche dans l'anse à Mailloux jusqu'à l'anse du ruisseau rouge (1 267m).

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ÎLE-AUX-COUDRES

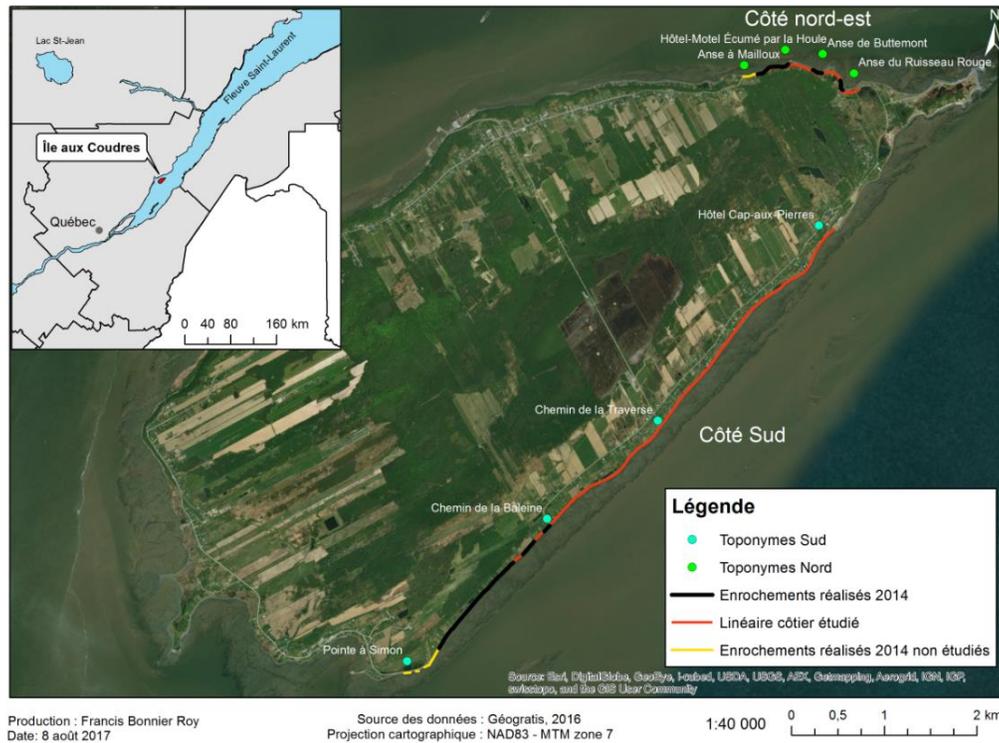


Figure 1. Emplacement de l'île aux Coudres, des travaux d'enrochements, des toponymes délimitant les secteurs et du linéaire côtier à l'étude.

Les toponymes sur la carte ont été choisis pour faciliter le repérage des résultats spatialement. Ces noms de lieu représentent des termes connus par les résidents de l'Île comme des anses, des bâtiments importants ou des points.

2.1.1 Méthodologie

2.1.1.1 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 (Poly-Géo Inc., 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.

2.1.1.2 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 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.

2.1.1.3 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 4 à 7 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 5,5 et 10 m, soit 0,11 à 0,21 m/an 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).

Puisque l'objectif initial du travail de Poly-Géo Inc. n'impliquait pas de calculs du taux de déplacement de la ligne de rivage, le géoréférencement n'était pas assez précis pour ce type d'analyse. Ainsi, certaines orthophotographies ont dû être géoréférencées à nouveau afin de superposer au mieux les photographies historiques sur les orthophotographies de 2012. 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 du paysage présents sur les photos entre 1964 et 2012.

2.1.1.4 Traitements 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 2). 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.



Figure 2. Exemple de l'utilisation de l'outil DSAS sur ArcGIS 10.1.

2.1.2 Résultats et interprétation

2.1.2.1 Évolution historique de l'état de la côte

Les berges à l'étude de la municipalité de L'Isle-aux-Coudres ont connu, depuis la deuxième portion du 20^e siècle, une artificialisation de plus en plus importante. La figure 3 montre un faible pourcentage de la côte artificialisée en 1964 (3 %), alors que celui-ci atteint 37 % en 2012.

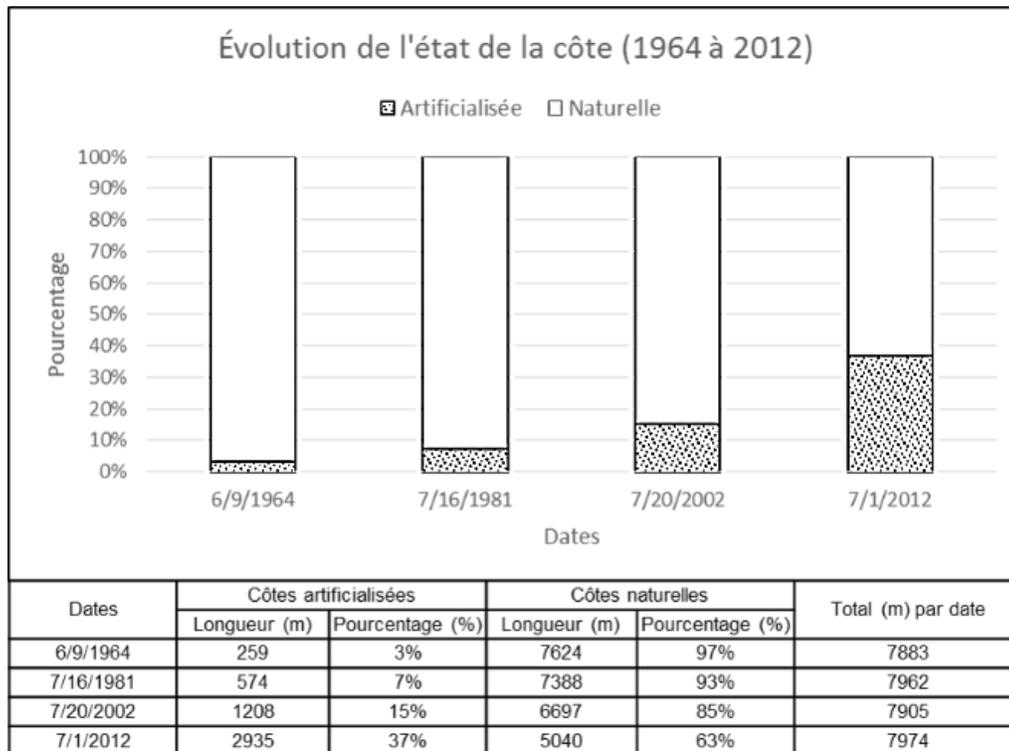


Figure 3. Évolution du pourcentage du littoral artificialisé entre 1964 et 2012.

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 du côté sud étaient en majorité vouées à l'agriculture et quelques habitations étaient présentes. En 1964, 8 bâtiments étaient construits près du linéaire côtier sur le côté sud à l'étude et 3 le long du côté nord-est étudié (figure 4). En 2012, il y avait 49 maisons sur le côté sud et 23 du côté nord-est. Selon ce même graphique, la tendance est continue sur le côté sud tandis que du côté 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'endroit libre pour construire sur le littoral du côté nord-est, contrairement au côté sud où de récentes constructions sont visibles.

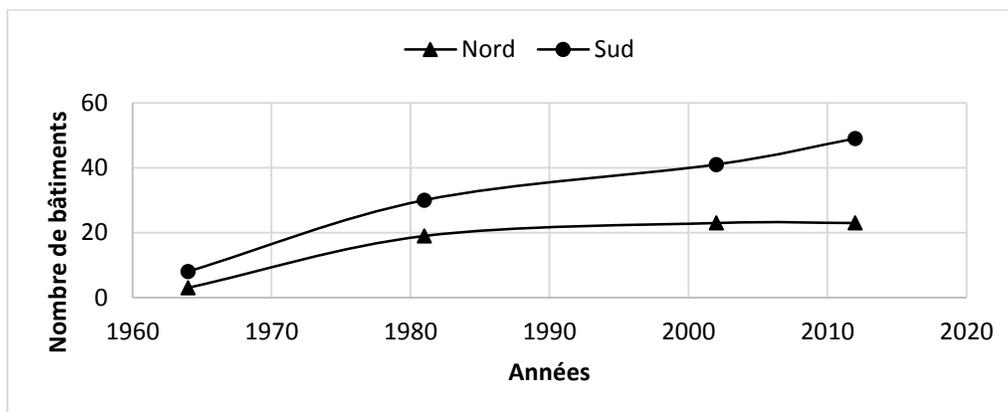


Figure 4. Nombre de bâtiments près du linéaire côtier à l'étude entre 1964 et 2012.

En 1964, les berges du côté nord-est étaient légèrement plus artificialisées (4 %) que celles du côté 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, ce chiffre monte à 20 % sur le côté nord-est et reste faible à 4 % pour l'ensemble du côté 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 le côté 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 le côté sud où le pourcentage de côte artificielle a plus que triplé durant cette période, atteignant 38 %. Le côté nord-est s'est plutôt stabilisé avec un pourcentage de 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 5.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES



Figure 5. État de la côte (naturelle et artificielle) entre 1964 et 2012.

2.1.2.2 Résultats et interprétation du taux de migration historique

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 1 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 1. 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
- 0,29 à - 0,15	300	4 %
- 0,149 à - 0,05	1 125	15 %
- 0,049 à 0,05	3 485	45 %
0,051 à 0,15	1 475	19 %
0,151 à 0,50	1 315	17 %
Total	7700	100 %

La figure 6 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. Des cartes détaillées du taux de migration historique sont disponibles aux annexes 1 à 6.

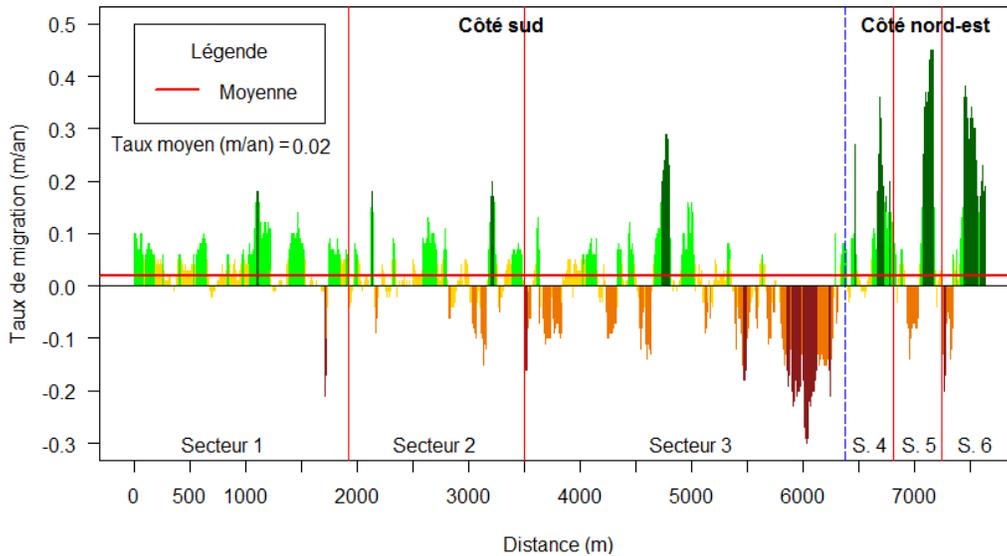


Figure 6. Taux de migration (m/an) et leur position sur la ligne de rivage (1964 à 2012).

La figure 7 est une carte complémentaire à la figure 6 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.

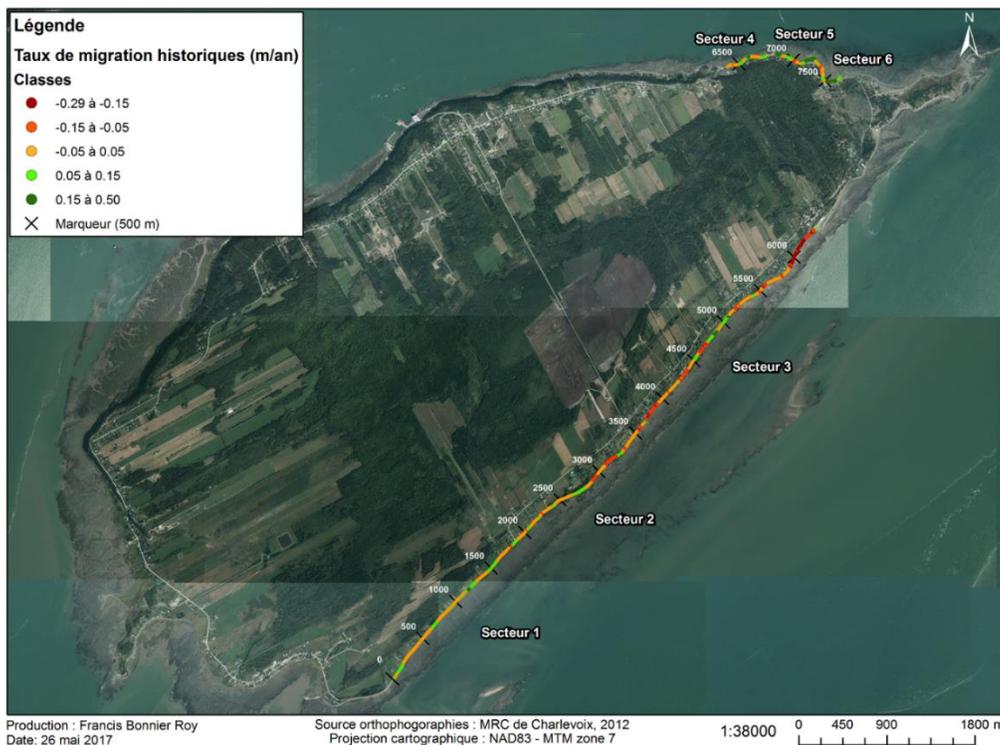


Figure 7. Taux de migration historiques (m/an) séparés en 5 classes (1964 à 2012). Le secteur 1 va de 0 m à 1 930 m, le secteur 2 de 1 930 m à 3 500 m, le secteur 3 de 3 500 m à 6 375 m, le secteur 4 de 6 375 m à 6 815 m, le secteur 5 de 6 815 m à 7 250 m et le secteur 6 de 7 250 m à 7 685 m.

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 7. Les taux de migration négatifs les plus forts (-0,29 à 0,15 m/an), 4 % du total, sont autour 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 des ouvrages de protection et de la microfalaise (entre 1,7 m et 5 m). De plus, cette portion du côté sud est celle qui a connu les plus fortes vagues enregistrées par les capteurs de pression durant le suivi.

La figure 8 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.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

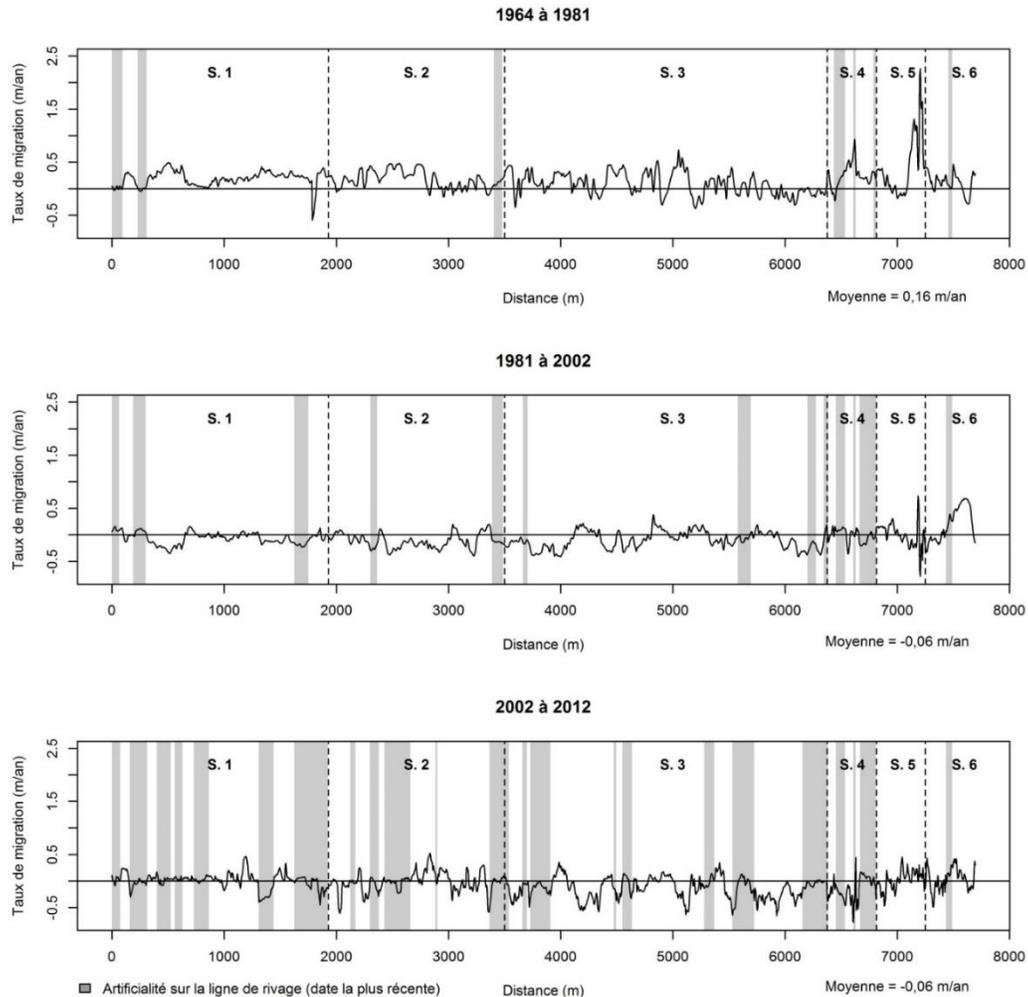


Figure 8. Taux de déplacement historiques (m/an) de la ligne de rivage et leur position sur le linéaire côtier délimité par les secteurs de chaque intervalle de dates entre 1964 et 2012. Les interventions de protection des berges sont illustrées par les zones grisées et représentent l'état de la côte de la date la plus récente de l'intervalle.

Les taux de déplacement historiques moyens des secteurs démontrent une tendance plutôt positive sur l'ensemble du linéaire côtier à l'étude pour l'intervalle 1964 à 1981 (tableau 2). Du côté 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 se traduisant par des tronçons du littoral en érosion parmi ceux en accrétion. Du côté nord-est, le constat est similaire avec une avancée de la ligne de rivage pour les secteurs 4, 5 et 6.

Tableau 2. Moyenne du taux de déplacement de la ligne de rivage (m/an) pour chaque intervalle de date par secteur.

Secteurs	Moyenne (m/an) 1964 à 1981	Moyenne (m/an) 1981 à 2002	Moyenne (m/an) 2002 à 2012
1	0,19	-0,06	0,01
2	0,17	-0,12	-0,02
3	0,09	-0,10	-0,13
4	0,25	-0,02	-0,15
5	0,39	0,01	0,02
6	0,11	0,21	0,03
Côté sud	0,14	-0,09	-0,06
Côté nord-est	0,25	0,07	-0,03

Entre 1981 et 2002, la tendance s'inverse et l'érosion est beaucoup plus présente du côté sud alors que le taux moyen est de - 0,09 m/an. Pour le même intervalle du côté nord-est, seul le secteur 4 présente une moyenne négative tandis que le secteur 5 expose une plus grande stabilité de la ligne de rivage et que le secteur 6 montre 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 est dans les 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'ouvrage de protection s'ajoutent. 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 -0,1 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 intervalles, 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 de 0,24 m/an. 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 neutre (-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, principalement causé par un recul important de la petite pointe naturelle à la distance 6 600 m. L'implantation de l'hôtel-motel semble avoir amplifié les problèmes d'érosion de ce secteur au cours des dernières décennies puisqu'un recul de la ligne de rivage léger à moyen est repérable sur les berges, ayant 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 exclus 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, dû 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 de 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 rocheuse basse à l'ouest du ruisseau rouge a quant à elle été en moyenne stable sur 48 ans.

Au terme de cette revue historique du taux de migration entre 1964 et 2012, plusieurs constats sont identifiables. Le taux moyen de déplacement de la côte des secteurs à l'étude est assez faible, voire nul. Il existe par contre des endroits où la progradation et l'érosion sont plus remarquables. Le secteur 1, la partie est du secteur 3 et le secteur 4 sont des endroits où le recul du littoral fut plus marquant qu'ailleurs. Ce sont aussi ces secteurs qui ont connu la grande majorité de l'artificialisation de la côte par toute sorte de moyens tels que des enrochements ou des murets. Les secteurs 2 et 5 ont été assez stables, voire légèrement en progradation. Le secteur 6 est cependant celui qui a connu le plus fort taux de déplacement sur l'ensemble du linéaire côtier à l'étude avec une progradation importante, probablement causée par l'apport de sédiment du ruisseau rouge et de la dérive littorale. De plus, les sédiments qui entrent dans cette anse par le transit sédimentaire s'y accumulent et peinent à poursuivre leur course vers l'ouest (secteur 5), car de nombreux écueils rocheux présents sur la côte rocheuse basse créent un obstacle naturel. Il est important de souligner que ces taux de migration sont globalement faibles comparativement au contexte régional de l'estuaire moyen du Saint-Laurent, plus particulièrement dans la région administrative de la Capitale-Nationale où les taux de déplacement moyens sont de $-0,46$ m/an et de $-0,91$ m/an entre Berthier-sur-Mer et La Pocatière pour la période 2001 à 2016 (figure 9).

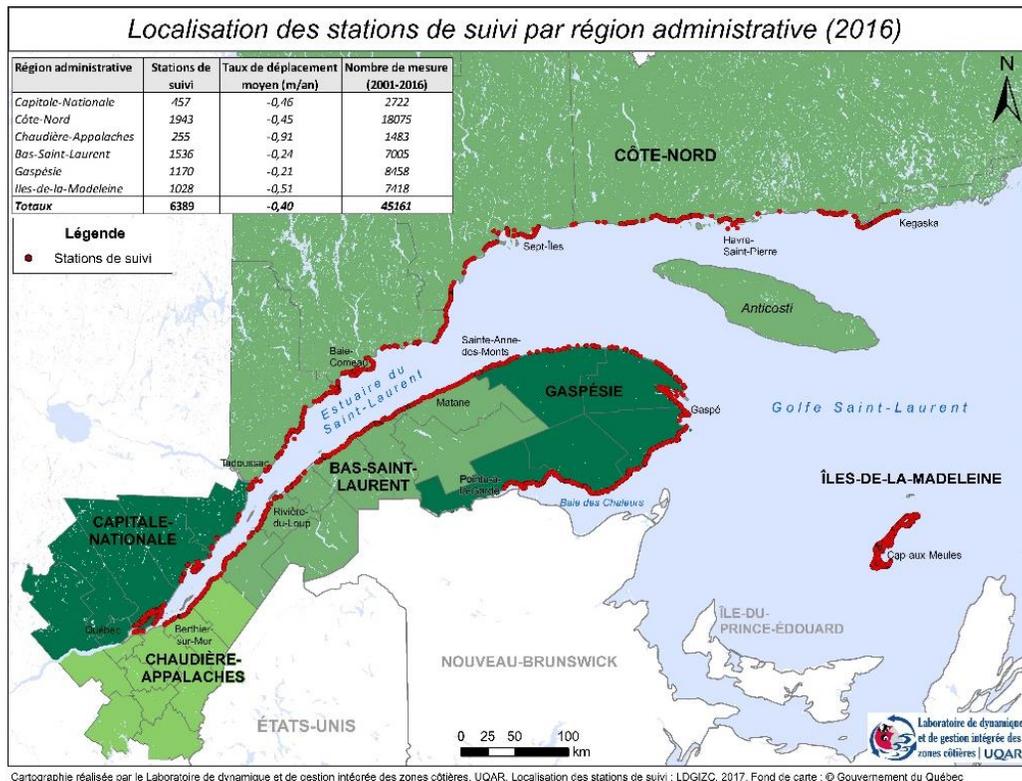


Figure 9. Localisation des stations de suivi par région administrative (2016). Source : LDGIZC, 2017.

Dans cette perspective, le littoral de l'île aux Coudres semble plus résilient à l'érosion que les autres littoraux de la région. Le taux de migration moyen de 0,02 m/an calculé sur le secteur étudié de l'île aux Coudres entre 1964 et 2012 se rapproche plus 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). 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). Le réseau de stations de suivi d'érosion du LDGIZC a permis de retracer les taux de déplacement annuels de la ligne de rivage, entre 2007 et 2016, grâce à 41 bornes disponibles sur le linéaire côtier à l'étude. La figure 10 montre que des épisodes d'accrétion et d'érosion périodiques peuvent se produire sur les berges de l'île, comme le montre 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 des travaux de protection des berges réalisés au cours des années pour protéger la route à proximité de la côte. La figure 11 présente l'emplacement des stations de mesures et les taux de déplacement. Il existe donc une grande variabilité interannuelle, mais une stabilité à long terme.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

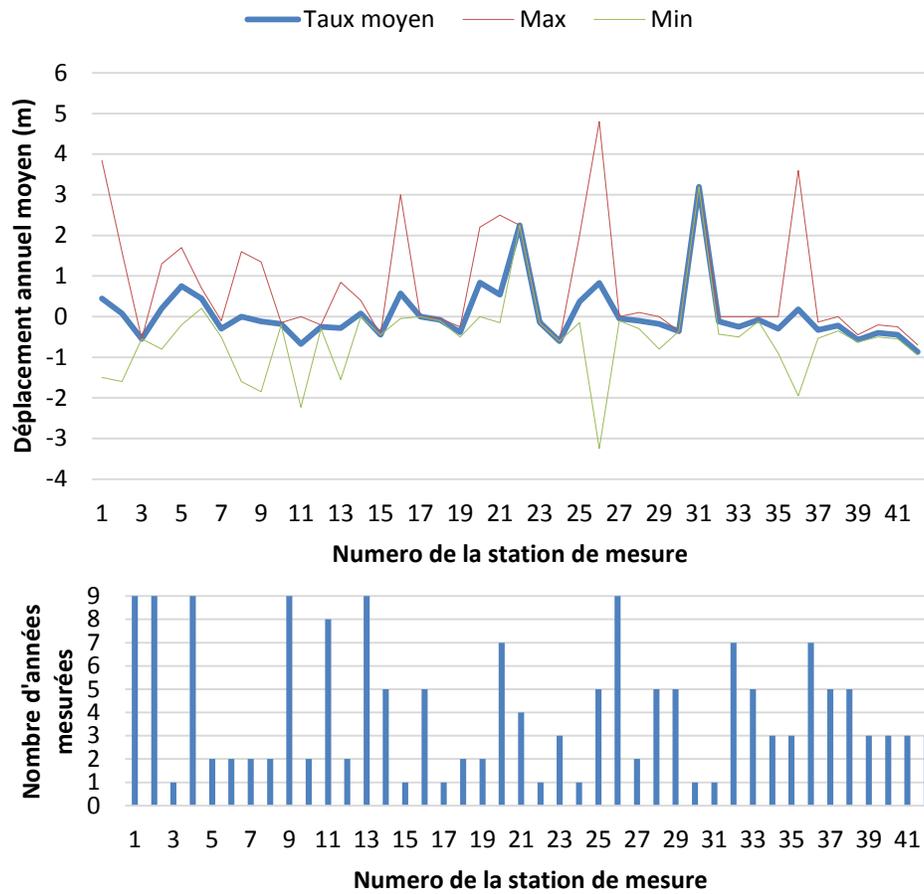


Figure 10. Taux de déplacement annuel mesuré entre 2007 et 2016 sur les berges à l'étude grâce au réseau de stations de mesures d'érosion du LDGIZC.

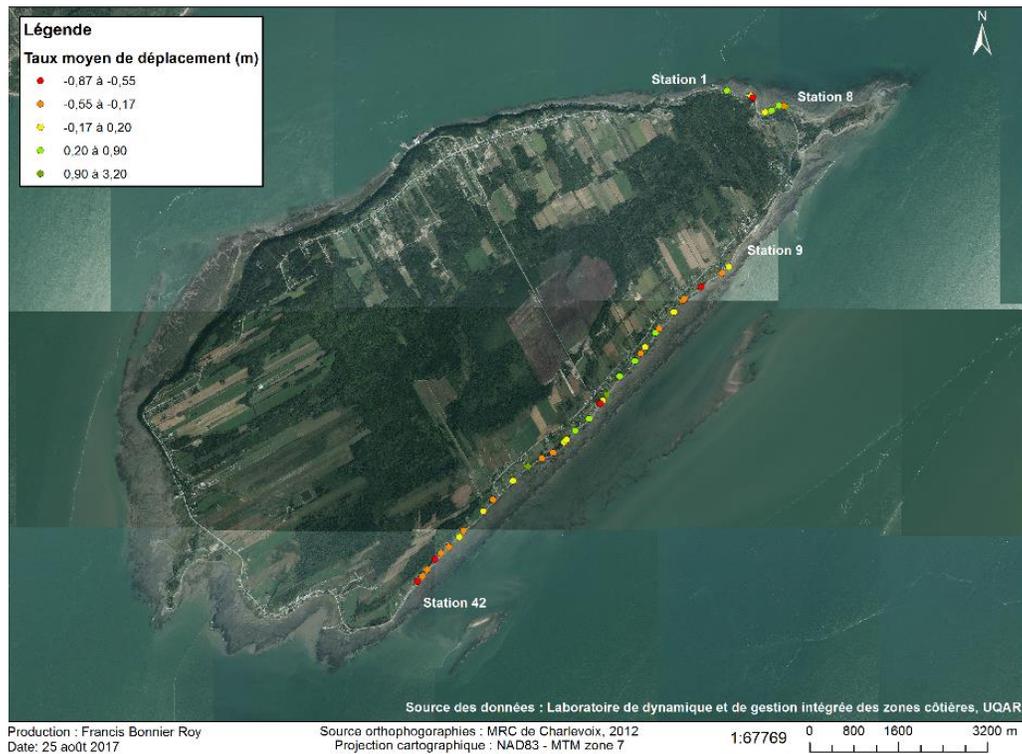


Figure 11. Taux moyen de déplacement de la ligne de rivage mesuré à l'aide des stations de mesures entre 2007 et 2016 (LDGIZC).

2.2 Segmentation et caractérisation 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.

2.2.1 Méthodologie

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 théorique de 2 cm. 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 3) 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 3. Composantes de la ligne de rivage et les variables utilisées pour la segmentation et la caractérisation côtière.

Composantes	Variables	
Type de côte	Terrasse de plage, côte rocheuse basse	
État de la côte	Active, semi-active, stable*(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 endommagée	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	

Source : Drejza et al., 2014

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 microfalaise 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 microfalaise en érosion visible et aucune végétation n'est présente sur le haut de plage.

Dans le cas des microfalaises et falaises, les dimensions du tableau 4 servent de balises pour la caractérisation. Les microfalaises ont été divisées en cinq catégories, soit l'absence de microfalaise sur une berge naturelle, l'absence de microfalaise sur une berge artificielle, les microfalaises dont la hauteur se situe entre 20 et 50 cm, les microfalaises dont la hauteur se situe entre 50 à 100 cm et les microfalaises dont la hauteur est supérieure à 100 cm.

Tableau 4. Nomenclature des microfalaises.

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	Plus de 100 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 du côté 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 12). La segmentation continue au côté 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 12 permet de visualiser la segmentation avec la composante microfalaise 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'enrochement à l'automne 2014.



Figure 12. Segmentation côtière en août 2014 représentée par les catégories de microfalaise.

2.2.2 Résultats et interprétation

2.2.2.1 Artificialisation des berges

La figure 13 présente la ligne de rivage artificielle avant les travaux d'enrochements à l'automne 2014 ainsi que l'emplacement des nouveaux ouvrages d'empierrement. Les ouvrages de protection ont majoritairement été implantés au secteur 1 du côté sud et au secteur 4 du côté nord-est.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

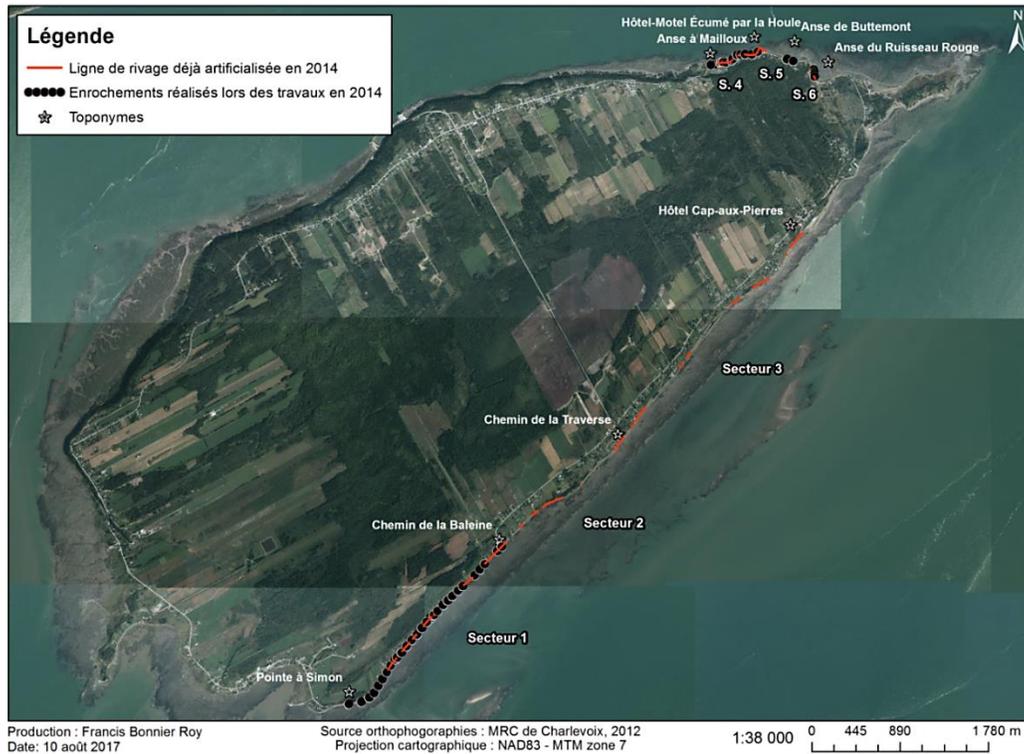


Figure 13. Ligne de rivage déjà artificielle avant les travaux de 2014 (trait rouge) et enrochements réalisés lors des travaux de 2014 (cercles noirs).

Les ouvrages de protection en août 2014 ont été comptabilisés pour produire le tableau 5. 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 artificialisées sur 6 339 m au total, soit 39 % du côté sud.

Tableau 5. 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

2.2.2.2 Types d'artificialités

Sur les 39 % de côtes artificialisées, les enrochements sont les types d'ouvrages les plus fréquents avec 83 % du linéaire côtier, dont 66 % au nord-est et 87 % au sud (tableau 6). Les murets de toutes sortes arrivent seconds avec 10 % du total, dont la majorité provient du muret de protection de l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle. Le gabion, qui occupe 88 m, est situé sur le côté 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 6. 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 %	360	87 %	2 162	83 %
Muret de béton	19 %	104	-	-	3 %
Muret de blocs de béton	-	-	2 %	41	1 %
Muret de pierre	-	-	2 %	56	2 %
Gabion	-	-	4 %	88	3 %
Muret de béton et enrochement	15 %	81	-	-	3 %
Remblais de petits blocs	-	-	5 %	131	4 %
Total	100 %	544	100 %	2 479	100 %

2.2.2.3 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 côté nord-est avait légèrement plus de berges stables (76 %) que le côté sud (71 %) (figure 14).

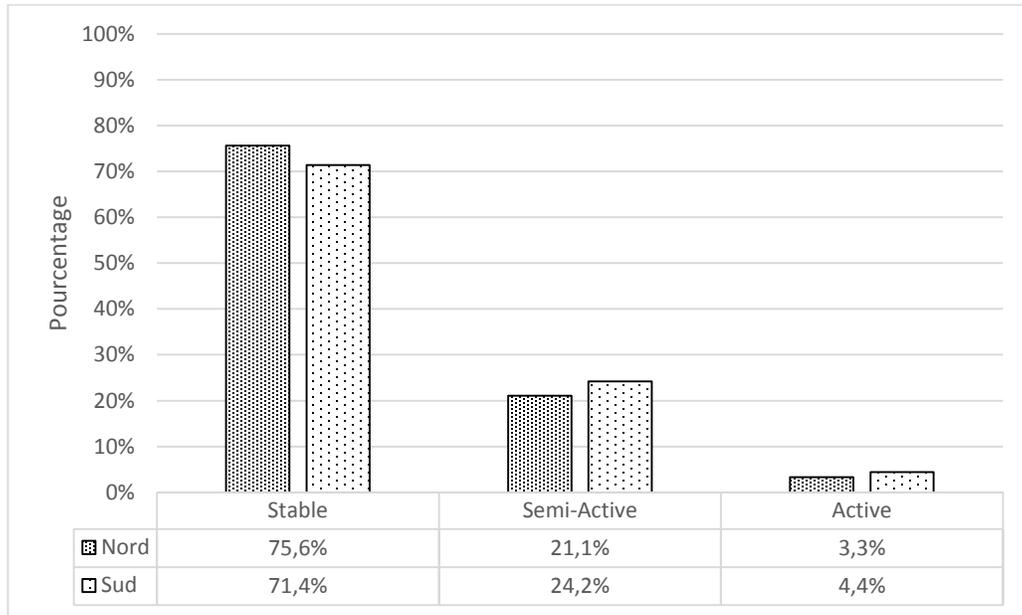


Figure 14. État de la ligne de rivage en août 2014.

Sur la côte nord-est, 48 % du littoral stable était attribué à une berge artificialisée tandis que 52 % était naturelle. Sur le côté 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.

2.2.2.4 Hauteur des microfalaises

Sur le côté nord-est, 44 % des berges naturelles sont sans microfalaise tandis que ce chiffre est de 16 % pour le côté sud (tableau 7).

Tableau 7. 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 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 le côté sud qui présente le plus de petites et moyennes microfalaises avec 49 %, comparativement à 19 % sur la côte nord-est. Au nord-est, 2 % de la côte ayant des microfalaises dépasse les 100 cm contre 1 % au sud. Les petites microfalaises sont généralement présentes partout au sud tandis qu'au nord-est, elles sont présentes près de l'anse de Buttemont. Les microfalaises entre 50 à 100 cm de hauteur sont surtout au niveau de l'enrochement vis-à-vis du profil 5 (anse à Buttemont, secteur 5). Les berges adjacentes à ce segment ont des microfalaises de 20 à 50 cm de hauteur. Au sud, ces traces d'érosion de taille moyenne 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 située au nord-est se trouve dans l'anse à Mailloux dans le secteur 4, derrière le muret de béton endommagé. Au sud, elle est positionnée au centre du secteur 2. Il est intéressant de souligner que 40 % des microfalaises moyennes du côté 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. Il est un bon exemple puisqu'il ne permet plus d'arrêter efficacement l'érosion provoquée par les vagues de haut niveau d'eau.

2.2.2.5 Présence de haut de plage et artificialité

La figure 15 présente les différents éléments de la plage au sens large. Le haut de plage (ou haute-plage), généralement végétalisé sur une côte basse sableuse, est la portion située entre le haut estran et l'arrière-plage, au pied d'une microfalaise souvent héritée de l'action des vagues lors d'événements de tempête.

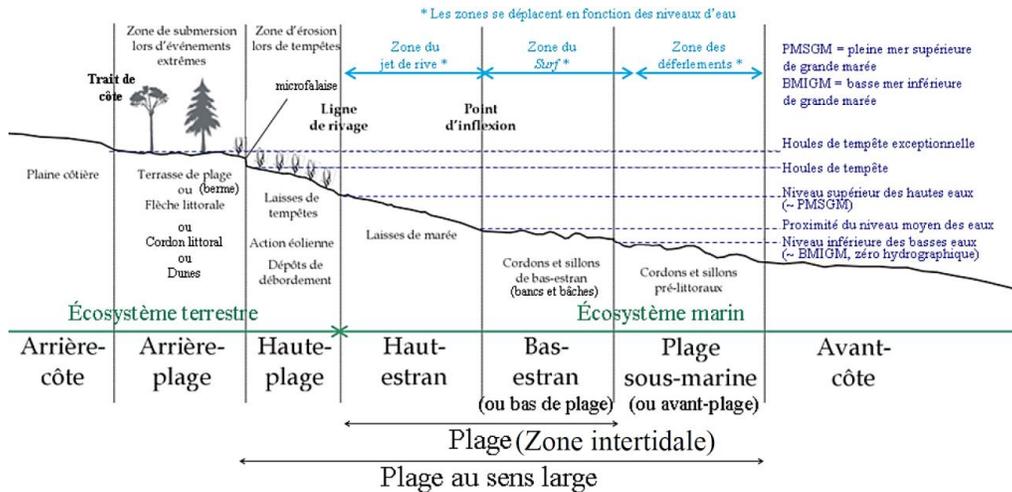


Figure 15. Profil type de plage sableuse à l'état stable. Source : modifiée de Fraser et Bernatchez, 2006

La figure 16 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.

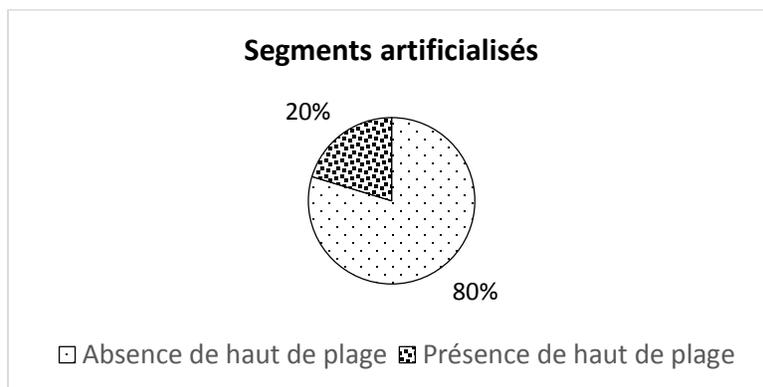


Figure 16. Relation entre les segments sans haut de plage et l'artificialité de la côte –août 2014.

En 2014, cette relation n'est pas aussi marquée dans les secteurs 5 et 6 que dans les autres secteurs (tableau 8). 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 de côte basse rocheuse, 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 8. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2014.

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

2.3 Granulométrie

2.3.1 Méthodologie

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 17). D'autres échantillons ont aussi été recueillis sur les pointes est (bout d'en bas) et ouest ainsi que sur le cordon infralittoral au sud de l'île pour répondre à l'objectif visant à définir les sources sédimentaires de la plage.

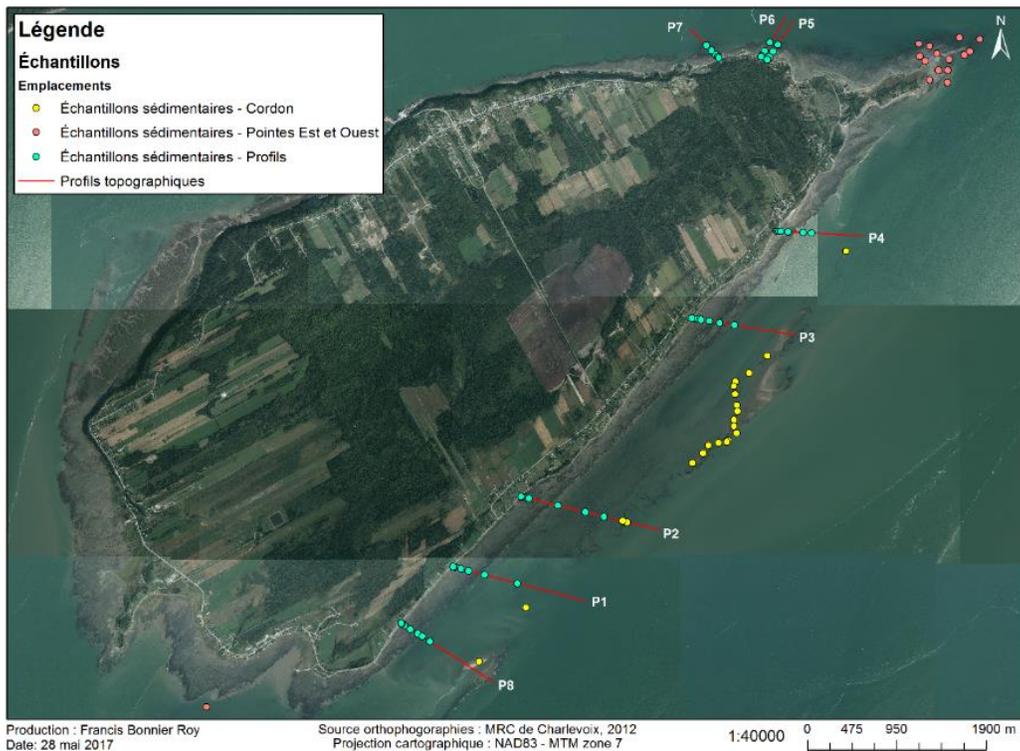


Figure 17. Emplacements des échantillons granulométriques des profils topographiques et hydrodynamiques pour la période de suivi 2014 à 2016.

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. 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 infralittoral. La figure 18 présente un exemple du positionnement des échantillons granulométriques de surface sur un profil topographique.

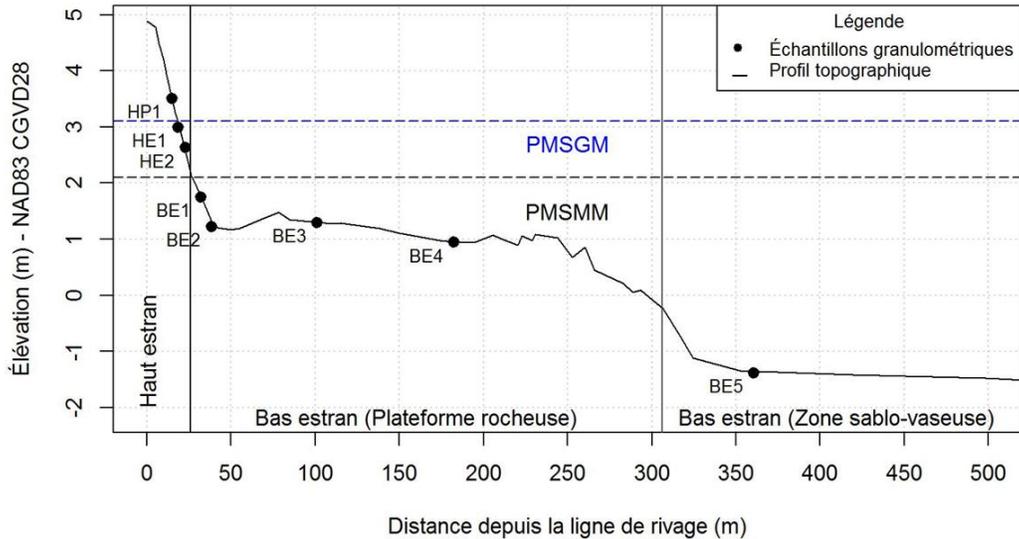


Figure 18. Exemple de positionnement des échantillons granulométriques sur un profil topographique.

L'échantillonnage de surface a été fait avec une truelle sur les 15 premiers centimètres de la surface. Chacun des emplacements d'échantillonnage a été relevé au GPS afin d'échantillonner les sédiments aux mêmes endroits à chaque saison sur la période de suivi. 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.

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 pour chacune d'elles. Ceci permet de déterminer la proportion de l'échantillon dont la taille granulométrique est inférieure au gravier (argile-limon-sable) et celle dont la taille est supérieure au sable (gravier, petits blocs). L'analyse granulométrique d'un sous-échantillon de 20 g des sédiments dont la taille est inférieure à 2 mm est réalisée à l'aide d'un granulomètre à 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 de 90 secondes six fois afin d'assurer la cohérence des résultats des trois derniers parcours.

Le quatrième parcours de l'échantillon est sélectionné pour générer les statistiques, car c'est à partir de celui-ci que les résultats deviennent stables. Les paramètres des distributions granulométriques ont été extraits avec le logiciel Gradistat, basé sur la classification modifiée d'Udden et Wentworth (Blott et Pye, 2001). Les données retenues sont les différents pourcentages de chaque classe texturale (sable, limon et argile), la médiane (D50) et la moyenne.

La représentation des classes texturales a été faite sous forme de diagramme ternaire à l'aide du logiciel statistique R en utilisant le package « *The Soil*

Texture Wizard » de Julien Moeys (2016). Deux types de diagrammes ont été générés. Le premier diagramme à trois côtés 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 2 000 μm). Il est destiné à l'interprétation des résultats des échantillons à prédominance de sable qui sont généralement localisés sur le haut de plage, le haut estran et sur la partie supérieure du bas estran (correspond souvent au bas estran 1 près de la flexure). Le deuxième diagramme est pour les autres échantillons du bas estran à prédominance de sable fin et de limon et ses trois côtés présentent respectivement les classes des sables (63 μm à 2 000 μm), des limons (2 μm à 63 μm) et des argiles (moins de 2 μm).

2.3.2 Résultats et interprétation

2.3.2.1 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'échantillon dans sa totalité en fonction du poids respectif des deux groupes de taille, soit les sédiments dits grossiers (graviers et petits blocs supérieurs à 2 mm de diamètre) et les sédiments fins (sables, limons et argiles inférieurs à 2 mm de diamètre). Le tableau 9, 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 (côté nord-est ou sud). Le premier constat est qu'il n'y a pas de différence significative des moyennes de proportion de sédiments fins des échantillons du haut estran (HE) et du bas estran (BE) entre les profils naturels (profils 1, 2, 3, 8) et le profil artificiel (profil 4) du côté sud. La différence entre les moyennes est plus claire entre les profils naturels de la côte nord-est et sud, soit de 6 points de pourcentage pour le haut de plage, de 13 points pour le haut estran et de 33 points pour le bas estran. Cela dit, le haut de plage est nettement plus fin que le haut estran. On remarque aussi des proportions similaires entre les sédiments fins et les sédiments grossiers pour les échantillons du haut estran du côté sud. C'est sur le bas estran que la différence est remarquable entre le nord-est (53 % de sédiments fins) et le sud (86 % de sédiments fins). C'est sur cette portion des profils du côté nord-est qu'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.

Tableau 9. Moyenne de la proportion des sédiments fins en fonction de l'état de la côte, la position de l'échantillon sur le profil et son orientation, août 2014.

État de la côte du profil	Position sur le profil	Nord-est	Sud	Moyenne générale
Artificiel	Haut estran	-	53 %	53 %
	Bas estran	-	87 %	87 %
Naturel	Haut de plage	76 %	83 %	80 %
	Haut estran	61 %	48 %	54 %
	Bas estran	53 %	86 %	76 %
Total	Moyenne générale	61 %	76 %	71 %

Sur l'ensemble de l'état initial du côté sud, la position sur le profil a un rôle déterminant sur la granulométrie. Plus on est élevé sur le profil, près de la zone végétalisée du haut de plage, plus l'échantillon est fin. En descendant vers le haut estran, les proportions de matrice fine et de graviers-petits blocs deviennent similaires alors que sur le bas estran, les sédiments fins deviennent à nouveau prédominants.

D'autre part, sur les profils du côté nord-est, le haut de plage est composé à forte majorité de sédiments fins avec une moyenne de 87 % (figure 19). 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 %. Dans le détail, le profil 7 avait un HE1 plus fin (78 %) que celui des profils 5 et 6 (62 % et 58 %), tandis que son HE2 était plus grossier (48 %) que les deux autres profils, près de la moyenne (58%). Les échantillons du bas estran présentent, comme le HE2, une proportion de sédiments fins oscillant autour de 50 %, à quelques exceptions près. Le BE1 du profil 5 présentait une faible proportion de sédiments fins, seulement 17 %, à l'inverse des deux autres profils dont les proportions s'élèvent à 58 % (P6) et 61 % (P7).

Toutefois, 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. 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.

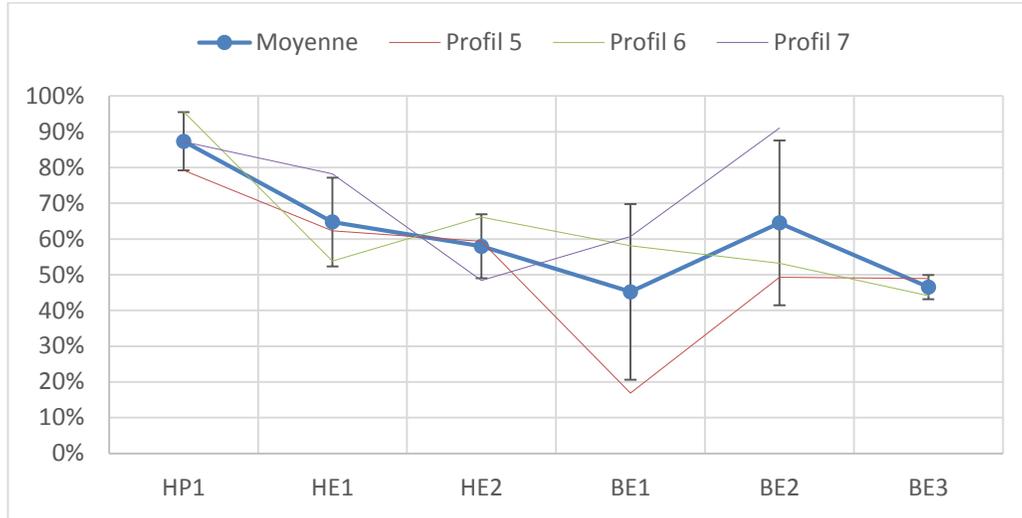


Figure 19. Moyenne des proportions et pourcentages par profil de la matrice fine (<2 mm de diamètre) des échantillons sur l'ensemble des profils (5, 6, 7) de la côte nord-est- août 2014.

Sur le côté sud, le haut estran contient en général une proportion de graviers plus élevée par rapport au total de la masse de l'échantillon (figure 20). 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 infralittoral et plateforme rocheuse). 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 le côté nord-est, probablement en raison du captage des limons par les herbiers, d'une moins grande exposition aux vagues, d'une plateforme rocheuse plus grande et des courants de marée élevés transportant des sédiments fins. 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 infralittoral donc ils sont assez fins. Les échantillons BE5 et BE6 sont plus près du cordon infralittoral, qui est sableux, ce qui explique de bonnes concentrations de sables moyens à grossiers.

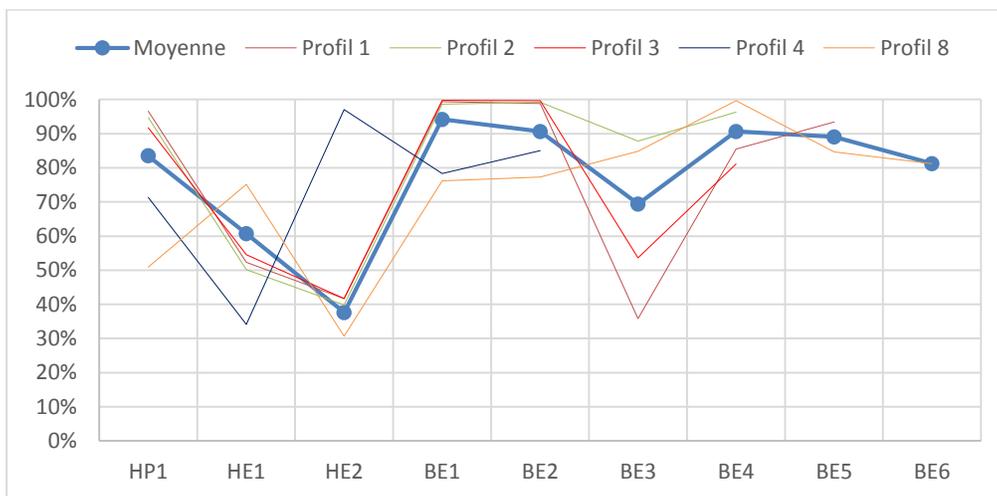


Figure 20. Moyenne des proportions et pourcentages par profil de la matrice fine (<2 mm de diamètre) des échantillons sur l'ensemble des profils (1, 2, 3, 4, 8) de la côte sud - août 2014.

2.3.2.2 Analyse 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 trois classes texturales granulométriques distinctes, soit les argiles (< 2 μm), les limons (2 μm à 63 μm) et les sables (63 μm à 2 mm). Les sables peuvent aussi être divisés en trois classes : grossiers, moyens et fins (tableau 10).

Tableau 10. Taille en millimètres 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 21 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 (l'ensemble des photographies des échantillons est disponible aux annexes 7 à 14). 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 autre, 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.

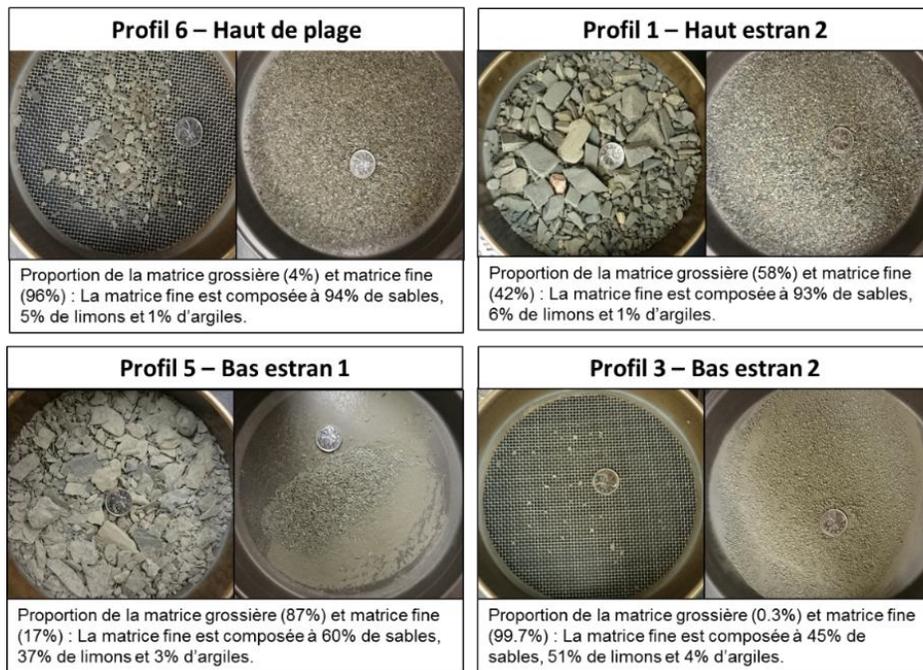


Figure 21. Exemples d'échantillons et des pourcentages de matériel grossier et fin ainsi que la composition détaillée de la matrice pour les trois classes texturales. Échelle : pièce de 25 ¢ canadienne (diamètre de 23,81 mm).

Sur la côte nord-est, la composition moyenne des échantillons des trois classes texturales est montrée au tableau 11. 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 11. 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 le côté sud, la composition des trois classes est présentée au tableau 12. 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 du côté nord-est. Le bas estran est quant à lui totalement différent avec un mélange presque à parité de sable et de limon, plus fin du côté sud qu'au nord-est de l'île.

Tableau 12. Moyennes des classes texturales granulométriques selon l'emplacement de l'échantillon sur le profil – côté 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 %

2.4 Profils topographiques

2.4.1 Méthodologie

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 22). Les profils 2, 3 et 6 sont les sites de témoins naturels. Le profil 4 était déjà artificialisé par un enrochement lors du début du projet. 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 a été localisé plus loin (100 m) des épis de la descente de bateaux Dufour pour éviter une perturbation des données de vagues par l'ouvrage perpendiculaire à la côte.

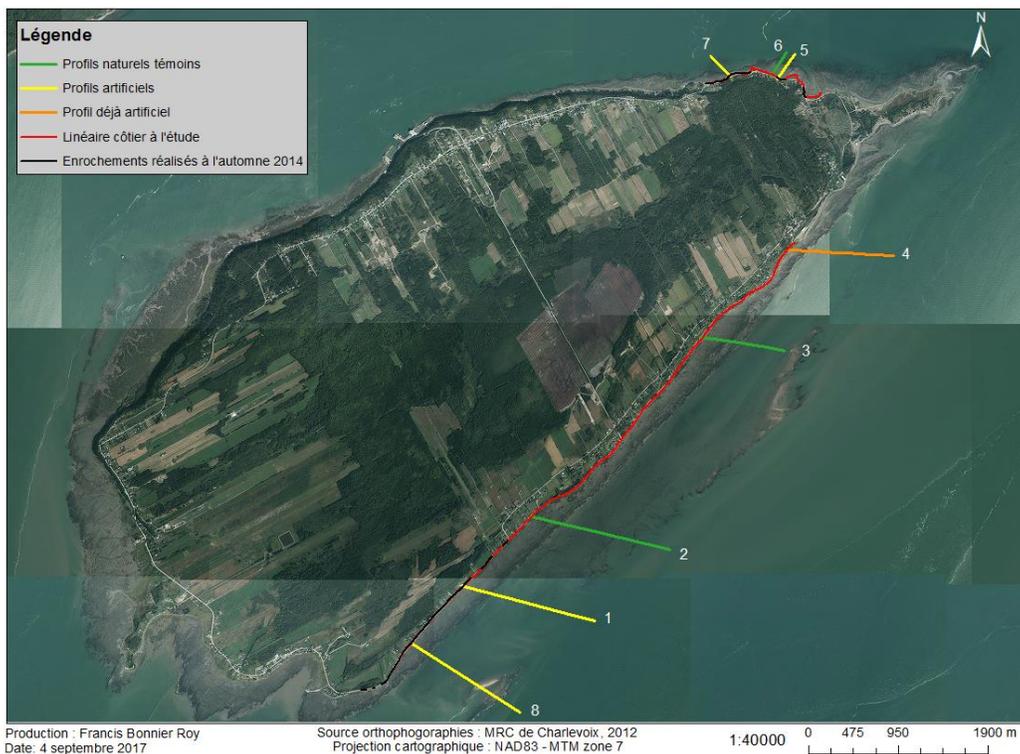


Figure 22. Profils topographiques suivis.

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 (au mètre), puis des points rapprochés (moins d'un mètre) sont levés pour bien prendre en compte 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 du côté sud où cela était possible, des points topographiques ont été réalisés sur le cordon infralittoral.

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 zones de l'estran ont été ajoutées.

2.4.2 Résultats et interprétation

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 du côté 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, ce qui indique une arrière-plage plus ou moins large selon les profils (tableau 13). La distance la plus courte est celle du profil 4 et la distance la plus grande est celle du profil 3. Deux profils naturels où ces distances étaient les plus courtes (moins de 10 m) ont fait l'objet de travaux d'enrochement réalisés à l'automne 2014 (profils 1 et 8).

Tableau 13. Distance entre la route et la ligne de rivage, août 2014.

Profil	Orientation	État de la côte	Distance (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 23 montre les profils 1, 2, 3, 4 et 8 du côté 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 ($\pm 2,3$ m) et une pente de $5,5^0$ ($\pm 1,1^0$). Elle est suivie d'une large plateforme rocheuse de 300 m (± 62 m) aplanie 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 infralittoral (100 m de large), à la limite des basses mers et de la zone infralittorale.

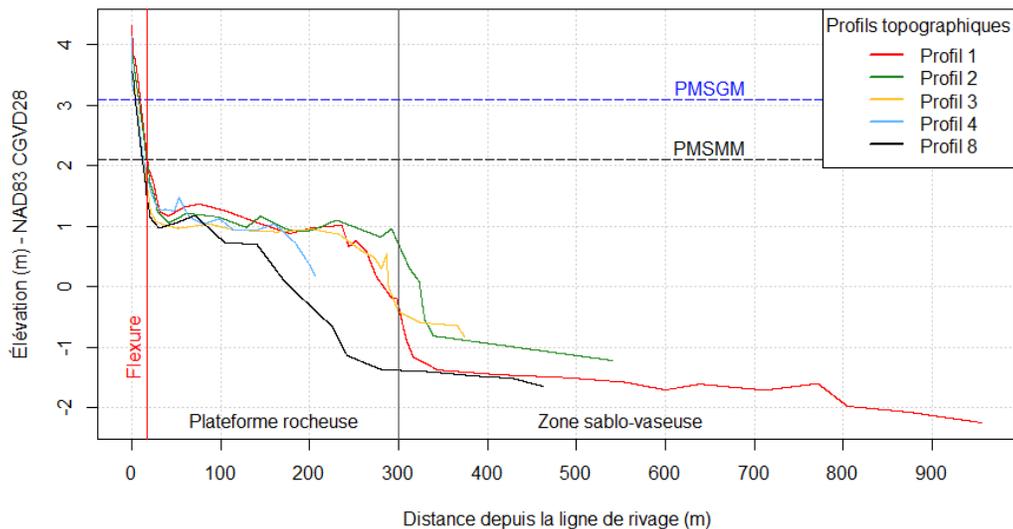


Figure 23. Profils topographiques du côté sud, août 2014.

La figure 24 montre les profils 5,6 et 7 du côté nord-est qui possèdent en moyenne une plage légèrement plus large qu'au sud avec 18,8 m (± 3 m). 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 forte et une étendue étroite qui caractérise le bas estran. Sa limite externe se poursuit sous le niveau des basses mers 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. Elle se termine près de la limite du niveau d'eau le plus bas (basse mer inférieure de grande marée) à -3,6 m.

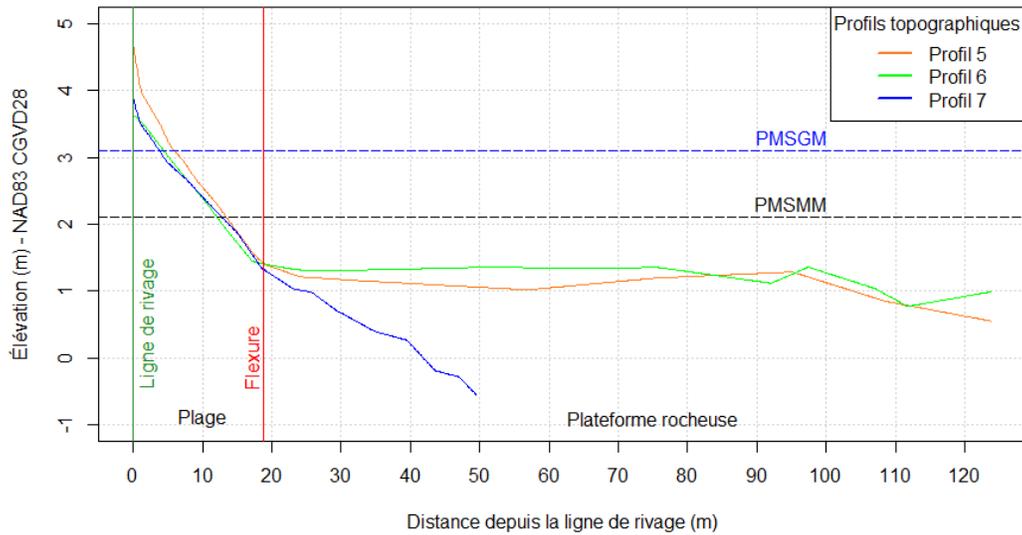


Figure 24. Profils topographiques de la côte nord-est, août 2014.

