ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DES FOYERS D'EROSION EN BORDURE DE LA ROUTE 138 SUR LA COTE-NORD AFIN D'IDENTIFIER DES SOLUTIONS D'ADAPTATION POUR LA ROUTE 138

NO. DE PROJET : CC03.1

Rapport final

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.

Réalisé pour le compte du ministère des Transports du Québec

2019

AVERTISSEMENT

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports du Québec (MTQ), Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation et a été financée par le Fonds vert dans le cadre de l'action 6.3 du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques (PACC 2013-2020).

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

CHERCHEUR RESPONSABLE DU PROJET

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)
300, allée des Ursulines, case postale 3300
Rimouski (Québec) G5L 3A1
Téléphone : (418) 723-1986, poste 1257 (bureau) ou poste 1206 (laboratoire)
Télécopieur : (418) 724-1847
Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca
Site web : http://dgizc.uqar.ca

CHARGÉ DE PROJET AU MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (MTQ)

Michel Michaud, géog., M.ATDR

Conseiller en recherche et chargé de projet en adaptation aux changements climatiques
Direction de la coordination de la recherche et de l'innovation
Direction générale de la gestion des actifs routiers et de l'innovation
Ministère des Transports du Québec
800,Place d'Youville, 15e étage
Québec (Québec) G1R 3P4
Téléphone : 418 643-0800 poste 24161
Courriel : michel.michaud@transports.gouv.qc.ca

COMITÉ DE SUIVI

Michel Michaud, chargé du projet à la DCRI
Corina Nicorici, conseillère en recherche, géomorphologue,DCRI
Annie Lévesque, répondante régionale en sécurité civile, DGCN
Marie-Hélène Grenon, ing., DGCN
Simon Bickay, biologiste, DGCN
Pascal Bernatchez, chercheur responsable, LDGIZC, UQAR
Maude Corriveau, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Évelyne Arsenault, professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Evelyne Arsenault, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Analyse et rédaction

Marion Bandet, Ph. D., Ingénierie, LDGIZC, POLR, UQAR-ISMER
Traitement des données de vagues et niveaux d'eau

Pascal Bernatchez Ph. D., géomorphologie côtière, LDGIZC, UQAR
Analyse et rédaction

Catherine Bruyère, B. Sc., candidate à la maîtrise, LDGIZC, UQAR
Levés de terrain

Louis Cormier, B. Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Levés de terrain et traitement des données LiDAR

Maude Corriveau, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR
Analyse et rédaction

Denys Dubuc, B. Sc., assistant de recherche, LDGIZC, UQAR
Gestion de l'équipement et installation de l'instrumentation

Steeve Dugas, B. Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR
Identification des secteurs avec foyers d'érosion

Nicholas Marion, B. Sc., assistant de recherche, LDGIZC, UQAR
Gestion de l'équipement et traitement des données LiDAR

Gabriel Montpetit-Allard, B. Sc., assistant de recherche et candidat à la maîtrise, LDGIZC, UQAR
Levés de terrain

RÉFÉRENCE SUGGÉRÉE

Corriveau, M., Bernatchez, P., Arsenault, E., Bandet, M., 2019. Analyse de la dynamique des foyers d'érosion en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord afin d'identifier des solutions d'adaptation pour la route 138. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtière, Université du Québec à Rimouski, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, 2019. 411 pages + Annexes

SYNTHESE DES CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les foyers d'érosion sont des segments côtiers où les vitesses de reculs sont sévères et plus importantes que celles mesurées sur les segments adjacents. Kraus et Galgano (2001) propose une typologie des foyers d'érosion d'après les processus et causes. Celle-ci a été adaptée (nouvelles caractéristiques) et six types de foyers d'érosion ont été ajoutés à la liste originale.

Une cartographie des foyers d'érosion sur la Côte-Nord en bordure de la route 138 a été réalisée à partir des données récentes issues des stations du réseau de suivi de l'érosion côtière du LDGIZC (2000-2015). Puis, une analyse historique a été réalisée pour 10 sites d'étude. Ce travail a permis de montrer qu'il est important de considérer les données historiques et récentes pour : 1) déterminer adéquatement les vitesses de recul les plus rapides ayant pu être observées sur le littoral d'un foyer d'érosion ; et 2) tenir compte de la mobilité spatio-temporelle des foyers d'érosion.

Des projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050 ont été réalisées pour six sites d'étude. L'impact des choix de la méthode statistique et de la période de calcul du taux à projeter a été quantifié et s'avère important. La méthode statistique la plus souvent privilégiée a été l'*ordinary least square* (OLS). La période de calcul choisie, quant à elle, varie d'un site à l'autre en fonction du mode d'évolution historique de la côte et en fonction des intervalles au cours desquels les vitesses de reculs les plus rapides ont été mesurées.

Dans une perspective d'aménagement du territoire, trois variables cartographiques complémentaires méritent d'être ajoutées aux cartes de projections d'évolution côtière. Premièrement, l'enveloppe de mobilité historique (EMH) permet de localiser les territoires ayant déjà été touchés par le déplacement de la ligne de rivage durant la période d'analyse. Les territoires contenus à l'intérieur des limites de l'enveloppe sont généralement bas et potentiellement sensibles au risque de submersion. Deuxièmement, la zone d'erreur quadratique moyenne permet de représenter cartographiquement la variabilité de la position de la ligne de rivage observée autour de la tendance historique ayant été calculée. Troisièmement, la ligne nommée Rmax_5ans permet de représenter les zones d'érosion sévère et d'intégrer la mobilité spatiale des foyers d'érosion côtière aux projections. Il s'agit d'une ligne qui représente la position de la ligne de rivage si la vitesse de recul la plus sévère ayant été mesurée au cours de la période historique était de nouveau atteinte et maintenue sur une période de 5 ans.

Une analyse plus détaillée de la dynamique côtière a été effectuée dans le secteur de Longue-Pointe-de-Mingan à l'endroit la route 138 est menacée à

court terme. Ce secteur est exposé à des vagues qui ont atteint des hauteurs significatives maximales de 4 à 5 m de septembre à janvier inclusivement au large lors des mesures en 2015 et 2016. C'est lors de cette période que le recul de la côte est généralement observé.

Les relevés topographiques de la plage de manière saisonnière et pluriannuelle ont permis de confirmer que l'évolution du trait de côte est conditionnée par les échanges sédimentaires entre les barres sableuses prélittorales, les cordons de bas estran et la plage. La bathymétrie influence le déferlement des vagues et favorise des courants de retour qui maintiennent localement un déficit sédimentaire de la plage et la présence d'un foyer d'érosion, et ce, malgré une quantité importante de sédiments en transit. En l'absence d'un pied de glace de bas estran et de glace de mer lors de la période de suivi, le front du pied de glace de haut estran agit comme une structure rigide et favorise la réflexion des vagues qui génère de l'affouillement et l'érosion de la partie inférieure de la plage et le bas estran. Toutefois, une quantité assez importante de sédiments est piégée dans et sur le pied de glace. Ainsi au printemps avec la fonte sur place d'une partie du pied de glace, les sédiments relargués entraînent la formation d'une crête de plage.

Nous recommandons la relocalisation de la route 138 dans le secteur ouest de la zone d'étude en raison du foyer d'érosion qui s'est maintenu tant récemment qu'au cours des 50 dernières années. Pour le secteur centre, même si la relocalisation est souhaitable à long terme, il est recommandé de mettre en place, idéalement en juin, un système d'épis. Peu importe la solution qui sera retenue par le Ministère, il serait pertinent de poursuivre les relevés tout en intégrant des levés bathymétriques pour couvrir davantage la zone prélittorale.

Enfin, il serait fort pertinent de mieux quantifier l'effet du pied de glace sur la dynamique morphosédimentaire des côtes sablonneuses, et plus particulièrement les effets de la réduction du couvert de glace sur l'évolution morphologique des plages et par conséquent sur les vitesses de déplacement du littoral.

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION 24

1.1 Typologie des foyers d'érosion 24
1.2 Objectifs du projet 25

2 OBJECTIF 1 : CARACTERISATION DES FOYERS D'EROSION 26

2.1 Typologie des foyers d'érosion 26
2.2 Localisation et cartographie des foyers d'érosion de la Côte-Nord 39
2.3 Description détaillée des sites d'étude 43
2.4 Conclusion 151

3 OBJECTIF 2 : PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE 152

3.1 Fondements généraux des projections d'évolution côtière selon une approche empirique 153
3.2 Positionnement de la ligne de rivage 157
3.3 Méthodes de calcul des taux d'évolution historiques pouvant être utilisées pour les projections d'évolution côtière 161
3.4 Périodes pour le calcul des taux utilisés dans les projections 183
3.5 Méthode de déplacement de la ligne de rivage : forme de la ligne de rivage de la projection 191
3.6 Modification de l'équation de base et ajout de variables cartographiques complémentaires 194
3.7 Projections d'évolution côtière : sites d'étude 204
3.8 Perspectives 249
3.9 Conclusion 250

4 OBJECTIF 3 : ÉVALUATION DE L'ORIGINE ET DE LA DYNAMIQUE DES FOYERS D'EROSION DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 252

4.1 Rappel du projet sur Longue-Pointe-de-Mingan 252
4.2 Description du site et justification du choix du site 254
4.3 Analyse de l'hydrodynamique locale de Longue-Pointe-de-Mingan 258
4.4 Analyse des variations morphologiques du haut estran à Longue-Pointe-de-Mingan 289
4.5 Description des variations morphologiques et des conditions hydrodynamiques observées 296
4.6 Synthèse de la dynamique hydrosédimentaire à Longue-Pointe-de-Mingan 381

5 IDENTIFIER LES SOLUTIONS D'ADAPTATION LES PLUS APPROPRIEES SELON LA DYNAMIQUE COTIERE POUR LE FOYER D'EROSION DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN EN BORDURE DE LA ROUTE 138 386

5.1 Évolution du trait de côte par rapport à la route aux abords de la sortie de ponceau dans le secteur ouest de Longue-Pointe-de-Mingan 386
5.2 Recommandations des solutions pour les secteurs ouest et centre 389

6 CONCLUSIONS GENERALES 397

6.1 Conclusion objectif 1 397
6.2 Conclusion objectif 2 398
6.3 Conclusion objectif 3 399
6.4 Conclusion objectif 4 400

7 REFERENCE 402

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Kraus et Galgano (2001), Beach erosional hot spots: types, causes, and solutions

Annexe B : Cartes individuelles des secteurs d'étude préliminaires avec déplacement moyen des stations de suivi

Annexe C : Valeurs mensuelles de la moyenne et du 95e percentile pour chacun des capteurs

Annexe D : Graphiques de Hs et de net mensuel à l'AWAC

Annexe E : Rose des directions

Annexe F : Instrumentation du système mobile de laser terrestre

Annexe G : Calcul d'erreur du système mobile de laser terrestre

Annexe H : Traitement des données acquises par le système mobile de laser terrestre

Annexe I : Description des appareils DGPS utilisés lors des différentes campagnes de terrain

Annexe J : Validation des MNT

Annexe K : MNT réalisés à partir des profils de plage

Annexe L : MNT réalisés à partir des levés lidar

Annexe M : Livrables numériques ayant été remis

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. CLE D'IDENTIFICATION DES TYPES DE FOYERS D'EROSION NON EXCLUSIFS AUX RECHARGES DE PLAGE EN FONCTION DE LEUR DUREE ET DU TRANSPORT SEDIMENTAIRE DOMINANT 34
FIGURE 2. LOCALISATION DES SECTEURS D'ETUDE PRELIMINAIRES CIBLES 40
FIGURE 3. LIGNE DE RIVAGE MULTI-DATE, TRANSECT AU 20 M (JAUNE) ET GRAPHIQUE DE POSITION DES LIGNES DE RIVAGE DANS LE TEMPS POUR UN TRANSECT (TIREE DE ANDERSON ET AL., 2015) 44
FIGURE 4. EXEMPLE : TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), MOISIE 1 47
FIGURE 5. EXEMPLE : MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES, MOISIE 1 48
FIGURE 6. EXEMPLE : RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT (GAUCHE) ET PAR INTERVALLE (DROITE), MOISIE 1 48
FIGURE 7. EXEMPLE : DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), MOISIE 1 50
FIGURE 8. EXEMPLE : LARGEUR DE L'ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, MOISIE 1 50
FIGURE 9. EXEMPLE DE REPARTITION SPATIALE DE TRANSECTS ET DE STATIONS DE SUIVI 51
FIGURE 10. EXEMPLE : TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, MOISIE 1 52
FIGURE 11. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, PENTECOTE 1 (PEN-23, ANNULEE EN 2001-2002) 53
FIGURE 12. LOCALISATION DES SITES DE FOYERS D'EROSION ANALYSES DANS LE SECTEUR DE PENTECOTE (RIVIERE CALUMET – PENTECOTE 1, RESTAURANT LE ROUTIER – PENTECOTE 2, RUISSEAU – PENTECOTE 3) 54
FIGURE 13. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), PENTECOTE 1 55
FIGURE 14. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES, PENTECOTE 1 56
FIGURE 15. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, PENTECOTE 1 56
FIGURE 16. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, PENTECOTE 1 58
FIGURE 17. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), PENTECOTE 1 58
FIGURE 18. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, PENTECOTE 1 58
FIGURE 19. VEGETALISATION DE LA PARTIE SUPERIEURE DU HAUT ESTRAN DEVANT LES TRANSECTS 12 ET 13, PENTECOTE 1 59
FIGURE 20. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, PENTECOTE 1 60
FIGURE 21. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, PENTECOTE 1 60
FIGURE 22. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, PENTECOTE 2 ... 62

FIGURE 23. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), PENTECOTE 2 63
FIGURE 24. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES, PENTECOTE 2 64
FIGURE 25. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, PENTECOTE 2 64
FIGURE 26. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, PENTECOTE 2 65
FIGURE 27. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), PENTECOTE 2 65
FIGURE 28. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, PENTECOTE 2 65
FIGURE 29. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, PENTECOTE 2 66
FIGURE 30. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, PENTECOTE 2 66
FIGURE 31. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, PENTECOTE 3 ... 70
FIGURE 32. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), PENTECOTE 3 71
FIGURE 33. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES, PENTECOTE 3 72
FIGURE 34. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, PENTECOTE 3 72
FIGURE 35. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), PENTECOTE 3 73
FIGURE 36. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, PENTECOTE 3 73
FIGURE 37. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, PENTECOTE 3 74
FIGURE 38. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, PENTECOTE 3 74
FIGURE 39. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, PENTECOTE 3 75
FIGURE 40. PROXIMITE DE LA COTE A L'ENDROIT OU S'ECOULE UN PETIT COURS D'EAU, PENTECOTE 3 EN 2009 (PHOTO MTQ) 75
FIGURE 41. ÉVOLUTION DU LITTORAL DEVANT LA STATION DE SUIVI PEN-17 77
FIGURE 42. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, GALLIX 1 80
FIGURE 43. LOCALISATION DES SITES DE FOYERS D'EROSION ANALYSES DANS LE SECTEUR DE GALLIX (RIVIERE BROCHU – GALLIX 1, RUE BELL – GALLIX 2) 81
FIGURE 44. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), GALLIX 1 82
FIGURE 45. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES (EPR-INTERVALLE), GALLIX 1 83
FIGURE 46. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, GALLIX 1 83
FIGURE 47. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, GALLIX 1 84

FIGURE 48. TAUX D'EVOLUTION (MMM_5ANS) DES STATIONS DE SUIVI VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, GALLIX 1 85
FIGURE 49. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, GALLIX 1 85
FIGURE 50. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), GALLIX 1 88
FIGURE 51. LARGEUR DE L'ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, GALLIX 1 88
FIGURE 52. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, GALLIX 2 91
FIGURE 53. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), GALLIX 2 92
FIGURE 54. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECT ET INTERVALLES, GALLIX 2 92
FIGURE 55. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, GALLIX 2 93
FIGURE 56. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, GALLIX 2 93
FIGURE 57. TAUX D'EVOLUTION MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, GALLIX 2 94
FIGURE 58. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, GALLIX 2 (UNE SEULE MESURE EN 2010-2011, LA PLUPART DES BORNES SONT EN REIMPLANTATION) 94
FIGURE 59. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE (EQUIVALENTE A 0 M) CREE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), GALLIX 2 97
FIGURE 60. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, GALLIX 2 97
FIGURE 61. ÉTAT DE LA COTE A GALLIX 2, TRANSECT 10 A 14, EN SEPTEMBRE 2010 98
FIGURE 62. ÉTAT DE LA COTE A GALLIX 2, TRANSECT 10 A 14, EN SEPTEMBRE 2017 98
FIGURE 63. COMPARAISON D'IMAGES AERIENNES 2005 ET 2010 MONTRANT LA DISPARITION DE LA SAILLIE TRIANGULAIRE (SOURCE DES IMAGES : GOOGLE EARTH) 99
FIGURE 64. ÉTAT DE LA COTE EN SEPTEMBRE 2017 100
FIGURE 65. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, SEPT-ÎLES 102
FIGURE 66. LOCALISATION DU SITE DE FOYER D'EROSION ANALYSE DANS LE SECTEUR DE SEPT-ÎLES 103
FIGURE 67. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), SEPT-ÎLES 104
FIGURE 68. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES (EPR-INTERVALLE), SEPT-ÎLES 105
FIGURE 69. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, SEPT-ÎLES 105
FIGURE 70. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, SEPT-ÎLES 106
FIGURE 71. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), SEPT-ÎLES 106
FIGURE 72. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, SEPT-ÎLES 107
FIGURE 73. DEVELOPPEMENT URBAIN SUR UN TERRITOIRE DU DOMAINE MARITIME DE 1930, SEPT-ÎLES 107
FIGURE 74. RECUL MAJEUR SURVENU PRES DU TRANSECT 40 ENTRE 2005 (GAUCHE) ET 2009 (DROITE) 109

FIGURE 75. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, SEPT-ÎLES 110
FIGURE 76. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, SEPT-ÎLES 112
FIGURE 77. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, MOISIE 1 114
FIGURE 78. LOCALISATION DES SITES DE FOYERS D'EROSION ANALYSES DANS LE SECTEUR DE MOISIE (MOISIE-OUEST – MOISIE 1, MOISIE-EST – MOISIE 2) 115
FIGURE 79. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), MOISIE 1 116
FIGURE 80. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), MOISIE 1 116
FIGURE 81. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, MOISIE 1 117
FIGURE 82. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES (EPR-INTERVALLE), MOISIE 1 118
FIGURE 83. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, MOISIE 1 118
FIGURE 84. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, MOISIE 1 119
FIGURE 85. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, MOISIE 1 120
FIGURE 86. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, MOISIE 1 120
FIGURE 87. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, MOISIE 2 124
FIGURE 88. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, MOISIE 2 (UN SEUL INTERVALLE DISPONIBLE) .. 125
FIGURE 89. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES (EPR-INTERVALLE), MOISIE 2 126
FIGURE 90. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, MOISIE 2 126
FIGURE 91. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, MOISIE 2 127
FIGURE 92. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), MOISIE 2 127
FIGURE 93. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, MOISIE 2 128
FIGURE 94. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, MOISIE 2 129
FIGURE 95. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 132
FIGURE 96. LOCALISATION DES SITES DE FOYERS D'EROSION ANALYSES DANS LE SECTEUR DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN (LONGUE-POINTE-DE-MINGAN-OUEST – LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN-CENTRE – LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2) 133
FIGURE 97. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 134
FIGURE 98. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 135

FIGURE 99. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 135
FIGURE 100. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 136
FIGURE 101. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 136
FIGURE 102. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 137
FIGURE 103. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 137
FIGURE 104. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 140
FIGURE 105. LOCALISATION DES STATIONS DE SUIVI ET DES TRANSECTS D'ANALYSE HISTORIQUE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 142
FIGURE 106. TAUX D'EVOLUTION EPR-HISTORIQUE, WLS-HISTORIQUE ET OLS-HISTORIQUE (SUR TOUTES LES LIGNES DE RIVAGE), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 143
FIGURE 107. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 144
FIGURE 108. RATIO D'EVOLUTION POSITIF (ACCUMULATION) ET NEGATIF (EROSION) EN POURCENTAGE PAR TRANSECT ET PAR INTERVALLE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 144
FIGURE 109. TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE PAR INTERVALLE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 145
FIGURE 110. TAUX D'EVOLUTION ANNUELS MMM_5ANS BORNES VS TAUX D'EVOLUTION EPR-INTERVALLE DES TRANSECTS LES PLUS PRES, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 145
FIGURE 111. STATION DE SUIVI MIN-62, PHOTO DU 22 AOUT 2011 (PHOTO DU HAUT) ET DU 25 JUIN 2014 (PHOTO DU BAS) 146
FIGURE 112. DISTANCES (M) DES LIGNES DE RIVAGE EXPRIMEES PAR RAPPORT A LA LIGNE DE BASE (POSITION « MOYENNE » DU LITTORAL, LIGNE DE BASE CREEE SELON L'ALGORITHME DE VORONOÏ, CORRESPOND A 0 M), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 147
FIGURE 113. ENVELOPPE DE MOBILITE HISTORIQUE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 147
FIGURE 114. MESURES DE DEPLACEMENT DU LITTORAL A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 147
FIGURE 115. MODELE CONCEPTUEL DE L'EVOLUTION COTIERE, MODIFIE DE DOLAN ET AL., 1991 (EXEMPLE D'UNE COTE OU LA TENDANCE EST POSITIVE, ACCUMULATION) 154
FIGURE 116. ILLUSTRATION DE L'EQUATION DE BASE DE PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE MENANT A UN RECUL DE 2,5 M EN 5 ANS 155
FIGURE 117. TRACES UTILISES POUR L'EVOLUTION HISTORIQUE DU LITTORAL SELON DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE LA COTE (MODIFIE DE DAIGLE ET AL., 2006) 160
FIGURE 118. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON L'EPR POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 163
FIGURE 119. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON L'AOR POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 164
FIGURE 120. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON L'OSL POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 165

FIGURE 121. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON LE WLS POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 166
FIGURE 122. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON LE RLS POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 167
FIGURE 123. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON LE RWLS POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 167
FIGURE 124. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON LE LAD POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 168
FIGURE 125. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON LE WLAD POUR LE TRANSECT 38 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 168
FIGURE 126. CALCUL DU TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE SELON LE JK POUR LE TRANSECT 35 DU SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 169
FIGURE 127. PROJECTION A PARTIR D'UN MODELE POLYNOMIAL SELON LA METHODE PAR MDL, TIRE DE CROWELL ET AL., 1997 171
FIGURE 128. RESULTATS DE GONCALVES ET AL. (2012) : DISTANCE ENTRE LA LIGNE OBSERVEE ET LA LIGNE PREDITE SELON TROIS MODELES 172
FIGURE 129. DIFFERENCE ENTRE LES TAUX MINIMUM ET MAXIMUM OBTENUS POUR CHAQUE TRANSECT, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 174
FIGURE 130. EFFET SUR LES DISTANCES DE PROJECTION D'EVOLUTION COTIERE SUR 40 ANS SELON L'UTILISATION DU TAUX MINIMUM OU MAXIMUM OBTENU POUR CHAQUE TRANSECT, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 175
FIGURE 131. TAUX CALCULES SELON DIFFERENTES METHODES POUR LES TRANSECTS DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 176
FIGURE 132. TAUX CALCULES SELON LA METHODE OLS ET WLS, GALLIX 1, PERIODE HISTORIQUE (TOUTES LES LIGNES DE 1930 A 2010) 178
FIGURE 133. ÉCARTS ENTRE LES TAUX CALCULES SELON LA METHODE OLS ET WLS, GALLIX 1, PERIODE HISTORIQUE (TOUTES LES LIGNES DE 1930 A 2010) 178
FIGURE 134. ÉCART ENTRE LES TAUX OSL ET WLS POUR DIFFERENTES PERIODES 179
FIGURE 135. TAUX CALCULES SELON LA METHODE OLS ET WLS, GALLIX 1, PERIODE 2001-2009 179
FIGURE 136. ÉCART ENTRE LES TAUX CALCULES SELON LA METHODE OLS ET WLS, GALLIX 1, PERIODE 2001-2009 180
FIGURE 137. ÉVOLUTION DE LA DISTANCE ENTRE LA LIGNE DE BASE ET LA LIGNE DE RIVAGE DEVANT LE TRANSECT 17 DE GALLIX 1 181
FIGURE 138. ÉVOLUTION DE LA DISTANCE ENTRE LA LIGNE DE BASE ET LA LIGNE DE RIVAGE DEVANT LE TRANSECT 23 DE GALLIX 1 181
FIGURE 139. ILLUSTRATION DES PERIODES POUVANT ETRE RETENUES POUR LES CALCULS DE TAUX D'EVOLUTION A UTILISER DANS L'EQUATION DES PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE, EXEMPLE ISSU DE GALLIX 1, TRANSECT 20 184
FIGURE 140. TAUX EPR CALCULES POUR LES DIFFERENTES PERIODES TEMPORELLES, GALLIX 1 189
FIGURE 141. TAUX OLS CALCULES POUR LES DIFFERENTES PERIODES TEMPORELLES, GALLIX 1 189
FIGURE 142. ÉCART ENTRE LE TAUX MINIMUM ET LE TAUX MAXIMUM CALCULE SELON DIFFERENTES PERIODES TEMPORELLES 190
FIGURE 143. SCHEMA DU PROBLEME LIE A LA CONSERVATION D'UNE COHERENCE MORPHOLOGIQUE LORS DES PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE 192

FIGURE 144. SCHEMA DE LA MODIFICATION DE LA MORPHOLOGIE DE LA LIGNE DE RIVAGE RENDUE POSSIBLE GRACE AU LISSAGE PAR MOYENNE MOBILE 193
FIGURE 145. SCHEMA REPRESENTANT L'INTEGRATION D'UNE VITESSE D'ACCELERATION DANS LES PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE 195
FIGURE 146. MOBILITE SPATIALE DES ZONES OU L'EROSION EST LA PLUS SEVERE DURANT LA PERIODE HISTORIQUE, SEPT-ÎLES 199
FIGURE 147. SITUATIONS D'EVOLUTION HISTORIQUE DIFFERENTES POUR UN EPR-HISTORIQUE IDENTIQUE 201
FIGURE 148. ILLUSTRATION DE L'ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE POUR DES OBSERVATIONS ELOIGNEES DE LA REGRESSION LINEAIRE (TENDANCE) 202
FIGURE 149. ILLUSTRATION DE L'ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE POUR DES OBSERVATIONS RAPPROCHEES DE LA REGRESSION LINEAIRE (TENDANCE) 203
FIGURE 150. TAUX D'EVOLUTION OLS (MOYENNE MOBILE) A PROJETER OBTENUS A PARTIR DE QUATRE PERIODES DE CALCUL (HISTORIQUE, 1970-2010, 1996-2010 ET 2001-2010), GALLIX 1 207
FIGURE 151. TAUX CALCULES (EPR ET OLS) POUR LA PERIODE HISTORIQUE ET LA PERIODE 1970-2010 POUR LE TRANSECT 13 A GALLIX 1 208
FIGURE 152. REJET DE LA POSITION DE LA LIGNE DE RIVAGE DE 1970 PAR LES METHODES RLS ET RWLS, TRANSECT 13 A GALLIX 1 208
FIGURE 153. TAUX D'EVOLUTION CALCULES SELON DIFFERENTES METHODES (EPR, WLS, OLS) POUR LA PERIODE HISTORIQUE, GALLIX 1 209
FIGURE 154. CHOIX ENTRE LA METHODE EPR ET OLS, TRANSECT 13 A GALLIX 1 209
FIGURE 155. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2050, GALLIX 1 212
FIGURE 156. TAUX D'EVOLUTION OLS (MOYENNE MOBILE) A PROJETER OBTENUS A PARTIR DE QUATRE PERIODES DE CALCUL (HISTORIQUE [1930-2013], 1970-2013, 1996-2013 ET 2001-2013), GALLIX 2 214
FIGURE 157. TAUX D'EVOLUTION CALCULES SELON DIFFERENTES METHODES (EPR, OLS) POUR LA PERIODE 1996-2013, GALLIX 2 215
FIGURE 158. ISOLATION D'UN SEGMENT COTIER A GALLIX 2, L'ELLIPSE BLANCHE MONTRE LA ZONE ISOLEE 217
FIGURE 159. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2030 ET 2050, GALLIX 2 218
FIGURE 160. MATRICE DE COULEURS REPRESENTANT L'EVOLUTION HISTORIQUE PAR TRANSECTS ET INTERVALLES (EPR-INTERVALLE), SEPT-ÎLES 220
FIGURE 161. TAUX D'EVOLUTION OLS (MOYENNE MOBILE) A PROJETER OBTENUS A PARTIR DE CINQ PERIODES DE CALCUL (1950-2009, 1965-2009, 1979-2009, 1996-2009 ET 2001-2009), SEPT-ÎLES 220
FIGURE 162. AVANCEE DE LA LIGNE DE RIVAGE DEVANT UN ENROCHEMENT ENCORE PARTIELLEMENT VISIBLE, TRANSECT 6, SEPT-ÎLES, PHOTO OBLIQUE SEPTEMBRE 2017 221
FIGURE 163. TAUX D'EVOLUTION CALCULES SELON DIFFERENTES METHODES (EPR, OLS) POUR LA PERIODE 1965-2009, SEPT-ÎLES 222
FIGURE 164. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2050, SEPT-ÎLES 225
FIGURE 165. TAUX D'EVOLUTION (EPR) CALCULES SELON DIFFERENTES PERIODES, MOISIE 1 227
FIGURE 166. TAUX D'EVOLUTION (OLS) CALCULES SELON DIFFERENTES PERIODES, MOISIE 1 227
FIGURE 167. ÉTAT DE LA COTE EN SEPTEMBRE 2017 DEVANT LE TRANSECT 44 228
FIGURE 168. TAUX CALCULES SELON LES METHODES STATISTIQUES EPR ET OLS AU TRANSECT 49 229
FIGURE 169. TAUX D'EVOLUTION CALCULES SUR LA PERIODE 1950-2009 A L'AIDE DES METHODES STATISTIQUES EPR ET OLS 229
FIGURE 170. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2050, MOISIE 1 232

FIGURE 171. TAUX D'EVOLUTION POUR LA PERIODE 2005-2014 COMPARATIVEMENT AUX AUTRES PERIODES DE CALCUL SELON LES METHODES EPR ET OLS (LA PERIODE 2005/2009-2014 NE COMPTE QUE DEUX POINTS, EXPLIQUANT LES RESULTATS IDENTIQUES ENTRE LES METHODES OLS ET EPR), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 233
FIGURE 172. VITESSES DE RECUL LORS DES DIFFERENTS INTERVALLES, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1..... 234
FIGURE 173. TAUX D'EVOLUTION OLS (MOYENNE MOBILE) A PROJETER OBTENUS A PARTIR DE TROIS PERIODES DE CALCUL (HISTORIQUE-1948-2014, 1976-2014, 1976-2014), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1..... 235
FIGURE 174. TAUX CALCULES SELON LES METHODES EPR ET OSL (GRAPHIQUE DE GAUCHE) ET DIFFERENCE ENTRE CES DEUX METHODES (GRAPHIQUE DE DROITE) 236
FIGURE 175. BIAIS POSITIF DE L'EQUATION OBTENUE A L'AIDE DE LA METHODE EPR, TRANSECT 2, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 237
FIGURE 176. BIAIS NEGATIF DE L'EQUATION OBTENUE A L'AIDE DE LA METHODE EPR, TRANSECT 33, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 237
FIGURE 177. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2050, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 .. 240
FIGURE 178. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2050, EXTREMITE EST DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1 241
FIGURE 179. TAUX D'EVOLUTION POUR LA PERIODE 2005-2014 COMPARATIVEMENT AUX AUTRES PERIODES DE CALCUL SELON LES METHODES EPR ET OLS (LA PERIODE 2005/2009-2014 NE COMPTE QUE DEUX POINTS , EXPLIQUANT LES RESULTATS IDENTIQUES ENTRE LES METHODES OLS ET EPR), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 242
FIGURE 180. VITESSES DE RECUL LORS DES DIFFERENTS INTERVALLES, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2..... 243
FIGURE 181. TAUX D'EVOLUTION OLS (MOYENNE MOBILE) A PROJETER OBTENUS A PARTIR DE QUATRE PERIODES DE CALCUL (HISTORIQUE-1967-2014, 1976-2014, 1983-2014 ET 1989-2014), LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 243
FIGURE 182. TAUX CALCULES SELON LES METHODES EPR ET OSL (GRAPHIE DE GAUCHE) ET DIFFERENCE ENTRE CES DEUX METHODES (GRAPHIQUE DE DROITE)..... 244
FIGURE 183. ÉVOLUTION RECENTE DE LA COTE (2014-2017) ET MIGRATION DU CORPS SEDIMENTAIRE VERS L'EST 247
FIGURE 184. PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE VERS L'HORIZON 2050, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 .. 248
FIGURE 185. LOCALISATION DES SECTEURS D'ETUDE A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN INVESTIGUES DANS LE CADRE DU PROJET DE RECHERCHE DE CORRIVEAU ET AL. (2016) (EN JAUNE) ET DE CEUX DU PRESENT PROJET DE RECHERCHE (ORANGE) 253
FIGURE 186. LOCALISATION DES SITES OUEST ET CENTRE A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 255
FIGURE 187. CORDON SABLEUX DE BAS ESTRAN A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN (SECTEUR CENTRE) 257
FIGURE 188. A) CAPTEURS DE PRESSION RBR ; B) VIS D'INSTALLATION DES CAPTEURS ; C) CAPTEUR EN PLACE SUR LA PLAGE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 259
FIGURE 189. LOCALISATION DES INSTRUMENTS DE MESURE DE VAGUES ET DES PROFILS DE PLAGE..... 260
FIGURE 190. COURANTOMETRE A EFFET DOPPLER (ADV) DE TYPE VECTOR (NORTEK) INSTALLE A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN..... 263
FIGURE 191. MOYENNE DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES (HS) AUX DIFFERENTS INSTRUMENTS 267
FIGURE 192. 95^{E} PERCENTILE DES HAUTEURS SIGNIFICATIVES (HS) AUX DIFFERENTS INSTRUMENTS 268
FIGURE 193. HAUTEURS SIGNIFICATIVES (HS) MAXIMALES AUX DIFFERENTS INSTRUMENTS..... 272
FIGURE 194. MOYENNE DU NIVEAU D'EAU TOTAL (NET) AUX DIFFERENTS INSTRUMENTS 274