La figure 25 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.

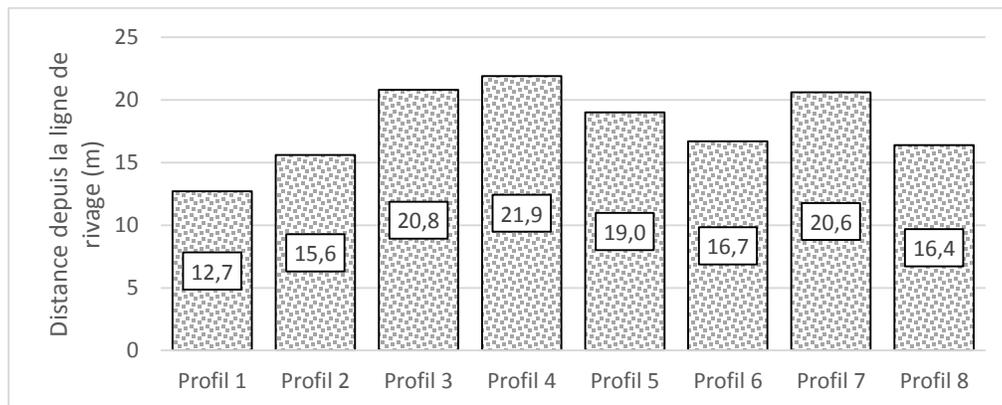


Figure 25. Morphologie de la plage des profils topographiques (août 2014).

Le tableau 14 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 du côté 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 14. Caractéristiques moyennes de la morphologie de la plage 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 (± 0,7 m)	1,3 (± 0,2 m)	7,5 (± 2,1)	18,8 (± 3 m)
Sud	3,5 (± 0,1 m)	1,6 (± 0,3 m)	5,5 (± 1,1)	17,5 (± 2,3 m)
Total général	3,6 (± 0,4 m)	1,5 (± 0,3 m)	6,2 (± 1,7)	18 (± 2,4 m)

La figure 26 montre la portion de plage des profils du sud de l'île. Les profils 1 et 2 sont ceux qui connaissent une altitude plus élevée tandis que les profils 3, 4 et 8 sont plus bas en altitude. Le niveau d'eau de PMSGM est à environ 50 cm d'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.

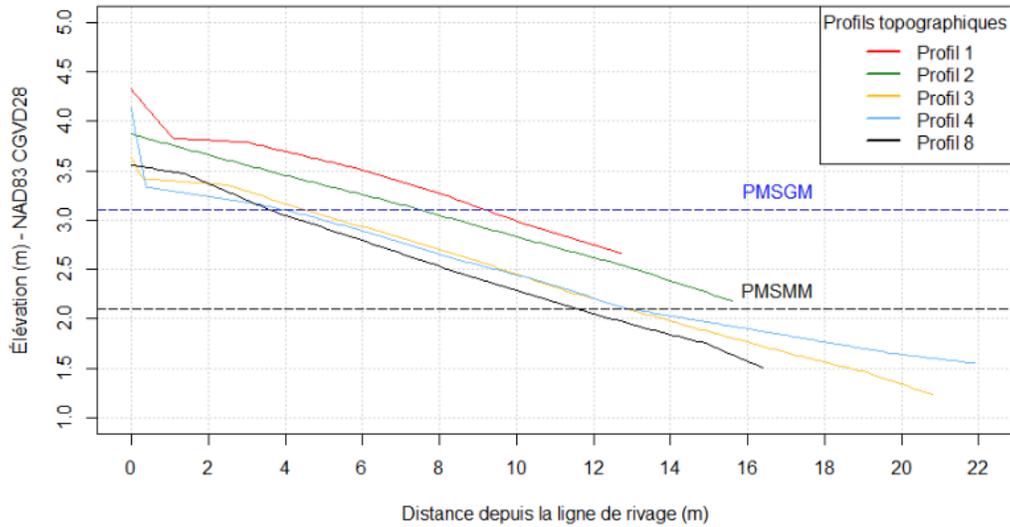


Figure 26. Profils topographiques de la plage côté sud, août 2014.

La figure 27 montre les profils de la portion de la plage 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. Le niveau d'eau de PMSGM est à environ 50 cm d'altitude de la ligne de rivage du profil 6, à 80 cm au profil 7 et à 1,5 m au profil 5.

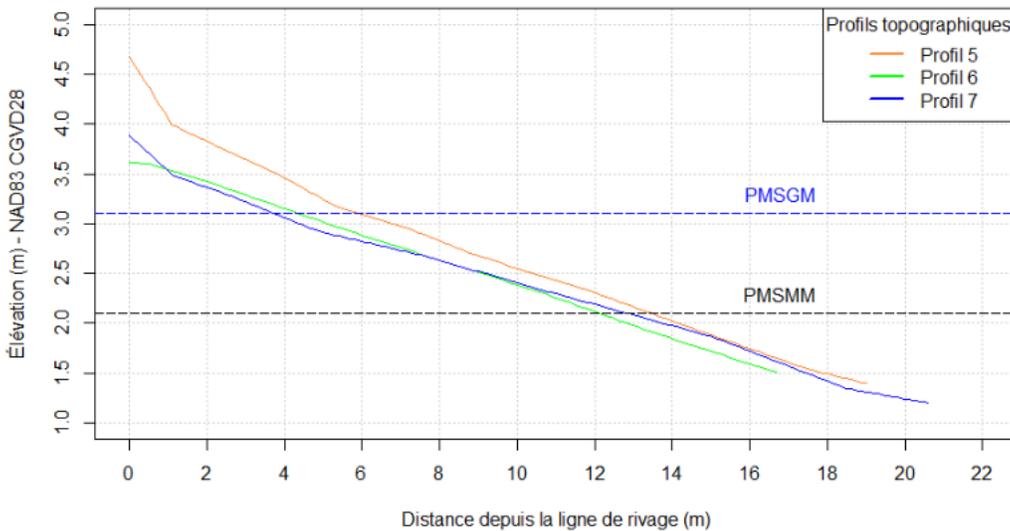


Figure 27. Profils topographiques de la plage côté nord-est, août 2014.

2.5 Morphologie et volumes de plage

2.5.1 Méthodologie

2.5.1.1 Levés terrains

Les données ont été acquises depuis le haut estran par le système mobile de LiDAR terrestre du LDGIZC de l'UQAR. 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 28).



Figure 28. 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

2.5.1.2 *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 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.

2.5.1.3 *Traçage des limites de la plage*

La ligne de rivage et la flexure ont été tracées à l'aide du logiciel *Trident* qui permet 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 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 de spartine alterniflore est rencontré, il est contourné 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. Pour chaque levé, ces deux limites sont combinées puis fractionnées grâce à une segmentation faite à partir de la ligne de rivage aux 5 m, permettant aux polygones de rester les mêmes sur l'ensemble de l'étude. Seul l'emplacement de la ligne de flexure fait varier la superficie totale du polygone, selon les levés.

Ensuite, les limites sont transformées en polygones de plage, qui sont divisées en sous-polygones de 5 m de large de façon à favoriser le calcul de volume de plage par état de la côte (naturel ou artificiel). Pour chaque sous-polygone et pour chaque date différente, la valeur minimale de la matrice est extraite et associée à ceux-ci 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 29 montre de manière simplifiée comment est calculé le volume de plage. 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 m³. Tous les volumes des prismes à l'intérieur du polygone de 5 m linéaire côtier sont calculés et additionnés pour faire le volume total du polygone.

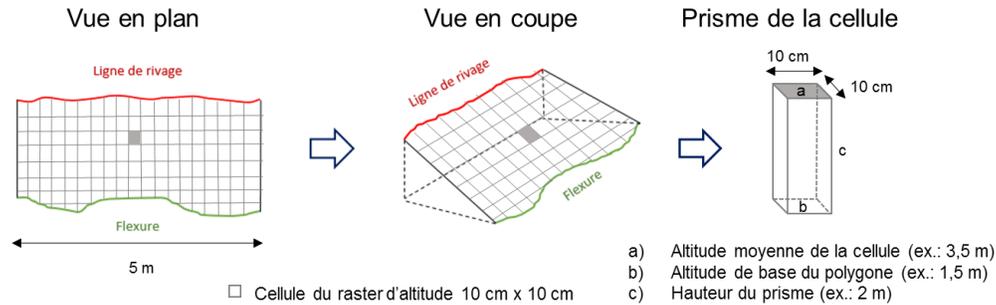


Figure 29. Croquis représentant la démarche du calcul du volume de plage pour chaque polygone.

Les volumes de plage sont représentés sur 6 secteurs, 3 au sud et 3 au nord-est. Au sud, le secteur 1 est 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). Du côté 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).

2.5.1.4 Données manquantes et sources 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 m³ et 11 m³ par polygone, soit 0,10 à 0,16 m³/m² (épaisseur du dépôt organique de 30 cm).

2.5.1.5 Représentation des résultats

Le volume de plage (m^3/m^2) 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 valeurs de volume (m^3/m^2) ont été séparées en 5 classes de façon à homogénéiser la cartographie sur l'ensemble des secteurs à l'étude pour toutes les dates des levés LiDAR. 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 15.

Tableau 15. Mesures statistiques sur l'ensemble des secteurs et pour tous les levés en m^3/m^2 (mai 2014 à mai 2016).

Moyenne	0,98
Min	0,26
Max	1,69
Écart-type	0,28
Demi écart-type	0,14

Puis, c'est avec ces mesures statistiques que les limites des classes de volumes (m^3/m^2) ont été calculées (tableau16).

Tableau 16. 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 17 présente les classes de volumes de plage telles qu'elles seront affichées dans toute la cartographie des volumes de plage.

**Tableau 17. Classes des volumes de plage (m³/m²) (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

2.5.3 Résultats et interprétation

2.5.3.1 Mai 2014

2.5.3.1.1 Côté sud

La figure 30 présente les volumes de plage (m^3/m^2) sur le secteur 1, 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.

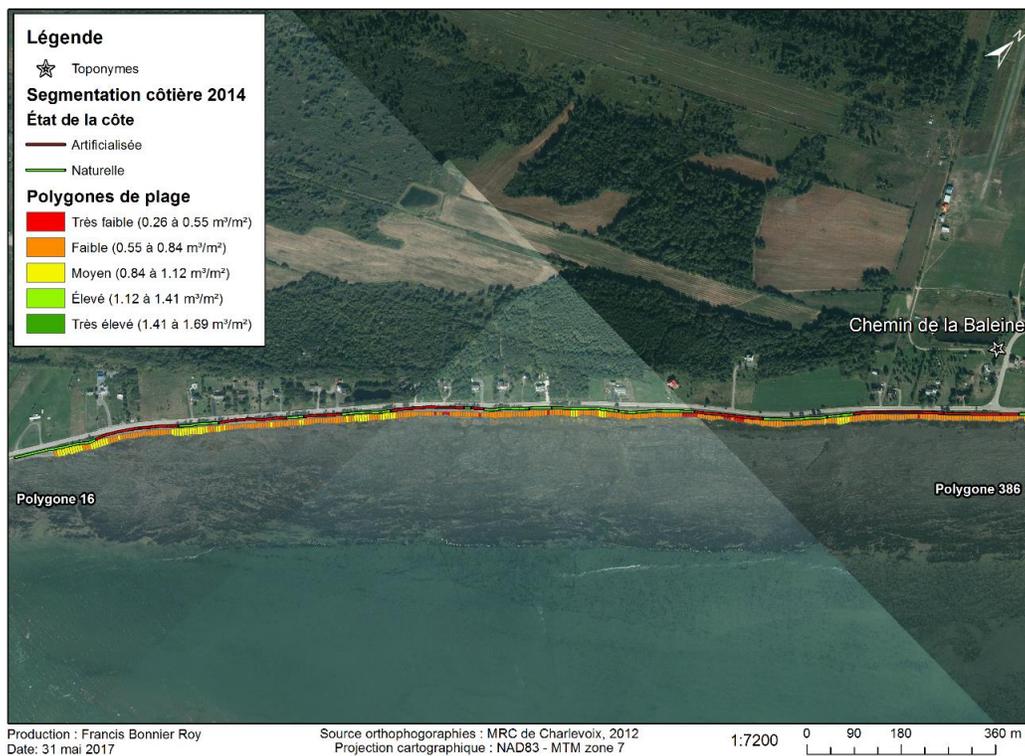


Figure 30. Volume de plage (m^3/m^2) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 1).

La figure 31 présente les volumes de plage (m^3/m^2) sur le secteur 2, entre le chemin de la Baleine et le chemin de la Traverse, pour les polygones 387 à 504. Sur les 293 polygones, 82 sont devant une côte artificielle, 8 devant une côte composite (moitié naturelle et artificielle) et 203 devant une côte naturelle.

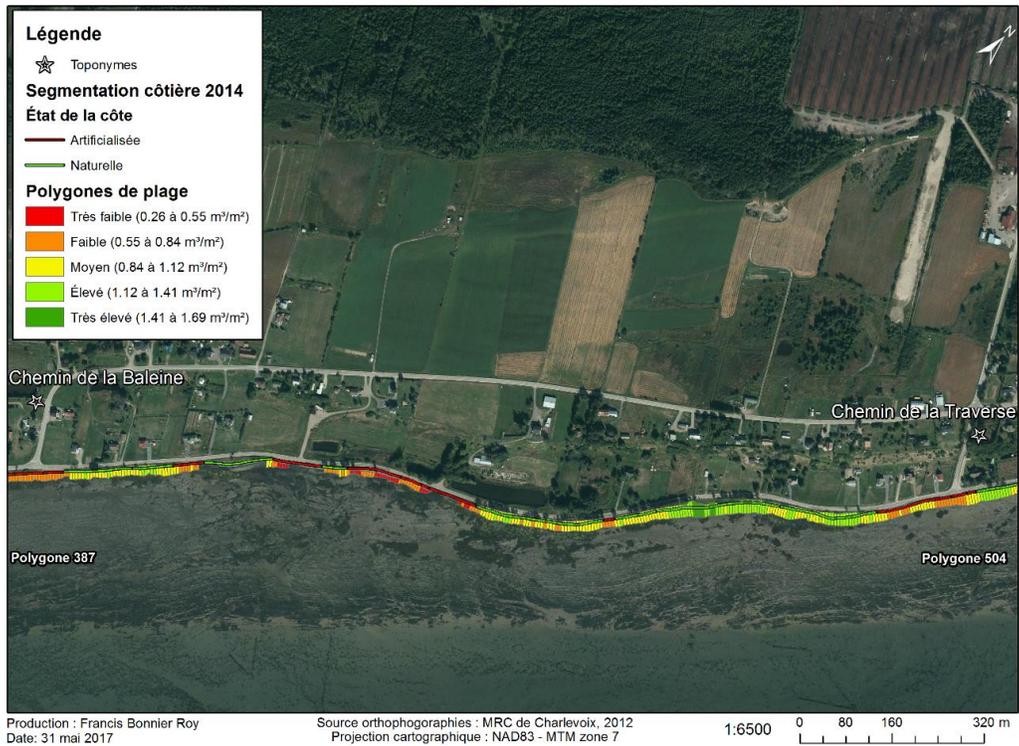


Figure 31. Volume de plage (m^3/m^2) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 2).

La figure 32 présente les volumes de plage sur le secteur 3, entre le chemin de la Traverse et l'Hôtel Cap-aux-Pierres, pour les polygones 505 à 1 242. Sur les 563 polygones, 185 sont devant une côte artificielle, 15 devant une côte composite (moitié naturelle et artificielle) et 363 devant une côte naturelle.

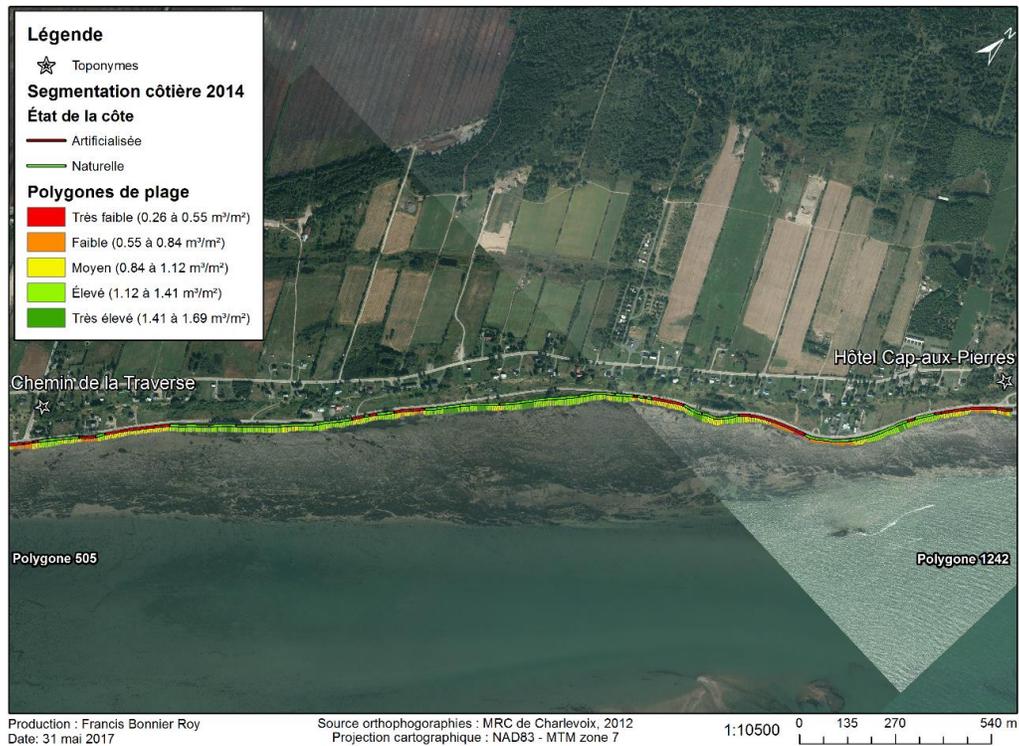


Figure 32. Volume de plage (m³/m²) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (secteur 3).

Au mois de mai 2014, 69 % des plages étudiées du côté sud étaient devant une côte naturelle contre 31 % devant les berges artificielles. Le tableau 18 présente les volumes de plage (m³/m²) des polygones pour les 3 secteurs au sud de l'île.

La moyenne est de 1 m³/m² sur l'ensemble du côté sud, soit, légèrement inférieur de 0,1 m³/m² par rapport au nord-est de l'île. Le secteur 1 est celui qui possède une moyenne inférieure aux autres secteurs avec 0,8 m³/m². Peu importe l'état de la côte de ce secteur, la moyenne des volumes (m³/m²) est faible, entre 0,7 et 0,8 m³/m². Le secteur 2, au milieu du côté sud, est en moyenne 0,2 m³/m² plus volumineux que le secteur 1 avec 1 m³/m². Les plages devant les berges artificielles et composites sont aussi moins volumineuses, entre 0,7 et 0,9 m³/m², que celles devant une ligne de rivage naturelle (1,1 m³/m²). Le secteur 3 est celui qui contient les polygones de plages les plus volumineux de l'ensemble du côté 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. Les polygones devant les plages artificialisées ont 0,9 m³/m², les

composites 1 m³/m² et les naturelles 1,3 m³/m². Globalement, à l'échelle du sud de l'île, ce sont les plages naturelles qui possèdent un volume de plage (m³/m²) plus grand par rapport aux plages artificialisées.

Tableau 18. Volumes de plage moyens (m³/m²) par secteur lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1	0,7	0,8	0,8	0,8
2	0,7	0,9	1,1	1
3	0,9	1	1,3	1,1
Moyenne par état de la côte	0,8	0,9	1,1	Moyenne globale : 1

Le tableau 19 montre les volumes de plage moyens par secteur et en fonction de l'état de la côte en mai 2014. La moyenne globale pour l'ensemble du côté sud est de 81 m³, soit légèrement au-dessus de celle de la côte nord-est de 2 m³. Une différence fortement marquée existe entre les volumes de plage des côtes naturelles et artificielles, avec une moyenne respective de 102 m³ contre 50 m³. 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 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 19. Volumes moyens de la plage (m³) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1	37	42	46	41
2	38	61	101	82
3	69	85	128	107
Moyenne par état de la côte	50	69	102	Moyenne globale : 81

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.

2.5.3.1.2 Côté nord-est

La figure 33 présente les volumes (m^3/m^2) de plage des secteurs 4, 5 et 6 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.

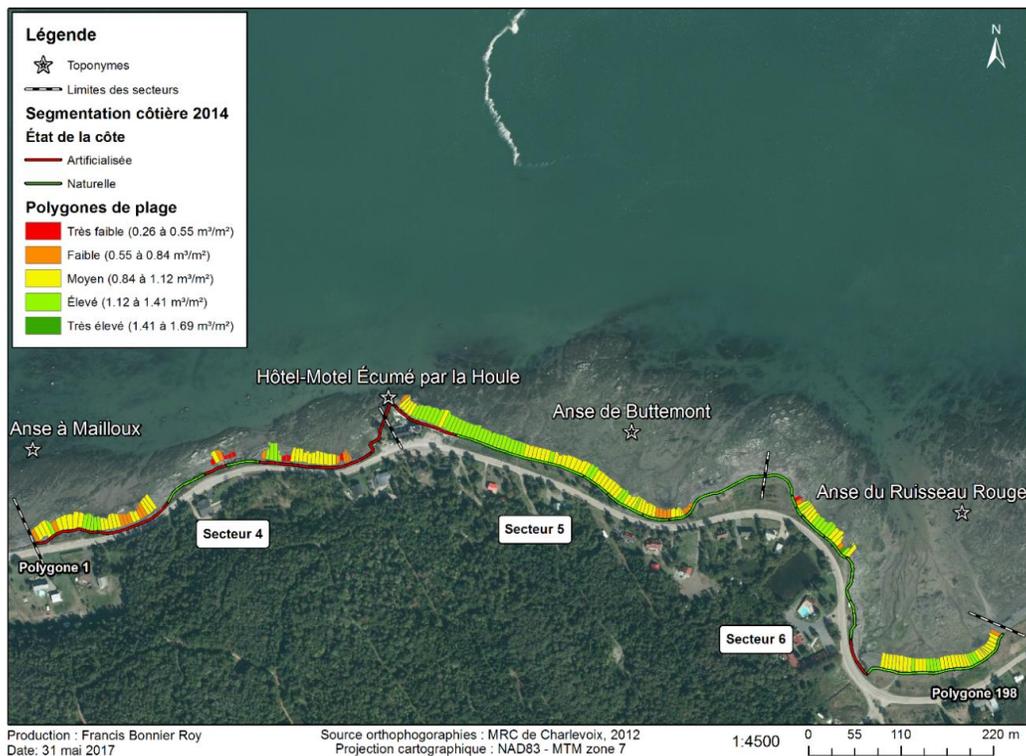


Figure 33. Représentation cartographique des volumes de plage (m^3/m^2) lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (Côté nord-est).

Le tableau 20 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 du côté nord-est étaient devant une côte naturelle contre 37 % de berges artificielles. La moyenne globale de volume est de $1,1 m^3/m^2$. La moyenne des volumes par état de la côte montre que la plage devant les berges naturelles est légèrement plus volumineuse, $0,1 m^3/m^2$ 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 m³/m² 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 20. Volumes moyens de la plage (m³/m²) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté nord-est).

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

Le tableau 21 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 m³. 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 m³ 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 21. Volumes moyens de la plage (m³) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 15 mai 2014 (côté nord-est).

Secteurs	Artificielle	Naturelle	Moyenne par secteur
4	73	11	70
5	100	85	88
6	-	76	76
Moyenne par état de la côte	79	79	Moyenne globale : 79

2.5.3.2 Août 2014

Ce deuxième levé avant les travaux d'enrochement est pertinent car il permet d'avoir une vue d'ensemble sur la morphologie des plages à l'étude de l'île vers la fin août mais aussi de voir 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. Des cartes de volumes de plage du 27 août 2014 sont présentées aux annexes 15 à 18.

2.5.3.2.1 Côté sud

Le volume sédimentaire (en m^3/m^2) des polygones dans le secteur 1 a légèrement diminué de $0,1 m^3/m^2$ (tableau 22). 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 $0,1 m^3/m^2$. Dans le secteur 2, les plages artificielles ont diminué de $0,1 m^3/m^2$, les plages composites possèdent le même volume qu'en mai 2014 et les plages naturelles ont augmenté de $0,1 m^3/m^2$. Dans le secteur 3, peu de changements ont été observés sur les volumes sauf une légère augmentation de $0,1 m^3/m^2$ devant les plages composites.

Tableau 22. Volumes de plage moyens (m^3/m^2) par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1	0,7	0,7	0,7	0,7
2	0,6	0,9	1,2	1,0
3	0,9	1,1	1,3	1,1
Moyenne par état de la côte	0,7	0,9	1,1	Moyenne globale : 1

Les volumes moyens des polygones de plage présentés au tableau 23 montrent que la moyenne globale a toutefois diminuée de $3 m^3$. L'ensemble des plages artificielles ont perdu $5 m^3$, les plages composites ont diminué de $3 m^3$ et les plages naturelles de $4 m^3$. Au secteur 1, c'est l'ensemble de la côte qui a perdu en volume moyen, soit entre 5 et $6 m^3$, par polygone de plage. Au secteur 2, seules les plages naturelles ont augmenté en volume de $2 m^3$ tandis que les plages artificielles et composites ont perdu 2 à $3 m^3$ en moyenne. Au secteur 3, le constat est semblable à celui du secteur 1, avec des pertes moyennes entre 1 à $7 m^3$ selon l'état de la côte.

Tableau 23. Volumes moyens de plage (m³) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté Sud).

Secteurs	Artificielle	Composite	Naturelle	Moyenne par secteur
1	32	36	40	36
2	35	59	103	83
3	62	84	124	103
Moyenne par état de la côte	45	66	98	Moyenne globale : 78

Les pertes de volume de plage affectant l'ensemble du côté sud peut 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 du côté 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 du côté sud.

2.5.3.2.2 Côté nord-est

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 24).

Tableau 24. Volumes de plage moyens (m³/m²) par secteur du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté nord-est).

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

Dans le tableau 25, 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 25. Volumes moyens de plage (m³) par secteur et selon l'état de la côte lors du levé LiDAR du 27 août 2014 (côté nord-est).

Secteurs	Artificielle	Naturelle	Moyenne par secteur
4	73	11	69
5	108	85	90
6	-	73	73
Moyenne par état de la côte	81	78	Moyenne globale : 79

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 le côté nord-est.

2.6 Cartographie et caractérisation des herbiers

2.6.1 Méthodologie

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*). 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 34).



Figure 34. Emplacements des herbiers à spartine alterniflore.

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 35). 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.

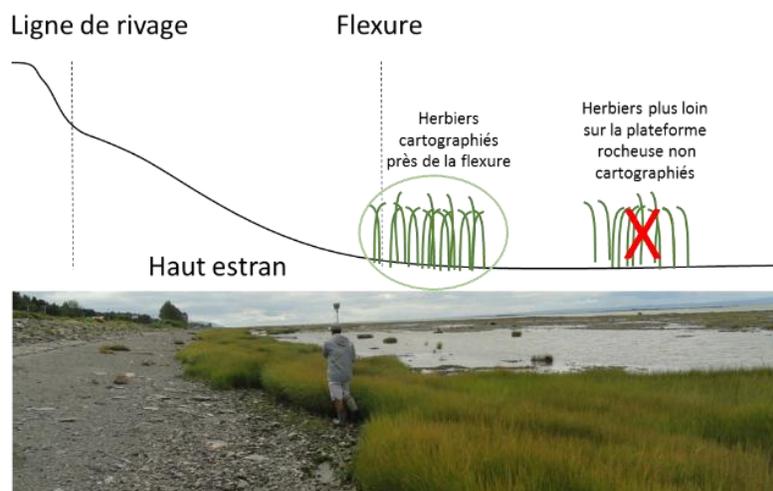


Figure 35. Illustration démontrant l'emplacement des herbiers cartographiés sur le profil.

À noter qu'il n'y a pas d'herbiers sur le côté 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 26 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 un marquage significatif entre le pourcentage de recouvrement de l'herbier 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.

Ensuite, la hauteur moyenne des plants de spartine alterniflore de l'herbier est notée. 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.

Tableau 26. 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

2.6.2 Résultats et interprétation

La figure 36 montre les herbiers 1 à 18 présents sur la première zone d'herbiers ainsi que leur superficie (en m²). L'herbier le plus imposant est l'herbier 13 avec plus de 7 000 m² suivi par l'herbier 12 de 3 000 m². Ce secteur est le plus imposant en termes de superficie avec un total de 17 282 m², soit 90,8 % des herbiers suivis. La superficie des herbiers est moins imposante 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).

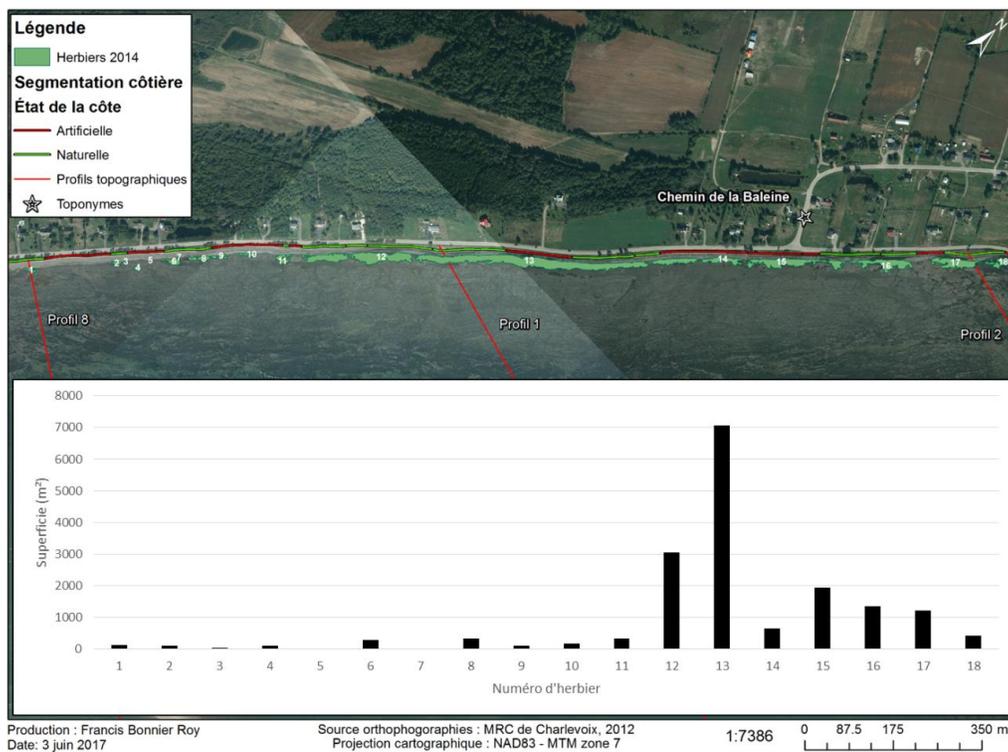


Figure 36. Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m²) de la zone 1 en août 2014.

La figure 37 montre les herbiers 19 à 29 présents sur la zone 2 ainsi que leur superficie (en m²). L'herbier le plus imposant est l'herbier 23 avec 484 m² suivi par l'herbier 27 de 410 m². Ce secteur est moins imposant en termes de superficie, un total de 1 747 m² et les herbiers sont plus dispersés les uns des autres.

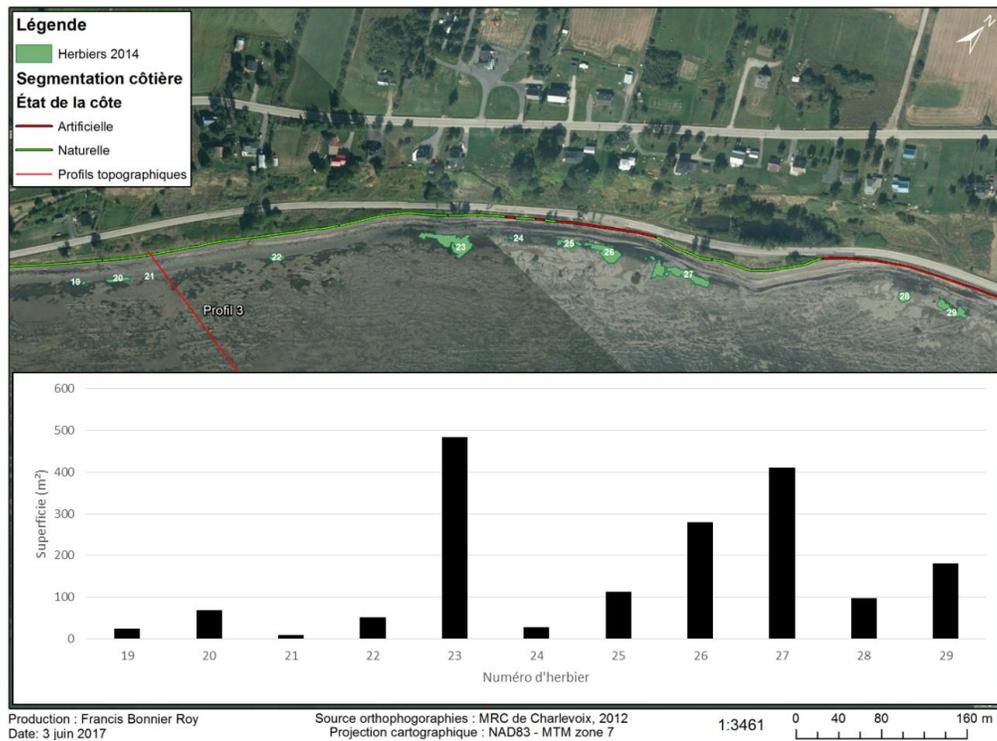


Figure 37. Emplacement des herbiers à spartine alterniflore et leur superficie (m²) de la zone 2 en août 2014.

Le tableau 27 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 27. 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 28). 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 28. Hauteur moyenne pondérée des herbiers de 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 29 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 29. 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 %

3. BILAN ÉVOLUTIF DES CHANGEMENTS MORPHOSÉDIMENTAIRES DE LA ZONE CÔTIÈRE ET RÔLE DES INFRASTRUCTURES

Dans cette section, un bilan sur 2 années des changements morphosédimentaires de la zone côtière a été fait suivant la mise en place des enrochements réalisée à l'automne 2014 dans l'objectif d'évaluer si ces ouvrages auront des impacts sur la plage et sur les herbiers à spartine alterniflore à proximité. Cette analyse a été possible grâce à la répétition des techniques d'acquisition de données effectuées lors de l'état de référence en complément d'une analyse globale des conditions hydrodynamiques à l'aide de capteurs à pression et d'un courantomètre sur les secteurs d'étude.

3.1 Segmentation côtière

3.1.1 *Artificialisation des berges*

Le tableau 30 montre l'état de l'artificialisation de la côte après les travaux d'enrochement réalisés à l'automne 2014 (figure 13). 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 le côté sud (972 m).

Tableau 30. État de la côte après les travaux d'enrochement 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 31 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 31. Impacts de l'empiètement des enrochements sur la plage.

Côté	Superficie (m²)	Volume (m³)
Nord-est	569	467
Sud	4 142	1 637
Total	4 711	2 105

3.1.2 *Types d'artificialités*

Puisque la solution adoptée pour protéger les berges lors des travaux de 2014 est l'enrochement, il va de soi que le pourcentage des enrochements a augmenté de 83 % à 90,5 % (tableau 32). 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 à 20,2 % des types d'artificialités, car il s'agit de la portion de côte artificialisée par l'Hôtel-Motel Écumé par la Houle.

Tableau 32. 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 %
Muret de béton	20,2 %	157	-	-	3,7 %
Muret de blocs de béton	-	-	1,2 %	41	1,0 %
Muret de pierre	-	-	0,5 %	18	0,4 %
Gabion	-	-	3,1 %	106	2,5 %
Enrochement avec gabion	-	-	0,7 %	25	0,6 %
Muret de blocs de pierre	-	-	1,1 %	38	0,9 %
Blocs déversés	-	-	0,5 %	18	0,4 %
Total	100 %	774	100 %	3 451	100,0 %

3.1.3 *État de la ligne de rivage*

À la suite des travaux d'enrochement 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 enrochements qui entraînent une diminution du littoral en érosion en 2015.

3.1.3.1 Côté sud

La figure 38 montre l'évolution de l'état de la ligne de rivage du côté sud sur les trois années de suivi. La proportion des berges stables a bondi de 9,3 points de pourcentage entre 2014 et 2015. Tandis que les côtes semi-actives ont diminué de 10,4 points entre 2014 et 2015, celles actives ont légèrement augmenté de 1,1 point. En août 2016, près de 2 ans après les travaux, il y avait moins de segments de côte stable qu'en 2014 (diminution de 3,5 points), tandis que la longueur totale des tronçons semi-actifs et actifs a augmenté de 2 points et 1,4 point respectivement.

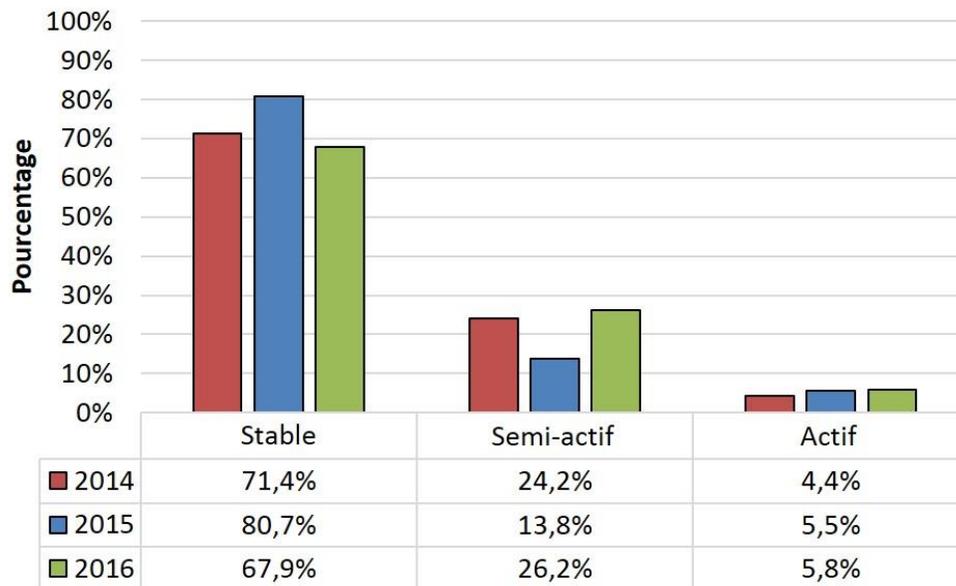


Figure 38. État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côté sud).

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 33).

Tableau 33. Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur du côté 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 65 % lors de la caractérisation côtière d'août 2014 alors que ce chiffre a diminué pour atteindre 55 % à l'été 2015. Certains tronçons stables ayant changé d'état, le pourcentage des berges semi-actives entre 2014 et 2015 a augmenté de 9,4 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 du chemin de la Baleine) s'est toutefois aggravé avec une érosion accélérée par effet de bout, passant de semi-actif à actif. 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.

Dans le secteur 3, les segments de côtes stables ont connu une diminution de 2,4 points de pourcentage entre 2014 et 2015, passant de 84,1 % à 81,7 %. 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, dû à une dévégétalisation de la microfalaise et du haut de plage mettant à nu la microfalaise. 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.

3.1.3.2 Côté nord-est

La figure 39 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 de pourcentage entre 2014 et 2015. Les côtes semi-actives ont 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 %.

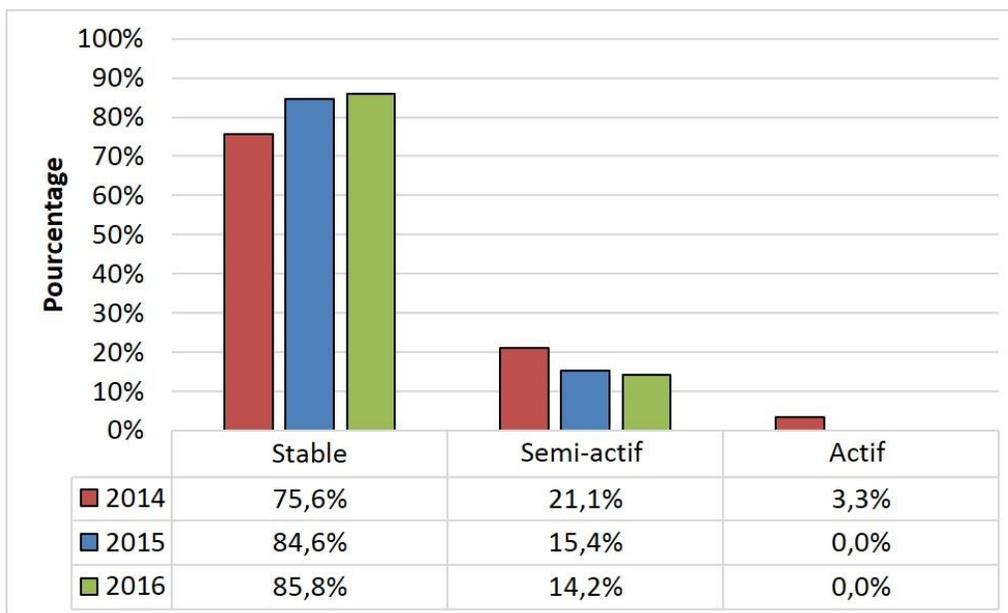


Figure 39. État de la ligne de rivage entre 2014 et 2016 (côte nord-est).

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 34).

Tableau 34. Évolution de l'état de la ligne de rivage par secteur du côté nord-est entre 2014 et 2016.

Secteurs	Années	Stable	Semi-actif	Actif
Secteur 4	2014	81,0 %	19,0 %	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 à l'endroit de l'enrochement fait au niveau du pont du ruisseau rouge, où l'état est passé de semi-actif à stable. En 2016, une portion de côte rocheuse basse 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.

Dans l'ensemble du côté 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 fut remarquée.

3.1.4 Hauteur des microfalaises

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 minimes 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.

3.1.4.1 Secteur sud

Du côté sud, le pourcentage de la côte naturelle caractérisée par l'absence d'une microfalaise est relativement stable entre 2014 et 2016 (figure 40). L'absence de marque d'érosion dans le cas de berges artificielles est passée de 34 % à 51 % après les travaux d'enrochement. Les microfalaises de 20 à 50 cm ont diminué brusquement entre 2014 et 2015 pour être transférées dans les catégories absence – artificielles à la suite des travaux en 2014 et quelques-unes ont augmenté pour aller dans la catégorie 50 à 100 cm. Cette dernière catégorie n'a pas cessé d'augmenter tandis que la catégorie 100 cm et plus, qui était faible en 2014, a augmenté en 2015 et complètement disparu en 2016.

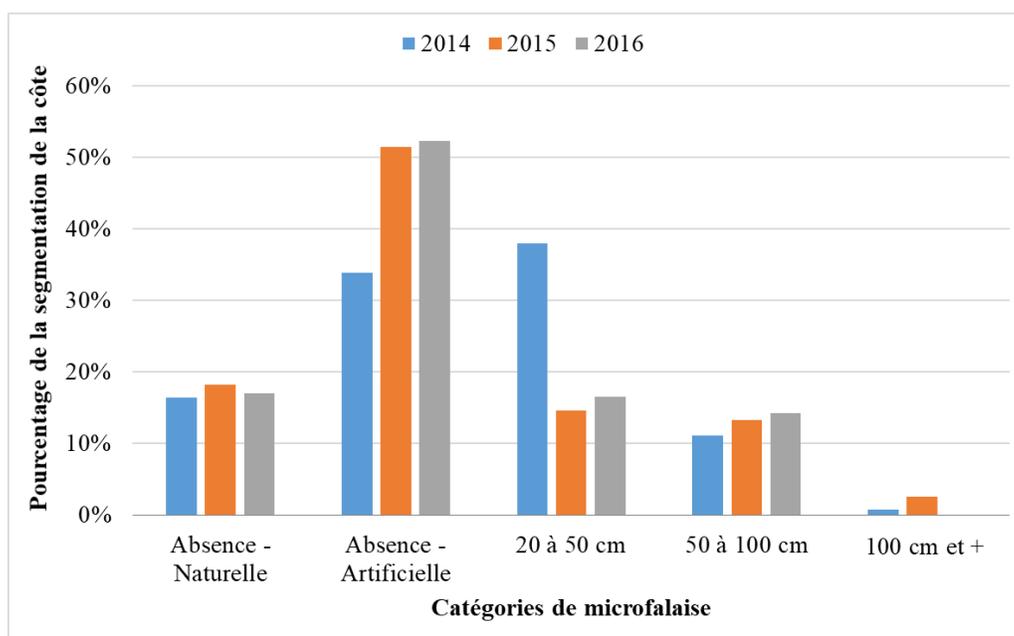


Figure 40. Catégories de microfalaises du côté sud de 2014 à 2016.

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 considérée dans la catégorie 100 cm et +. Un peu plus loin à l'est de ce segment, 100 m de berges ont eu des microfalaises de 20 à 50 cm de hauteur qui se sont agrandies 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 vers 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 réparti dans les segments de classe moyenne. Il a été observé que les segments adjacents aux enrochements ont subi une augmentation de la hauteur des microfalaises. La microfalaise supérieure à 100 cm derrière le gabion a diminué pour devenir entre 50 et 100 cm. 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.

Au secteur 3, plusieurs segments, dont celui où la microfalaise s'est accentuée, ont changé de catégorie passant de la catégorie 20 à 50 cm vers celle de 50 à 100 cm ou de 50 à 100 cm vers 100 cm et plus. Ces changements se sont produits à forte majorité sur les secteurs adjacents aux enrochements déjà présents avant les travaux de 2014. En 2016, la microfalaise de 100 cm et plus près du chemin de la Traverse a diminué de hauteur et a été classée dans la catégorie moyenne. 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.

3.1.4.2 Secteur nord-est

Du côté nord-est, l'absence d'une microfalaise sur une côte naturelle est passée de 44 % à 35 % de 2014 à 2015 puis le pourcentage s'est élevé à 42 points en 2016 (figure 41). L'absence de marque d'érosion sur des berges artificielles est passée de 35 % à 52 % après les travaux d'enrochement. Les microfalaises de 20 à 50 cm ont diminué constamment entre 2014 et 2016 pour être transférées dans les catégories absence – artificielles à la suite des travaux en 2014 et par la suite dans les catégories naturelles 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.

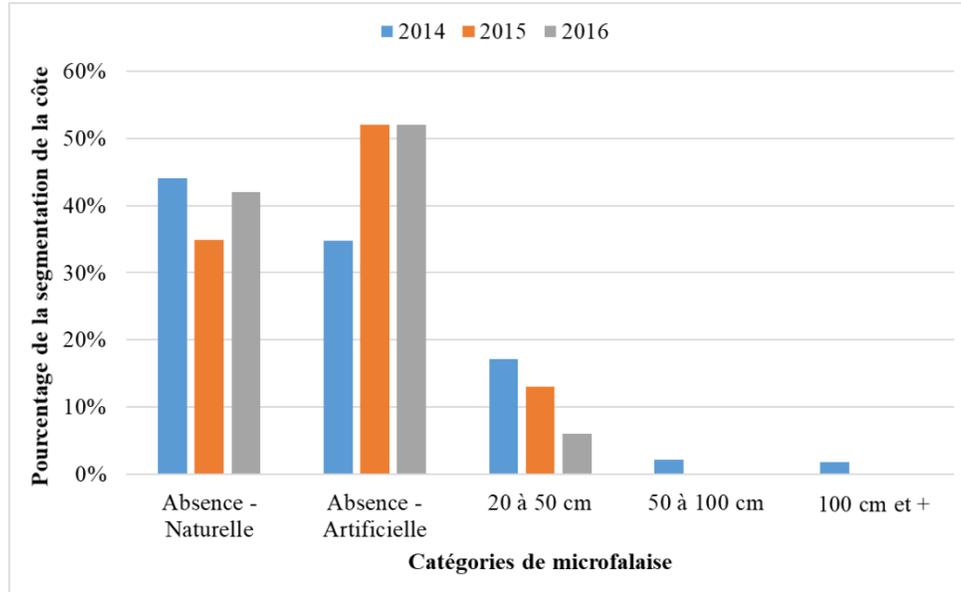


Figure 41. Catégories de microfaiences de la côte nord-est de 2014 à 2016.

Au secteur 4, la mise en place des enrochements a engendré une caractérisation des segments dans la catégorie absence de microfaience avec artificialité en 2015 et 2016.

Au secteur 5, une microfaience 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 microfaience entre 20 à 50 cm est apparue. Les microfaiences entre 20 à 50 cm des secteurs 5 et 6 repérées en 2015 n'ont pas été assez importantes pour être considérées comme petites microfaiences 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 microfaiences entre 20 et 50 cm était en 2016 caractérisée par des microfaiences plus petites que 20 cm, donc catégorisée dans absence - naturelle.

3.1.5 Relation haut de plage et artificialité

La figure 42 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.

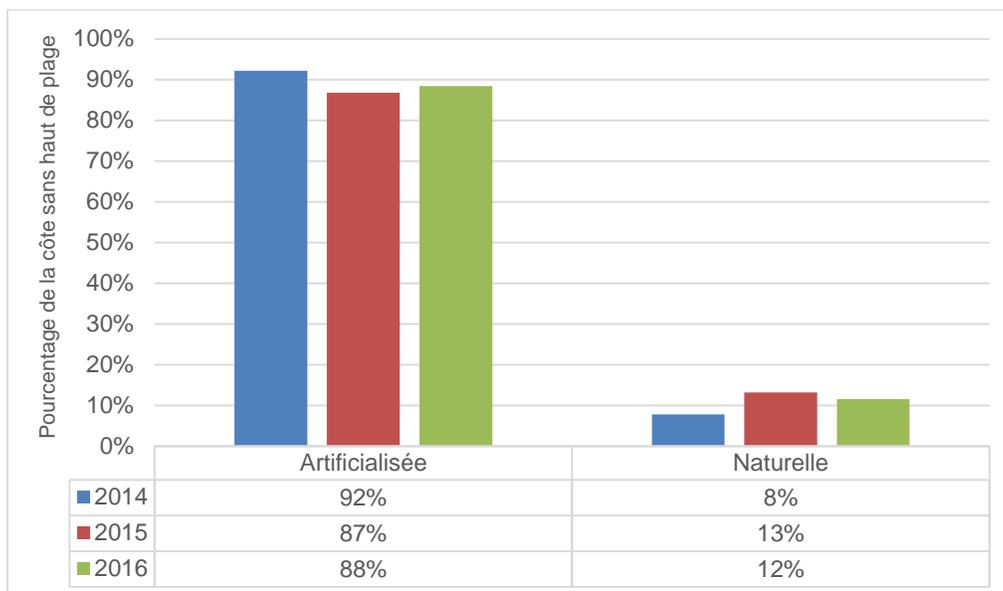


Figure 42. Relation entre l'absence de haut de plage et l'état de la côte de 2014 à 2016.

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 35). Cette augmentation est due aux travaux d'enrochement 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 du côté 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 35. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2015.

État de la côte	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 36). 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 36. Relation entre les segments de côte sans haut de plage et l'état de la côte par secteur, août 2016.

État de la côte	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 favorisé 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 dû aux affleurements rocheux sur le haut estran, à l'enrochement lié au pont du ruisseau rouge ainsi qu'à la partie en progradation à l'est de celui-ci. Cette dernière 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.

3.1.6 Synthèse

La segmentation côtière a permis de montrer des signes d'effet de bout évidents aux extrémités de certains enrochements (nouveaux et anciens) (figure 43). On note une légère augmentation de 2015 à 2016 de la proportion de berges dans les catégories de de 20 à 50 cm et de 50 à 100 cm du côté sud contrairement au phénomène plutôt inverse du côté nord-est, avec une diminution des microfalaises dans la catégorie de 20 à 50 cm. D'ailleurs, la hauteur des microfalaises est généralement plus basse du côté nord-est. En 2016, ce sont les conditions hydrodynamiques possiblement plus clémentes qui semblent expliquer cette diminution par un apport sédimentaire en haut de plage et une végétalisation de la cicatrice d'érosion. Du côté sud, du chemin de la Baleine jusqu'à la moitié du secteur 3 (environ 2,8 km de linéaire côtier), plusieurs marques d'érosion forte sont visibles tandis qu'environ 20 % seulement de ce linéaire est naturel sans trace d'érosion. La deuxième portion (près de l'Hôtel Cap-aux-Pierres) du secteur 3 est un peu plus stable avec près de 35 % de berges naturelles sans érosion. Du côté nord-est, la période entre les travaux de 2014 et l'été 2015 semble avoir été une phase d'ajustement pour les berges naturelles puisque certains segments catégorisés comme actif ou semi-actif ont été relégués à la classe inférieure en 2016, soit semi-actif ou stable.

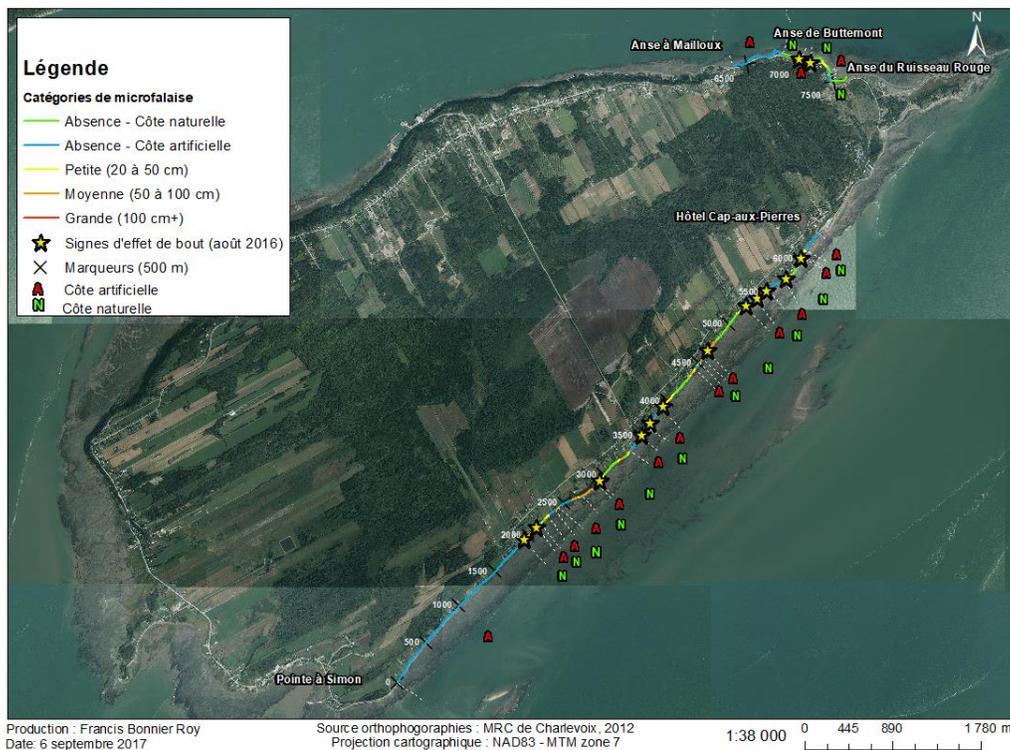


Figure 43. Carte synthèse des éléments marquants de la segmentation côtière en 2016.

3.2 Évolution sédimentaire

3.2.1 *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 des matrices supérieur et inférieur à 2 mm des échantillons de mai 2016 et août 2016.

Le tableau 37 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 du côté sud après les travaux de l'automne 2014, les proportions (%) des échantillons du haut estran (HE1 et HE2) des profils du côté 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 37. 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 %

Du côté 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 représenté par la matrice fine car la moyenne de cette proportion est de 48 %, légèrement plus faible que les secteurs naturels affichant 55 %. Cela indique que la matrice sédimentaire de surface sur les plages artificielles est plus grossière que devant les plages naturelles. Sur le

bas estran, la matrice fine s'élève en moyenne à 74 %, soit un peu moins que la moyenne des profils naturels à 81 %. Le profil 4, déjà artificialisé en 2014, a eu une moyenne du haut estran qui s'est légèrement accrue de 53 à 61 points de pourcentage, ce qui indique une proportion de sédiments plus fins à cet endroit depuis l'état initial. La proportion de sédiments fins sur le bas estran a diminué de 87 à 71 %.

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 artificielles au nord-est sont donc plus grossières qu'en 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 %. Ces chiffres sont similaires aux résultats obtenus en août 2014, qui présentaient une moyenne de 53 % (tableau 9). 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 du côté 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 38 et 39 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 19 à 26.

Tableau 38. Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons du côté sud.

Sud					
Zones	Écart-type	Variance	Minimum	Maximum	Étendue
Haut de plage	16%	2%	51%	100%	49%
Haut estran	20%	4%	16%	96%	80%
Bas estran	17%	3%	27%	100%	73%

Tableau 39. Mesures de dispersion statistiques de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons du côté nord-est.

Nord-est					
Zones	Écart-type	Variance	Minimum	Maximum	Étendue
Haut de plage	20%	4%	33%	96%	63%
Haut estran	20%	4%	5%	91%	86%
Bas estran	12%	1%	17%	91%	74%

Ce qui est à retenir, c'est que du côté sud, le haut de plage et le bas estran ont présenté des résultats de la proportion de la matrice fine démontrant une variabilité moins importante que sur le haut estran. Aussi, la proportion de la matrice fine du haut de plage est en moyenne plus fine sur l'ensemble des profils que sur ceux de la côte nord-est, même si elle affiche une grande variabilité (moins importante qu'au nord-est). Du côté nord-est, c'est plutôt le bas estran qui présente peu de variabilité, ce qui signifie une stabilité granulométrique entre les deux groupes de matrices (plus et moins de 2 mm de diamètre) sur l'ensemble de cette zone.

De plus, un granoclassement est visible sur tous les profils. Les échantillons sur le haut de plage sont plus fins que ceux du premier tiers de la plage, composés d'une moins grande quantité de sédiments fins. La moyenne de la proportion de la matrice fine de tous les échantillons est de 84 % pour le haut de plage contre 56 % pour le haut estran sur le côté nord-est. Ces chiffres sont respectivement de 84 % et 53 % du côté sud. En ce qui concerne le bas estran, une différence dans la moyenne est marquée du côté nord-est (50 %) et sud (78 %).

Du côté sud, sur les 5 premiers mètres après la flexure, l'échantillon BE 1 est largement constitué de sédiments fins (entre 53 % à 100 %). Les échantillons dans les herbiers y sont pour quelque chose, car les plants captent les 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 sédiments sur le bas estran 2

et 3 ont été recueillis sur la plateforme rocheuse, c'est pourquoi la matrice fine est un peu moins élevée avec une moyenne de 75 % et 66 % respectivement. La plateforme rocheuse s'érode par l'action mécanique des vagues et c'est pourquoi des graviers de schistes et des petits galets de microgrès se sont retrouvés dans les échantillons et ont fait augmenter la proportion de la matrice grossière. Les échantillons du bas estran 4, 5 et 6 sont sur la zone sablo-vaseuse et près du cordon à la limite de la zone intertidale. Cette zone est assez fine entre 75 % et 83 % de matrice inférieure à 2 mm.

Du côté nord-est, les sédiments près de la flexure sur le bas estran présentent moins de sédiments fins avec une proportion variant entre 34 % et 74 %. Puisqu'il n'y a pas de zone sablo-vaseuse de ce côté de l'île, les échantillons du bas estran ont été entièrement recueillis sur la courte plateforme rocheuse. Le pourcentage attribué à la proportion de la matrice fine sur le bas estran varie entre 24 % à 68 %, ce qui montre que cette zone comporte moins de sédiments fins que du côté sud.

3.2.2 Analyse 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, le haut estran et le bas estran 1 des profils témoins naturels, nouvellement artificialisés et déjà artificialisés. Ces trois zones sur le profil ont été choisies puisque les changements granulométriques sont prévus d'y apparaître en cas d'effets des ouvrages de protection sur la morphosédimentologie de la plage devant l'enrochement.

3.2.2.1 Côté sud

3.2.2.1.1 Haut de plage

La figure 44 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. 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.

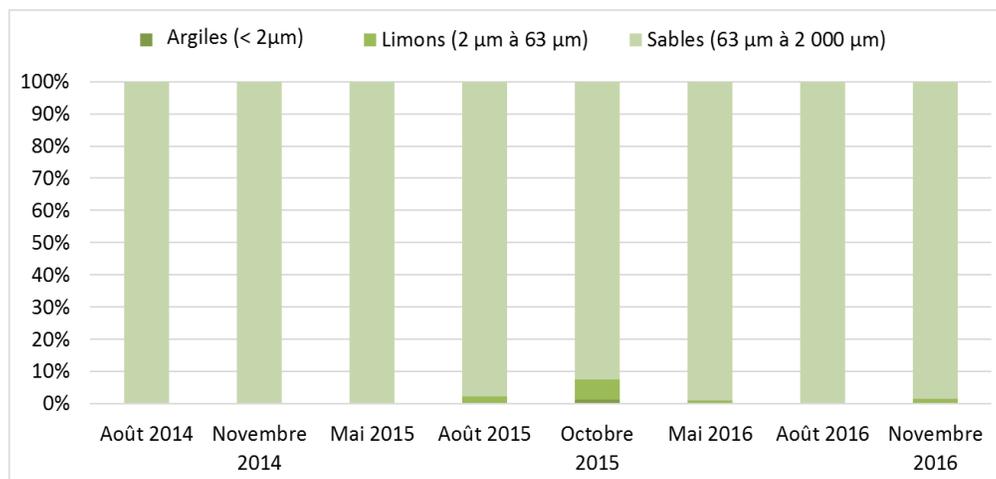


Figure 44. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côté sud.

La figure 45 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. Puisque l'enrochement a complètement empiété sur le haut de plage du profil 8 (aussi enroché lors des travaux de 2014), 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. 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 présent, 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.

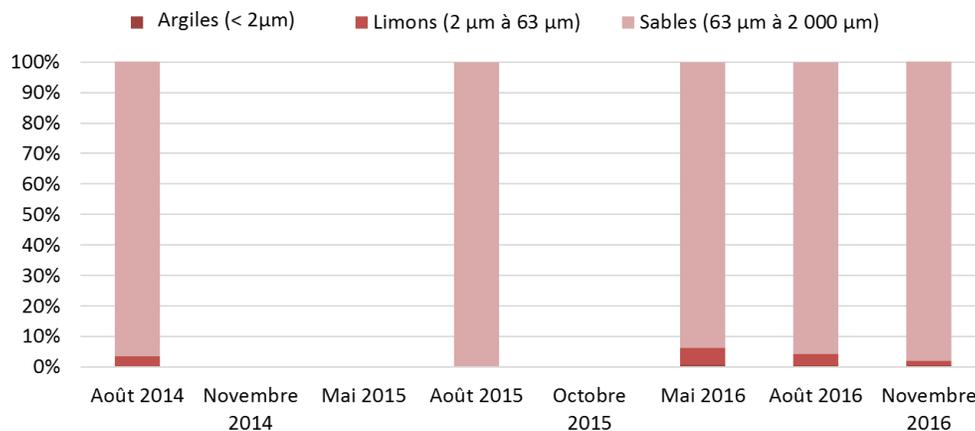


Figure 45. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur le profil 1 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côté sud.

3.2.2.1.2 Haut estran

La figure 46 présente l'évolution des 3 classes granulométriques pour les échantillons du haut estran situés sur les profils 2 et 3 témoins naturels. 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 tandis que ceux des argiles étaient assez stables entre 0,5 et 1 point.

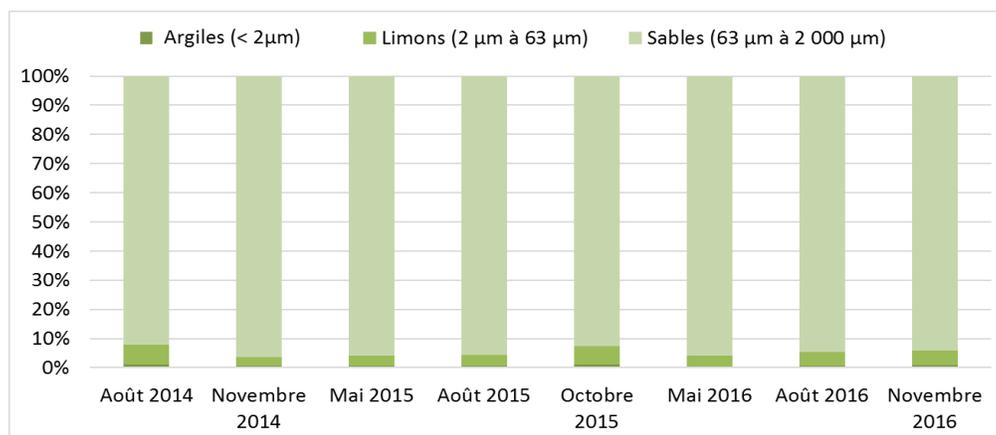


Figure 46. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côté sud.

La figure 47 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. 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 granulométrique sont assez stables, il est possible d'affirmer que les enrochements ne semblent pas avoir influencé la composition de la matrice fine.

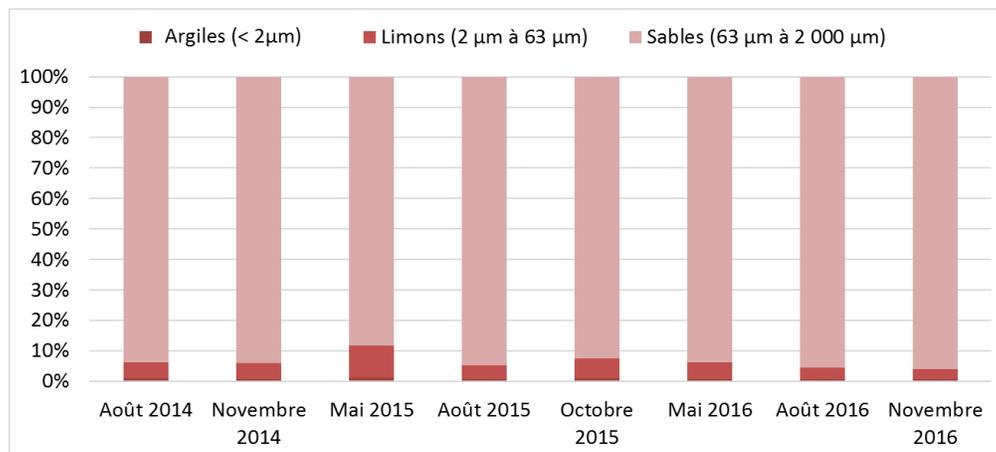


Figure 47. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 1 et 8 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côté sud.

La figure 48 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. 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 point de pourcentage 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.

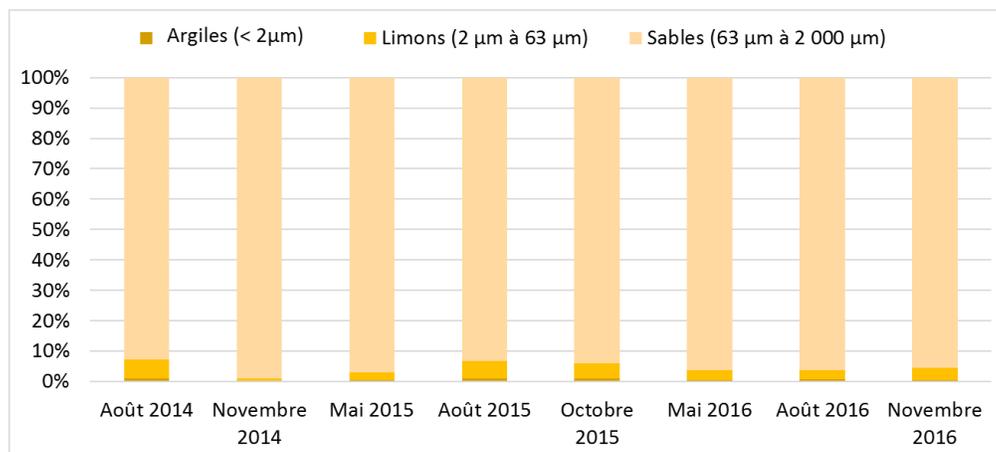


Figure 48. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côté sud.

En somme, les caractéristiques granulométriques du haut estran sont assez similaires entre les profils du côté 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.

3.2.2.1.3 Bas estran 1

La figure 49 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.

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, soit à 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. Il est possible que du sable provenant de la dérive littorale ou du large ait migré vers la plage par le 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.

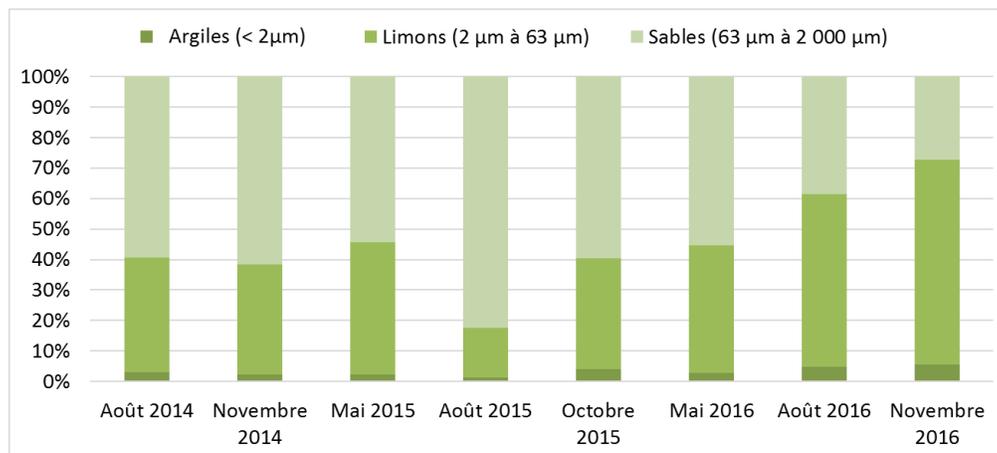


Figure 49. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 2 et 3 devant une ligne de rivage naturelle, côté sud.

La figure 50 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.

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, les sables ont grimpé de 9 points de pourcentage, les limons ont perdu 8 points et les argiles étaient à 1 point. 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 il était constitué que de sédiments fins (91 % de limon et 9 % d'argile). Seul un dépôt de surface de sédiments fins à ces endroits peut expliquer de tels résultats. Le bon développement durant la période de croissance des herbiers sur ces profils peut expliquer ces chiffres par le captage de sédiments fins grâce à la barrière physique que forment les plants de l'herbier. 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. En mai 2016, la composition de la matrice fine revient à des pourcentages similaires à ceux de l'état initial avec 57 points pour les sables, les limons à 40 points et les argiles avec un peu moins de 4 points. 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.

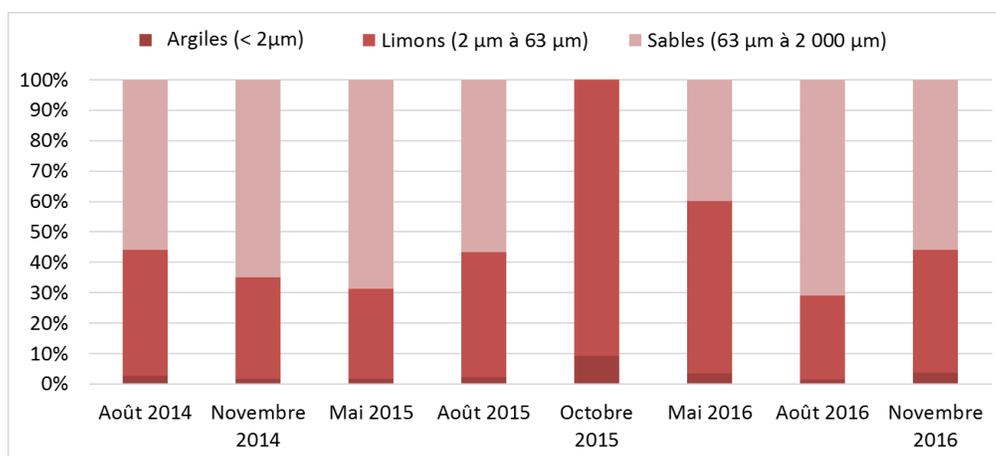


Figure 50. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du bas estran 1 situés sur les profils 1 et 8 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côté sud.

La figure 51 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.

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 marées peuvent emporter périodiquement des sédiments de différentes tailles sur la plateforme rocheuse. Puisque cet échantillon est situé à travers des 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.

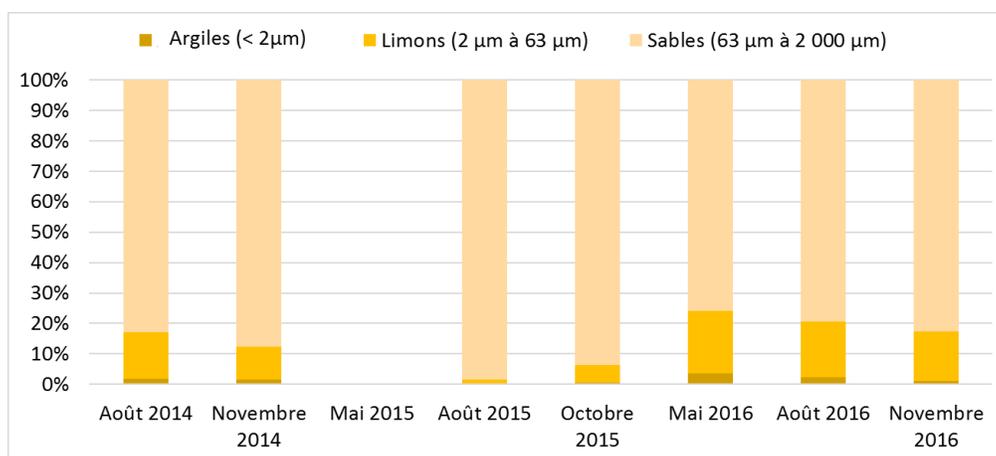


Figure 51. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 4 devant une ligne de rivage déjà artificialisée en 2014, côté sud.

3.2.2.2 Côte nord-est

3.2.2.2.1 Haut de plage

La figure 52 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. 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 du côté sud.

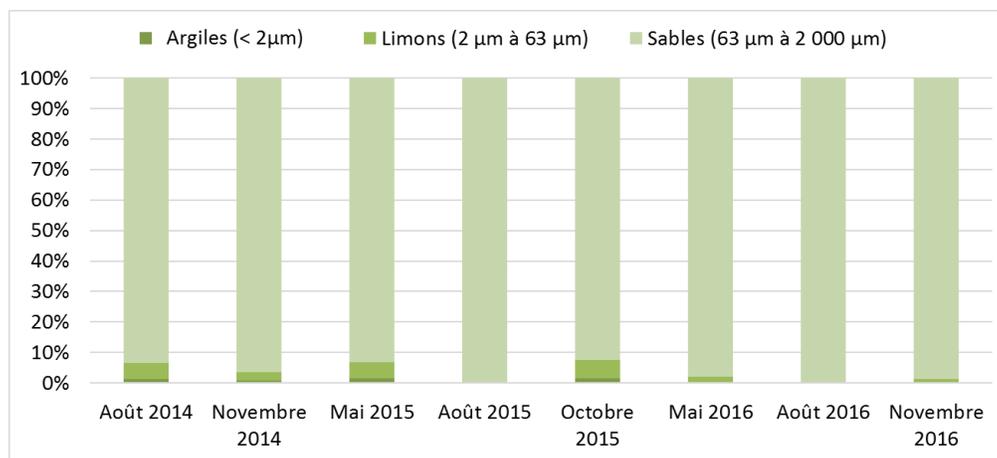


Figure 52. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du haut de plage situé sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.

La figure 53 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.

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 à 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.

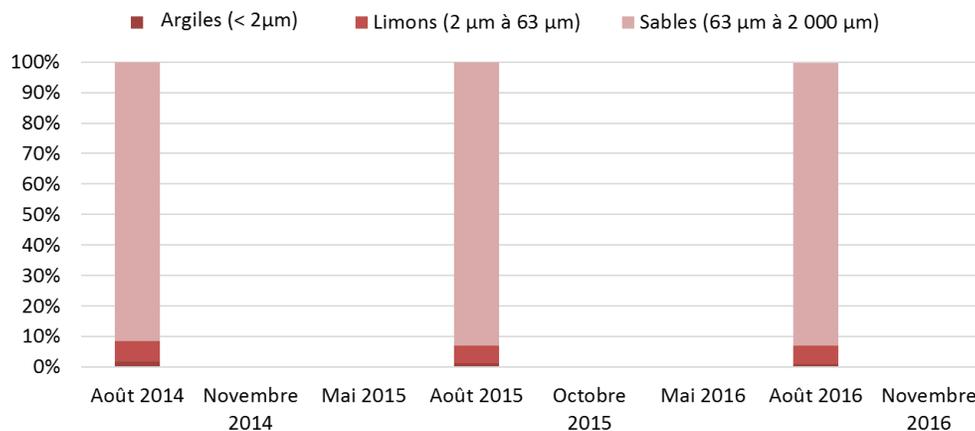


Figure 53. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut de plage situés sur le profil 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.

3.2.2.2 Haut estran

La figure 54 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.

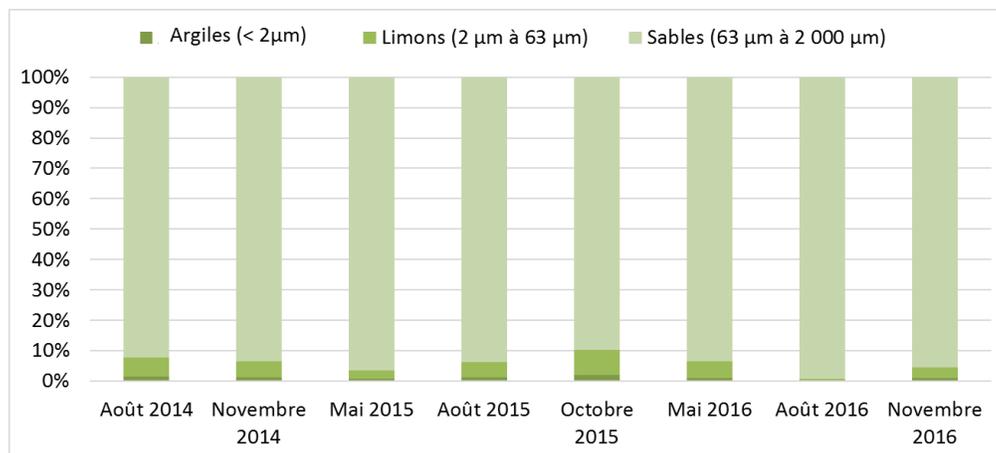


Figure 54. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.

La figure 55 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. 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'enrochement, 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'enrochement 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.

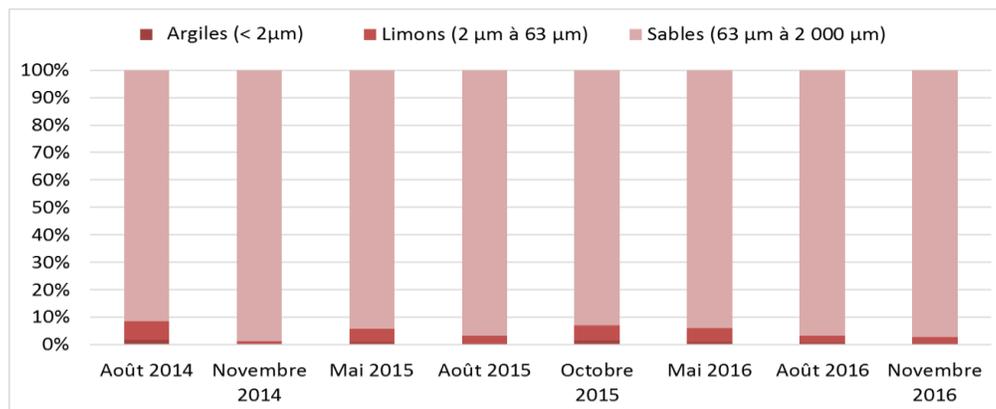


Figure 55. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons du haut estran situés sur les profils 5 et 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.

3.2.2.2.3 Bas estran 1

La figure 56 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. 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). 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.

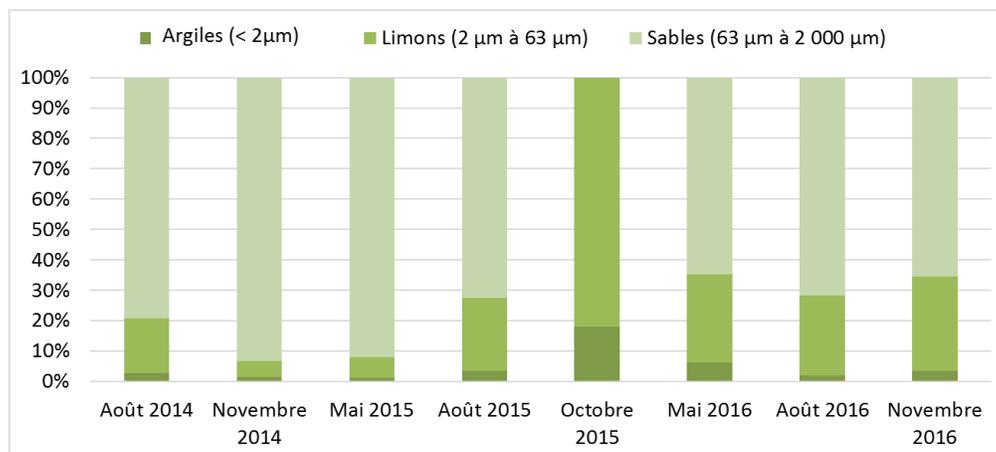


Figure 56. Évolution des 3 classes granulométriques de l'échantillon du bas estran 1 situé sur le profil 6 devant une ligne de rivage naturelle, côte nord-est.

La figure 57 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. À l'état initial, les échantillons étaient constitués à 70 % de sable, 28 % de limon et de 2 % d'argile. Après les travaux d'enrochements, 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 du côté 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.

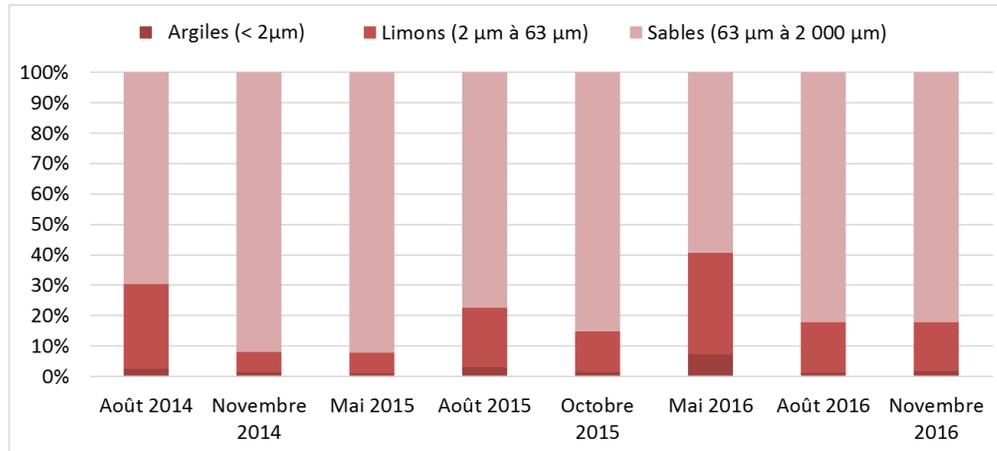


Figure 57. Évolution des 3 classes granulométriques des échantillons bas estran 1 situés sur les profils 5 et 7 devant une ligne de rivage artificialisée lors des travaux de 2014, côte nord-est.

3.2.3 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. La période de transition qui suit l'artificialisation du littoral peut être caractérisée par le déplacement des sédiments devant l'ouvrage vers le bas estran lors du retrait du jet de rive 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. En effet, lors des tempêtes automnales et printanières, à la suite du déferlement des vagues, la nappe de retrait possède une énergie plus forte que le jet de rive transportant du matériel sédimentaire vers le large (Paskoff, 2012). De plus, les ouvrages de protection parallèles au trait de côte accentuent le processus de transport sédimentaire vers le large et le long du littoral par une perturbation des conditions hydrodynamiques locales (Ismail et El-Sayed, 2011). C'est pour cette raison que le bas estran 1 est présenté avec les résultats de la plage dans cette section.

3.2.3.1 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 58). 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.

Au 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 dans l'échantillon.

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.

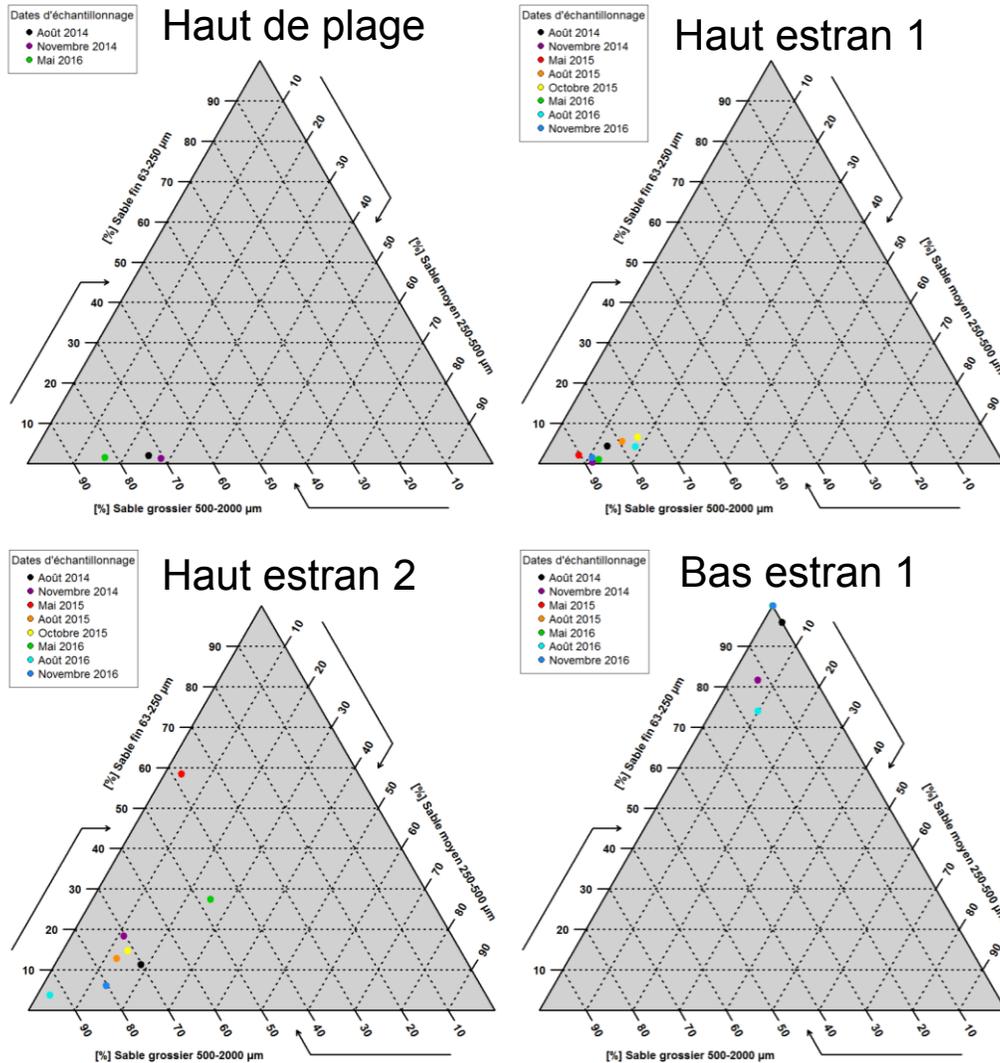


Figure 58. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 1.

3.2.3.2 Profil 2 (*naturel*)

La portion de sable de la matrice fine du haut de plage est constituée en majorité de sable grossier, soit entre 57 % et 83 %, tandis que les sables moyens composent entre 16 à 40 % de l'échantillon (figure 59). 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 hors de la moyenne, 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 harmonisés 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), lequel aurait été déplacé 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).

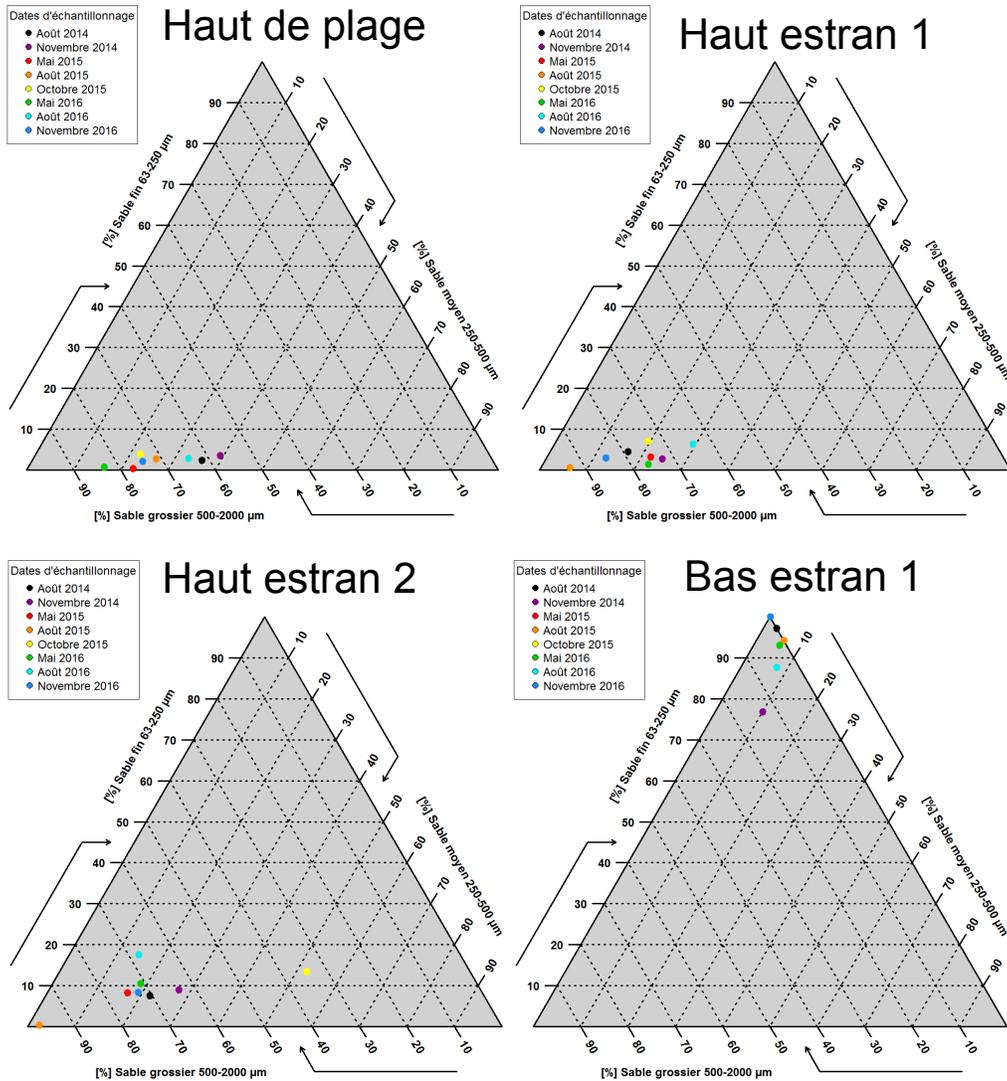


Figure 59. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 2.

3.2.3.3 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 60). 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 variée 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.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

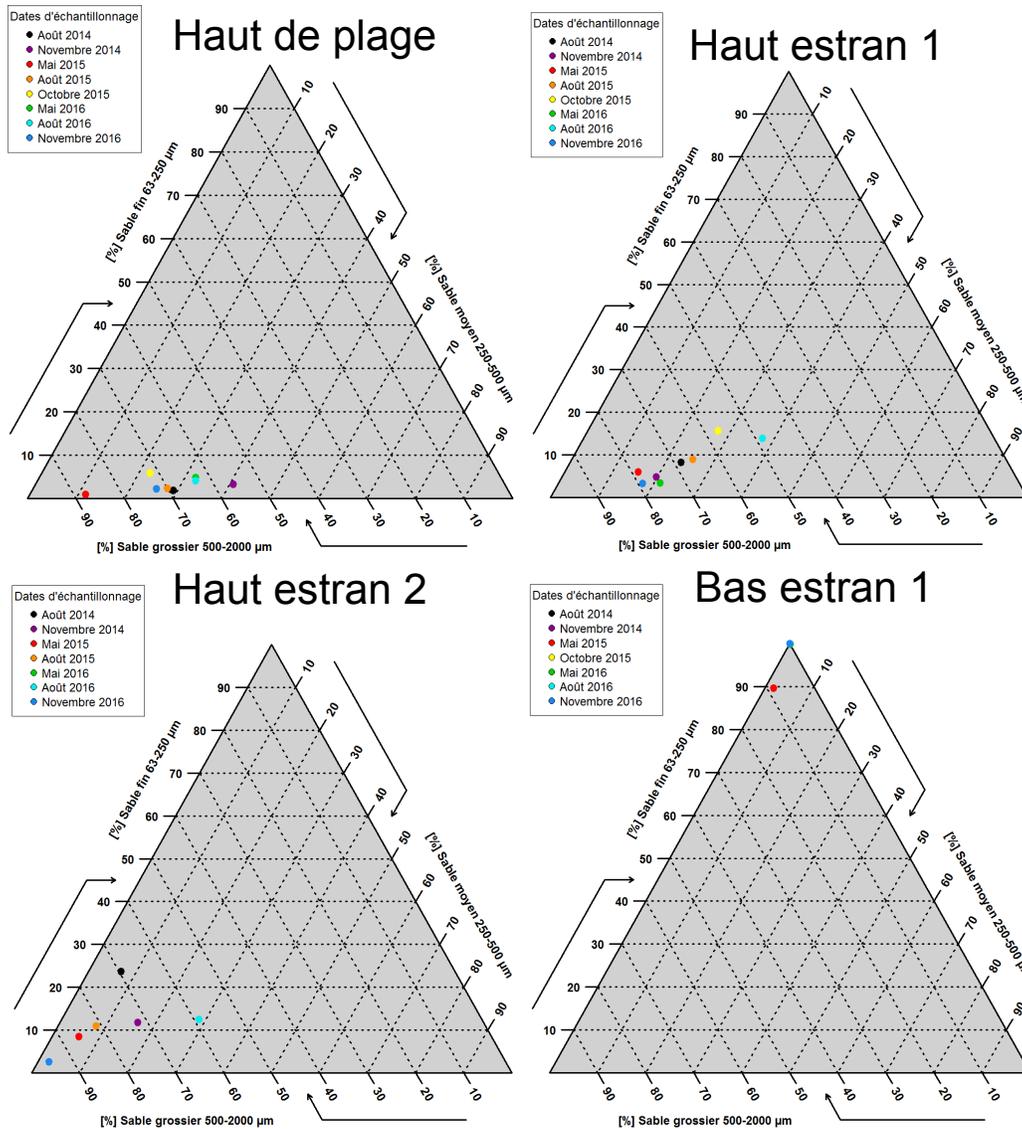


Figure 60. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 3.

3.2.3.4 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 61). 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 du côté 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.

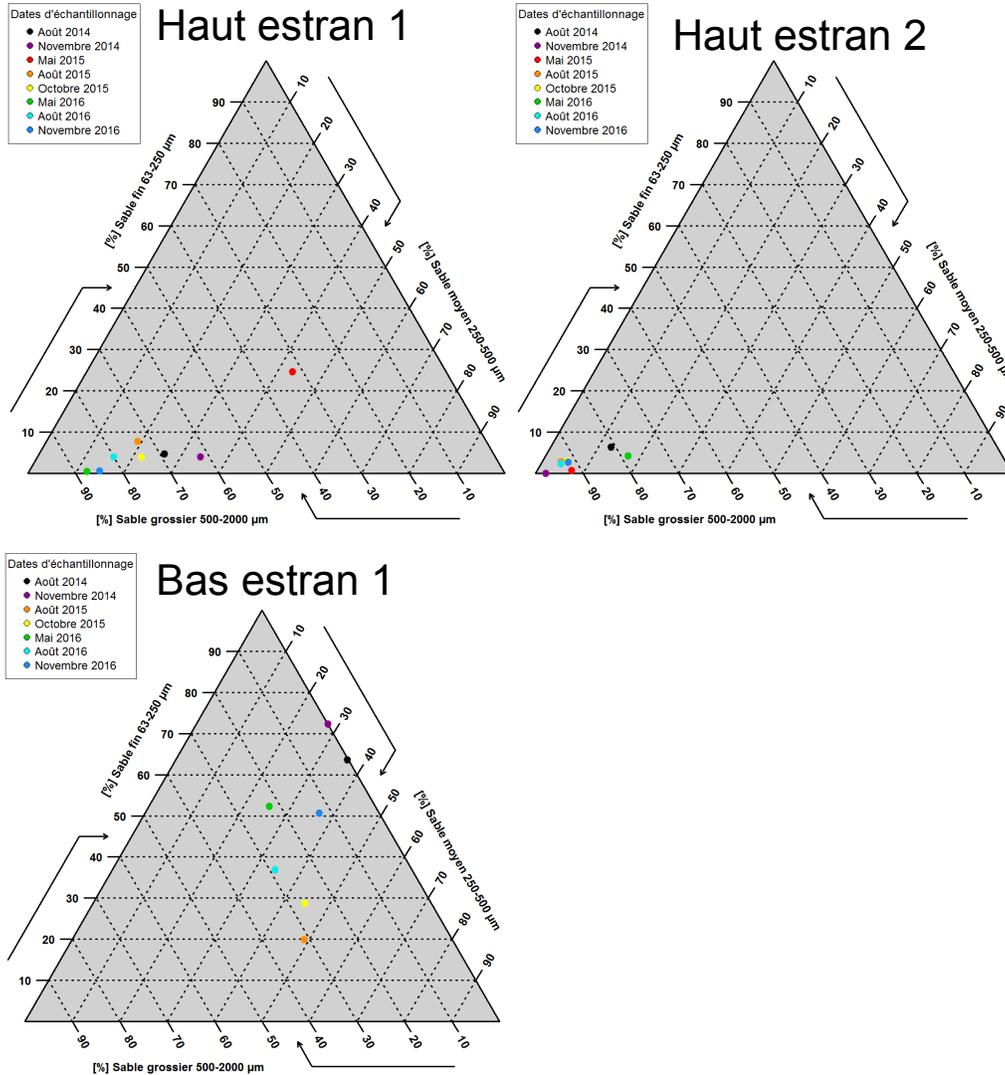


Figure 61. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sables fins de 63 µm à 250 µm, sables moyens de 250 µm à 500 µm et sables grossiers de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 4.

3.2.3.5 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 62).

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 montrent 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 les sables grossiers perdent en pourcentage, ces derniers sont gagnés dans la tranche moyenne, 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, le 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 causé cette augmentation de sable grossier. Il est aussi probable que les sédiments remis devant l'ouvrage ait été dans la même tranche granulométrique que les 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, les sédiments remis au pied de l'ouvrage lors des travaux semblent avoir été redistribués vers le bas de la plage par les vagues affectant grandement la composition de la matrice fine du bas estran 1.

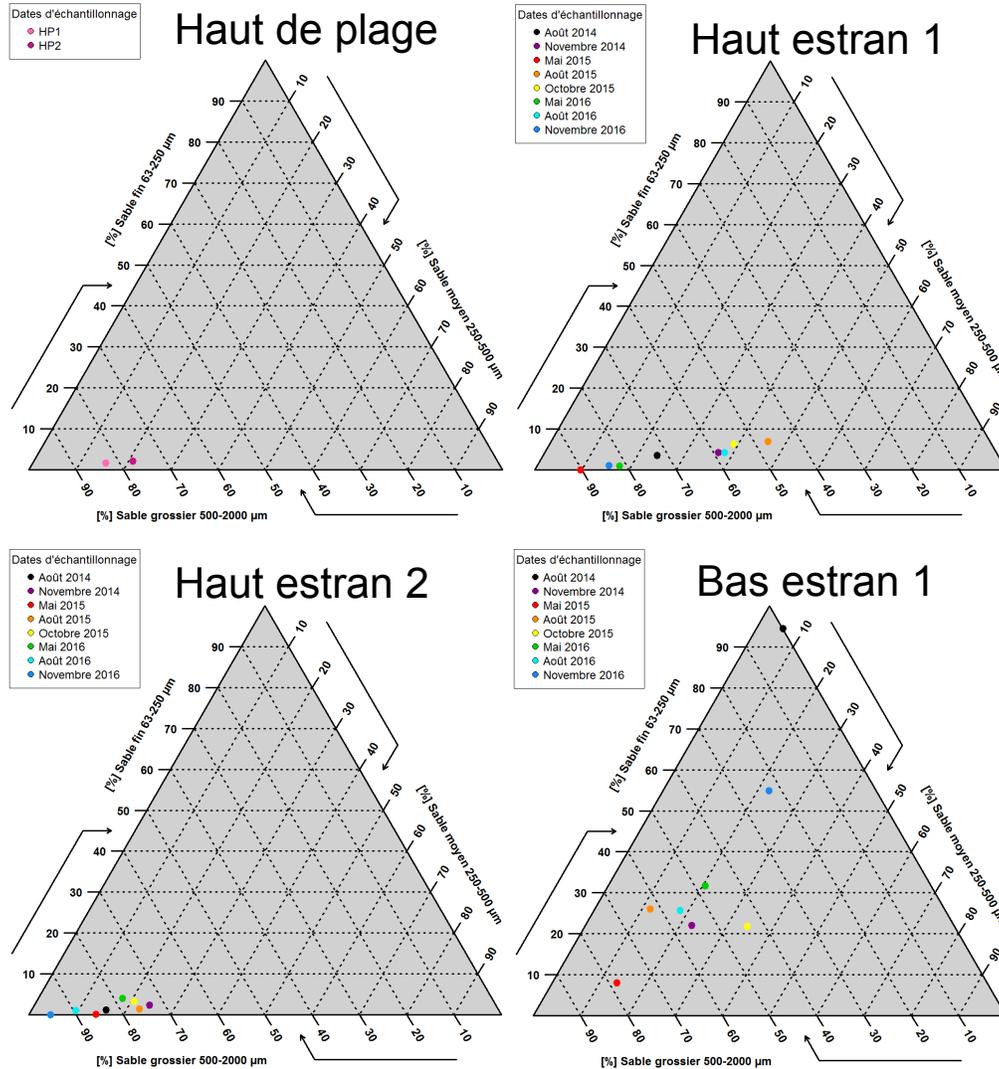


Figure 62. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 5.

3.2.3.6 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 63).

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 près de 0 points. 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 démontrent 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.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

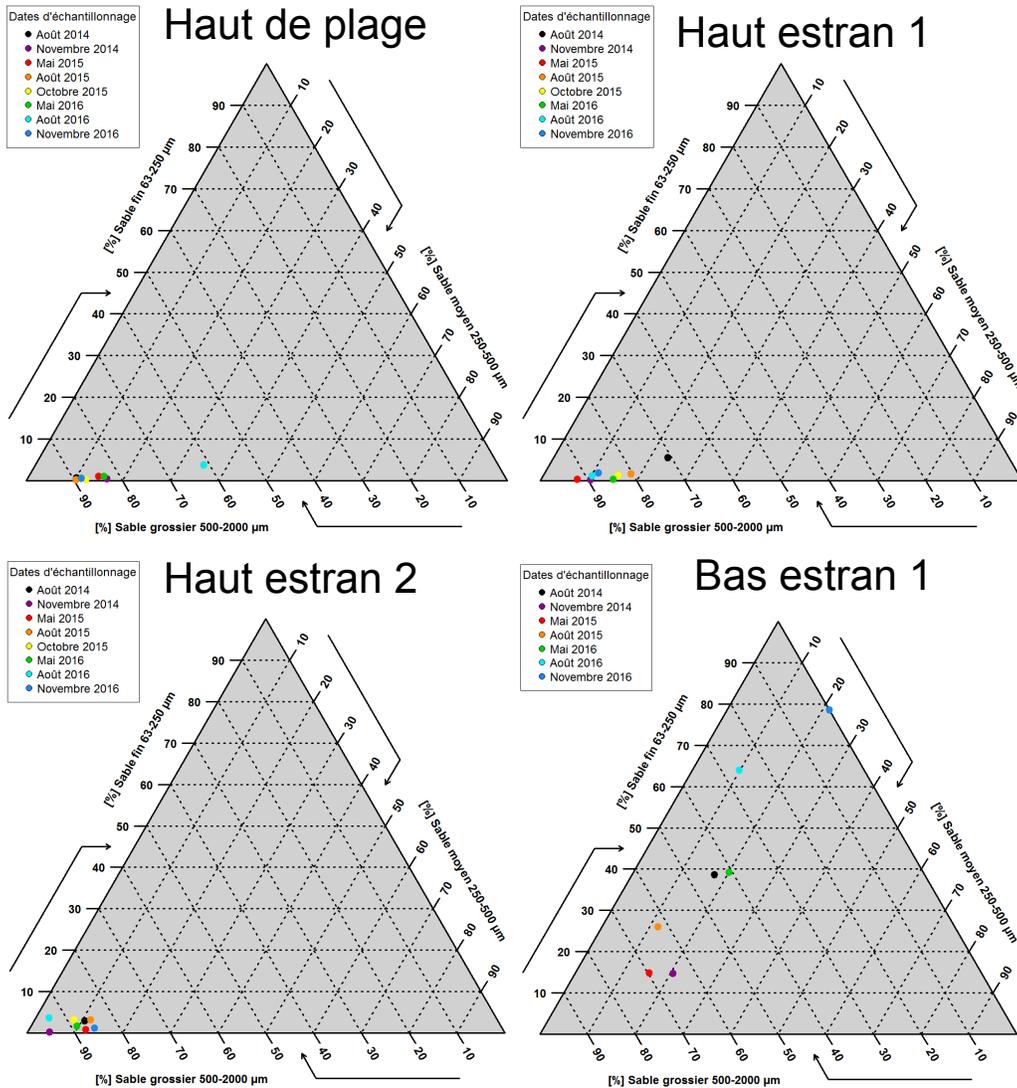


Figure 63. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 6.

3.2.3.7 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 à près de 100 % dans la matrice sableuse pour août 2016 (figure 64).

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 corrélation 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.

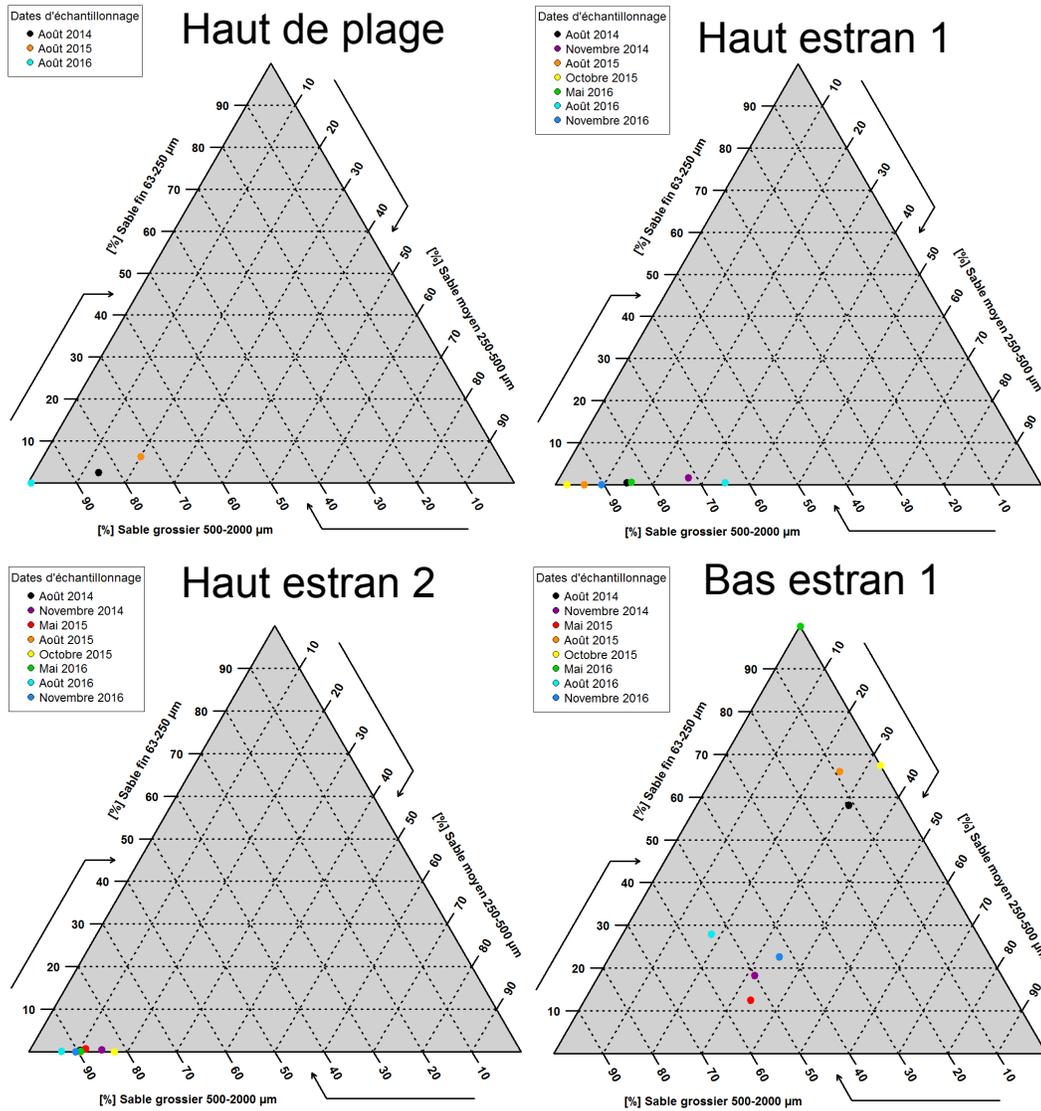


Figure 64. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 7.

3.2.3.8 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 sable grossier et 34 % de sable moyen (figure 65). Les sables fins sont toujours représentés en faible proportion sur le haut de plage avec 5 %.

Sur le haut estran 1, l'état initial dévoile 66 % de sable grossier, 28 % de sable moyen et 6 % de sable fin. Après 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, alors qu'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 grossiers avec 32 % de sable grossier, 47 % de sable moyen et 21 % de sable fin. Un certain patron est observable dans les résultats des mois d'août alors qu'ils présentent un pourcentage moins important de sable grossier pour leur année d'échantillonnage respective, i.e. août 2015 a 58 % de sable grossier contre 84 % pour mai 2015 et 71 % pour octobre 2015. Un constat similaire est repérable pour les deux autres années.

Sur le haut estran 2, l'état de référence est à 64 % de sable grossier, 18 % de sable moyen et 18 % de sable fin. 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 quant à la proportion de sable grossier, étant distribués 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 sable fin. Il faut attendre mai 2015 pour que l'état change alors que 12 % de sable grossier est observé. 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 sable fin est à l'été 2016, alors que 20 % de sable grossier et 15 % de sable moyen ont été calculés. C'est aussi à cette date que le haut estran 2 a connu sa plus grande concentration de sable grossier.

Il semble que les enrochements aient influencé la granulométrie de la plage, mais de façon temporaire, plutôt visible lors des 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.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

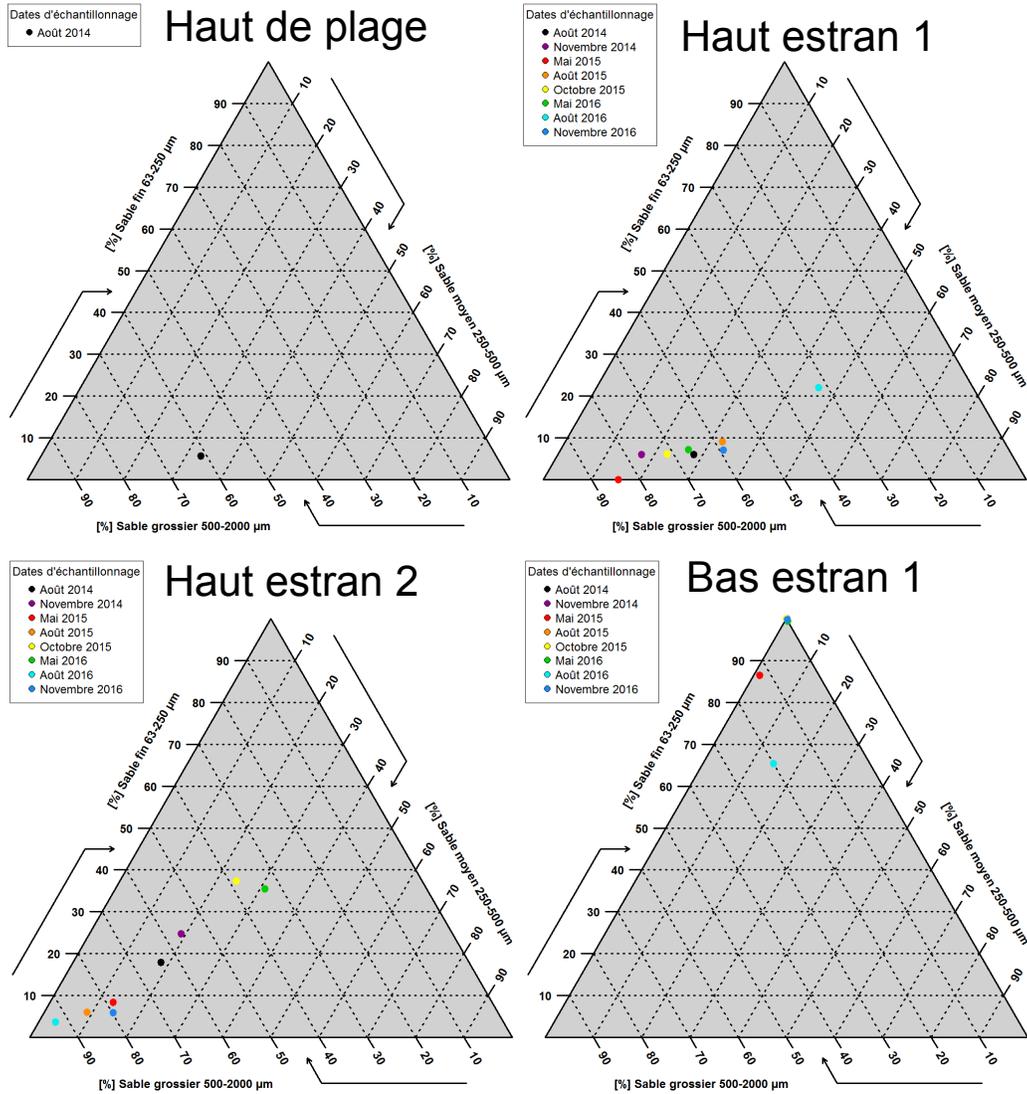


Figure 65. Évolution représentée sur des diagrammes ternaires des trois groupes granulométriques du sable (sable fin de 63 µm à 250 µm, sable moyen de 250 µm à 500 µm et sable grossier de 500 µm à 2 000 µm) des échantillons sur le haut de plage, haut estran et bas estran 1 situés sur le profil 8.

3.2.4 Synthèse

Le premier constat est que, dans l'ensemble, le haut de plage et le haut estran sont constitués à majorité de sable grossier 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.

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 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 important du suivi (voir chapitre 6). 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. Seul le profil 7 artificialisé n'a pas semblé avoir été affecté par les enrochements. Puisque ce secteur présente plusieurs affleurements 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. En ce qui concerne la granulométrie des plages naturelles, elle est dans l'ensemble plus stable et présente des cycles saisonniers visibles davantage harmonisés entre les échantillons.

En somme, les profils dont la granulométrie a été le plus affectée par les enrochements correspondent aux endroits où le climat de vague est le plus important : le profil 5 dans l'anse à Buttemont avec le fetch le plus grand et le profil 4 au sud-est où le climat de vague enregistré a été le plus important. 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 grossier comme ceux du haut estran de certains profils artificiels (1 et 5), aucun changement immédiat de la granulométrie n'a été observé après les travaux.

La zone après la flexure constituée d'herbiers est propice à la captation de sédiments fins. Néanmoins, des sables et des petits graviers de schistes sont déplacés par les vagues et les courants sur la plateforme rocheuse et peuvent constituer des patrons granulométriques aléatoires sur le bas estran. C'est cette grande variabilité que montrent les résultats des échantillons à cet endroit. Par contre, un constat est sûr, le bas estran 1 situé dans la zone des herbiers est fortement plus limoneux et argileux qu'ailleurs sur la plateforme rocheuse.

3.3 Évolution morphologique des plages

L'objectif de cette section est d'évaluer les changements de la morphologie des plages de saison en saison, mais aussi de comparer les profils témoins naturels avec les profils artificialisés afin de déterminer s'il y a eu des impacts sur la plage à la suite des travaux de protection de la berge.

3.3.1 Évolution verticale et volumique

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. Puis, 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 permettant d'obtenir un résultat en volume (m³).

3.3.1.1 Profil 1 (artificialisé)

La figure 66 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'enrochement 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 enrochée 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 40 m depuis l'origine du profil.

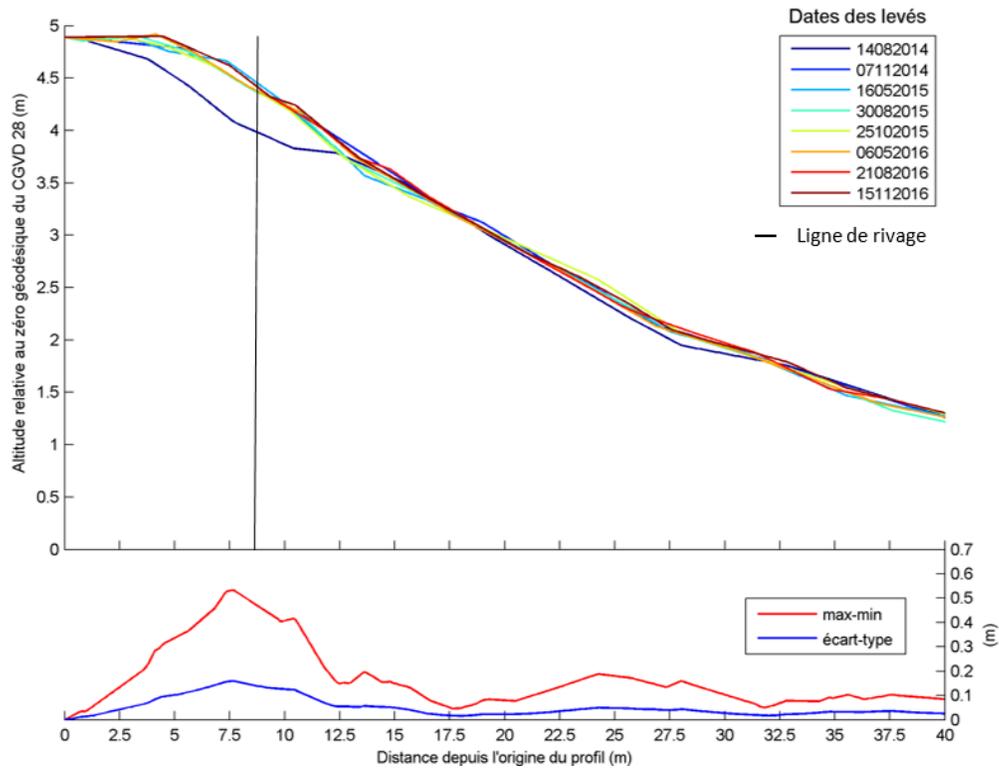


Figure 66. Évolution du profil topographique 1 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 67 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculé sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 9 à 40 m (31 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 10 m) est en rouge, le deuxième tiers (10 à 21 m) est en bleu et le troisième tiers (21 à 31 m) est en vert.

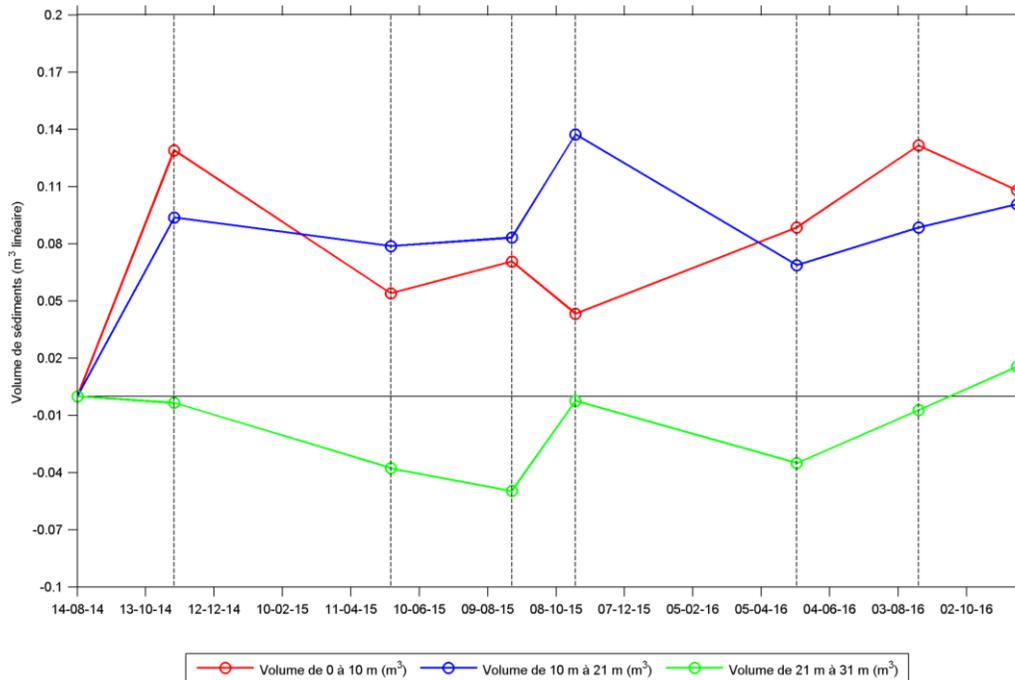


Figure 67. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 1.

Le premier tiers de la plage présente une augmentation de 0,013 m³ à la suite des travaux, due à la recharge sédimentaire au pied de l'ouvrage de protection. Un gain sédimentaire est aussi repérable de 0,09 m³ sur le deuxième tiers. Le 3^e tiers n'a que très peu diminué en volume. À la suite de l'hiver, le levé de mai 2015 présente une perte de volume de 0,08 m³ sur les 10 premiers mètres de la plage, ce qui indique que la berme de recharge de plage faite devant et dessus l'enrochement a été remaniée par les vagues et les glaces. Le volume sur la deuxième portion a légèrement diminué de 0,01 m³ tandis que les 10 derniers mètres ont perdu 0,04 m³. 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. Néanmoins, le bas de la plage a encore perdu en volume de 0,015 m³. À l'automne 2015, le haut de la plage perd des sédiments qui semblent être transférés vers le bas de la plage sur les 2^e et 3^e tiers. Après le deuxième hiver, le levé de mai 2016 présente une augmentation de 0,04 m³ sur la zone supérieure de la plage tandis que le milieu et le bas de plage diminuent de 0,07 m³ et 0,03 m³. Cela indique qu'une partie des sédiments de la plage ont été poussés 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 rejoint un niveau similaire à ce qui était calculé à l'automne 2014, à la suite des travaux d'enrochement. Novembre 2016 voit le premier tiers légèrement diminuer de 0,02 m³ ce qui semble être transféré vers le bas de la plage, se traduisant par une augmentation de 0,01 m³ et 0,02 m³ sur ces portions 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. Néanmoins, c'est un gain sédimentaire qui a subsisté sur ce profil, qui se traduit dans l'altitude et le volume de la plage.

3.3.1.2 Profil 2 (naturel)

La figure 68 présente les huit levés du profil topographique 2. La ligne de rivage moyenne est située à 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 après la ligne de rivage, soit sur la portion de plage finissant à 35 m, soit à la limite de la flexure.

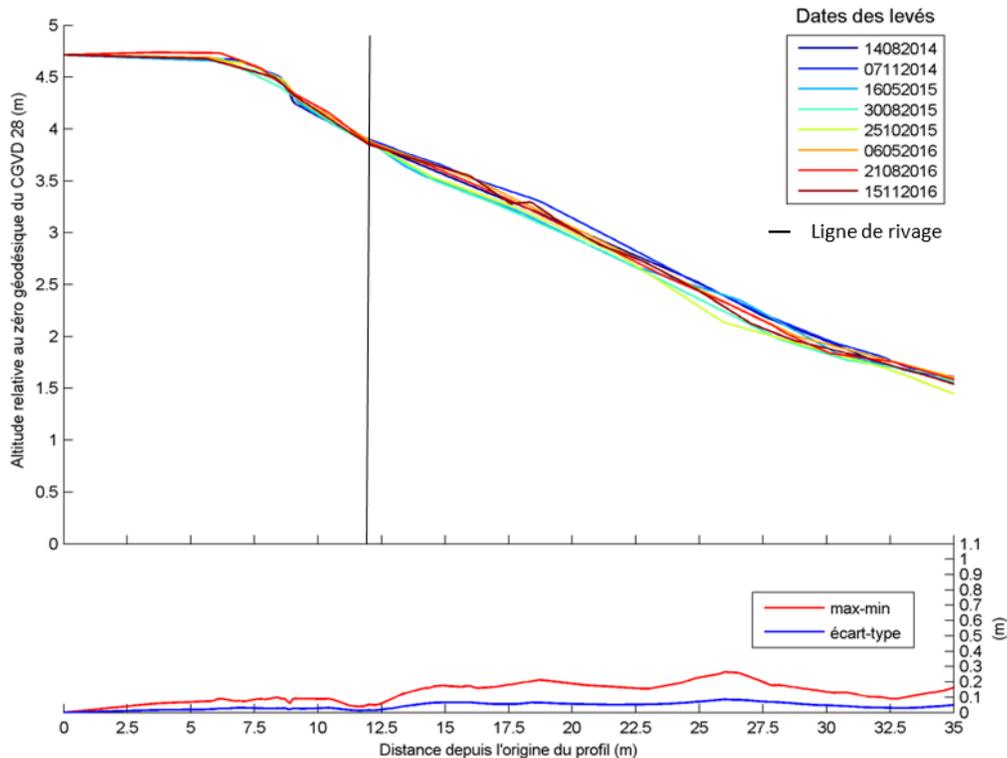


Figure 68. Évolution du profil topographique 2 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 69 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 12 à 35 m (23 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage dans le temps. 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.

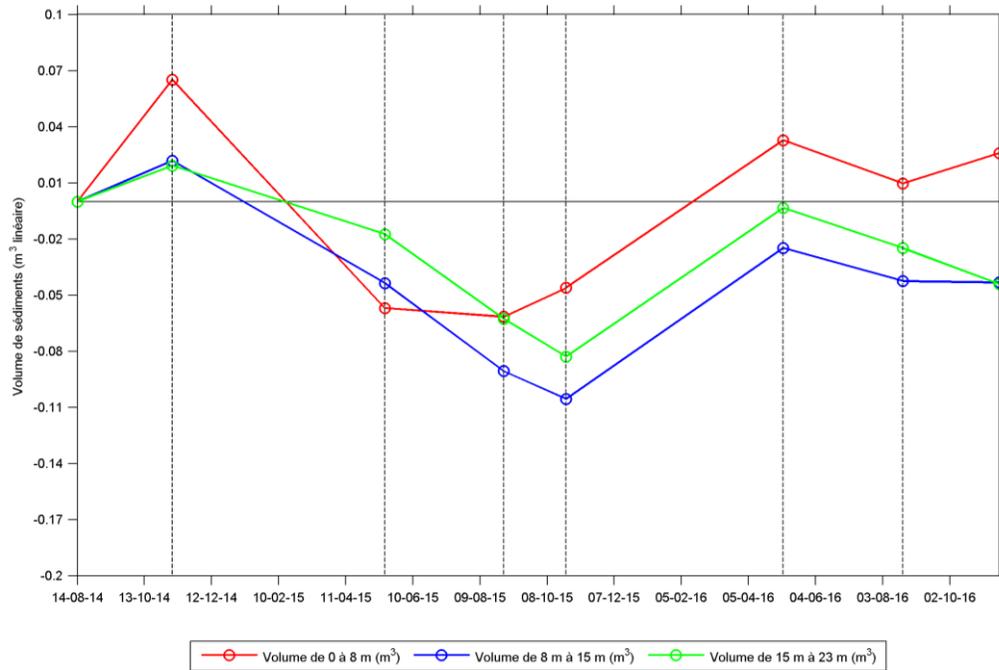


Figure 69. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 2.

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 moitié et le bas 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 de l'altitude, 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.

3.3.1.3 Profil 3 (naturel)

La figure 70 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 prise en compte. 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 sur le premier et le 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.

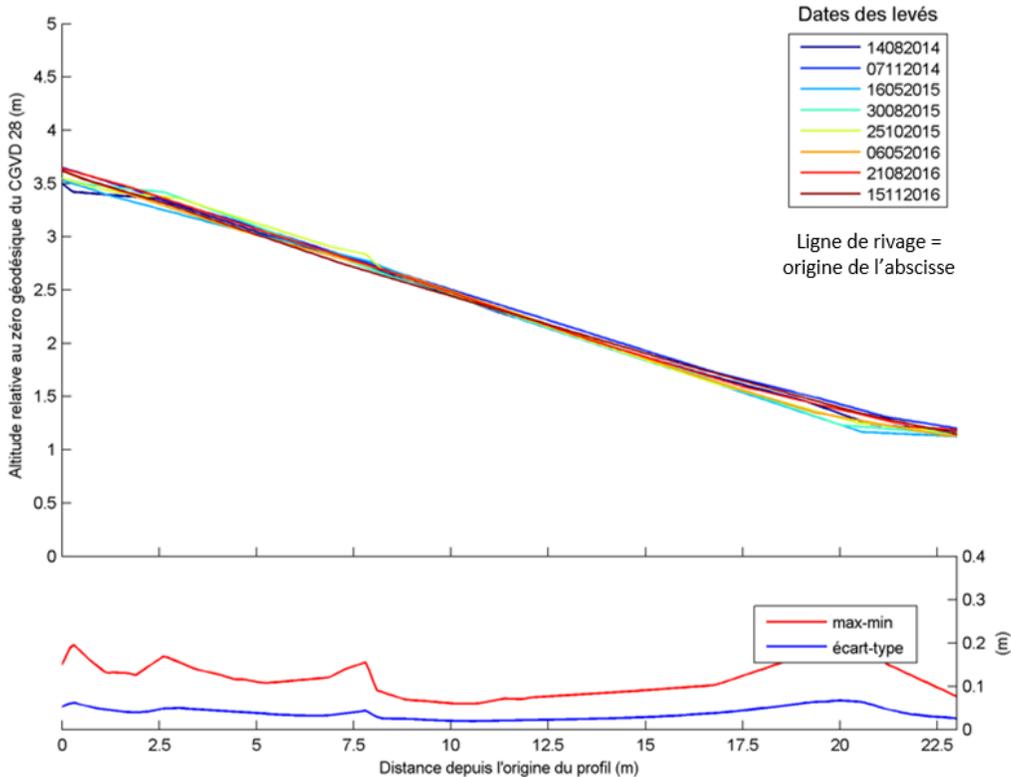


Figure 70. Évolution du profil topographique 3 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 71 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 0 à 23 m. Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage dans le temps. 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.

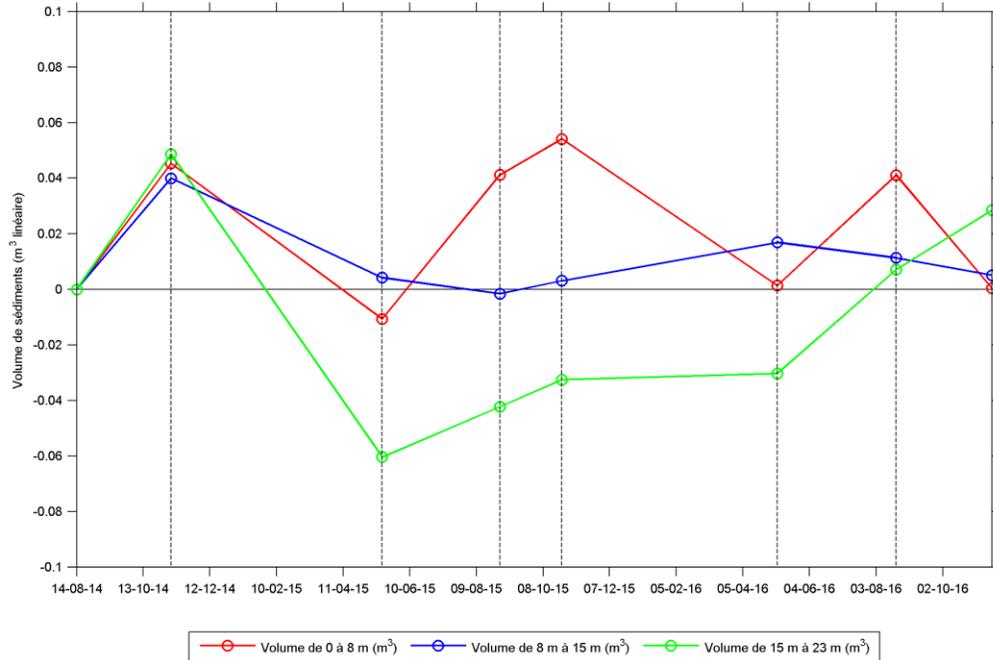


Figure 71. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 3.