FIGURE 195. 95E PERCENTILE DU NIVEAU D'EAU TOTAL (NET) AUX DIFFERENTS INSTRUMENTS 275
FIGURE 196. NIVEAU D'EAU TOTAL (NET) MAXIMAL POUR LES DEUX CAPTEURS DE BAS ESTRAN ET DE L'AWAC (AU LARGE) 276
FIGURE 197. COURBES DE HS A L'AWAC POUR LA PERIODE D'ACQUISITION 2015-2017 277
FIGURE 198. HAUTEUR SIGNIFICATIVE (HS) MOYENNE MENSUELLE (AWAC) 277
FIGURE 199. HAUTEUR SIGNIFICATIVE (HS) MAXIMALE MENSUELLE (AWAC)..... 278
FIGURE 200. 95E PERCENTILE MENSUEL DE LA HS - AWAC LPM 278
FIGURE 201. NOMBRE D'HEURES PAR MOIS DE DEPASSEMENT DU 95E P. DE LA HS 2015-2017 - AWAC LPM 279
FIGURE 202. COURBES DE HS ET DE NET A L'AWAC LPM POUR JANVIER 2017 280
FIGURE 203. NOMBRE D'HEURES DE DEPASSEMENT DU 95E P. DE LA HS ET DU NET – AWAC LPM 281
FIGURE 204. ROSE DES VAGUES EN FONCTION DES HS 282
FIGURE 205. ROSE DES VAGUES EN FONCTION DES PERIODES DE VAGUES 283
FIGURE 206. A) SCHEMA DES MECANISMES INDUISANT LE TRANSPORT LONGITUDINAL DES SEDIMENTS*, ADAPTE DES SCHEMAS DU COURS D'OCEANOGRAPHIE PHYSIQUE DE THE UNIVERSITY OF WESTERN ONTARIO (HTTP : //INSTRUCT.UWO.CA) (B, C) : SCHEMAS TRADUISANT LA DEPENDANCE DES FLUX DE SEDIMENT LONGITUDINAL** Q EN FONCTION DE L'ANGLE D'INCIDENCE (B) ET DE LA HAUTEUR (C) DES VAGUES AU DEFERLEMENT, RESPECTIVEMENT A HAUTEUR ET A ANGLES CONSTANTS (TIREE DE CHARLES ET AL., 2012). 285
FIGURE 207. DIRECTION DES VAGUES LES PLUS FREQUENTES 286
FIGURE 208. DIRECTION MOYENNE DES VAGUES ET GRADATION DE LA HS ENTRE LES 16 OCT. 2015 ET 15 JUIN 2017 287
FIGURE 209. DIRECTION DES VAGUES SUPERIEURES A 2 M ET CLASSIFICATION DE L'ANGLE D'INCIDENCE DES VAGUES 288
FIGURE 210. LOCALISATION DES PROFILS DE PLAGE REALISES DANS LES SECTEURS « OUEST » (27 PROFILS) ET « CENTRE » (11 OU 12 PROFILS)..... 292
FIGURE 211. RELEVE DE PROFILS DE PLAGE AU DGPS 293
FIGURE 212. EXEMPLE DE MNT PRODUIT AVEC *GEOSTATICAL ANALYST* (SECTEUR CENTRE) 294
FIGURE 213. IDENTIFICATION D'EVENEMENTS POTENTIELLEMENT MORPHOGENES 297
FIGURE 214. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST – ENTRE LE 20 FEVRIER ET 18 AVRIL 2015 298
FIGURE 215. ÉVOLUTION DU PROFIL 6 A L'HIVER 2015 299
FIGURE 216. PIED DE GLACE CHARGE EN SEDIMENTS (19 AVRIL 2015)..... 299
FIGURE 217. TRANSFERT DE SEDIMENTS DU PIED DE GLACE VERS LA PLAGE PROVENANT D'UN CHENAL SUPRAGLACIEL (19 AVRIL 2015). 300
FIGURE 218. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 18 AVRIL ET LE 17 MAI 2015 301
FIGURE 219. ÉVOLUTION DU PROFIL 16 ENTRE LE 18 AVRIL ET LE 31 JUILLET 2015. 302
FIGURE 220. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 17 MAI ET LE 31 JUILLET 2015 303
FIGURE 221. ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE ENTRE LE 17 MAI 2015 ET LE 31 JUILLET 2015..... 304
FIGURE 222. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 31 JUILLET ET 27 SEPTEMBRE 2015 305

FIGURE 223. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 1.2 ET 1.3 SECTEUR OUEST – 31 JUILLET AU 27 SEPTEMBRE 2015 306
FIGURE 224. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 27 SEPTEMBRE ET LE 26 NOVEMBRE 2015 308
FIGURE 225. ÉVOLUTION DU PROFIL 17 ENTRE LE 31 JUILLET ET LE 26 NOVEMBRE 2015 308
FIGURE 226. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 1.2 ET 1.3 SECTEUR OUEST – DU 27 SEPTEMBRE AU 26 NOVEMBRE 2015 310
FIGURE 227. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS, B) DE LA PERIODE ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 16 OCTOBRE AU 26 NOVEMBRE 2015 312
FIGURE 228. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 26 NOVEMBRE 2015 ET LE 9 FEVRIER 2016 314
FIGURE 229. ÉVOLUTION DU PROFIL 10 ENTRE LE 26 NOVEMBRE 2015 ET LE 5 MAI 2016 314
FIGURE 230. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE 9 FEVRIER ET LE 5 MAI 2016 ... 315
FIGURE 231. FORMATION D'UNE CRETE DE PLAGE DEVANT UNE MICROFALAISE D'EROSION SUR LA PARTIE SUPERIEURE DE LA PLAGE VIS-A-VIS LES PROFILS 23 A 27, 24 AVRIL 2016 316
FIGURE 232. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 26 NOVEMBRE 2015 AU 9 FEVRIER 2016 318
FIGURE 233. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 9 FEVRIER AU 5 MAI 2016 320
FIGURE 234. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 5 MAI ET LE 16 SEPTEMBRE 2016 321
FIGURE 235. ÉVOLUTION DU PROFIL 6 ENTRE LE 6 JUIN ET LE 16 SEPTEMBRE 2016 322
FIGURE 236. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 1.2 ET 1.3 – SECTEUR OUEST – 4 JUIN AU 16 SEPTEMBRE 2016 323
FIGURE 237. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 5 MAI AU 6 JUIN 2016 325
FIGURE 238. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 6 JUIN AU 16 SEPTEMBRE 2016 327
FIGURE 239. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 16 SEPTEMBRE ET LE 13 OCTOBRE 2016 329
FIGURE 240. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 15 OCTOBRE ET LE 14 NOVEMBRE 2016 330
FIGURE 241. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR OUEST - ENTRE LE 15 NOVEMBRE ET LE 15 DECEMBRE 2016 331
FIGURE 242. CLIMAT DE VAGUES DU CAPTEUR 1.3 SECTEUR OUEST –16 SEPTEMBRE AU 13 OCTOBRE 2016 .. 332
FIGURE 243. CLIMAT DE VAGUES DU CAPTEUR 1.3 SECTEUR OUEST – 15 OCTOBRE AU 14 NOVEMBRE 2016 . 333
FIGURE 244. ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA PLAGE : A) ELEVATION DE LA PLAGE LE 4 NOVEMBRE 2016 ; B) ELEVATION DE LA PLAGE LE 14 NOVEMBRE 2016 ; C) DIFFERENTIEL D'ELEVATION ENTRE LE 4 ET LE 14 NOVEMBRE 2016 333
FIGURE 245. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 15 OCTOBRE AU 14 NOVEMBRE 2016 336
FIGURE 246. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 14 NOVEMBRE AU 15 DECEMBRE 2016 338

FIGURE 247. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 20 FEVRIER ET LE 19 AVRIL 2015 340
FIGURE 248. ÉVOLUTION DU PROFIL 2 ENTRE LE 20 FEVRIER ET LE 16 MAI 2015 340
FIGURE 249. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 19 AVRIL ET LE 16 MAI 2015 341
FIGURE 250. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE – ENTRE LE 16 MAI ET LE 2 AOUT 2015 342
FIGURE 251. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE – ENTRE LE 2 AOUT ET LE 29 SEPTEMBRE 2015 343
FIGURE 252. CLIMAT DE VAGUES DU CAPTEUR 2.2 – SECTEUR CENTRE – 2 AOUT AU 29 SEPTEMBRE 2015 ... 344
FIGURE 253. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 29 SEPTEMBRE ET LE 26 NOVEMBRE 2015 345
FIGURE 254. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 2.2 ET 2.4 – SECTEUR CENTRE – 29 SEPTEMBRE AU 26 NOVEMBRE 2015 347
FIGURE 255. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 29 SEPTEMBRE AU 26 NOVEMBRE 2015 349
FIGURE 256. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 26 NOVEMBRE 2015 ET LE 11 FEVRIER 2016 351
FIGURE 257. ÉVOLUTION DU PROFIL 7 ENTRE LE 26 NOVEMBRE 2015 ET LE 11 FEVRIER 2016 351
FIGURE 258. ÉVOLUTION DU PROFIL 3 ENTRE LE 26 NOVEMBRE 2015 ET LE 7 MAI 2016 352
FIGURE 259. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 11 FEVRIER ET LE 7 MAI 2016 352
FIGURE 260. ÉVOLUTION DU PROFIL 10 ENTRE LE 26 NOVEMBRE 2015 ET LE 7 MAI 2016 353
FIGURE 261. FORMATION D'UN CORDON SABLEUX EN BORDURE DE LA PLAGE 353
FIGURE 262. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 7 MAI ET LE 6 JUIN 2016 ... 354
FIGURE 263. CLIMAT DE VAGUES DU CAPTEUR 2.2 – SECTEUR CENTRE – 26 NOVEMBRE 2015 AU 11 FEVRIER 2016 355
FIGURE 264. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 26 NOVEMBRE 2015 AU 11 FEVRIER 2016 357
FIGURE 265. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 11 FEVRIER AU 7 MAI 2016 359
FIGURE 266. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 7 MAI AU 5 JUIN 2016 361
FIGURE 267. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE - ENTRE LE 6 JUIN ET LE 16 SEPTEMBRE 2016 362
FIGURE 268. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 2.2 ET 2.4 – SECTEUR CENTRE – 5 JUIN AU 16 SEPTEMBRE 2016 364
FIGURE 269. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 5 JUIN AU 16 SEPTEMBRE 2016 366
FIGURE 270. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE – ENTRE LE 16 SEPTEMBRE ET LE 14 OCTOBRE 2016 367
FIGURE 271. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE – ENTRE LE 14 OCTOBRE ET LE 15 NOVEMBRE 2016 368

FIGURE 272. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE – ENTRE LE 15 NOVEMBRE ET LE 11 DECEMBRE 2016 369
FIGURE 273. DIFFERENTIEL D'ELEVATION OBSERVE – SECTEUR CENTRE – ENTRE LE 15 NOVEMBRE ET LE 15 DECEMBRE 2016 370
FIGURE 274. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 2.2 ET 2.4 – SECTEUR CENTRE – 16 SEPTEMBRE AU 14 OCTOBRE 2016 372
FIGURE 275. CLIMAT DE VAGUES DES CAPTEURS 2.2 ET 2.4 – SECTEUR CENTRE – 14 OCTOBRE AU 15 NOVEMBRE 2016 373
FIGURE 276. CLIMAT DE VAGUES DU CAPTEUR 2.2 – SECTEUR CENTRE – 15 NOVEMBRE AU 15 DECEMBRE 2016 374
FIGURE 277. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 16 SEPTEMBRE AU 14 OCTOBRE 2016 376
FIGURE 278. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 14 OCTOBRE AU 15 NOVEMBRE 2016 378
FIGURE 279. ROSE DES VAGUES EN FONCTION A) DE LA HS ; B) DE LA PERIODE ; ET C) DIRECTION MOYENNE ET HS DES VAGUES DU 15 NOVEMBRE AU 15 DECEMBRE 2016 380
FIGURE 280. BARRES SABLEUSES SUR LA ZONE PRELITTORALE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN DEVANT LES ZONES D'ETENDUE MAXIMALE DE RELEVES TOPOGRAPHIQUES DES SECTEURS OUEST ET CENTRE (ENCADRES VERTS) 382
FIGURE 281. CORDON LITTORAL RELEVES A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN ET LOCALISATION APPROXIMATIVE DE LA ZONE DE PROFILS 385
FIGURE 282. ÉVOLUTION DU TRAIT DE COTE ENTRE MAI 2015 ET NOVEMBRE 2017 A PROXIMITE DU PONCEAU A LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 387
FIGURE 283. HS ET NET DU 18 OCTOBRE 2015 AU 16 NOVEMBRE 2017 AU LARGE (AWAC) 388
FIGURE 284. SECTEUR DU PONCEAU ENROCHE EN BORDURE LA ROUTE 138, SEPTEMBRE 2017 390
FIGURE 285. SORTIE DU PONCEAU LE 11 OCTOBRE 2014, SANS ENROCHEMENT 391
FIGURE 286. SORTIE DU PONCEAU LE 24 AVRIL 2016 AVEC ENROCHEMENT 392
FIGURE 287. PROPOSITION DE TRACE POUR LA RELOCALISATION DE LA ROUTE 138 DANS LE SECTEUR OUEST (TIREE DE CORRIVEAU ET AL., 2016) 393
FIGURE 288. BARRE DE DEFERLEMENT DANS LE SECTEUR CENTRE, SEPTEMBRE 2017 395

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. FOYERS D'EROSION : TYPES ET CAUSES (TRADUIT ET ADAPTE DE KRAUS ET GALGANO, 2001)..... 28
TABLEAU 2. TYPES DE FOYERS D'EROSION AJOUTES A LA LISTE DE KRAUS ET GALGANO (2001)..... 37
TABLEAU 3. PORTRAIT SOMMAIRE DU DEPLACEMENT MOYEN OBSERVE AUX STATIONS DE SUIVI DANS LES SECTEURS D'ETUDE PRELIMINAIRE CIBLES..... 41
TABLEAU 4. NOMENCLATURE DES SITES D'ETUDE 42
TABLEAU 5. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE PENTECOTE 1 61
TABLEAU 6. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE PENTECOTE 2..... 67
TABLEAU 7. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE PENTECOTE 2 69
TABLEAU 8. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE PENTECOTE 3..... 76
TABLEAU 9. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE PENTECOTE 3 79
TABLEAU 10. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE GALLIX 1..... 87
TABLEAU 11. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE GALLIX 1 90
TABLEAU 12. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE GALLIX 2..... 96
TABLEAU 13. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE GALLIX 2 101
TABLEAU 14. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE SEPT-ÎLES..... 111
TABLEAU 15. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE SEPT-ÎLES..... 113
TABLEAU 16. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE MOISIE 1 122
TABLEAU 17. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE MOISIE 1..... 123
TABLEAU 18. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE MOISIE 2 130
TABLEAU 19. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE MOISIE 2..... 131
TABLEAU 20. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1..... 139
TABLEAU 21. CARACTERISTIQUE DU SITE D'ETUDE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 1..... 141
TABLEAU 22. MESURE DE DEPLACEMENT A PARTIR DES STATIONS DE SUIVI POUR LE SITE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2..... 148
TABLEAU 23. CARACTERISTIQUES DU SITE D'ETUDE DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 150
TABLEAU 24. ERREURS EVALUEES POUR CHACUNE DES POSITIONS DE LA LIGNE DE RIVAGE POUR GALLIX 1 177
TABLEAU 25. ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE, GALLIX 1..... 211
TABLEAU 26. ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE, GALLIX 2..... 216
TABLEAU 27. NOMBRE DE TRANSECTS POUR LESQUELS LES VITESSES ONT ETE ENREGISTREES AU COURS DES DIFFERENTS INTERVALLES D'ANALYSE 223
TABLEAU 28. ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE, MOISIE 1..... 224
TABLEAU 29. NOMBRE DE TRANSECTS POUR LESQUELS LES VITESSES ONT ETE ENREGISTREES AU COURS DES DIFFERENTS INTERVALLES D'ANALYSE 230
TABLEAU 30. ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE, MOISIE..... 231
TABLEAU 31. DIFFERENCES ENTRE LES TAUX CALCULES PAR OLS SUR LES PERIODES DE CALCUL 1948-2014, 1967-2014 ET 1976-2014..... 235
TABLEAU 32. NOMBRE DE TRANSECTS POUR LESQUELS LES VITESSES ONT ETE ENREGISTREES AU COURS DES DIFFERENTS INTERVALLES D'ANALYSE 238
TABLEAU 33. ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 239

TABLEAU 34. NOMBRE DE TRANSECTS POUR LESQUELS LES VITESSES ONT ETE ENREGISTREES AU COURS DES DIFFERENTS INTERVALLES D'ANALYSE 245
TABLEAU 35. ÉVOLUTION DE LA LIGNE DE RIVAGE, LONGUE-POINTE-DE-MINGAN 2 246
TABLEAU 36. NIVEAUX D'EAU MAREGRAPHIQUES ET GEODESIQUES A LA STATION MAREGRAPHIQUE DE MINGAN (# 2470) 256
TABLEAU 37. PERIODE DE DEPLOIEMENT DES CAPTEURS DE PRESSION ET DES COURANTOMETRES 262
TABLEAU 38. VALEURS MOYENNES ET DU 95E PERCENTILE DES HS ENREGISTREES AUX DIFFERENTS CAPTEURS POUR LEUR DUREE TOTALE D'ACQUISITION 266
TABLEAU 39. NOMBRE D'HEURES OU LA HS EST SUPERIEUR AU 95E PERCENTILE DE TOUTE LA SERIE DE DONNEES DISPONIBLE POUR CHACUN DES INSTRUMENTS 270
TABLEAU 40. LISTE DES PROFILS DISPONIBLES. 290
TABLEAU 41. PERIODE D'ANALYSE MORPHOLOGIQUE PAR SITE 295

1 INTRODUCTION

1.1 Typologie des foyers d'érosion

Des mesures effectuées sur le littoral de la Côte-Nord et des Îles-de-la-Madeleine indiquent la présence de foyers d'érosion (*erosion hotspots* en anglais), c'est-à-dire des segments côtiers où la vitesse de recul est nettement supérieure aux segments adjacents. D'une longueur de quelques centaines de mètres, ces foyers d'érosion peuvent se former rapidement et entraîner un recul de 50 m de la côte en moins d'une décennie (Bernatchez et Fraser, 2012 ; Bernatchez et al., 2008), ce qui est très préoccupant lorsque des infrastructures comme des résidences ou une route nationale comme la 138 longent la côte de près, à quelques dizaines de mètres.

L'hypothèse de l'origine des foyers d'érosion est que ceux-ci se formeraient devant des plages déficitaires en sédiments entre des systèmes de barres sableuses de bas estran, alors que l'intensité de l'érosion dépendrait des caractéristiques des vagues et des conditions de tempête. De plus, la réduction du couvert de glace liée au réchauffement climatique (Senneville et al., 2014) expose la côte aux vagues de tempête sur une plus longue période, augmentant le transit sédimentaire et la migration des barres sableuses, même en saison hivernale.

Ces foyers d'érosion n'ont fait l'objet d'aucune étude jusqu'à maintenant sur les côtes du Québec. Or, la compréhension de leur origine et leur localisation sont cruciales pour déterminer les segments routiers à risque. Le développement de ces foyers peut donc avoir des incidences sur la gestion des infrastructures routières, principalement la route nationale 138. Les résultats du projet seront très utiles aux répondants concernés à la direction de la Côte-Nord ; ils pourront mieux déterminer où intervenir et concentrer les investissements au stade de la planification des projets routiers et des études d'opportunités. Les solutions les plus durables pourront être envisagées afin d'assurer la pérennité de la route 138 dans les tronçons de route visés.

1.2 Objectifs du projet

Les objectifs généraux du projet de recherche sont de mieux comprendre la dynamique des foyers d'érosion le long de la route 138, de développer une nouvelle méthode de projection côtière applicable à l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures routières et d'identifier des solutions d'adaptation dans un secteur routier de Longue-Pointe-de-Mingan.

Les objectifs spécifiques du projet de recherche sont :

- Objectif 1 : Effectuer une cartographie des foyers d'érosion sur la Côte-Nord en bordure de la route nationale 138 ;
- Objectif 2 : Développer une méthode pour intégrer la dynamique des foyers d'érosion dans les projections d'évolution côtière servant à l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures routières ;
- Objectif 3 : Évaluer l'origine et la dynamique des foyers d'érosion où la route 138 est menacée à court (moins de 5 ans) et moyen termes (5 à 10 ans) à Longue Pointe-de-Mingan ;
- Objectif 4 : Identifier les solutions d'adaptation les plus appropriées selon la dynamique côtière pour le foyer d'érosion situé à Longue-Pointe-de-Mingan ;
- Objectif 5 : Assurer le transfert des connaissances vers les ressources du ministère des Transports du Québec.

2 OBJECTIF 1 : CARACTERISATION DES FOYERS D'EROSION

Localiser et cartographier les foyers d'érosion de la Côte-Nord (Tadoussac à Natashquan) et caractériser ces foyers d'érosion à l'aide d'une typologie.

Les sections suivantes présentent la localisation des foyers d'érosion ayant été ciblée à partir des données du réseau de suivi LDGIZC (section 2.2). Ceci est suivi par la caractérisation et l'analyse historique des quatre secteurs ayant été retenus pour une description détaillée (total de 10 segments côtiers) (section 2.3). Préalablement, une revue de la typologie des foyers d'érosion telle que proposée par Kraus et Galgano (2001) est présentée à la section 2.1.2. Les analyses des sites d'étude et des littoraux de la Côte-Nord ont permis d'adapter et de bonifier la liste des caractéristiques et des types de foyers d'érosion.

2.1 Typologie des foyers d'érosion

2.1.1 Définition de foyer d'érosion (hot spots)

En géoscience côtière, les foyers d'érosion sont définis comme des segments côtiers où les vitesses de recul sont nettement supérieures à celles des segments adjacents ou alors, où les vitesses de recul sont supérieures à ce qui serait attendu (Kraus et Galgano, 2001 ; List et al., 2006). Dans certains cas, les auteurs identifient les foyers d'érosion (sur les recharges de plage notamment) à partir d'un seuil, et plus précisément lorsque la vitesse d'érosion est de plus de deux fois la moyenne des taux sur les segments adjacents (Kraus et Galgano 2001 ; Benedet et al. 2007).

2.1.2 Typologie de Kraus et Galgano (2001)

Le document de Kraus et Galgano (2001) « *Beach Erosional Hot Spots: Types, Causes, and Solution* » du *US Army Corps of Engineers* propose une liste détaillée des types de foyers d'érosion et de leurs causes. Une partie de cette liste est le résultat des travaux de Bridges (1995) (élément 1 à 8) puis de ceux de Dean et al. (1999) (ajout des éléments 9 à 12) et ceux de Weber (2000). Puisque l'analyse des foyers d'érosion s'est d'abord inscrite dans le cadre d'études portant sur la dynamique des plages et les recharges de plages, un certain nombre de types de foyers d'érosion présentés dans cette liste sont liés directement aux travaux de recharge de plage. Bien qu'aucun des foyers d'érosion identifiés sur la Côte-Nord ne soit lié à des travaux de recharge, nous avons choisi de maintenir l'intégralité de la liste de Kraus et Galgano (2001) et de la présenter dans son ensemble (tableau 1). Plutôt que de

développer une liste propre au territoire à l'étude, nous proposons d'ajouter des éléments à partir des observations faites sur la Côte-nord à ce qui a déjà été réalisé dans la littérature scientifique (section 2.1.3). Le document original de Kraus et Galgano (2001) est placé à l'annexe A.

Kraus et Galgano (2001) présentent les foyers d'érosion à l'aide des caractéristiques suivantes :

1) Le type, c'est-à-dire le nom du type de foyer d'érosion ;
2) Les causes de l'érosion (processus responsables) ;
3) Les directions prédominantes du transport sédimentaire responsable de l'érosion :
    a. Longitudinale
    b. Transversale
4) La durée d'existence :
    a. C : court (annuel) ;
    b. M : Moyen (pluriannuel) ;
    c. P : Persistant (durée de vie du projet, de la propriété ou plus, jusqu'à l'échelle géologique) ;
5) L'étendue latérale :
    a. Locale ;
6) Si le type de foyer d'érosion peut être prédit ou résolu.

Notons qu'au tableau 1, la caractéristique « étendue latérale » n'est pas reprise puisque tous les types de foyers d'érosion présentés par Kraus et Galgano (2001) ont une étendue latérale « locale ». Le tableau 1 n'intègre pas non plus les pistes de solutions émises par Kraus et Galgano (2001). Celles-ci sont disponibles directement dans le document à l'annexe A.

Tableau 1. Foyers d'érosion : types et causes (traduit et adapté de Kraus et Galgano, 2001)

No	Type	Cause de l'érosion	Direction du transport sédimentaire dominante et durée[1]	Spécifications
1	Sélection granulométrique *Dredge selectivity*	Variabilité de la granulométrie et de la vitesse de sédimentation Il s'agit d'un foyer d'érosion qui se produit sur les recharges de plage là où la granulométrie est plus fine puisque les sédiments plus fins sont érodés plus facilement.	Transversale Court-Moyen	Associé aux recharges de plage
2	Pente résiduelle induite par un ouvrage *Residual structure-induced slope*	Pente de la plage (plus abrupte au large) induite par l'existence d'un ancien ouvrage (typiquement des épis)	Transversale Court-Moyen	Associé au démantèlement d'infrastructures côtières (épis)
3	Transformation des vagues liée à la présence d'un banc d'emprunt *Wave transformation over borrow pits*	Transformation des vagues (diffraction, réflexion, réfraction) et courants côtiers associés Lorsque le matériel d'emprunt de la recharge est prélevé au large, mais dans des eaux peu profondes, il y a une modification de la bathymétrie et donc des caractéristiques des vagues qui atteignent la côte.	Longitudinale Moyen	Associé au prélèvement de sédiments pour des recharges de plage Apparenté au type 11
4	Discontinuité des barres (temporelle et/ou spatiale) *Gaps in bars*	Concentration des vagues et courants de retours Les barres d'avant côte permettent aux vagues de déferler et donc de perdre de l'énergie avant d'atteindre les plages. Lorsque les barres sont discontinues, les vagues déferlent plus près de la côte et l'énergie est concentrée entre les barres pouvant ainsi générer de l'érosion localisée. Si les courants de retour sont à l'origine des discontinuités, celles-ci seront plus stables (moins de mobilité de la discontinuité).	Longitudinale Court-Moyen	Associé à des environnements naturels (littoral sans infrastructure) Apparenté au type 18

No	Type	Cause de l'érosion	Direction du transport sédimentaire dominante et durée[1]	Spécifications
5	Rechargement mécanique vs hydraulique *Mechanically placed fill*	Moins de sédiments déposés sur le profil de plage lors des rechargements mécaniques (vs hydrauliques) Ce type de foyer d'érosion est lié au moyen utilisé pour réaliser la recharge soit hydraulique ou mécanique. Les techniques de rechargement hydraulique (pompage de sédiments) fournissent plus de sédiments (overfill) puisqu'il y a un écoulement des sédiments vers les zones plus basses du profil. En conséquence, l'ajustement (érosion) du profil de plage est moins important avec des méthodes hydrauliques qu'avec des méthodes mécaniques.	Transversale Court	Associé aux recharges de plage et aux techniques de mise en place
6	Affouillement au pied de structure naturelle ou anthropique rigide et verticale *Profile lowering in front of seawalls or cliffs*	Déficit sédimentaire lié à l'ajustement du profil de plage devant des structures verticales rigides Les vagues qui frappent contre une structure rigide et verticale (mur de protection, falaise ou front de pied de glace) entraînent un affouillement à la base de celui-ci et donc une érosion verticale plus importante que sur les segments adjacents où il n'y a pas de structures de ce type. Dans les régions tempérées et froides, le front du pied de glace peut aussi agir telle une structure rigide et entraîner un abaissement du profil de plage.	Transversale Saisonnier ou Persistant	Associé aux milieux naturel ou anthropisé
7	Empiètement en zone littorale ou prélittorale *Headlands and encroachments*[1]	Empiètement par un ouvrage en zone littorale ou prélittorale ou par un relief (pointe) ou changement de l'orientation de la côte Les recharges de plages au front des éléments naturels (pointe rocheuse par exemple) ou anthropiques (remblais et aménagement) qui s'avancent sur la plage s'érodent plus rapidement et deviennent plus étroites.	Longitudinale Persistant	Associé aux recharges de plage

No	Type	Cause de l'érosion	Direction du transport sédimentaire dominante et durée[1]	Spécifications
8	Dépôt de sédiments résiduels entraînant une modification de la bathymétrie *Residual fill bathymetry*	Modifications de la bathymétrie devant la recharge en raison du dépôt de sédiments Les sédiments non utilisés directement pour la recharge qui sont déposés dans la zone prélittorale modifient la bathymétrie et conséquemment les caractéristiques de vagues. Ce changement peut favoriser l'érosion en certains endroits sur la plage. Une fois que les sédiments auront été dispersés, on constate un retour à la normale.	Longitudinale Court	Associé aux recharges de plage Apparenté au type 11
9	Pertes sédimentaires permanentes vers le large *Permanent offshore loss*	Perte sédimentaire nette vers le large Les pertes sédimentaires nettes vers le large se produisent lorsque les sédiments sont transportés vers le large et qu'ils ne peuvent plus être transportés de nouveau vers la côte. Ils peuvent être perdus dans des chenaux de navigation (p. ex. Evert et al., 1987 *in* Kraus et Galgano, 2001), vers des canyons sous-marins ou, dans le contexte québécois, vers le chenal laurentien ou encore, retenus derrière un obstacle tel qu'un récif.	Transversale Persistant	Associé aux milieux naturel ou anthropisé
10	Déplacement non uniforme des sédiments de la recharge vers le large *Nonuniform offshore translation of beach*	Modification de la topobathymétrie devant la recharge en raison de déplacements transversaux non uniformes des sédiments de la recharge. À la suite de la mise en place d'une recharge, les sédiments sont déplacés. Lorsque ce déplacement vers le large s'effectue de manière inégale, il y a une modification de la topobathymétrie et donc une modification des caractéristiques des vagues qui peut entraîner la formation de foyer d'érosion sur la recharge.	Longitudinale Court	Associé aux recharges de plage

No	Type	Cause de l'érosion	Direction du transport sédimentaire dominante et durée[1]	Spécifications
11	Bathymétrie non uniforme au large *Nonuniform offshore bathymetry*	Bathymétrie non uniforme au large Une bathymétrie irrégulière influence la transformation des vagues et favorise des zones de convergence et de divergence pouvant occasionner des foyers d'érosion. On considère, pour ce type de foyer d'érosion, la bathymétrie en eaux profondes jusqu'à la zone de déferlement.	Longitudinale Persistant	Associé aux milieux naturel ou anthropisé (apparenté aux types 3 et 8)
12	Banc d'emprunt situé dans le profil de la plage *Borrow pit located within active profile*	Transport des sédiments vers le large Si la zone de prélèvement de sédiments pour la recharge est localisée dans le profil actif de la plage, il y a un remplissage progressif de cette zone (dépression) à partir des sédiments de la plage et de la recharge elle-même ce qui génère un abaissement du profil.	Transversale Moyen/Pluriannuel ou Persistant	Associé aux recharges de plage
13	Accumulation sédimentaire en amont par rapport au sens de la dérive *Updrift barrier*	Blocage du transit sédimentaire longitudinal Il s'agit du blocage des apports sédimentaires longitudinaux par une structure (naturelle ou anthropique) positionnée perpendiculairement à la côte. Les sédiments bloqués ne peuvent plus alimenter la côte en aval de la structure perpendiculaire ce qui favorise le développement d'un foyer d'érosion	Longitudinale Persistant	Associé aux milieux naturel ou anthropisé
14	Resserrement d'un exutoire *Relict inlet offset*	Modification de la capacité de transport d'un cours d'eau en raison de la dérive sédimentaire Lorsque la dérive sédimentaire pousse les sédiments vers un chenal ou un cours d'eau, la capacité de transport augmente en raison de la réduction de sa largeur. Ce faisant, une zone d'érosion se développe sur la rive opposée.	Longitudinale Court/annuel	Associé au milieu naturel

No	Type	Cause de l'érosion	Direction du transport sédimentaire dominante et durée[1]	Spécifications
15	Transport longitudinal caractérisé par des vagues de sables *Translatory longshore sand waves*	Transport sédimentaire longitudinal caractérisé par des vagues de sables Les vagues de sable peuvent être précédées par une vague d'érosion. Les vagues de sable (pouvant être de l'ordre de dizaines de mètres) sont associées à des apports sédimentaires majeurs et épisodiques. Ces apports proviennent des rivières ou d'accolements de barres sableuses par exemple.	Longitudinale Court - Moyen	Associé aux milieux naturel ou anthropisé Mobile
16	Morphologie de la ligne de rivage en ondulations *Standing and random longshore sand waves*	Changements saisonniers du climat de vagues ou bathymétrie irrégulière de la zone prélittorale (hypothèses ; les causes réelles sont inconnues) Devant ce type de côte qui présente une forme en ondulations, il y a des foyers d'érosion dans les creux. Les causes exactes menant à ce type d'environnement sont inconnues. La bathymétrie et le climat de vagues figurent parmi les hypothèses.	Longitudinale Court - Moyen	Associé aux milieux naturel ou anthropisé
17	Isolation d'un segment côtier du transport sédimentaire longitudinal *Isolation of beach from longshore transport inputs*	Transport perpendiculaire limitant l'apport sédimentaire par transport longitudinal pour un segment côtier. Gains et pertes sédimentaires inégaux et réduction ou élimination des apports sédimentaires À proximité des exutoires des cours d'eau, par exemple, le transport sédimentaire s'effectuant de manière longitudinale est dévié vers le large par le transport perpendiculaire (débit de la rivière). Les sédiments sont éloignés de la côte sur une certaine distance avant d'être ramenés vers la côte par les vagues. En d'autres mots, le transport des sédiments n'est plus linéaire et forme plutôt un croissant ce qui limite les apports sédimentaires vers une portion de la plage et entraîne la formation d'un foyer d'érosion.	Longitudinale et Transversale Persistant	Associé aux milieux naturel ou anthropisé

No	Type	Cause de l'érosion	Direction du transport sédimentaire dominante et durée[1]	Spécifications
18	Courants de retour *Rip currents on open beach or near groins, jetties*	Sédiments transportés au large par des courants de retours *Sediment transported offshore*	Transversale Court - Persistant	Associé aux milieux naturel ou anthropisé

[1]En termes de durée, Kraus et Galgano (2001) utilisent court pour annuel, moyen pour pluriannuel et persistant pour l'équivalent de la durée de vie du projet jusqu'à l'échelle géologique.

La clé suivante permet de cibler plus rapidement les types de foyers d'érosion, tels que numérotés au tableau 1, qui ne sont pas spécifiques aux recharges de plage et donc susceptibles d'être rencontrés sur les sites d'étude (figure 1).

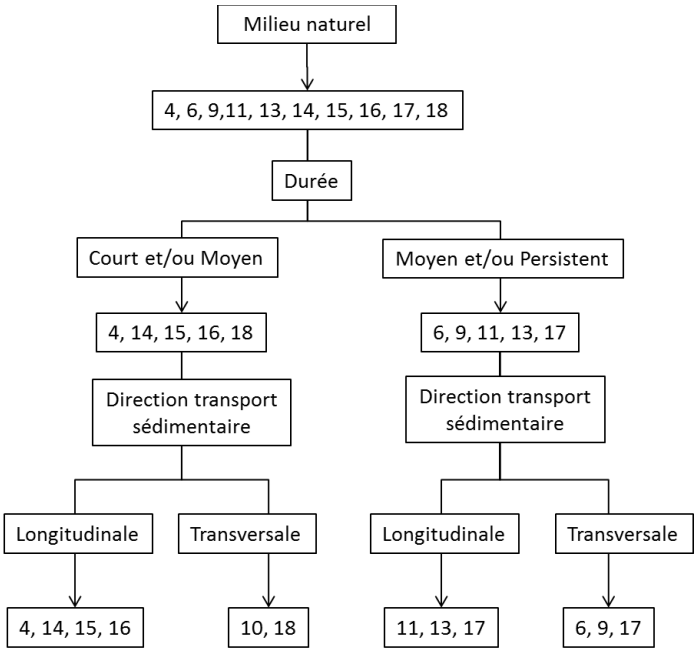


Figure 1. Clé d'identification des types de foyers d'érosion non exclusifs aux recharges de plage en fonction de leur durée et du transport sédimentaire dominant

2.1.3 Ajouts à la typologie de Kraus et Galgano (2001)

En plus des caractéristiques générales décrivant les foyers d'érosion retenues par Kraus et Galgano (2001) (caractéristiques 1 à 6), nous proposons l'ajout de deux caractéristiques (caractéristiques 7 et 8). Les foyers d'érosion seront donc aussi caractérisés en fonction du mode d'évolution historique (caractéristique 7). En effet, les scientifiques du domaine côtier qui s'intéressent à l'évolution côtière à l'échelle historique observent différents modes d'évolution (p. ex. Bernatchez et al., 2008 ; Burningham et French, 2017). Enfin, il est proposé d'indiquer s'il y a présence ou non d'enjeux (route 138, rues, bâtiments) dans une zone potentiellement à risque d'érosion côtière (caractéristique 8).