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 m³ et 0,015 m³. Après le deuxième hiver, les premiers mètres de plage ont perdu près de 0,06 m³ de plage pour retourner à la valeur de l'état initial. La moitié de la plage a légèrement augmenté de près de 0,02 m³. 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 m³, similaire à ce qui avait été enregistré en novembre 2014. La moitié de la plage a connu une légère baisse de 0,005 m³ tandis que le bas de plage a connu une forte augmentation, près de 0,004 m³. En novembre 2016, la plage voit son premier tiers diminuer de 0,04 m³ ce qui semble avoir été transféré vers le bas de la plage, se traduisant par une augmentation de 0,025 m³.

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.

3.3.1.4 Profil 4 (déjà artificialisé avant les travaux de 2014)

La figure 72 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 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.

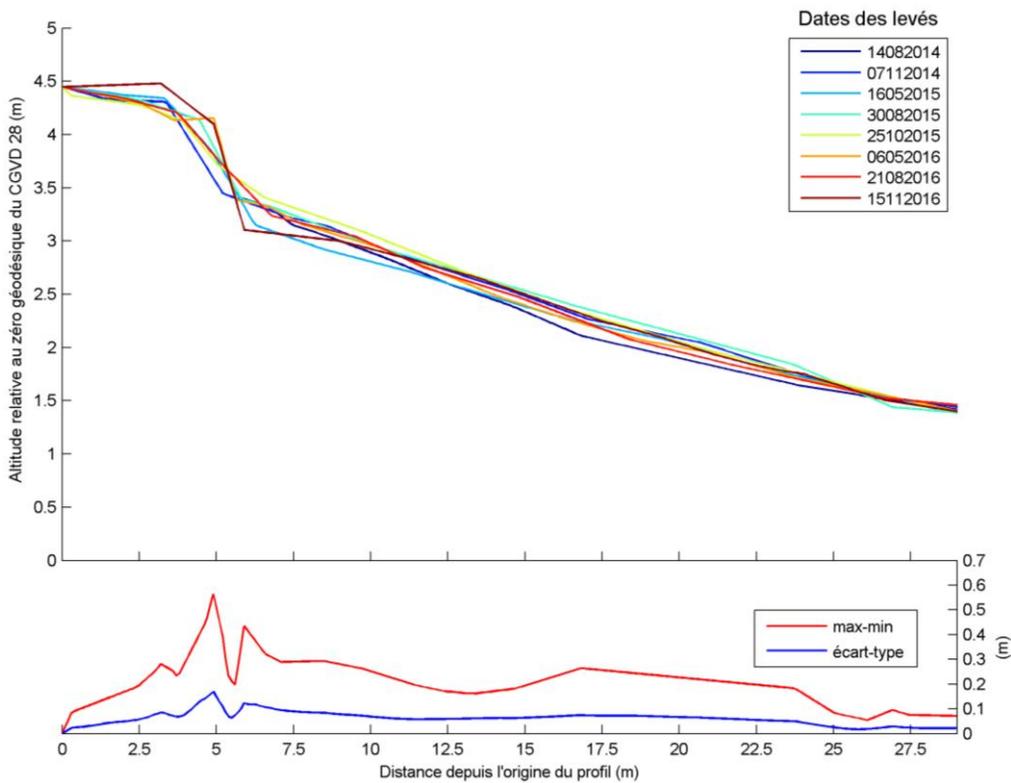


Figure 72. Évolution du profil topographique 4 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 73 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 7 à 28 m (21 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage dans le temps. 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.

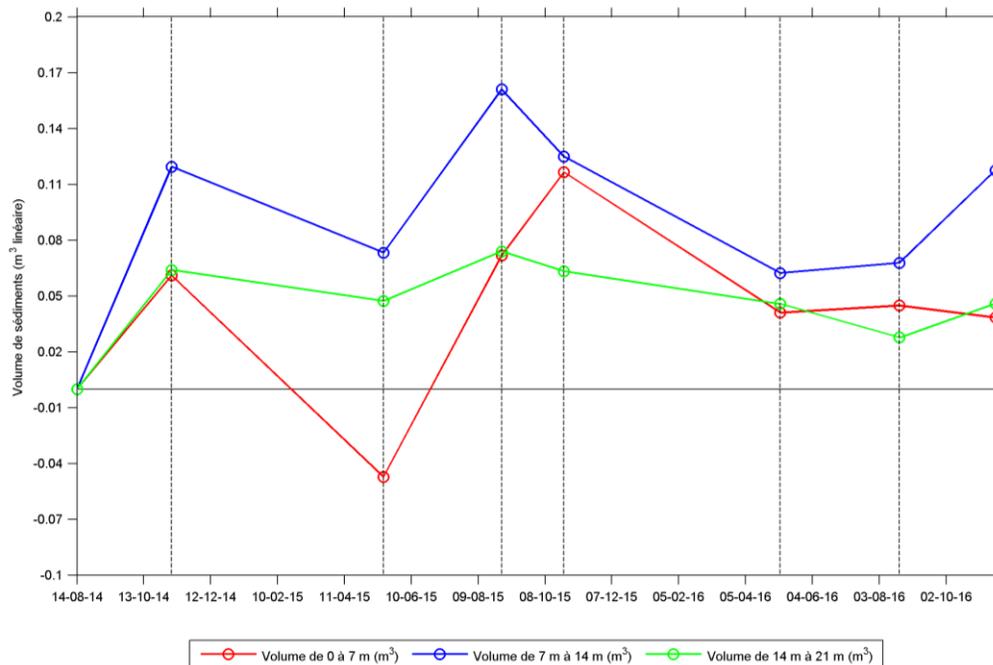


Figure 73. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 4.

Dès l'automne 2014, l'ensemble de la plage présente une augmentation, soit de 0,065 m³ pour les deux premiers tiers et de 0,12 m³ pour le troisième tiers. Cet apport sédimentaire semble provenir du transit sédimentaire lié à la dérive littorale et aux apports du cordon infralittoral. 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 chiffres similaires à ce qui avait été obtenu 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 m³ pour les deux premiers tiers mais une perte de 0,02 m³ 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 m³ tandis que le deuxième et troisième gagnent près de 0,05 m³ et 0,02 m³ 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 demi du suivi.

3.3.1.5 Profil 5 (artificialisé)

La figure 74 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.

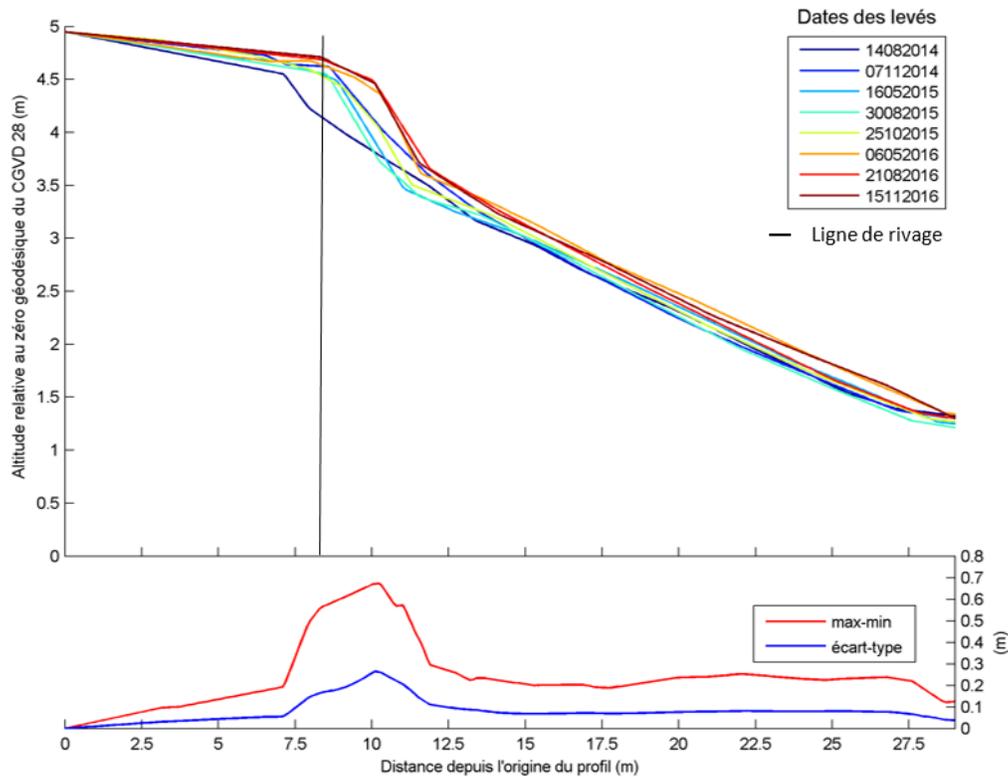


Figure 74. Évolution du profil topographique 5 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

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 aout

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 75 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 8 à 29 m (21 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage dans le temps. 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.

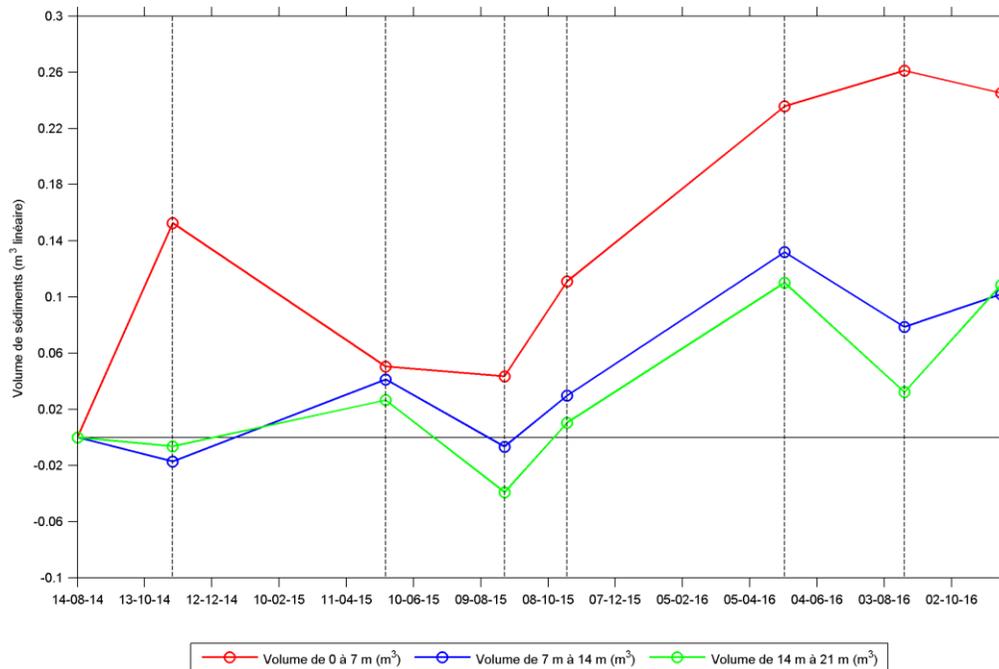


Figure 75. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 5.

Dès l'automne 2014, le premier tiers de la plage connaît une augmentation importante de 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 huit 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. Au 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 s'est vu revenir légèrement sous le niveau 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 moitié 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 et de recharge de plage devant. Cela montre aussi que la recharge sédimentaire est restée en place 2 ans après les travaux.

3.3.1.6 Profil 6 (naturel)

La figure 76 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 plus constante de 0,2 à 0,3 m d'élévation sur cette plage, ce qui démontre un caractère naturel de la plage et ses changements morphologiques saisonniers. 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.

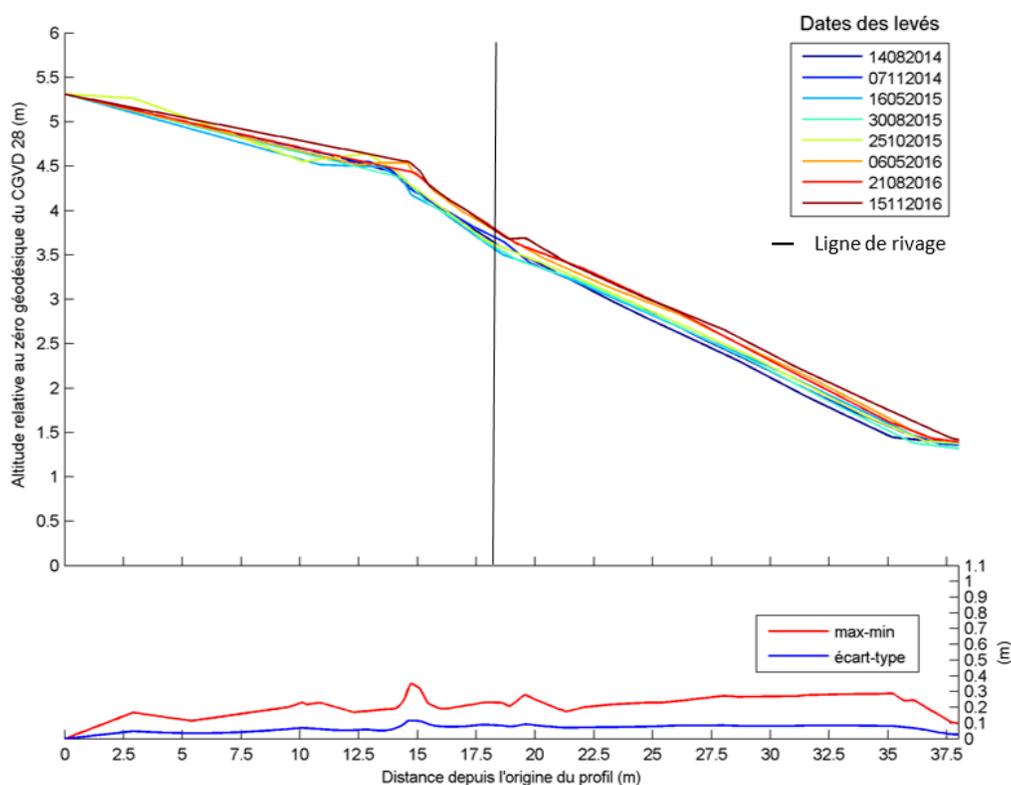


Figure 76. Évolution du profil topographique 6 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 77 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 18 à 38 m (20 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage dans le temps. 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.

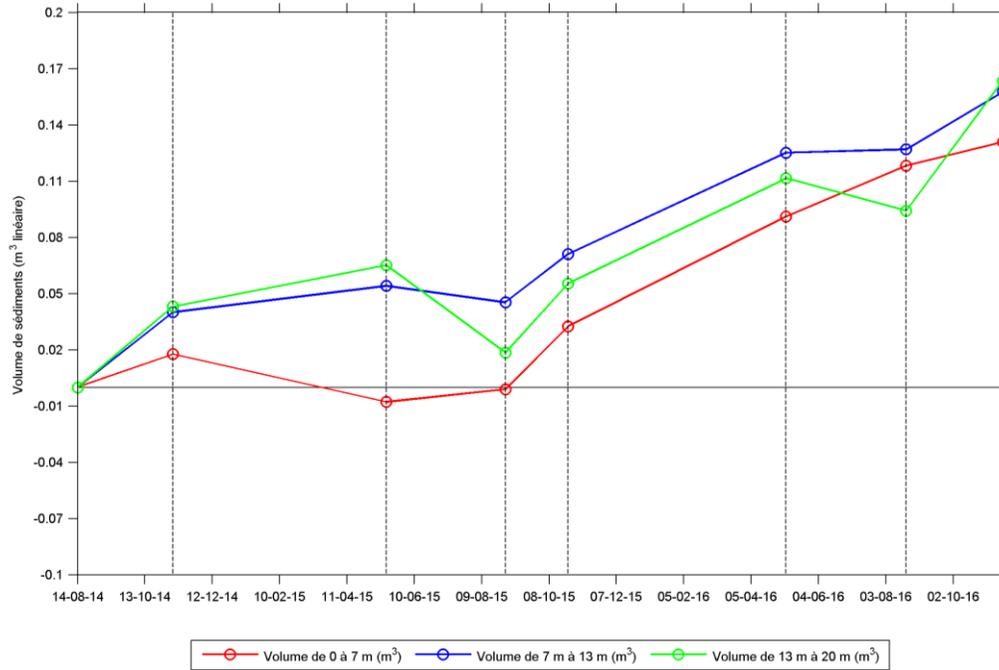


Figure 77. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 6.

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 été un peu plus élevé qu'à l'état initial, sauf dans les premiers mètres. À l'automne 2015, tout le profil gagne en élévation avec un gain entre 0,02 et 0,03 m³. Après le deuxième hiver, l'ensemble du profil gagne encore en volume sédimentaire de l'ordre de 0,05 m³ partout. À l'été 2016, le haut de la plage gagne encore du volume sédimentaire de l'ordre de 0,03 m³. La moitié de la plage s'est stabilisée tandis que le bas de la 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.

3.3.1.7 Profil 7 (artificialisé)

La figure 78 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.

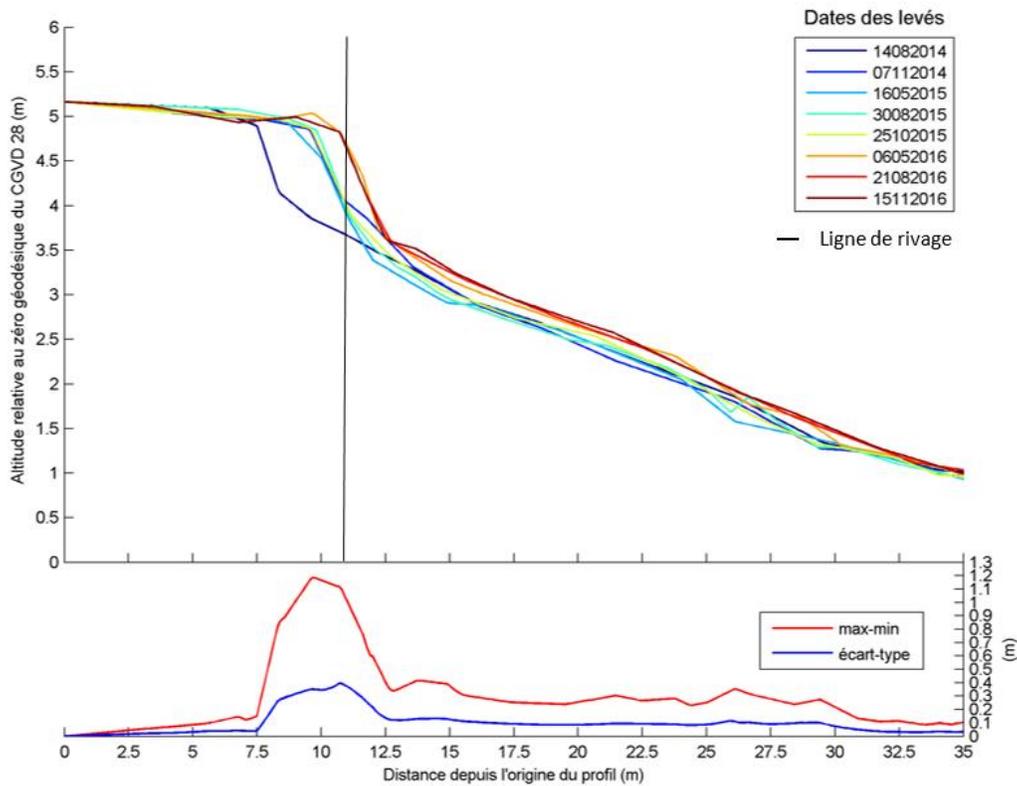


Figure 78. Évolution du profil topographique 7 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 79 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 11 à 35 m (24 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage dans le temps. 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.

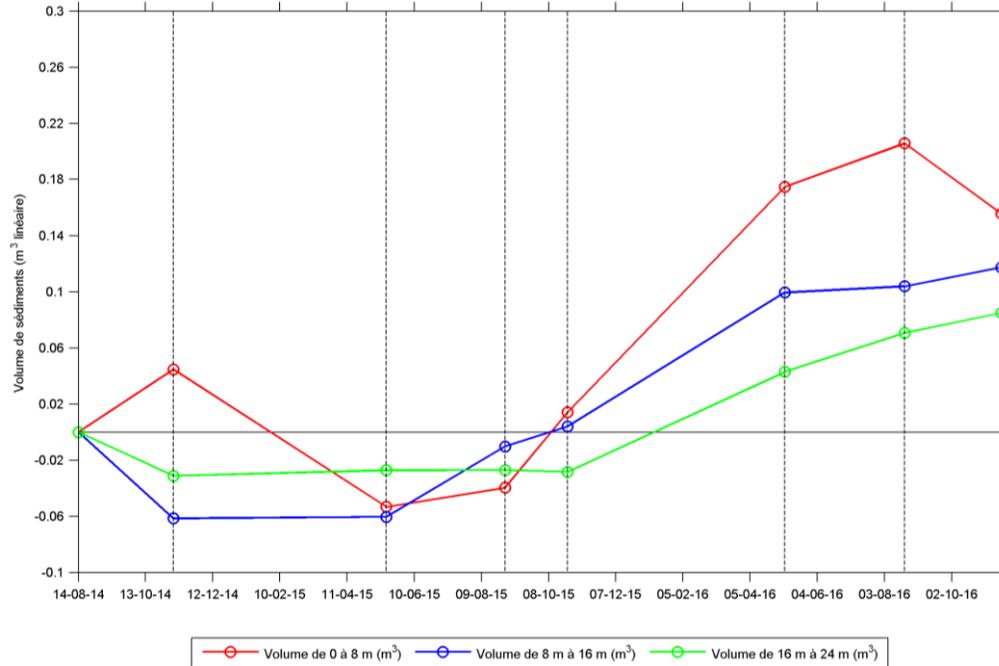


Figure 79. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 7.

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 étant toujours négatif par rapport à 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 haut de la plage, une stabilité sur la moitié de la plage et 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'enrochement. Par la suite, le profil a connu une baisse d'élévation qui s'est ensuite inversée à partir de 2016. Cette tendance à la hausse 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 côte basse rocheuse et les affleurements rocheux sont nombreux. Il se

peut que les sédiments qui migrent sur la côte soient pris au piège par moment 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 rocheux.

3.3.1.8 Profil 8 (artificialisé)

La figure 80 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'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 montre l'emprise de l'enrochement 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.

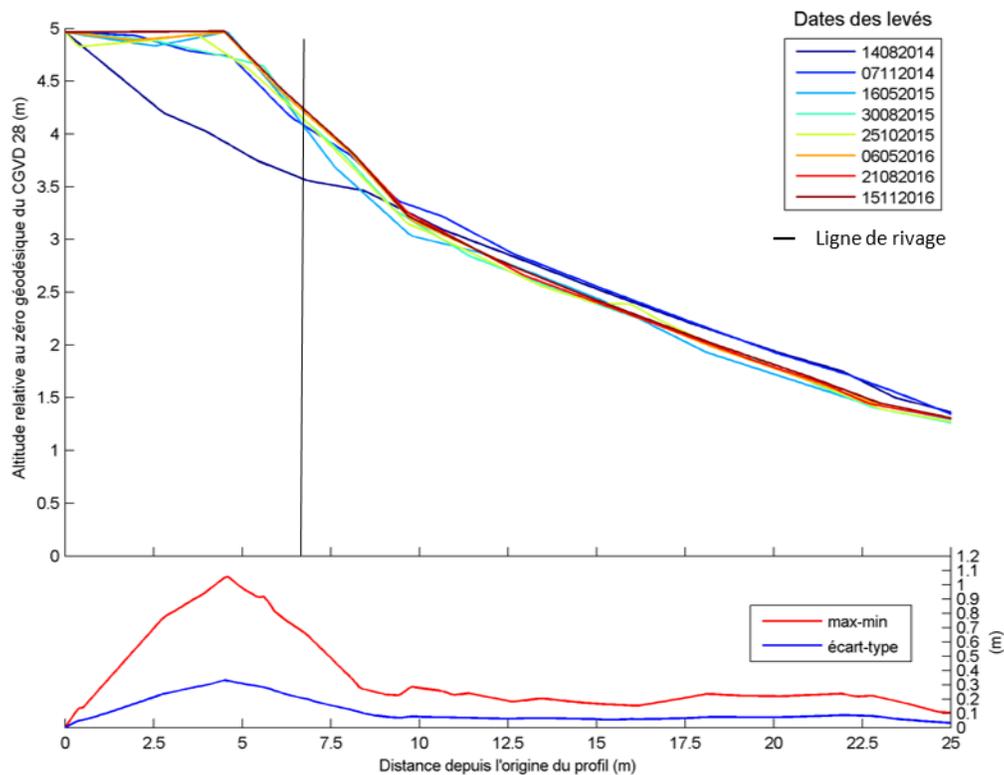


Figure 80. Évolution du profil topographique 8 depuis août 2014 jusqu'à novembre 2016, avec l'enveloppe maximum-minimum de l'altitude de la plage et son écart-type.

La figure 81 présente les volumes d'un mètre cube linéaire calculés sur l'étendue maximale de la plage, soit entre les distances 7 à 25 m (18 m de largeur). Cette zone a été divisée en trois sections égales pour évaluer l'évolution verticale de la plage 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 18 m) est en vert.

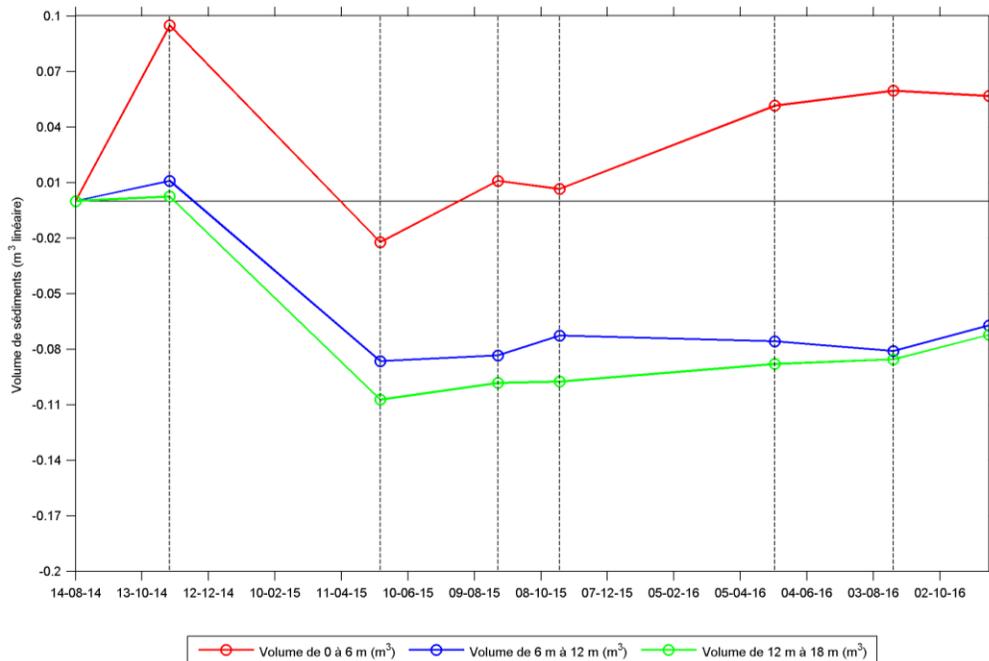


Figure 81. Évolution du volume de la plage en trois sections sur le profil 8.

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 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 le bas de plage semble gagner ce même volume. Le bas de plage est quant à lui demeuré au même chiffre. 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.

3.3.2 Évolution de la largeur de la plage

3.3.2.1 Profil 1 (artificialisé)

La figure 82 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.

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 enrochement. Ainsi, la ligne de rivage a reculée lors de la mise en place de l'enrochement. Il est important de mentionner qu'une partie des sédiments excavés lors de la mise en place des enrochements 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 qu'est le pied des nouvelles structures de défense et de la disparition du haut de plage. En mai 2015, la largeur de plage atteint 27,5 m. C'est le seul levé topographique qui montre un tel élargissement de la plage, probablement lié à la redistribution des sédiments de la recharge de plage faite lors des travaux pendant l'hiver. Par la suite, la flexure et la ligne de rivage se stabilisent et reviennent approximativement à la situation de l'état de référence. La plage montre aussi une résilience aux changements anthropiques apportés à la côte.

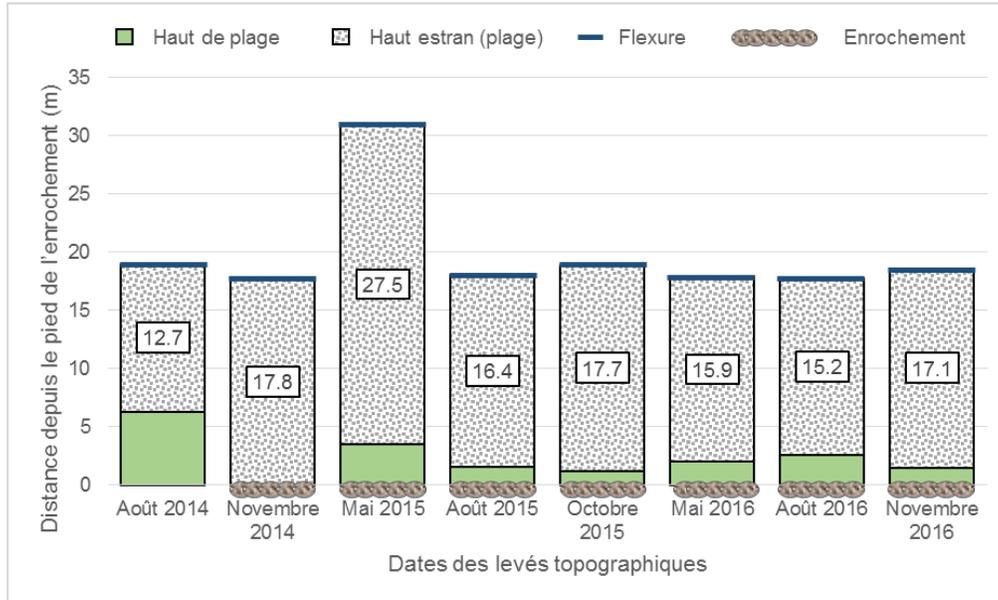


Figure 82. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure depuis le pied de l'enrochement pour le profil topographique 1.

3.3.2.2 Profil 2 (naturel)

La figure 83 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'en 2016, où elle recule d'environ 2,5 m en mai et novembre. À l'état initial, la plage était de 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, où elle atteint 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 agrandissement de la largeur 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 (figure 69) 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.

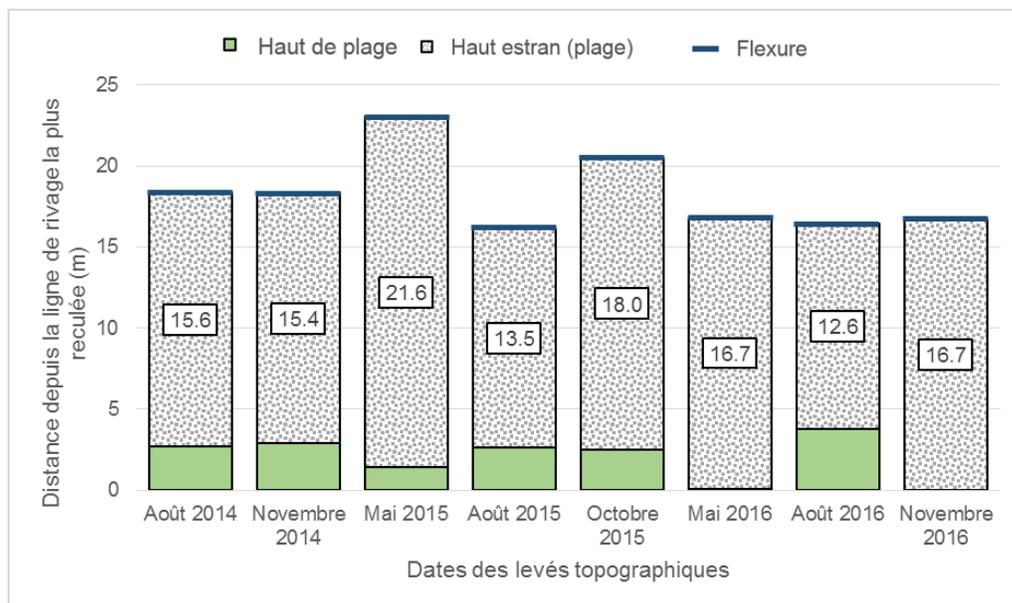


Figure 83. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 2.

3.3.2.3 Profil 3 (naturel)

La figure 84 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 est observé d'environ deux mètres. 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 et en croissance est présent sur ce profil.

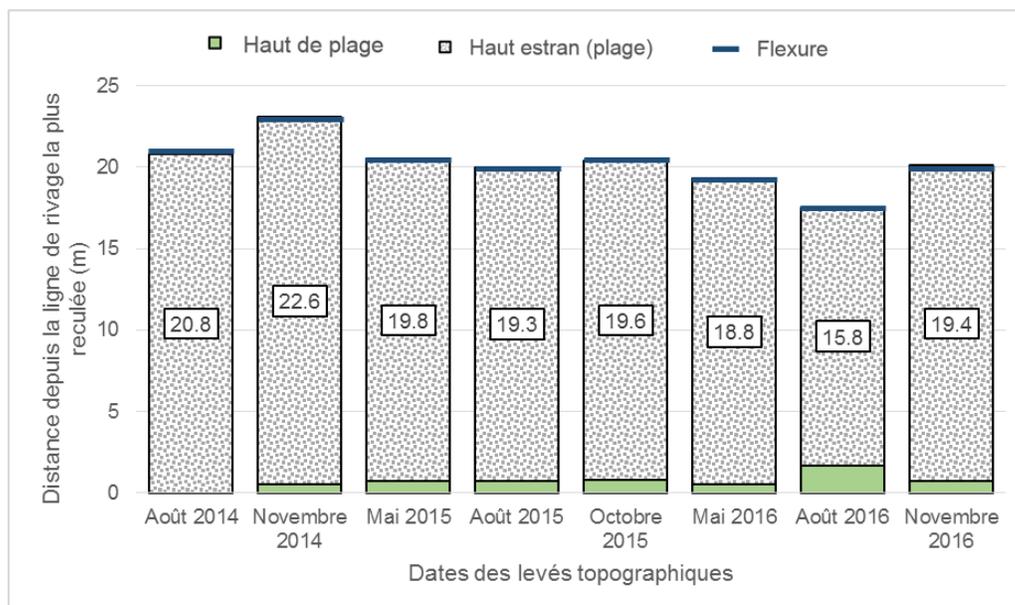


Figure 84. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 3.

3.3.2.4 Profil 4 (déjà artificiel)

La figure 85 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 73). 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.

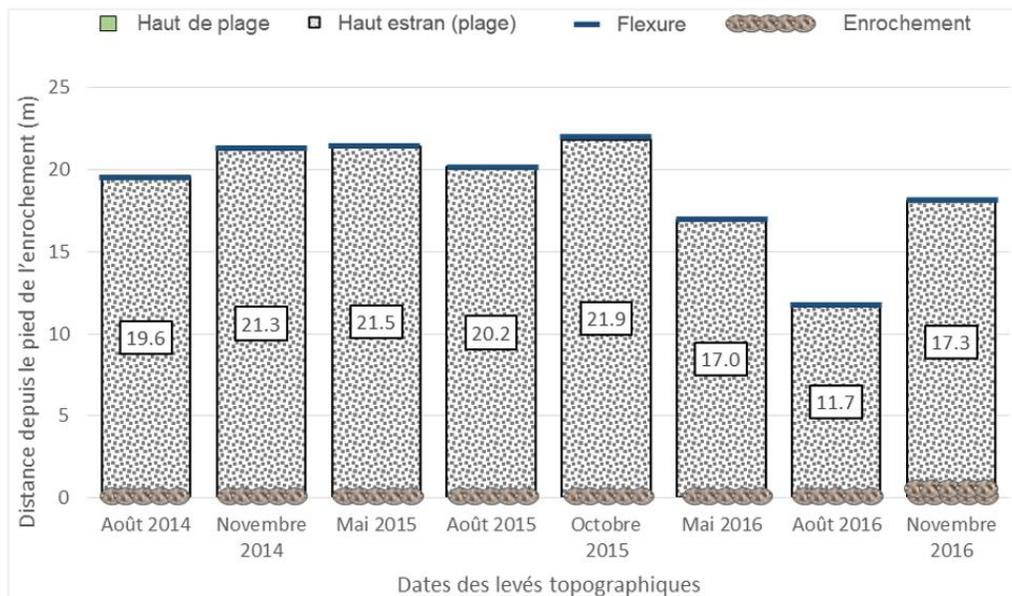


Figure 85. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 4.

3.3.2.5 Profil 5 (artificiel)

La figure 86 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 depuis 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 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 75). Ces changements morphologiques sont attribués à la mise en place des sédiments de la clé de l'ouvrage au pied de l'ouvrage lors de travaux de l'automne 2014 et de leur redistribution sur la plage et des secteurs adjacents. De plus, la variation apparente de la largeur de l'enrochement sur la figure s'explique par l'affouillement de la plage qui fait apparaître l'enrochement

(élargissement de l'enrochement) ou encore l'accumulation sur le pied de l'enrochement réduit sa largeur apparente.

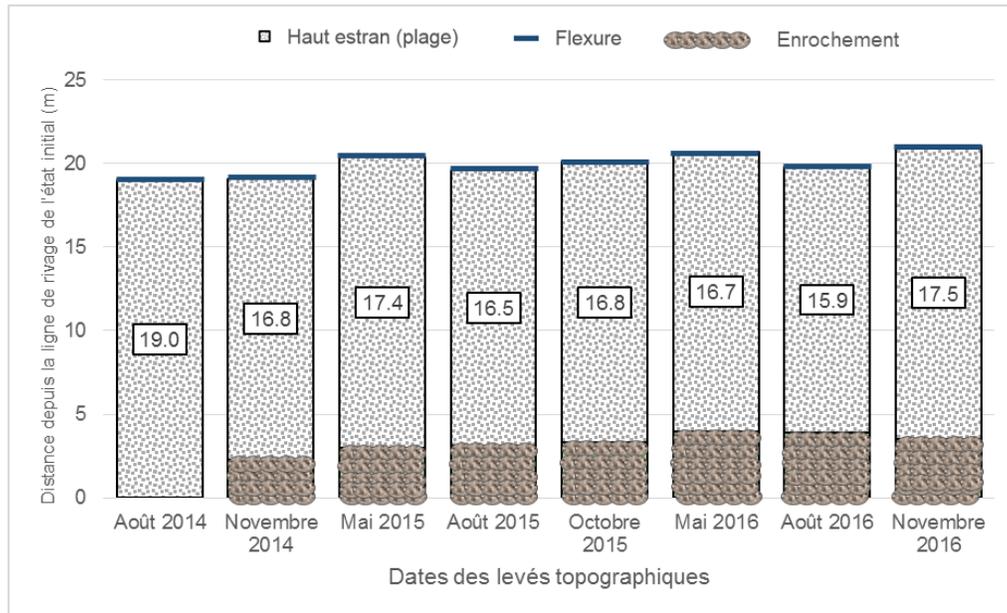


Figure 86. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 5.

3.3.2.6 Profil 6 (naturel)

La figure 87 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 était de 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 77). Autre fait intéressant est que 2015 est l'année durant laquelle la végétation du haut de plage était moins imposante, 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.

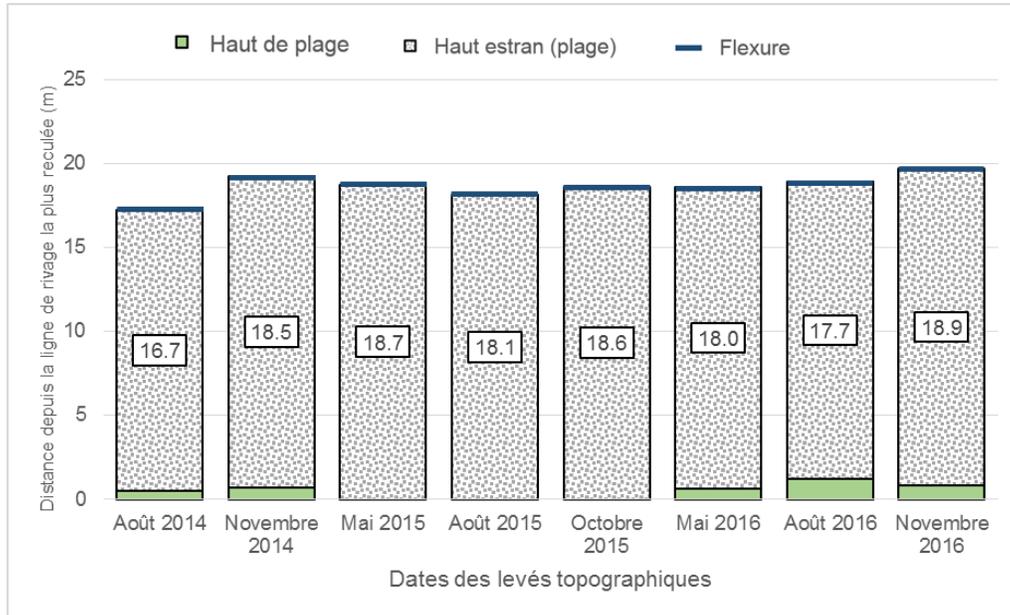


Figure 87. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 6.

3.3.2.7 Profil 7 (artificiel)

La figure 88 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'enrochement 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'enrochement. 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'enrochement 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 permettant à la faible couche sédimentaire de la recharge de plage de contribuer à l'élargissement du haut estran. En mai 2015, un nouvel 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 a soit été déplacée ailleurs sur les plages adjacentes, soit vers le haut du profil. Cette dernière hypothèse peut être vérifiée par le gain altitudinal continu et grandissant 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.

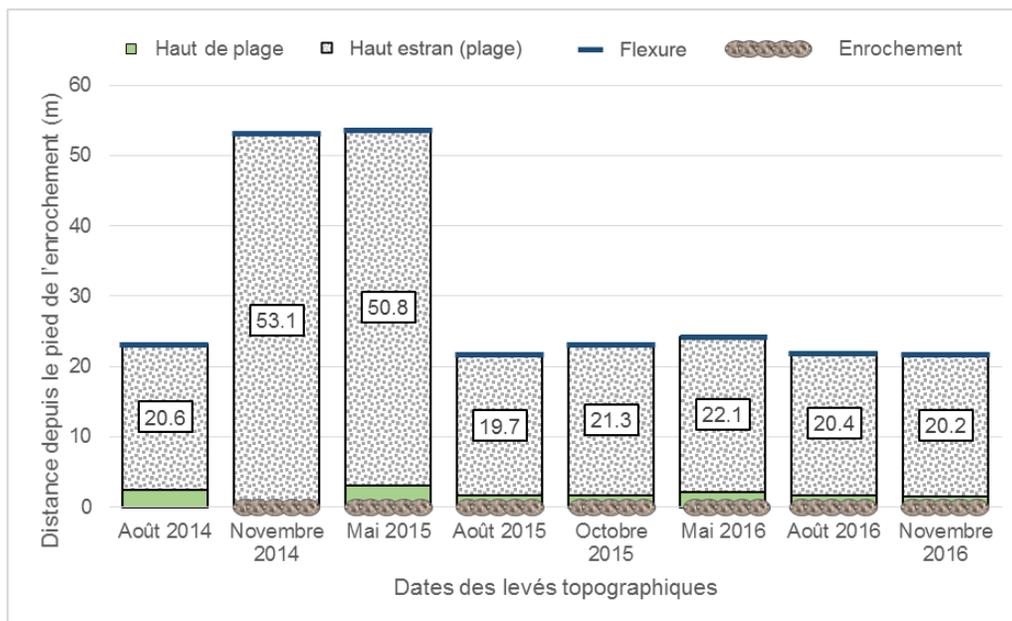


Figure 88. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 7.

3.3.2.8 Profil 8 (artificiel)

La figure 89 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 ligne de rivage fut avancée 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. L'accumulation sur le pied de l'enrochement en août 2015 réduit sa largeur apparente. 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, la plage a eu une période d'adaptation, après les travaux, qui s'est faite remarquer jusqu'à

près d'un an après ceux-ci. Par la suite, la plage s'est stabilisée pour revenir à une flexure au même point qu'à l'état de référence. Cependant, l'altitude du milieu et du bas de la plage est plus faible 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.

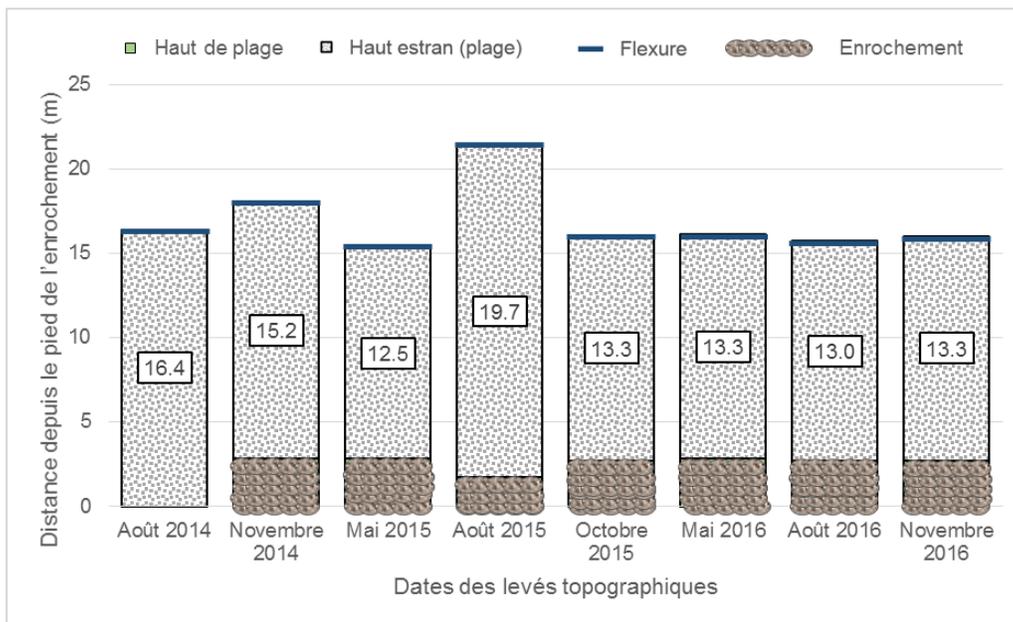


Figure 89. Évolution de la largeur de plage, du positionnement de la ligne de rivage et de la flexure pour le profil topographique 8.

3.3.3 Synthèse

La mise en place des enrochements lors des travaux à l'automne 2014 a engendré certaines conséquences sur la morphologie des plages à l'étude sur l'île. Les huit profils topographiques suivis ont permis de constater des changements parfois importants dans l'altitude et la position des limites de la plage pendant les trois années du projet.

Les profils naturels du côté sud ont permis de constater des variations saisonnières au niveau de la topographie et du positionnement de la flexure, entre autre. 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. Néanmoins, la morphologie de la plage est restée relativement similaire durant les trois années. Du côté 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.

Les profils artificiels ont tous eu un empiètement variable de plusieurs mètres sur le haut de plage. La recharge de plage faite au pied des structures de protection a permis à l'ensemble des profils de bénéficier d'une augmentation du volume de la plage et d'une largeur plus importante. Ces gains ont majoritairement été conservés sur les profils suivis, sauf pour le profil 8 où les pertes sédimentaires et volumiques sont inquiétantes. C'est d'ailleurs ce profil qui enregistre les largeurs de plage les plus petites.

En somme, il semble que les enrochements jumelés à une recharge de plage ont permis, du moins à court terme, d'engraisser la plage et de protéger la côte de l'érosion.

3.4 Résultats de l'évolution volumique

3.4.1 Côté sud

La figure 90 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).

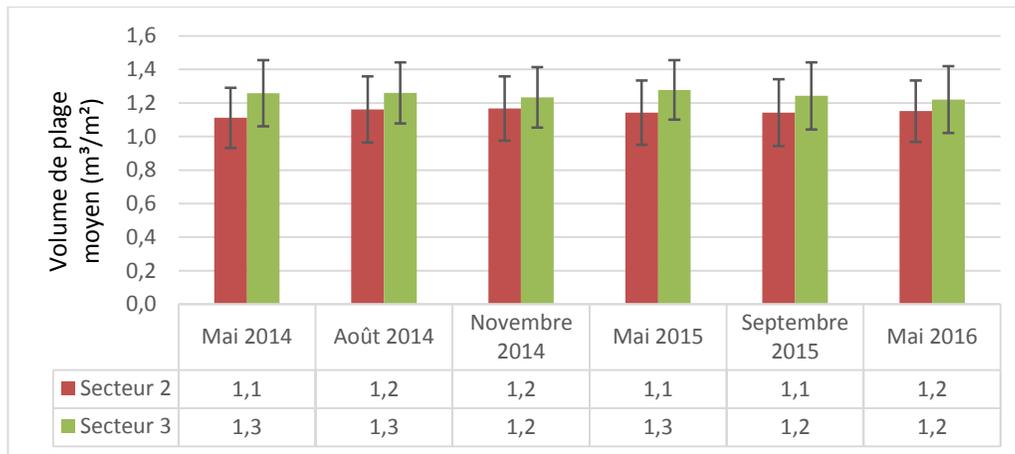


Figure 90. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côté sud.

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 m^3/m^2 . Au secteur 3, la tendance est similaire avec quelques pertes de volume moyen de l'ordre de 0,1 m^3/m^2 en moyenne par polygone de plage aux 3^e, 5^e et 6^e levés.

La figure 91 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).

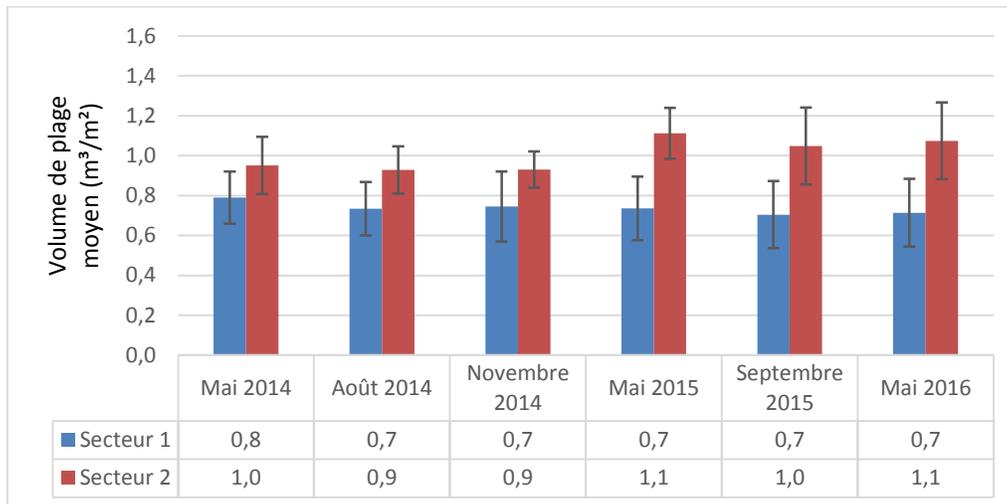


Figure 91. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles ayant fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côté sud.

Au secteur 1, la moyenne du volume de ces polygones de plages du mois de mai 2014 est de $0,8 m^3/m^2$ alors qu'elle est un peu plus faible pour août 2014 avec $0,7 m^3/m^2$. 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 conséquent qu'il y a un an au printemps 2014, présentant $0,1 m^3/m^2$ 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 $0,1 m^3/m^2$. Un cycle saisonnier est visible aussi sur ce secteur alors que le mois de mai est plus volumineux que les saisons estivale ou automnale. 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 $0,2 m^3/m^2$ 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. 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 $0,1 m^3/m^2$ a été calculée alors qu'au printemps 2016, le volume moyen est de nouveau évalué à $1,1 m^3/m^2$. En somme, il semble que les ouvrages de protection mis en place à l'automne 2014 ont eu des impacts négatifs mitigés 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 du côté sud.

La figure 92 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 du côté sud de l'île.

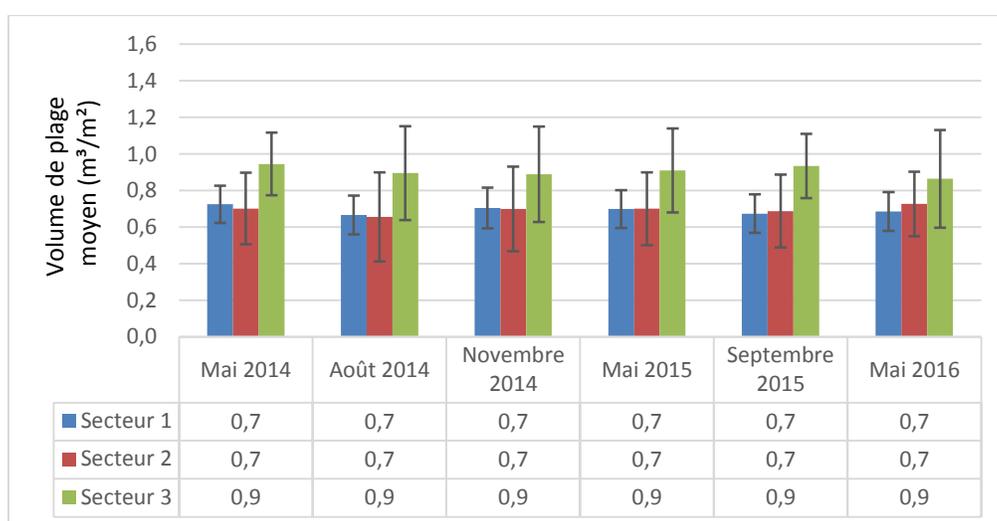


Figure 92. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages déjà artificielles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côté sud.

Au secteur 1 (980 m), la moyenne des volumes de plage est de $0,7 m^3/m^2$ 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 $0,7 m^3/m^2$. Au secteur 3 (1 000 m), le volume moyen est plus élevé mais tout aussi stable avec $0,9 m^3/m^2$. 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 93 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.

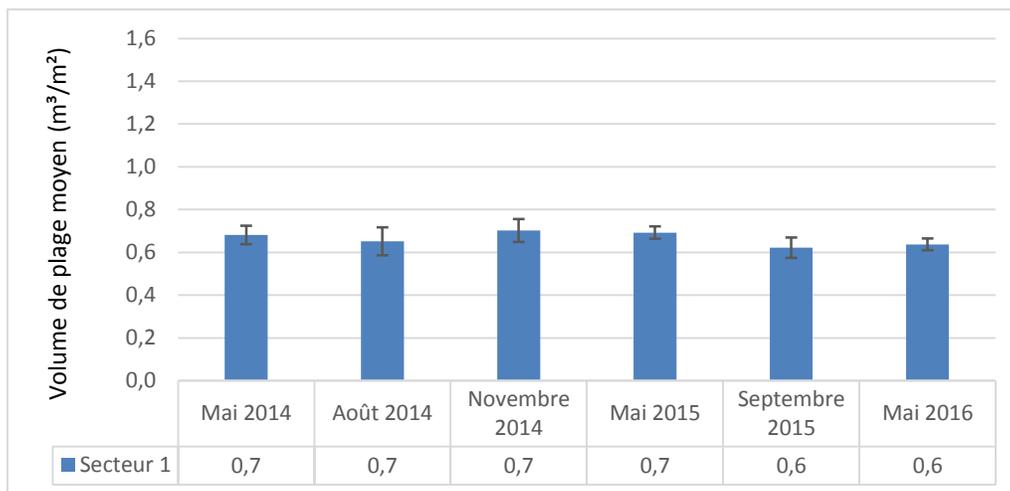


Figure 93. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages artificielles ayant fait l'objet de réflexion lors des travaux de l'automne 2014, côté sud.

L'état initial montre qu'en moyenne, le volume de plage par polygone était de $0,7 m^3/m^2$. À la suite des travaux, le volume reste identique jusqu'à l'été 2015 où le volume de plage diminue de $0,1 m^3/m^2$. 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 du côté 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 du côté sud de l'île.

3.4.2 Côté nord-est

La figure 94 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).

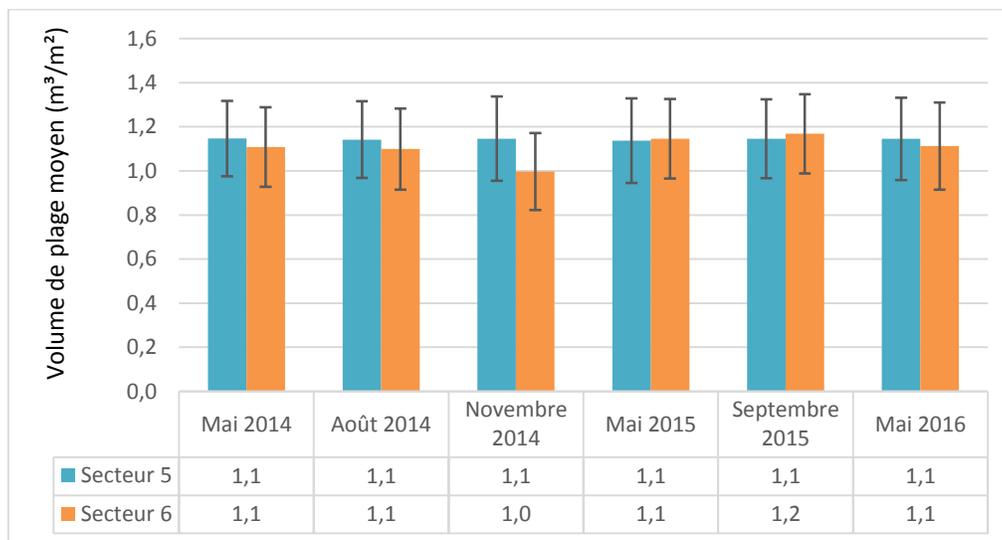


Figure 94. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.

Au secteur 5, les volumes de plages sont demeurés stables à $1,1 m^3/m^2$ sur l'ensemble du suivi.

Au secteur 6, le volume moyen a connu de légères variations. À l'état initial, le volume moyen des plages a été estimé à $1,1 m^3/m^2$. Ce chiffre a diminué de $0,1 m^3/m^2$ à l'automne 2014 mais était à nouveau à $1,1 m^3/m^2$ au printemps 2015 et 2016. Septembre 2015 est le levé où le volume de plage a été le plus important avec $1,2 m^3/m^2$. 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 2). 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 95 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).

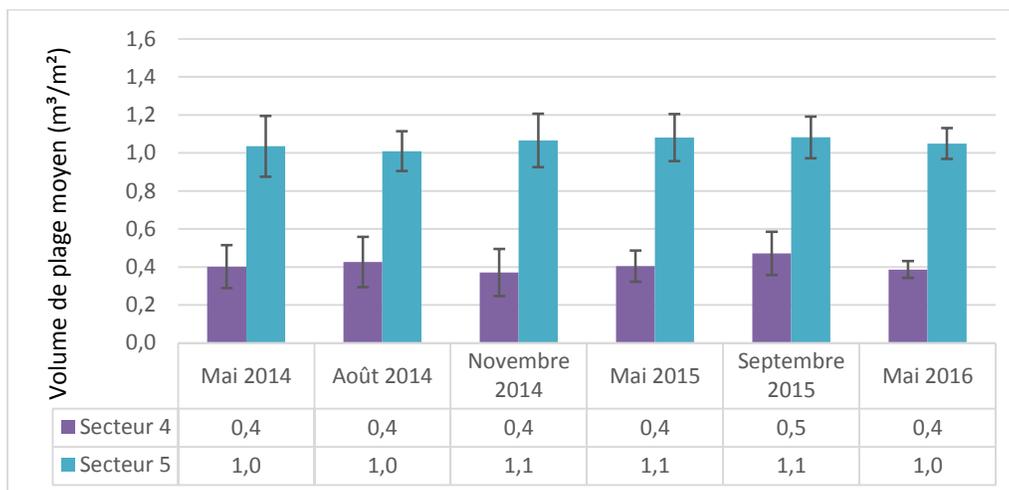


Figure 95. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages naturelles ayant fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.

Le premier constat est que les plages du secteur 4 sont beaucoup moins volumineuses avec 0,4 à 0,5 m^3/m^2 que les plages du secteur 5 ayant 1,0 à 1,1 m^3/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 m^3/m^2 . Un volume légèrement supérieur est observable à partir de mai 2015. C'est en septembre 2015 que le volume moyen des plages est le plus élevé avec 0,5 m^3/m^2 . L'année suivante, en mai 2016, environ 0,1 m^3/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 m^3/m^2 pour mai et août 2014. L'évolution volumique a été positive sur l'ensemble du levé avec un gain de 0,1 m^3/m^2 à partir de novembre 2014. 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 75.

La figure 96 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.

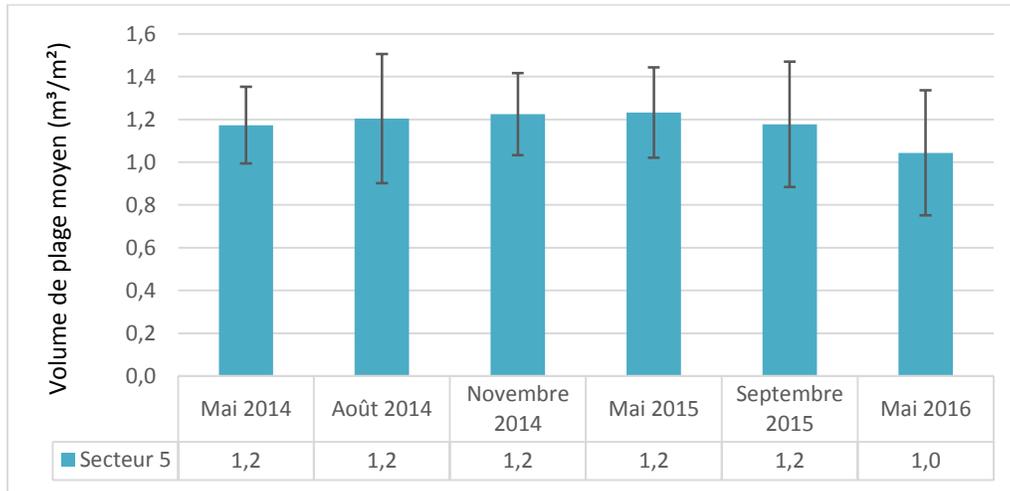


Figure 96. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages déjà artificielles n'ayant pas fait l'objet de travaux à l'automne 2014, côte nord-est.

Lors de l'état de référence en mai et août 2014, le volume moyen était de $1,2 m^3/m^2$. 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 $1,0 m^3/m^2$. 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 97 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.

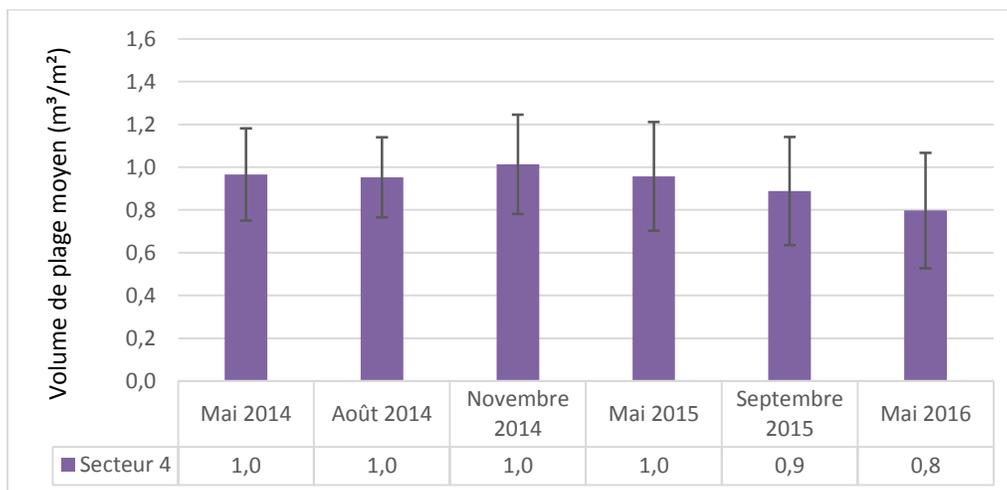


Figure 97. Évolution du volume de plage moyen (m^3/m^2) par polygone des plages artificielles ayant fait l'objet de réfection lors des travaux de l'automne 2014, côte nord-est.

Elles avaient en moyenne un volume de plage de $1,0 m^3/m^2$ 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 $0,8 m^3/m^2$ 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.

3.4.3 Synthèse

Tout d'abord, 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. Du côté 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.

3.4.3.1 Côté sud

La figure 98 montre les différences cumulées des volumes de plages du côté sud pour les trois secteurs. Pour cette synthèse, les volumes sont présentés en

m³ 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 27, 28 et 29).

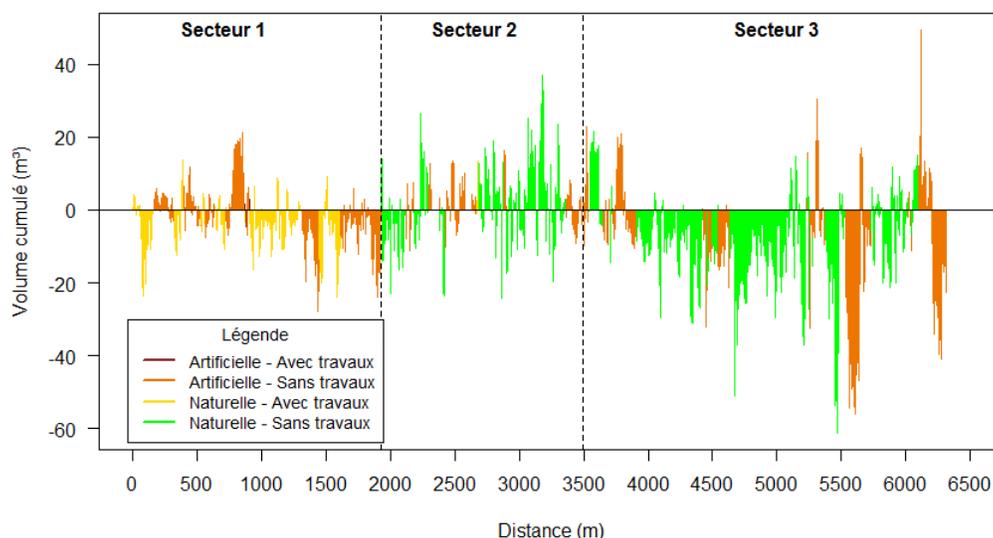


Figure 98. Différences cumulées des volumes (m³) des plages du côté sud.

Il est possible de voir que, sur le secteur 1, l'évolution volumique est globalement négative devant ces berges artificialisées. Le volume des plages où un ouvrage était déjà présent s'est accru dans l'ensemble de la première moitié et de manière importante autour de 800 m, où des gains jusqu'à 20 m³ par polygone ont été enregistrés au terme du suivi. La deuxième moitié du secteur est presque entièrement négative sur l'ensemble du suivi, peu importe si les enrochements sont nouveaux ou non. Globalement, les berges qui étaient naturelles et qui ont été enrochées ont en grande majorité connue 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 (chemin de la Traverse), les plages ont, dans l'ensemble, connu une accumulation sédimentaire. Les variations volumiques vont de - 25 m³ à 40 m³ pour ce secteur, ce qui indique une grande variabilité, peu importe l'état de la côte. Au secteur 3, les premiers 350 m semblent expérimenter la même tendance en gain sédimentaire qu'au secteur 2. Cependant, le reste du secteur éprouve 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 exposés pour quelques polygones vers la fin du secteur avec près de 50 m³.