2.1.3.1 *Caractéristiques ajoutées*

Voici de nouveau les caractéristiques de Kraus et Galgano (2001) mais, cette fois, avec les **ajouts** que nous avons jugés nécessaires d'intégrer pour caractériser les foyers d'érosion identifiés dans le cadre de ce projet :

1) Type, c'est-à-dire le nom du type de foyer d'érosion ;
2) Les causes de l'érosion (processus responsables de l'érosion) ;
3) Les directions prédominantes du transport sédimentaire responsable de l'érosion :
    a. Longitudinale ;
    b. Transversale ;
4) La durée d'existence :
    a. C : court (annuel) ;
    b. M : Moyen (pluriannuel) ;
    c. P : Persistant (durée de vie du projet, de la propriété ou plus, jusqu'à l'échelle géologique) ;
    d. Cyclique ;
    e. Événementiel ;
5) L'étendue latérale :
    a. Locale ;
6) Si le type de foyer d'érosion peut être prédit ou résolu ;
7) Mode d'évolution historique :
    a. évolution où l'érosion ou l'accumulation est exclusive ;
    b. évolution où l'érosion ou l'accumulation est persistante, mais non exclusive ;
    c. évolution cyclique où les inversions entre les périodes d'érosion et d'accumulation sont évidentes ;
    d. évolution historique où l'érosion constitue un changement de tendance par rapport à l'accumulation historique et vice versa ;
    e. stabilité relative ;
8) Présence d'enjeux dans une zone potentiellement à risque d'érosion :
    a. Délimitation de la zone potentiellement à risque à l'aide des vitesses de recul maximales : La vitesse de recul maximal est identifiée à partir de l'évolution historique et des stations de suivi. Le taux maximum trouvé à l'intérieur des limites du site d'étude est projeté sur 10 ans.
    b. Délimitation de la zone potentiellement à risque à partir de la position de la ligne de rivage la plus reculée vers les terres connue: la limite de la zone est tracé à 10 m vers les terres de la ligne trouvée

Ce sont l'ensemble de ces caractéristiques qui sont présentées pour chacun des sites d'étude de Pentecôte, Gallix, Sept-Îles, Moisie et Longue-Pointe-de-Mingan (tableau 4) dans les tableaux « Caractéristiques du site d'étude » à la section 2.3.

2.1.3.2 *Types de foyer d'érosion ajoutés*

L'analyse historique par photo-interprétation des littoraux des secteurs d'étude de la Côte-Nord nécessite d'ajouter actuellement au moins 5 types à la liste de Kraus et Galgano (2001). Il s'agit de :

1) Exutoire de petits cours d'eau ;
2) Cours d'eau de plage s'écoulant parallèlement à la côte ;
3) Modifications environnementales et/ou météos-marines ;
4) Modifications anthropiques interférant sur les apports sédimentaires ;
5) Effet de bout.

De plus, List et al. (2006) caractérisent, sur des plages (sans aménagement), des foyers d'érosion réversibles liés aux événements de tempête (*reversing storm hot spots*). Il s'agit de segments où la plage subit de l'érosion sévère par rapport aux zones adjacentes, mais qui retrouvent un état similaire aux segments adjacents grâce à l'accumulation qui survient durant les semaines ou les mois suivants (en conditions de beau temps). Les suivis à l'aide des bornes ou par imagerie et photo-interprétation ne permettent pas de localiser et de suivre ce type de foyer puisque leur évolution est très rapide. En effet, List et al. (2006) observent que les foyers d'érosion de ce type sont comblés en quelques jours à quelques semaines seulement. Des suivis topographiques sur le littoral ou dans la zone prélittorale, avec une fréquence accrue (journalière à hebdomadaire) et une attention particulière portée aux périodes avant et après événements de tempêtes pourraient possiblement permettre l'identification de foyers d'érosion réversibles liés aux événements de tempête, s'il en existe, sur le territoire québécois.

6) Foyers d'érosion réversibles liés aux événements de tempête (type 24)

De nouveaux types pourraient encore être ajoutés à cette liste dans le futur.

Tableau 2. Types de foyers d'érosion ajoutés à la liste de Kraus et Galgano (2001)

No	Type	Cause de l'érosion	Transport sédimentaire dominant et durée	Spécifications
19	Exutoire de petits cours d'eau	Abaissement de la plage devant l'exutoire d'un petit cours d'eau (chenal du cours d'eau) Les zones où le profil de plage est abaissé permettent aux vagues de déferler plus près de la côte ce qui peut être favorable à la formation de foyer d'érosion	Transversale Court - Moyen - Persistant	Associé au cours d'eau
20	Cours d'eau de plage (course longitudinale/ parallèle à la côte)	Transport sédimentaire longitudinal excédant la capacité de transport du cours d'eau Le cours d'eau est poussé contre la berge par les sédiments déplacés par la dérive littorale. L'érosion est alors d'origine fluviale ou côtière selon les conditions (Corriveau et al., 2016, site de Pentecôte).	Longitudinale Persistant	Associé au cours d'eau Apparenté au type 14
21	Modifications environnementales et/ou météos-marines	Différentes selon les situations Il s'agit de foyers d'érosion qui s'activent à la suite de modifications des conditions environnementales et/ou météos-marines. Il s'agit généralement de foyers d'érosion nouvellement actifs sur des segments côtiers qui étaient historiquement relativement stables, voire en accumulation.	Variables	Aucune
22	Modifications anthropiques interférant sur les apports sédimentaires	Rétention des sédiments par des aménagements entraînant un déficit sédimentaire sur des segments côtiers de la cellule hydrosédimentaire. Il s'agit ici de l'effet de la rétention de sédiments par l'artificialisation des berges et des sources sédimentaires ou de la rétention des sédiments à la suite de l'harnachement de rivières par exemple.	Variables	Associé à des aménagements dans la cellule hydrosédimentaire

No	Type	Cause de l'érosion	Transport sédimentaire dominant et durée	Spécifications
23	Effet de bout *End effect, flanking effects*	Concentration de l'énergie des vagues aux extrémités d'une structure de protection rigide et verticale (enrochement, mur) qui entraîne de l'érosion (par ex., Walton et Sensabaugh, 1979 ; Toue et Wang, 1991 ; Kraus et McDougal, 1996)	Persistant	Associé aux ouvrages de protection rigide
24	Foyers d'érosion réversibles liés aux événements de tempête *Reversing storm hot pots*	Causes inconnues List et al. 2006 explorent les relations entre la formation des foyers d'érosion et différentes variables environnementales telles que la pente de la plage, la bathymétrie et les barres sableuses, caractéristiques des vagues. Cependant, aucune des conclusions ne permet d'expliquer la localisation de ces foyers d'érosion.	Jours-semaines	Associé aux plages naturelles

2.2 Localisation et cartographie des foyers d'érosion de la Côte-Nord

La localisation des foyers d'érosion pour le territoire nord-côtier a été réalisée à partir de l'analyse des bases de données du suivi de l'érosion côtière (mise à jour 2015) mené par le LDGIZC depuis le début des années 2000 (Bernatchez et Drejza, 2015). Ceci a permis d'identifier au total 10 secteurs d'études préliminaires où plusieurs stations de suivi indiquaient des taux de déplacement négatifs parmi les plus importants ayant été observés sur le territoire. Ceux-ci sont délimités à partir des limites latérales des unités hydrosédimentaires où ils se trouvent. Ces secteurs d'étude préliminaire ont été présentés lors d'une première rencontre avec le ministère des Transports du Québec (MTQ) le 16 décembre 2016. Ces cartes individuelles montrant la classification du déplacement moyen des stations de suivi sont de nouveau présentées à l'annexe B. La figure 2 montre la localisation de ces 10 secteurs. Le tableau 3 présente un portrait sommaire du déplacement moyen observé aux stations de suivi dans les secteurs d'études préliminaires ciblés.

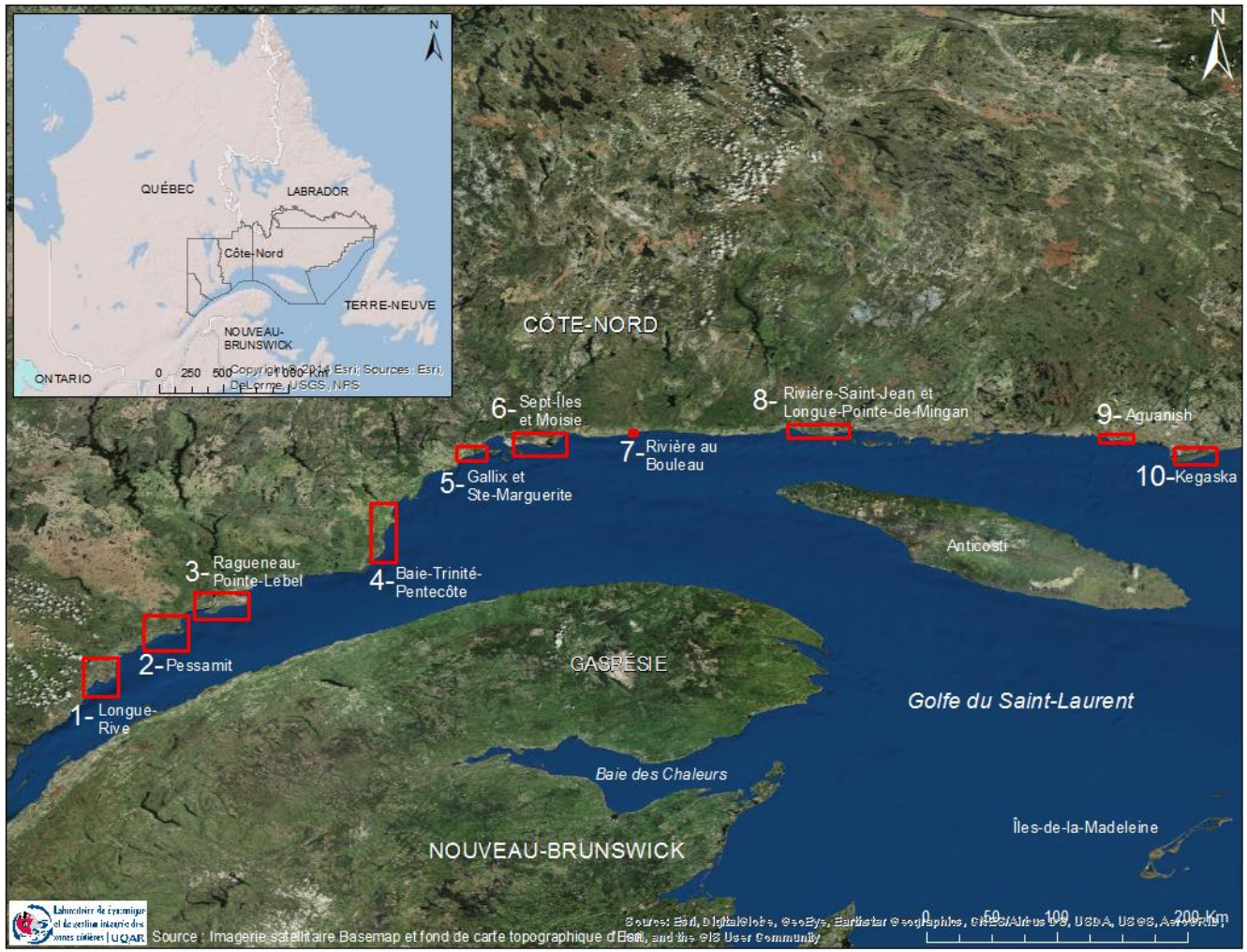


Figure 2. Localisation des secteurs d'étude préliminaires ciblés

Tableau 3. Portrait sommaire du déplacement moyen observé aux stations de suivi dans les secteurs d'étude préliminaire ciblés

Secteur préliminaire	Nombre de stations de suivi LDGIZC*	Nombre de stations de suivi avec déplacement moyen						
		< -2 m	- 1,99 à -1 m	-0,99 à -0,50 m	-0,49 à -0,01 m	0 m (stable)	0,01 à 0,50 m	> 0,51 m
Aguanish	92	0	4	9	28	5	14	10
Baie-Trinité - Pentecôte	134	1	4	25	49	7	14	12
Pessamit (Betsiamites)	187	9	23	41	57	13	6	13
Gallix - Rivière Ste-Marguerite	111	10	10	16	30	6	12	12
Kegaska	109	7	21	25	30	5	3	6
Longue-Rive	236	29	42	38	66	16	7	5
Ragueneau - Pointe-Lebel	272	23	32	51	91	17	3	11
Rivière au Bouleau	10	0	1	0	2	0	4	0
Longue-Pointe-de-Mingan - Riv. St-Jean	177	42	34	31	32	2	6	21
Sept-Îles - Rivière-Moisie	147	17	21	23	32	10	3	14
Total général	1475	138	192	259	417	81	72	104

* Données du réseau de suivi LDGIZC 2015

Quatre secteurs préliminaires ont été retenus pour réaliser des analyses détaillées. Pour ce faire, ceux-ci ont été subdivisés en 10 sites d'étude à la suite d'une délimitation plus fine réalisée en tenant compte de l'évolution récente (analyse des mesures des stations de suivi) et du contexte géomorphologique. Le nom et l'acronyme des sites d'étude sont formés du secteur auquel ils appartiennent suivis d'un numéro séquentiel les localisant d'ouest en est (tableau 4).

Le choix des sites d'étude à analyser dans le cadre du présent projet de recherche a été fait en fonction des intérêts du MTQ, des taux de recul observés avec le réseau de suivi du LDGIZC, mais aussi en grande partie en fonction de la connaissance du territoire par les chercheurs. En ce sens, certains secteurs d'étude préliminaire ont été retenus pour l'analyse en raison

de la proximité de la route 138, et ce, même si les taux de recul mesurés n'étaient pas les plus sévères sur le territoire nord-côtier. Dans d'autres cas, la connaissance du territoire par les chercheurs a permis de cibler des contextes géomorphologiques typiques de la Côte-Nord et documentés par le réseau de suivi dont les particularités étaient susceptibles d'être reconnues ailleurs le long du réseau routier. Par ailleurs, la disponibilité de lignes de rivage multi-dates déjà tracées rendant possible l'analyse historique de l'évolution côtière a aussi été considérée quant au choix des secteurs d'étude.

Tableau 4. Nomenclature des sites d'étude

Secteur d'étude	Site d'étude	Acronyme utilisé
Pentecôte	Pentecôte-1	PEN-1
	Pentecôte-2	PEN-2
	Pentecôte-3	PEN-3
Gallix	Gallix-1	GAL-1
	Gallix-2	GAL-2
Sept-Îles	Sept-Îles	SEP-1
Moisie	Moisie-1	MOI-1
	Moisie-2	MOI-2
Longue-Pointe-de-Mingan	Longue-Pointe-de-Mingan 1	LPM-1
	Longue-Pointe-de-Mingan 2	LPM-2

2.3 Description détaillée des sites d'étude

La section suivante présente une description des foyers d'érosion à l'aide des données d'évolution historique combinée à une analyse des mesures *in situ* provenant du réseau de stations de suivi du LDGIZC. La démarche méthodologique précède la description détaillée des sites d'étude.

2.3.1 Choix du logiciel d'analyse de la cinétique de la ligne de rivage

Le logiciel Digital Shoreline Analysis System (DSAS) développé par la Commission géologique des États-Unis (USGS) (Thieler et al., 2005) est le logiciel d'analyse de la cinétique de la ligne de rivage utilisé dans essentiellement tous les articles ayant été consultés. Ce logiciel permet de générer automatiquement des transects à un intervalle fixe (dans ce projet, 50 m) qui recoupent perpendiculairement les lignes de rivage des différentes années (figure 3). La distance entre chacune des lignes de rivage le long des transects par rapport à une ligne de base (*baseline*) permet d'effectuer les calculs d'évolution.

Bien que le logiciel le plus couramment utilisé soit DSAS, le logiciel utilisé pour le calcul qui a été retenu pour la réalisation de ce projet est MobiTC (pour mobilité du trait de côte). Il s'agit d'un logiciel développé au Cerema Direction Territoriale Méditerranée, en France. Il permet d'effectuer les mêmes calculs que DSAS, mais aussi des calculs statistiques supplémentaires en plus de produire des graphiques d'évolution grâce à des matrices de couleurs de type « pseudocolor » (figure 5). Contrairement à DSAS, qui fonctionne sur la suite ArcGIS et qui a été traditionnellement utilisé au LDGIZC, MobiTC fonctionne aussi sur QGIS, un logiciel libre de SIG. En plus des calculs statistiques supplémentaires, MobiTC ne nécessite pas le traçage *manuel* d'une ligne de base pour générer des transects perpendiculaires à la côte. Il utilise plutôt les lignes de rivage disponibles pour tracer *automatiquement* la ligne de base (selon l'algorithme de Voronoï).

Enfin, il existe aussi un progiciel (*package*) dans le logiciel R (logiciel libre) fournissant des fonctions pour l'analyse et la visualisation de l'évolution historique de lignes de rivage. Ce progiciel est connu sous le nom de AMBUR (Analyzing Moving Boundaries Using R) (Jackson et al., 2012). Celui-ci n'a pas été exploré ni testé au LDGIZC.

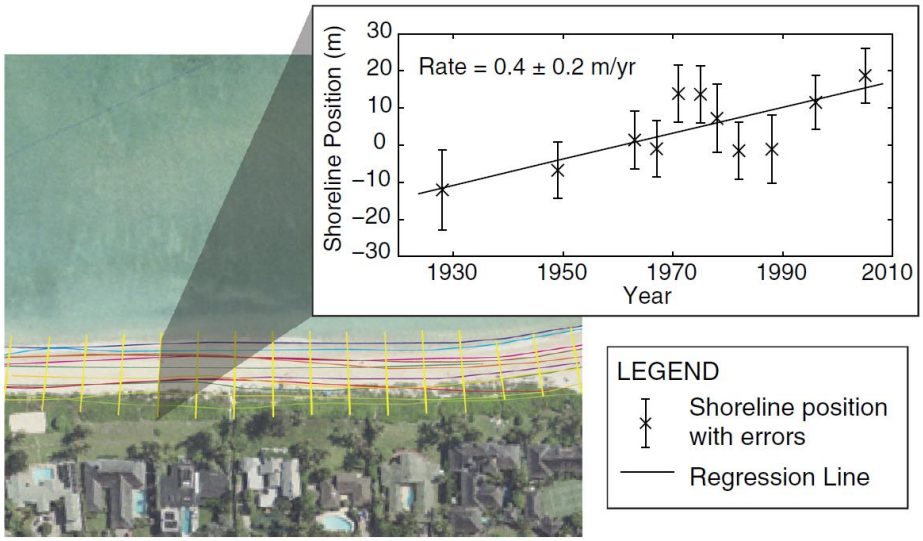


Fig. 1 Relative cross-shore positions are recorded along transects (*yellow vertical lines*) spaced 20 m apart along the shore. The shoreline change rate is the slope of the *line* fit to the historical data

Figure 3. Ligne de rivage multi-date, transect au 20 m (jaune) et graphique de position des lignes de rivage dans le temps pour un transect (tirée de Anderson et al., 2015)

2.3.2 Contenu des descriptions détaillées des sites d'étude et éléments méthodologiques

Après avoir adopté une approche spatiale basée sur des mesures *in situ* récentes pour localiser les sites d'étude, il est nécessaire d'adopter une approche temporelle qui permet de mettre en contexte l'érosion sévère y ayant été observée. Pour ce faire, l'analyse de chacun des sites d'étude repose sur les connaissances suivantes :

1) Les taux d'évolution historiques (section 2.3.1) ;
2) Les taux d'évolution par intervalle (section 2.3.2.2) ;
3) L'enveloppe de mobilité historique (section 2.3.2.3) ;
4) Les taux d'évolution d'après les mesures *in situ* du réseau de stations de suivi du LDGIZC (section 2.3.2.4).

Ces informations sont obtenues grâce à l'analyse historique. Celle-ci est effectuée à partir de photographies aériennes sur lesquelles sont tracées les lignes de rivage pour plusieurs années différentes. Les calculs d'évolution sont réalisés grâce à la méthode « ligne de base et transects » où les transects, au 50 m dans ce projet, permettent d'effectuer les calculs de distances à partir d'une ligne de base, et ce, pour toutes les dates (années) disponibles.

En plus de contribuer grandement à la compréhension du système côtier auquel on s'intéresse, l'approche temporelle par l'analyse historique s'avère nécessaire pour effectuer les projections d'évolution côtière selon une approche empirique (section 3).

Ces données sont intégrées dans un tableau synthèse nommé « Caractéristiques du site d'étude ». Celui-ci présente les éléments suivants :

1) Étendue latérale (approx.) du site d'étude ;
2) Durée d'existence de l'érosion ;
3) Mode d'évolution historique ;
4) Vitesse de recul maximale (intervalle) ;
5) Vitesse de recul maximale, mmm_5ans (mmm= minimum moyenne mobile) ;
6) Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi, correspond au recul événementiel) ;
7) Processus et causes, si identifiés ;
8) Sens de la dérive littorale ;
9) Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion ;
10) Solution(s) à évaluer ;
11) Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales ;
12) Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée
13) Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001) adaptée.

2.3.2.1 *Taux d'évolution historique*

Les taux d'évolution de la ligne de rivage sont calculés pour l'ensemble de la période historique pour connaître la tendance générale de l'évolution entre la date la plus ancienne et la plus récente disponible (stabilité, accumulation, érosion). Trois méthodes statistiques différentes ont été utilisées afin de s'assurer que l'analyse soit basée sur plusieurs résultats possibles (EPR-historique, OLS-historique et WLS-historique). Les résultats sont présentés sur un graphique tel que celui de la figure 4 où la valeur du taux d'évolution historique (m/an) est visible pour tous les transects du site d'étude. Au moment d'identifier la tendance d'évolution sur les sites d'étude il n'est pas question d'expliquer les différences entre les méthodes statistiques. Ces méthodes sont expliquées, plus tard et en détails, à la section 3.3.

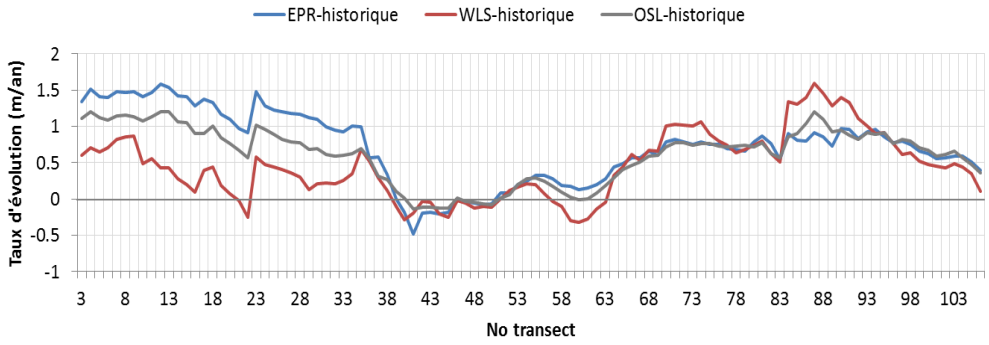


Figure 4. Exemple : taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Moisie 1

2.3.2.2 *Taux par intervalles*

L'analyse historique à l'échelle des intervalles (entre deux dates, par ex., entre 1965-1979) complète en partie le portrait d'évolution historique. Ce type de résultat est représenté par une matrice de couleur permettant de considérer l'évolution du littoral pour tout le site d'étude pour un intervalle donné (lecture de gauche à droite dans la matrice de couleur) de même que l'évolution du littoral pour un ou plusieurs transects pour toute la période couverte par l'étude (lecture de bas en haut dans la matrice de couleur) (figure 5). Cette analyse permet de savoir combien d'années ont été caractérisées par l'érosion et par l'accumulation pour chacun des transects. Cette information est illustrée à partir du ratio (%) entre le nombre d'années en érosion ou en accumulation par rapport au nombre d'années suivies. Ces résultats sont illustrés dans une figure telle que celle de la figure 6 (à gauche). L'analyse permet aussi de savoir combien de transects étaient en érosion et combien étaient en accumulation au cours de chacun des intervalles (ratio % sur le nombre total de transects). Ces résultats sont illustrés dans une figure telle que celle de la figure 6 (à droite).



Figure 5. Exemple : matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles, Sept-Îles

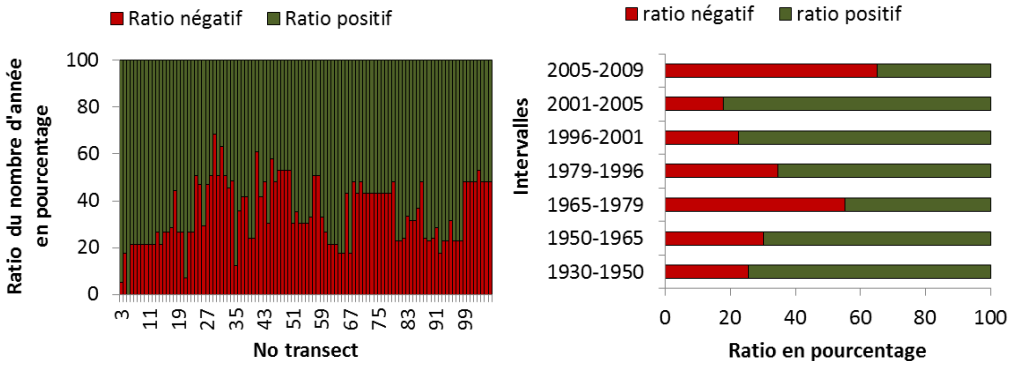


Figure 6. Exemple : ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect (gauche) et par intervalle (droite), Sept-Îles

2.3.2.3 *Enveloppe de mobilité historique (EMH)*

Afin de tenir compte de toutes les positions des lignes de rivage, la largeur de l'enveloppe de mobilité historique a aussi été calculée. Il s'agit de mesurer la distance entre la ligne de rivage la plus reculée vers les terres et la ligne de rivage la plus avancée vers la mer le long de chacun des transects. L'enveloppe ne peut pas surestimer l'espace de mobilité de la ligne de rivage. Par contre, l'enveloppe peut être sous-estimée puisque nous n'avons aucune assurance que l'acquisition des photos ait permis de capter la position la plus reculée et/ou la plus avancée atteinte durant la période d'analyse. Bien que DSAS effectue ce calcul (*SCE, shoreline change envelope*) et qu'il s'agit du logiciel d'analyse de l'évolution historique dont l'usage est le plus répandu (Thieler et al., 2009), cette donnée est, à notre connaissance, rarement utilisée dans la littérature. Pourtant, elle s'avère très utile dans la quantification de l'évolution historique. Nous verrons plus loin qu'elle présente, en plus, un intérêt dans les travaux de projections d'évolution côtière de gestion du territoire (section 3.6.5). Les données sont présentées à l'aide des graphiques tels que ceux de la figure 7 et de la figure 8. Sur la première figure, on peut observer la distance entre la ligne de rivage d'une année donnée et la ligne de base. La ligne de base est construite à partir de toutes les lignes de rivage disponibles selon l'algorithme de Voronoï et constitue en quelque sorte la position « moyenne » de la ligne de rivage à travers le temps. Sur le graphique, elle correspond à la distance de 0 m. Les distances positives indiquent une position avancée vers la mer et les distances négatives, une position reculée vers les terres. Dans l'exemple, la ligne de 2009 est donc plus avancée vers la mer que la ligne de 1930. La surface grisée y représente l'enveloppe de mobilité historique. La largeur (m) de celle-ci est aussi représentée sur la seconde figure, mais cette fois sous la forme d'un histogramme (bâtons).

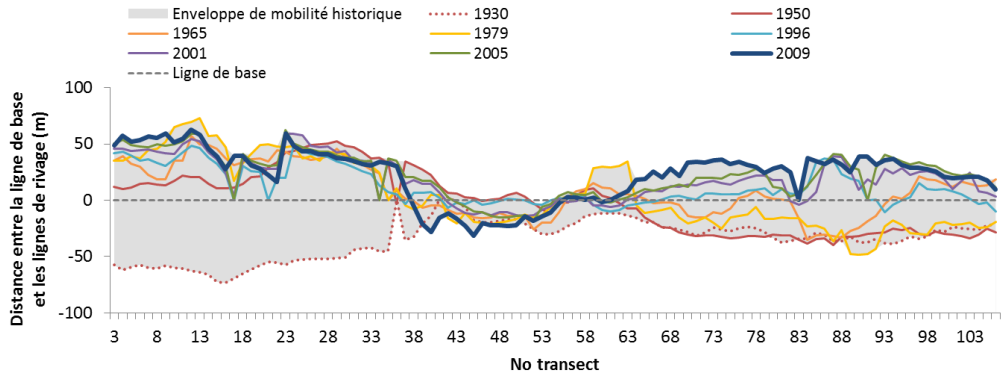


Figure 7. Exemple : distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Moisie 1

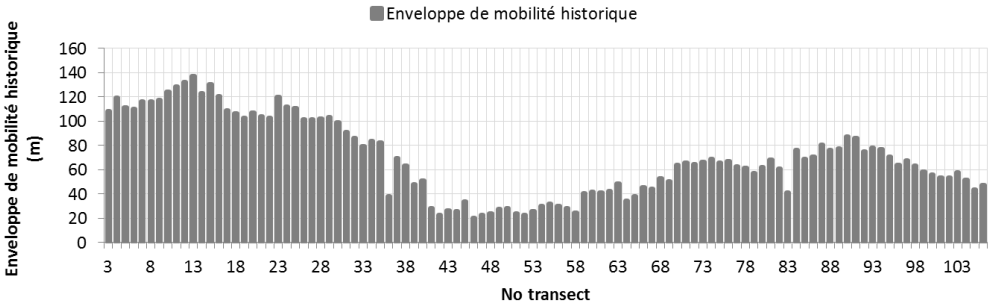


Figure 8. Exemple : largeur de l'enveloppe de mobilité historique, Moisie 1

2.3.2.4 *Taux d'évolution d'après les mesures in situ du réseau de stations de suivi du LDGIZC*

Les données des stations de suivi ont été utilisées pour obtenir des taux d'évolution sur 5 ans (moyenne mobile 5 ans, « mm_5ans ») chaque fois que nous disposons d'au moins 4 mesures de déplacement sur une période de 5 ans. Ce regroupement permet de comparer ces données avec les vitesses d'évolution calculées pour les intervalles historiques des transects associés (transect le plus proche d'une station) (figure 9). C'est la valeur minimum des moyennes mobiles 5 ans (c'est-à-dire le taux de recul le plus sévère, nommé « mmm_5ans ») qui est utilisée pour effectuer les comparaisons entre les taux par intervalle et les taux selon les mesures *in situ*. En raison de la répartition

spatiale des bornes, l'évolution historique de tous les transects ne peut pas être comparée à des mesures *in situ* (figure 9). Ces données sont représentées à l'aide d'une figure telle que la figure 10. On y voit les vitesses d'évolution pour tous les intervalles historiques disponibles (bâtons orangés) comparativement à la mmm_5ans obtenue avec les mesures *in situ* (bâtons gris). Par exemple, lorsque le bâton gris (*in situ*) est plus bas que les bâtons orangés (intervalles historiques), cela signifie que les vitesses de recul *in situ* sont plus sévères.

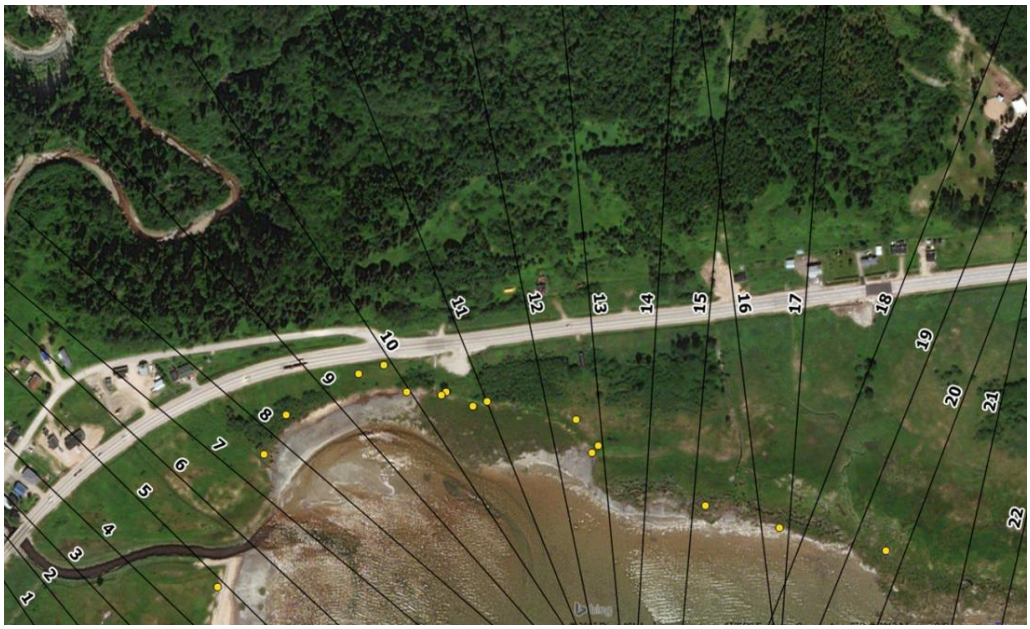
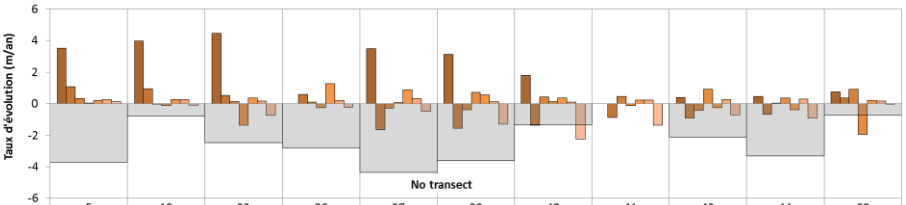


Figure 9. Exemple de répartition spatiale de transects et de stations de suivi



	5	18	22	36	37	38	40	41	43	44	60
1930-1950	3.52	4.00	4.48	0.00	3.48	3.15	1.81	0.00	0.39	0.46	0.76
1950-1965	1.09	0.95	0.53	0.60	-1.67	-1.57	-1.36	-0.87	-0.89	-0.69	0.38
1965-1979	0.33	-0.01	0.14	0.09	-0.29	-0.37	0.44	0.46	-0.43	0.00	0.93
1979-1996	0.01	-0.13	-1.36	-0.27	0.06	0.73	0.15	-0.13	0.92	0.37	-1.94
1996-2001	0.20	0.27	0.38	1.28	0.88	0.57	0.37	0.24	-0.26	-0.39	0.21
2001-2005	0.28	0.26	0.18	0.20	0.32	0.13	0.12	0.23	0.27	0.31	0.16
2005-2009	0.12	-0.09	-0.74	-0.23	-0.50	-1.30	-2.25	-1.36	-0.72	-0.89	-0.01
mmm_5ans	-3.72	-0.77	-2.46	-2.81	-4.35	-3.61	-1.33	0.00	-2.13	-3.31	-0.72
Année déb. mmm_5ans	2005	2012	2007	2007	2007	2007	2000	2001	2005	2001	2005

Figure 10. Exemple : taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Sept-Îles

La comparaison entre les taux d'évolution (intervalle) et le taux d'évolution par moyenne mobile (5 ans) sur les données des stations permet d'identifier si un segment côtier a subi un changement récent par rapport à l'historique, qu'il s'agisse d'une inversion de son évolution (historique positif - récent négatif ou vice versa) ou d'une accélération ou décélération de son évolution (historique à une vitesse donnée – récent à une vitesse plus rapide ou vice versa).

La valeur unique la plus importante de déplacement négatif mesuré aux stations de suivi d'un site d'étude pour une année correspond au « recul événementiel ». Celle-ci est présentée dans les tableaux synthèses « Caractéristiques du site d'étude ». Cette valeur est aussi parfois intégrée comme variable complémentaire à l'équation de base des projections d'évolution côtière (section 3.6.3).

2.3.3 Pentecôte 1

L'analyse historique pour le site de Pentecôte 1 (figure 11 et figure 12, rivière Calumet – Pentecôte 1) montre que les taux d'évolution historiques (EPR, OLS et WLS) sont généralement positifs et atteignent des vitesses allant jusqu'à 0,91 m/an (figure 13). Les transects qui croisent directement l'embouchure des cours d'eau ne peuvent pas faire l'objet d'une analyse ; ils sont donc exclus.

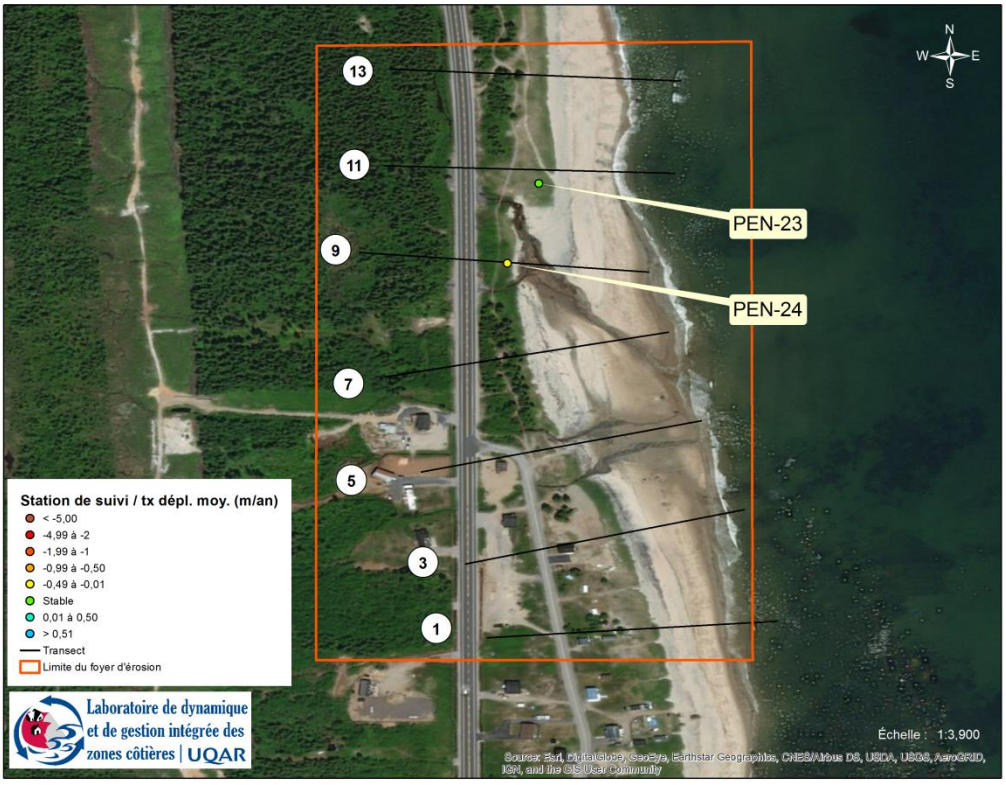


Figure 11. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Pentecôte 1 (PEN-23, annulée en 2001-2002)



Figure 12. Localisation des sites de foyers d'érosion analysés dans le secteur de Pentecôte (Rivière Calumet – Pentecôte 1, Restaurant Le Routier – Pentecôte 2, Ruisseau – Pentecôte 3)

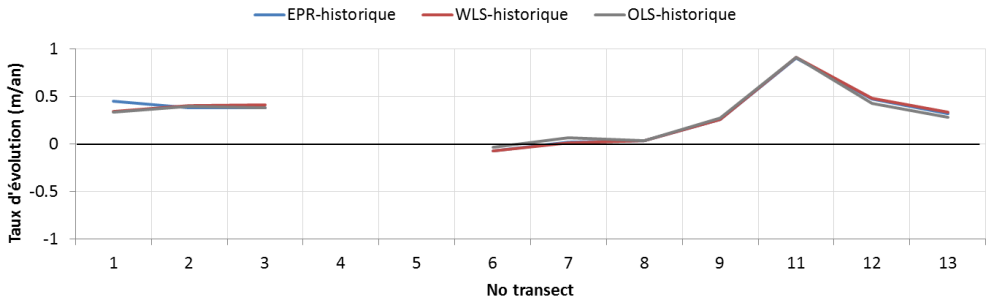


Figure 13. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Pentecôte 1

Pour l'analyse par intervalle, les données disponibles ne permettent que d'obtenir trois intervalles. Cette analyse montre que la côte a généralement été en accumulation (figures 14 et 15) et que ponctuellement, certaines zones ont été en érosion.

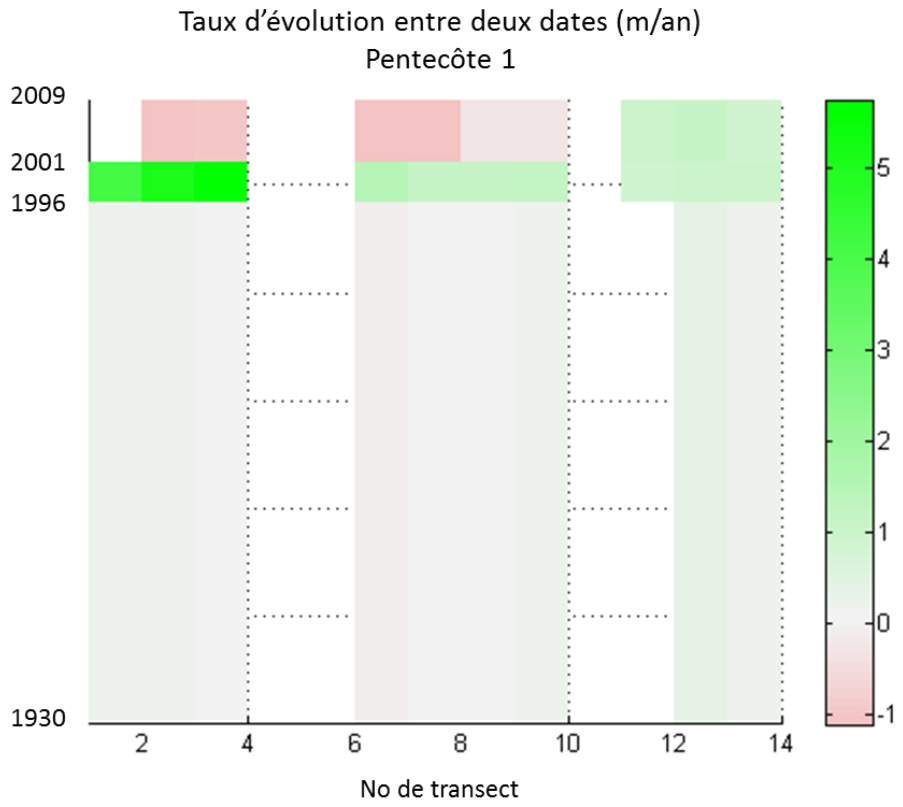


Figure 14. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles, Pentecôte 1

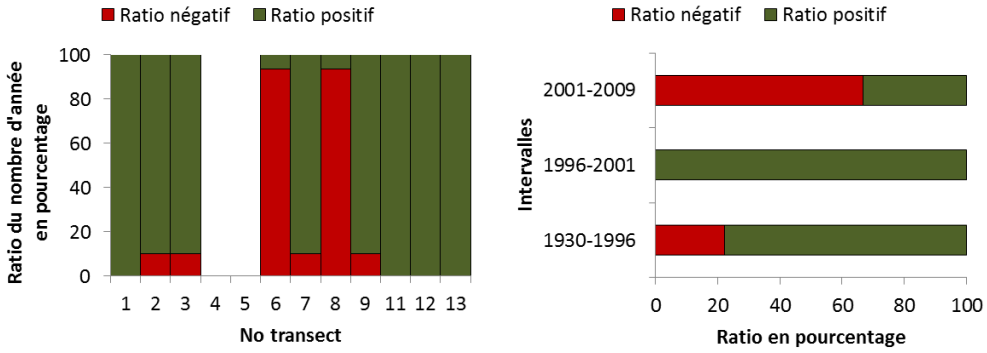


Figure 15. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Pentecôte 1

Au cours de l'intervalle 1930-1996, le littoral est très stable ; la moyenne des taux est de 0,15 m/an (figure 16). En termes de distance, la figure 17 montre qu'il s'agit d'une avancée d'un peu plus de 10 m pour les transects 1 à 3 (moyenne de 11,55 m) et pour les transects 9 et 11 (moyenne de 12,64 m) ainsi que de près de 20 mètres pour les transects 12 et 13 (moyenne de 18,67 m). Devant les transects 6, 7 et 8, la position de la ligne de rivage est demeurée essentiellement la même (déplacement moyen de 0,13 m).

Par la suite, on observe une période d'accumulation importante et généralisée au cours de l'intervalle 1996-2001 (figure 14 et figure 16). Durant cet intervalle, le littoral progresse à une vitesse allant jusqu'à 5,75 m/an pour les transects 1 à 3 (figure 16). Autrement, l'évolution s'effectue plutôt au rythme de 1,10 m/an (moyenne des taux d'évolution de l'intervalle pour les transects 6 à 13). Au total, c'est une progression moyenne de 24,91 m qui est mesurée pour les transects 1 à 3 et de 5,51 m pour les transects 6 à 13 (figure 17). Ces avancées sont attribuables à la végétalisation de la partie supérieure du haut estran entre 1930 et 1996, puis entre 1996 et 2009. La figure 19 illustre, à titre d'exemple, la végétation s'étant établie devant les transects 12 et 13.

Enfin, au cours de la période la plus récente (2001-2009), le recul enregistré est localisé en aval des petits cours d'eau par rapport au sens de la dérive littorale (vers le sud). Le recul s'effectue à une vitesse allant jusqu'à -1,12 m/an au transect 6 (figure 16). La figure 17 montre que devant les transects 2 et 3 ainsi que 6 et 7, il s'agit d'un déplacement négatif moyen de -8,59 m. Inversement, le littoral devant les transects 11 à 14, en amont d'un cours d'eau, est en accumulation et progresse à une vitesse moyenne de 0,96 m/an (déplacement positif moyen de 7,70 m).

Pour l'ensemble de la période historique, la variabilité spatiale de la largeur de l'enveloppe de mobilité (figure 17 et figure 18) montre que la côte évolue beaucoup plus pour les segments situés de part et d'autre (transects 1 à 3 et 11 à 13) du segment central qui est directement affecté par les cours d'eau (transects 4 à 10).

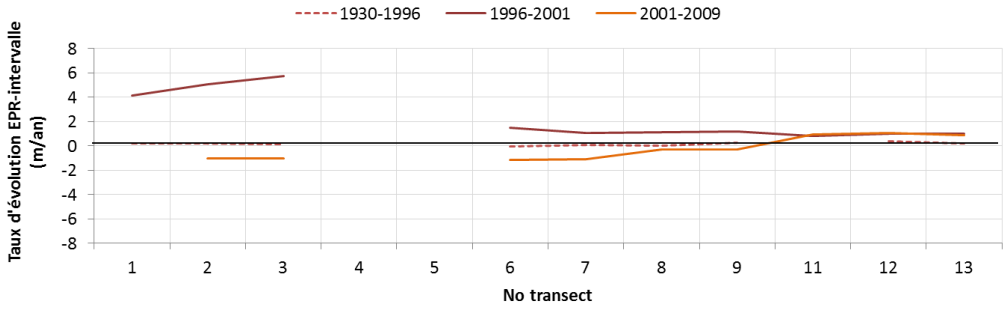


Figure 16. Taux d'évolution historique par intervalle, Pentecôte 1

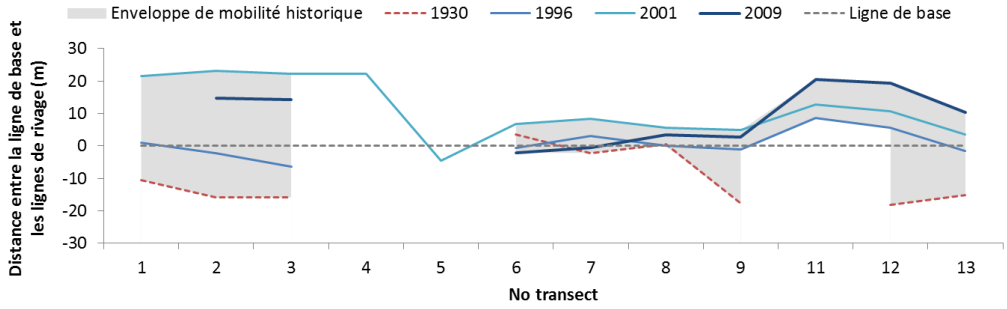


Figure 17. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Pentecôte 1

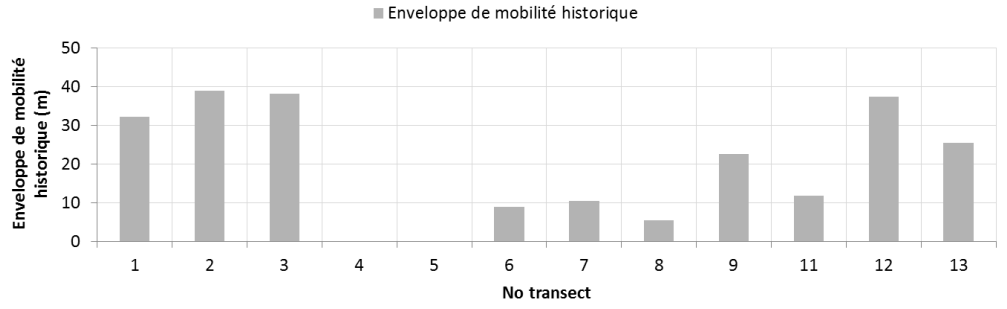


Figure 18. Enveloppe de mobilité historique, Pentecôte 1

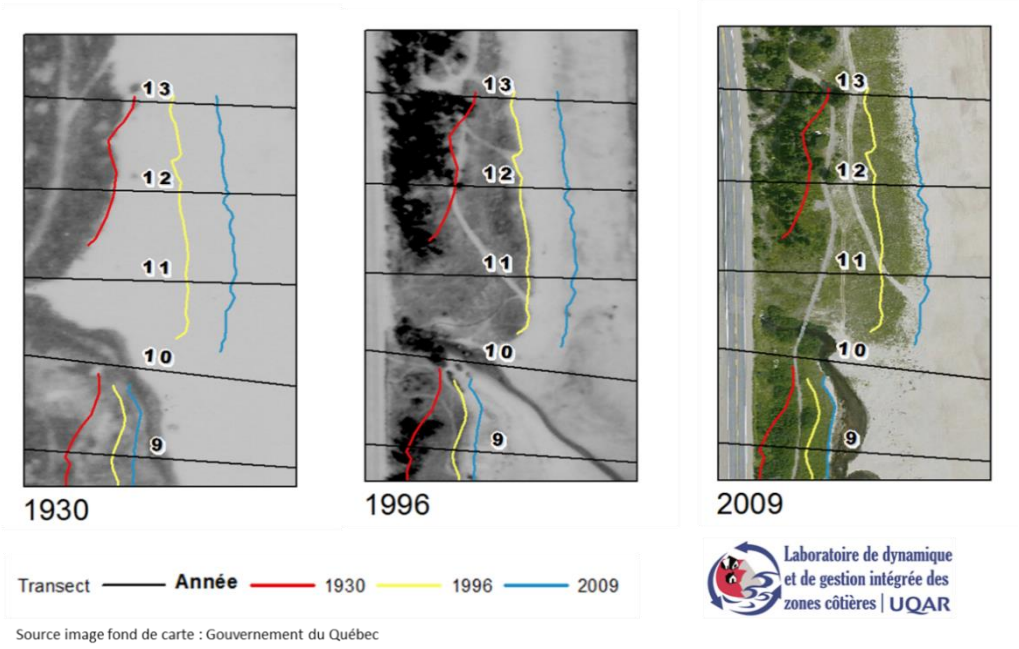
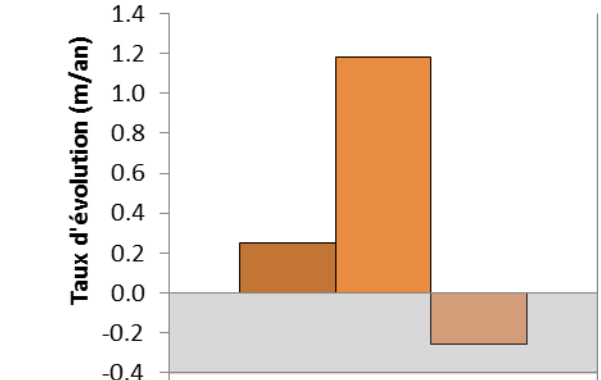


Figure 19. Végétalisation de la partie supérieure du haut estran devant les transects 12 et 13, Pentecôte 1

Pour le site de Pentecôte 1, seulement deux stations de suivi sont implantées. La moyenne mobile minimum sur 5 ans calculée à partir des données de la station de suivi PEN-24 (mesures *in situ*) a été de -0,66 m/an (2002-2007), et ce, en raison du recul événementiel de -2,05 m qui y a été mesuré en 2005-2006 (figure 20). Par rapport aux données d'évolution historique pour le transect le plus proche (transect 9), il s'agit de la vitesse de recul la plus rapide ayant été enregistrée (figure 21). Compte tenu des taux historiques pour ce transect, qui ont été positifs pour les intervalles antérieurs (1930-1996 et 1996-2001), il est probable que le recul (m/an) soit lié à la captation d'un recul événementiel. Conséquemment, il est possible que ce recul soit compensé par de l'accumulation. Enfin, malgré les reculs observés, la ligne de rivage de 2009 est encore avancée par rapport à la position de 1930 (figure 17).



No transect	9
1930-1996	0.25
1996-2001	1.18
2001-2009	-0.26
mmm_5ans	-0.66

Figure 20. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Pentecôte 1

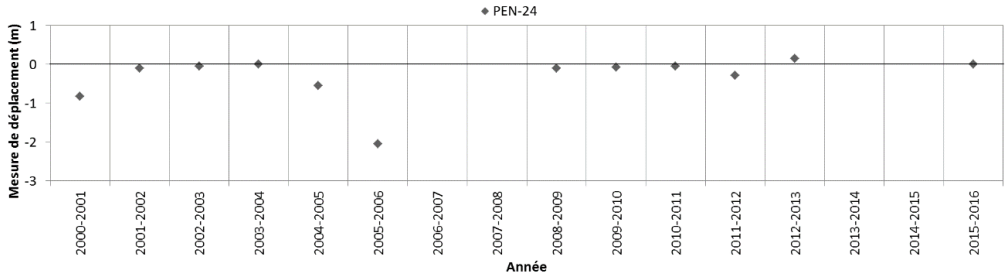


Figure 21. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Pentecôte 1

Finalement, la dynamique de ce site suggère que la tendance est à l'accumulation et que le secteur peut être affecté par des reculs lors d'événements de tempête pour progresser de nouveau par la suite. Ce site est identifié comme un foyer d'érosion surtout en raison de la proximité de la route 138. Le tableau 5 présente un résumé des caractéristiques du site Pentecôte 1. L'impact des cours d'eau sur la dynamique littorale est décrit pour le site de pentecôte 2.

Tableau 5. Caractéristiques du site d'étude de Pentecôte 1

Caractéristiques	Pentecôte 1
Étendue latérale (approx.)	700 m
Durée d'existence	Événementielle
Mode d'évolution historique	L'accumulation est persistante, mais non linéaire
Vitesse de recul maximale, EPR	-1,12 m/an 2001-2009, transect 6
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-0,66 m/an 2002-2007, PEN-24
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-2,05 m 2005-2006, PEN-24
Processus et causes si identifiés	Liés aux cours d'eau de plage en raison de leur course longitudinale sur la plage (poussée par la dérive sédimentaire) ce qui limite la végétalisation de la partie supérieure du haut estran, contrairement aux côtes adjacentes, et rend sensible la côte face aux reculs événementiels
Sens de la dérive	Vers le sud
Direction prédominante du transport sédimentaire (sens de la dérive) responsable de l'érosion	Longitudinale et transversale
Possibilité de résolution du foyer d'érosion	ESSAI POTENTIEL : Linéarisation du cours d'eau avec épis courts en haut de plage et végétalisation des talus en aval des cours d'eau (par rapport au sens de la dérive) Objectif : Limiter le transport sédimentaire qui contraint le cours d'eau à s'écouler longitudinalement. (Voir Corriveau et al., 2016)
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales (20 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2009)	Non
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Ligne centrale (jaune de la route à moins de 10 m de la position de la ligne de rivage de 1930)
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001) Types ajoutés : Exutoire de cours d'eau (19) et Cours d'eau de plage (course longitudinale/parallèle à la côte) (20)

[1]Attention, le géoréférencement ne peut être corrigé sur la photo de 1930 (absence de point de repère). Néanmoins celui-ci semble bon.

2.3.4 Pentecôte 2

Sur le site de Pentecôte 2 (figure 22 et figure 12, Restaurant Le Routier – Pentecôte 2), l'évolution historique montre que le littoral a été généralement en légère accumulation avec des taux maximaux allant jusqu'à 0,6 m/an, bien que de faibles taux négatifs (-0,2 m) soient enregistrés entre les transects 12 et 17 (figure 23). Les transects qui croisent directement l'embouchure des cours d'eau ne peuvent pas faire l'objet d'une analyse ; ils sont donc exclus.



Figure 22. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Pentecôte 2

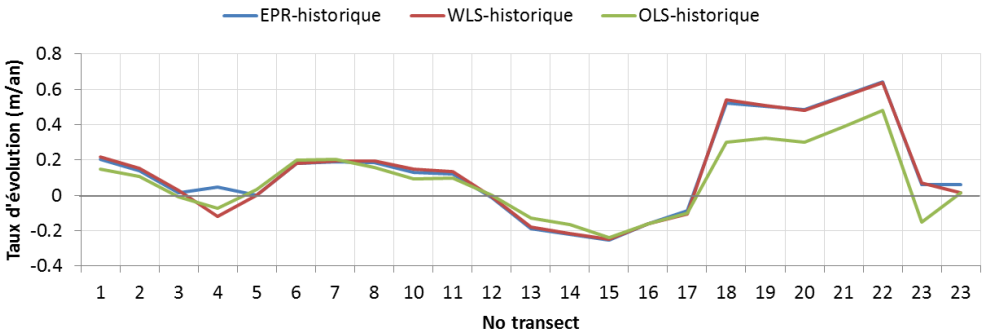


Figure 23. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Pentecôte 2

Les figures 24 et 25 montrent une alternance d'érosion et d'accumulation pour l'intervalle 1930-1996 avec toutefois des taux d'évolution très faibles (figure 26). L'intervalle suivant (1996-2001) est caractérisé par de l'accumulation alors qu'entre 2001 et 2009, le ratio de transects en érosion est le plus important. Le site est assez stable avec une enveloppe de mobilité historique dont les largeurs sont inférieures à 20 m pour la majorité des transects (1 à 17) (figure 24 et figure 25).

Au cours de l'intervalle 1931-1996, il y a eu végétalisation et avancée de la ligne de rivage sur une distance moyenne de 31,13 m devant les transects 18 à 22, ce qui correspond à une progression de 0,47 m/an (figure 27 et figure 26). C'est en raison de cette avancée que l'enveloppe de mobilité historique est plus importante pour ces transects (figure 28). La figure 19 à la section précédente avait permis d'illustrer la végétalisation de la partie supérieure du haut estran. Pendant la même période, il y a eu de l'érosion en aval (par rapport au sens de la dérive) de la côte par le cours d'eau (transect 15 et transects adjacents). L'intervalle suivant, soit 1996-2001, est caractérisé par une avancée généralisée de la ligne de rivage, et ce, même en aval des petits cours d'eau. L'érosion en aval du cours d'eau se manifeste de nouveau pour l'intervalle 2001-2009 (figure 27).

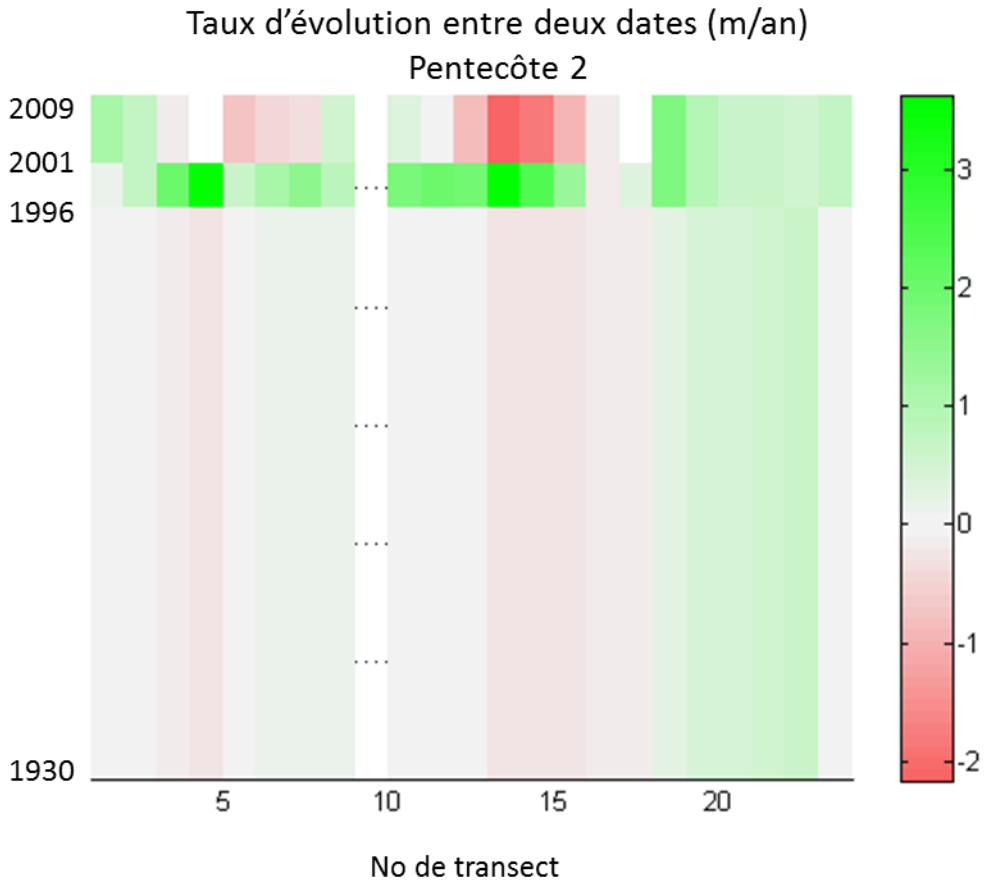


Figure 24. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles, Pentecôte 2



Figure 25. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Pentecôte 2

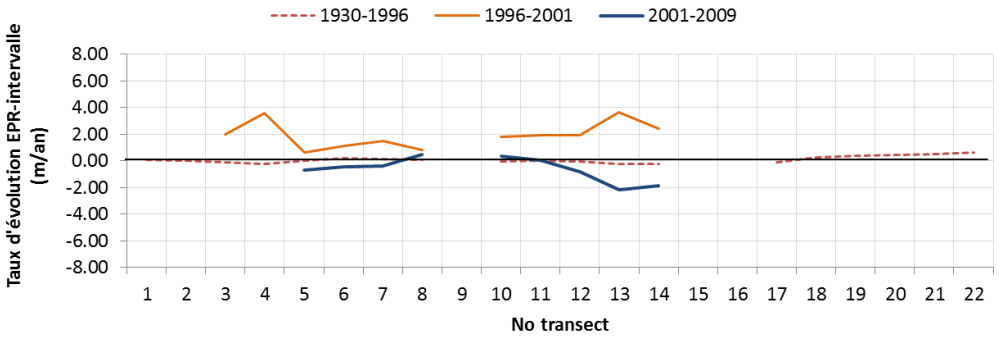


Figure 26. Taux d'évolution historique par intervalle, Pentecôte 2

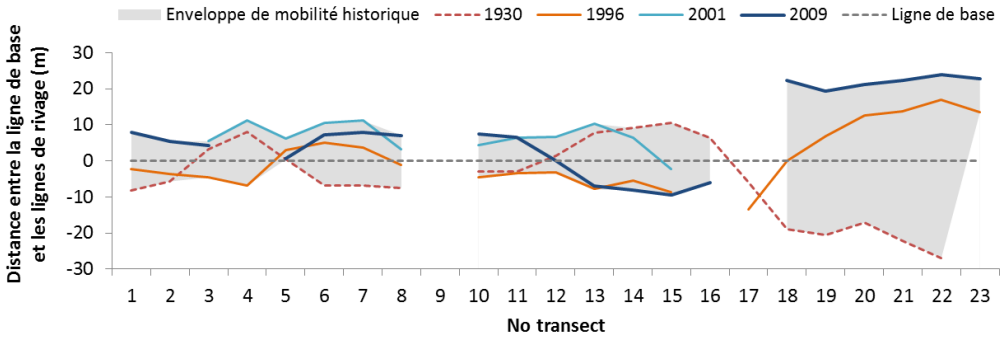


Figure 27. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Pentecôte 2

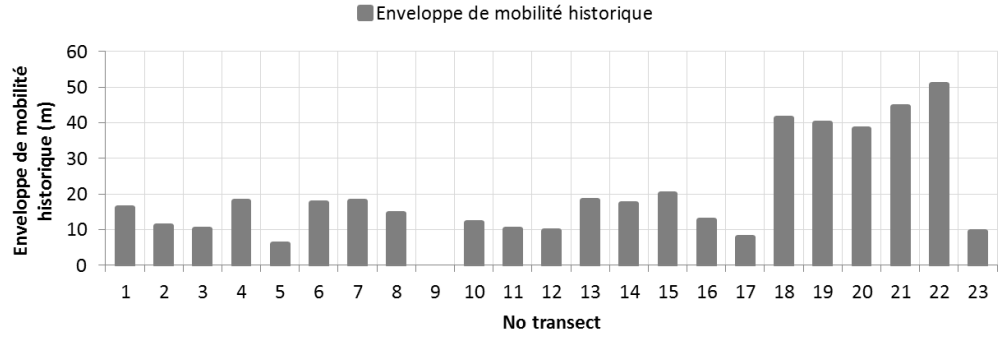
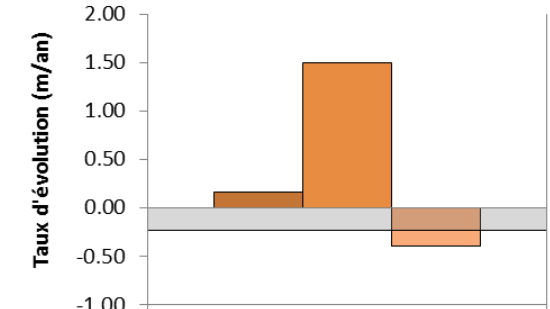


Figure 28. Enveloppe de mobilité historique, Pentecôte 2

Peu de données du réseau de suivi sont disponibles dans les limites du site d'étude et celles-ci n'ont permis que de mesurer des déplacements négatifs ponctuels et inférieurs à 1 mètre (figure 29, figure 30 et tableau 6). Les stations de suivi localisées en aval des ruisseaux ne sont implantées que depuis 2013-2014 (suivis disponibles pour 2014-2015 et 2015-2016) et, jusqu'alors, les données indiquent que le littoral a été stable (déplacement de 0 m).



No transect	7
1930-1996	0.16
1996-2001	1.49
2001-2009	-0.39
mmm_5ans	-0.23

Figure 29. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Pentecôte 2

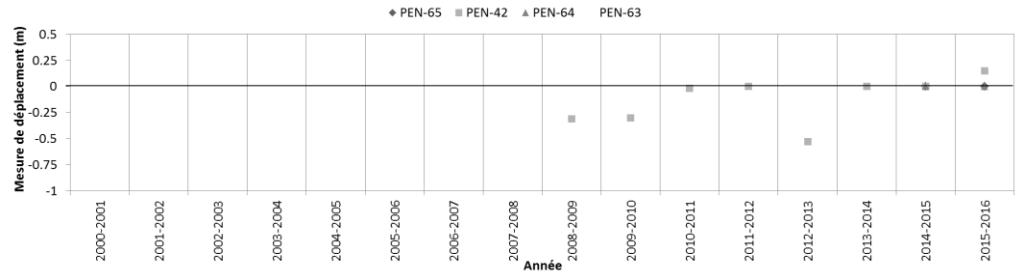


Figure 30. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Pentecôte 2

Tableau 6. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Pentecôte 2

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
PEN-65	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	0
PEN-42	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.31	-0.3	-0.02	0	-0.53	0	0	0.15
PEN-64	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	0
PEN-63	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.02	0

La configuration de la côte illustre bien l'effet des petits cours d'eau. À la figure 22, on voit que les terrasses de plage ne sont pas aussi bien développées devant les exutoires de cours d'eau et directement en aval des ruisseaux (par rapport au sens de la dérive littorale) qu'ailleurs sur la côte. La ligne de rivage présente donc un tracé en « dentelle » puisque les cours d'eau limitent en partie le développement et la végétalisation des terrasses de plage. Lorsque des événements extrêmes se produisent, ils peuvent occasionner des reculs plus importants dans les concavités formées par la dynamique de cours d'eau de plage. La course longitudinale du cours d'eau (parallèlement à la côte) est donc en partie responsable de l'érosion (voir les travaux de Caron et Buffin-Bélanger dans Corriveau et al., 2016).

Les conclusions sont donc similaires à celles de Pentecôte 1, soit que le site connaît une légère accumulation, que les zones d'érosion ponctuelles, dans le temps et l'espace, sont liées à la présence des cours d'eau et que le site a été ciblé en raison de la proximité de la route. Sur les photographies aériennes de 1996 et de 2009, la route est à 10 ou 15 m de la ligne de rivage près des exutoires de cours d'eau. L'ensemble des caractéristiques relatives au site de Pentecôte 2 sont résumées au tableau 7.