En moyenne, les plages du côté 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 fetchs mais aussi les plus enrochés du côté sud. 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 infralittoral et des herbiers à spartine.

Sur la figure 99, 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 et le secteur 3 a perdu 4 859 m³. En somme, c'est 5 624 m³ de sédiments qui ont été perdus entre mai 2014 et mai 2016.

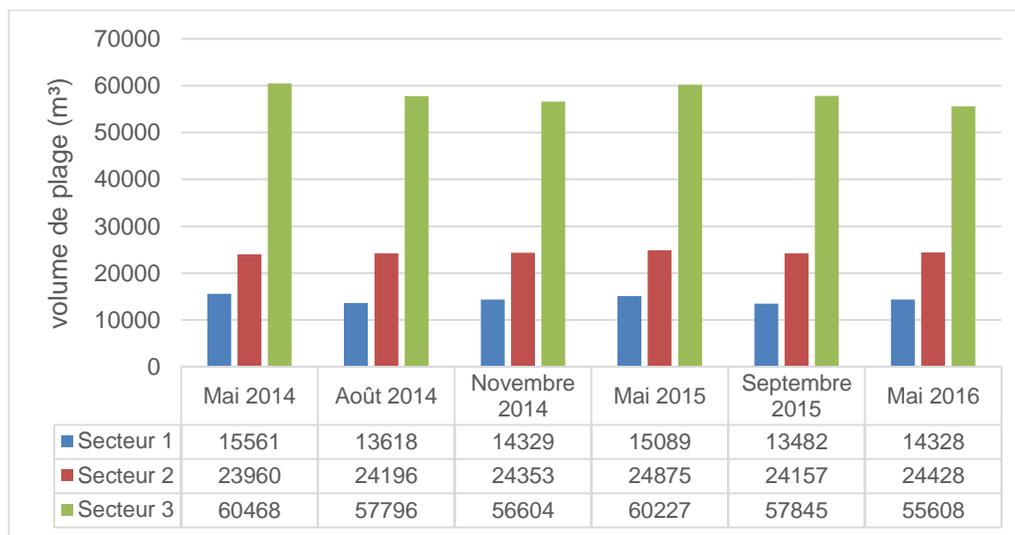


Figure 99. Évolution du volume de plage total (m³) par secteur entre mai 2014 et mai 2016 pour le côté sud. À noter que sur les levés du printemps et l'été 2014, 39 et 9 polygones respectivement étaient manquants de par des imprévus techniques sur le terrain. Leur volume a été estimé grâce à d'autres levés et ajouté dans les secteurs respectifs.

Le tableau 40 montre le changement de volume sédimentaire entre les levés saisonniers pour chaque secteur. Sur l'ensemble de la côte, 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 à chaque année.

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

3.4.3.2 Côté nord-est

La figure 100 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 en annexe les cartes de chacun des secteurs (annexe 30).

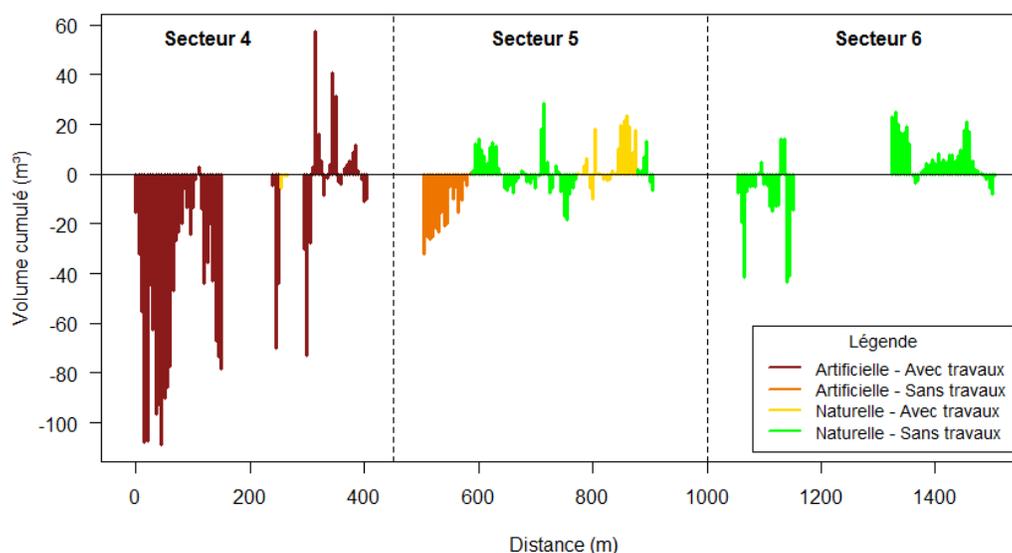


Figure 100. Différences cumulées des volumes (m³) des plages du côté nord-est.

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 toute 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 101 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 de sédiments, le secteur 5 en a perdu beaucoup moins avec 91 m³ et le secteur 6 en a gagné 39 m³.

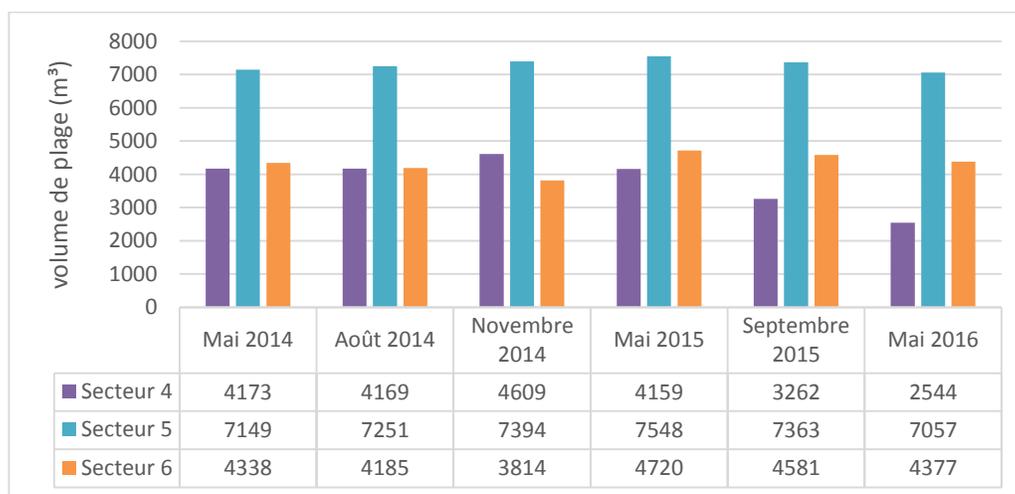


Figure 101. Évolution du volume de plage total (m³) par secteur entre mai 2014 et septembre 2015 pour le côté sud.

Le tableau 41 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 41. Pourcentage de volume gagné ou perdu comparativement à celui du levé précédent, côté 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 %

3.5 Synthèse globale de l'évolution morphosédimentaire

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 (voir section 6.4). 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. Sur les profils naturels au sud, le niveau d'eau n'a pas atteint la base de la microfalaise sur le profil 2 tandis qu'il a dépassé la berme du haut de plage sur le profil 3. Cependant, les niveaux d'eau ont été plus bas et le nombre d'heures moindre comparativement aux profils 4 et 5.

En somme, 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. Les profils naturels (2 et 3) au sud de l'île sont témoins de vagues moins puissantes en raison de la morphologie de la plateforme rocheuse, plus grande sur le secteur central du côté sud de l'île, ce qui explique la stabilité générale des résultats morphosédimentaires obtenus durant le suivi. C'est au profil 4 que l'on observe les vagues les plus importantes dû à la direction des vagues provenant du nord-est et du sud et de la longueur moins étendue de la plateforme rocheuse. La moyenne de hauteur de vagues significative est plus élevée sur ce profil qu'ailleurs au sud de l'île (tableau 58). Il est alors évident que l'intensité des vagues dans ce secteur du côté 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 morphosédimentaire remarquable dans la forme de la plage et la granulométrie. Cependant, ces modifications se traduisent par un réajustement du profil pour le moment mais peuvent 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 marées 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.

4. ÉVOLUTION DES HERBIERS DE SPARTINE ALTERNIFLORE

Cette section présente les résultats du comportement morphométrique des herbiers à spartine alterniflore entre 2014 et 2016.

4.1 Présentation de la méthode utilisée

En premier lieu, les méthodes de récolte des données brutes de terrains et de traitement utilisés pour l'état initial ont été répétées pour les herbiers cartographiés 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 102).

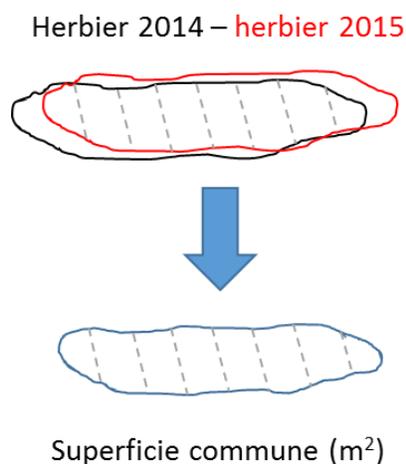


Figure 102. Croquis de l'utilisation de l'outil *intersect*.

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 se 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. Cela dit, 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 la hauteur moyenne des herbiers.

4.2 Résultats et interprétation

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 31 et entre 2015 et 2016 à l'annexe 32.

4.2.1 Zone 1

La figure 103 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 146 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 214 m² de gains. Les enrochements n'ont pas eu d'impacts négatifs sur la croissance de ces plantes halophiles durant le suivi.

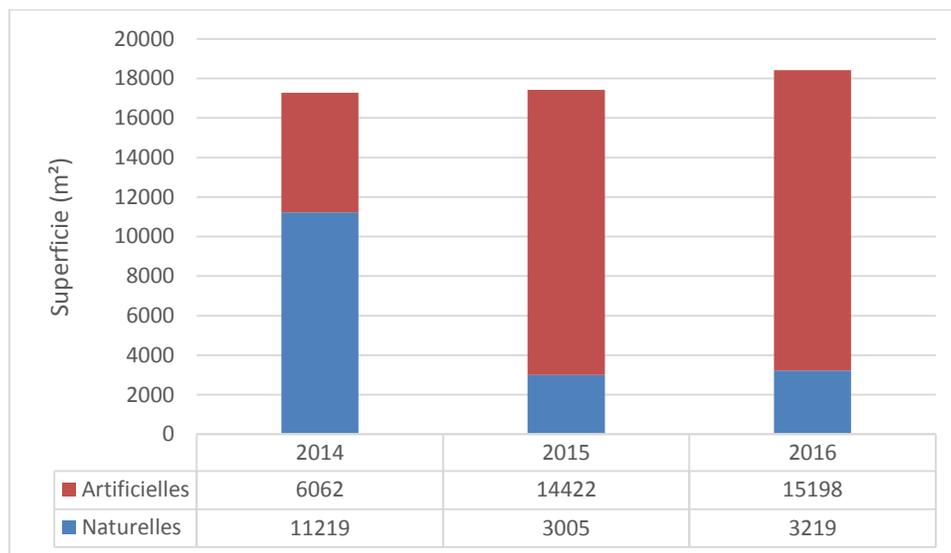


Figure 103. Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 1.

La figure 104 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 en % 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.

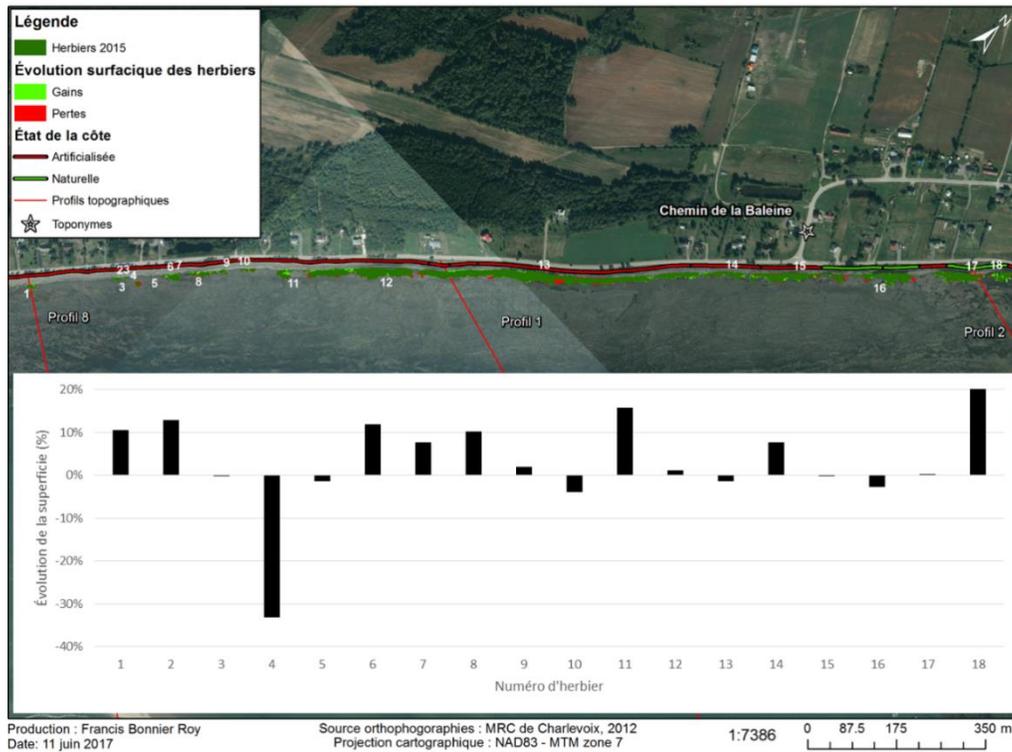


Figure 104. Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 1.

La figure 105 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 tailles, comme celles observées entre les herbiers 1 à 10. L'herbier 7 est le seul à avoir eu une baisse importante de sa superficie, passant 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 de spartine alterniflore en avant des ouvrages de ce secteur ne semblent pas être dérangés depuis l'implantation des ouvrages à l'automne 2014.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

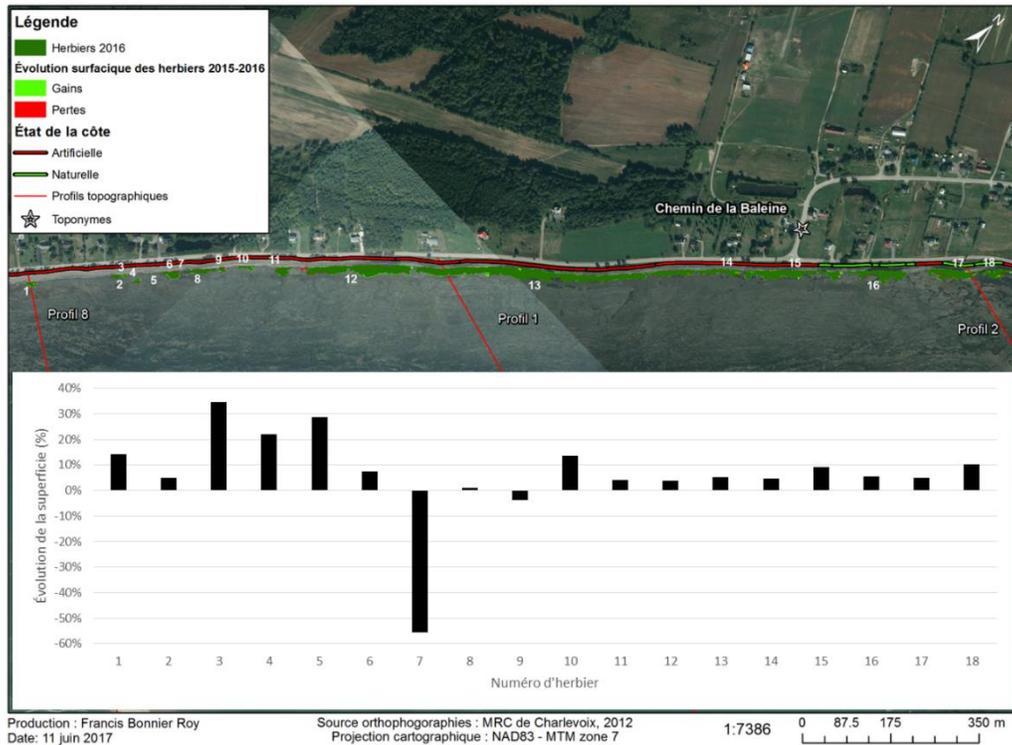


Figure 105. Évolution de la superficie des herbiers entre 2015 et 2016 sur la zone 1.

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 42). La seconde direction à être la plus fréquente pour le déplacement de l'herbier est vers le sud-ouest à 28 % des herbiers de la zone à 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 42. 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 43). 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 % a été décelée par rapport à l'année précédente de 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 43. 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 44). 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 44. Hauteur moyenne des herbiers de spartine alterniflore de la zone 1 en août 2014, 2015 et 2016.

Dates	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 affecté en 2015 alors que les herbiers de la zone 1 dont le recouvrement s'élevait à 75 % et plus sont passés de 56 % à 39 % en un an (tableau 45). Il y eut un gain sur les deux catégories inférieures de 11 % (recouvrement de 25 à 50%) et 5 % (recouvrement de 50 à 75%). Par la suite, en 2016, un retour à un état similaire à celui de 2014 est atteint.

Tableau 45. Proportion d'herbiers de 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 %

4.2.2 Zone 2

La figure 106 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.

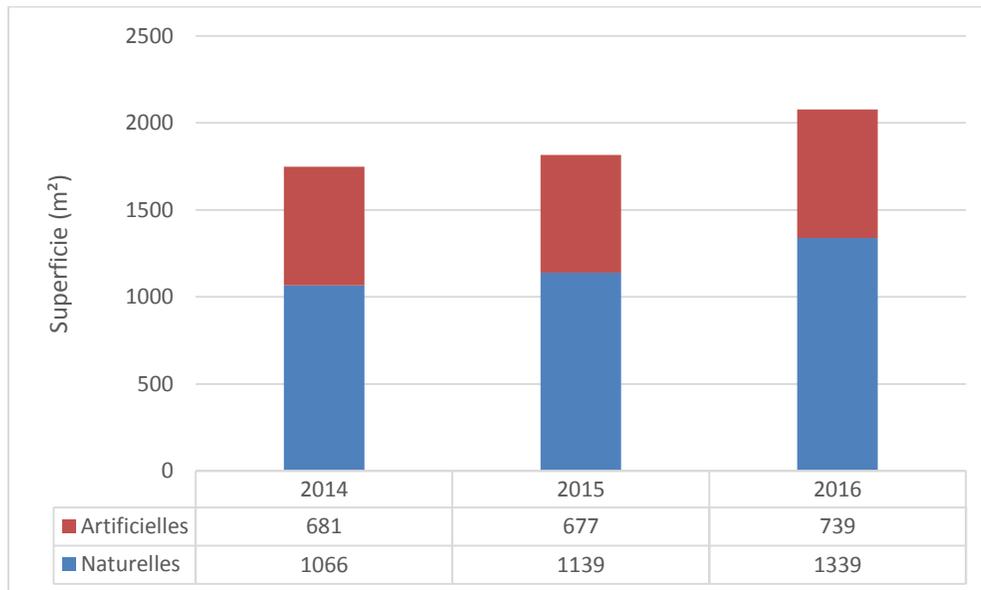


Figure 106. Superficie des herbiers devant les côtes naturelles et artificielles entre 2014 et 2016 sur la zone 2.

La figure 107 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.

SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES



Figure 107. Évolution de la superficie des herbiers entre 2014 et 2015 sur la zone 2.

La figure 108 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, passant de 11 m² à 21 m². Les plus gros herbiers ont eu des augmentations plutôt modestes entre 10 et 18 %. 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 108. 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 46). 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 46. 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-est-ouest	27 %	0,2
Sud-est	-	-
Sud-ouest	36 %	0,4

Le tableau 47 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 47. 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-est-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 48). 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 48. Hauteur moyenne des herbiers de 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 49). 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 49. Proportion d'herbiers de 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 %

4.3 Synthèse

Une grande variabilité est observée d'année en année par rapport à la moyenne des hauteurs des plants et aux pourcentages de recouvrement. Ces caractéristiques ne semblent pas refléter la superficie des herbiers car un écart de 273 m² entre 2014 et 2016 est observable pour la zone 2 alors que leurs caractéristiques étaient similaires. Une situation similaire est remarquable à la zone 1 alors qu'un gain de 1136 m² a été enregistré entre 2014 et 2016.

Ainsi, la mise en place des enrochements ne semblent pas avoir d'impacts négatifs indirects sur la croissance des herbiers à spartine alterniflore des secteurs à l'étude du côté 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. Ainsi, le centre de masse de l'herbier se déplace et a été calculé. 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 des vagues à la côte.

5. IDENTIFICATION DES SOURCES SÉDIMENTAIRES QUI ALIMENTENT LES PLAGES

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, dans ce chapitre, 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.

5.1 Préparation des échantillons pour les analyses minéralogiques

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 du côté 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 infralittoral, 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 affleurement 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). La figure 109 présente l'ensemble des échantillons de sédiments et d'échantillons de roc utilisé pour cette analyse minérale. La liste complète des échantillons présentant leur date de récolte sur le terrain et leur position se trouve en annexe 34.

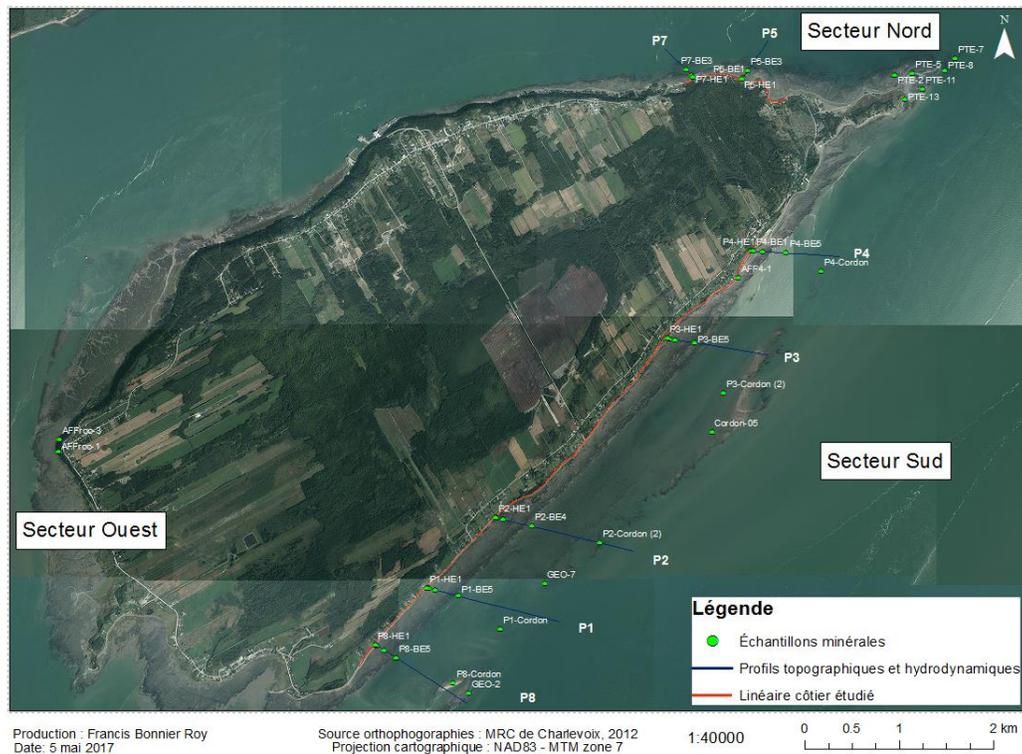


Figure 109. Emplacement des échantillons utilisés pour les analyses minérales.

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) concentré 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*. Pour plus d'information sur le fonctionnement de cet instrument, voir l'article de Casse et al. (2017). 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. 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.

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).

5.2 Résultats des analyses minérales

La figure 110 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).

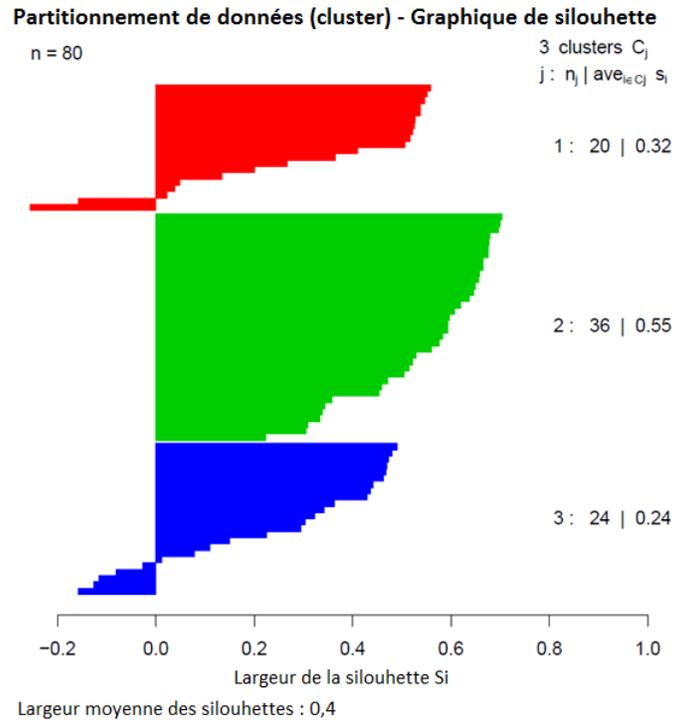


Figure 110. Silhouette des groupes d'échantillons en fonction de la composition minéralogique.

Deux échantillons dans le premier regroupement et cinq dans le troisième regroupement ont une silhouette négative (figure 110). Cela indique que ces échantillons ont une composition légèrement différente que celle des échantillons de ces groupes. Si le nombre de regroupement avait été doublé à 6, ils auraient fait partis 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.

Ensuite, il faut déterminer quels étaient les minéraux les plus significatifs statistiquement pour discriminer les échantillons entre eux. La figure 111 présente les relations entre 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.

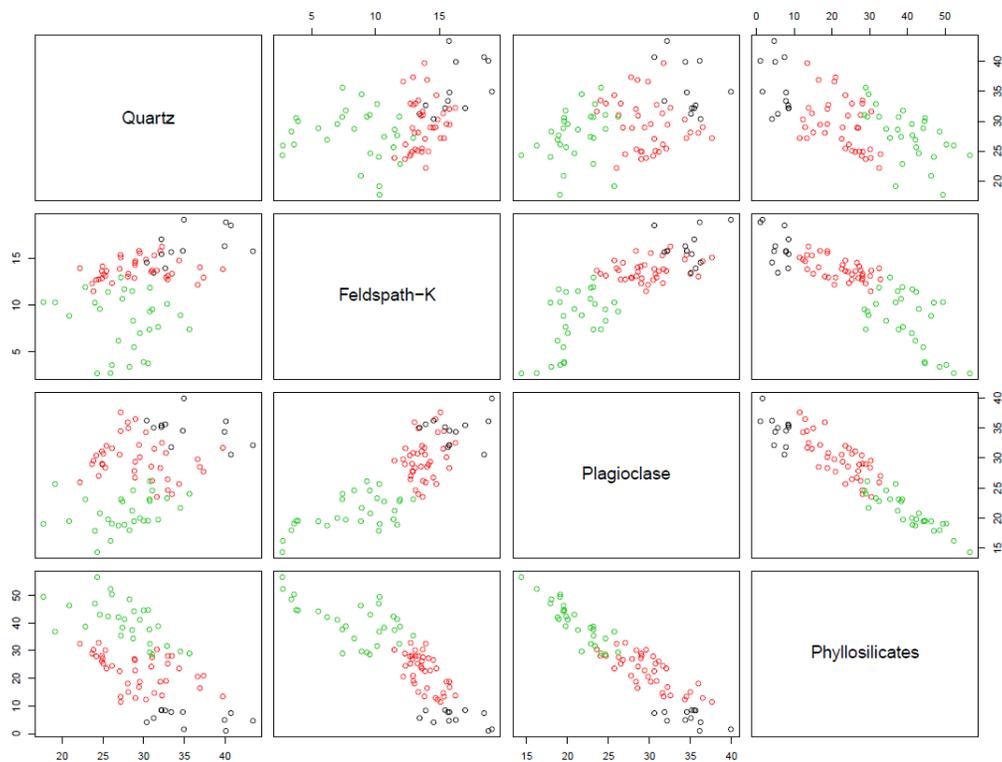


Figure 111. Graphique montrant la relation entre les concentrations (%) de quartz, de feldspath potassique, de plagioclase et de phyllosilicate pour les différents clusters. Cercle noir (cluster 1), cercle rouge (cluster 2) et cercle vert (cluster 3).

À la figure 112, 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.

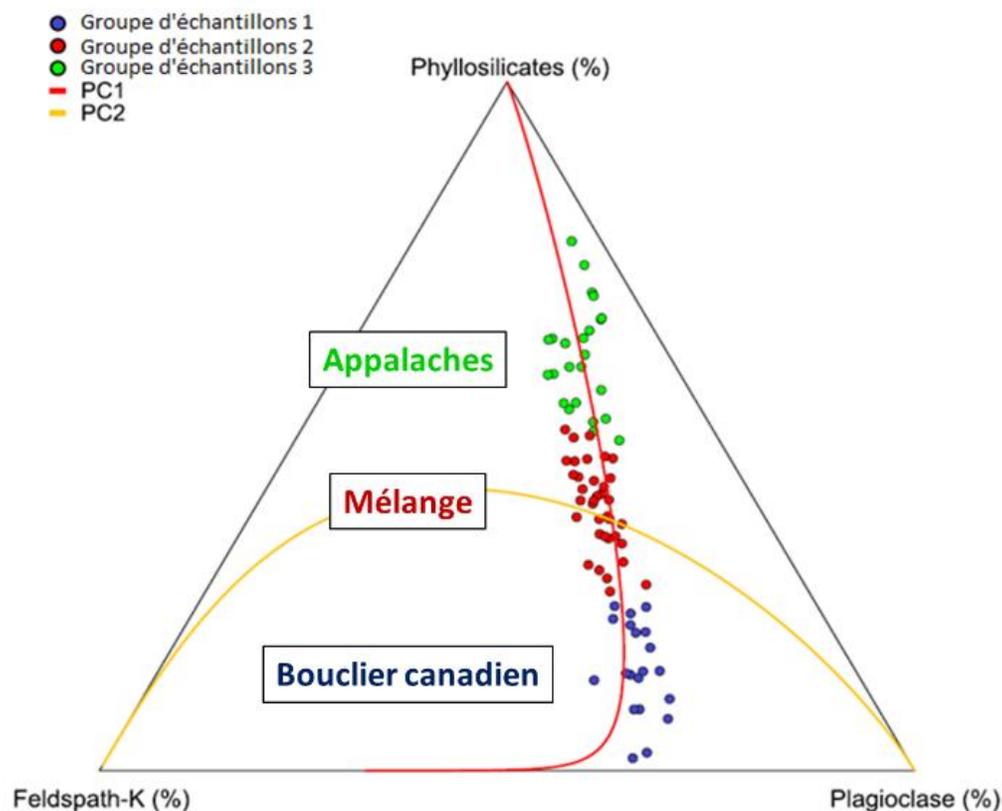


Figure 112. Diagramme ternaire des groupes d'échantillons en fonction des minéraux choisis pour discriminer leur origine sédimentaire. Les courbes correspondent aux analyses en composante principale des trois concentrations de minéraux (phyllosilicates, feldspath-K et plagioclase).

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 50). Les échantillons du cordon ont une concordance quasi parfaite avec les échantillons des rivières du Bouclier canadien alors que les échantillons du bas estran, sur la plateforme rocheuse et à la pointe Est sont identiques en termes de minéralogie aux sédiments de rivières des Appalaches.

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 grâce à la comparaison des résultats de l'analyse minérale.

Tableau 50. 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

Selon Casse et al. (2017), un échantillon qui a un ratio de phyllosilicates divisé par la somme des feldspaths potassiques et des plagioclases ($\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$) inférieur à 0,5 provient du Bouclier canadien (tableau 51). 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 51. 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

La figure 113 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 35 et 36.

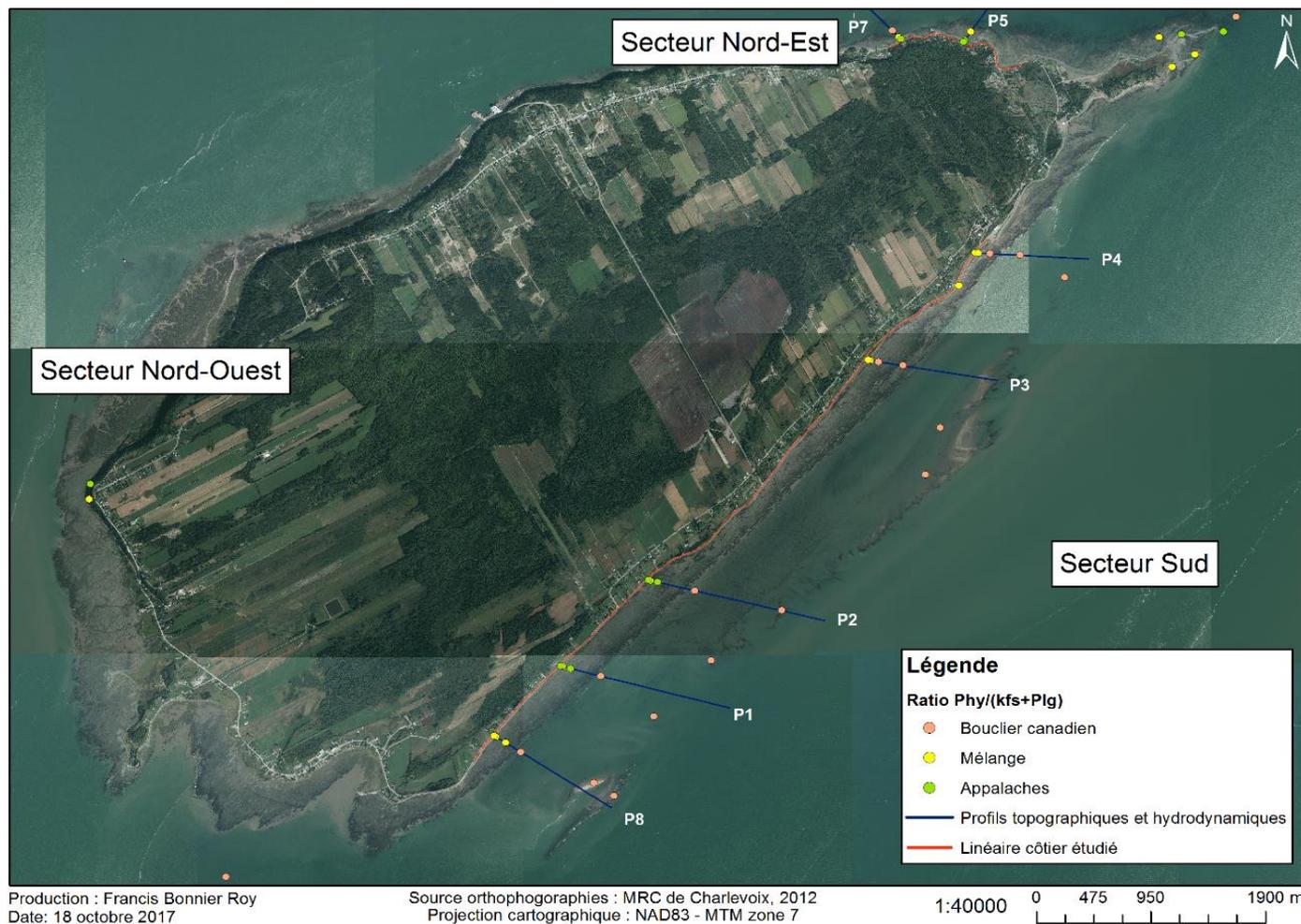


Figure 113. Appartenance des échantillons de sédiment meuble et de roc de l'ensemble de l'île selon le ratios $Phy/(Kfs+Plg)$.

Sur le tableau 52, la moyenne des ratios $\text{Phy}/(\text{Kfs}+\text{Plg})$ des échantillons est présentée pour l'ensemble des emplacements de l'île.

Tableau 52. 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 infralittoral					0,08	Sédiments meubles
Cordon infralittoral					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 infralittoral prouvent que la source sédimentaire de cette forme au large provient du Bouclier canadien. Le cordon infralittoral 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 Allard, 1985). Mentionnons aussi du côté de 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).

L'échantillon de roc du Grand Pilier est plus concentré en plagioclase et en phyllosilicates ce qui s'apparente à une minéralogie du Bouclier canadien.

Les échantillons de sédiment meuble 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, soit associé au Bouclier canadien.

Le roc de la plateforme rocheuse analysé a un ratio de 0,80, considéré comme un mélange. Néanmoins, il est près du seuil de 1 pour être désigné comme d'origine appalachienne.

La minéralogie des plages du côté sud est organisée selon un patron ouest-est particulier. À l'ouest, au profil 8, la minéralogie de la plage est plutôt constituée d'un mélange des deux formations géologiques avec un ratio de 0,81. Plus au centre, aux profils 1 et 2, les deux ratios 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 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 du côté sud de l'île, des apports sédimentaires provenant du cordon infralittoral 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 infralittoral appuie ce constat, avec un ratio moyen de 0,27. Ainsi, les vagues les plus imposantes, provenant du sud-ouest et du nord-est, transportent les sédiments du cordon infralittoral 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 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 est aussi une source en sédiments, quoique faible en apports sédimentaires.

La figure 114 présente l'évolution sur la durée du suivi de la composition minérale des échantillons de la plage associée à la minéralogie du Bouclier canadien. La plage des profils 1 et 2 sur le côté sud présente une faible similitude avec le Bouclier 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 Bouclier canadien, mais cette proportion reste toutefois inférieure à 41 % (mélange), sauf pour le profil 4 où une connexion sédimentaire avec le cordon infralittoral semble être la cause d'une augmentation de la proportion entre août 2014 et novembre 2016. Au nord-est de l'île, la majorité des échantillons sont d'origine appalachienne alors que les pourcentages d'association à la minéralogie du Bouclier canadien n'affichent que 28 % au plus fort, soit au profil 7.

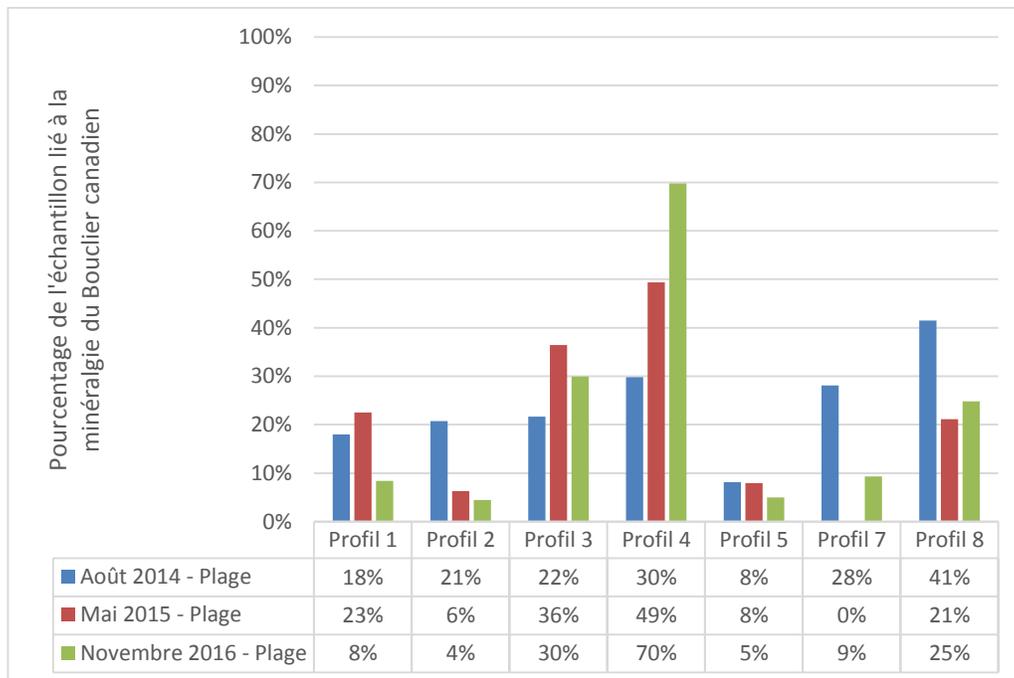


Figure 114. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien de la plage pour chaque échantillon sur les profils durant les campagnes d'échantillonnage août 2014, mai 2015 et novembre 2016.

La figure 115 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.

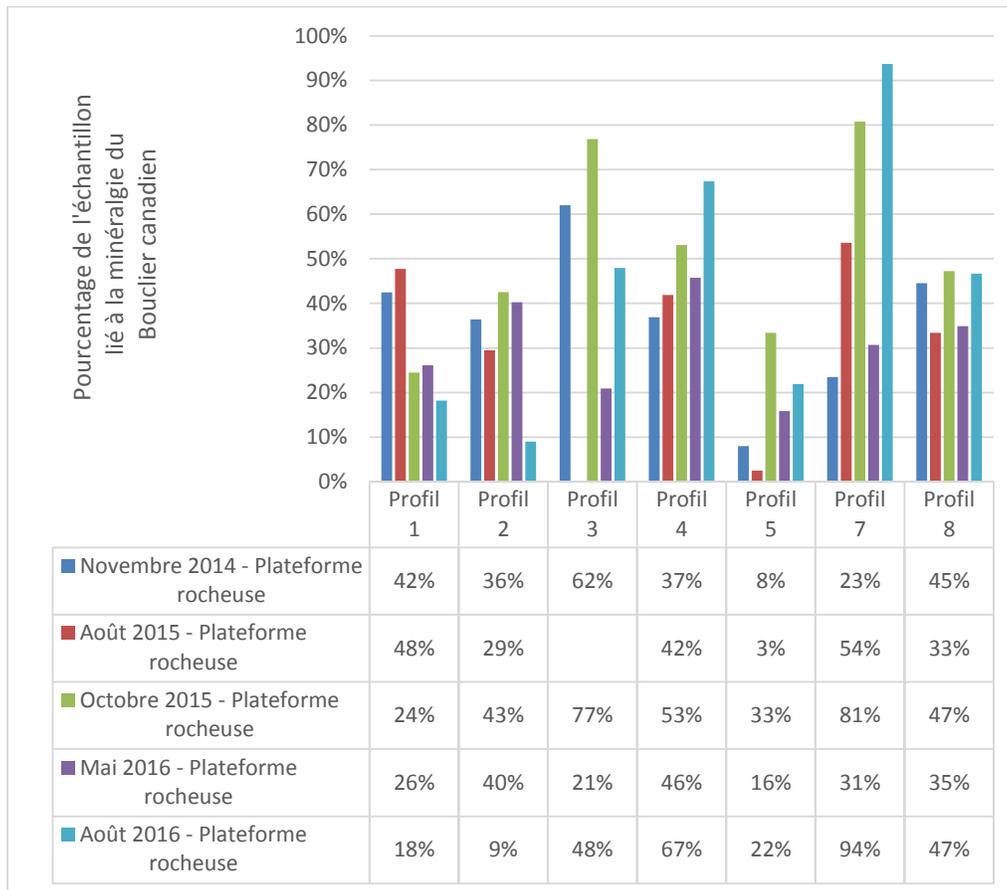


Figure 115. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la plateforme rocheuse pour chaque profil sur les périodes d'échantillonnage de novembre 2014, août 2015, octobre 2015, mai 2016 et août 2016.

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 116 présente le pourcentage des échantillons sur la zone sablo-vaseuse associé à la minéralogie du Bouclier canadien. 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 infralittoral. De plus, les sédiments de l'érosion de la plateforme rocheuse 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.

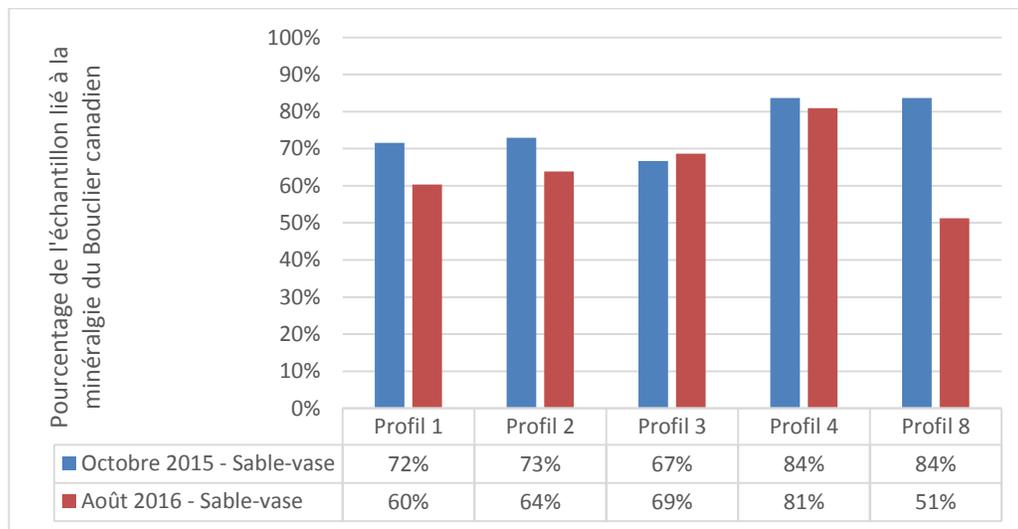


Figure 116. Pourcentage de la composition minéralogique liée au Bouclier canadien des sédiments de la zone sablo-vaseuse située entre la plateforme rocheuse et le cordon infralittoral pour chaque profil du côté sud sur les périodes d'échantillonnage d'octobre 2015 et août 2016.

5.3 Synthèse

L'île aux Coudres est constituée de deux séquences géologiques distinctes nord-sud divisées par une faille de chevauchement d'ouest en est (ligne pointillée noire sur la figure 119). La séquence au nord, est composée principalement de microgrès (siltstone). La séquence au sud est formée d'une séquence flyschique (schiste argileux, microgrès, grès impurs divers) (Brodeur et Allard, 1983). Ainsi, ces deux séquences forment les plateformes rocheuses (zone grisée) au nord-est et au sud. Du côté nord, cette plateforme plonge dans le chenal maritime situé entre l'île et les littoraux de Charlevoix. Du côté sud, la batture est plus étendue et la pente est plus douce. Après 250 à 300 m de plateforme rocheuse, une zone de sable et de vase (principalement de limons mais présence d'argile aussi) s'étend sur plusieurs centaines de mètres. Puis, à environ un kilomètre de la côte, se situe le cordon de sable et de blocs près de la zone infralittorale (à la limite du point le plus bas de la marée basse). Entre la plateforme et le cordon, lors du flot et du jusant, les courants de marées de forte intensité sont concentrés dans la zone sablo-vaseuse où des rides de courants sont présents (figure 117).



Figure 117. Rides de courant dans la zone sablo-vaseuse sur le profil 1, 15 novembre 2016.

Ainsi, ces trois éléments morphologiques de l'estran ont été identifiés comme sources sédimentaires des plages. Les analyses minérales ont confirmé ces hypothèses en analysant la composition minérale des sources potentielles et en les comparant à des échantillons de rivières du Bouclier canadien et des Appalaches. De cette façon, il a été possible d'identifier l'origine de ces sources sédimentaires. Subséquemment, la plateforme rocheuse est d'origine appalachienne ; les sédiments de la zone sablo-vaseuse et du cordon proviennent du Bouclier canadien. De plus, le cordon infralittoral est constitué de cailloux de tailles diverses selon les endroits (figure 118). Puisque le socle rocheux de l'île aux Coudres est d'origine appalachienne et que les dépôts de

sable et de blocs du Bouclier canadien se trouvent sur l'estran sud, il est fort possible que les sédiments grossiers composant le cordon infralittoral proviennent de l'érosion d'un till tel qu'observé aussi sur la batture dans la région de Charlevoix (Dionne et Poitras, 1996).



Figure 118. Cordon infralittoral composé de sable et de blocs de diverses tailles (entre les profils 3 et 4), 19 mai 2015.

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 119) 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).

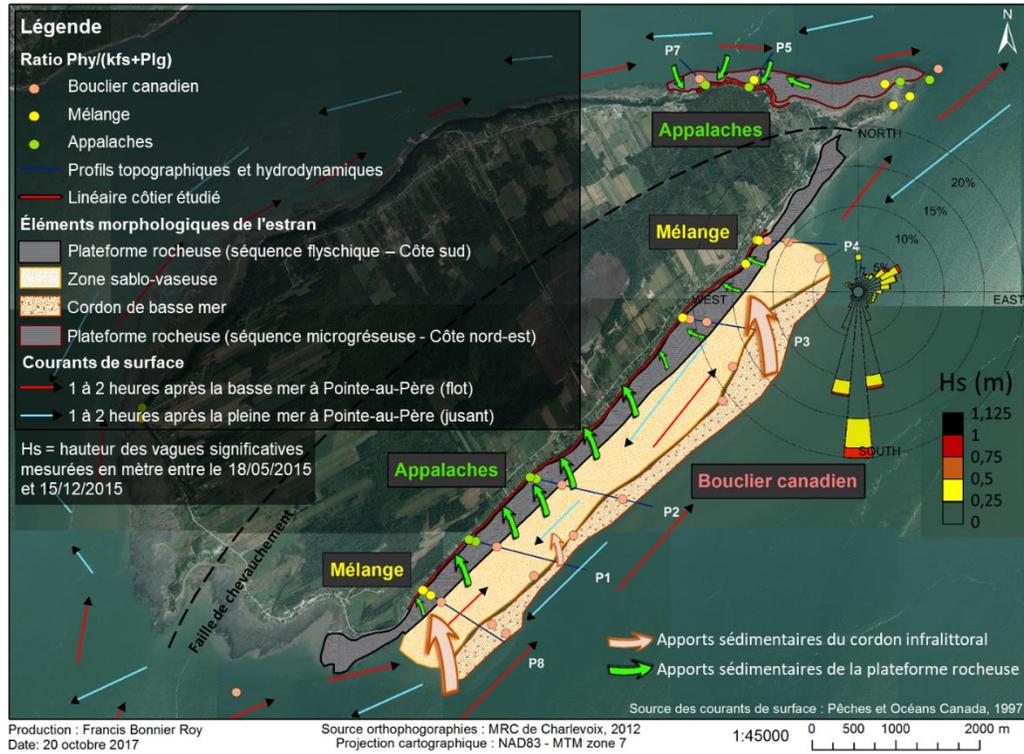


Figure 119. Carte synthèse des sources sédimentaires des plages à l'étude de l'île, incluant les courants de surface. La direction des courants a été estimée selon la moyenne des cinq premiers mètres de profondeur depuis la surface entre juin et septembre (voir l'Atlas des courants de marée, Pêches et Océans Canada, 1997).

Les plages du nord-est sont principalement alimentées par l'érosion de la plateforme rocheuse et des sédiments meubles schisteux qui y sont déposés par les courants. Le taux d'érosion vertical de la plateforme rocheuse a été évalué à 0,22 à 0,53 cm/an pour le secteur nord-est (Brodeur et Allard, 1983).



Figure 120. Plateforme rocheuse devant le profil 6. Vue vers l'est. Photo prise le 21 août 2016.

Des dépôts de sable sont aussi présents à la limite de la zone infralittorale au large (figure 121), ce qui est expliqué par la présence de sédiments provenant du Bouclier canadien sur le profil 7.



Figure 121. Dépôts de sable et de petits blocs. Photo de l'échantillon P7-BE4 prise le 30 août 2015.

Du côté 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 de minéralogie appalachienne (exemple figure 122). Cela indique un apport sédimentaire provenant du cordon et de la zone sablo-vaseuse 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 vers les plages plus efficace sur les deux extrémités du littoral au sud.



Figure 122. Photo de l'échantillon P1-HE2 prise sur la plage du profil 1 le 9 novembre 2014.

Cependant, les plages du centre du côté sud de l'île sont davantage protégées par la plateforme rocheuse qui est plus large. De plus, le cordon infralittoral est moins volumineux devant le profil 2, ce qui peut influencer sur 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 123).



Figure 123. Photo de l'échantillon P2-HE1 prise sur la plage du profil 2 le 5 mai 2016.

Il est aussi important de mentionner que la dérive d'estran joue un rôle non négligeable sur la distribution des sédiments de la plage. Ainsi, une dérive dominante d'est en ouest est observable du côté sud (observations sur photographie aérienne et sur le terrain) et une dérive secondaire d'ouest en est a été remarquée dans la distribution des sédiments au centre de l'île provenant du secteur 1 dans l'analyse des volumes de plage. Cela s'explique par la direction des plus fortes vagues enregistrées provenant du nord-est et des vagues plus faibles enregistrées provenant du sud. Du côté nord-est, les vagues arrivent directement du nord-est, ce qui fait que l'érosion de la plateforme rocheuse et le transport des sédiments se fait aussitôt sur la plage. Une dérive littorale se remarque aussi d'est en ouest par photo-interprétation et par des observations terrains.

Les apports provenant de l'érosion de la plateforme rocheuse sont non négligeables. 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).

6. DONNÉES DE NIVEAUX D'EAU, DE VAGUES ET DE COURANTS CÔTIERS

6.1 Description des méthodes d'acquisition de données

6.1.1 *Mesure de la dénivellation de la surface libre*

Les séries chronologiques de la dénivellation de la surface libre sont mesurées à l'aide de capteurs de pression piézo-résistifs autonomes RBR Virtuoso.

Ces capteurs sont positionnés le plus proche possible du fond, compte tenu de la rugosité de surface. Les capteurs sont installés dans des supports subhorizontaux fixés sur la roche de la batture ou dans des vis à sable verticales dans les secteurs meubles. La prise de pression (membrane) est orientée vers la surface pour les capteurs situés sur la plateforme rocheuse (figure 124) ou à la verticale pour les capteurs du haut estran et de la batture, de sorte à éviter l'emprisonnement d'une bulle d'air contre la membrane, qui fausserait la mesure de pression.



Figure 124. Capteur fixé sub-horizontalement sur la plateforme rocheuse. La membrane est positionnée le plus proche possible du fond.

Les positions des capteurs et des prises de pression sont mesurées en X,Y (MTM7) et en Z (NAD83) au DGPS. Les altitudes seront converties en profondeurs relativement au zéro des cartes.

La fréquence d'acquisition est fixée à 4 Hz, en continu, ce qui permet une bonne résolution de la forme des vagues courtes et asymétriques avant et dans la zone de déferlement, tout en autorisant des déploiements autonomes d'une durée de trois mois. L'acquisition en continu permet la mesure de la totalité des cycles de marée et la réalisation d'analyses des composantes fréquentielles de vagues et de niveaux d'eau sur des fenêtres de temps de différentes tailles.

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 poids 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. 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, i.e. soustraire la pression atmosphérique de la pression mesurée dans la colonne d'eau par les capteurs pour obtenir la pression relative. La pression relative est convertie en hauteur d'eau h par $h=p/(\rho \cdot g)$ avec g l'accélération gravitationnelle et ρ 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.

6.1.2 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 le banc de sable à l'est du Petit Pilier afin de quantifier les dynamiques marines à cette position et de fournir d'autres informations pour répondre à la question de la connexion sédimentaire entre le banc de sable et le littoral sud-est de l'île (figure 125).

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 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.



Figure 125. ADV positionné au sud-est de l'île du 18/05/2015 au 15/12/2015

6.1.3 **Rappel méthodologique : traitements et analyses réalisées sur les données**

6.1.3.1 *Analyse des ondes de gravité (2s – 20s) et d'infragravité (20s – 5mn)*

Les données de pression corrigées de hauteur d'eau à 4Hz seront traitées par analyse spectrale afin de produire la distribution fréquentielle de l'énergie des vagues (spectres de densité d'énergie des vagues). Ces analyses seront 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 seront 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) seront également calculés sur la bande de fréquence des ondes incidentes pour chaque capteur de pression au pas de 20 mn. A partir de ces séries chronologiques de paramètres de vagues produites sur trois ans, il sera possible d'analyser les

périodes de retour des vagues en chaque point de mesure, ce qui permettra de déterminer les niveaux d'exposition des différents secteurs de la côte de la municipalité de L'Isle-aux-Coudres pour cet intervalle de temps.

Les paramètres des ondes d'infragravité seront calculés de la même manière, sur leur bande de fréquence propre. Le résultat permettra d'étudier la contribution de ces ondes à la surélévation du niveau d'eau à la côte.

6.1.3.2 *Analyse des ondes de longue période non-tidales (5mn – 3hr)*

L'existence d'ondes périodiques stationnaires de basse fréquence (seiches) liées à la géométrie et à la bathymétrie de l'estuaire n'a pas été étudiée à notre connaissance. La présence de ces ondes est susceptible d'augmenter temporairement le niveau d'eau à la côte. L'échantillonnage en continu sur toute la durée d'un cycle de marée permet d'étudier la présence de telles ondes.

La recherche des composantes de basse fréquence de la dénivellation de la surface libre sera faite soit par analyse spectrale sur des fenêtres de 1h à 6h, soit par filtrage passe-bas du signal après décomposition harmonique sur la totalité de chaque cycle de marée. Ces analyses seront menées pour chaque capteur. La comparaison des résultats permettra d'évaluer la proportion de surcote imputable à ces ondes.

6.1.3.3 *Analyse des composantes tidales et atmosphériques du niveau d'eau*

Les oscillations de la surface liées aux harmoniques tidales seront discrétisées par analyse tidale unifiée sous Matlab (groupe de routines T-tide), les caractéristiques des résidus seront comparées entre chaque capteurs de pression.

6.1.4 *Caractéristiques des déploiements réalisés entre mai 2014 et novembre 2016*

Les caractéristiques des déploiements réalisés entre mai 2014 et novembre 2016 sont présentées aux tableaux 53 et 54.

Tableau 53. Position et durée des déploiements d'instruments de mesure des paramètres de vagues et de niveaux d'eau sur le littoral de l'Isle-aux-Coudres pour les années 2014 et 2015.

Position	X	Y	Z	Déploiement 1 S14			Déploiement F14			Déploiement W14			Déploiement 4 S15			Déploiement 5 F15			Déploiement 6 W15		
				numéro de série	date de déploiement	date de récupération	numéro de série	date de déploiement	date de récupération	numéro de série	date de déploiement	date de récupération	numéro de série	date de déploiement	date de récupération	numéro de série	date de déploiement	date de récupération	numéro de série	date de déploiement	date de récupération
p1.1	5248726.01	313638.433	2.25084				55122	27/08/2014	11/11/2014	55120	11/11/2014	17/12/2014	55122	18/05/2015	04/08/2015	55122	04/08/2015	02/10/2015	55122	03/10/2015	12/2015
p1.2	5248716.65	313669.678	1.43944	55040	01/05/2014	27/08/2014	55040	27/08/2014	11/11/2014	55040	11/11/2014	17/12/2014	55087	17/05/2015	02/08/2014	55087	03/08/2014	02/10/2015	55087	03/10/2015	12/2015
p1.3A	5248682.83	313893.137	1.08703				55120	25/08/2014	11/11/2014	55118	11/11/2014	17/12/2014	55119	17/05/2015	02/08/2014	55119	03/08/2015	02/10/2015	55119	03/10/2015	12/2015
p1.3B	5248624.52	314004.003	-1.38568	55039	01/05/2014	25/08/2014	55039	25/08/2014	11/11/2014	55039	11/11/2014	17/12/2014	55039	17/05/2015	02/08/2014	55039	03/08/2015	02/10/2015	55039	03/10/2015	12/2015
p2.1	5249472.55	314368.46	2.24822				55123	27/08/2014	11/11/2014	55091	11/11/2014	17/12/2014	55118	18/05/2015	04/08/2015	55118	04/08/2015	02/10/2015	55118	03/10/2015	12/2015
p2.2	5249464.75	314386.874	1.3661	55037		27/08/2014	55037	27/08/2014	11/11/2014	55037	11/11/2014	17/12/2014	55091	17/05/2015	02/08/2014	55091	02/08/2014	02/10/2015	55091	03/10/2015	12/2015
p2.3	5249404.63	314752.803	-1.01468	55038		27/08/2014	55038	27/08/2014	11/11/2014	55038	11/11/2014	17/12/2014	55115	17/05/2015	02/08/2014	55115	02/08/2014	02/10/2015	55115	03/10/2015	12/2015
p2.4	5249246.95	315628.726	-2.01962				55091	28/08/2014	11/11/2014	55116	11/11/2014	17/12/2014	55002	17/05/2015	02/08/2014	55142	02/08/2014	02/10/2015	55142	03/10/2015	12/2015
p3.1	5251375.41	316186.974	2.24449				55092	26/08/2014	11/11/2014	55115	11/11/2014	17/12/2014	55116	18/05/2015	04/08/2015	55116	03/08/2015	02/10/2015	55116	03/10/2015	12/2015
p3.2	5251379.66	316226.871	1.13532	55091	01/05/2014	27/08/2014	55119	25/08/2014	11/11/2014	55119	11/11/2014	17/12/2014	55093	17/05/2015	03/08/2014	55093	03/08/2015	02/10/2015	55093	03/10/2015	12/2015
p3.3A	5251364.53	316465.838	1.09445				55116	25/08/2014	11/11/2014	55092	11/11/2014	17/12/2014	55092	17/05/2015	03/08/2014	55092	03/08/2015	02/10/2015	55092	03/10/2015	12/2015
p3.3B	5251287.52	316616.051	-1.83977	55095	01/05/2014	26/08/2014	55095	26/08/2014	11/11/2014	55095	11/11/2014	17/12/2014	55037	17/05/2015	02/08/2014	55037	04/08/2015	02/10/2015	55037	03/10/2015	12/2015
p4.1	5252155.93	316985.986	2.25073				55118	26/08/2014	11/11/2014	55093	11/11/2014	17/12/2014	55094	18/05/2015	04/08/2015	55094	04/08/2015	02/10/2015	55094	03/10/2015	12/2015
p4.2	5252150.13	317000.696	1.23886	55093	01/05/2014	26/08/2014	55115	26/08/2014	11/11/2014	55123	11/11/2014	17/12/2014	55117	17/05/2015	02/08/2015	55117	02/08/2015	02/10/2015	55117	03/10/2015	12/2015
p4.3b	5252135.87	317491.638	-2.25378	55088	01/05/2014	26/08/2014	55092	27/08/2014	11/11/2014	55089	11/11/2014	17/12/2014	55038	17/05/2015	02/08/2015	55034	02/08/2015	02/10/2015	55034	03/10/2015	12/2015
p5.1	5254140.44	316975.215	2.26394				55121	27/08/2014	12/11/2014	55121	12/11/2014	17/12/2014	55121	18/05/2015	03/08/2015	55121	03/08/2015	02/10/2015	55121	03/10/2015	12/2015
p5.2	5254159.14	316991.497	1.24625	55089	01/05/2014	27/08/2014	55089	27/08/2014	11/11/2014	55122	11/11/2014	17/12/2014	55089	17/05/2015	02/08/2015	55089	03/08/2015	02/10/2015	55089	03/10/2015	12/2015
p5.3b	5254326.66	317195.302	-1.96723	55092	01/05/2014	26/08/2014							55040	17/05/2015	02/08/2015	55040	03/08/2015	02/10/2015	55040	03/10/2015	12/2015
p6.1	5254178.53	316914.832	2.25265				55117	27/08/2014	12/11/2014	55117	12/11/2014	17/12/2014	55120	18/05/2015	03/08/2015	55120	03/08/2015	02/10/2015	55120	03/10/2015	12/2015
p6.2	5254195.46	316925.022	1.50395	55087	01/05/2014	27/08/2014	55087	27/08/2014	11/11/2014	55087	11/11/2014	17/12/2014	55095	17/05/2015	16/07/2015	55095	03/08/2015	02/10/2015	55095	03/10/2015	12/2015
p6.3	5254384.01	317058.874	-1.83937	55094	01/05/2014	26/08/2014	55094	26/08/2014	11/11/2014	55094	11/11/2014	17/12/2014	55036	17/05/2015	02/08/2015	55036	03/08/2015	02/10/2015	55036	03/10/2015	12/2015
ADV	5250879.99	317081.11	-1.81										ADV	18/05/2015	04/08/2015	ADV	05/08/2015	26/10/2015	ADV	27/10/2015	12/2015

Tableau 54. Position et durée des déploiements d'instruments de mesure des paramètres de vagues et de niveaux d'eau sur le littoral de l'Isle-aux-Coudres pour l'année 2016.

Isle-aux-Coudres														
Position	numéro de série	Coordonnées			Déploiement AXIS P16		Déploiement E16		Déploiement A16		Déploiement H16			
		EST	NORD	Z	Date de déploiement	Date de récupération	Date de déploiement	Date de récupération	Date de déploiement	Date de récupération	Date de déploiement	Date de récupération		
p1.1	55115	313638.4112	5248725.99	2.263			4 mai 2016	3 juillet 2016	3 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p1.2	55157	313669.7513	5248716.67	1.42789			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p1.3A	120130	313893.1815	5248682.79	1.03657			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p1.3B	55039	314003.5678	5248625.29	-1.40644			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p2.1	55155	314368.4721	5249472.57	2.23152			4 mai 2016	3 juillet 2016	3 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p2.2	120125	314386.8417	5249464.68	1.35916			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p2.3	120124	314754.00035	5249402.42	-1.06957			6 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	20 août 2016	20 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p2.4	55038	315628.6309	5249246.92	-2.03242			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	20 août 2016	20 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p3.1	120127	316187.053	5251375.37	2.2552			4 mai 2016	3 juillet 2016	3 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p3.2	120129	316226.863	5251379.65	1.16939			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p3.3A	120128	316466.006	5251364.66	1.11748			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016		NA		
p3.3B	55040	316616.026	5251287.98	-1.84347			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	20 août 2016	20 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p4.1	120126	316986.05	5252155.89	2.24109			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p4.2	55158	317000.54	5252150.02	1.22045			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p4.3B	55034	317491.572	5252136.32	-2.20662			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	20 août 2016	20 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p5.1	55159	316975.326	5254140.41	2.27353			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p5.2	55160	316991.535	5254160.29	1.24293			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p5.3	55037	317195.397	5254327.76	-2.03918			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	20 août 2016	20 août 2016	15 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
p6.1	550154	316914.837	5254178.7	2.25746			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p6.2	120123	316924.963	5254196.51	1.45728			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	15 octobre 2016	15 octobre 2016	13 décembre 2016
p6.3	55036	317059.337	5254385.47	-1.90593			4 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	20 août 2016	20 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
PA.1	55002	316937.2016	5252037.54	2.42955	17 avril 2016	7 mai 2016	7 mai 2016	3 juillet 2016	3 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
PA.2	55102	316966.0936	5252026.42	1.39493	17 avril 2016	7 mai 2016	7 mai 2016	4 juillet 2016	4 juillet 2016	19 août 2016	19 août 2016	16 octobre 2016	16 octobre 2016	13 décembre 2016
ADV	COT-0118	316466.8839	5251358.62	1.26109						19 août 2016		En déploiement		13 décembre 2016

6.2 Quantification des dynamiques à la côte

6.2.1 *Évaluation des conditions de niveaux d'eau et de vagues pour la période de suivi*

6.2.1.1 *Conditions de vagues et de niveaux d'eau*

Pour quantifier le climat de vague du large à la côte on compare donc de proche en proche les valeurs des données de hauteur significative (H_{m0}) produites par les différents capteurs d'un même profil morphodynamique (figure 126). Cette section présente les climatologies obtenues pour les ondes incidentes (ondes courtes, $1 \text{ s} < T < 18 \text{ s}$), les résultats obtenus pour les ondes d'infragravité (ondes longues, $18 \text{ s} < T < 200 \text{ s}$) seront présentés ultérieurement.



Figure 126. Exemple de déploiement de capteur de pression sur la plateforme rocheuse réalisé lors de la campagne C1 (12 au 16 mai 2014)

La climatologie conjointe de vagues et de niveaux d'eaux pour les années 2014 (15 mai au 12 décembre), 2015 (4 mai au 15 décembre selon les marées) et 2016 (4 mai au 13 décembre selon les marées) est présentée sous forme de distributions statistiques des données de H_{m0} pour la bande de fréquence gravitaire.

Les moyennes, moyennes des 10% des valeurs les plus élevées, du 99^{ième} percentile ainsi que les maxima des hauteurs significatives des ondes incidentes (H_{m0}) et niveaux d'eaux (d) sur la période sont calculés. Les

distributions sont ordonnées sous forme de courbes de fréquences cumulées, aussi appelées courbes de dépassement, afin de mettre en évidence la fréquence des événements extrêmes. En raison de la durée insuffisante de l'échantillonnage (3 ans), il est trop tôt pour proposer une statistique des périodes de retour supérieure à 10 ans.

Les figures 127 à 132 de même que les tableaux 55 à 60 présentent les différentes caractéristiques des vagues et des niveaux d'eau pour les différents profils. De plus, les hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés pour chaque capteur enfoui sous la plage sont disponibles aux annexes 37 à 54.

6.2.1.1.1 Profil 1 (artificiel)

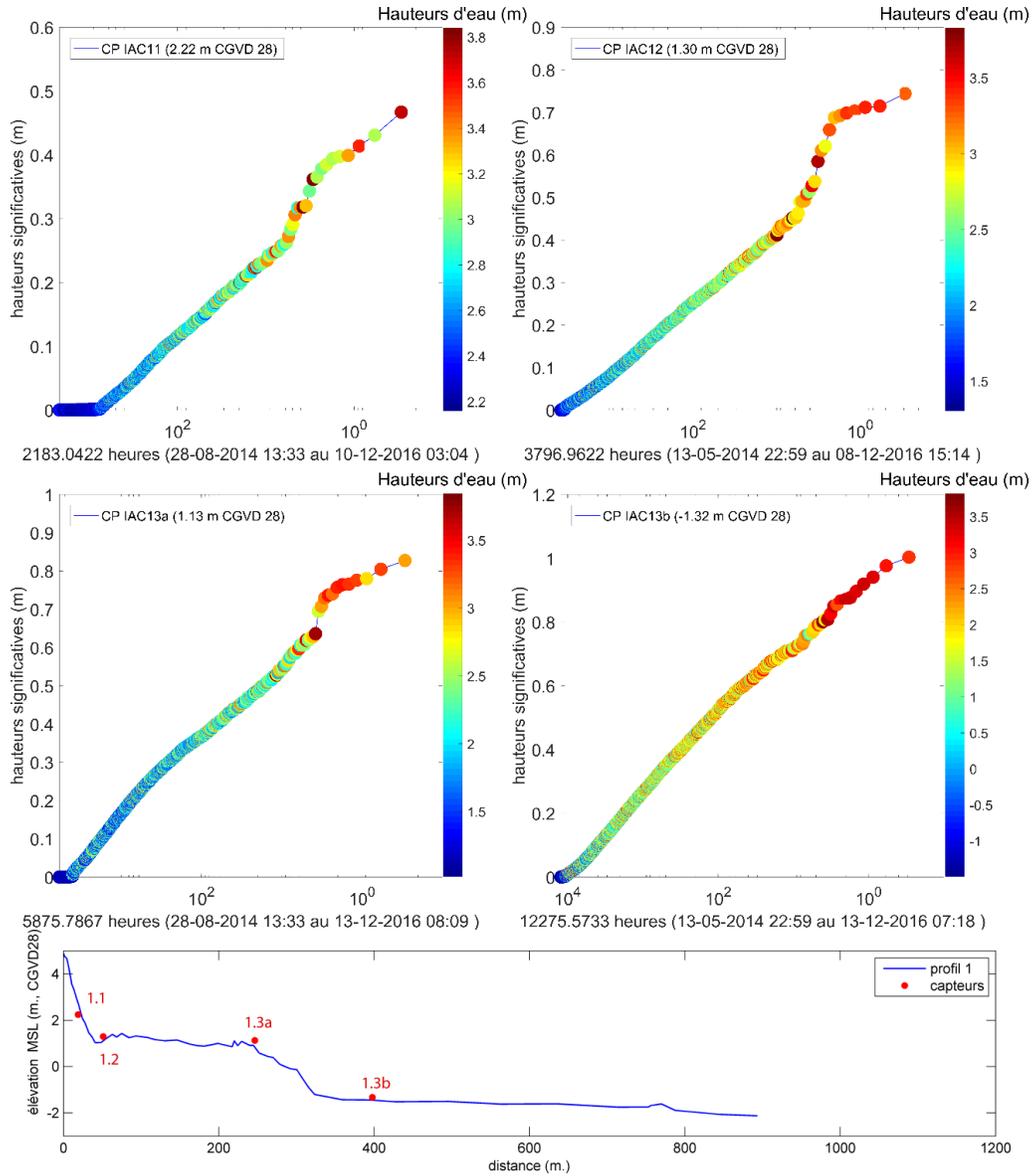


Figure 127. Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 1 et niveaux d'eau concomitants.

Tableau 55. Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 1

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP1.1	0.02	2.42	0.13	2.84	0.26	3.12	0.47	3.84
CP1.2	0.06	2.04	0.23	2.51	0.40	2.88	0.74	3.83
CP1.3a	0.08	1.65	0.31	2.09	0.49	2.44	0.83	3.84
CP1.3b	0.13	1.42	0.41	1.70	0.64	2.14	1.00	3.82

6.2.1.1.2 Profil 2 (naturel)

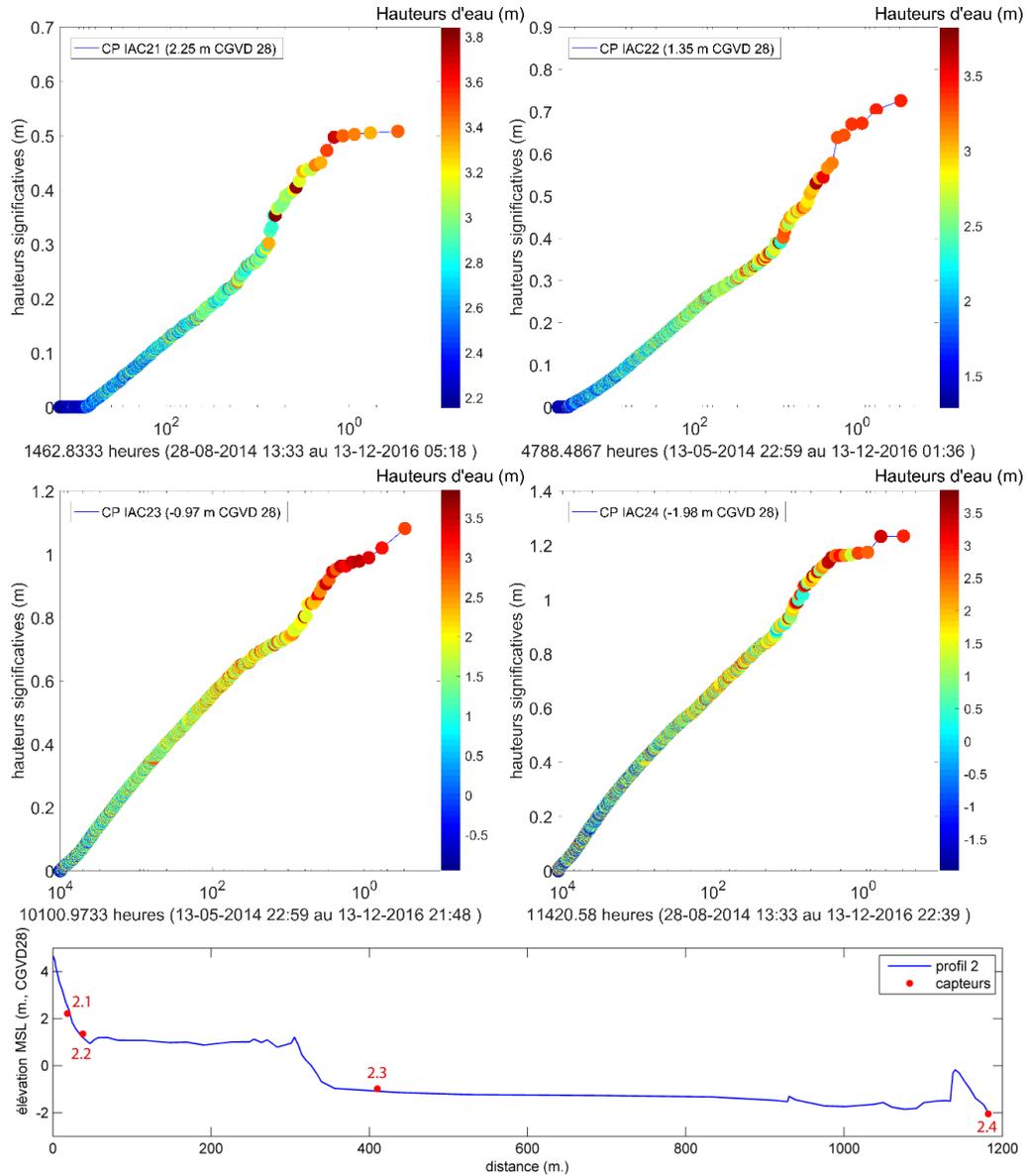


Figure 128. Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 2 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 56. Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 2

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP2.1	0.03	2.46	0.16	2.87	0.34	3.08	0.51	3.84
CP2.2	0.04	1.90	0.19	2.48	0.35	2.82	0.73	3.82
CP2.3	0.14	1.42	0.43	1.69	0.67	2.13	1.08	3.85
CP2.4	0.17	1.41	0.54	1.43	0.82	1.72	1.23	3.84

6.2.1.1.3 Profil 3 (naturel)

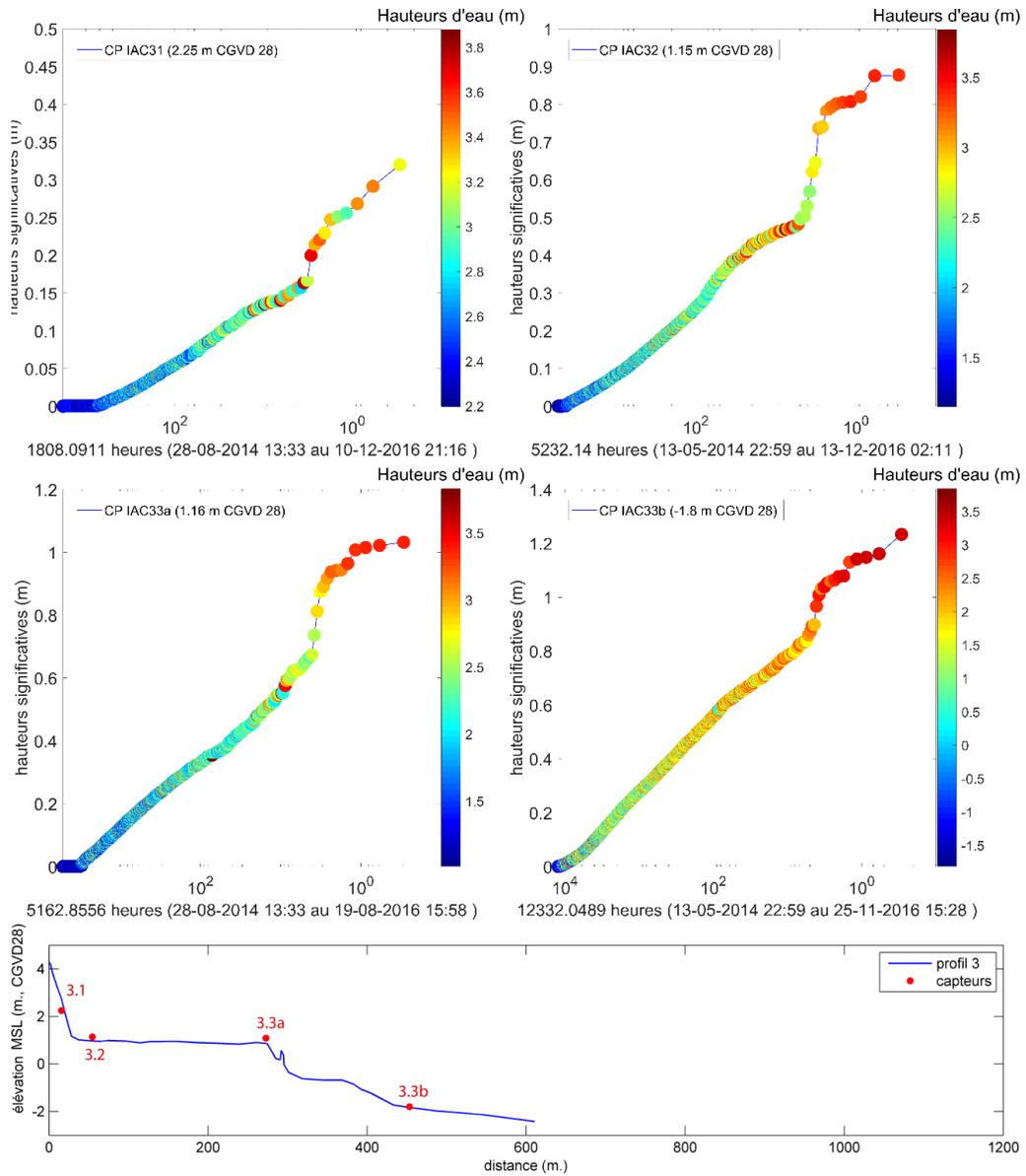


Figure 129. Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 3 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 57. Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 3

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP3.1	0.01	2.50	0.07	2.84	0.15	3.12	0.32	3.88
CP3.2	0.05	1.84	0.21	2.39	0.43	2.82	0.88	3.84
CP3.3a	0.06	1.60	0.28	2.15	0.49	2.37	1.03	3.83
CP3.3b	0.13	1.42	0.43	1.64	0.70	2.06	1.23	3.84

6.2.1.1.4 Profil 4 (déjà artificiel)

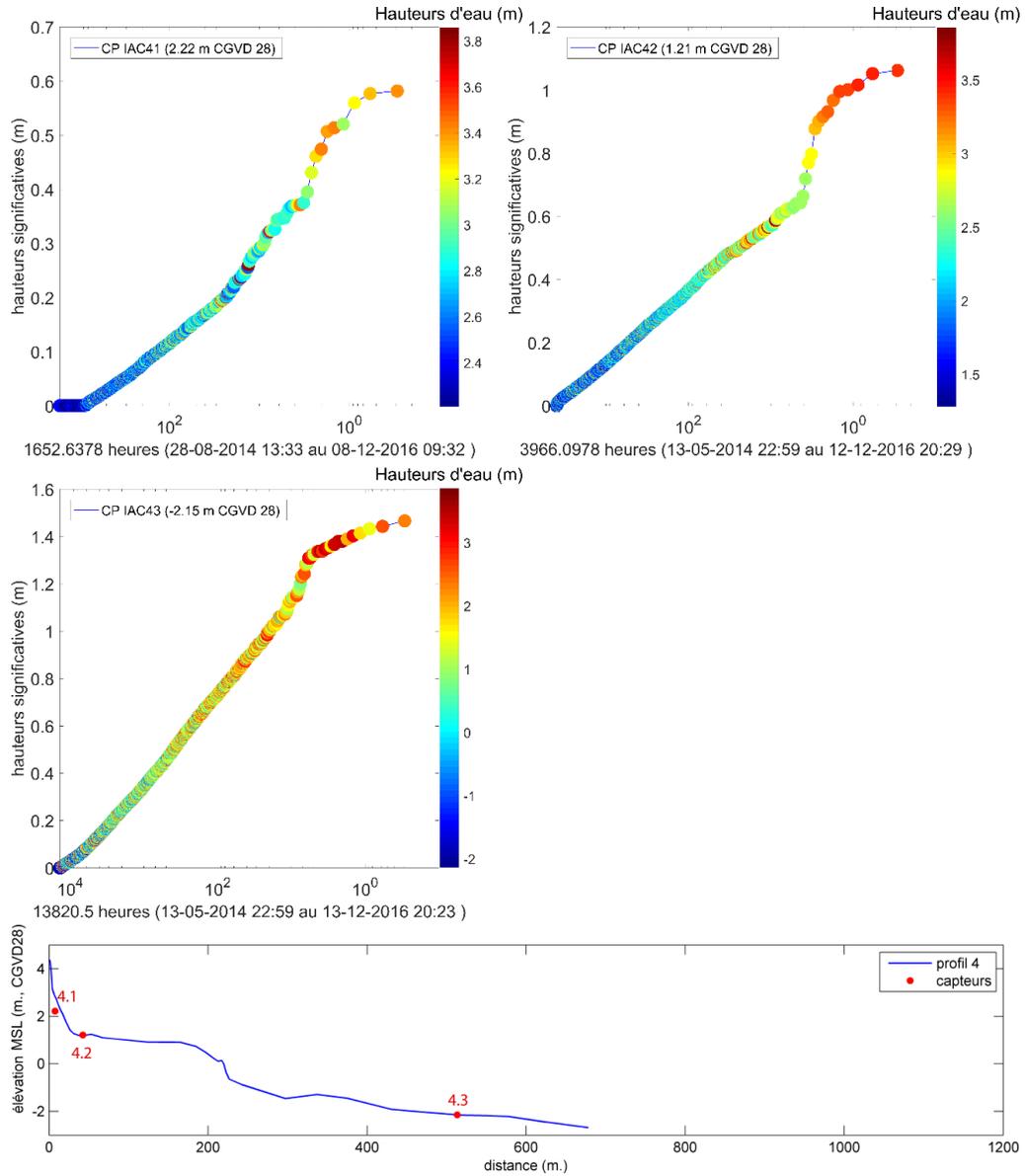


Figure 130. Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 4 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 58. Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 4

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP4.1	0.03	2.50	0.15	2.84	0.33	3.03	0.58	3.86
CP4.2	0.10	2.03	0.33	2.33	0.56	2.80	1.06	3.86
CP4.3	0.16	1.43	0.54	1.53	0.94	1.84	1.47	3.86

6.2.1.1.5 Profil 5 (artificiel)

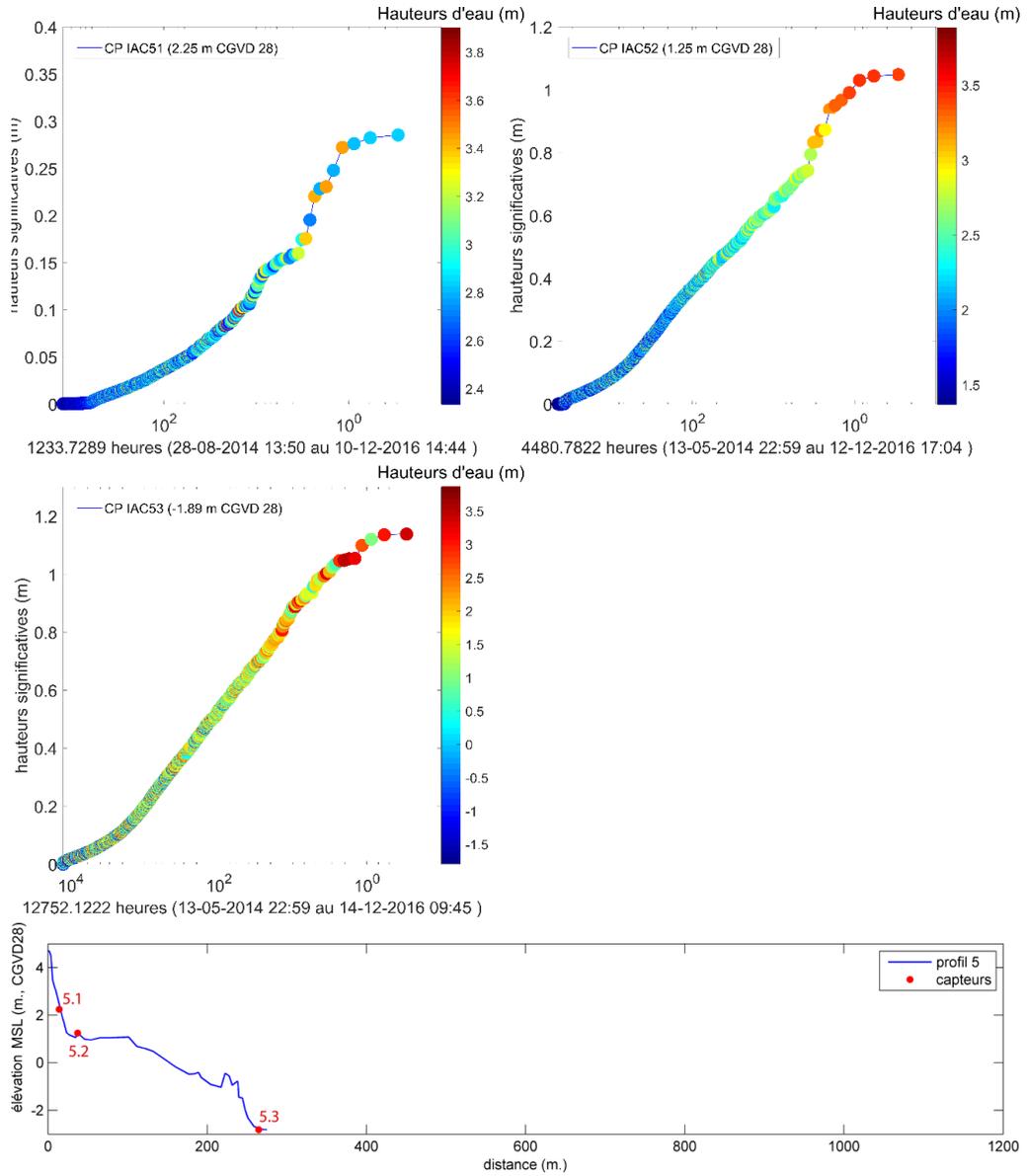


Figure 131. Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 5 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 59. Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 5

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP5.1	0.01	2.60	0.06	2.86	0.16	2.95	0.29	3.90
CP5.2	0.07	1.96	0.30	2.18	0.58	2.51	1.05	3.89
CP5.3	0.09	1.43	0.36	1.43	0.70	1.64	1.14	3.87

6.2.1.1.6 Profil 6 (naturel)

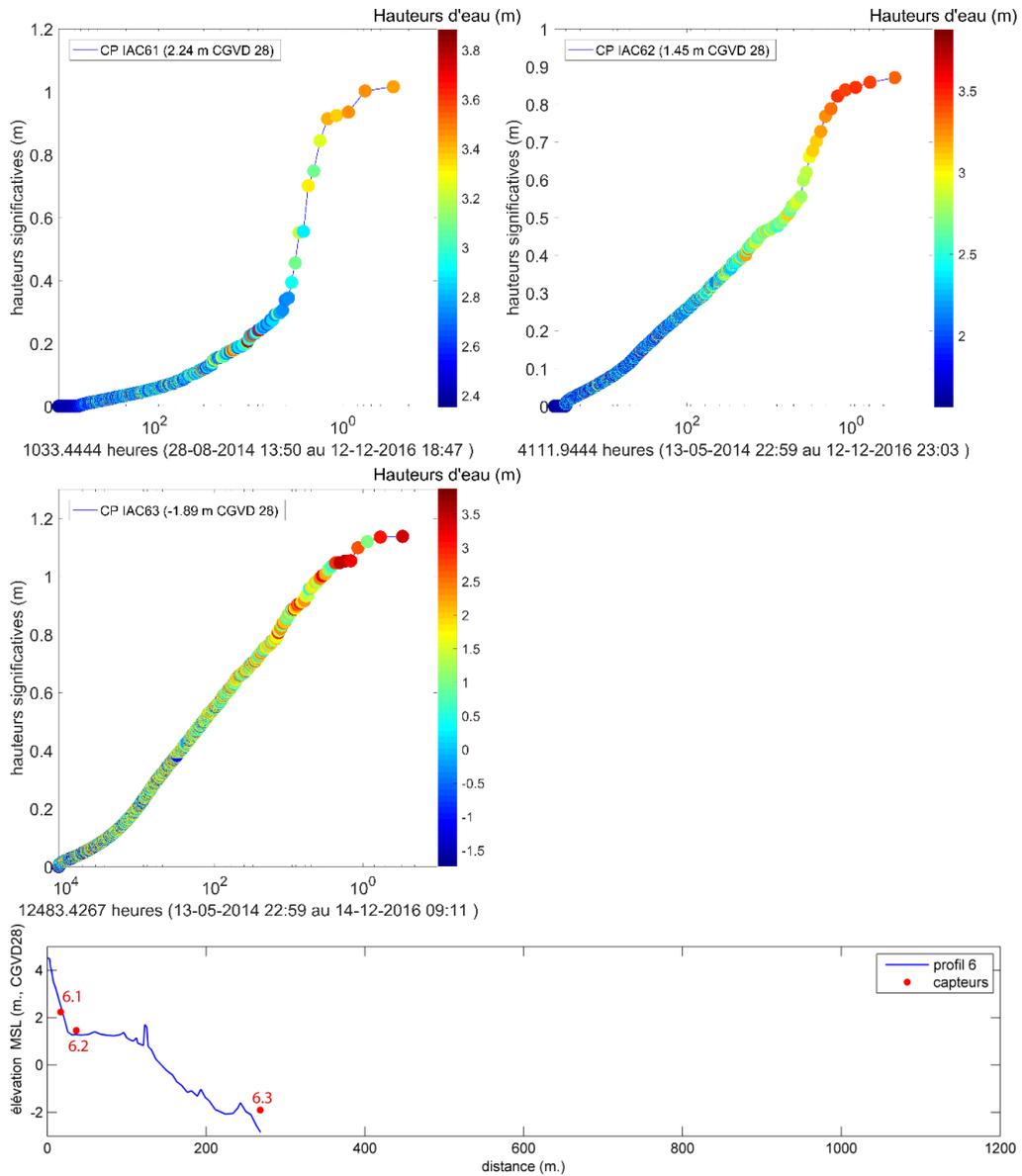


Figure 132. Courbes de dépassement des H_{m0} pour le profil 6 et niveaux d'eau concomitants

Tableau 60. Moyennes et maxima des distributions de hauteurs significatives (H_{m0}) et de niveaux d'eau (d) pour le Profil 6

Position	Moyennes		Moyennes des 10 % supérieurs		Moyennes du 99e percentile		Maximum	
	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)	Hm0 (m)	d (m)
CP6.1	0.02	2.63	0.13	2.90	0.42	3.06	1.02	3.88
CP6.2	0.05	2.02	0.22	2.29	0.44	2.69	0.87	3.88
CP6.3	0.09	1.43	0.38	1.44	0.71	1.62	1.14	3.88

Tableau 61. 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	

Les vagues mesurées à la position de l'ADV proviennent majoritairement 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 61).

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, soit 1 963 heures et 20 mn 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 62).

Tableau 62. 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[
N-E (45°-85°)	56,92	37,74	5,14	0,21	0,00	1 542
S (175° - 195°)	80,45	15,40	3,92	0,20	0,02	4 052

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 %).

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 %).

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.

6.2.3 Synthèse

L'analyse des données de vagues et de niveaux d'eau met en évidence l'existence d'un double gradient spatial dans l'intensité des dynamiques qui affectent l'île aux Coudres – du large à la côte et d'ouest en est.

L'intensité des dynamiques de vagues est faible, les moyennes des hauteurs significatives pour les capteurs les plus au large sont toutes inférieures à 0,16 m. Le climat de vagues est globalement calme, l'écart entre les valeurs moyennes et les extrêmes de la distribution illustre néanmoins l'existence de pics d'intensité.

Du côté sud, les moyennes des distributions d'hauteurs significatives des capteurs au large situés à des profondeurs équivalentes (excepté le capteur 2.4 qui est localisé sur la face aval du cordon) augmentent néanmoins graduellement du sud-ouest au sud-est, allant de 0,13 m au niveau du profil 1 pour atteindre 0,16 m au niveau du profil 4. Cette tendance est confirmée par les moyennes des 10% les plus forts et du 99^{ème} percentile ainsi que les maximas. La hauteur significative maximale enregistrée sur le profil 1 (1 m) est 68% en-dessous du maximum enregistré sur le profil 4 (1,47 m). Le sud-ouest de l'île est donc globalement moins exposé que le sud-est : la figure 133 montre que le sud-est de l'île est soumis à la fois aux vagues des secteurs sud et nord-est, alors que le secteur sud-ouest est soumis principalement aux vagues provenant du sud, les vagues du nord-est y étant plus amorties en raison de leur direction quasi-parallèle à la côte, à l'origine d'une réfraction plus importante.

L'exposition de la pointe nord-est de l'île est renforcée par la géométrie de la zone intertidale, la plateforme des plus basses mers étant moins étendue et plongeant plus vite que sur la section centrale de la côte sud. Les vagues du nord-est atteignant la pointe nord-est de l'île sont non seulement moins dissipées par friction sur le fond, mais leur réfraction est également plus faible en raison de leur incidence à la côte plus forte.

Les sections centrale et ouest de la côte sud bénéficient également de la présence d'un cordon sableux et de blocs et galets formant un haut-fond de grand-axe perpendiculaire à la côte, à 800 m du littoral de l'île. Ce cordon contribue également à la dissipation de l'énergie des vagues, les mesures réalisées de part et d'autre montrant une atténuation des hauteurs significatives de vagues franchissant le cordon. Cette atténuation diminue néanmoins en conditions de hautes mers de vives-eaux, lorsque la hauteur d'eau au-dessus du cordon est trop importante pour permettre la dissipation des vagues par friction sur le fond ou déferlement.

D'une manière générale, les paramètres des distributions de vagues pour les différents capteurs d'un même profil montrent une atténuation des hauteurs significatives de vagues à mesure qu'elles se propagent vers la côte. Cette atténuation n'est cependant pas constante, elle est plus forte pour les vagues les plus faibles et son importance diminue avec l'augmentation de la hauteur des vagues. Cette observation contre-intuitive s'explique par l'étude des

distributions jointes des niveaux d'eau et des hauteurs de vagues : les courbes de dépassement montrent que les vagues les plus fortes enregistrées par les capteurs positionnés à la flexure correspondent aux occurrences de niveaux d'eau les plus élevés. Or, lorsque la profondeur augmente, la dissipation par friction et la réfraction des vagues se font plus tardivement lors de leur trajet vers la côte, autorisant des niveaux d'énergie plus élevés à la côte sans pour autant modifier la distribution des vagues mesurées plus au large.

6.3 Évaluation de la modification du régime morphodynamique du haut-estran lié au positionnement des ouvrages

Cette section présente les courbes de dépassement des niveaux d'eau atteints 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 formulation 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.

6.3.1 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 d'ouvrage est situé à +3,71 m d'altitude (CGVD28).

La courbe de dépassement (figure 134) indique que la cote maximale atteinte par les vagues est de 4,4 m au-dessus du niveau moyen des mers (CGVD28), avec un niveau d'eau statique maximum de 3,83 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). Le *runup* a atteint ou dépassé le pied de l'ouvrage (+ 3,7m NMM) durant 5h40 pour une durée de mesure de 3 797 heures (durée de submersion du capteur situé à +1,3 m NMM). Le niveau le plus haut est situé 0,6 m au-dessus du pied de l'ouvrage.

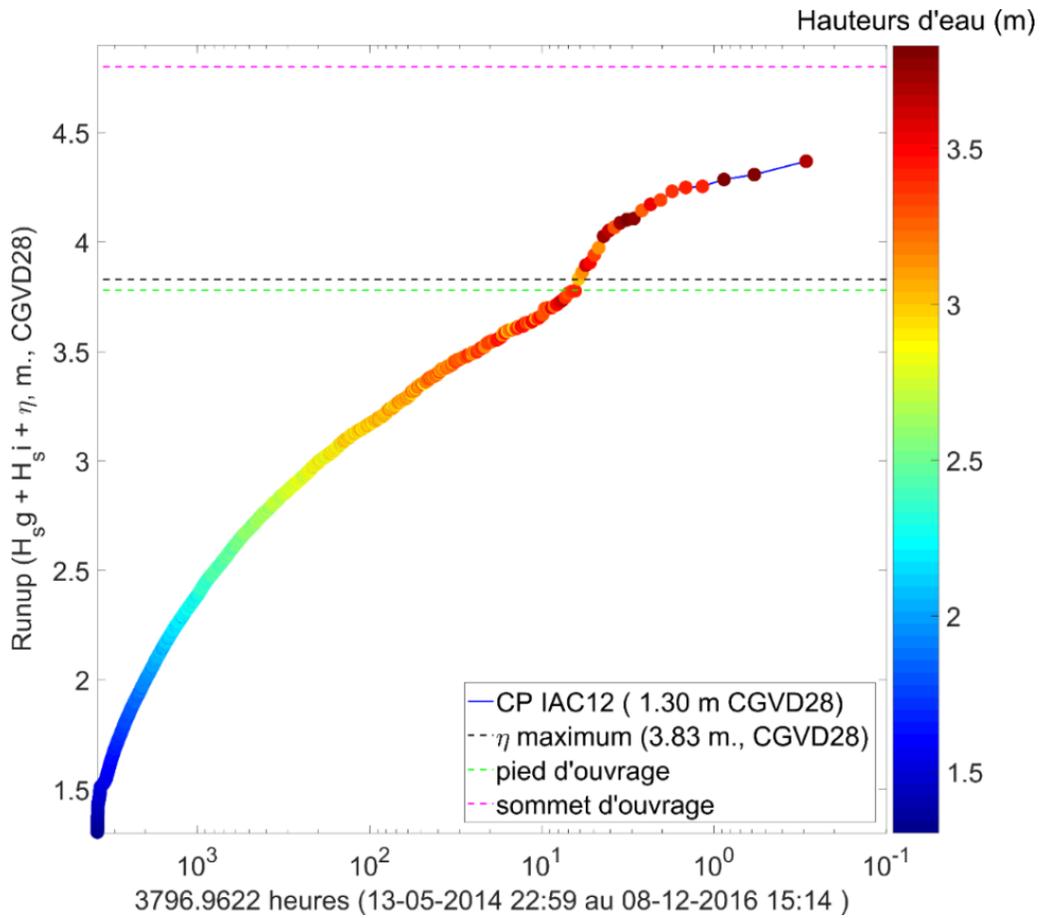


Figure 134. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut estran du profil 1 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

6.3.2 Profil 2 (naturel)

La courbe de dépassement (figure 135) indique que la cote 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 (marée astronomique + surcote). Le *runup* n'a pas atteint la base de la microfalaise d'érosion observée en haut de plage (+4,31 m).

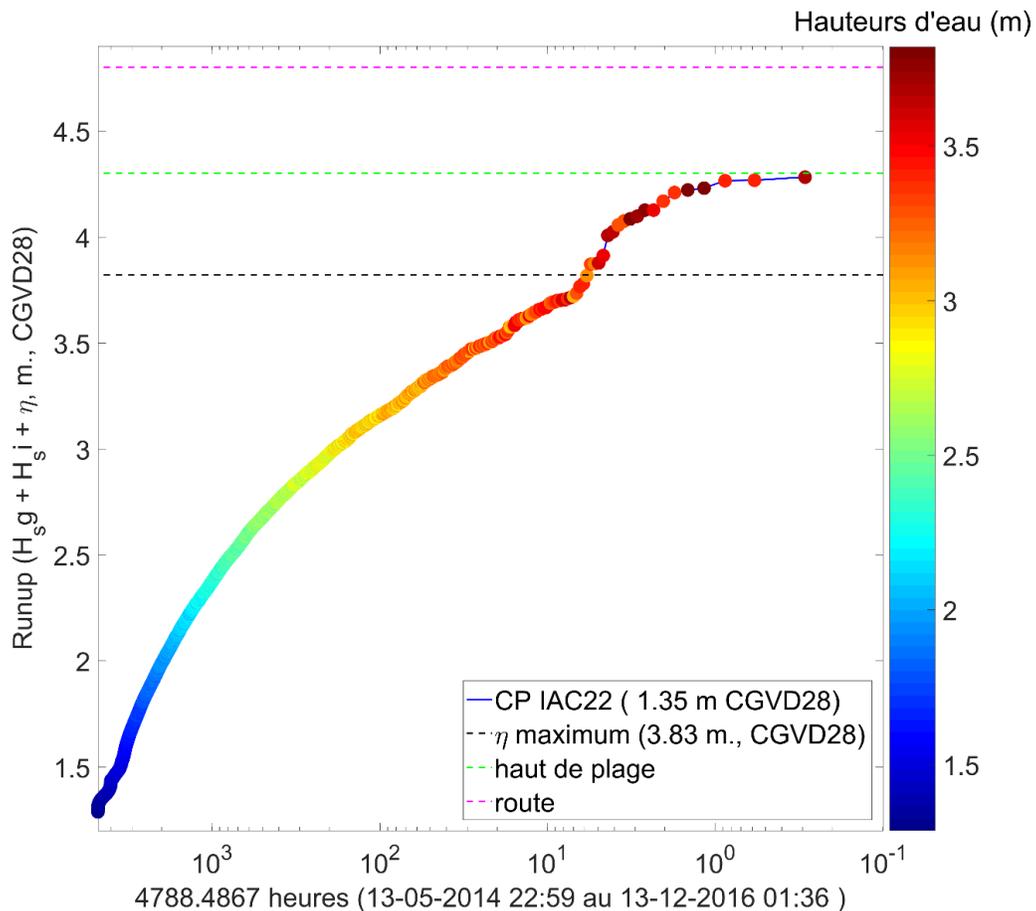


Figure 135. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 2 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

6.3.3 Profil 3 (naturel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 3 (figure 136) indique que la cote 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 (marée astronomique + surcote). Le *runup* a dépassé le sommet de la berme marquant la limite amont du haut estran (+4,2 m) durant 2h30 sur 5 232 heures d'immersion du capteur 3.2.

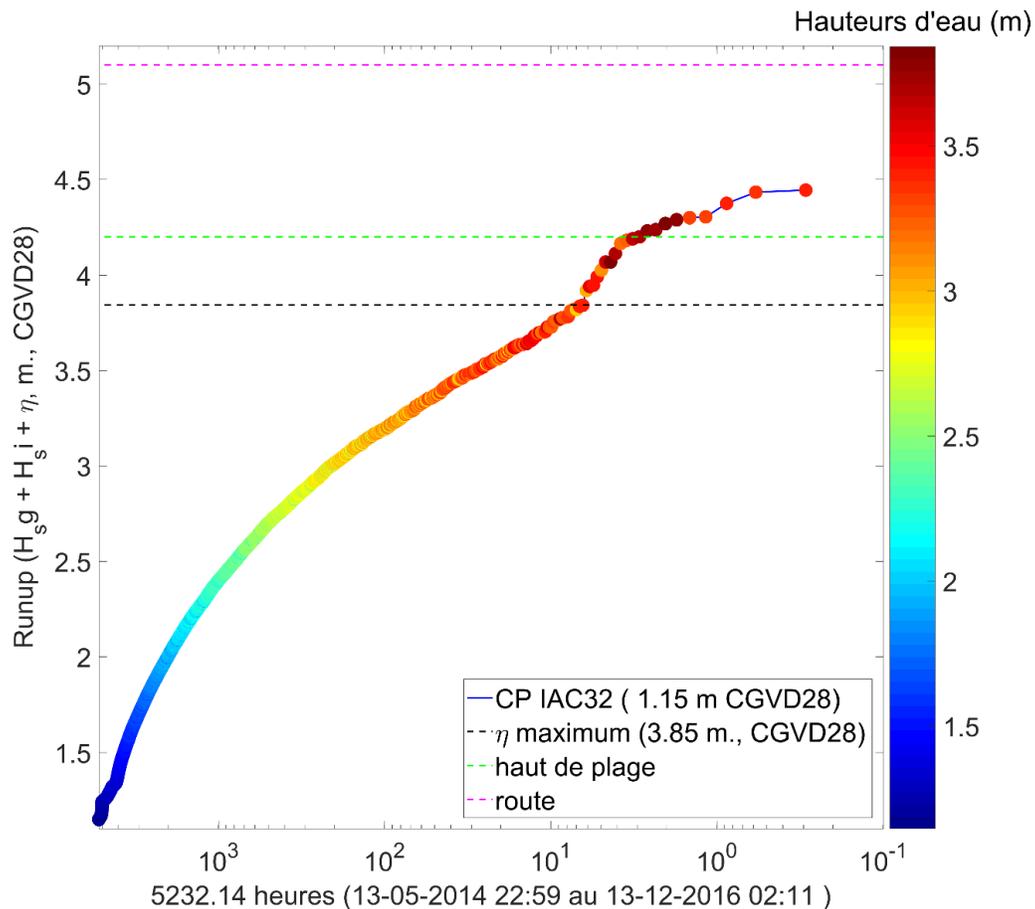


Figure 136. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 3 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

6.3.4 Profil 4 (déjà artificiel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 4 (figure 137) indique que la cote 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 3,83 m, non concomitant (marée astronomique + surcote). 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.

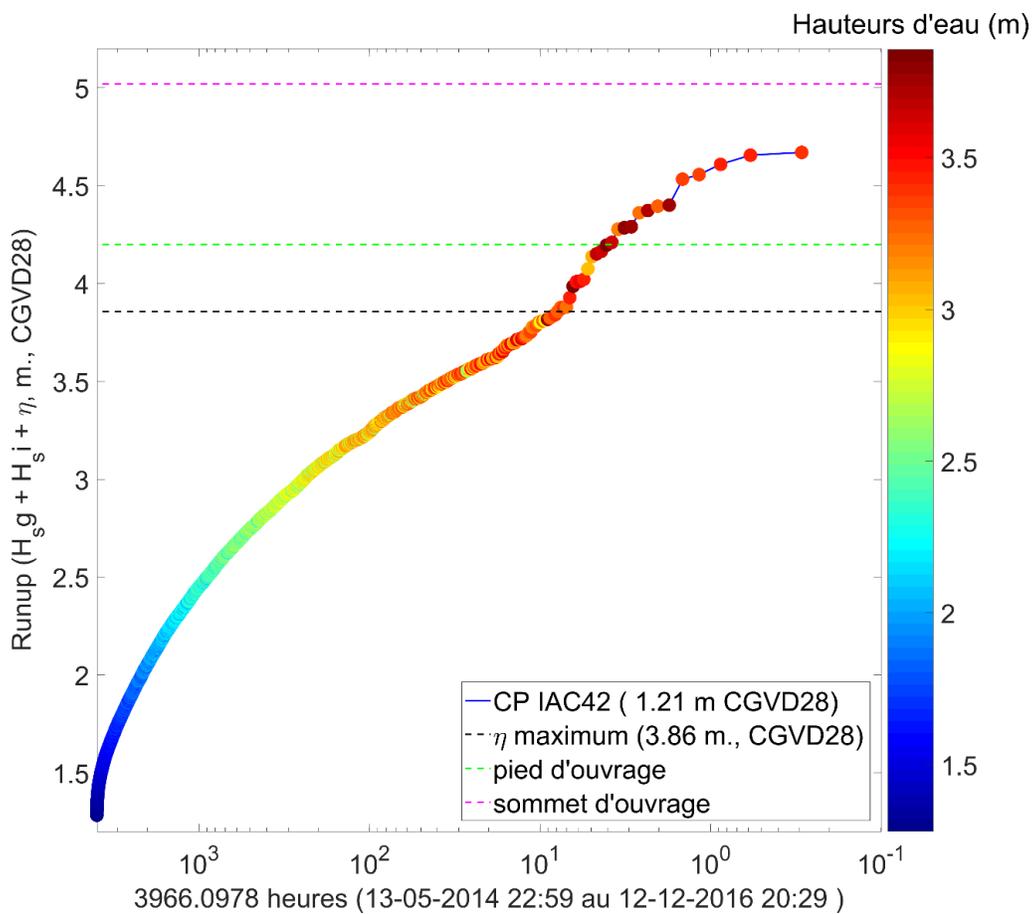


Figure 137. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 4 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

6.3.5 Profil 5 (artificiel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 5 (figure 138) indique que la cote 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 (marée astronomique + surcote). Le *runup* a atteint le pied de l'enrochement qui protège la route positionné 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.

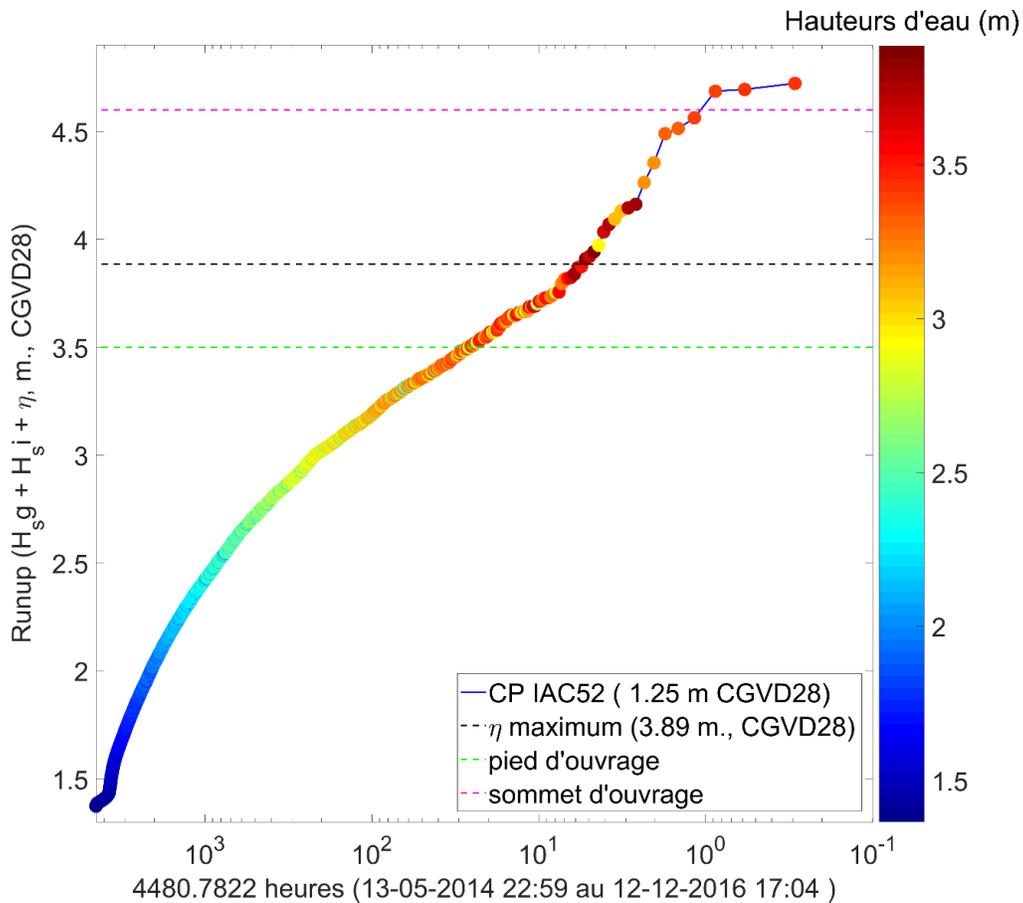


Figure 138. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 5 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

6.3.6 Profil 6 (naturel)

La courbe de dépassement produite pour le profil 6 (figure 139) indique que la cote 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 (marée astronomique + surcote). 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 *runup* 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.

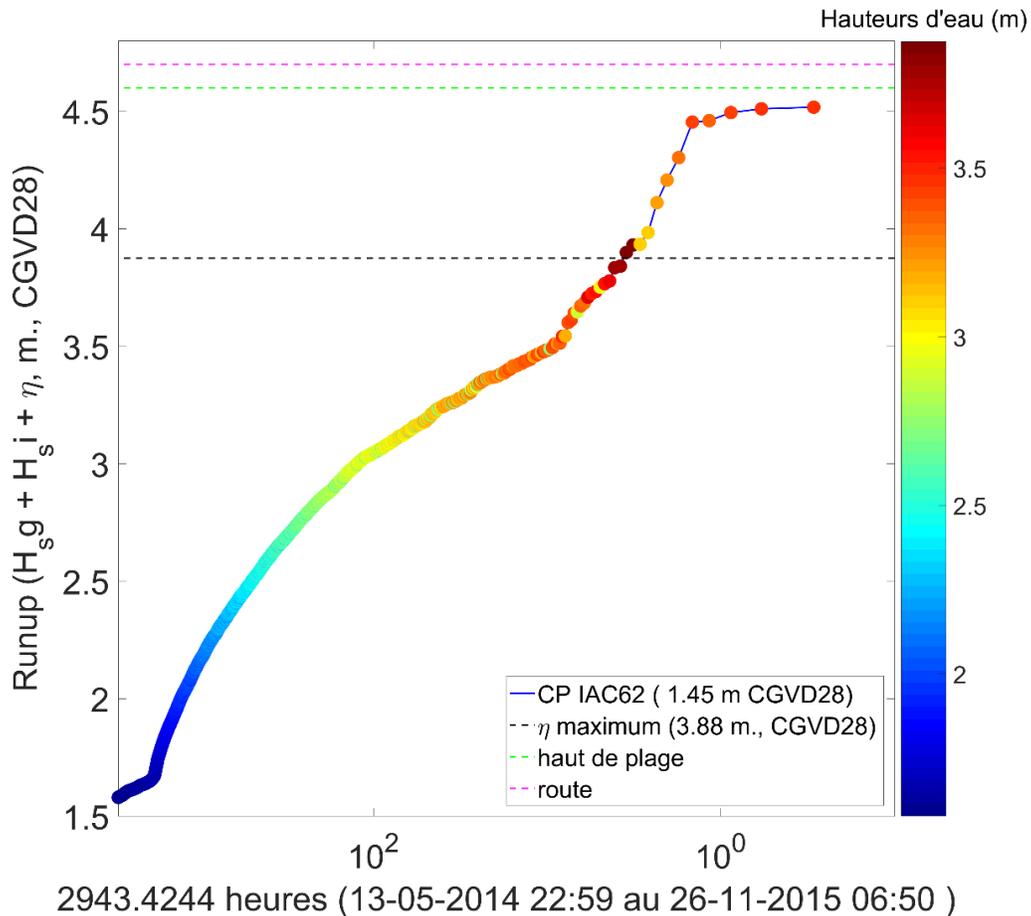


Figure 139. Courbe de dépassement des niveaux d'eau atteints par les vagues sur le haut-estran du profil 6 (*runup* calculé) intégrant la marée instantanée et l'effet des ondes d'infragravité.

6.3.7 Synthèse

Pour les six profils suivis, les plus fortes valeurs d'érosion verticale sont observées devant les trois profils équipés d'un ouvrage de défense construit sur la section supérieure du haut estran. Les données hydrodynamiques montrent que si les aménagements des profils 2 et 4 ne sont pas atteints par les variations statiques (marée astronomique + surcote) du plan d'eau, l'addition des dynamiques de vagues permet d'expliquer les évolutions observées au pied de ces aménagements, particulièrement lors des tempêtes du 27 novembre 2014.

La conjonction d'une surcote barométrique, des hautes mers de vives-eaux et de fortes vagues est à l'origine de l'érosion observée en pied des ouvrages. Cet événement a contribué à redistribuer sur le bas de l'estran les sédiments excavés lors de la construction qui avaient été déposés au pied de l'ouvrage (profils 1, 5, 7 et 8).

Même si l'on ne peut pas évoquer un effet dommageable des ouvrages sur la stabilité des profils artificialisés – les sédiments érodés étant issus d'apports externes lors de la construction – il est à noter que les profils témoins, non-aménagés, n'ont pas montré d'évolution aussi importante.

Il est également important de noter que les évolutions observées au pied des ouvrages sont le résultat d'événements statistiquement rares. Cela démontre la fragilité d'un milieu adapté à un fonctionnement morphodynamique de faible intensité.

Les évolutions négatives observées ont principalement lieu entre novembre 2014 et mai 2015. Les variations morphologiques négatives observées durant cette période ne sont pas compensées lors de l'été 2015. Néanmoins, sur les sites aménagés, ces évolutions négatives sont principalement imputables à la redistribution du matériel sédimentaire positionné artificiellement sur les ouvrages et en pied d'ouvrage lors des travaux de l'automne 2014.

Compte-tenu de la rareté des occurrences de tempête et de leurs impacts observés sur les stocks sédimentaires en pied d'ouvrage lorsqu'il y a contact avec le jet de rive des vagues, un suivi continu du milieu pour les années à venir est tout de même recommandé, du moins pour les profils 1, 4 et 5.

6.4 Quantifier les effets de la géomorphologie de l'estran sur les conditions de niveaux d'eau et de vagues à la côte

La variabilité de la distribution des hauteurs significatives de vagues (H_{m0}) entre le large et la côte est due à plusieurs phénomènes physiques :

- la réfraction des vagues sur le fond ;
- la dissipation de l'énergie des vagues par friction sur le fond puis déferlement ;
- les transferts d'énergie non-linéaires entre les différentes bandes de fréquence du spectre ;
- l'effet de la modulation tidale sur ces phénomènes.

La réfraction est un phénomène linéaire lié à la géométrie des fonds (pente et orientation) qui affecte les ondes courtes de la même manière, quelle que soit la profondeur, dès que la profondeur est inférieure à $\frac{1}{2}$ longueur d'onde ($L_0/2$). La dissipation par friction sur le fond est variable en fonction des paramètres de vagues et du niveau d'eau. Des modélisations montrent que ce phénomène devient sensible à partir de -2 m de profondeur pour des vagues de $H_{m0} = 1,5$ m, $T_p = 6$ s. On considère que la dissipation par déferlement devient active à partir d'une profondeur limite telle que $d = 0,73 H_{m0}$.

Pour évaluer le rôle de la morphologie des fonds de l'avant-côte proximale, on compare donc de proche en proche, du large vers la côte, les valeurs des données de hauteur significative (H_{m0}) produites simultanément par les différents capteurs d'un même profil morphodynamique. Cette section présente les résultats obtenus pour les ondes incidentes (ondes courtes, $1 \text{ s} < T < 18 \text{ s}$), les résultats obtenus pour les ondes d'infragravité (ondes longues, $18 \text{ s} < T < 200 \text{ s}$) seront présentés ultérieurement.

Les horloges internes des instruments étant synchronisées lors du déploiement, les séries chronologiques de vagues issues de chaque capteur sont également synchronisées. Pour un pas de temps donné, chaque caractéristique de H_{m0} pour chaque instrument et position est issue exactement de l'analyse du même échantillon de 1 024 s. Les distances entre les instruments aux différentes positions étant petites relativement à la vitesse de propagation des vagues, on peut donc suivre l'évolution des caractéristiques de vagues du large vers la côte pour chaque pas de temps.

Afin de mesurer l'influence de la morphologie des fonds sur la variabilité du climat de H_{m0} , on compare les distributions statistiques des données de H_{m0} produites simultanément pour chaque couple d'instruments adjacents, pour les deux bandes de fréquences considérées (gravitaires et infragravitaires). Les distributions sont ordonnées sous forme de courbes de fréquences cumulées, aussi appelées courbes de dépassement. Des régressions linéaires sont ensuite

calculées à partir de diagrammes quantile-quantile (mise en relation graphique des distributions de H_{m0} à la position de chaque capteur), les coefficients des droites de régression permettant de quantifier la probabilité d'amortissement des H_{m0} d'une position à l'autre. Cette approche intègre donc la totalité des termes physiques affectant l'évolution des hauteurs de vagues du large à la côte (réfraction, dissipation par friction sur le fond, par déferlement et effet de la modulation tidale sur ces termes).

6.4.1 Amortissement des hauteurs de vagues sur la plateforme des basses-mers (-2 à -1 m CGVD28)

La plateforme des basses-mers (PFBM ou zone sablo-vaseuse) correspond à la surface d'estran seulement découverte durant les basses-mers. Elle constitue une surface subhorizontale de pente très faible (0,3 – 0,125%). En raison de sa profondeur importante et du climat modéré de vague qui affecte l'île aux Coudres, cette surface contribue principalement à l'amortissement par réfraction des hauteurs de vagues. En raison de son extension (plus de 800 m par endroit sur l'île), elle contribue majoritairement à une dissipation non-turbulente de l'énergie des vagues atteignant la côte.

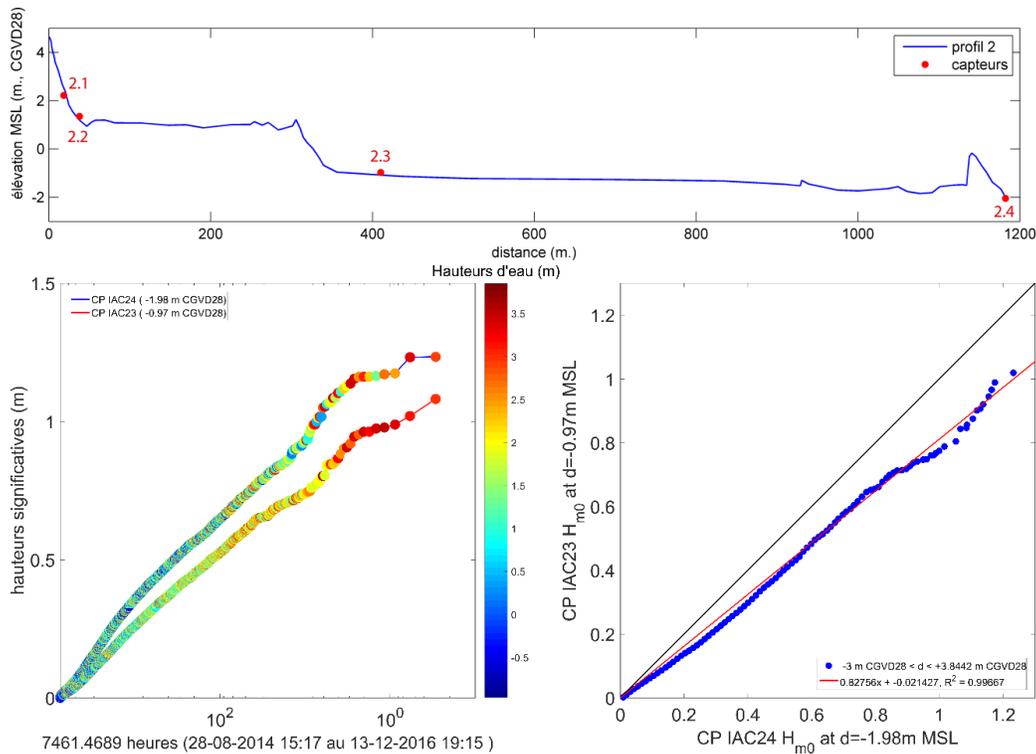


Figure 140. a. morphologie et position des capteurs du profil 2, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 2.4 et 2.3 pour les années 2014, 2015 et 2016.

Au niveau du profil 2 (figure 140a), là où l'extension de la PFBM est la plus importante, l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 2.4 situé à -1,98 m CGVD28 (NMM) à l'extrémité sud-est (offshore) du profil, et le capteur 2.3 (-0,97 m CGVD 28) situé au pied de l'escarpement du niveau marin moyen. Cet amortissement est de 18 %. Cette valeur est homogène pour toute la distribution (figure 140b).

6.4.2 Effet de l'escarpement du niveau marin moyen

La PFBM est connectée à la plateforme rocheuse des hautes-mers par un escarpement structural présent sur la quasi-totalité du littoral sud de l'île. Cet escarpement est caractérisé par une cambrure forte (2,4 % en moyenne), potentiellement responsable de la réflexion vers le large d'une proportion de l'énergie des ondes incidentes des vagues. Afin d'isoler ses effets sur la distribution de l'énergie des vagues se propageant vers la côte, des capteurs ont été positionnés immédiatement à l'amont et à l'aval de cette structure.

Au niveau du profil 1 (figure 141a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 1.3b, situé à -1,32 m CGVD28 (NMM) en aval de l'escarpement, et le capteur 1.3a (1,13 m CGVD 28), distant de 165 m, situé au sommet de l'escarpement du niveau marin moyen. Cet amortissement est de 21 %. Cette valeur est homogène pour toute la distribution (figure 141b).

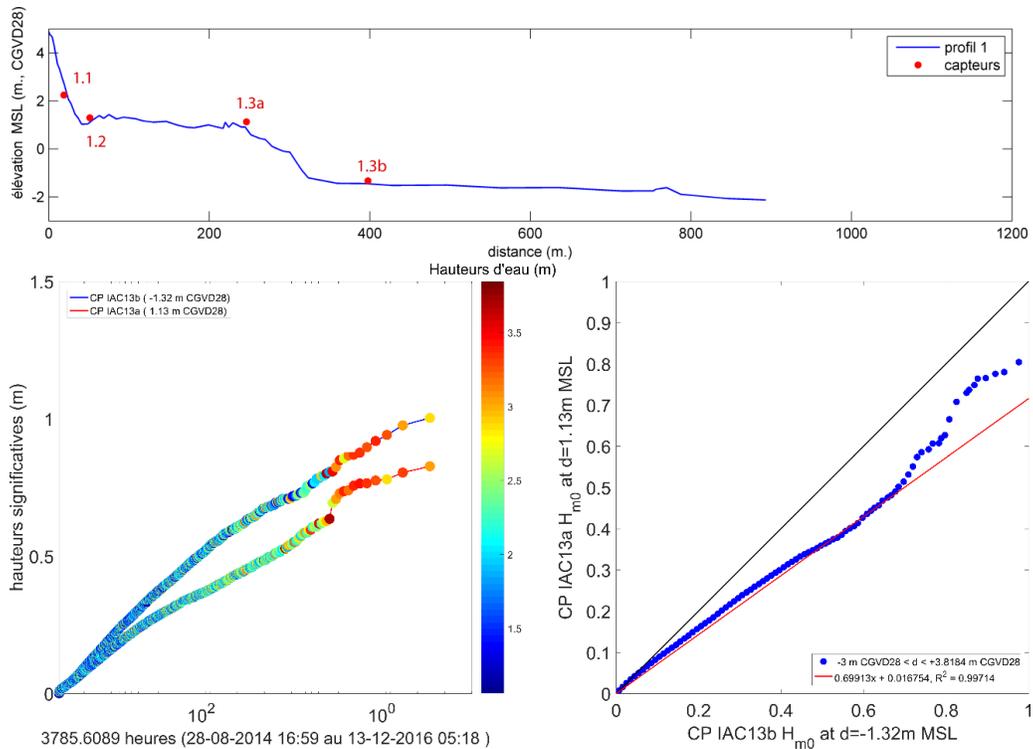


Figure 141.a. morphologie et position des capteurs du profil 1, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3b et 1.3a pour les années 2014, 2015 et 2016.

Au niveau du profil 3 (figure 142a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 3.3b, situé à -1,8 m CGVD28 (NMM) en aval de l'escarpement, et le capteur 3.3a (1,16 m CGVD 28), distant de 180 m, situé au

sommet de l'escarpement du niveau marin moyen. L'amortissement est hétérogène : il est de 32,5% pour les vagues inférieures à 0,7 m mesurées au capteur 3.3b tandis que pour les vagues supérieures à 0,7m, l'amortissement est plus faible à 20 % en moyenne (figure 142b).

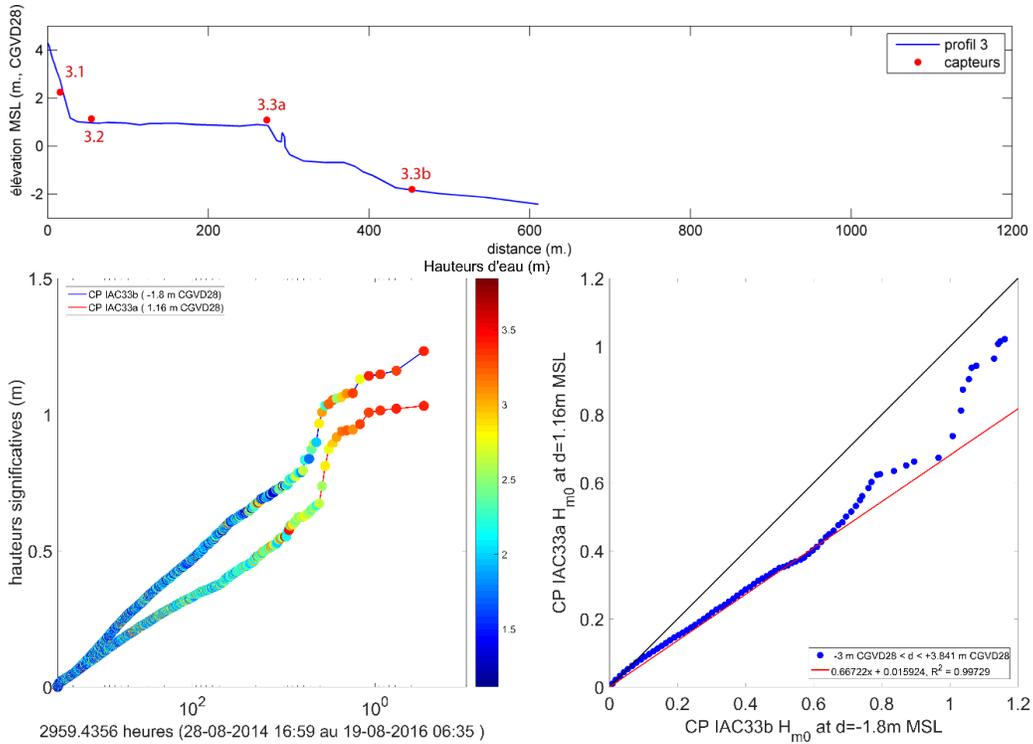


Figure 142. a. morphologie et position des capteurs du profil 3, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3b et 3.3a pour les années 2014, 2015 et 2016.