Tableau 7. Caractéristiques du site d'étude de Pentecôte 2

Caractéristiques	Pentecôte 1
Étendue latérale (approx.)	1 200 m
Durée d'existence	Événementielle
Mode d'évolution historique	Évolution cyclique
Vitesse de recul maximale, EPR	-2,16 m/an 2001-2009, transect 13
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-0,23 m/an 2008-2013, PEN-42
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-0,53 m 2012-2013, PEN-42
Processus et causes si identifiés	Liés aux cours d'eau de plage en raison de leur course longitudinale sur la plage (poussée par la dérive sédimentaire) ce qui limite la végétalisation de la partie supérieure du haut estran, contrairement aux côtes adjacentes, et rend sensible la côte face aux reculs événementiels
Sens de la dérive	Vers le sud
Direction prédominante du transport sédimentaire (sens de la dérive) responsable de l'érosion	Longitudinale et transversale
Possibilité de résolution du foyer d'érosion	ESSAI POTENTIEL : Linéarisation du cours d'eau avec épis courts en haut de plage et végétalisation des talus en aval des cours d'eau (par rapport au sens de la dérive) Objectif : Limiter le transport sédimentaire qui contraint le cours d'eau à s'écouler longitudinalement. (Voir Corriveau et al., 2016)
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales (20 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2010)	Oui Habitation
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Route 138 (par rapport à 1996) et habitations
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001) Types ajoutés : Exutoire de cours d'eau (19) et Cours d'eau de plage (course longitudinale/parallèle à la côte) (20)

2.3.5 Pentecôte 3

Historiquement, le site de Pentecôte 3 (figure 31 et figure 12, Ruisseau – Pentecôte 3) a été assez stable avec des taux près de 0 m/an. Les taux d'évolution sont positifs sauf localement pour un transect (transect 5, directement en aval de l'exutoire du cours d'eau par rapport au sens de la dérive) (figure 32). Les transects qui croisent directement l'embouchure des cours d'eau ne peuvent pas faire l'objet d'une analyse ; ils sont donc exclus.

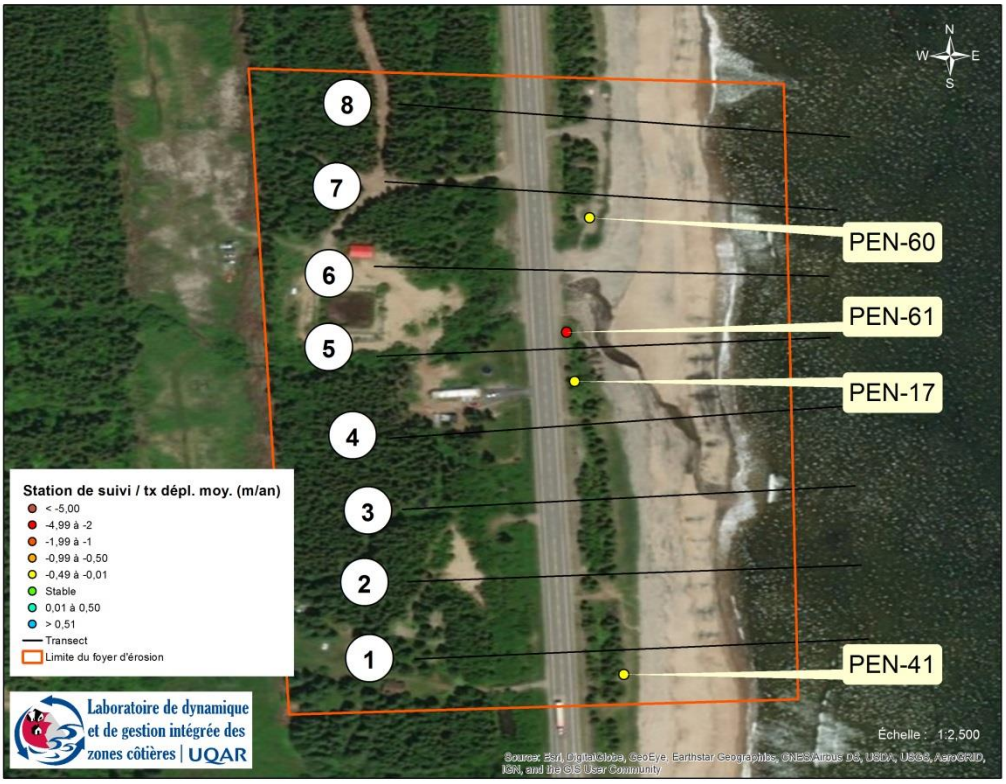


Figure 31. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Pentecôte 3

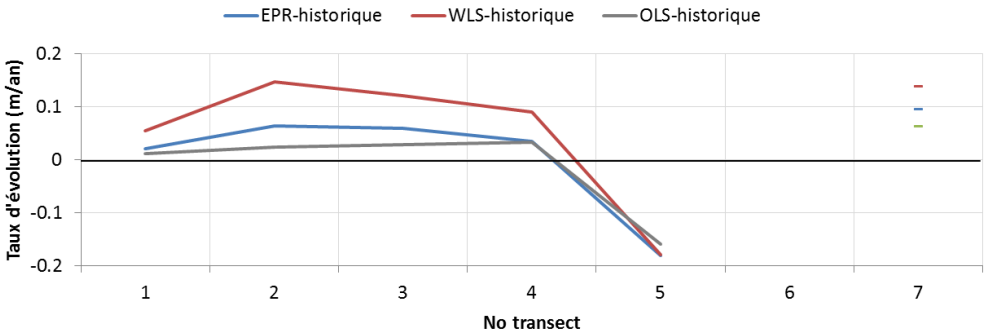


Figure 32. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Pentecôte 3

Les données disponibles pour le site de Pentecôte 3 ne permettent d'obtenir que trois intervalles historiques (figure 33 et figure 34). Selon ces données, ce site n'est ni dominé par l'érosion ni par l'accumulation. Le site est aussi très stable dans le temps avec des enveloppes de mobilité historique de moins de 15 m (figure 35 et figure 36).

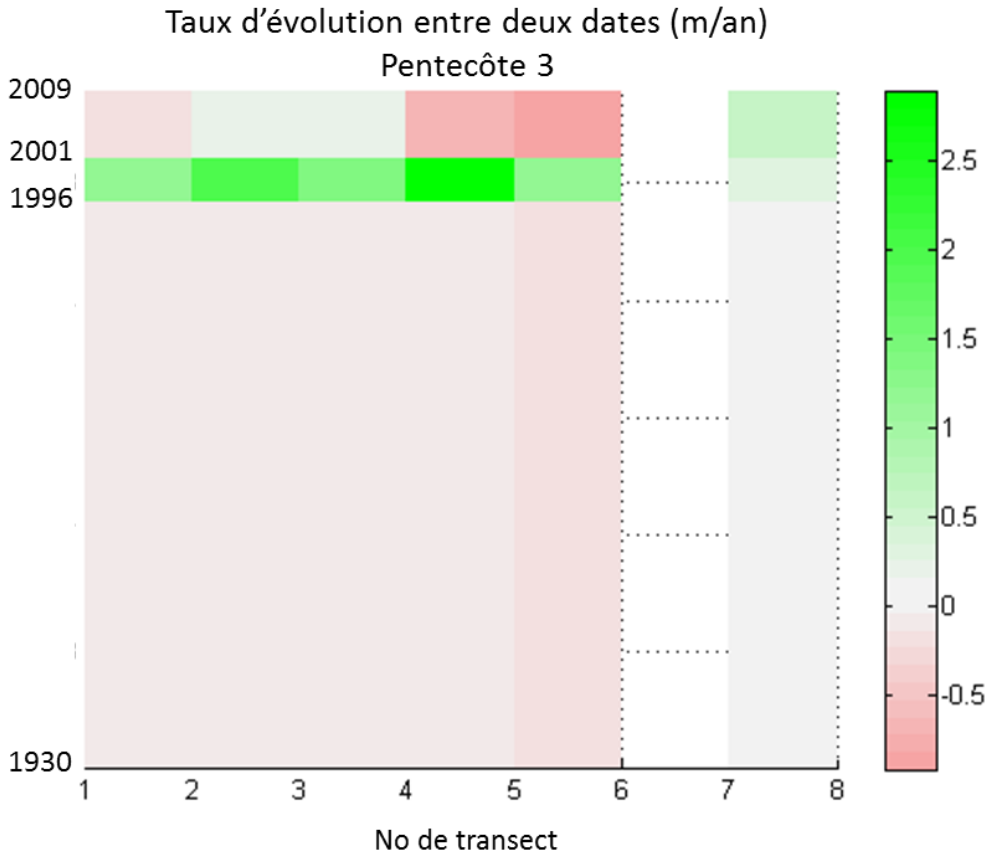


Figure 33. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles, Pentecôte 3

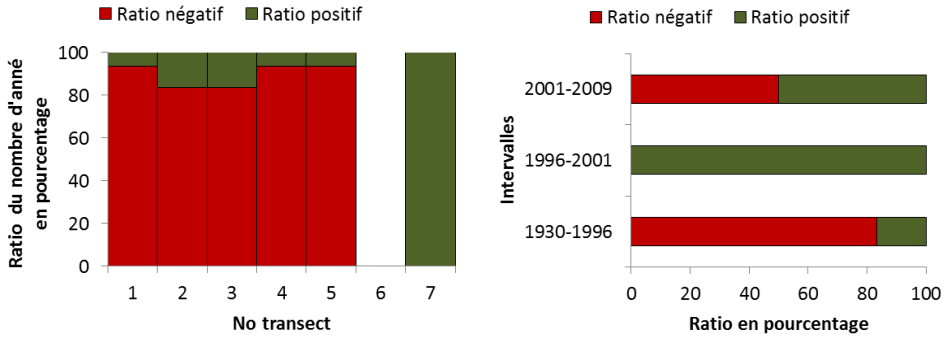


Figure 34. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Pentecôte 3

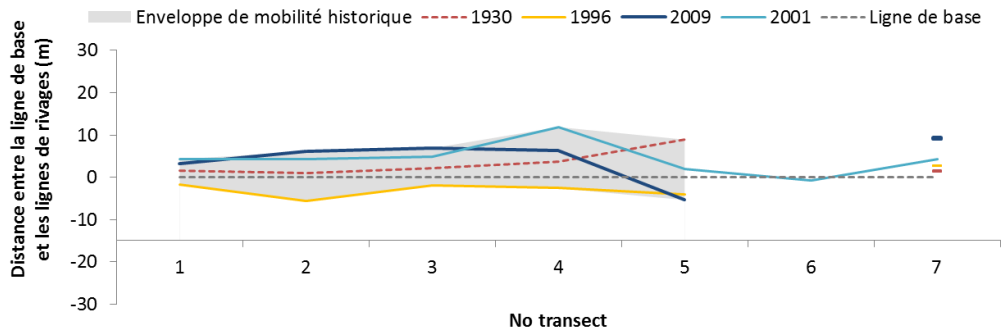


Figure 35. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Pentecôte 3

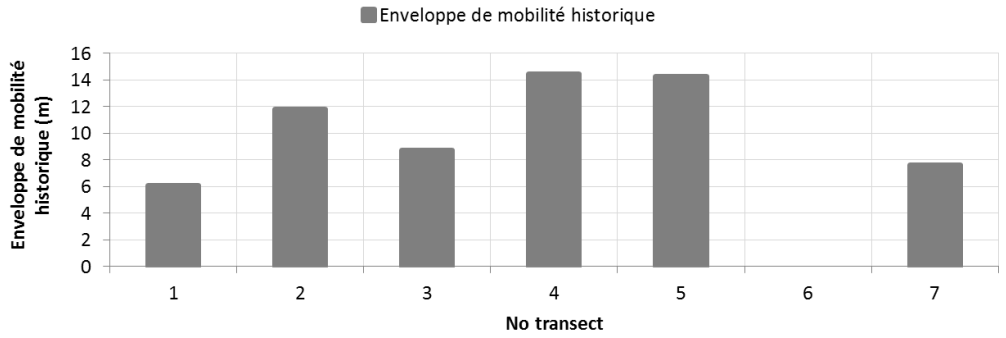


Figure 36. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Pentecôte 3

La figure 37 montre que la vitesse de recul la plus importante ayant été calculée est de -0,91 m/an (historique, 2001-2009). L'intervalle précédent avait plutôt été caractérisé par une avancée rapide du littoral avec des taux allant jusqu'à 2,89 m/an. Malgré le recul observé au cours de l'intervalle 2001-2009, les positions récentes de la ligne de rivage (2001 et 2009) sont encore légèrement avancées par rapport à celles de 1996 et de 1930 (figure 35).

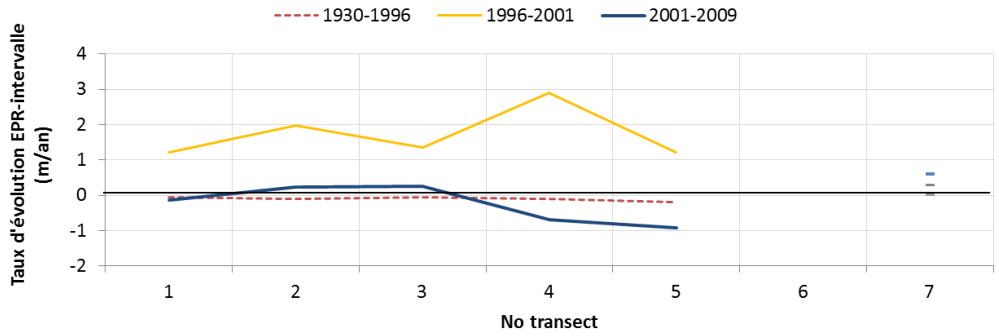


Figure 37. Taux d'évolution historique par intervalle, Pentecôte 3

La comparaison entre les données de stations de suivi et des analyses par intervalle montre que les vitesses de recul les plus sévères ont été mesurées depuis 2001 (figure 38). Aussi, ces déplacements mesurés annuellement ont permis de mesurer un recul événementiel de -5,3 m en 2015-2016 (PEN-61, tout juste au sud de l'exutoire du cours d'eau, soit en aval par rapport au sens de la dérive). La station de suivi voisine enregistrait pour sa part, au même moment, un déplacement de -3,75 m (PEN-17) (figure 39 et tableau 8).

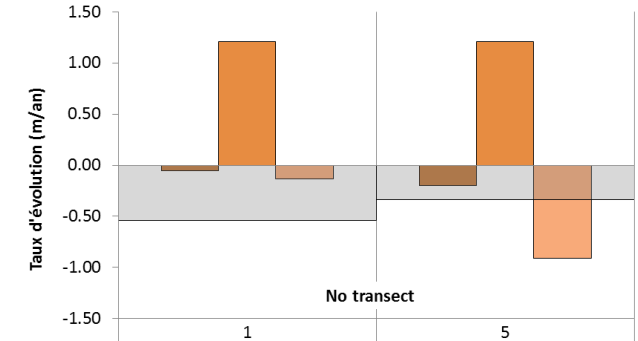


Figure 38. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Pentecôte 3

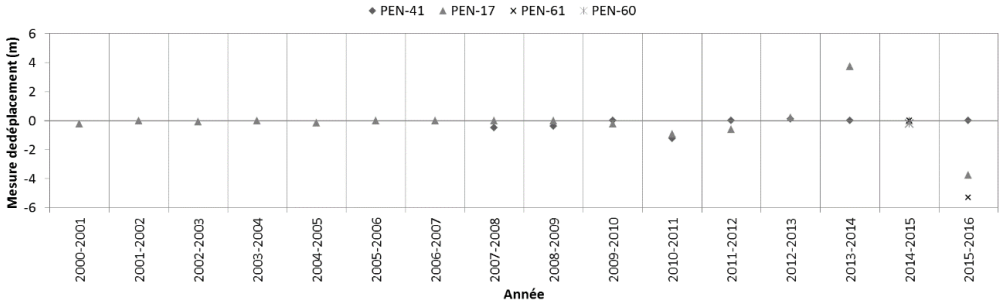


Figure 39. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Pentecôte 3



Figure 40. Proximité de la côte à l'endroit où s'écoule un petit cours d'eau, Pentecôte 3 en 2009 (photo MTQ)

Tableau 8. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Pentecôte 3

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
PEN-41	na	na	na	na	na	na	imp	-0.5	-0.4	0	-1.25	0	0.1	0	rimp	0
PEN-17	-0.21	0	-0.05	0	-0.15	0	0	0	0	-0.2	-0.9	-0.6	0.2	3.75	0	-3.75
PEN-61	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	-5.3
PEN-60	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.2	nd

En aval de l'exutoire par rapport au sens de la dérive littorale, on constate que l'état de la côte a évolué durant les années récentes. À la figure 41, on observe en 2013 et 2014 que le talus le long du chenal est escarpé et que la végétation commence à coloniser la basse terrasse (sous l'arbre tombé). En 2015, la végétalisation de la terrasse est complétée (+3,75 m entre la falaise et le chenal) et en 2016, le cours d'eau ne s'écoule plus parallèlement à la côte et la basse falaise est réactivée. La présence du cours d'eau permet fort probablement aux événements de tempête d'éroder la côte plus sévèrement près de l'exutoire et en amont. Celui-ci limite aussi partiellement le développement de la terrasse de plage directement en aval de l'exutoire du cours d'eau. Ces observations permettent de mieux cerner l'influence des cours d'eau de plage sur les côtes de Pentecôte, soit qu'ils limitent partiellement l'avancée de la végétation et que l'abaissement de la plage dans le chenal du cours d'eau permet aux événements de tempête d'affecter plus sévèrement le littoral à proximité.



2013-10-16



2014-08-09



2015-09-16



2016-08-14

Figure 41. Évolution du littoral devant la station de suivi PEN-17

Enfin, les données recueillies jusqu'ici indiquent que le littoral est stable et qu'il a dû être résilient aux reculs événementiels passés. Ce secteur a été retenu surtout en raison de la proximité de la route qui n'est qu'à 20-25 m de la ligne de rivage actuelle sauf à l'endroit où il y a l'exutoire d'un petit cours d'eau. À cet endroit, la route est directement accolée à la côte (figure 40). Les conclusions pour ce site sont les mêmes que celles réalisées pour le site de Pentecôte 1 et 2. Le tableau 9 résume les caractéristiques du site d'étude de Pentecôte 3.

Tableau 9. Caractéristiques du site d'étude de Pentecôte 3

Caractéristiques	Pentecôte 3
Étendue latérale (approx.)	400 m
Durée d'existence	Événementielle
Mode d'évolution historique	Stabilité relative
Vitesse de recul maximale, EPR-intervalle	-0,91 m/an 2001-2009, transect 5
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-0,54 m/an 2006-2011, PEN-41
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-5,30 m 2015-2016, PEN-61
Processus et causes si identifiés	Liés aux cours d'eau de plage en raison de leur course longitudinale sur la plage (poussée par la dérive sédimentaire) ce qui limite la végétalisation de la partie supérieure du haut estran, contrairement aux côtes adjacentes, et rend sensible la côte face aux reculs événementiels
Sens de la dérive	Vers le sud
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	Longitudinale et transversale
Possibilité de résolution du foyer d'érosion	ESSAI POTENTIEL : Linéarisation du cours d'eau avec épis courts en haut de plage et végétalisation des talus en aval des cours d'eau (par rapport au sens de la dérive). Objectif : Limiter le transport sédimentaire qui contraint le cours d'eau à s'écouler longitudinalement. (Voir Corriveau et al., 2016)
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimité à l'aide des vitesses de recul maximales (50 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2010)	Oui Route 138
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimité à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Frôle l'accotement de la route 138 Par rapport aux lignes de rivage 1930 et 2009
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001) Types ajoutés : Exutoire de cours d'eau (19) et Cours d'eau de plage (course longitudinale/parallèle à la côte) (20)

2.3.6 Gallix 1

L'analyse historique de Gallix 1 (figure 42 et figure 43, Rivière Brochu – Gallix 1) montre que l'érosion du littoral est récente et que l'évolution de la position de la ligne de rivage à l'échelle historique a été positive (accumulation) avec des taux d'évolution oscillant entre +0,12 m/an et +0,62 m/an (figure 44). Le taux moyen pour le site est de 0,33 m/an (EPR-historique), de 0,41 m/an (OLS-historique) et de 0,39 m/an (WLS-historique). En raison du recul observé au cours de la période la plus récente (2005-2010), les taux EPR-historique sont moins élevés que ceux obtenus avec la régression linéaire OLS et WLS (figure 44).

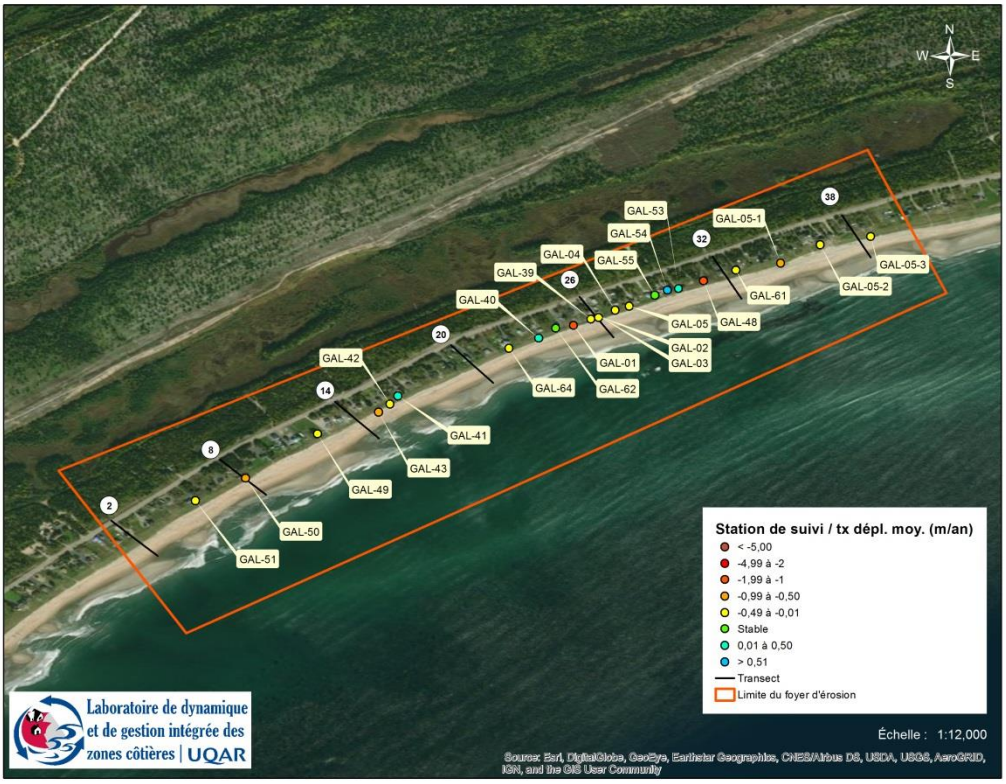


Figure 42. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Gallix 1



Figure 43. Localisation des sites de foyers d'érosion analysés dans le secteur de Gallix (Rivière Brochu – Gallix 1, Rue Bell – Gallix 2)

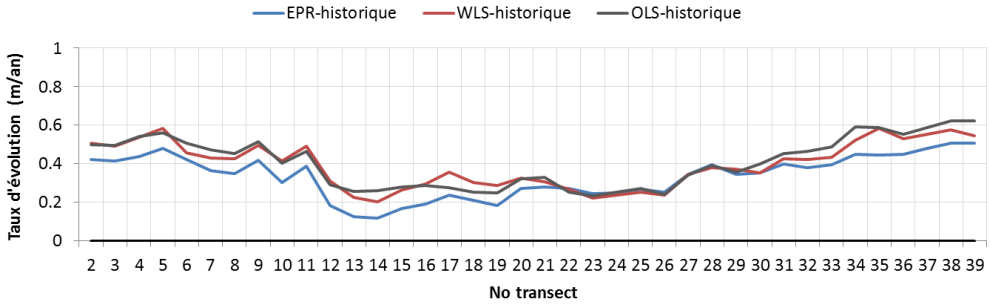


Figure 44. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Gallix 1

L'analyse par intervalle montre que l'évolution a été majoritairement positive ou stable durant les intervalles historiques les plus anciens soit 1930-1970 et 1970-1996 (figure 45 et figure 46). Mis à part l'intervalle récent, c'est l'accumulation qui domine durant la période 1930-1996 et c'est au cours de la période récente, soit 2005-2010, que se produit un renversement de tendance (figure 45 et figure 46). L'érosion affecte alors presque tout le littoral du segment à l'étude. Durant cet intervalle, le recul s'effectue à une vitesse allant jusqu'à -3,31 m/an et est d'en moyenne -1,33 m/an (figure 47).



Figure 45. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles (EPR-intervalle), Gallix 1

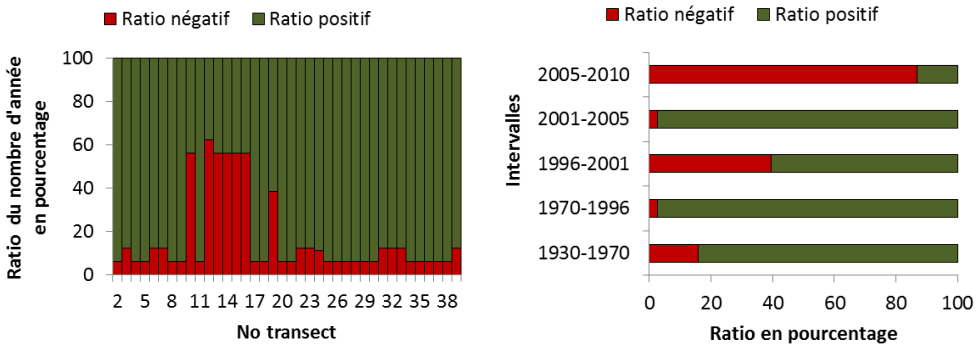


Figure 46. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Gallix 1

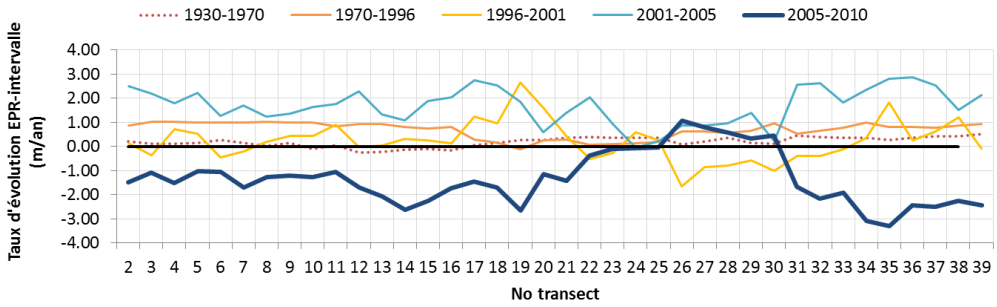
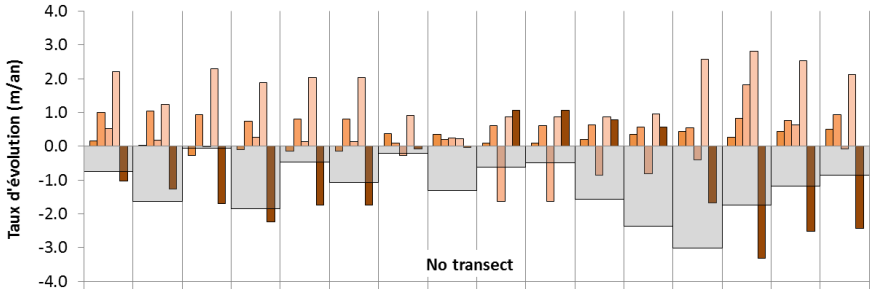


Figure 47. Taux d'évolution historique par intervalle, Gallix 1

L'analyse de l'évolution historique (photos aériennes) indique que les vitesses de recul maximales ont été atteintes durant l'intervalle récent (2005-2010) (figure 47). Les mesures de déplacement *in situ* corroborent cette observation. En effet, on observe, à la figure 48, que les vitesses de recul maximales mesurées à l'aide des données des stations de suivi du LDGIZC (mmm_5ans) sont, en général, similaires ou supérieures aux vitesses mesurées au cours du dernier intervalle historique. Les vitesses d'érosion rapides mesurées à partir de l'imagerie entre 2005 et 2010 se sont donc poursuivies au cours des années subséquentes. On peut voir au tableau 10 que des reculs importants ont été enregistrés particulièrement au cours de la saison 2010-2011, saison au cours de laquelle d'importantes tempêtes avaient touché les côtes de plusieurs régions du Québec maritime (décembre 2010). En octobre 2005, une tempête importante avait aussi touché le littoral de la Côte-Nord.



	5	8	12	15	16	16	23	25	26	26	27	28	31	35	37	39
1930-1970	0.16	0.04	-0.26	-0.09	-0.15	-0.15	0.37	0.36	0.09	0.09	0.20	0.35	0.44	0.26	0.44	0.51
1970-1996	1.00	1.04	0.95	0.74	0.81	0.81	0.10	0.19	0.61	0.61	0.63	0.57	0.55	0.82	0.77	0.93
1996-2001	0.52	0.18	-0.01	0.27	0.14	0.14	-0.27	0.25	-1.64	-1.64	-0.86	-0.80	-0.40	1.82	0.64	-0.08
2001-2005	2.22	1.24	2.30	1.89	2.04	2.04	0.92	0.22	0.88	0.88	0.88	0.96	2.58	2.81	2.54	2.12
2005-2010	-1.04	-1.27	-1.70	-2.24	-1.73	-1.73	-0.09	-0.04	1.06	1.06	0.79	0.56	-1.67	-3.31	-2.51	-2.43
mmm_5ans	-0.74	-1.63	-0.06	-1.85	-0.48	-1.08	-0.20	-1.31	-0.61	-0.49	-1.56	-2.37	-3.02	-1.74	-1.17	-0.85
Année déb. mmm_5ans	2007	2007	2007	2001	2003	2001	2001	2000	2000	2008	2009	2007	2009	2006	2004	2005

Figure 48. Taux d'évolution (mmm_5ans) des stations de suivi vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Gallix 1

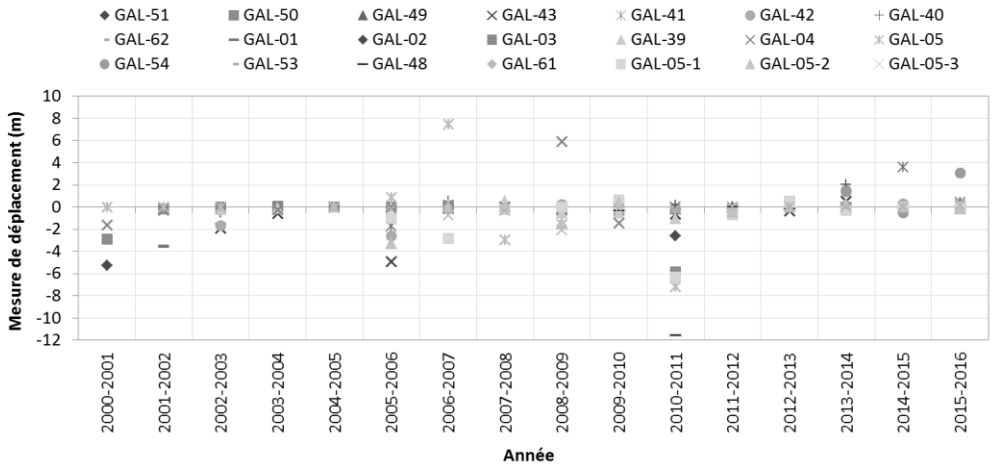


Figure 49. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Gallix 1

D'après l'imagerie disponible, c'est en 2005 que la ligne de rivage est la plus avancée (accumulation générale depuis 1930) (figure 50). Par la suite, la ligne de rivage (2010) retrouve une position similaire à celle de 2001 et 1996. La position la plus récente (2010) est encore très avancée par rapport à la position la plus ancienne (1930), soit jusqu'à 30-35 m par endroit. Ceci signifie

que le territoire (terrestre) actuel n'existait tout simplement pas durant les années 1930. Ces territoires construits par accumulation au cours de la période historique devraient être considérés avec prudence en termes d'aménagement. Ici, entre 1930 et 2005, c'est jusqu'à environ 50 m de terrain qui a été gagné (entre les transects 34 à 39). Dans ce cas, cette distance correspond aussi à l'enveloppe de mobilité historique (figure 50 et figure 51). Dans ce type de situation, il serait important d'intégrer la position de la limite la plus retirée vers la terre aux connaissances supportant les décisions de gestion du territoire côtier. L'intégration de l'enveloppe de mobilité permet, entre autres, de localiser cette limite.

Tableau 10. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Gallix 1

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
GAL-51									-0.1	-0.08	-2.62	-0.15	0	0.1	0	0
GAL-50									-0.05	-0.3	-5.87	-0.28	0.5	0	0	0
GAL-49									-0.2	0.1	-0.15	0	0			
GAL-43			-1.9	-0.6	0	-4.91	-0.13	0	0	0	-0.61	-0.15	-0.35	0.5	0	0
GAL-41					0	-1.76	-0.14	0	-0.28	0	0	0	0.18	-0.1	3.6	0.4
GAL-42			-1.7	0	0	-2.62	-0.09	-0.24	0.21	-0.1	-0.11	-0.15	0.1	1.5	0.3	0.3
GAL-40			-0.5	-0.3	0	0	0.5	0	0	-0.24	0.19	-0.05	0	2.05	-0.15	0.4
GAL-62															0	0
GAL-01	-3.13	-3.52	-0.05	0.4	-0.25	0										
GAL-02	-5.28															
GAL-03	-2.87	-0.15	0	-0.05	0	0	0.1									
GAL-39			-0.2	-0.1	0	0	0.15	0.55	-0.5	-0.54	-1.06	-0.35	0	0	-0.05	0
GAL-04	-1.6	-0.27	0	-0.2	0	0	0.2	0	5.9	-1.45	-6.2	-0.25	0.1	0	0	0
GAL-05	0	0	0		0	0.85	7.5	-2.95	-1.55	0.04	-7.19	-0.2				
GAL-54														1.42	-0.52	3.05
GAL-55														0	0	0
GAL-53														0	0	0.03
GAL-48									0	-0.37	-11.56	0	-0.15		0	0
GAL-61															-0.02	0
GAL-05-1						-1.05	-2.83	-0.2	0	0.63	-6.28	-0.7	0.55	-0.3	0	0
GAL-05-2						-3.29	0	0.09	-1.47	0.34		-0.45	0	0.3	0	-0.15
GAL-05-3						-0.19	-0.77	-0.34	-2.1	-0.18	-0.23	0	0	0	0	0.15

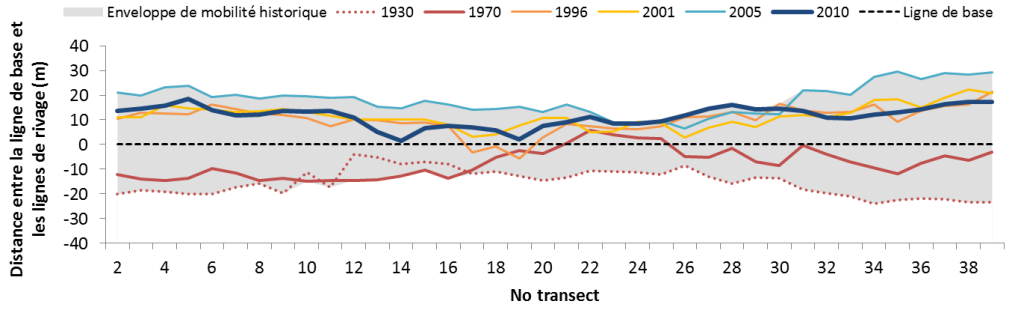


Figure 50. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Gallix 1

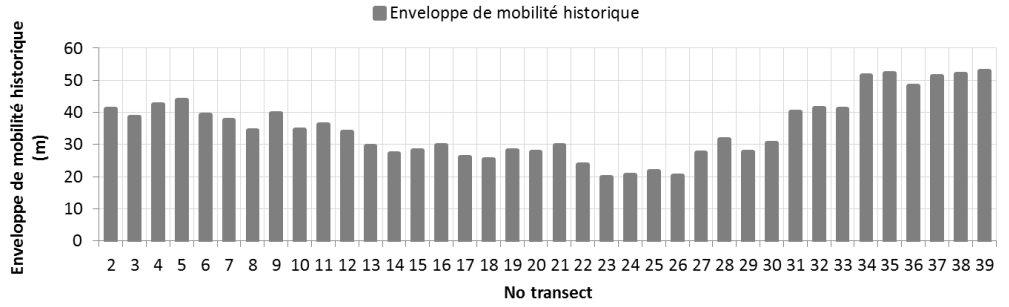


Figure 51. Largeur de l'enveloppe de mobilité historique, Gallix 1

À la lumière des données dont nous disposons, le foyer d'érosion de Gallix 1 est relativement récent (perdure depuis plusieurs années). Le recul récent est significatif (retour à une position similaire à celles de 1996 et 2001) et ne connaît pas d'équivalents historiques documentés. Aussi, on observe à partir des mesures *in situ* que des déplacements négatifs importants ont été mesurés tous les 5 ans (2001-2002, 2005-2006 et 2010-2011) (figure 49 et

tableau 10). Entre ces reculs, des avancées ont été mesurées ponctuellement, mais n'ont pas été suffisantes pour combler l'érosion. L'ensemble des caractéristiques relatives au site de Gallix 1 sont résumées dans le tableau 11.

L'hypothèse actuelle est que le recul récent constitue un changement de tendance dans l'évolution du site d'étude, en raison de sa sévérité et de son étendue. La validation de cette hypothèse nécessiterait l'analyse des données environnementales, climatiques et météos-marines ainsi qu'une analyse de la dynamique sédimentaire afin d'identifier les changements survenus au cours des années 2000 qui pourraient expliquer l'apparition de ce foyer d'érosion. Ces analyses permettraient de prévoir le sens de la tendance d'évolution future, à savoir si l'érosion constitue bel et bien la nouvelle tendance pour Gallix 1. Néanmoins, en sachant que de manière globale, les apports sédimentaires à la côte ne sont généralement pas en augmentation, qu'une diminution du couvert de glace de mer et sur la côte (pied de glace) (Senneville et al., 2014) aura des conséquences sur le climat de vagues (moins d'énergie dissipée au contact de la glace, fetch plus long) en plus de limiter en temps la durée de protection directe offerte par le pied de glace, il est probable que l'hypothèse émise ici se confirme dans le contexte climatique et météo-marin appréhendé pour le futur. L'érosion mesurée est vraisemblablement le résultat d'événements de tempête combinés à une vitesse de rétablissement ayant été insuffisante pour assurer une stabilité ou une accumulation. Contrairement aux conditions du passé, il est probable que l'équilibre entre la fréquence des tempêtes et les conditions de beaux temps permettant le rétablissement de la plage ait été rompu. Néanmoins, puisque l'on observe actuellement des mesures d'accumulation grâce aux stations de suivi (tableau 10), cette dynamique reste elle aussi à confirmer.

Tableau 11. Caractéristiques du site d'étude de Gallix 1

Caractéristiques	Gallix 1
Étendue latérale (approx.)	2000 m
Durée d'existence	Pluriannuelle
Mode d'évolution historique	L'érosion pourrait constituer un changement de tendance par rapport à l'accumulation historique
Vitesse de recul maximale, EPR-intervalle	-3,31 m/an 2005-2010, transect 35
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-3,02 m/an GAL-48-2009-2014
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-11,56 m GAL-48, 2010-2011
Processus et causes si identifiés	Hypothèse : Modifications des conditions environnementales récentes (vagues, niveau d'eau, fréquence des événements de tempêtes, réduction du couvert de glace). Équilibre entre les vagues constructives et destructives rompu limitant la vitesse de rétablissement après les événements de tempête.
Sens de la dérive	Vers l'ouest
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	T (courant de retour), lors des événements de tempêtes
Solution(s) à évaluer	Non évaluée
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales (30 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2010)	Oui Habitations
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Habitations
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001) Foyer d'érosion d'apparition récente probablement en raison de modifications aux conditions environnementales et météos-marines (21)

2.3.7 Gallix 2

L'évolution historique de Gallix 2 (figure 52 et figure 43, Rue Bell – Gallix 2) a été généralement positive ou alors ne présente qu'un recul légèrement négatif (figure 53). L'analyse de l'évolution côtière par intervalle pour ce site montre que le recul observé actuellement est récent. C'est à partir de 2001 que des vitesses de recul plus importantes commencent à être mesurées (figure 54 et figure 55). L'érosion touche de plus en plus de transects et les vitesses de recul sont de plus en plus rapides à partir de cette date (figure 55 et figure 56).

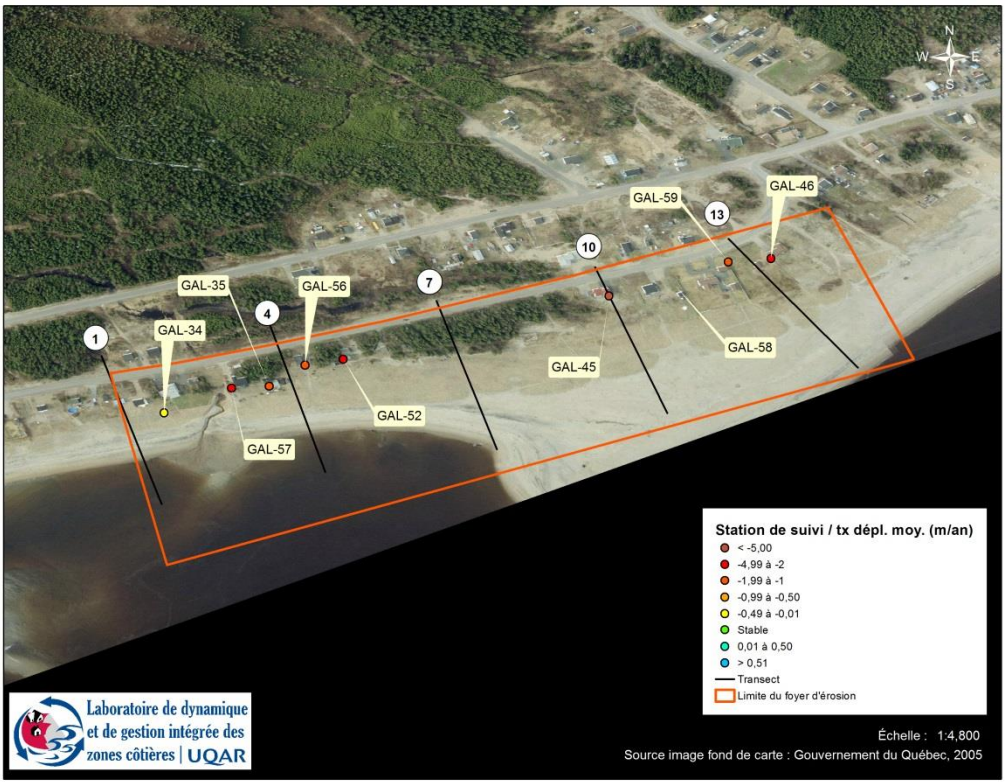


Figure 52. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Gallix 2

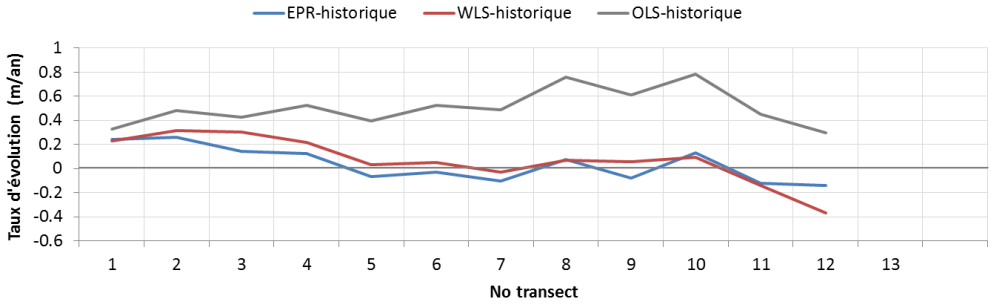


Figure 53. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Gallix 2

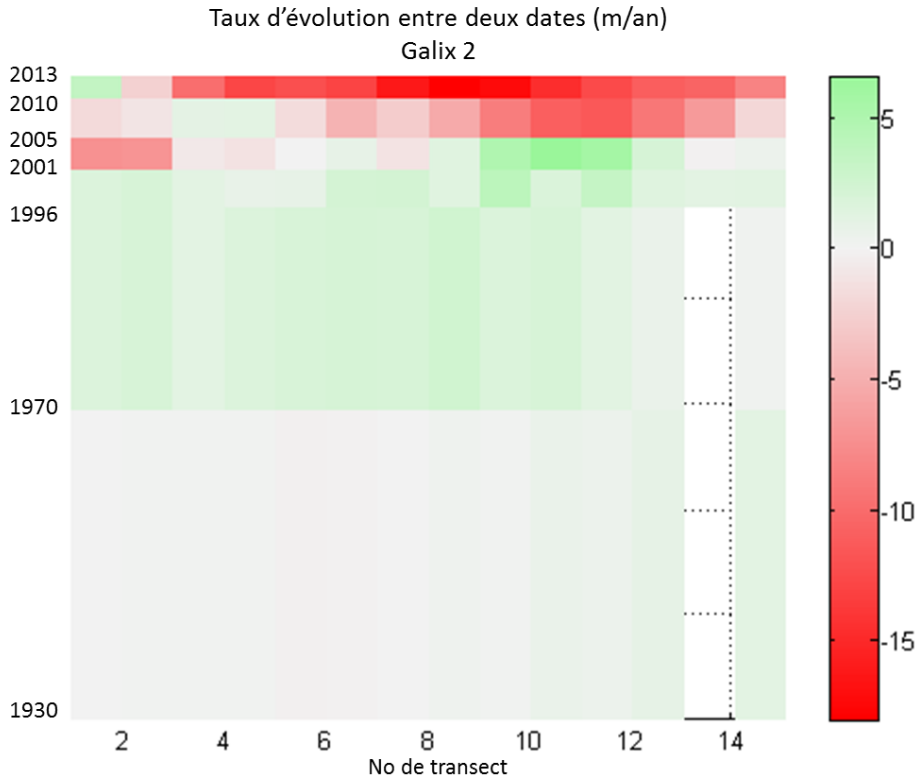


Figure 54. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transect et intervalles, Gallix 2

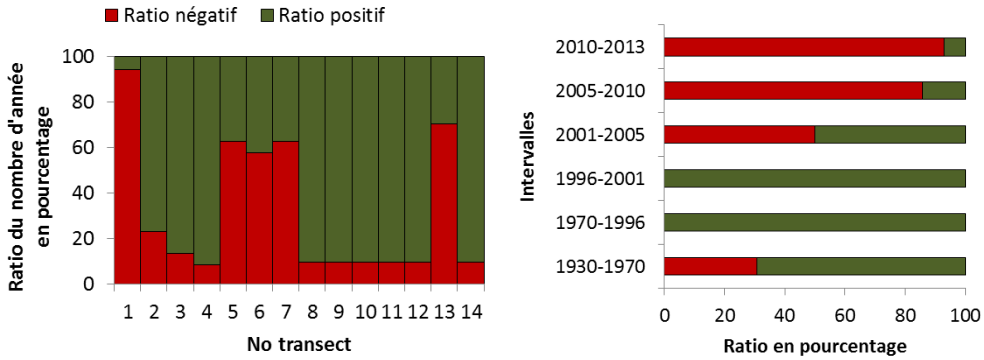


Figure 55. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Gallix 2

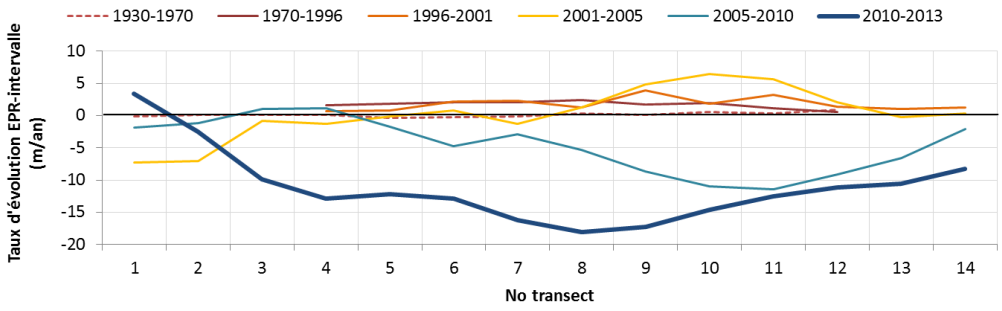
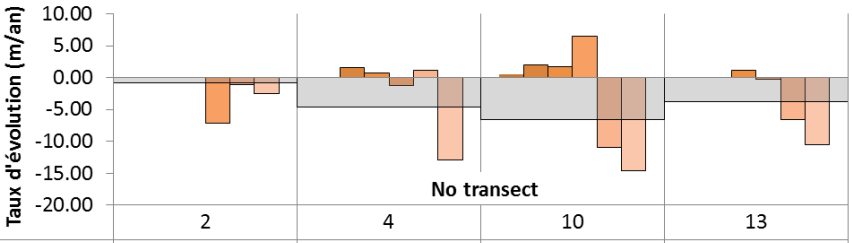


Figure 56. Taux d'évolution historique par intervalle, Gallix 2

À Gallix 2, les mesures *in situ* (stations) ont d'abord permis de localiser le foyer d'érosion. Par contre, c'est grâce à l'analyse historique et au calcul des taux d'évolution des périodes récentes (par intervalle) que la sévérité du foyer d'érosion a pu être quantifiée. En effet, on constate à la figure 57 que les vitesses de recul les plus importantes ont été observées durant l'intervalle 2010-2013 (historique) et que les vitesses de recul de 2005-2010 (historique) ont été localement, elles aussi, supérieures aux taux d'évolution mesurés à partir des données de stations.



	2	4	10	13
1930-1970	0.08	0.06	0.55	0.00
1970-1996	0.00	1.64	2.02	0.00
1996-2001	0.00	0.69	1.79	1.10
2001-2005	-7.09	-1.27	6.52	-0.22
2005-2010	-1.14	1.14	-10.97	-6.55
2010-2013	-2.51	-12.88	-14.66	-10.54
mmm_5ans	-0.74	-4.63	-6.59	-3.72
Année déb. mmm_5ans	2007	2009	2009	2009

Figure 57. Taux d'évolution mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Gallix 2

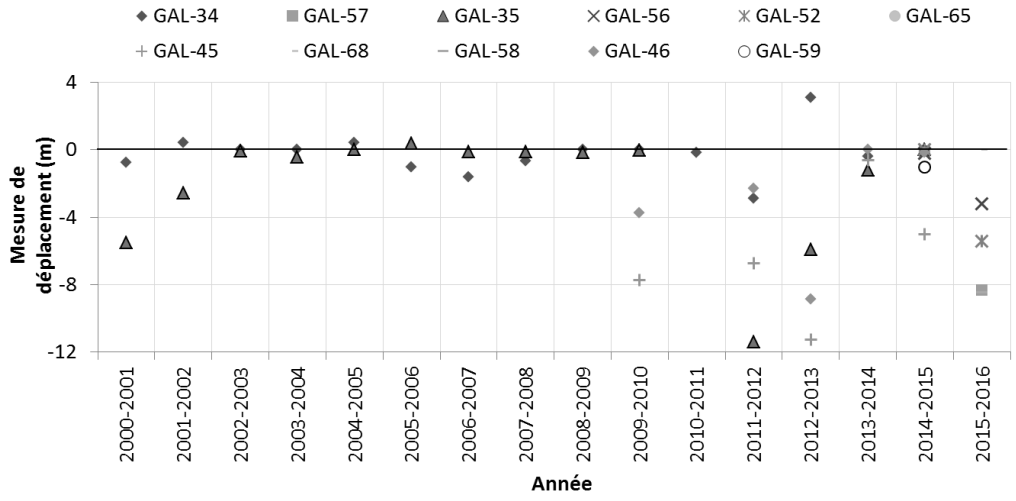


Figure 58. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Gallix 2 (une seule mesure en 2010-2011, la plupart des bornes sont en réimplantation)

L'évolution historique de la côte présentée à la figure 59 montre que la position de la ligne de rivage de 2013 retrouve une position similaire à celle de 1930 et 1970. La vitesse à laquelle s'effectue ce retour est extrêmement rapide. Plus

exactement, les vitesses de recul de 2010-2013 s'abaissent même sous des valeurs de -15 m/an (figure 56). C'est donc le territoire gagné en 75 ans (de 1930 à 2005) qui a été perdu en 8 ans (de 2005 à 2013). L'enveloppe de mobilité historique nous indique que ce gain avait atteint jusqu'à 100 m (figure 59 et figure 60).

Tableau 12. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Gallix 2

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
GAL-34	-0.76	0.4	0	0	0.41	-1.05	-1.63	-0.67	0	0.03	-0.16	-2.9	3.1	-0.4	-0.1	rimp
GAL-57	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.07	-8.3
GAL-35	-5.5	-2.55	-0.1	-0.45	0	0.36	-0.13	-0.13	-0.15	-0.03	rimp	-11.4	-5.9	-1.2	0	rimp
GAL-56	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.2	-3.2
GAL-52	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	rimp	0	-5.4
GAL-65	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	imp
GAL-45	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-7.73	rimp	-6.75	-11.25	-0.62	-5.02	rimp
GAL-68	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
GAL-58	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	rimp	-8.45
GAL-46	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-3.73	rimp	-2.28	-8.85	0	-0.15	rimp
GAL-59	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-1.03	rimp

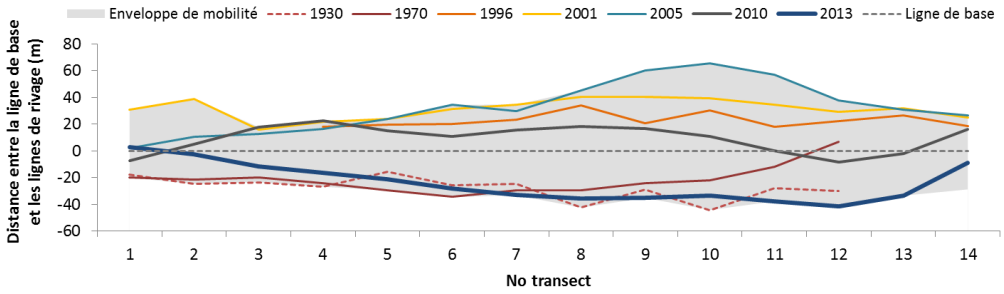


Figure 59. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base (équivalente à 0 m) crée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Gallix 2

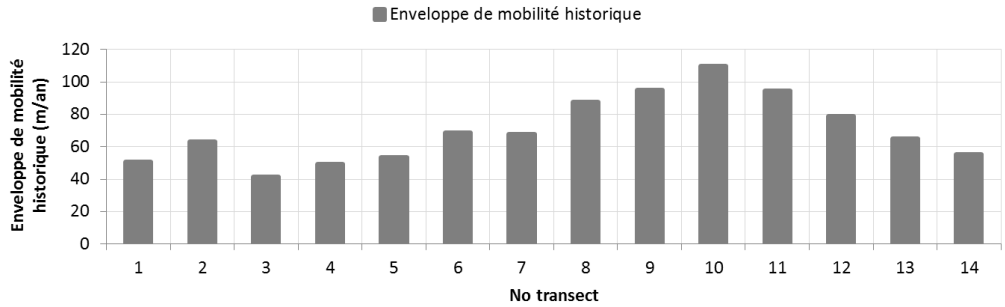


Figure 60. Enveloppe de mobilité historique, Gallix 2

Actuellement, on sait déjà que le recul s'est poursuivi et que la ligne de rivage est, à certains endroits, derrière la position de 1930 et/ou 1970 (observations sur le terrain durant l'automne 2017 et photographies obliques de septembre 2017) (figure 62). Devant les transects 10 à 14, la position de la ligne de rivage visible tout près des maisons sur les photos obliques de septembre 2017 (figure 62) était déjà localisée à entre 20 et 35 m approximativement derrière la position de la ligne de rivage historique la plus reculée vers les terres (1930 ou 2013 selon le cas). La comparaison de l'imagerie oblique de 2010 et de 2017 pour ce même secteur montre cet important recul de la ligne de rivage (figure 61 et 62).



Figure 61. État de la côte à Gallix 2, transect 10 à 14, en septembre 2010



Figure 62. État de la côte à Gallix 2, transect 10 à 14, en septembre 2017

Ces reculs récents extrêmement sévères sont attribuables à la destruction de la saillie triangulaire sableuse (formée par la confluence d'une dérive secondaire vers l'est et du courant de l'exutoire de la rivière Sainte-Marguerite). Cette saillie a fort possiblement été détruite lors d'un ou plusieurs événements extrêmes. D'après l'analyse de l'imagerie disponible, la saillie a été détruite après 2005 (position la plus avancée de la ligne de rivage) et avant 2009-2010 (figure 63). Durant l'année de suivi 2009-2010, le déplacement négatif mesuré à la station GAL-45 (position centrale par rapport à la saillie) est important et atteint -11,25 m (tableau 12). Ce déplacement aurait été impossible si la saillie avait été en place. Notons aussi que les stations GAL-45 et GAL-46 ont été implantées à l'été 2009, signe que des marques d'érosion étaient probablement visibles dans ces secteurs au moins à partir de cette année-là (tableau 12) ce qui laisse penser que sa destruction est antérieure à

2009 et postérieure à 2005. Les citoyens de ce secteur seraient probablement en mesure de dater la destruction de la saillie.



Figure 63. Comparaison d'images aériennes 2005 et 2010 montrant la disparition de la saillie triangulaire (source des images : Google Earth)

On ignore encore si un retour de la ligne de rivage à proximité de la position de 1930 implique que la vitesse de recul deviendra progressivement moins importante ou alors si le recul se poursuivra à une vitesse aussi importante que celle mesurée depuis 2001. Néanmoins, les données de déplacement devant les stations de suivi semblent montrer un ralentissement de l'érosion. Cependant, ce ralentissement est bien relatif puisque les taux mesurés devant les stations demeurent très sévères comparativement à d'autres sites. À titre

d'exemple, le taux mmm_5ans mesuré à Gallix 2 est de -3,02 m/an alors qu'ici, il est de -6,59 m/an.

Une reconstruction d'une saillie combinée à une progradation de la côte dans le futur résultant d'une stabilisation des sédiments qui soit suffisante pour se traduire par une avancée de la ligne de rivage est considérée comme probable. Ce scénario demeure toutefois incertain à l'emplacement exact de la saillie historique. Actuellement, une saillie sableuse s'est plutôt développée devant l'église (figure 64).



Figure 64. État de la côte en septembre 2017

L'ensemble des caractéristiques relatives au site de Gallix 2 sont résumées dans le tableau 13. Indépendamment de l'évolution future de la côte, et compte tenu de la fragilité de ce type d'environnement et de l'événement récent de destruction de la saillie, les territoires gagnés par l'avancée future de la côte par rapport aux côtes adjacentes ne devraient pas être aménagés. De plus, dans le contexte de hausse accéléré du niveau marin, les territoires gagnés sur la mer sont très bas et sensibles aux aléas de submersion.

Actuellement, le secteur fait l'objet d'un suivi particulier par le ministère de la Sécurité publique du Québec et par la municipalité de Sept-Îles. Depuis la tempête du 30 décembre 2016, ayant causé des dommages importants à plusieurs habitations, des bâtiments ont été, ou seront, démolis ou déménagés.

Tableau 13. Caractéristiques du site d'étude de Gallix 2

Caractéristiques	Gallix 2
Étendue latérale (approx.)	1000 m
Durée d'existence	Pluriannuelle, début entre 2005 et 2010
Mode d'évolution historique	L'érosion constitue un changement de tendance par rapport à l'accumulation historique
Vitesse de recul maximale, EPR	-18,01 m/an 2010-213, transect 8
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-6,59 m/an GAL-45 2009-2014
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-11,4 m GAL-34, 2011-2012
Processus et causes si identifiés	Destruction de la saillie triangulaire sableuse (événements extrêmes)
Sens de la dérive	Vers l'ouest
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	na
Solution(s) à évaluer	Non évalué
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimité à l'aide des vitesses de recul maximales (100 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2010)	Oui Habitations et rue Bell Déménagements et démolitions réalisés ou prévus
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimité à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Habitations
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001) Foyer d'érosion d'apparition récente probablement en raison de modifications aux conditions environnementales et météos-marines, (21) (destruction de la saillie)

2.3.8 Sept-Îles

Sur le site de Sept-Îles (figure 65 et figure 66), les taux d'évolution historiques (EPR, WLS et OLS) ont généralement été positifs (figure 67). Seuls les taux historiques mesurés devant les transects 39 à 50 ont été négatifs. Dans tous les cas, l'analyse montre quand même une évolution du littoral qui s'effectue par avancées et reculs ; il ne s'agit donc pas d'une évolution qui soit unidirectionnelle.

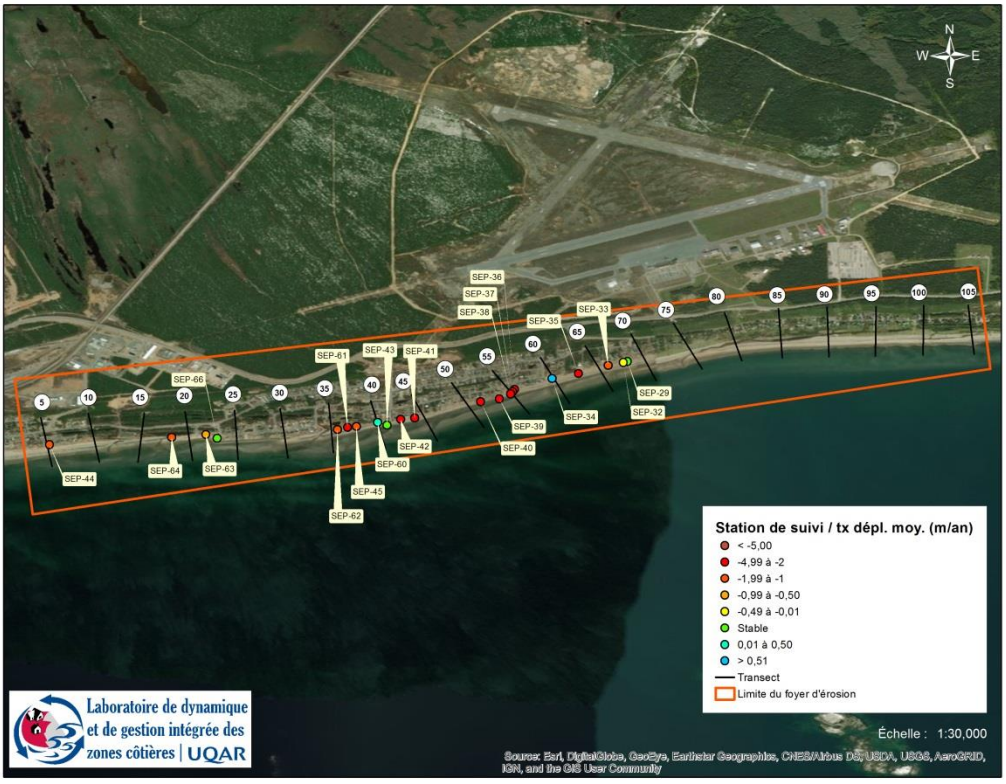


Figure 65. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Sept-Îles



Figure 66. Localisation du site de foyer d'érosion analysé dans le secteur de Sept-Îles

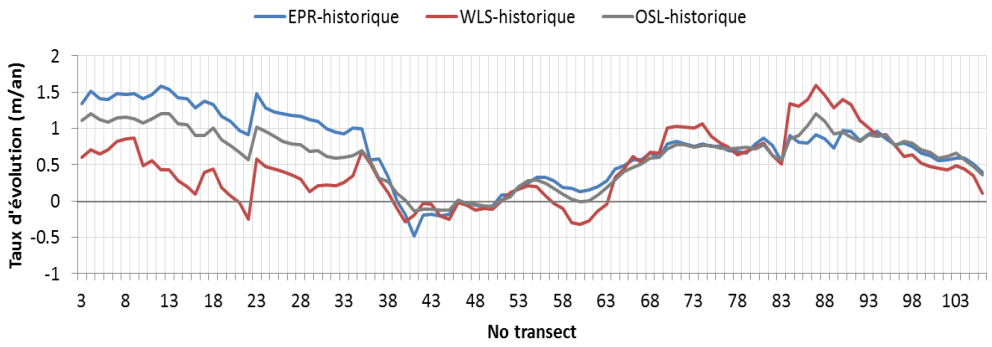


Figure 67. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Sept-Îles

L'analyse par intervalle indique aussi que l'évolution du site d'étude a surtout été caractérisée par des vitesses d'évolution positives (accumulation), et ce, tant spatialement que temporellement (figure 68 et figure 69). Cette analyse par intervalle montre que la vitesse d'avancée a été très rapide pour les transects 3 à 35 entre 1930 et 1950, atteignant plus de 5 m/an (figure 68 et figure 70). Cette évolution est le résultat de la progradation du littoral et du processus de végétalisation des terrasses de plage en bordure d'une série de lagunes. L'enveloppe de mobilité montre que le territoire gagné a été de plus de 100 m (figure 71 et figure 72). Ce territoire gagné à cette époque est maintenant occupé ; des habitations et des rues y ont été construites (figure 73).



Figure 68. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles (EPR-intervalle), Sept-Îles

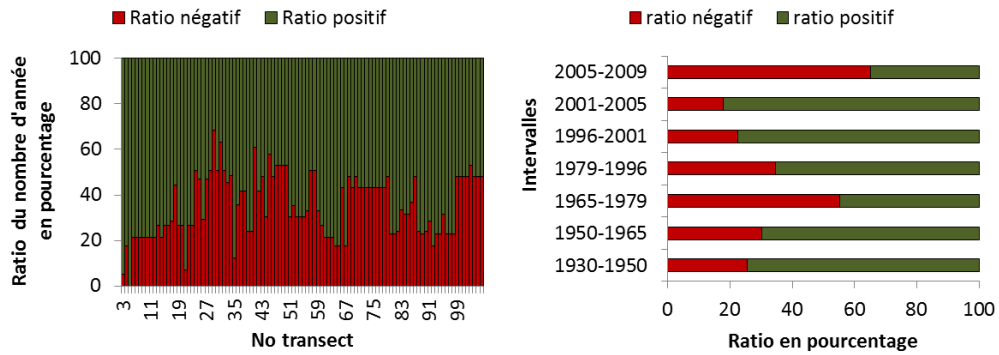


Figure 69. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Sept-Îles

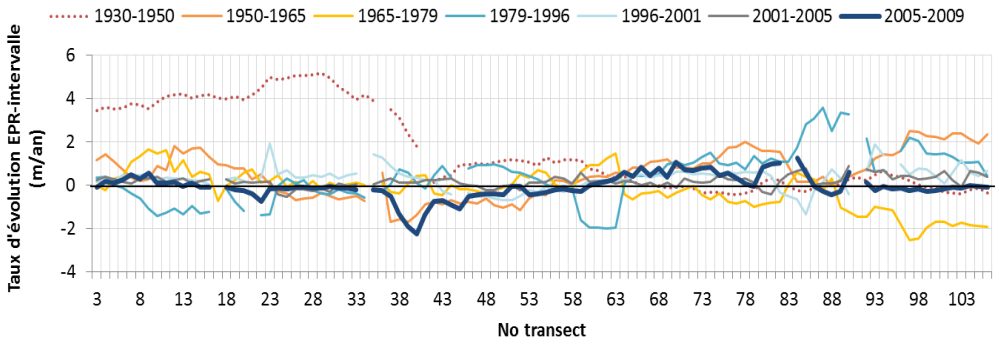


Figure 70. Taux d'évolution historique par intervalle, Sept-Îles

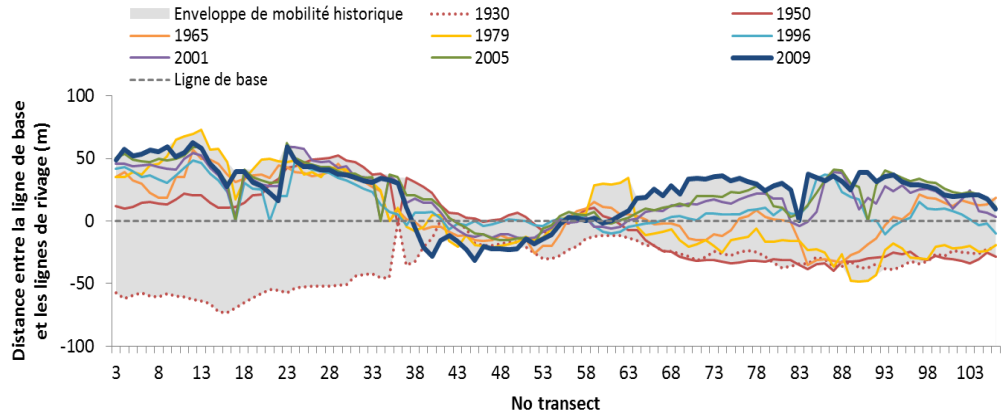


Figure 71. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Sept-Îles

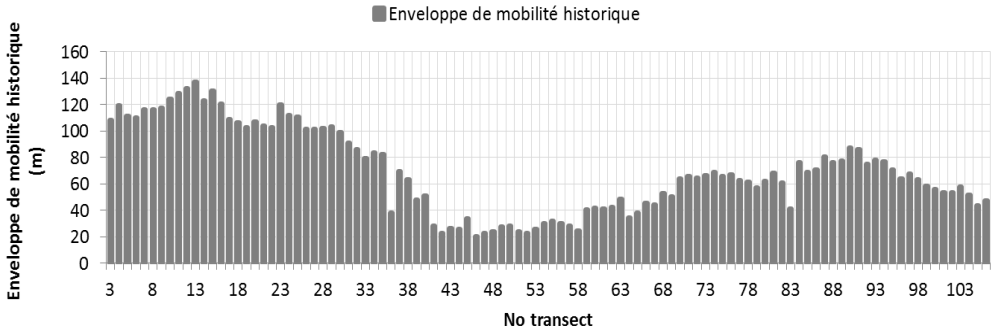


Figure 72. Enveloppe de mobilité historique, Sept-Îles



Figure 73. Développement urbain sur un territoire du domaine maritime de 1930, Sept-Îles

L'analyse par intervalle montre que c'est au cours de l'intervalle récent (2005-2009) que l'érosion affecte la plus grande proportion de côte. Plus exactement, c'est 65 % de la côte qui est alors affectée par l'érosion (figure 69). La vitesse de recul est parmi les plus rapides ayant été mesurées et atteint localement jusqu'à -2,25 m/an (transect 40, figure 70). La figure 74 présente l'évolution à cet endroit. Malgré les reculs durant la période 2005-2009, la position de la ligne de rivage la plus récente (2009) est à proximité de celles des années précédentes. Entre les transects 3 et 37 et entre les transects 64 à 106, la ligne de 2009 est généralement avancée ou près des lignes de rivage des années précédentes (figure 71). Entre les transects 38 à 51, la position récente de la ligne de rivage (2009) rejoint, ou se retrouve derrière, la position de 1930. Cette zone, pour laquelle l'évolution historique est près de zéro ou négative, est caractérisée par des enveloppes de mobilité historique plus faibles qu'ailleurs sur le site, soit généralement inférieures à 50 m (figure 72).