6.4.3 Amortissement des hauteurs de vagues sur la plateforme des hautes-mers (+ 1m CGVD 28)

La plateforme des hautes-mers (PFHM) correspond à la surface d'estran seulement recouverte durant la marée haute. Elle constitue une surface rocheuse subhorizontale de pente très faible voire nulle. En raison de sa profondeur faible, 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 (figure 143a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 1.3a situé à 1,3 m CGVD28 (NMM), au sommet de

l'escarpement du niveau marin moyen, et le capteur 1.2 (1,16 m CGVD 28), distant de 220 m et situé au niveau de la flexure (rupture de pente entre le haut estran et la PFHM). L'amortissement est hétérogène, il est de 50 % pour les vagues inférieures à 0,5 m mesurées au capteur 1.3a, les vagues supérieures à 0,7 m présentant un amortissement plus faible, de 13% en moyenne (figure 143b).

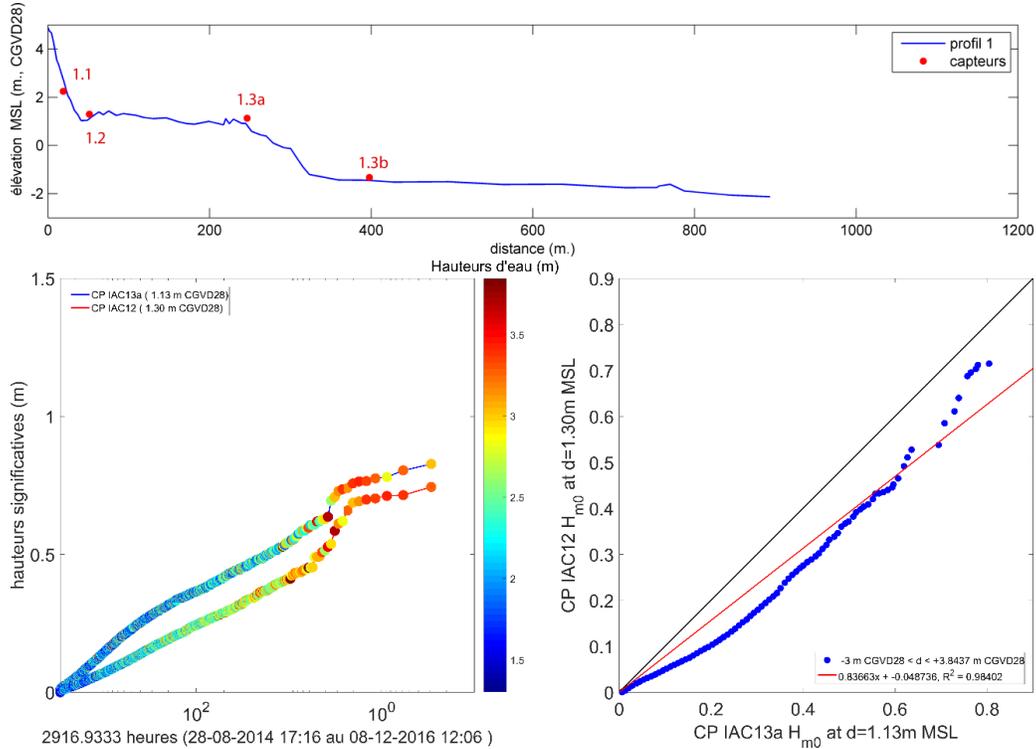


Figure 143. a. morphologie et position des capteurs du profil 1, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 1.3a et 1.2 pour les années 2014, 2015 et 2016.

Au niveau du profil 2 (figure 144a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 3.3a situé à 1,16 m CGVD28 (NMM), au sommet de l'escarpement du niveau marin moyen, et le capteur 3.2 (1,15 m CGVD 28) situé au niveau de la flexure (rupture de pente entre le haut estran et la PFHM), distant de 200 m. L'amortissement de la distribution est globalement homogène de 16 % (figure 144b).

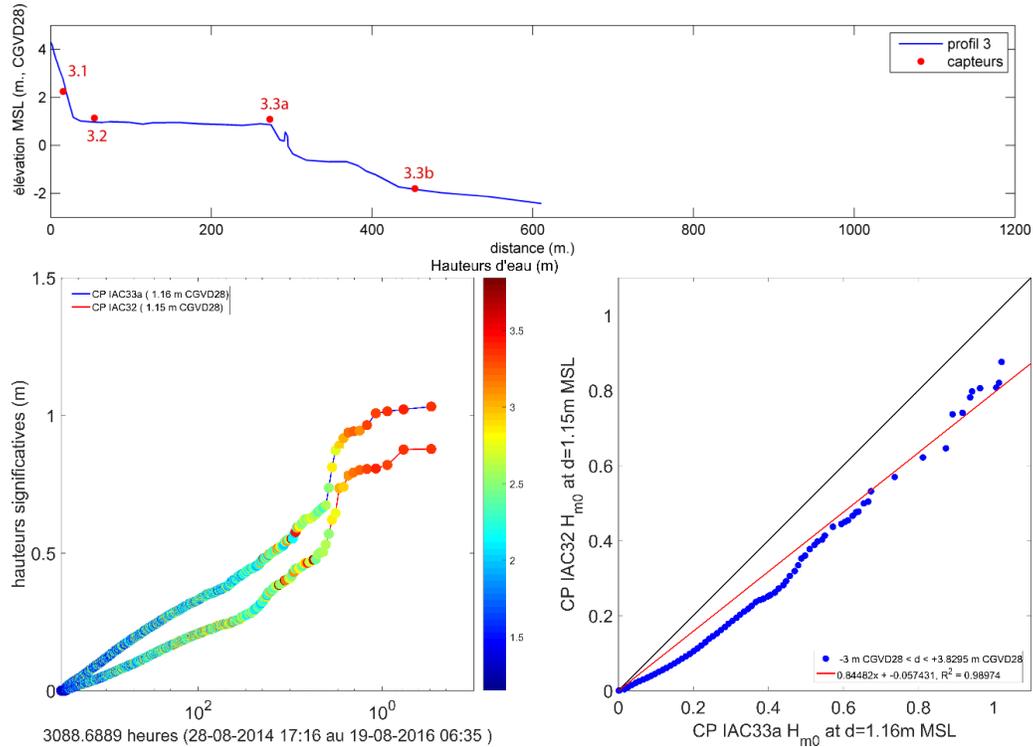


Figure 144. a. morphologie et position des capteurs du profil 3, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 3.3a et 3.2 pour les années 2014, 2015 et 2016.

6.4.4 Amortissement des hauteurs de vagues sur l'estran

Le haut estran de l'île aux Coudres est recouvert en totalité uniquement durant les pleines mers de vives-eaux. Il constitue une surface plane de pente forte et fortement réflexive (10%). 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. 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 dégâts importants.

Au niveau du profil 4 (figure 145a), l'amortissement de la distribution des H_{m0} est quantifié entre le capteur 4.2 situé à 1,21 m CGVD28 (NMM), au niveau de la

rupture de pente entre la PFHM et le haut estran (flexure), et le capteur 4.1 situé au centre du haut estran sableux, à une altitude de 2,22 m. Les deux instruments sont distants de 22,5 m. L'estran est responsable de la dissipation terminale de l'énergie des vagues, avec un taux d'amortissement de la distribution très élevé et homogène, de l'ordre de 46 % (figure 145b).

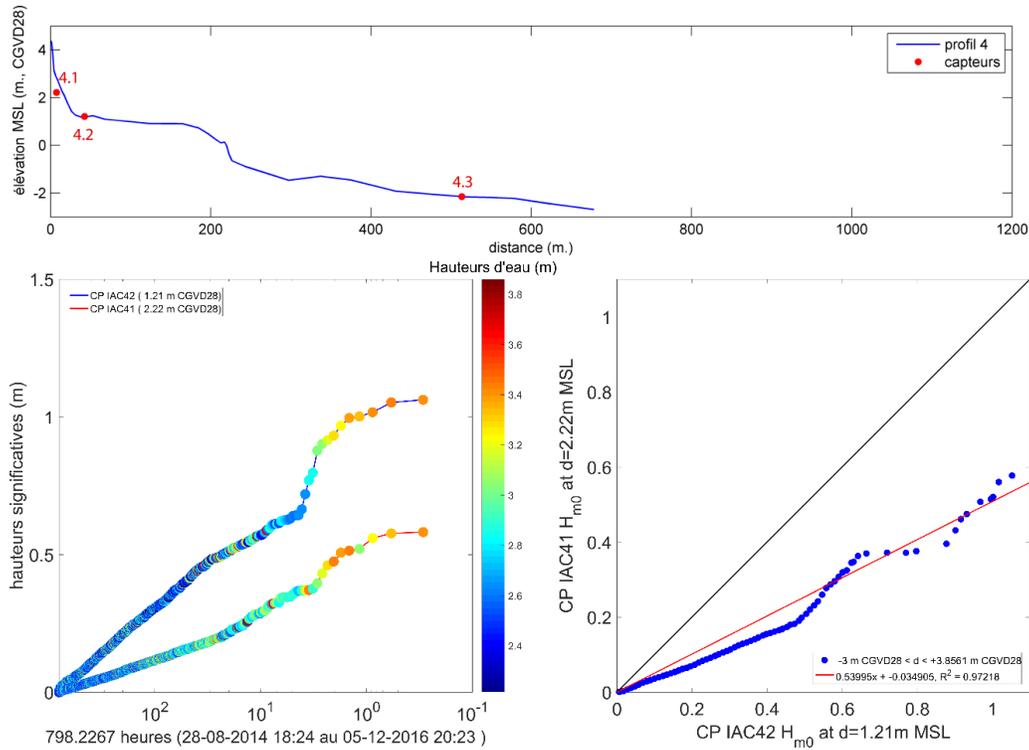


Figure 145. a. morphologie et position des capteurs du profil 3, b. courbes de dépassement synchrones et diagramme quantile-quantile des distributions de hauteurs significatives des capteurs 4.1 et 4.2.

6.4.5 Synthèse

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 (tableau 63). L'escarpement du NMM connectant les plates formes des hautes-mers et basses-mers ainsi que le haut estran présentent les taux d'amortissement ramenés à leur extension les plus élevés de l'ensemble des unités.

Tableau 63. Influence des différents secteurs morphologiques de la zone intertidale sur l'amortissement des distributions de hauteurs significatives pour les années 2014, 2015 et 2016.

	PFBM		Escarpement NMM				PFHM				Haut estran	
Capteurs	2.4	2.3	1.3b	1.3a	3.3b	3.3a	1.3a	1.2	3.3a	3.2	4.2	4.1
Profondeur (m)	- 1,98	- 0,97	- 1,32	1,30	- 1,80	1,16	1,30	1,13	1,16	1,15	1,21	2,22
H _{m0} moyenne (m)	0,17	0,14	0,13	0,08	0,13	0,06	0,08	0,06	0,06	0,05	0,10	0,03
H _{m0} max (m)	1,23	1,08	1,00	0,82	1,23	1,03	0,83	0,74	1,03	0,87	1,06	0,59
Distance entre les instruments (m)	800,00		165,00		180,00		220,00		200,00		22,50	
Différence de profondeur entre les instruments (m)	1,01		2,62		2,96		-0,17		-0,01		1,01	
Coefficients d'amortissement (petites vagues)	0,82		0,79		0,67		0,60		0,84		0,51	
Coefficients d'amortissement (grandes vagues)					0,84		0,90					
Taux d'amortissement ramené à la distance (%/m)	-0,10		-0,48		-0,37		-0,27		-0,42		-2,27	
					-0,47		-0,41					

7. PROPOSITION D'UNE APPROCHE DE GESTION DES STOCKS SÉDIMENTAIRES

La figure 146 présente les trois cellules hydrosédimentaires observées dans la zone d'étude.

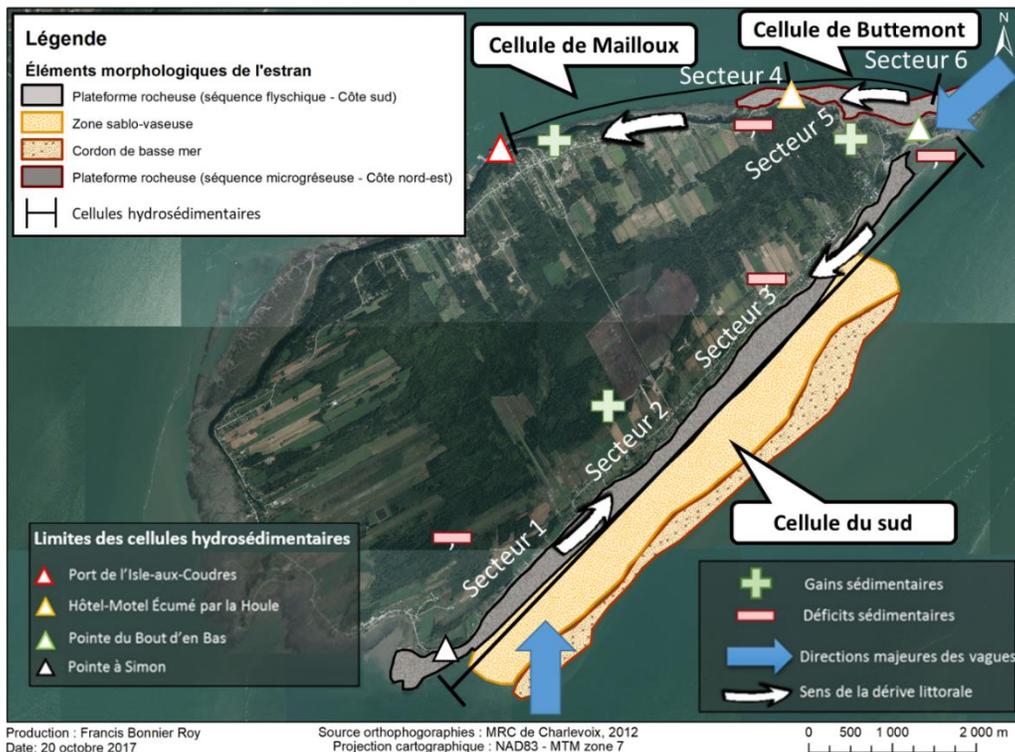


Figure 146. Cellules hydrosédimentaires des zones à l'étude de l'île aux Coudres.

La première cellule de Mailloux 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, cellule de Buttemont. Cette dernière cellule est située entre le promontoire de l'Hôtel-Motel et la Pointe du Bout d'en Bas. Ainsi, les vagues les plus importantes provenant du nord-est orientent le sens dominant de la dérive littorale soit de l'est vers l'ouest.

Au sud, une seule cellule est en place, régie par les vagues provenant du sud et du nord-est qui engendrent une dérive littorale convergente. Ces deux dérives littorales convergentes amènent un démaigrissement des plages aux extrémités du côté sud, tandis que le centre connaît des gains sédimentaires.

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) ont été suffisantes pour assurer une viabilité à long terme du stock sédimentaire. Brodeur et Allard (1983) mentionnent que le taux d'érosion de la plateforme rocheuse serait situé entre 0,22 et 0,53 cm/an au cours des derniers siècles. Puisqu'une grande proportion des matériaux schisteux de la plage provient de la plateforme rocheuse, il est possible d'affirmer que la plage actuelle ait été formée, entre autre, 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. 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 sédiment 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. De plus, une plage plus large et volumineuse permet de réduire l'énergie des vagues et limiter le franchissement des enrochements par les vagues. Cet ajout en sédiment serait aussi bénéfique aux côtes adjacentes par la redistribution des sables par la dérive littorale.

8. CONCLUSION GÉNÉRALE

Les ouvrages de l'île aux Coudres ne sont susceptibles d'avoir une action sur la morphodynamique que lors de conjonctions 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. Ainsi, à moyen terme, ils sont susceptibles d'être affouillés par les vagues et deviendront des zones où la sédimentation est impossible. Ce phénomène (*dike scouring*) est connu et bien documenté (Burcharth et Hughes, 2002) et peut potentiellement contribuer à déstabiliser la plage en augmentant la dissipation turbulente et la réflexion des vagues percutant l'ouvrage, voire même le déchausser. Jusqu'à l'automne 2015, ce phénomène 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 limitée le phénomène d'affouillement et de réflexion des vagues. Cette pratique devrait être préconisée lorsque des enrochements sont implantés en bordure de côtes basses de sable et de gravier au Québec. Les sédiments déplacés par les vagues de tempêtes ayant atteint les ouvrages étant excédentaires relativement au budget pré-aménagement. Une surveillance accrue des secteurs où le phénomène est avéré est à recommander. Il a été montré que les stocks sédimentaires déposés au pied de l'ouvrage se sont déposés dans la section inférieure du haut estran sableux et ont été redistribués le long de la côte par la dérive littorale.

Pour le secteur du Profil 1, 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 pied du haut estran. 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. L'analyse des données de 2016 quant au volume sédimentaire va permettre de voir si la faible tendance à la réduction du volume sédimentaire va se poursuivre. Les plus fortes pertes sédimentaires ont été observées en bordure des ouvrages, mais ces secteurs ont aussi enregistré des gains sédimentaires. Difficile actuellement de déterminer la présence ou l'absence d'impact sur le volume sédimentaire de la plage. 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. Les taux et coefficients d'amortissement des vagues calculés pourront servir lors de la conception d'ouvrages en bordure de plateforme rocheuse de l'estuaire moyen du Saint-Laurent.

9. RÉFÉRENCES

ANDREWS, J. T. et EBERL, D. D. 2012: Determination of sediment provenance by unmixing the mineralogy of source-area sediments: the 'SedUnMix' program. *Marine Geology* 291, 24–33.

ANDREWS, J. T., BJØRK, A. A., EBERL, D. D., JENNINGS, A. E. & 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* 30, 452–463.

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*, n. 26, p. 1237-1248.

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.

BURCHARTH, H.F., HUGHES, S. A. 2002. Fundamentals of design. Dans: Vincent, L., and Demirebilek, Z. (editors), *Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter VI-5-6, Scour and Scour Protection*. Engineer Manual 1110-2-1110, US Army Corps of Engineers, Washington D.C., U.S.

DAGNEAU, B. et LÉVESQUE, R., Poly-Géo Inc. 2009. Photo-interprétation et caractérisation de la ligne de rivage 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.

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.

Eberl, D.D. 2003, User guide to RockJock: a program for determining quantitative mineralogy from X-Ray diffraction data. United States Geological Survey, Open file report 03-78. Washington DC. 40 p.

ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA. 2017. Sommaires climatologiques mensuels [En ligne], (http://climat.meteo.gc.ca/prods_servs/cdn_climate_summary_f.html). Page consultée le 10 octobre 2017.

ISMAIL, N.M. et W., EL-SAYED. 2011. Seawall-Waves Interaction and Impact on Sediment Morphology. Conference on Coastal Engineering Practice. San Diego, United States. p. 436-448.

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., 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.

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, juillet 2014, 74 p.

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/>

PASKOFF, R. 2012. Les littoraux : Impacts des aménagements sur leur évolution (3e éd. Rév.). Paris, France : Armand Colin.

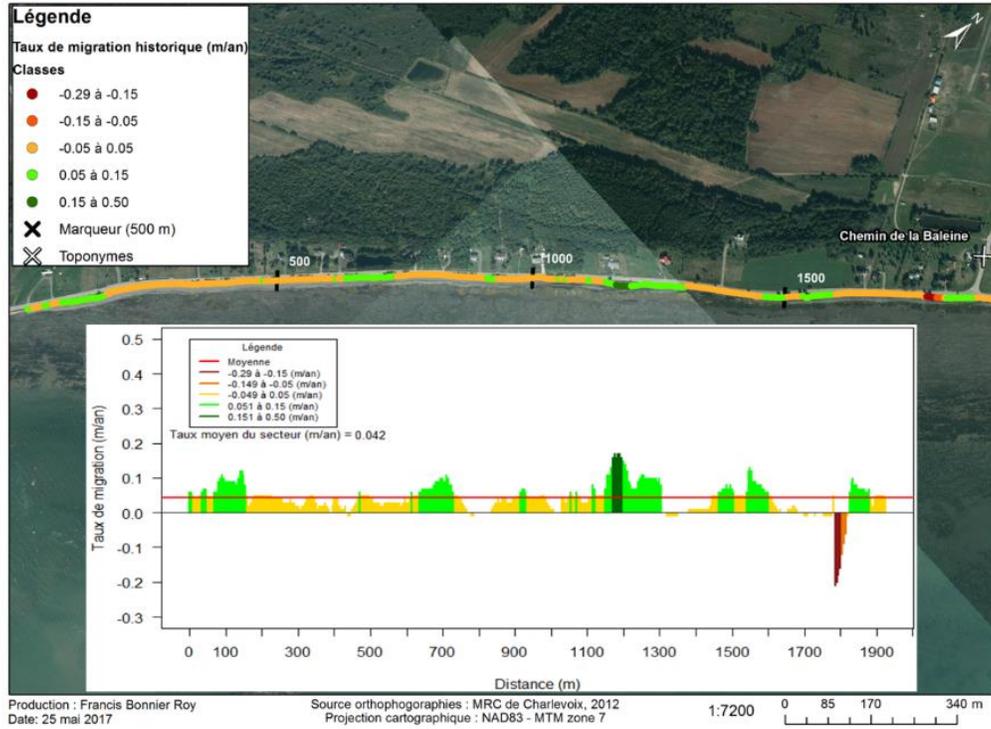
ROCHE LTÉE. 2010. Stabilisation des berges en bordure de routes à l'Isle-aux-Coudres (N° 57146-100). Étude d'impact sur l'environnement présenté au Ministère des Transports du Québec et à la municipalité de l'Isle-aux-Coudres. Québec. 107 p.

----- . 2011. Stabilisation des berges en bordure de routes à l'Isle-aux-Coudres. Étude d'impact sur l'environnement (N° 57146-100). Réponses à la deuxième série de questions du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Mai 2011. 27 p. + annexes.

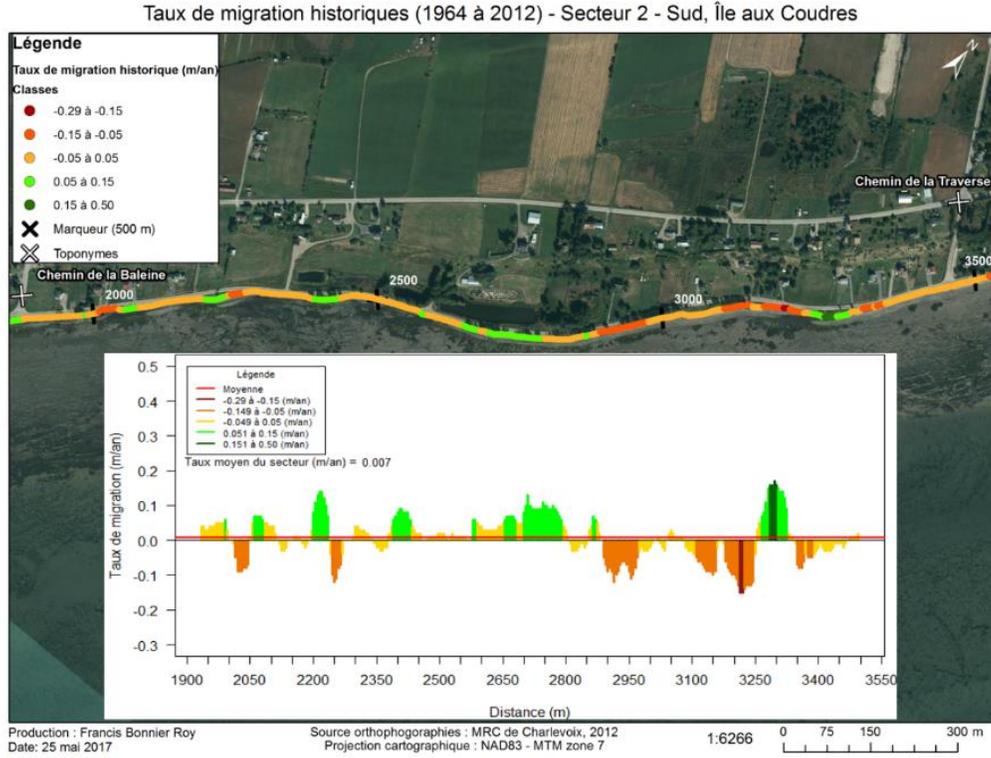
----- . 2013. Analyse et impacts des variantes de protection de berges envisagées (N° 102197.001). Rapport final présenté au Ministère du Développement durable, de l'environnement, de la Faune et des parcs, Québec. 17 p. + annexes.

ANNEXES 1 À 54

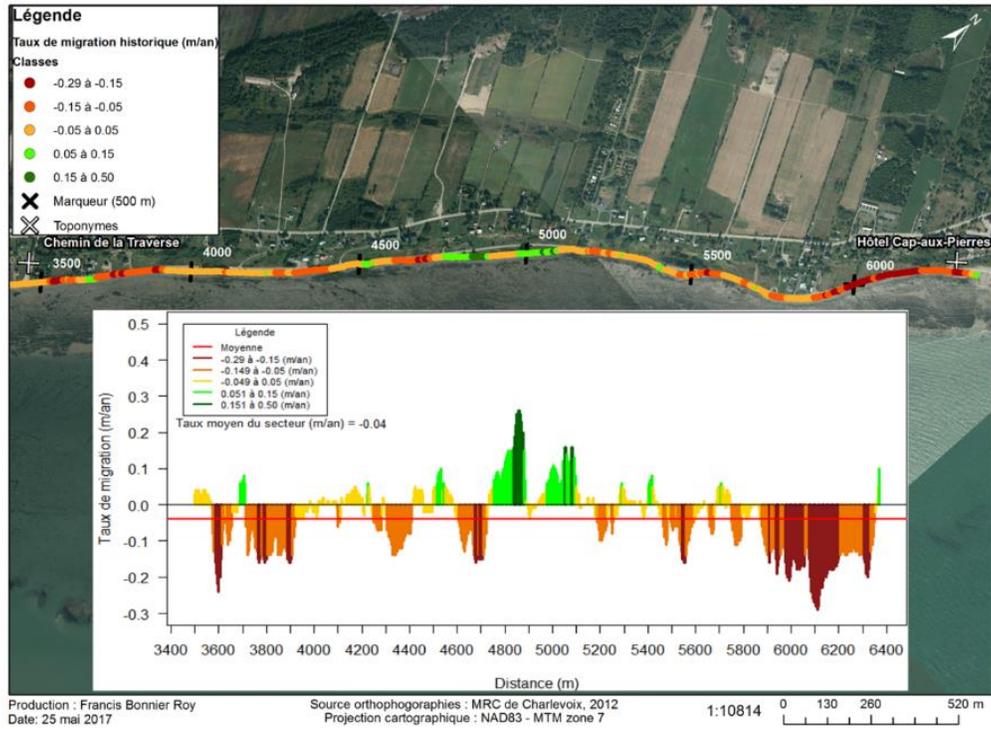
Annexe 1. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 1, côté sud.



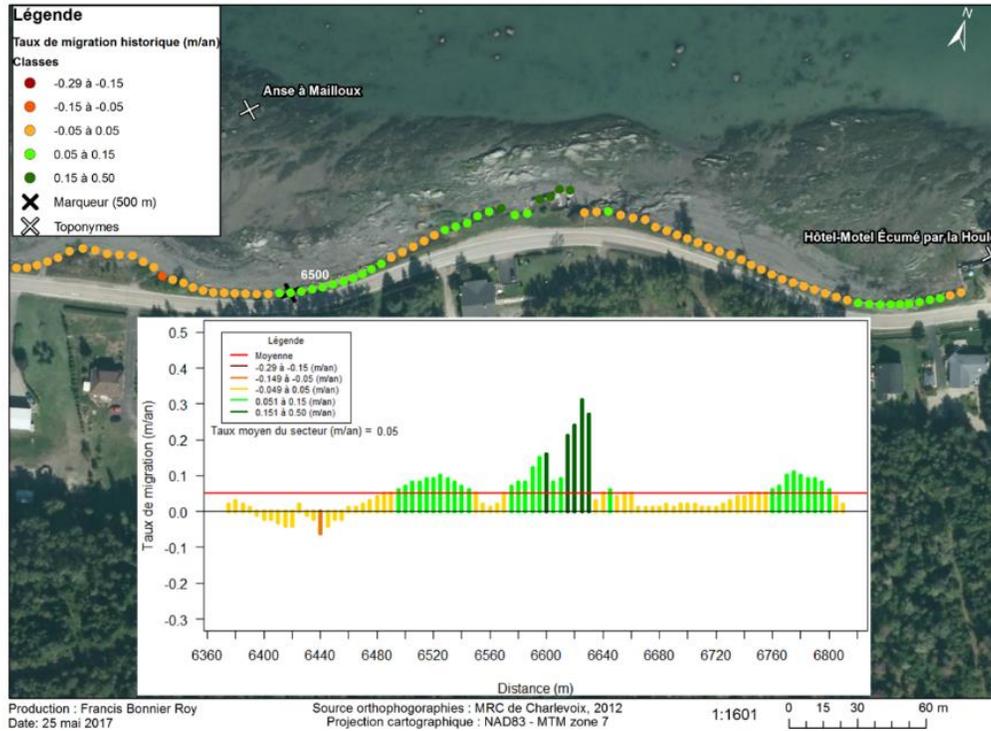
Annexe 2. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 2, côté sud.



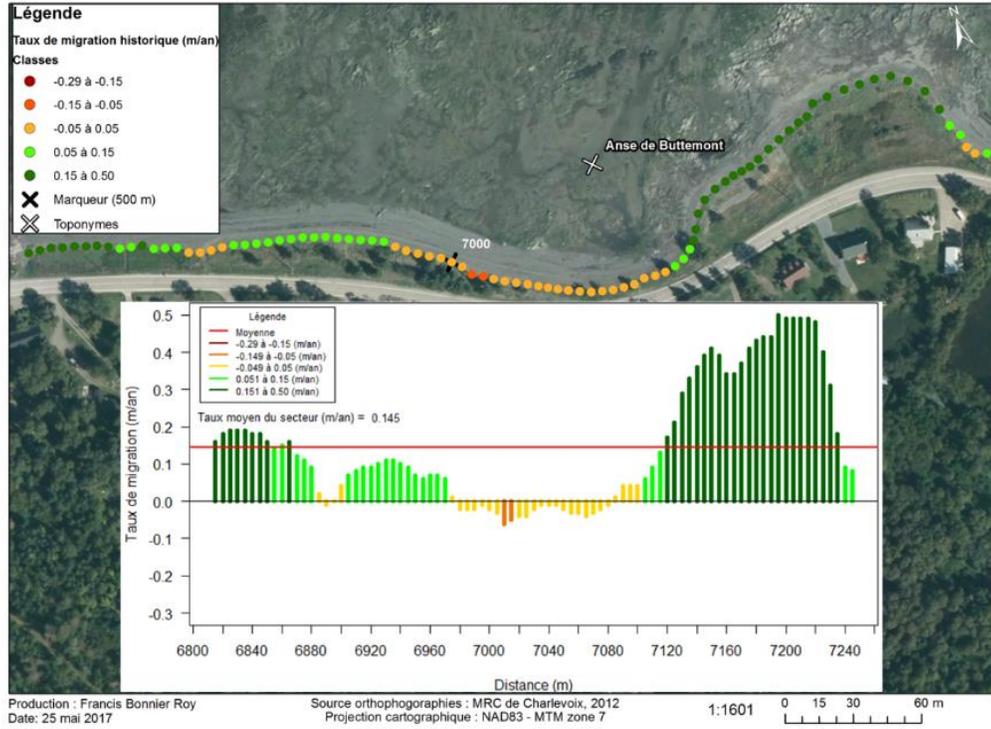
Annexe 3. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 3, côté sud.



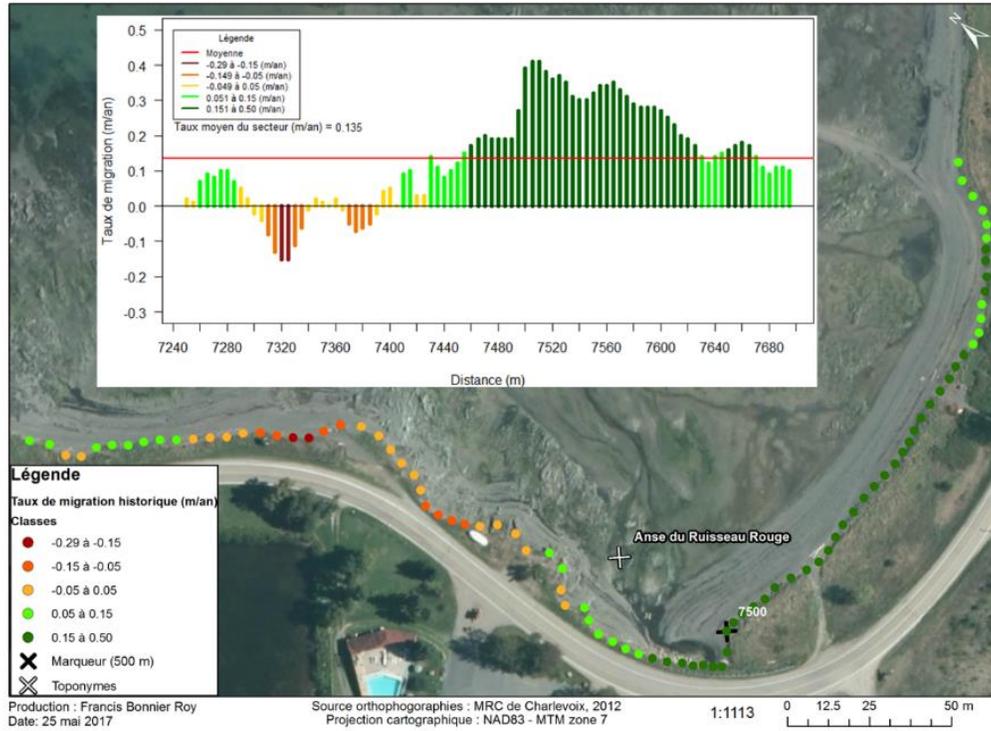
Annexe 4. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 4, côte nord-est.



Annexe 5. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 5, côte nord-est.



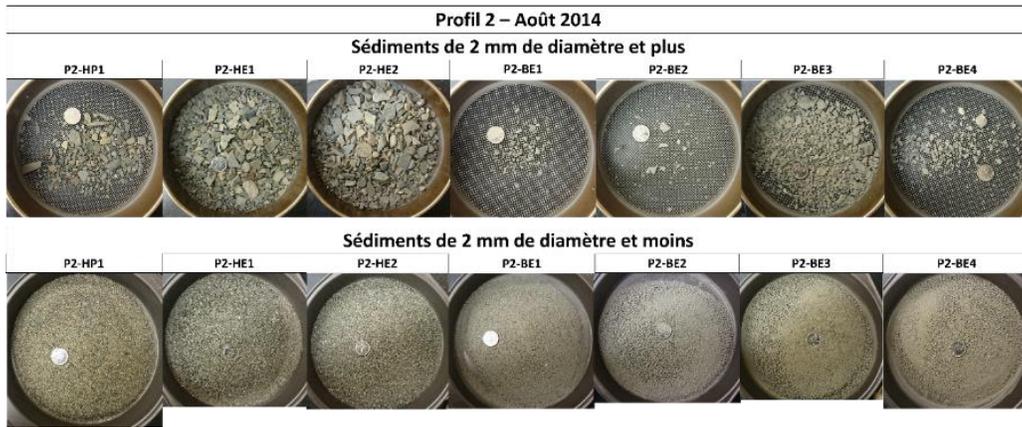
Annexe 6. Taux de migration historiques (1964 à 2012) au secteur 6, côte nord-est.



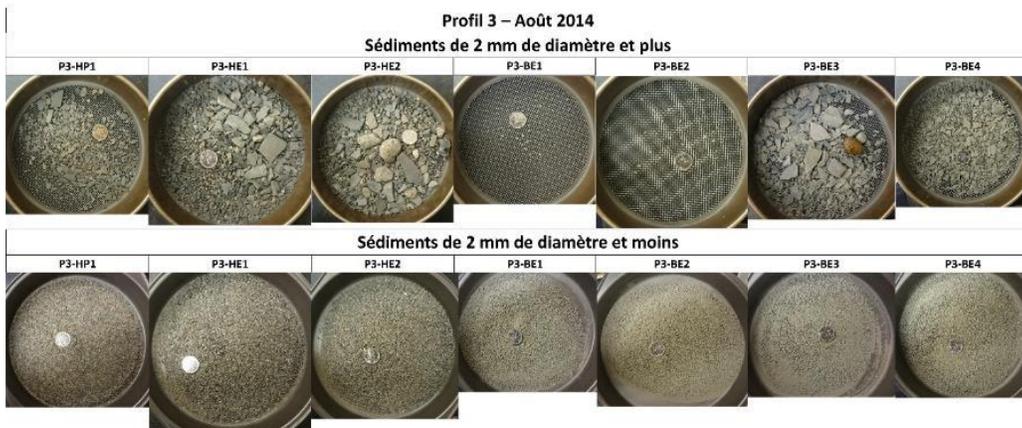
Annexe 7. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 1 - août 2014.



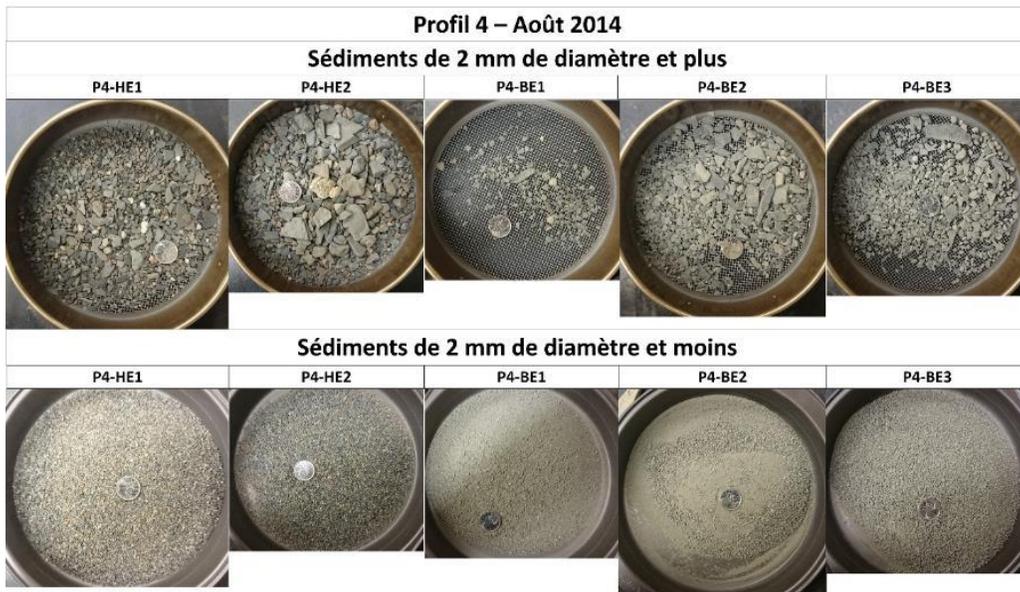
Annexe 8. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 2 - août 2014.



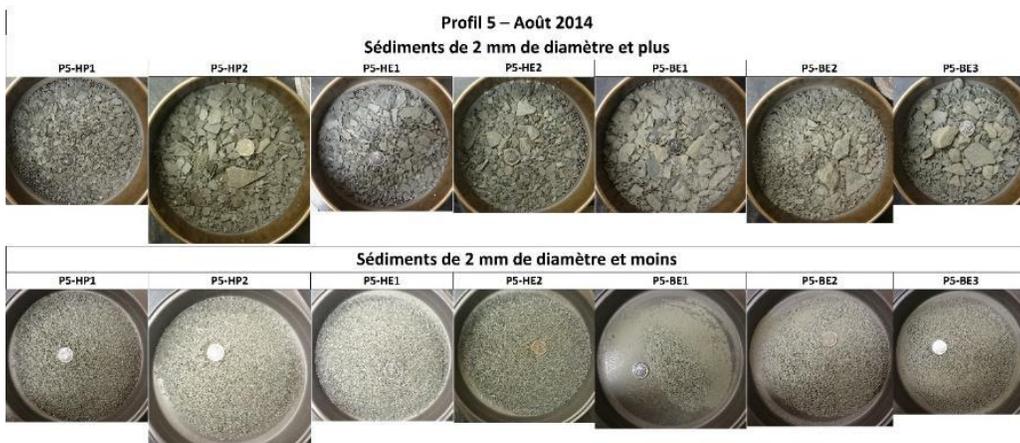
Annexe 9. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 3 - août 2014.



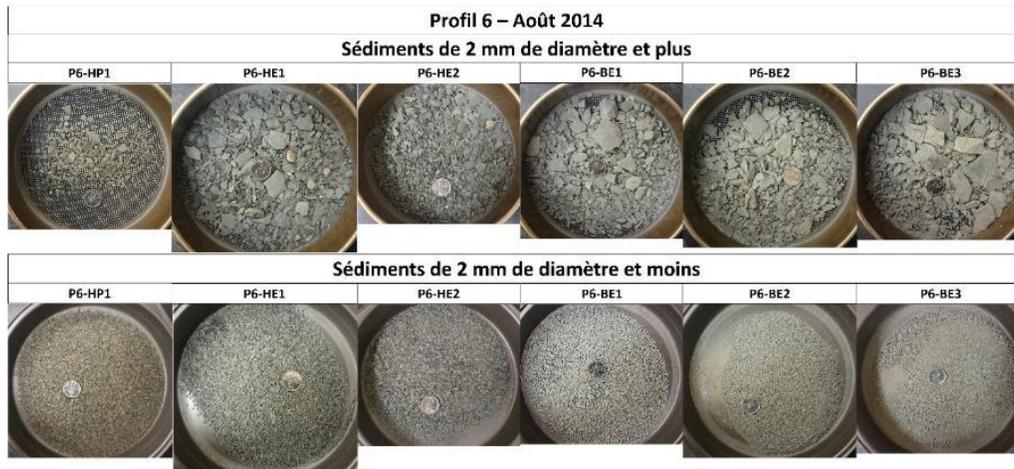
Annexe 10. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 4 - août 2014.



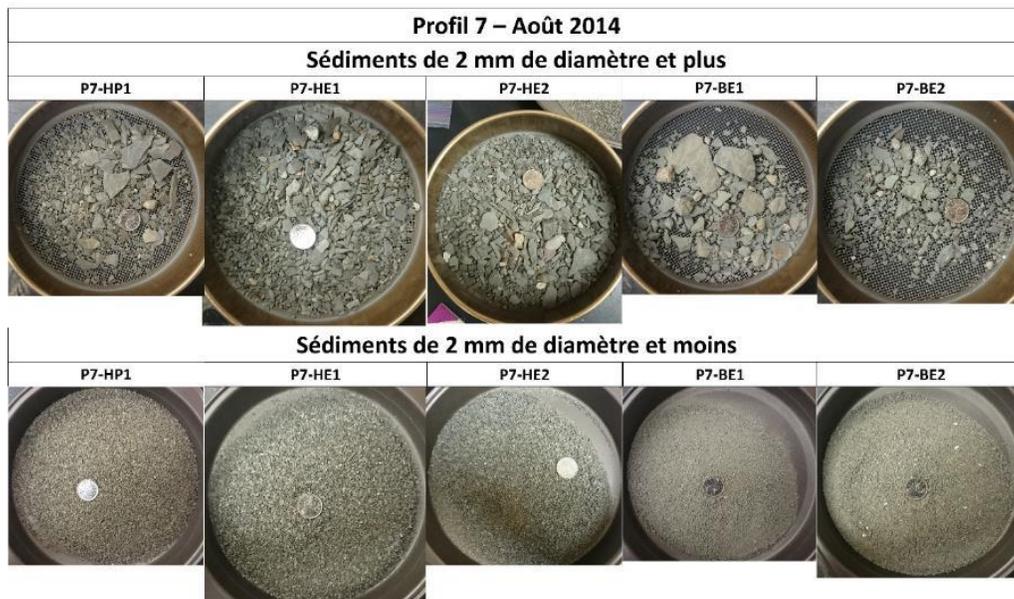
Annexe 11. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 5 - août 2014.



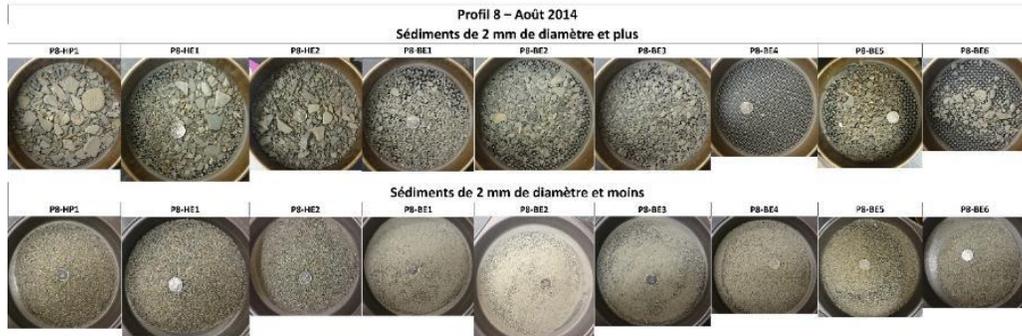
Annexe 12. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 6 - août 2014.



Annexe 13. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 7 – août 2014.



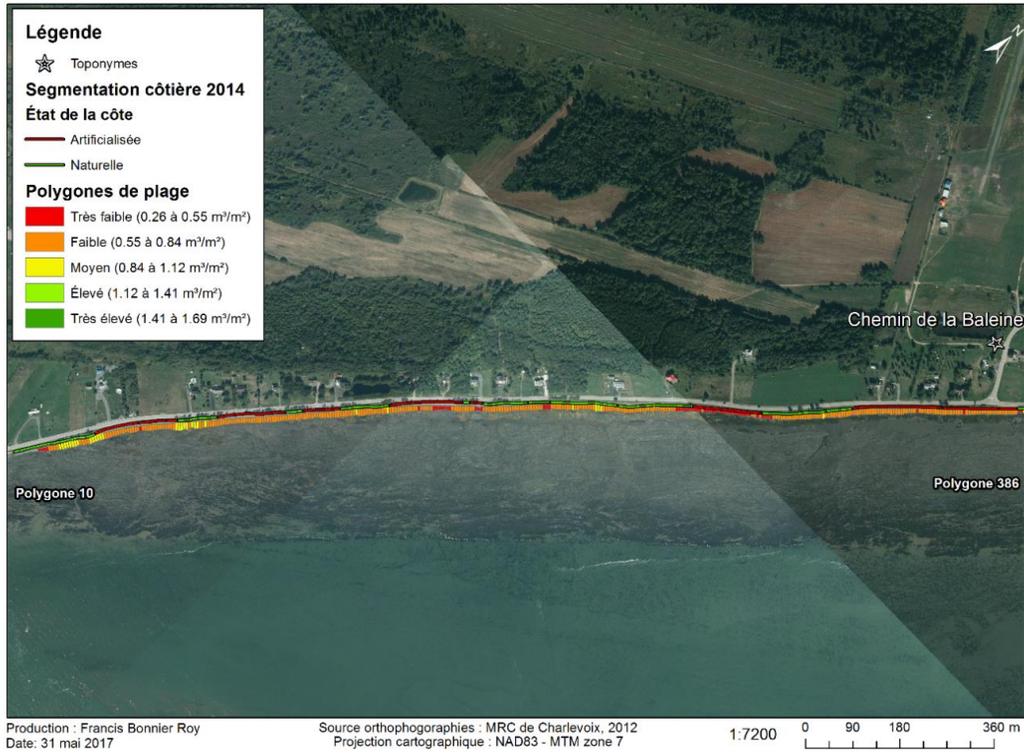
Annexe 14. Photographies des sédiments de moins de 2 mm et des graviers du profil 8 - août 2014.



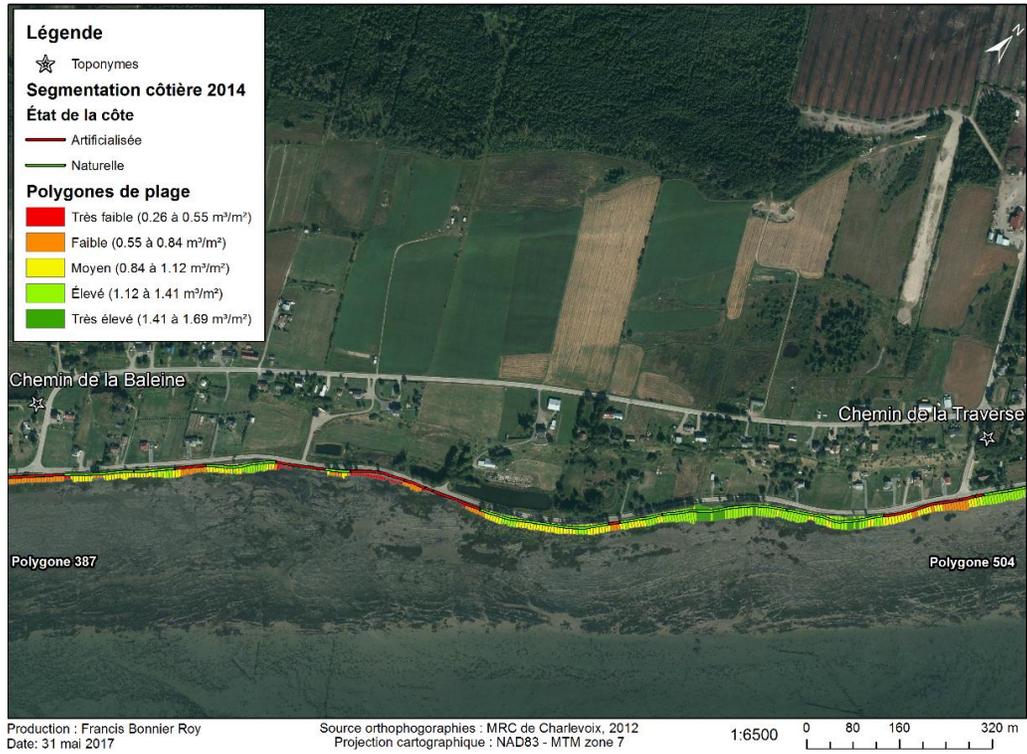
Annexe 15. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (côte nord-est).



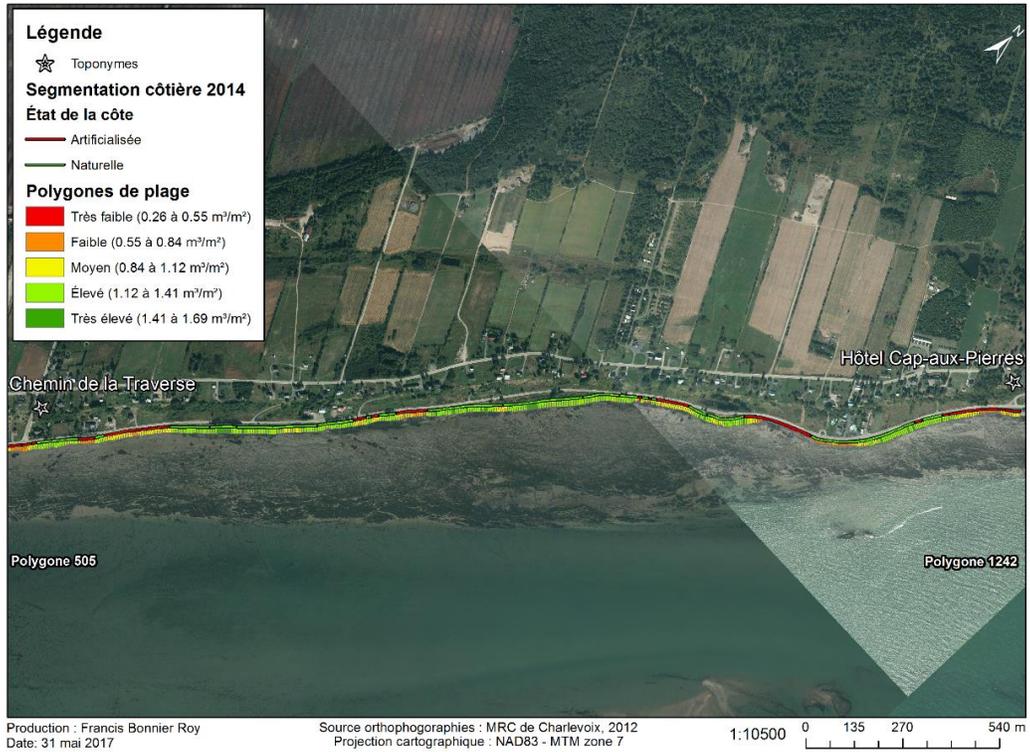
Annexe 16. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 1).



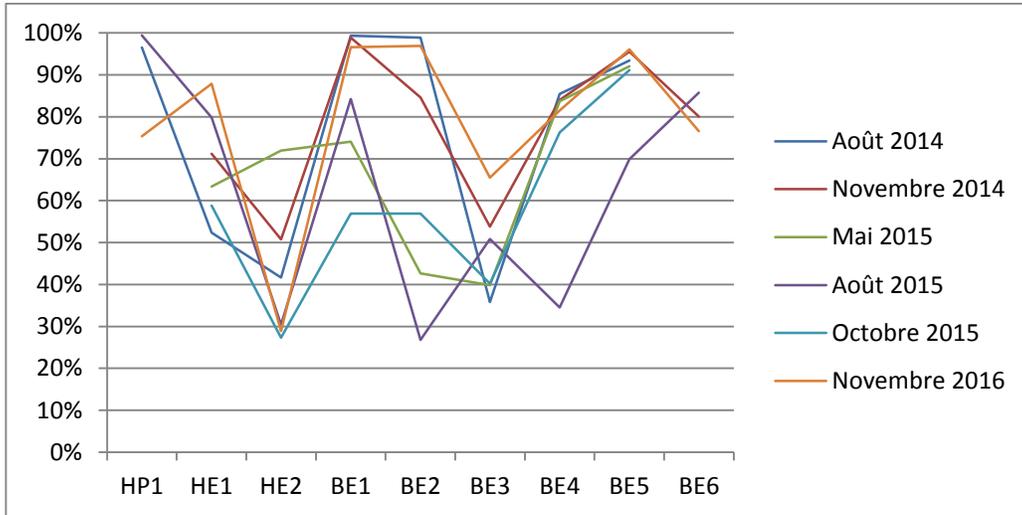
Annexe 17. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 2).



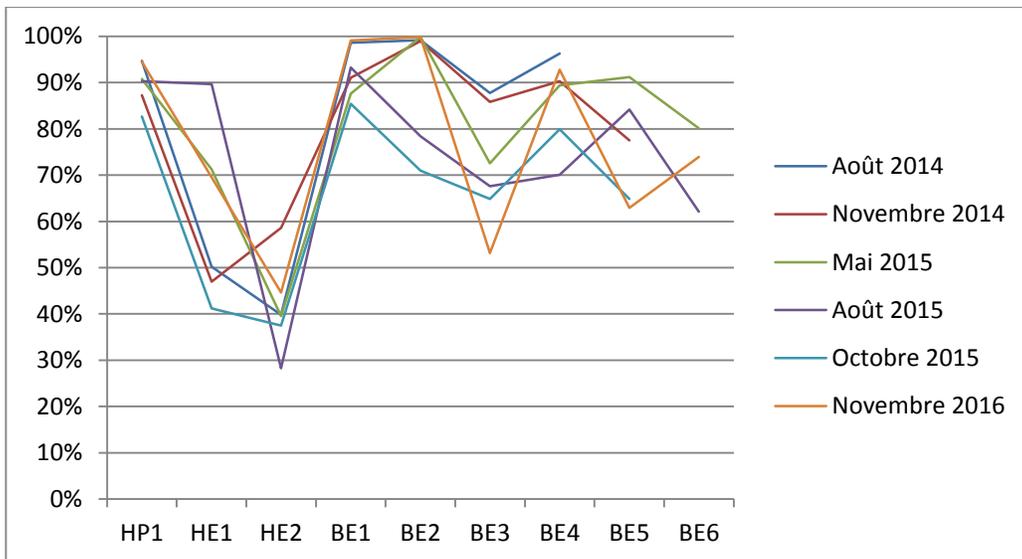
Annexe 18. Volumes de plage (m^3/m^2) du levé LiDAR du 27 août 2014 (secteur 3).



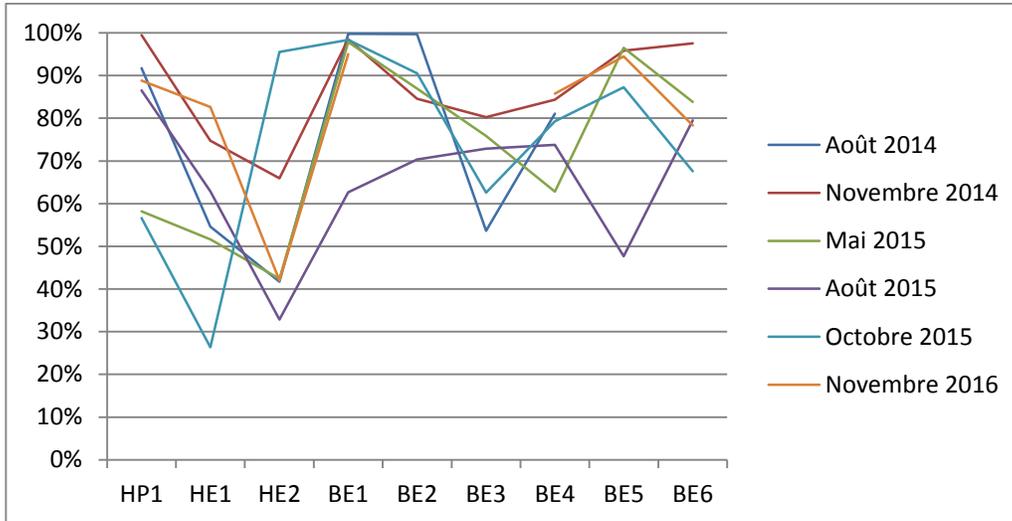
Annexe 19. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 1 (Enroché en 2014).



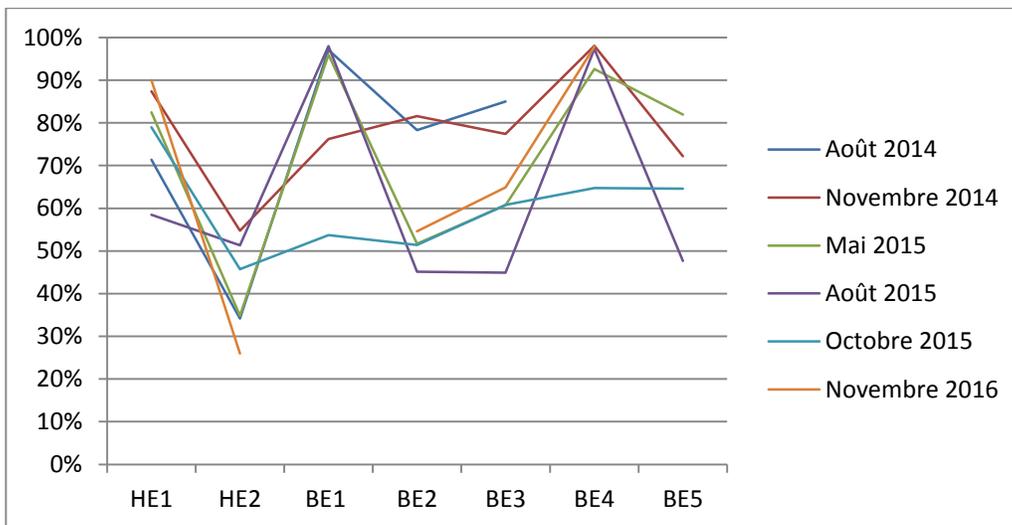
Annexe 20. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 2 (Naturel).



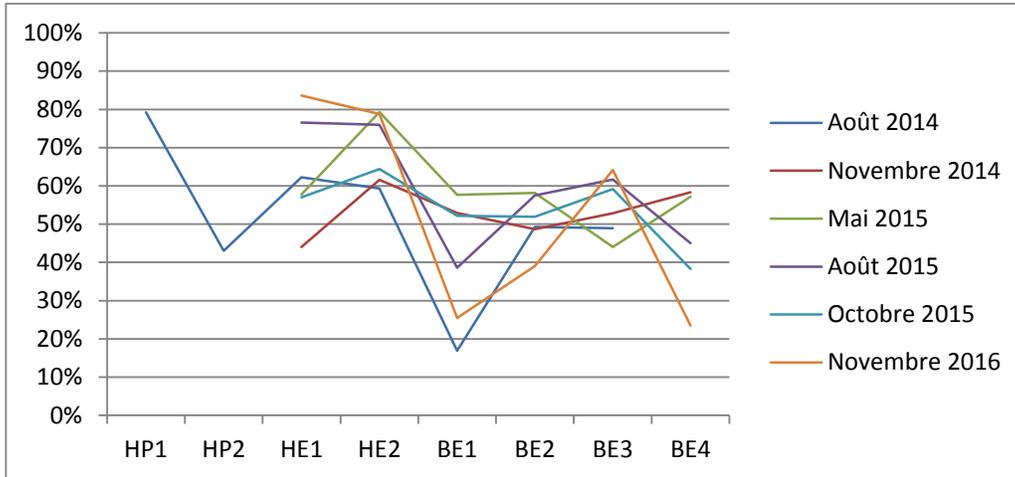
Annexe 21. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 3 (Naturel)



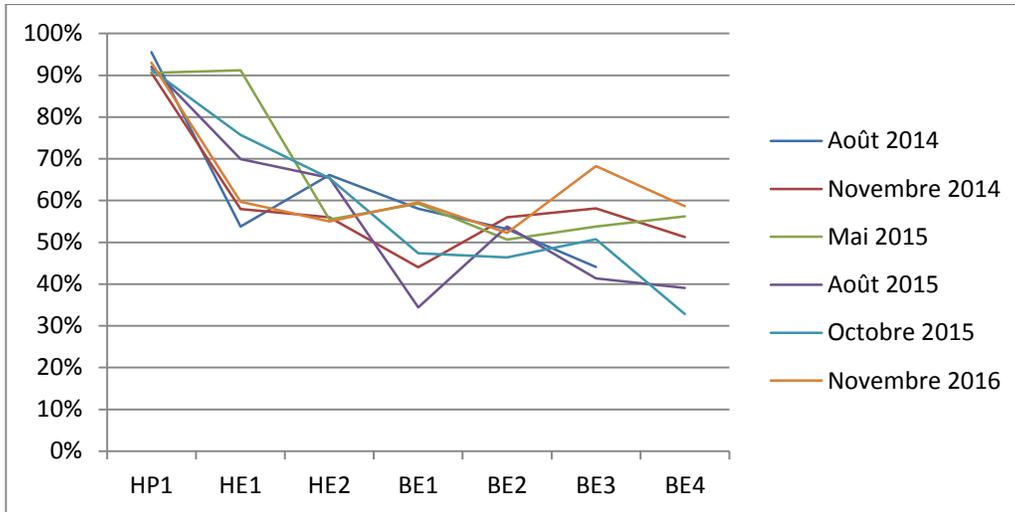
Annexe 22. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 4 (Déjà artificiel en 2014).



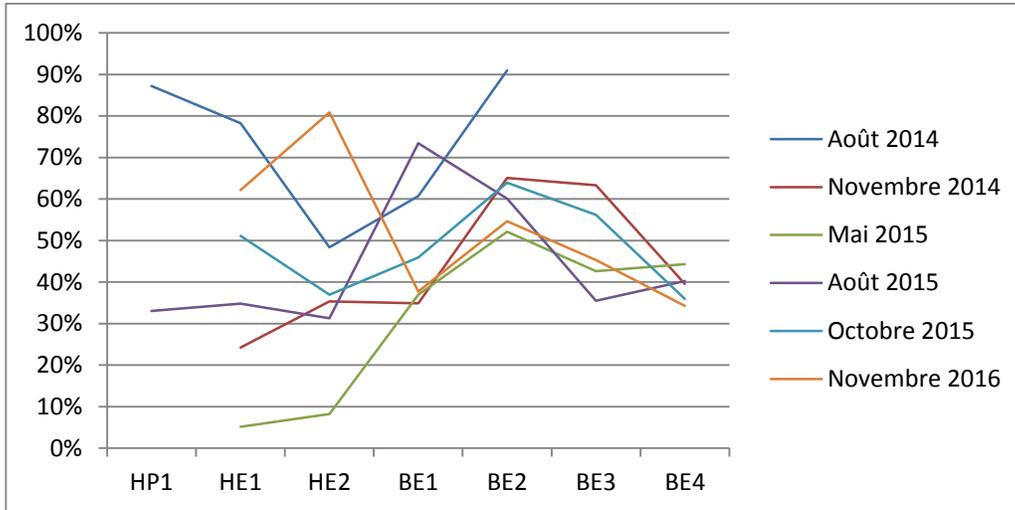
Annexe 23. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 5 (Enroché en 2014).



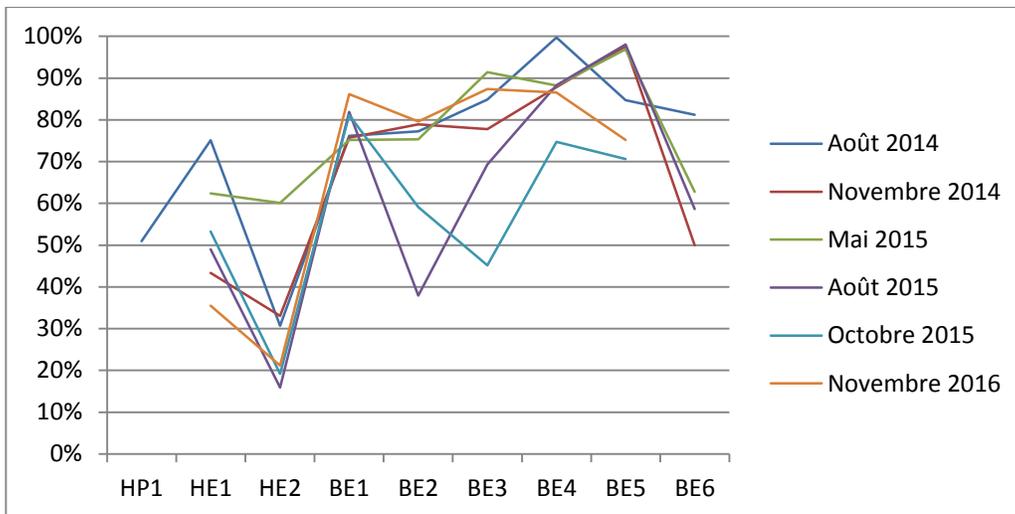
Annexe 24. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 6 (Naturel).