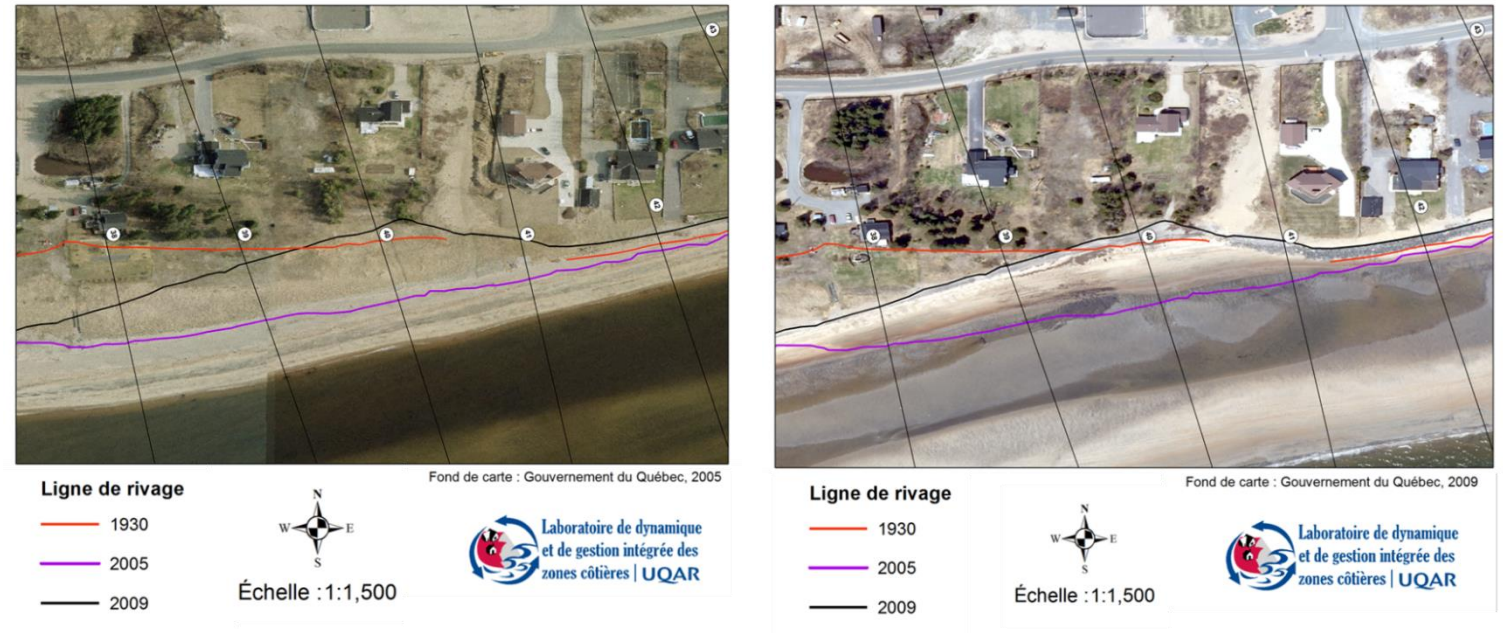
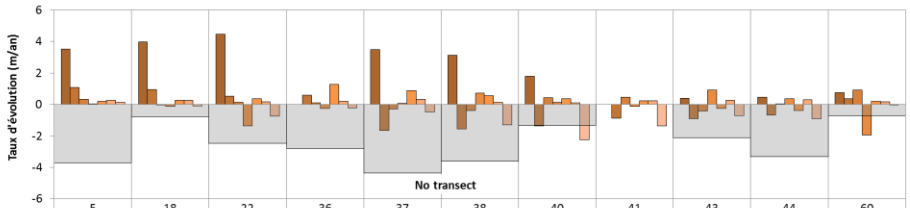


Figure 74. Recul majeur survenu près du transect 40 entre 2005 (gauche) et 2009 (droite)

Les valeurs de reculs mesurées *in situ* sont beaucoup plus sévères que ce qui a été mesuré pour les intervalles historiques (figure 75), et ce, en lien avec l'érosion observée en 2008-2009 et 2009-2010. Les reculs événementiels ont été de plus de 10 m (tableau 14). En raison de la proximité des habitations et des infrastructures dans ce secteur, il s'agit de reculs considérables. Il est probable que des reculs d'une intensité similaire aient déjà affecté la côte par le passé. Cependant, ces reculs événementiels n'ont vraisemblablement pas limité la progression du littoral. En ce sens, il est encore trop tôt pour affirmer avec certitude que les reculs très sévères mesurés récemment indiquent un changement de tendance dans l'évolution du site d'étude. En effet, des déplacements positifs ont été mesurés par la suite (figure 75), mais ceux-ci sont de faible amplitude (figure 76).



	5	18	22	36	37	38	40	41	43	44	60
1930-1950	3.52	4.00	4.48	0.00	3.48	3.15	1.81	0.00	0.39	0.46	0.76
1950-1965	1.09	0.95	0.53	0.60	-1.67	-1.57	-1.36	-0.87	-0.89	-0.69	0.38
1965-1979	0.33	-0.01	0.14	0.09	-0.29	-0.37	0.44	0.46	-0.43	0.00	0.93
1979-1996	0.01	-0.13	-1.36	-0.27	0.06	0.73	0.15	-0.13	0.92	0.37	-1.94
1996-2001	0.20	0.27	0.38	1.28	0.88	0.57	0.37	0.24	-0.26	-0.39	0.21
2001-2005	0.28	0.26	0.18	0.20	0.32	0.13	0.12	0.23	0.27	0.31	0.16
2005-2009	0.12	-0.09	-0.74	-0.23	-0.50	-1.30	-2.25	-1.36	-0.72	-0.89	-0.01
mmm_5ans	-3.72	-0.77	-2.46	-2.81	-4.35	-3.61	-1.33	0.00	-2.13	-3.31	-0.72
Année déb. mmm_5ans	2005	2012	2007	2007	2007	2007	2000	2001	2005	2001	2005

Figure 75. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Sept-Îles

Tableau 14. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Sept-Îles

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
SEP_29	0	0	0	0	0	an	an	an	an	an	an	an	an	an	na	na
SEP_32	-0.1	0	0	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	na	na
SEP_33	-1.2	-1.9	-0.05	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	na	na
SEP_34	0	0.75	0	0.75	0	0	0	0	0	-3.6	5.85	-1.8	10.1	3.45	2.75	0
SEP_35	-2.82														na	na
SEP_36	-5.2		rimp	-0.15											na	na
SEP_37	-2.28														na	na
SEP_38	-2.97														na	na
SEP_39	0	-4	-2.7												na	na
SEP_40	-2.14	-4.08	-2.3												na	na
SEP_41	-2.85	-0.75	-0.8	-2.9	-8.8										na	na
SEP_42	-2.39	-0.34	0	-3.3	-4.6										na	na
SEP_43	0	0	0	rimp	0										na	na
SEP_44	-0.23	0.97	0	0	0	0	0.6	-3	-12.48	nd	an	an	an	an	na	na
SEP_45	0	0	0.16	an	an	an	an	rimp	-5.94	-7.91	-0.55	-0.05	nd	rimp	0.3	0
SEP_60	na	na	na	na	na	na	na	imp	-3.8	-0.9	-0.2	-0.4	1.2	3	1.1	0.9
SEP_61	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.93	-13.79	-2.68	0	-1.4	0.4	nd	0
SEP_62	na	na	na	na	na	na	na	imp	-4.03	-4.8	-2.02	-0.4	0.95	0.5	-0.5	0
SEP_63	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	-7.82	-1.88	-0.15	0	1.2	1.75	rimp
SEP_64	na	na	na	na	na	na	na	imp	-7.77	rimp	rimp	0.14	-0.4	0.77	-0.47	-2.1
SEP_66	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	0

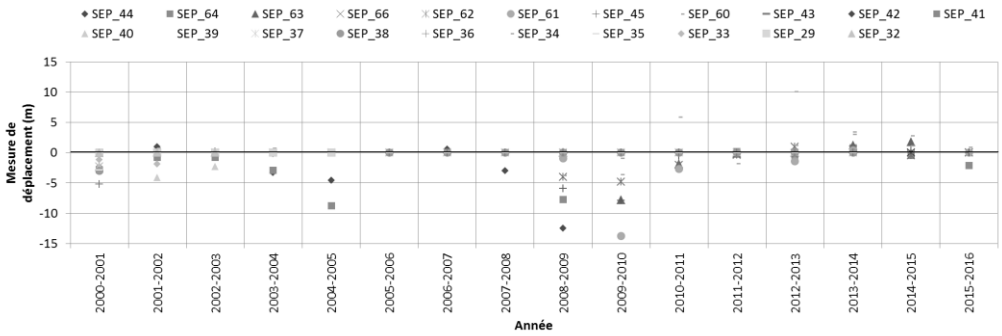


Figure 76. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Sept-Îles

Avec une évolution historique généralement positive et une ligne de rivage récente très avancée vers la mer par rapport aux positions antérieures, l'érosion observée (mesures *in situ*) est liée aux événements de tempête (reculs événementiels). Des reculs similaires aux reculs mesurés à partir des réseaux de stations de suivi du LDGIZC ont vraisemblablement dû se produire à l'occasion dans le passé, et ce, alors que la tendance évolutive de la côte était à l'accumulation. Les données actuelles ne permettent pas de conclure que la côte subit actuellement un changement de tendance. Cependant, les reculs événementiels très élevés (plus grand que 10 m) mesurés récemment ne sont pas compatibles avec la présence de résidences à proximité de la ligne de rivage, et ce, même si la tendance était encore à l'accumulation pour les prochaines décennies. Plusieurs bâtiments, rappelons-le, sont construits sur des terrains très récemment gagnés sur la mer. Bref, l'érosion sur ce site d'étude n'appartient pas à un cycle ; elle est plutôt événementielle sur une côte généralement en accumulation. Le tableau 15 résume les caractéristiques de ce site d'étude.

Tableau 15. Caractéristiques du site d'étude de Sept-Îles

Caractéristiques	Sept-Îles
Étendue latérale (approx.)	5000 m
Durée d'existence	Événementielle
Mode d'évolution historique	Évolution où l'accumulation est persistante, mais non linéaire
Vitesse de recul maximale, EPR-intervalle	-2,52 m/an 1965-1979, transect 97
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-4,35 m/an SEP-61, 2007-2011
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-13,79 m SEP-61, 2009-2010
Processus et causes si identifiés	Recul événementiel dû aux événements de tempête et à la mobilité des cordons sableux de bas estran
Sens de la dérive	Vers l'ouest
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	Événement de tempête/ponctuel
Solution(s) à évaluer	Non évaluée
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales (30 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2009)	Oui Habitations
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Habitations et rues
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001) Événementiel

2.3.9 Moisie 1

À l'échelle historique, Moisie 1 (figure 77 et figure 78, Moisie-Ouest – Moisie 1) connaît des taux d'évolution près de zéro ou alors positifs (figure 79). Seuls les transects 10 à 19 ont une évolution historique négative (figure 79).

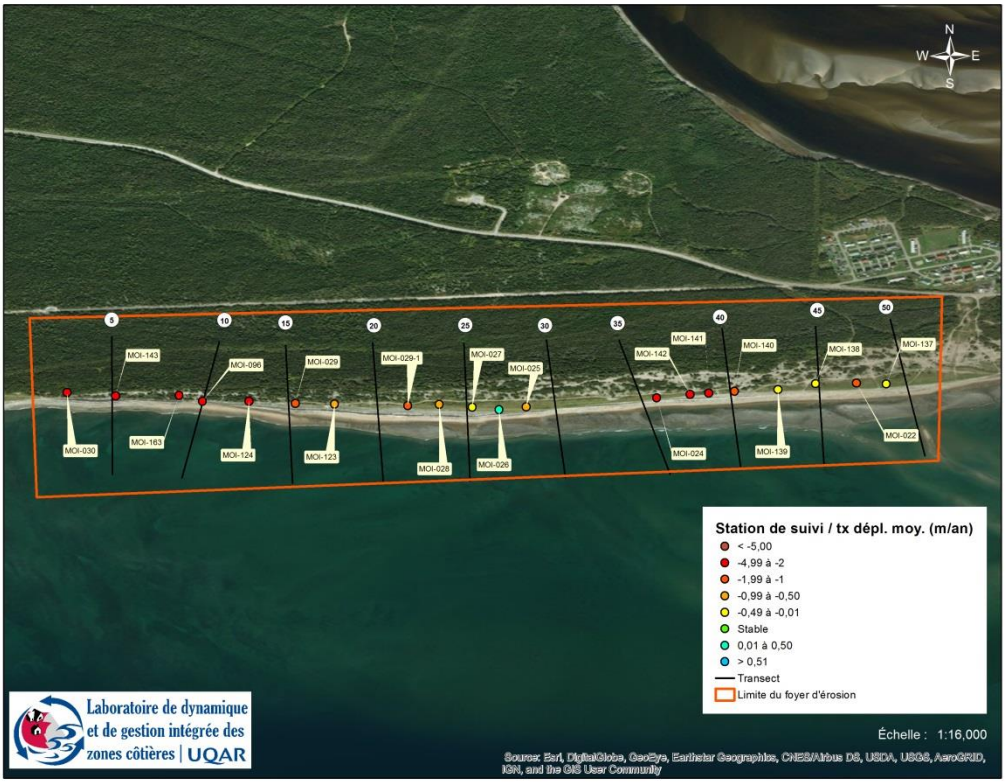


Figure 77. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Moisie 1



Figure 78. Localisation des sites de foyers d'érosion analysés dans le secteur de Moisie (Moisie-Ouest – Moisie 1, Moisie-Est – Moisie 2)

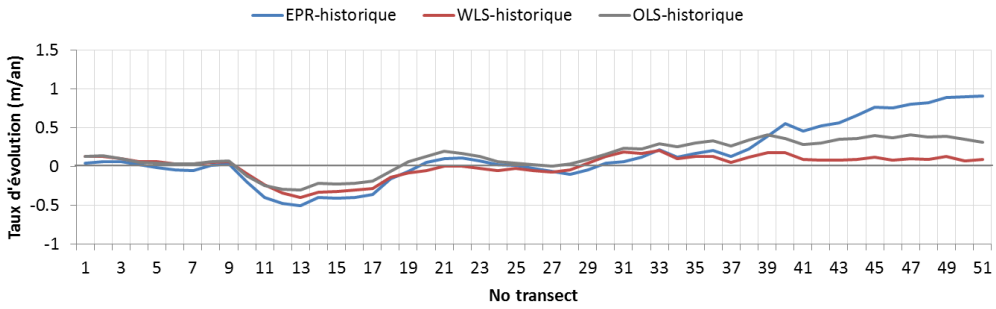


Figure 79. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Moisie 1

Toujours à l'échelle historique, on remarque qu'à partir du transect 30 environ, la mobilité de la ligne de rivage a été très importante. On observe que les enveloppes de mobilité historique s'élèvent progressivement pour atteindre 185 m (transect 50) alors qu'elles étaient inférieures à 40 m pour les transects précédents (figure 80 et figure 81). L'accolement d'un cordon sableux dans les années 1950-1960 devant ce segment est à l'origine de ces observations. Actuellement, la position la plus récente de la ligne de rivage (2009) s'avère généralement assez centrale par rapport aux positions des autres années (figure 80).

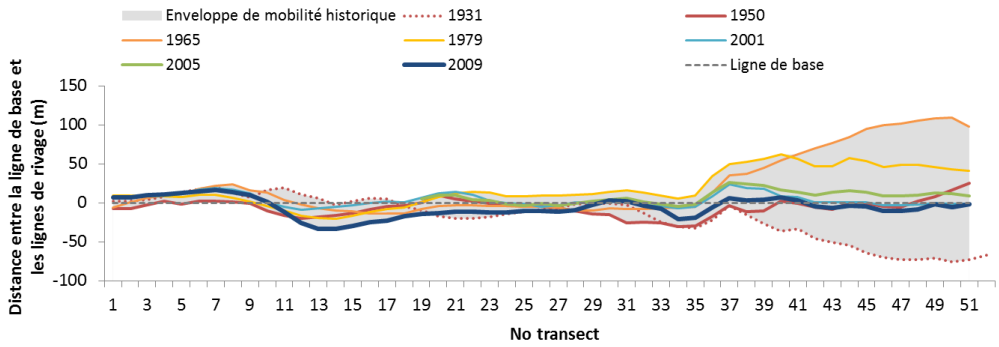


Figure 80. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Moisie 1

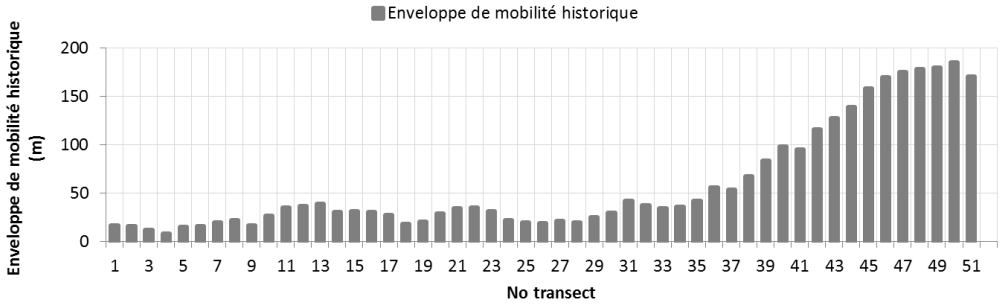


Figure 81. Enveloppe de mobilité historique, Moisie 1

L'analyse historique par intervalle pour le site de Moisie montre que le site d'étude est caractérisé par une alternance d'avancées et de reculs (figure 82 et figure 83). Cette alternance s'exprime spatialement entre des zones d'érosion et des zones d'accumulation pour un intervalle donné. L'alternance est aussi visible temporellement : pour une zone de transects donnée, il y a des périodes d'érosion et des périodes d'accumulation. Pour l'intervalle le plus récent (2005-2009) par contre (transects disponibles pour cet intervalle : 19 à 51), l'érosion a été généralisée à tout le site ou presque. Plus exactement, 92 % de la côte était alors en érosion.

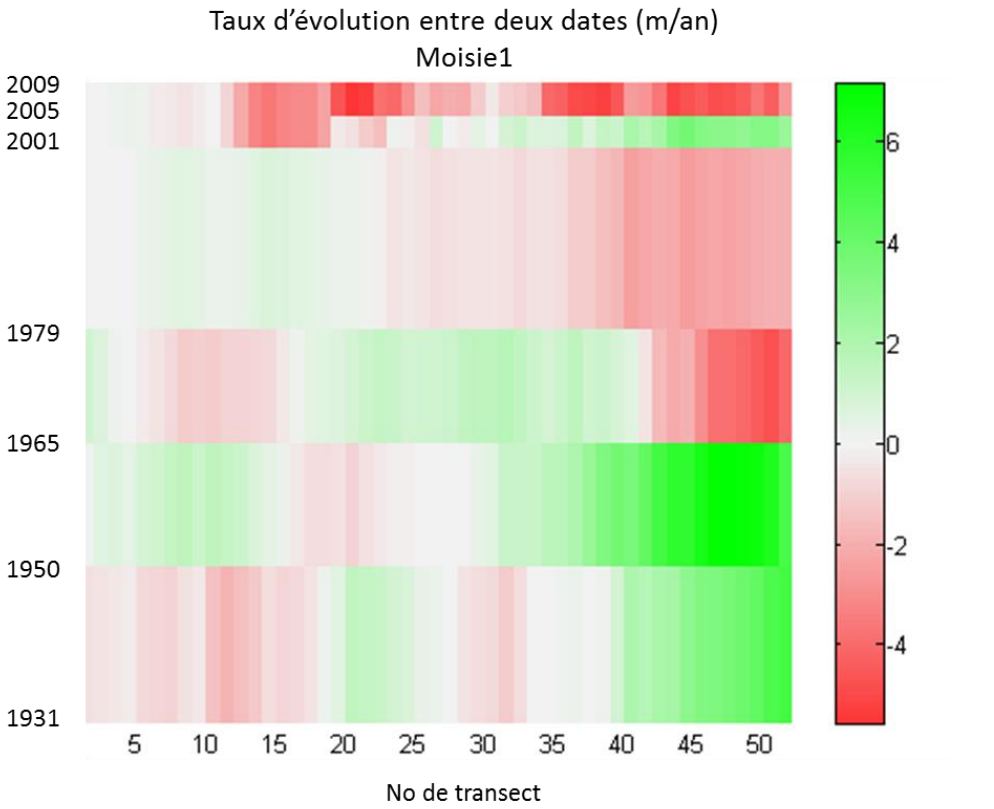


Figure 82. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles (EPR-intervalle), Moisie 1

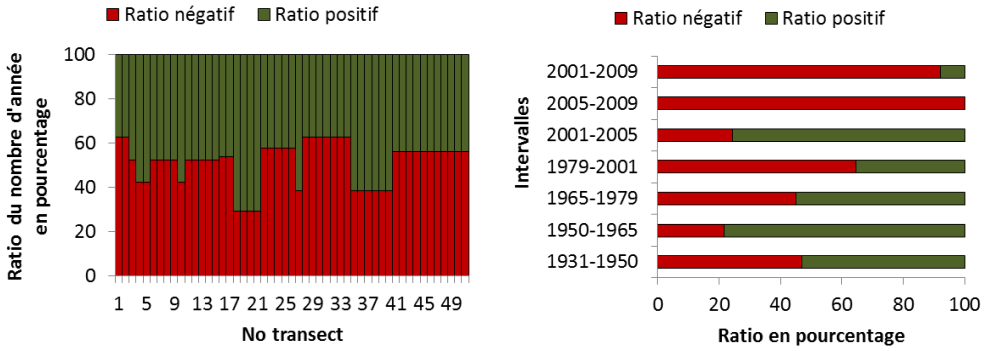


Figure 83. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Moisie 1

Les vitesses de déplacement de la ligne de rivage mesurées au cours des différents intervalles ont été particulièrement rapides. L'avancée de la ligne de rivage s'est effectuée à une vitesse allant jusqu'à 7,12 m/an (transect 47, 1950-1965) et le recul, à une vitesse allant jusqu'à -5,59 m/an (transect 20, 2005-2009) (figure 84). Les vitesses de recul négatives les plus importantes ont toutes été mesurées au cours des intervalles historiques les plus récents ou à partir de mesures *in situ* (moyennes mobiles 5 ans sur les stations de suivi) (figure 85). En d'autres mots, c'est généralement depuis les années 2000 que les vitesses de recul les plus importantes ont été observées.

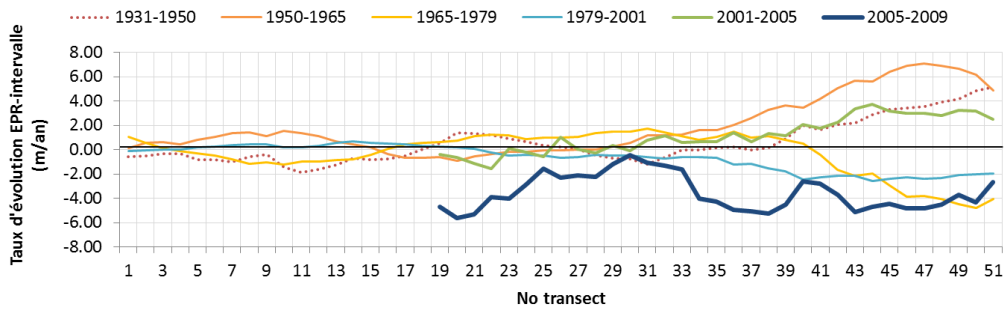
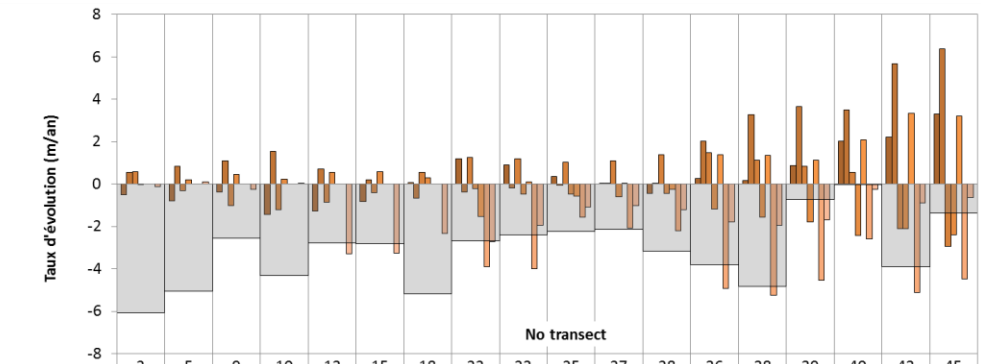


Figure 84. Taux d'évolution historique par intervalle, Moisie 1



No transect	2	5	9	10	13	15	18	22	23	25	27	28	36	38	39	40	43	45
1931-1950	-0.50	-0.79	-0.38	-1.42	-1.27	-0.84	0.08	1.20	0.91	0.35	0.04	-0.46	0.27	0.16	0.89	2.03	2.23	3.30
1950-1965	0.55	0.84	1.10	1.54	0.70	0.20	-0.66	-0.38	-0.19	-0.06	0.03	0.05	2.03	3.26	3.66	3.49	5.67	6.39
1965-1979	0.58	-0.30	-1.03	-1.20	-0.86	-0.42	0.55	1.27	1.21	1.02	1.10	1.39	1.50	1.13	0.85	0.54	-2.12	-2.95
1979-2001	-0.03	0.21	0.46	0.23	0.57	0.60	0.31	-0.21	-0.46	-0.47	-0.59	-0.43	-1.18	-1.55	-1.78	-2.42	-2.12	-2.39
2001-2005								-1.54	0.12	-0.58	0.04	-0.25	1.38	1.34	1.13	2.08	3.35	3.22
2005-2009								-3.89	-4.01	-1.58	-2.08	-2.20	-4.93	-5.24	-4.53	-2.58	-5.10	-4.47
2001-2009	-0.12	0.10	-0.25	0.03	-3.29	-3.25	-2.32	-2.71	-1.95	-1.08	-1.02	-1.22	-1.77	-1.95	-1.70	-0.25	-0.88	-0.63
mmm_5ans	-6.07	-5.05	-2.54	-4.33	-2.79	-2.83	-5.20	-2.67	-2.39	-2.24	-2.13	-3.15	-3.81	-4.83	-0.74	-0.03	-3.90	-1.38
mmm_année début	2001	2001	2007	2007	2006	2007	2002	2000	2000	2000	2000	2007	2010	2008	2009	2011	2006	2008

Figure 85. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Moisie 1

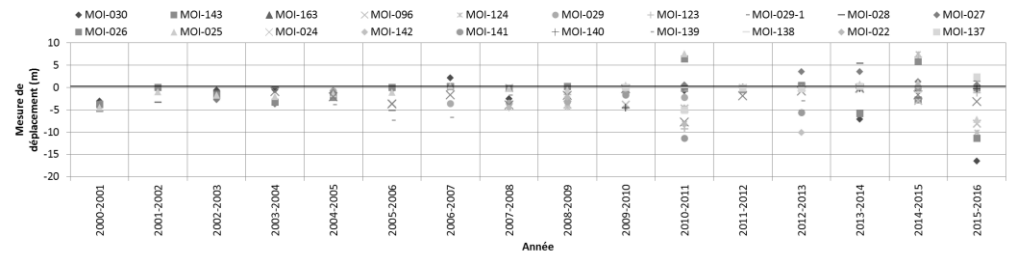


Figure 86. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Moisie 1

Après avoir été clairement caractérisée par des cycles d'avancées et de reculs (tant spatialement que temporellement), l'évolution récente pointe vers un changement : l'érosion y est de plus en plus répandue et montre des signes d'accélération. Néanmoins, des déplacements positifs (accumulation) ont aussi été mesurés au cours des années récentes à l'aide du réseau de suivi du LDGIZC (figure 86), signe que l'accumulation est encore possible. Ainsi, il est encore difficile d'affirmer hors de tout doute que le mode d'évolution du site soit passé de cyclique à une tendance générale vers l'érosion (mais non linéaire), d'autant plus qu'entre 2001 et 2005, 75 % du littoral était en progression vers la mer (accumulation). Le tableau 17 présente un résumé des caractéristiques du site Moisie 1.

Tableau 16. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Moisie 1

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
MOI-030	-3.1	-0.3	-0.7	-0.5	-0.8	-0.1	2.13	-2.58	0.18	0.13	-0.76	-0.04	rimp	-7.1	-0.61	-16.54
MOI-143	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.07	-0.18	-0.2	rimp	-5.85	-2.79	-11.36
MOI-163	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	imp
MOI-096	na	na	na	na	imp	-3.6	0	-0.1	-3.89	-3.89	-4.67	-0.15	0	-0.3	-2.95	-8.15
MOI-124	na	na	na	na	na	na	na	imp	-4.33	-4.64	-8.13	-0.2	0.2	0	7.6	-10
MOI-029	na	na	na	imp	-0.85	-0.19	-3.63	-3.58	-3.19	-1.28	-2.28	0	0	0	-0.1	rimp
MOI-123	na	na	na	na	na	na	na	imp	-1.6	-0.36	-9.29	-0.05	-0.2	0	6.8	-1.2
MOI-029-1	-3.1	0	rimp	-2.9	-3.8	-7.34	-6.75	-1.71	rimp	0	-0.6	0	0.1	0	0.15	0.35
MOI-028	-5.3	-3.34	-0.9	rimp	-1.15	-5.1	0.82	-0.27	0.1	-0.7	-0.3	0	1	5.45	-2.39	1.44
MOI-027	-4.2	0	-2.82	-3.73	-1.2	-0.28	0.13	-0.2	0.1	-0.28	0.47	0	3.55	3.55	1.3	0.55
MOI-026	-3.8	0	-1.86	-3.34	-2.2	0	0.18	-0.23	0.23	-0.03	6.35	-0.5	0.2	0	5.78	-0.08
MOI-025	-4.5	-1	-1.75	-1.99	-1.4	-1.08	0.34	-0.24	-0.59	0.49	7.58	-0.3	-0.2	0.76	1	-7.12
MOI-024	na	na	imp	-1	-2.1	-3.75	-1.69	-3.96	-1.8	-0.35	-7.75	-1.9	-0.9	-0.2	-1.7	-3.25
MOI-142	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.18	-4.62	-0.2	-10.1	-0.32	rimp	rimp
MOI-141	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-1.69	-11.37	-0.59	-5.65	0	0	-0.2
MOI-140	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-4.56	nd	nd	rimp	-0.2	rimp	-0.3
MOI-139	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.09	rimp	-0.25	-2.95	0.35	0	1.35
MOI-138	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	0	-0.05	0.35	0.62	-1.04	rimp
MOI-022	na	na	na	na	na	na	imp	-4.6	-2.3	-0.35	-8.35	-0.2	-0.2	0.3	0.33	2.07
MOI-137	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	-5.1	-0.1	-0.3	0.19	rimp	2.35

Tableau 17. Caractéristiques du site d'étude de Moisie 1

Caractéristiques	Moisie 1
Étendue latérale (approx.)	2600 m
Durée d'existence	Pluriannuelle
Mode d'évolution historique	Évolution cyclique où les inversions entre les périodes d'érosion et d'accumulation sont évidentes
Vitesse de recul maximale, EPR-intervalle	-5,59 m/an 2005-2009, transect 20
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-6,07 m/an 2011-2016, MOI-030
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-16,54 m 2015-2016, MOI-030
Processus et causes si identifiés	S'inscrit dans la dynamique naturelle d'évolution de la côte, migration latérale de cordons de bas estran explique une évolution en dents de scie
Sens de la dérive	Vers l'ouest
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	Événement de tempête/ponctuel
Solution(s) à évaluer	Non évaluée
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales (30 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2010)	Aucune infrastructure à proximité du littoral
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Aucune infrastructure à proximité du littoral
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001)

2.3.10 Moisie 2

Les données pour l'évolution de la ligne de rivage pour le site de Moisie 2 (figure 87 et figure 78, Moisie-Est – Moisie 2) disponibles pour l'analyse se sont avérées problématiques. La présence de sable noir devant les terrasses de plage ne permet pas de bien positionner la limite de végétation dense sur les photographies en noir et blanc. Les lignes disponibles pour 1930 et 2006 suivaient la limite des arbres. Ce sont les seules années que nous avons retenues, et ce, même si la limite des arbres n'est pas l'indicateur habituellement retenu par le LDGIZC. Dans ce cas, cette limite permet d'observer le recul de la côte entre ces deux années. En n'ayant que deux lignes, seul le calcul de l'EPR historique est possible. Le taux moyen (EPR-historique) pour ce site varie entre -0,56 m/an et 0,10 m/an et est d'en moyenne -0,25 m/an (figure 88).



Figure 87. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Moisie 2

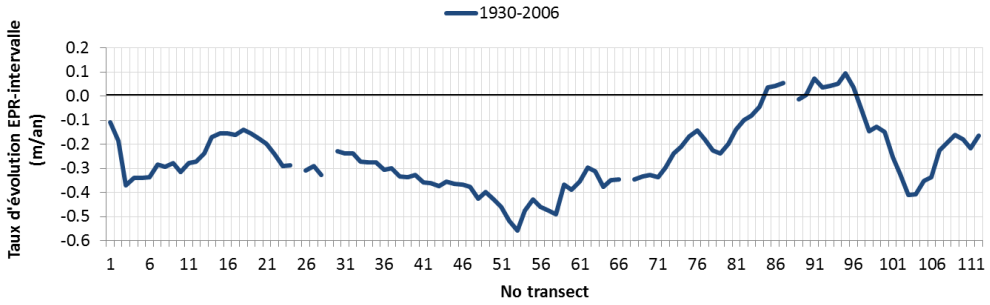


Figure 88. Taux d'évolution historique par intervalle, Moisie 2 (un seul intervalle disponible)

Le taux d'évolution a été essentiellement négatif à l'exception de quelques valeurs positives entre les transects 85 et 96 qui sont toutefois plutôt faibles, atteignant tout au plus 0,10 m/an (figures 88, 89 et 90). La vitesse d'évolution mesurée correspond à un déplacement négatif de la ligne de rivage (indicateur : limite des arbres) moyen de 19,7 m et d'au plus 42,27 m (figure 91). Ce déplacement correspond aussi à l'enveloppe de mobilité historique (figure 91 et figure 92).