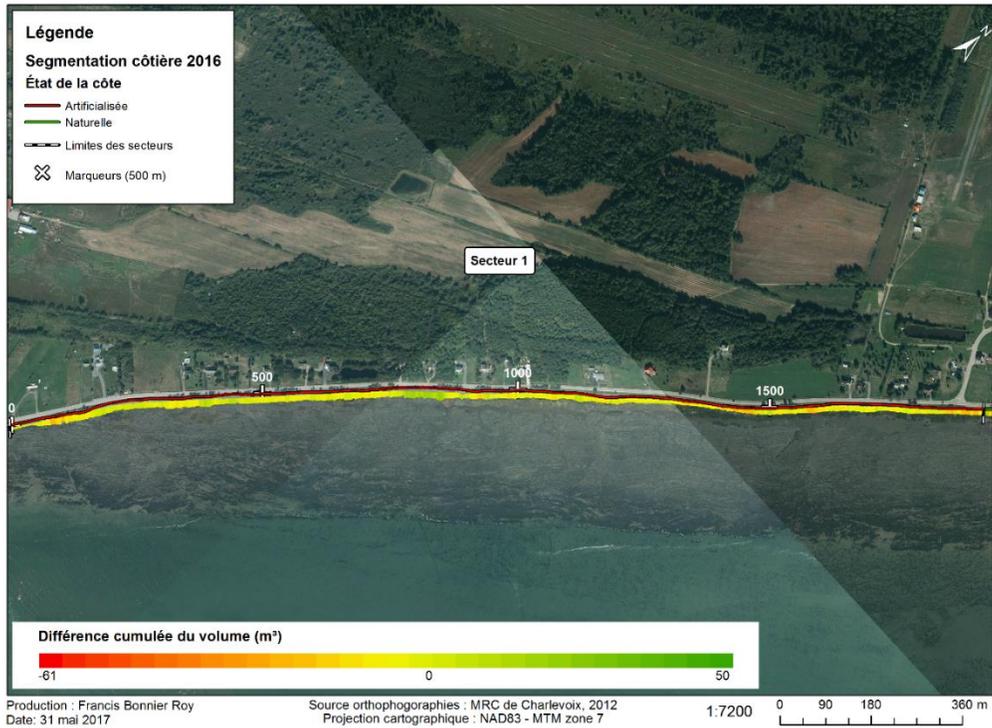
Annexe 25. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 7 (Enroché en 2014).



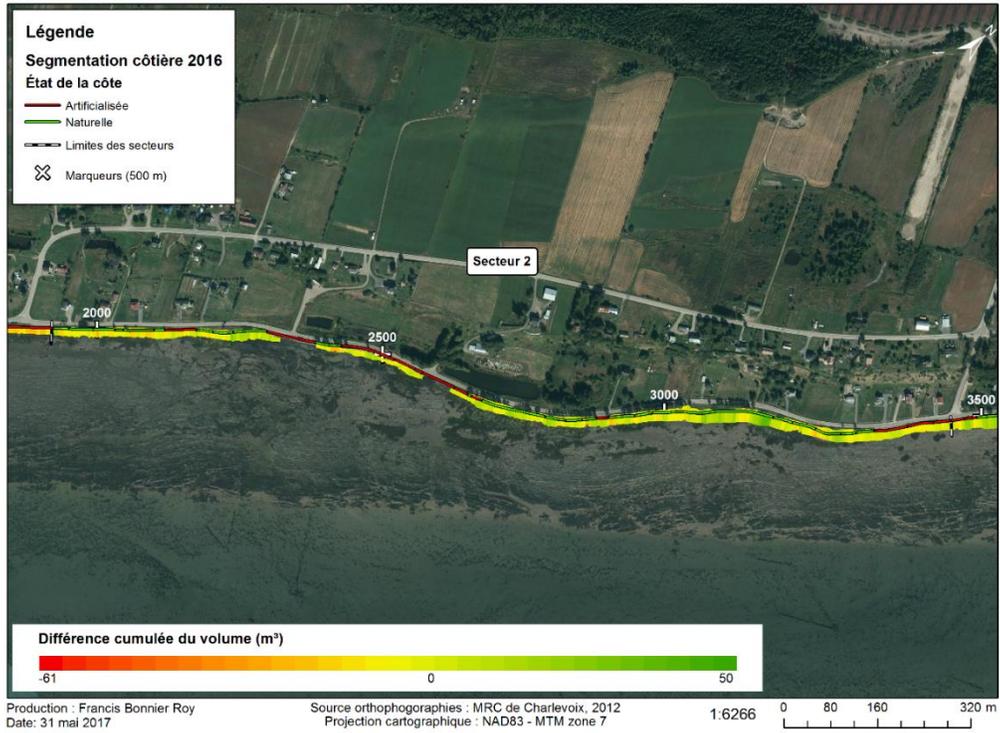
Annexe 26. Proportions de la matrice inférieure à 2 mm de diamètre - Profil 8 (Enroché en 2014).



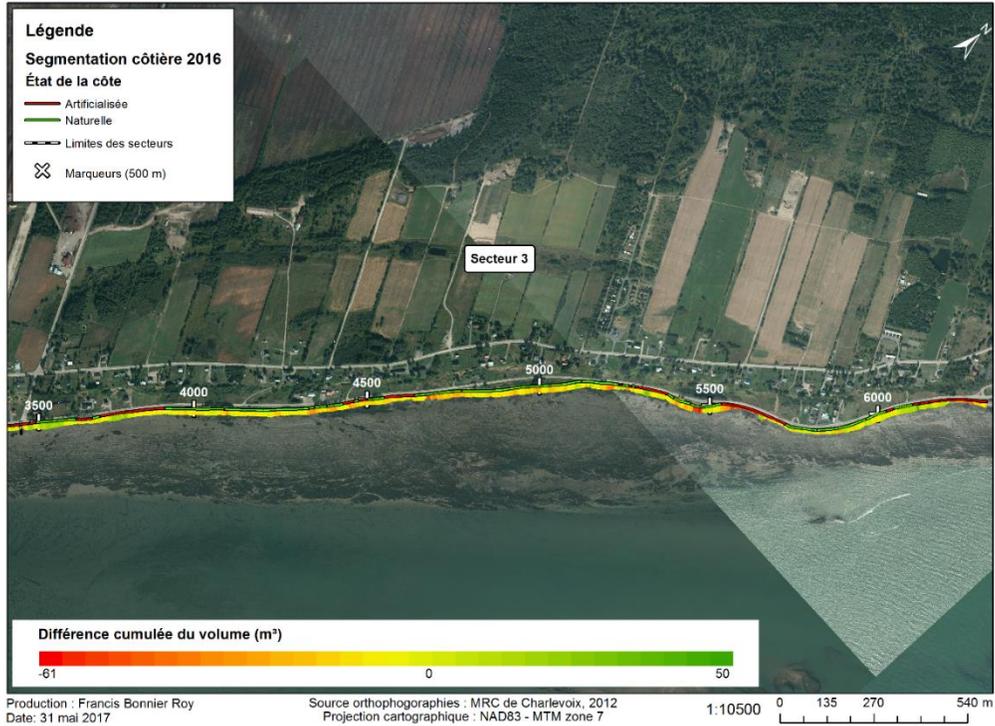
Annexe 27. Différences cumulées des volumes (m^3) de plage du secteur 1 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.



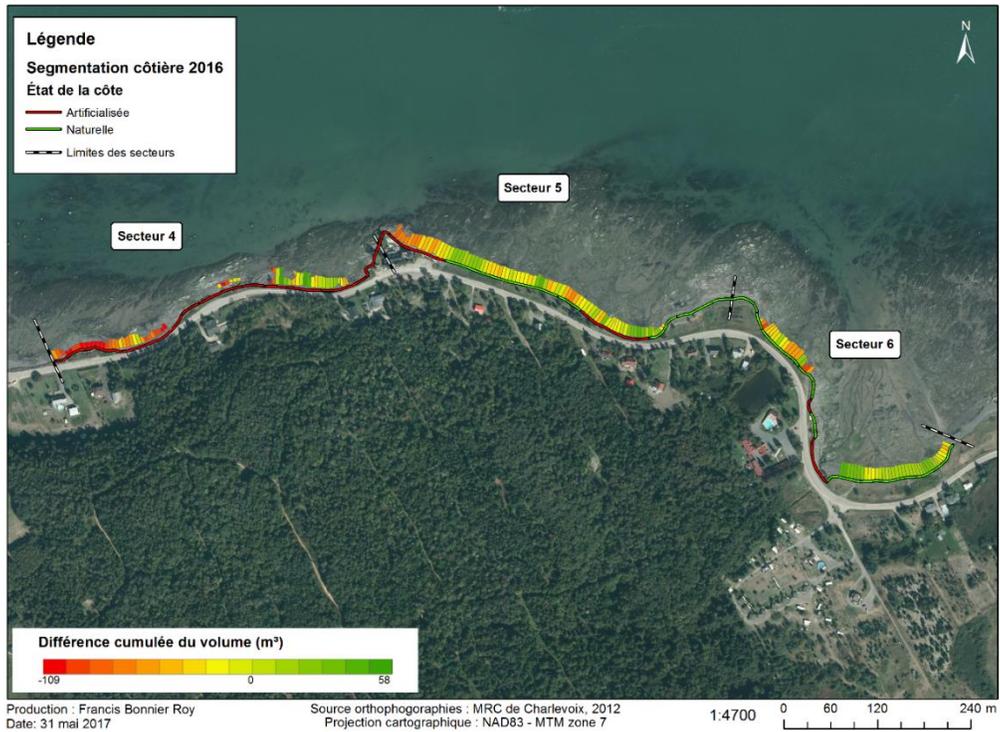
Annexe 28. Différences cumulées des volumes (m^3) de plage du secteur 2 de l'ensemble des levés LiDAR entre le premier levé en mai 2014 et le dernier levé en mai 2016.



Annexe 29. 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.



Annexe 30. 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.



Annexe 31. Interprétation de l'évolution surfacique des herbiers entre 2014 et 2015.

Herbier 1	L'herbier 1 a eu une augmentation de superficie de 11 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 91,9 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 2	L'herbier 2 a eu une augmentation de superficie de 13 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,8 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 3	L'herbier 3 a eu une diminution de superficie de 0 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 91,8 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 4	L'herbier 4 a eu une diminution de superficie de -33 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 63,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est
Herbier 5	L'herbier 5 a eu une diminution de superficie de -1 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 92,7 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est-ouest
Herbier 6	L'herbier 6 a eu une augmentation de superficie de 12 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 7	L'herbier 7 a eu une augmentation de superficie de 8 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 90,4 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est-ouest
Herbier 8	L'herbier 8 a eu une augmentation de superficie de 10 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 91,3 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 9	L'herbier 9 a eu une augmentation de superficie de 2 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 93,4 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 10	L'herbier 10 a eu une diminution de superficie de -4 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 87,6 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 11	L'herbier 11 a eu une augmentation de superficie de 16 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 93,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le sud-ouest

Herbier 12	L'herbier 12 a eu une augmentation de superficie de 1 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 95,8 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 13	L'herbier 13 a eu une diminution de superficie de -1 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 94,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 14	L'herbier 14 a eu une augmentation de superficie de 8 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 96,7 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 15	L'herbier 15 a eu une diminution de superficie de 0 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 92,7 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement fort vers le nord-est
Herbier 16	L'herbier 16 a eu une diminution de superficie de -3 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 92,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est
Herbier 17	L'herbier 17 a eu une augmentation de superficie de 0 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 94,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est
Herbier 18	L'herbier 18 a eu une augmentation de superficie de 20 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 91,4 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 19	L'herbier 19 a eu une augmentation de superficie de 14 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 88,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 20	L'herbier 20 a eu une augmentation de superficie de 9 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est-ouest
Herbier 21	L'herbier 21 a eu une augmentation de superficie de 18 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 22	L'herbier 22 a eu une diminution de superficie de -24 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 71,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 23	L'herbier 23 a eu une augmentation de superficie de 2 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 96,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest

Herbier 24	L'herbier 24 a eu une augmentation de superficie de 20 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 96,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est-ouest
Herbier 25	L'herbier 25 a eu une augmentation de superficie de 17 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98,3 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 26	L'herbier 26 a eu une augmentation de superficie de 14 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est-ouest
Herbier 27	L'herbier 27 a eu une augmentation de superficie de 16 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est
Herbier 28	L'herbier 28 a eu une diminution de superficie de -10 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 89,6 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 29	L'herbier 29 a eu une diminution de superficie de -32 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 62,8 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement fort vers le nord-est

Annexe 32. Interprétation de l'évolution surfacique des herbiers entre 2015 et 2016.

Herbier 1	L'herbier 1 a eu une augmentation de superficie de 14 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 95,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 2	L'herbier 2 a eu une augmentation de superficie de 5 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 3	L'herbier 3 a eu une augmentation de superficie de 35 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 100 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 4	L'herbier 4 a eu une augmentation de superficie de 22 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 94,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 5	L'herbier 5 a eu une augmentation de superficie de 29 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 88,7 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est-ouest

Herbier 6	L'herbier 6 a eu une augmentation de superficie de 7 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97,3 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 7	L'herbier 7 a eu une diminution de superficie de -55 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 41,8 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 8	L'herbier 8 a eu une augmentation de superficie de 1 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 96,7 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 9	L'herbier 9 a eu une diminution de superficie de -4 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 87,8 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 10	L'herbier 10 a eu une augmentation de superficie de 14 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 11	L'herbier 11 a eu une augmentation de superficie de 4 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 12	L'herbier 12 a eu une augmentation de superficie de 4 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97,9 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement fort vers le nord-est
Herbier 13	L'herbier 13 a eu une augmentation de superficie de 5 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le sud-ouest
Herbier 14	L'herbier 14 a eu une augmentation de superficie de 5 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 15	L'herbier 15 a eu une augmentation de superficie de 9 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,4 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est
Herbier 16	L'herbier 16 a eu une augmentation de superficie de 6 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,3 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 17	L'herbier 17 a eu une augmentation de superficie de 5 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97,4 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 18	L'herbier 18 a eu une augmentation de superficie de 10 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 96,1 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 19	L'herbier 19 a eu une augmentation de superficie de 14 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 83,2 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le sud-ouest
Herbier 20	L'herbier 20 a eu une augmentation de superficie de 22 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98,2 % de sa superficie au

	même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 21	L'herbier 21 a eu une augmentation de superficie de 90 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 96,6 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le sud-ouest
Herbier 22	L'herbier 22 a eu une augmentation de superficie de 46 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 98,5 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le sud-ouest
Herbier 23	L'herbier 23 a eu une augmentation de superficie de 12 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,3 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 24	L'herbier 24 a eu une augmentation de superficie de 29 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est
Herbier 25	L'herbier 25 a eu une augmentation de superficie de 3 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 95,9 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 26	L'herbier 26 a eu une augmentation de superficie de 1 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 95,7 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-est
Herbier 27	L'herbier 27 a eu une augmentation de superficie de 18 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 97,4 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le nord-est
Herbier 28	L'herbier 28 a eu une augmentation de superficie de 10 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,6 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement faible vers le sud-ouest
Herbier 29	L'herbier 29 a eu une augmentation de superficie de 34 % entre 2014 et 2015. Il a conservé 99,3 % de sa superficie au même endroit et a connu un déplacement moyen vers le nord-est

Annexe 33. Données statistiques des stations météorologiques de La Pocatière et de Charlevoix (MRC) pour les mois d'avril et de mai 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
Avril 2015	3,1	19,1	-15	446
Mai 2015	12,4	27,7	-1,4	178
Avril 2016	1,2	19,4	-15	503
Mai 2016	10,5	26,5	-0,8	205

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
Avril 2015	-1,3	13,8	-22	580
Mai 2015	8,7	21,3	-3,2	279
Avril 2016	-3,9	17,8	-24	657
Mai 2016	7,3	24,6	-6,2	331

Annexe 34. 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

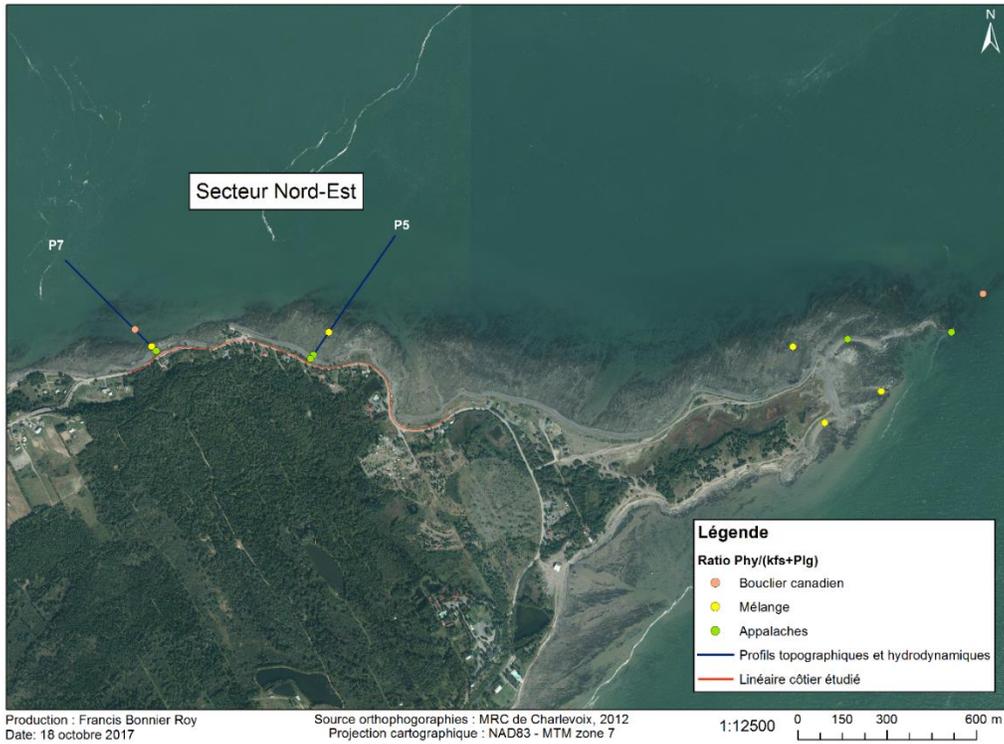
SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE
ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

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

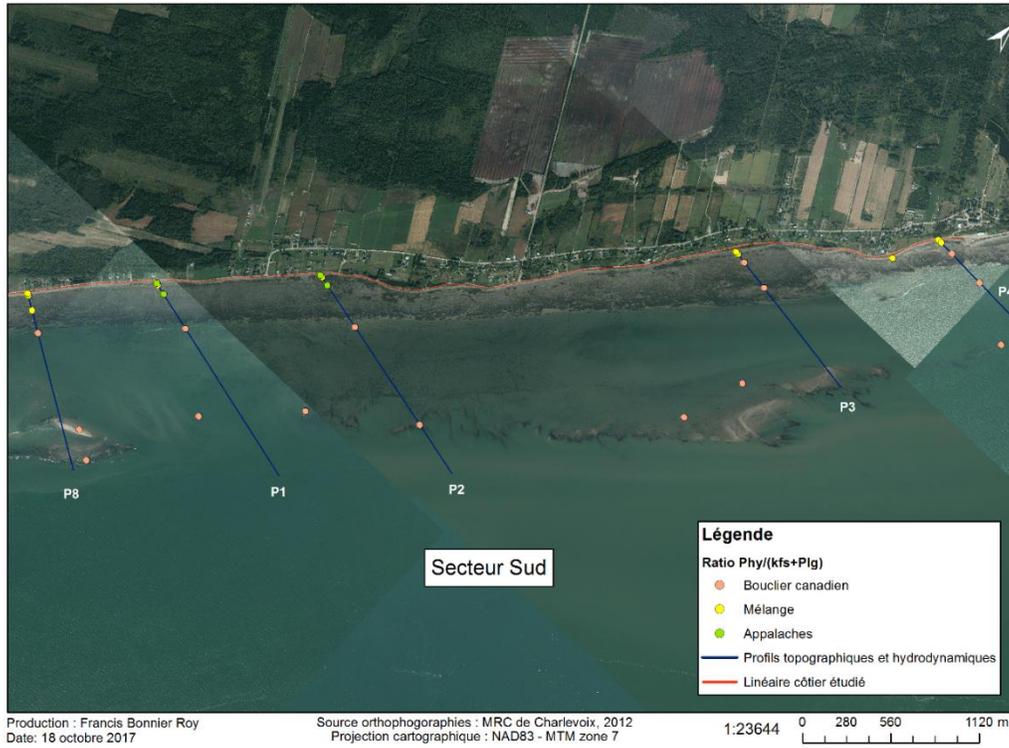
SUIVI DE L'ÉROSION CÔTIÈRE SUITE À DES TRAVAUX DE STABILISATION DES BERGES EN BORDURE DE
ROUTES À L'ISLE-AUX-COUDRES

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
P1-CORDON	Août 2014	Sud	Cordon
P2-CORDON	Août 2014	Sud	Cordon
P3- CORDON(2)	Mai 2015	Sud	Cordon
P4-CORDON	Mai 2016	Sud	Cordon
P8-CORDON	Mai 2015	Sud	Cordon
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-est- ouest	Falaise
AFFroc-3	Août 2016	Nord-est- ouest	Falaise
GEO-2	Août 2016	Sud	Grand Pilier (Cordon)
GEO-7	Août 2016	Sud	Roc Cordon

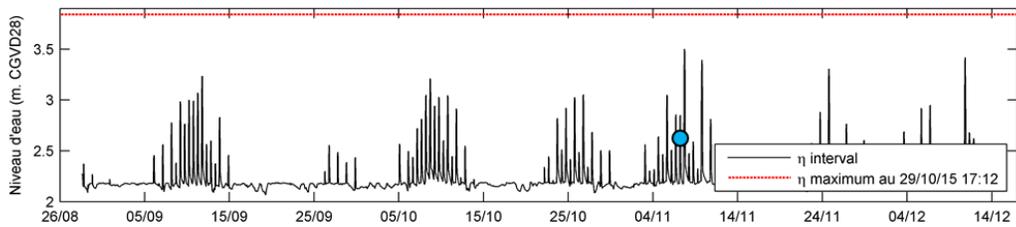
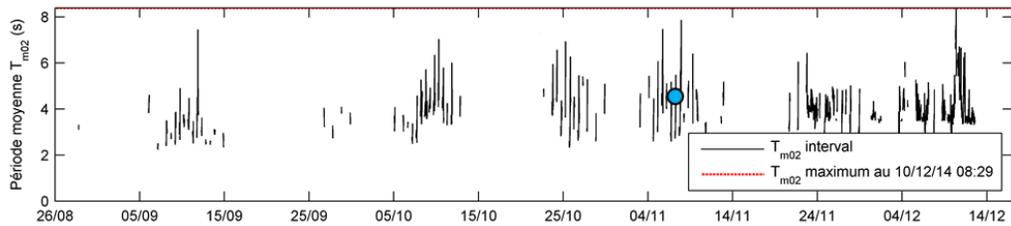
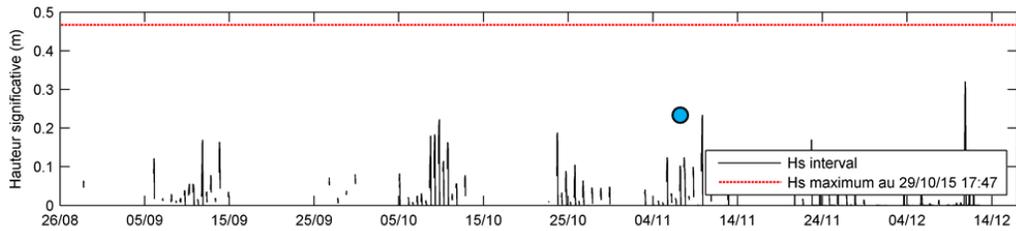
Annexe 35. Ratios $Phy/(Kfs+Plg)$ des échantillons de sédiments meubles et de roc du côté sud.



Annexe 36. Ratios $Phy/(Kfs+Plg)$ des échantillons de sédiments meubles et de roc du côté sud.

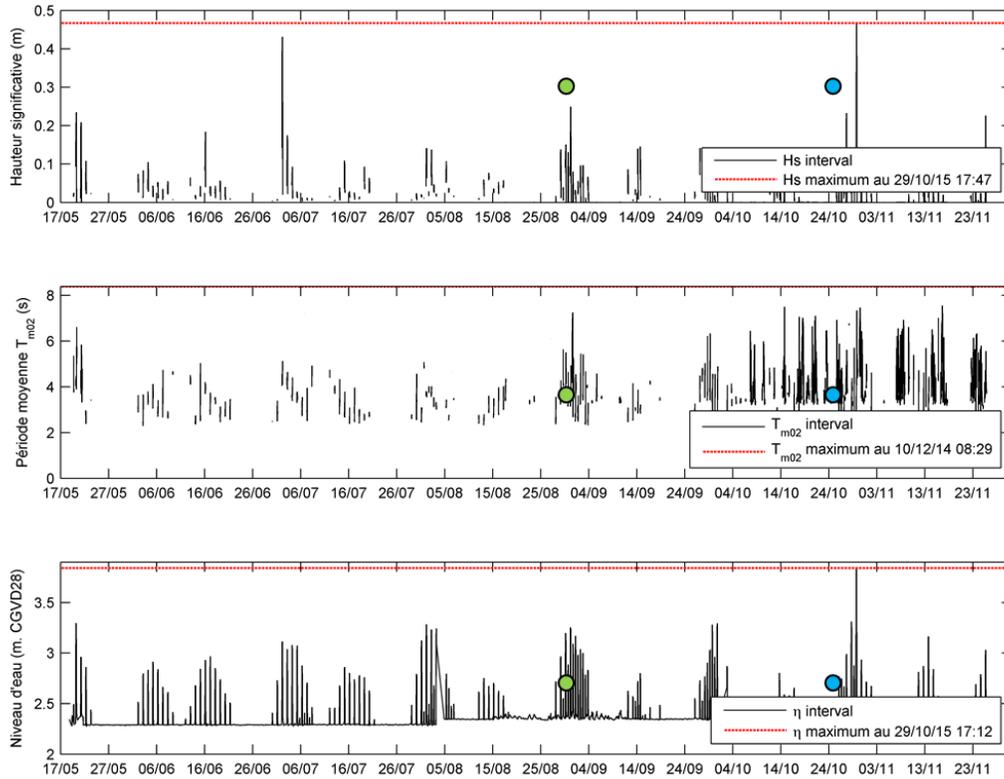


Annexe 37. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



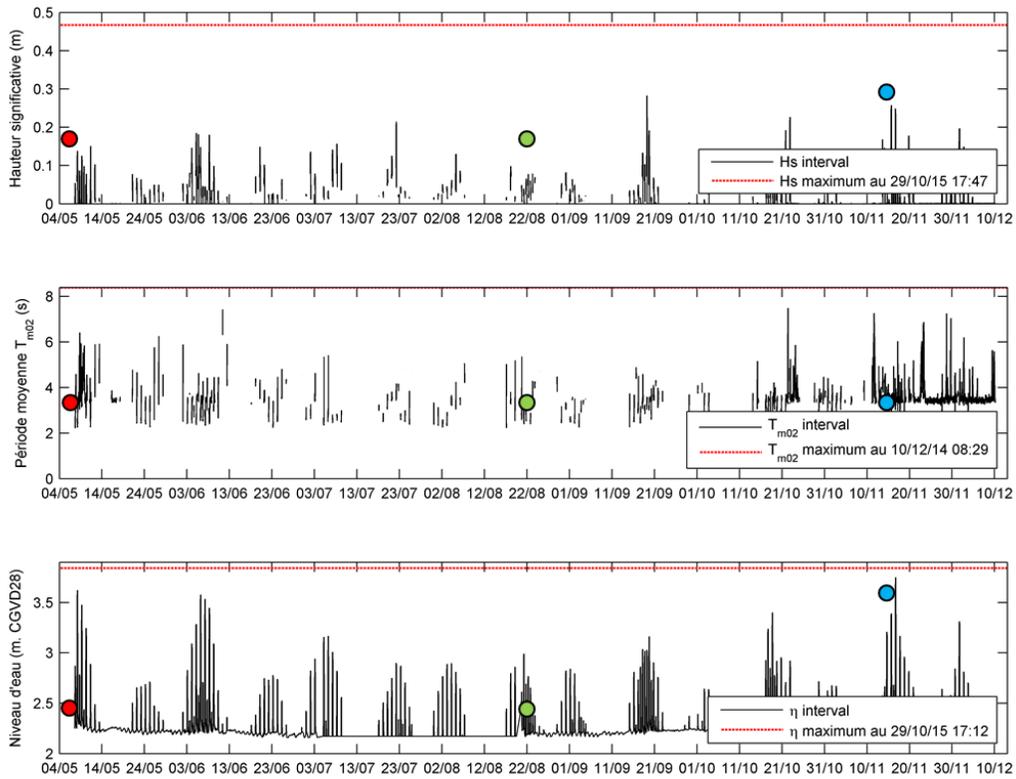
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
● 7 novembre 2014

Annexe 38. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



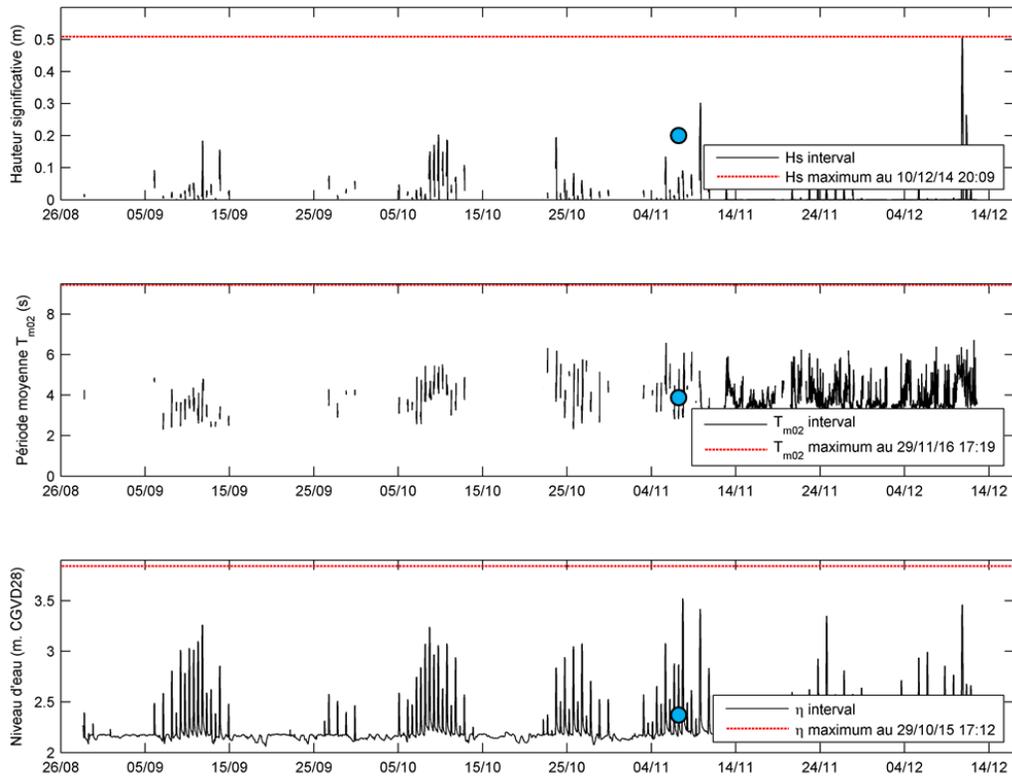
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 30 août 2015
 ● 25 octobre 2015

Annexe 39. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 1.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



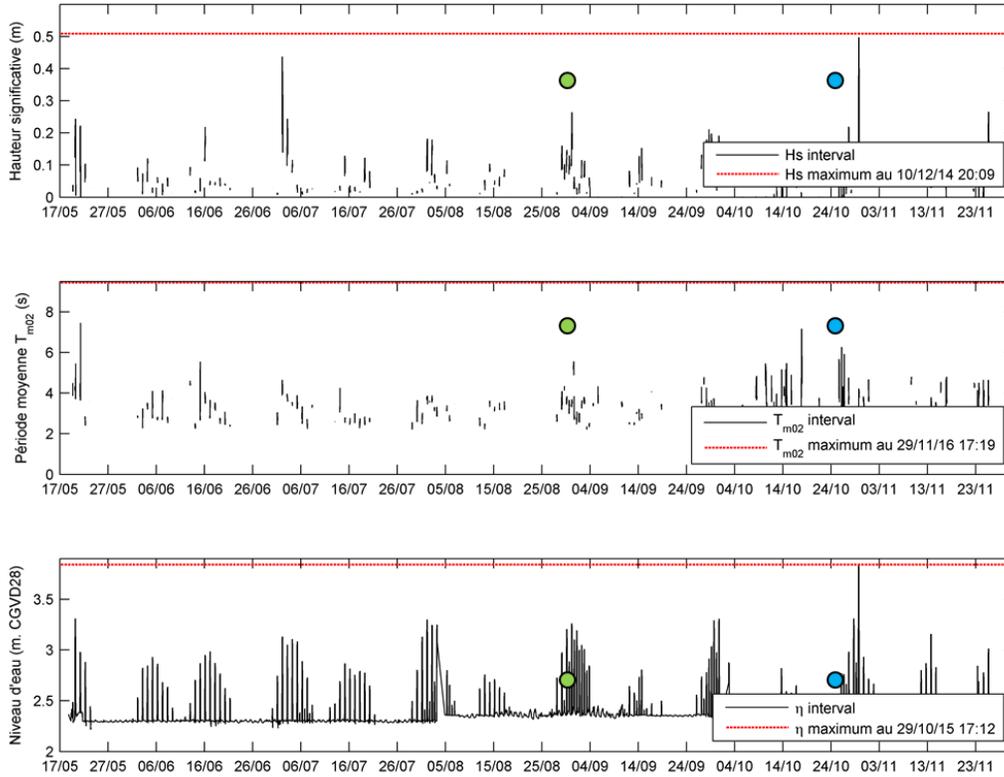
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 6 mai 2016
 ● 22 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 40. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



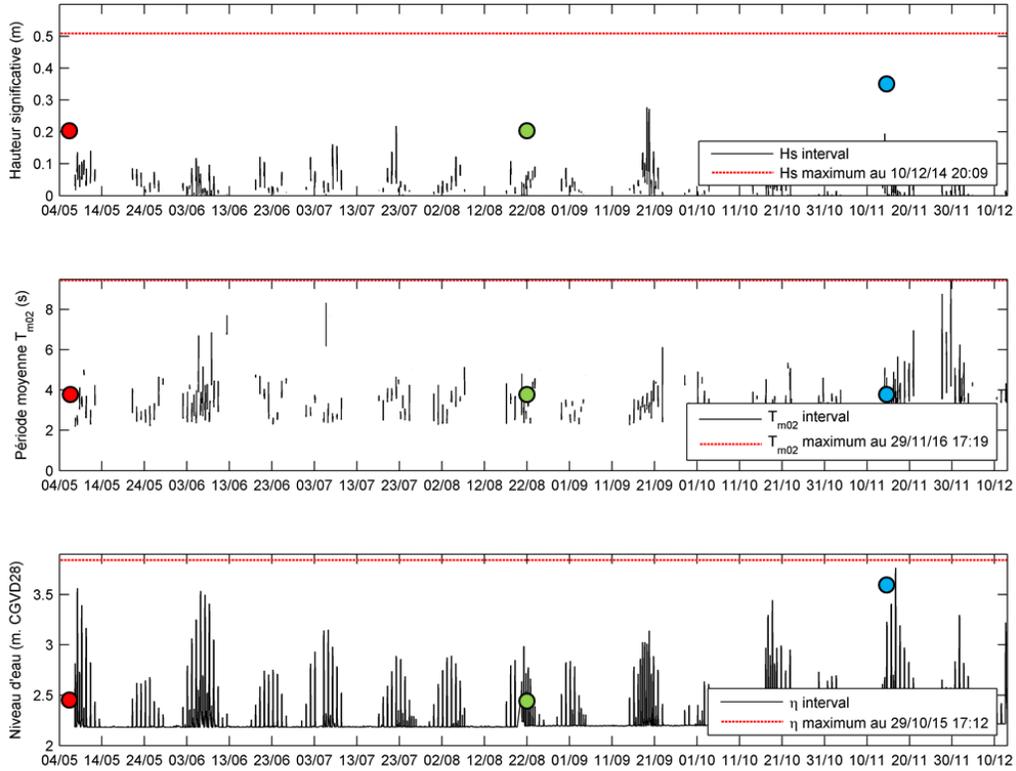
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
● 7 novembre 2014

Annexe 41. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



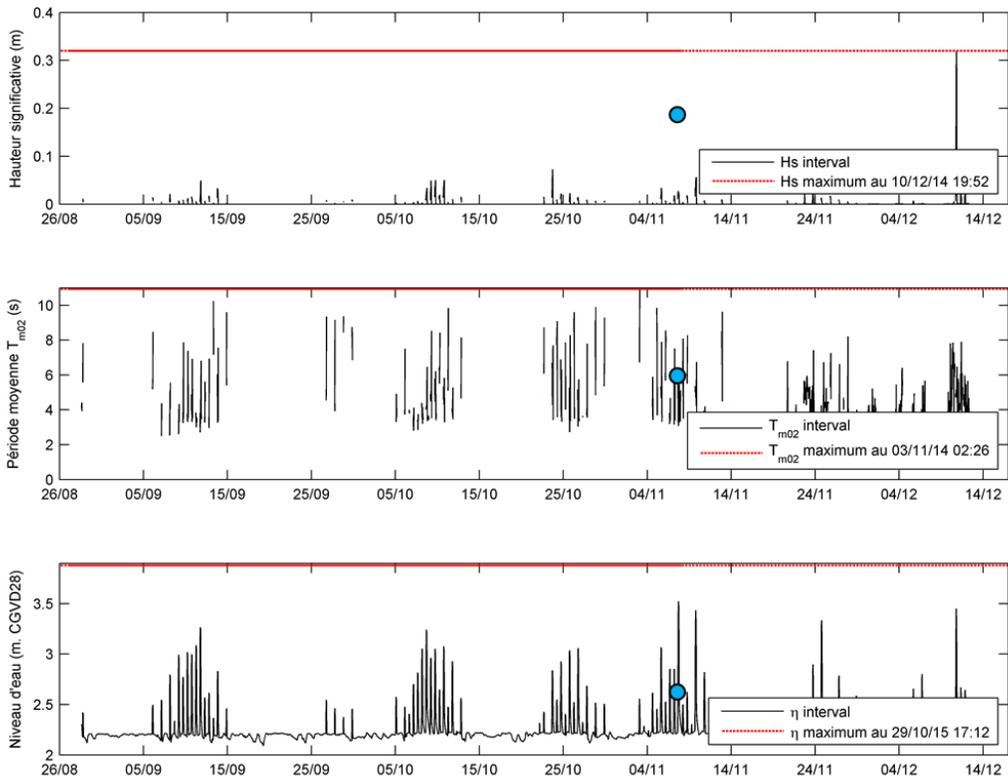
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 31 août 2015
 ● 25 octobre 2015

Annexe 42. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 2.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



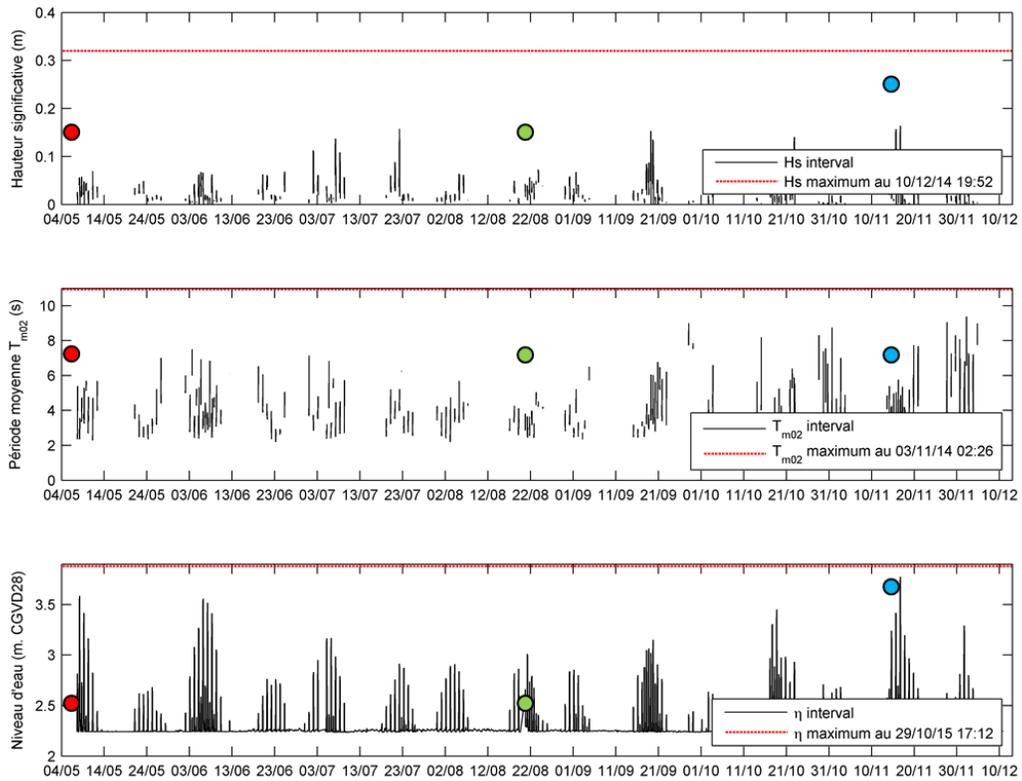
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 6 mai 2016
 ● 22 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 43. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



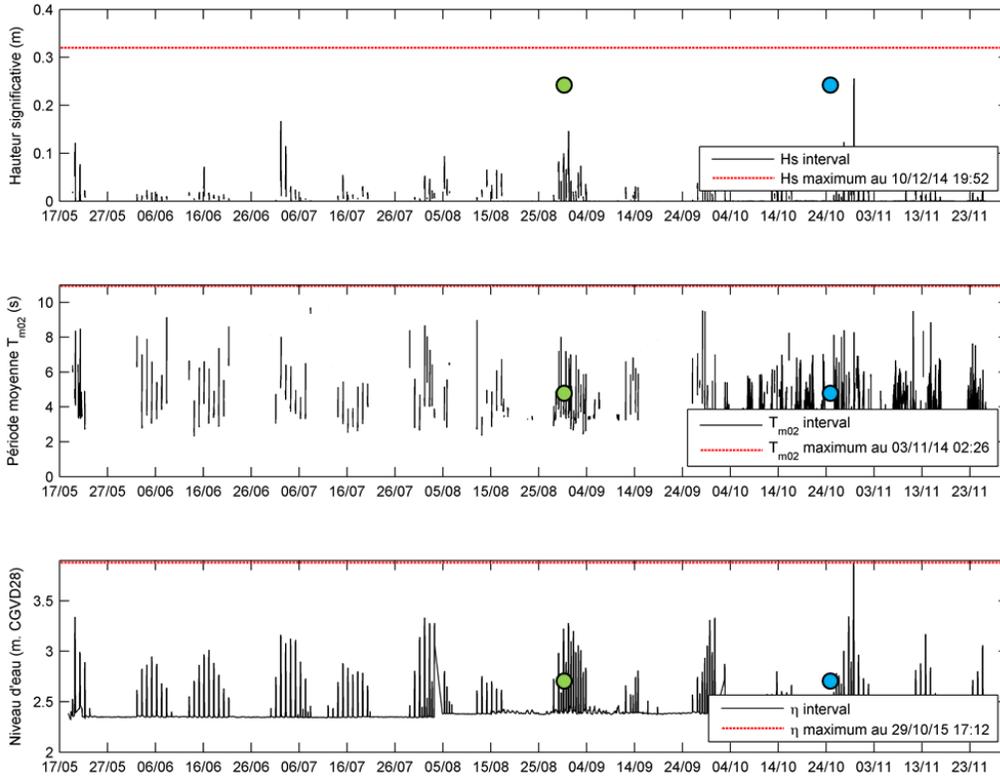
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
● 8 novembre 2014

Annexe 44. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



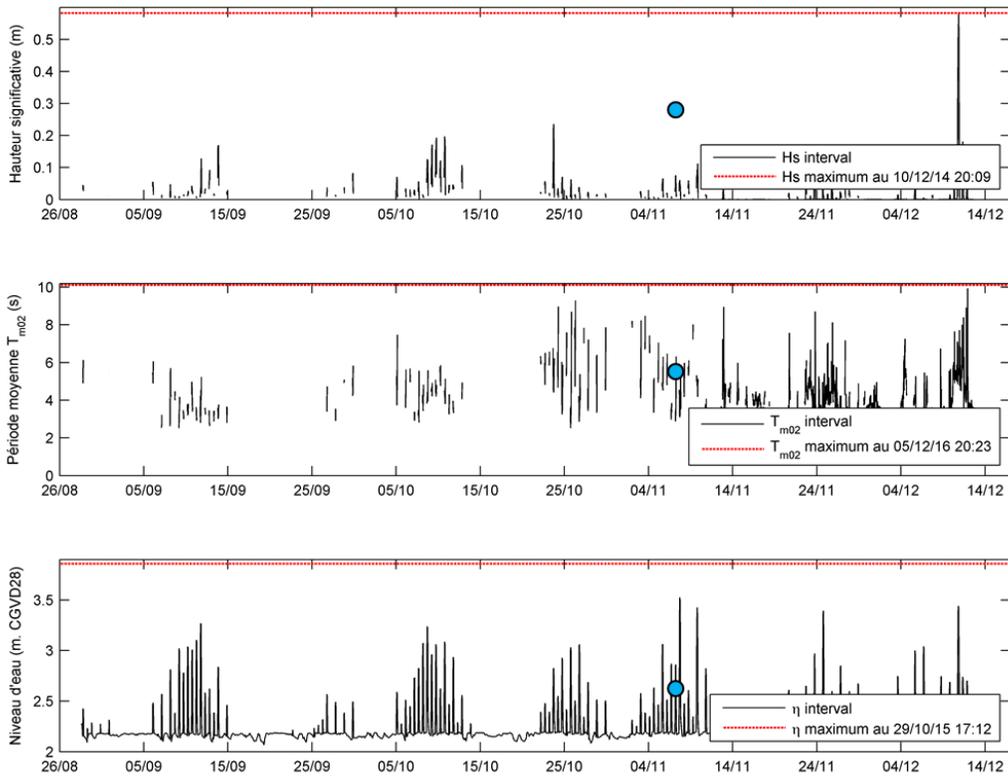
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 6 mai 2016
 ● 21 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 45. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 3.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



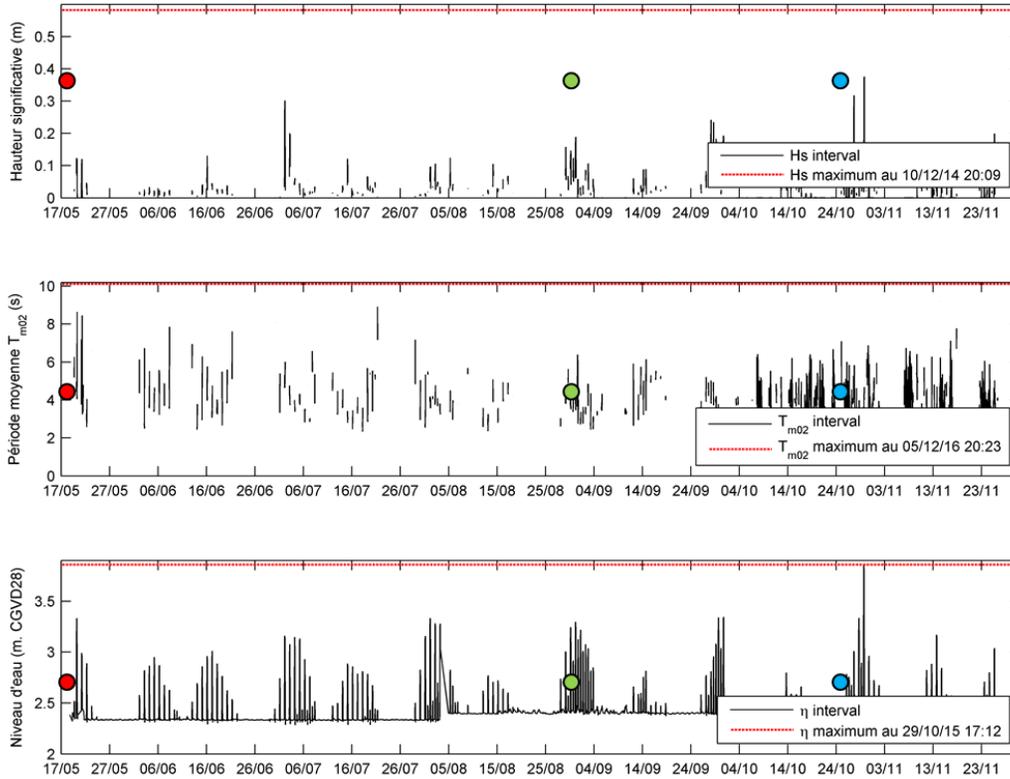
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 31 août 2015
 ● 25 octobre 2015

Annexe 46. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 26 août 2014 au 17 décembre 2014.



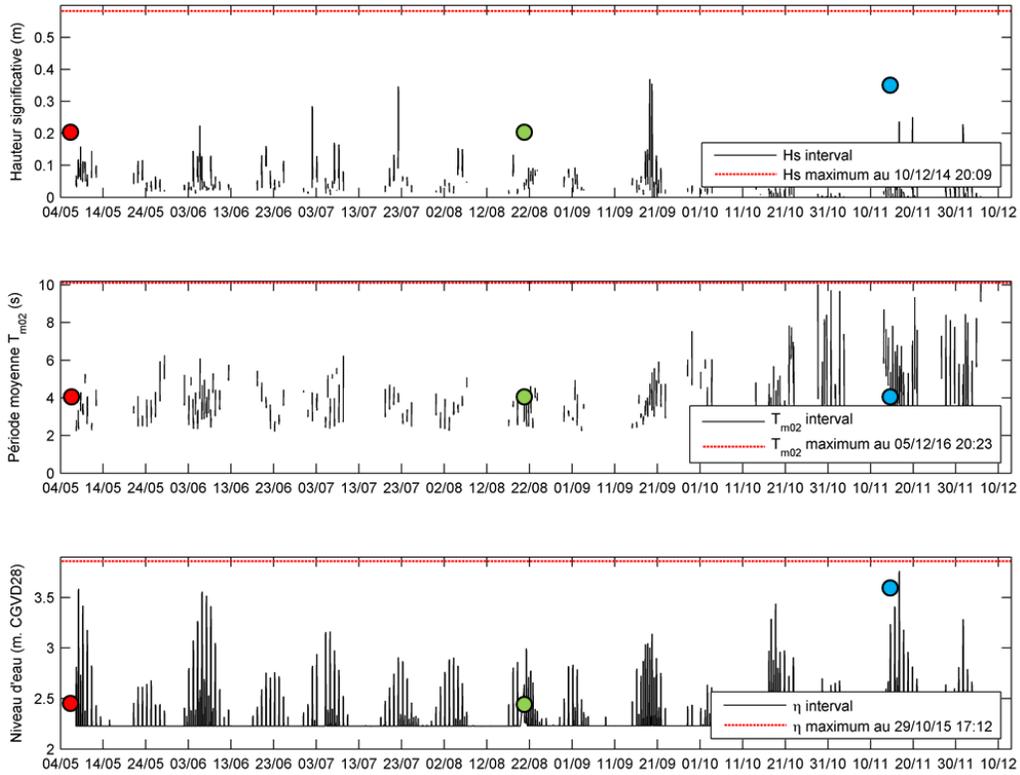
Dates des levés topographiques et échantillonnage: 14 août 2014 (avant instrumentation des capteurs)
● 8 novembre 2014

Annexe 47. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



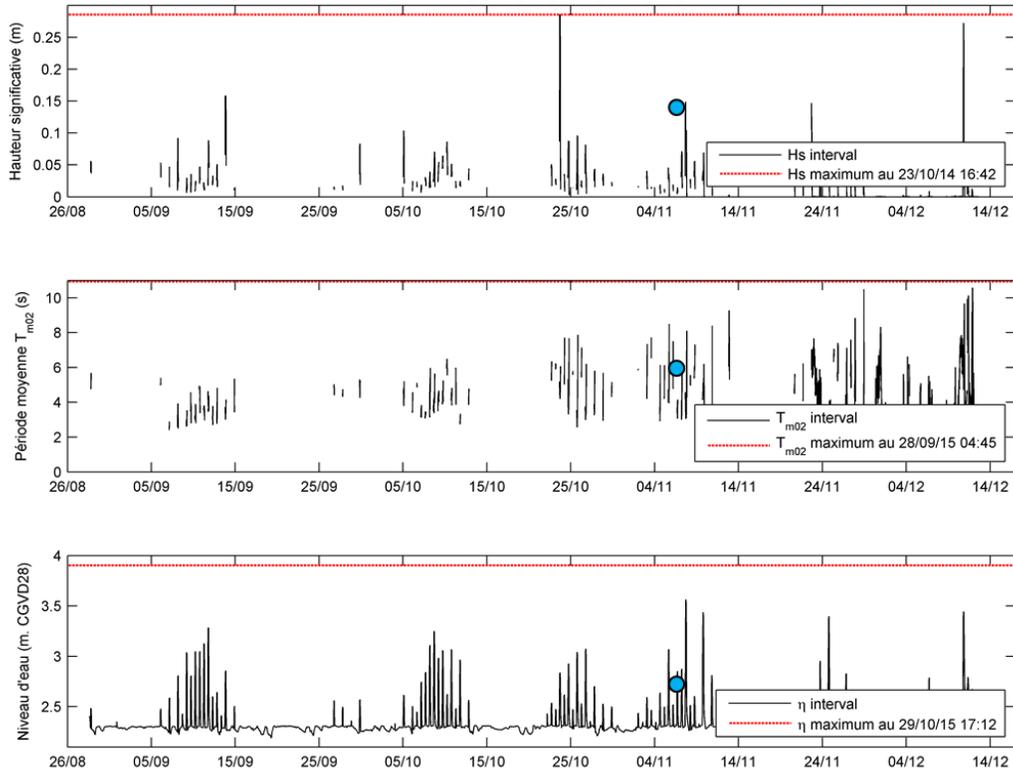
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 17 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)
 ● 31 août 2015
 ● 26 octobre 2015

Annexe 48. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 4.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



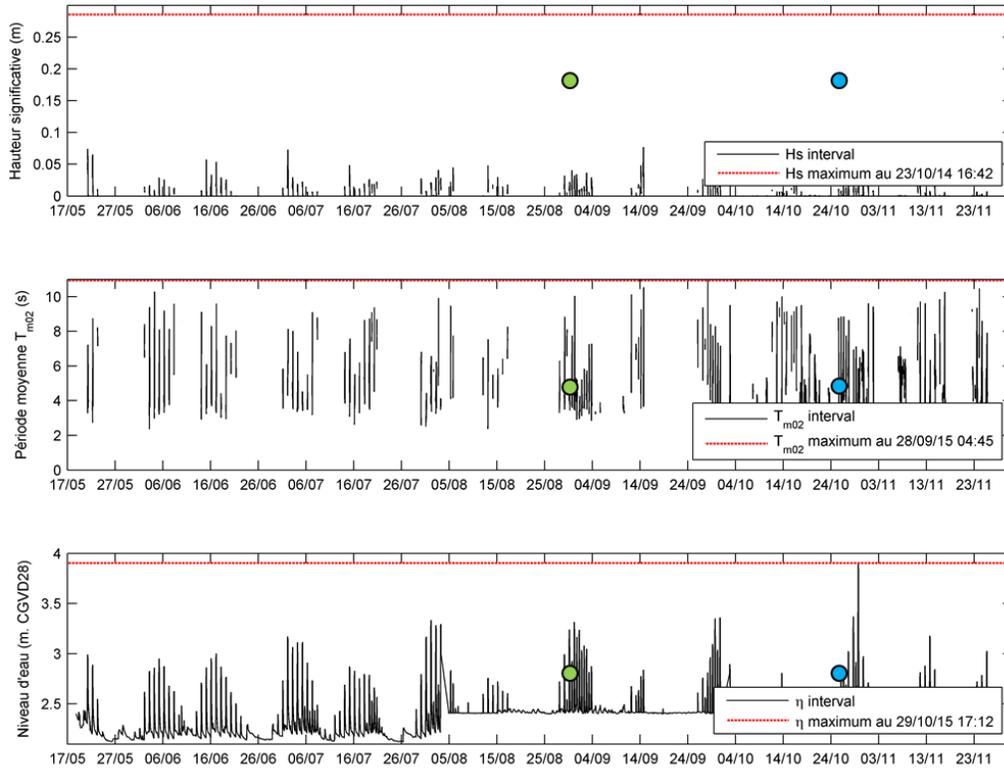
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 5 mai 2016
 ● 21 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 49. 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

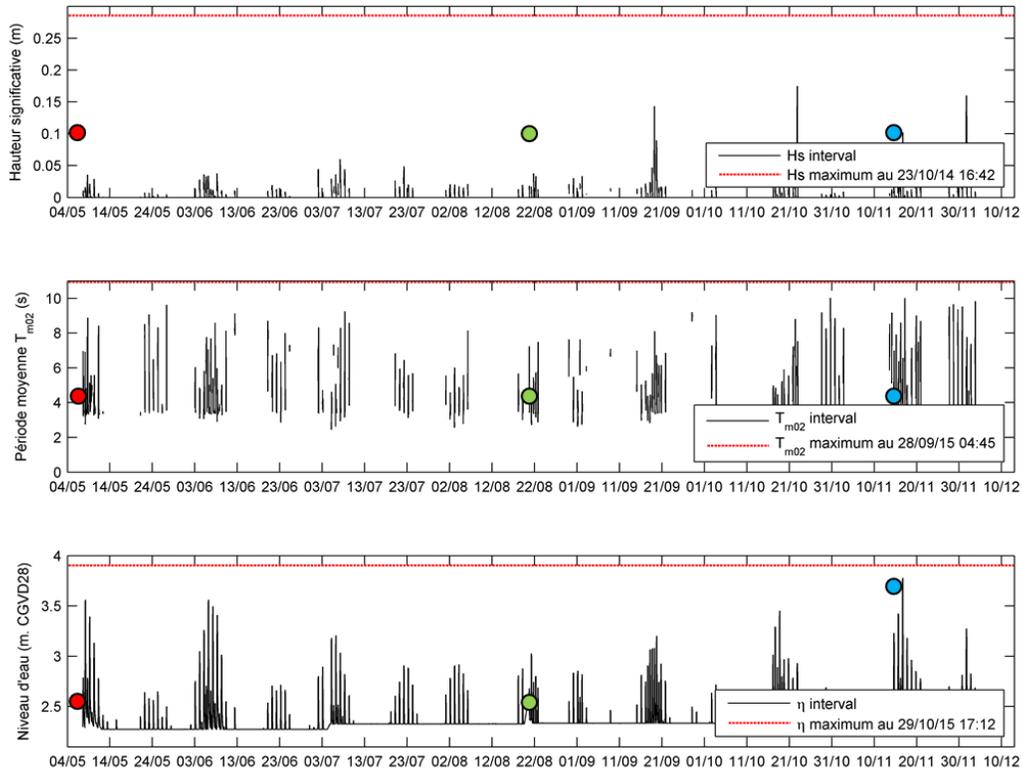
Annexe 50. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

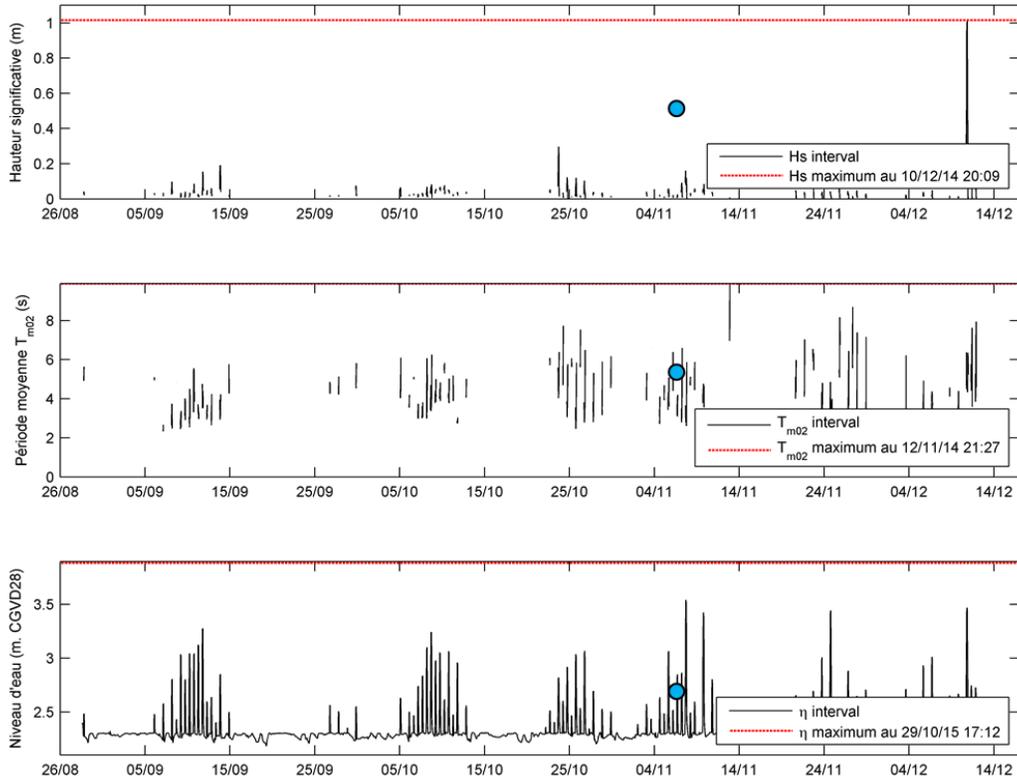
- 30 août 2015
- 26 octobre 2015

Annexe 51. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 5.1 du 4 mai 2016 au 13 décembre 2016.



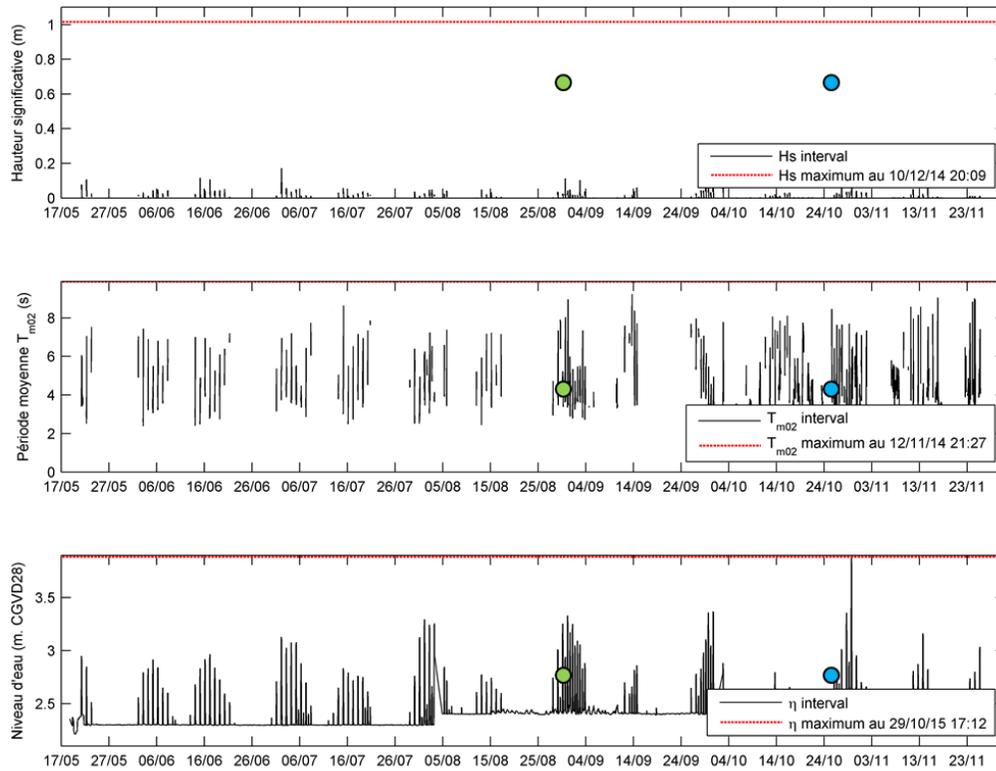
Dates des levés topographiques et échantillonnage: ● 5 mai 2016
 ● 21 août 2016
 ● 15 novembre 2016

Annexe 52. 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

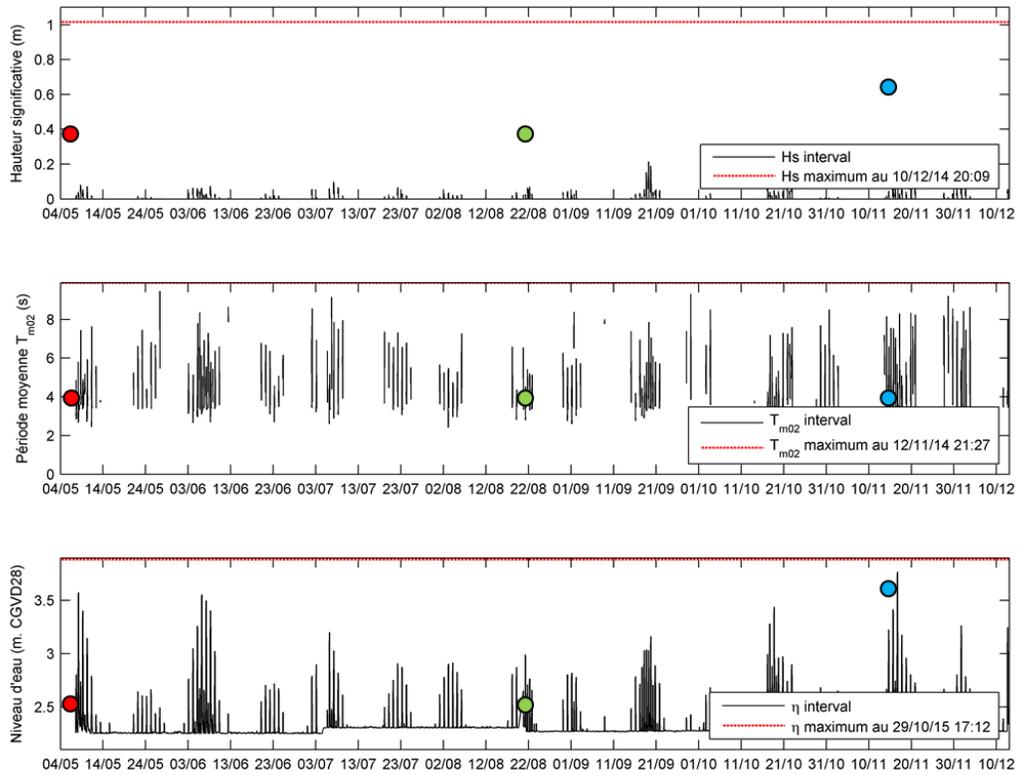
Annexe 53. Hauteurs significatives, périodes moyennes et niveaux d'eau enregistrés par le capteur 6.1 du 17 mai 2015 au 1^{er} décembre 2015.



Dates des levés topographiques et échantillonnage: 16 mai 2015 (avant instrumentation des capteurs)

- 30 août 2015
- 26 octobre 2015

Annexe 54. 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