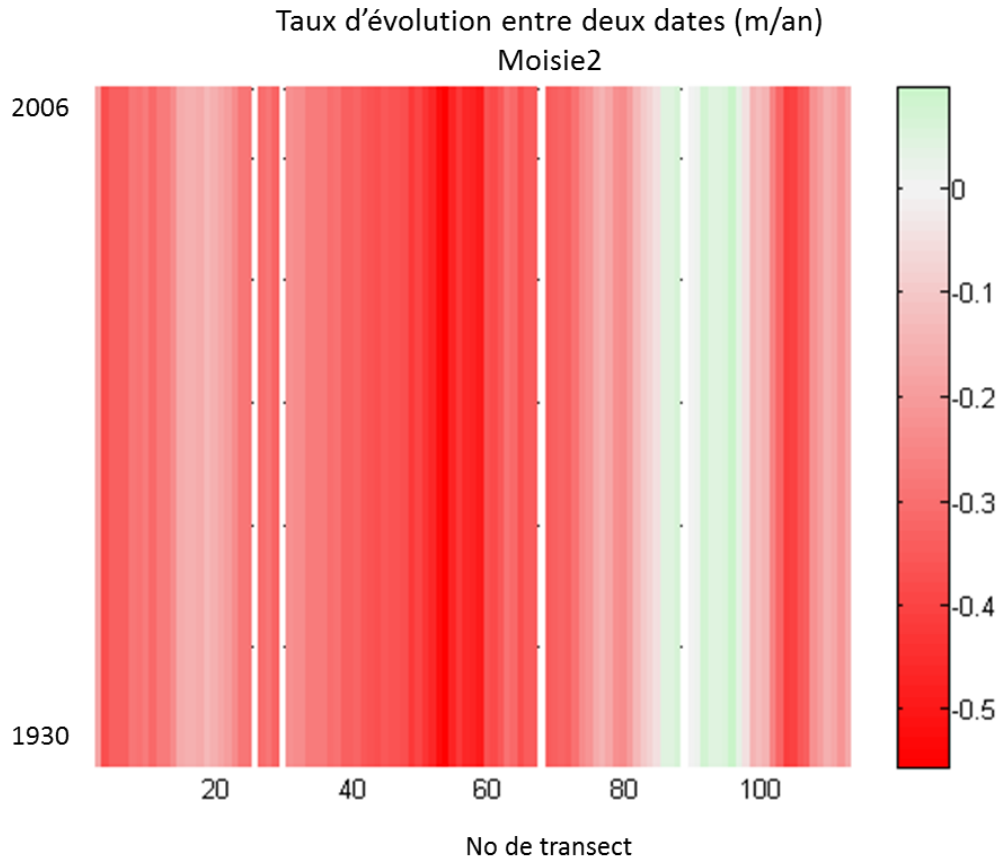


Figure 89. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles (EPR-intervalle), Moisie 2

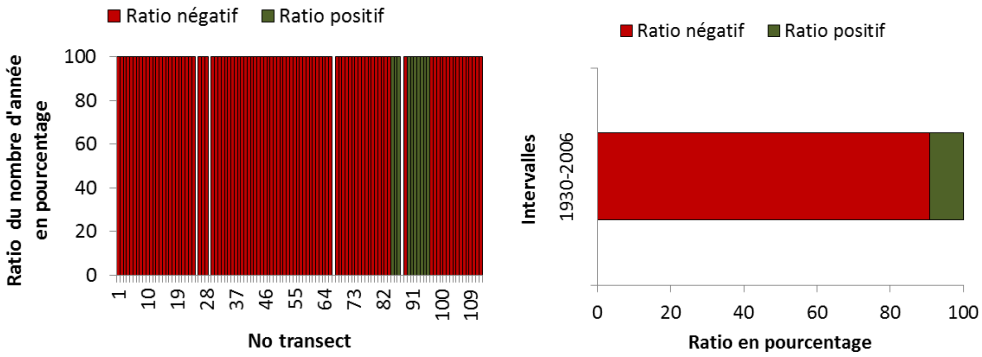


Figure 90. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Moisie 2

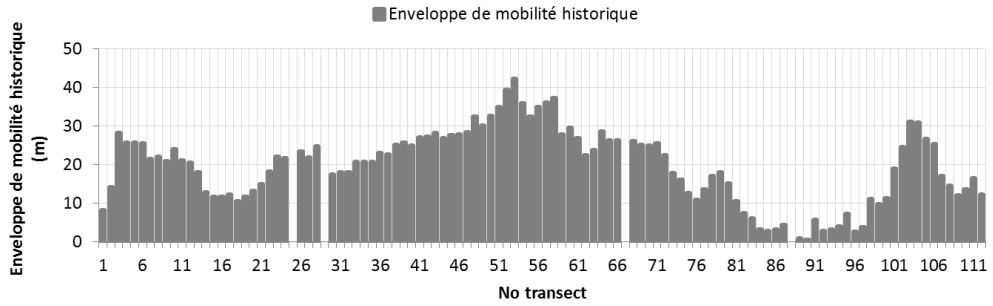


Figure 91. Enveloppe de mobilité historique, Moisie 2

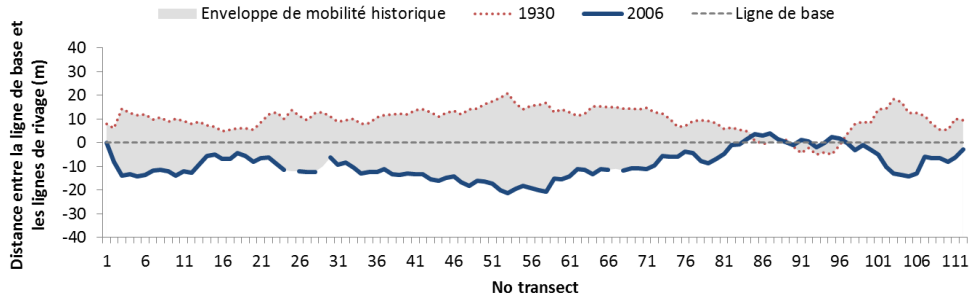
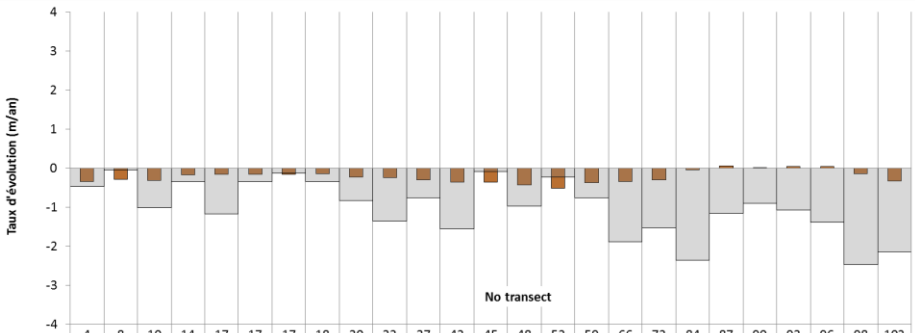


Figure 92. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Moisie 2

Les mesures du réseau de suivi ne permettent pas vraiment d'observer de changement de tendance, d'accélération ou de ralentissement de l'érosion puisque la comparaison entre des vitesses d'évolution mesurées sur 76 ans (intervalle 1930-2006) et sur 5 ans (moyennes mobiles sur les déplacements mesurés aux stations) n'est pas adéquate. Le nombre d'années sur lequel les taux d'évolution sont calculés est trop différent. La figure 93 présente néanmoins la comparaison des vitesses d'évolution historiques et récentes.



	4	8	10	14	17	17	17	18	30	32	37	42	45	48	52	59	66	72	84	87	90	93	96	98	102
1930-2006	-0.34	-0.29	-0.32	-0.17	-0.16	-0.16	-0.16	-0.14	-0.23	-0.24	-0.30	-0.36	-0.36	-0.43	-0.52	-0.37	-0.35	-0.30	-0.04	0.06	0.01	0.04	0.04	-0.15	-0.32
mmm_5ans	-0.48	-0.04	-1.02	-0.34	-1.18	-0.35	-0.13	-0.35	-0.83	-1.36	-0.75	-1.56	-0.09	-0.97	-0.23	-0.75	-1.89	-1.53	-2.35	-1.16	-0.90	-1.07	-1.38	-2.48	-2.15
Année déb. mmm_5ans	2003	2007	2007	2011	2003	2003	2009	2007	2001	2008	2007	2006	2007	2001	2003	2007	2006	2002	2007	2006	2008	2011	2006	2007	2007

Figure 93. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Moisie 2

Les mesures du réseau de suivi montrent que l'évolution n'est probablement pas seulement négative comme l'indiquent les résultats de l'intervalle 1930-2006 puisque des déplacements positifs ont aussi été mesurés (figure 94). Le tableau 18 montre que le déplacement positif maximal a été de l'ordre de 6,91 m entre 2014-2015 à la station FMOI-06. Cependant, le site subit vraisemblablement une tendance à l'érosion. À ce titre, le recul événementiel le plus sévère ayant pu être mesuré a été de l'ordre de -7,74 m (station FMOI-04 à proximité du transect 42). Bref, les vitesses de recul récentes (mesures *in situ*) ont été rapides mais les données disponibles ne permettent pas de les mettre en perspective et d'évaluer si la tendance à l'érosion est en accélération. Le tableau 19 présente les caractéristiques de ce site.

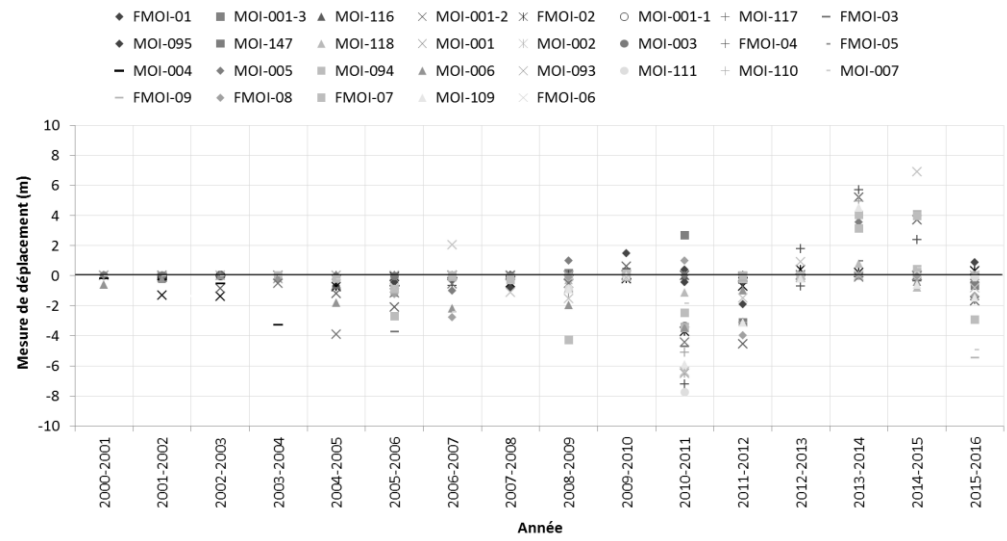


Figure 94. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Moisie 2

Tableau 18. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Moisie 2

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
FMOI-01	na	na	na	imp	-0.7	-0.1	-0.32	-0.78	0	1.5	0.4	-1.9	nd	rimp	0.11	0.89
MOI-001-3	imp	-0.1	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	nd	rimp
MOI-116	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	0	0	-0.15	0.15	0	0	0
MOI-001-2	imp	-1.3	-1.4	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	nd	rimp
FMOI-02	na	na	na	imp	-0.75	-0.05	0	-0.47	0	-0.23	-3.7	-0.7	0.4	0.2	0	0.3
MOI-001-1	imp	-0.1	0	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	an	nd	rimp
MOI-117	na	na	na	na	na	na	na	imp	0	0	rimp	0	-0.7	nd	-0.38	-0.27
MOI-173	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
FMOI-03	na	na	na	imp	-0.8	-3.73	0	-0.17	0.15	0.45	-4.7	0	0	0	rimp	0
MOI-095	na	na	imp	-0.3	-0.2	-0.42	0	-0.83	0	-0.03	-0.42	-0.1	an	an	nd	rimp
MOI-147	na	na	na	na	na	na	na	imp	0.15	-0.1	2.7	-3.1	0	rimp	nd	-0.65
MOI-118	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.3	0	-1.1	0	-0.1	0.8	-0.77	rimp
MOI-001	0	0	-0.84	0	-1.2	-2.1	0	0	0	0.6	0	-4.55	0.05	5.2	3.7	-1.7
MOI-002	0	-0.02	0	-0.22	0	0	0	-0.03	0	0	-6.5	-0.15	-0.15	0	0	0
MOI-003	0	0	0	0	-0.2	-0.02	-0.11	0	-0.12	-0.02	-3.33	-0.3	0	0	-0.07	0
FMOI-04	na	na	na	na	imp	-1.12	-0.65	0	0.07	0.04	-7.24	-0.5	1.8	5.7	2.37	-1.62
FMOI-05	na	na	na	na	imp	0	0	0	-0.15	0	rimp	-0.2	rimp	0.98	0	rimp
MOI-004	-0.2	-0.27	-0.56	-3.29	0	-0.72	-0.16	-0.1	0	-0.24	rimp	-0.18	0	nd	an	na
MOI-005	0	0	0	0	0	0	-1	-0.13	1	0	0.02	0	-0.1	3.55	-0.06	-0.14
MOI-094	na	na	imp	0	-0.17	-2.71	0	-0.1	-0.1	0.14	-3.51	-0.2	0	3.15	0.41	0
MOI-006	-0.6	-0.2	0	-0.15	-1.8	-1.1	-2.16	rimp	-1.95	0	-3.45	-0.95	0	0	-0.4	0
MOI-093	na	na	imp	-0.5	-3.9	-1.14	-0.56	0	-0.5	0	-4.45	-0.05	0	-0.11	-0.03	-0.16
MOI-172	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	
MOI-111	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.85	-0.06	-7.74	rimp	nd	rimp	0	-0.1
MOI-110	na	na	na	na	na	na	na	imp	-1.15	-0.02	-5.13	-3.1	0	4.95	an	na
MOI-007	0	0	0	0	-0.2	-0.72	-2.39	-0.19	-0.2	rimp	-1.85	-0.03	-0.03	3.9	0.54	-4.94
FMOI-09	na	na	na	na	imp	-1.07	-0.31	0.08	-1.03	0.03	-3.2	-0.3	0	0	4.3	-5.45
FMOI-08	na	na	na	na	imp	-1.24	-2.76	-0.1	-0.1	0.1	1	-4	0	0	-0.02	-1.33
FMOI-07	na	na	na	na	imp	-0.88	0	-0.27	-4.3	0.11	-2.46	0	0	4.05	3.97	-2.92
MOI-109	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.9	0	-5.9	-3.1	-0.17	4.54	-0.6	-1.45
FMOI-06	na	na	na	na	imp	-0.83	2.06	-1.13	-1.55	-0.15	-6.4	-1.5	0.9	0	6.91	-0.81

Tableau 19. Caractéristiques du site d'étude de Moisie 2

Caractéristiques	Moisie 2
Étendue latérale (approx.)	5700 m
Durée d'existence	Non disponible
Mode d'évolution historique	Non disponible
Vitesse de recul maximale, EPR-intervalle	-4,30 m/an 1996-2001, transect 92
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-2,48 m/an 2007-2012, MOI-109
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-7,74 m 2010-2011, MOI-111
Processus et causes si identifiés	Non disponible
Sens de la dérive	Vers le sud-ouest
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	Non évaluée
Solution(s) à évaluer	Non évaluée
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide des vitesses de recul maximales (30 m à partir de la position de la ligne de rivage la plus récente, 2010)	Oui Habitations
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui Habitations
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Aucun équivalent dans Kraus et Galgano (2001)

2.3.11 Longue-Pointe-de-Mingan 1

L'analyse historique du foyer d'érosion de Longue-Pointe-de-Mingan 1 (figure 95 et figure 96, Longue-Pointe-de-Mingan Ouest – Longue-Pointe-de-Mingan 1) montre que la côte subit un recul variant entre -1,86 m/an et -0,08 m/an (EPR-historique) (figure 97).

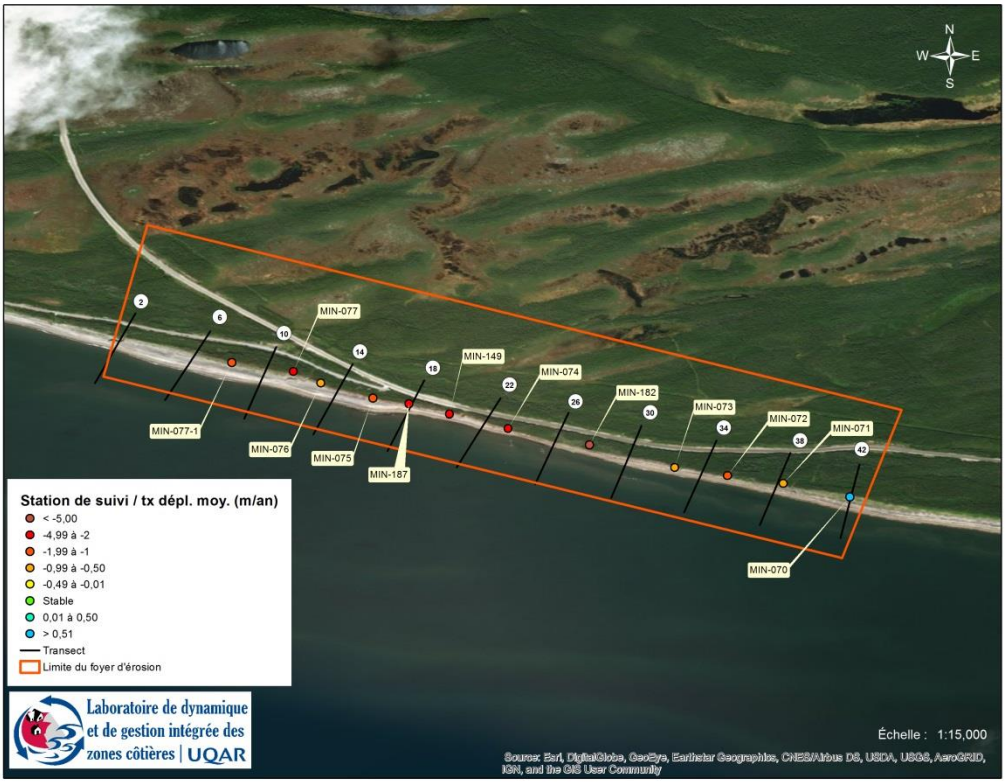


Figure 95. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Longue-Pointe-de-Mingan 1

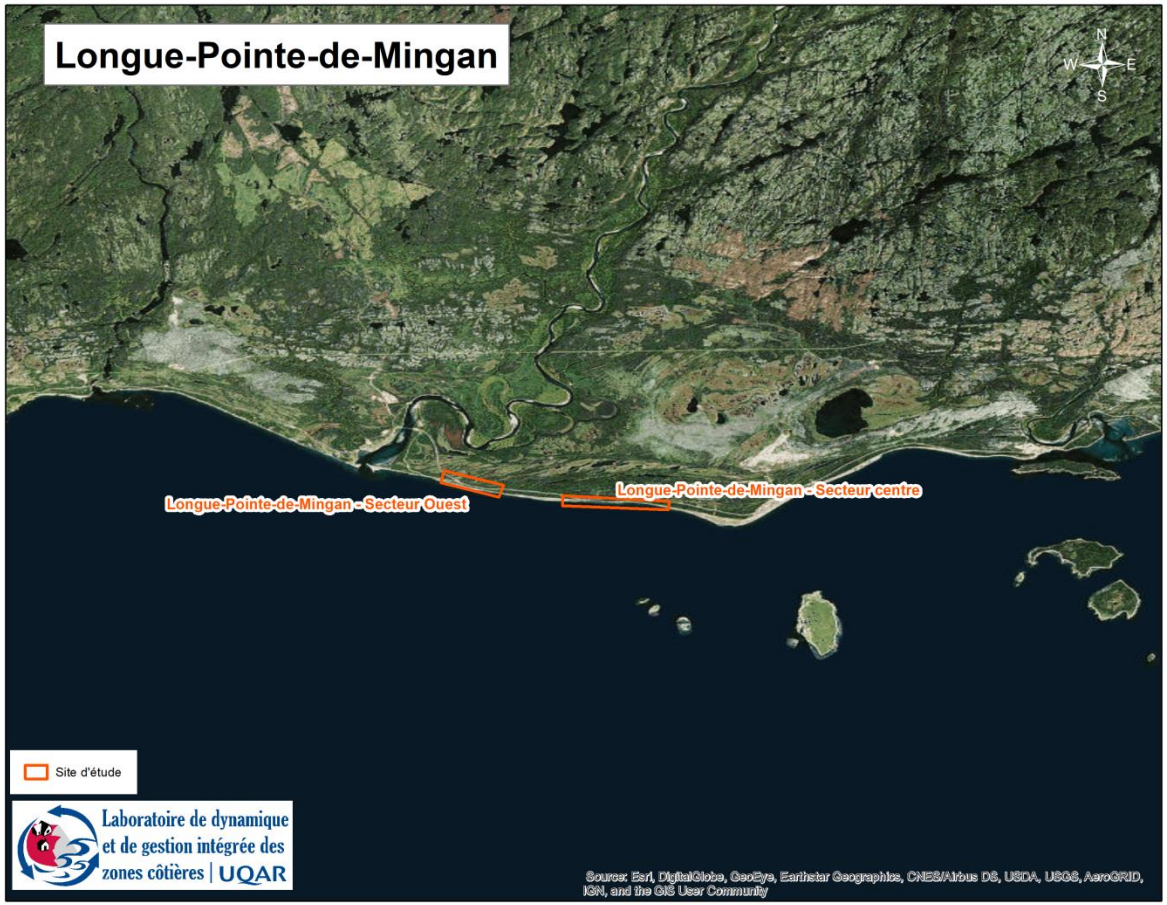


Figure 96. Localisation des sites de foyers d'érosion analysés dans le secteur de Longue-Pointe-de-Mingan (Longue-Pointe-de-Mingan-Ouest – Longue-Pointe-de-Mingan 1, Longue-Pointe-de-Mingan-Centre – Longue-Pointe-de-Mingan 2)

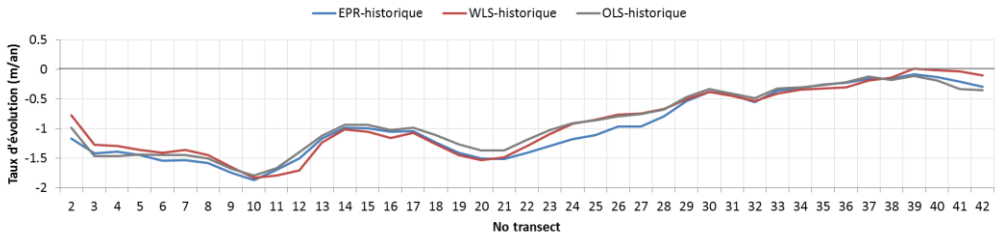


Figure 97. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Longue-Pointe-de-Mingan 1

L'évolution historique n'a pas été exclusivement négative pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan 1. Sur les figures 98 et 99, on observe, pour la majorité des transects, qu'il y a eu au moins un intervalle durant lequel la côte était en accumulation et, dans la plupart des cas, l'accumulation n'a pas perduré sur plus d'un intervalle continu. On remarque également une période d'accumulation généralisée pour les transects 23 à 40 au cours de l'intervalle 1967-1976 de même que pour les transects 36 à 42 pour l'intervalle 1976-1983. Néanmoins, l'érosion domine dans l'évolution de ce site (figure 100). En effet, grâce à l'analyse par intervalle, on constate que l'érosion est l'évolution dominante pour tous les transects et pour tous les intervalles (figure 99). C'est durant l'intervalle 2009-2014 que les taux d'érosion ont été les plus sévères. Plus exactement, le taux d'érosion (EPR-intervalle) le plus sévère y a été de -6,85 m/an pour le transect 25.

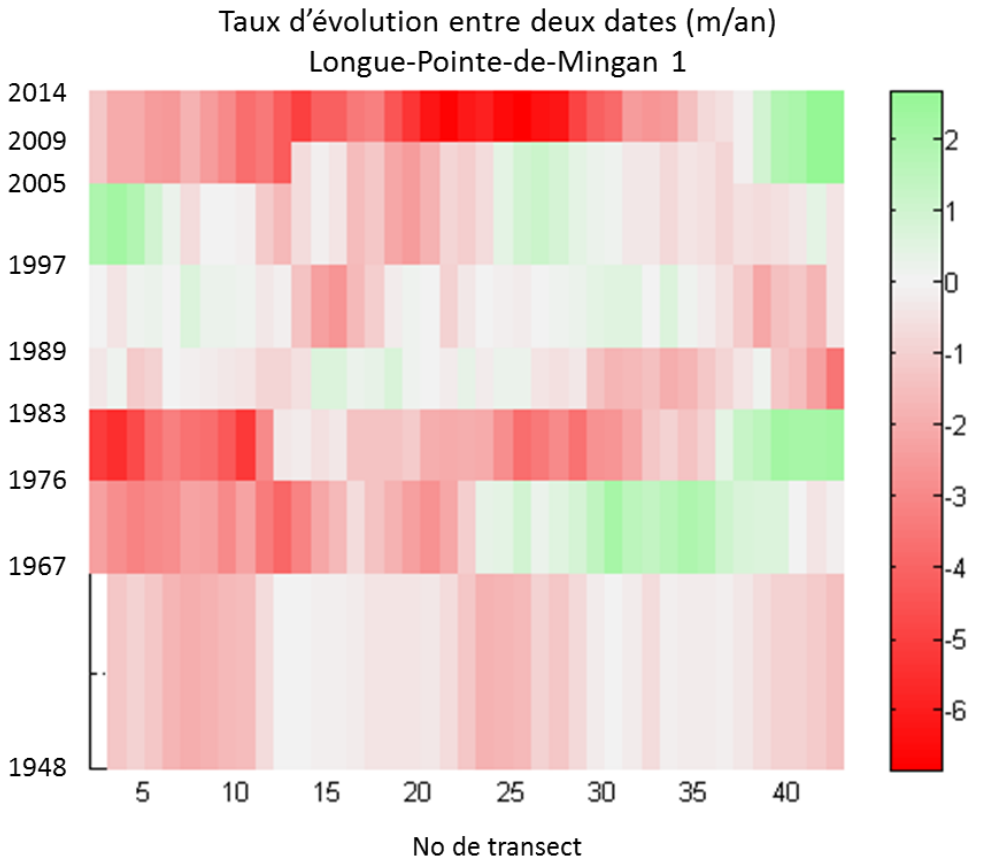


Figure 98. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles, Longue-Pointe-de-Mingan 1

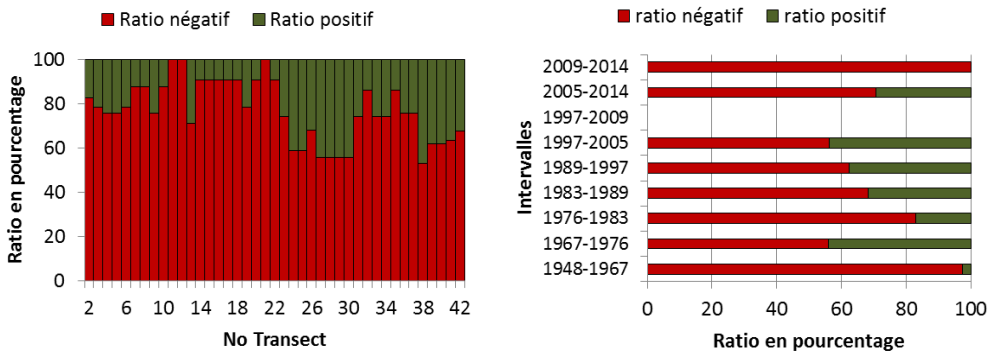


Figure 99. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Longue-Pointe-de-Mingan 1

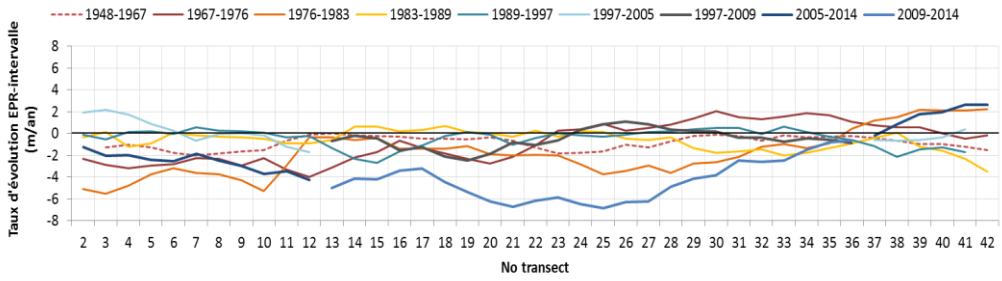


Figure 100. Taux d'évolution historique par intervalle, Longue-Pointe-de-Mingan 1

Entre les transects 2 et 28, l'évolution entre la position la plus ancienne (1948) et la plus récente (2014) s'est produite presque exclusivement par recul et représente un déplacement de la ligne de rivage négatif moyen de 86 m et allant jusqu'à un maximum de 123 m (figures 01 et 02). On observe également que les déplacements sont de moins en moins importants en progressant vers l'est (vers les numéros de transects les plus élevés).

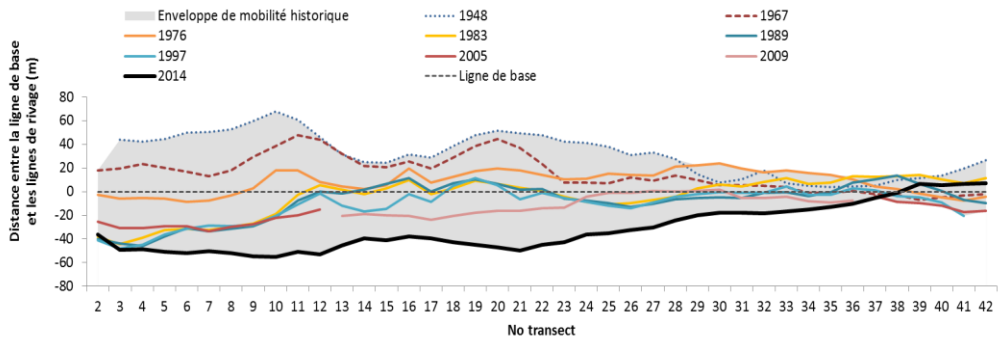


Figure 101. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Longue-Pointe-de-Mingan 1

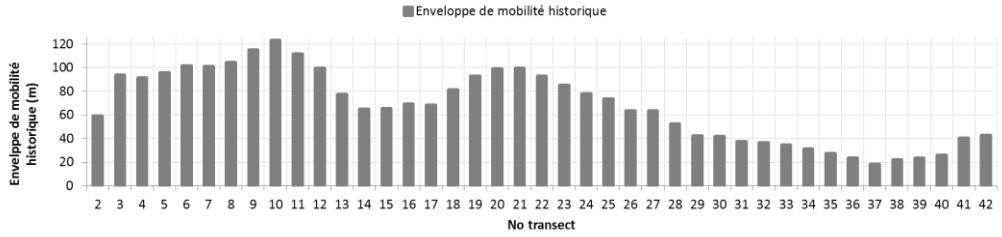


Figure 102. Enveloppe de mobilité historique, Longue-Pointe-de-Mingan 1

Les mesures de déplacement (station de suivi) indiquent que l'érosion est généralisée entre 2000 et 2016. En effet, on observe que des reculs sont mesurés pour presque toutes les années et que les déplacements positifs (accumulation) n'ont été que ponctuels et exclusivement observés à l'extrémité est (transect 38 à 42 pour les stations MIN-070 et MIN-071) (figure 103 et tableau 20).

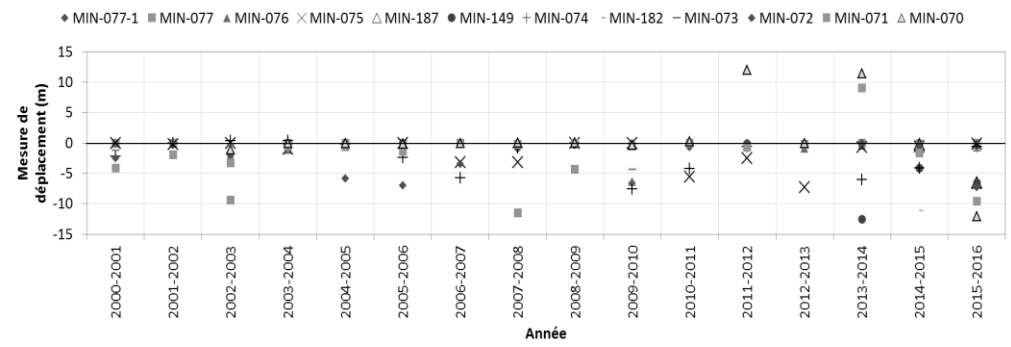


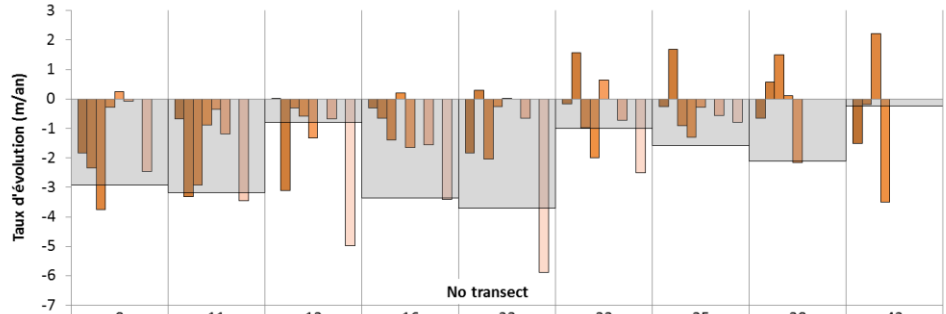
Figure 103. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan 1

La figure 104 montre que la comparaison ponctuelle (transect-station de suivi) entre les taux d'évolution EPR-intervalle et les mmm_5ans des stations de suivi indique que le recul de la côte au cours d'un intervalle historique a déjà été supérieur pour 8 des 9 stations localisées à l'intérieur des limites du site. En d'autres mots, on comprend que ce foyer d'érosion a déjà enregistré des vitesses de recul supérieures à la période récente (selon les données des mesures *in situ*) au cours des différents intervalles historiques. Ce constat

indique que la vitesse de recul de la côte pourrait potentiellement être, pour ce foyer d'érosion, similaire ou encore plus rapide que ce qui est actuellement mesuré à partir des stations de suivi.

Tableau 20. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
MIN-077-	na	na	imp	-0.17	-5.86	-7	0	-1	0	-6.6	-0.7	-0.5	0	-0.2	-0.37	-0.03
MIN-077	-0.07	0	-9.38	0	0	0	0	-11.47	-4.38	nd	an	an	rimp	0	-0.11	-0.09
MIN-076	0	-0.17	-2.1	-1.1	-0.6	-0.05	0	nd	-0.18	-6.35	rimp	0	-0.9	-0.45	rimp	-0.35
MIN-075	0	-0.27	0	-1	rimp	0	-3.24	-3.24	0	-0.05	-5.63	-2.5	-7.35	-0.7	-0.64	-0.16
MIN-187	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.22	-6.55
MIN-149	na	na	na	na	na	na	na	imp	-0.27	-0.43	0	-0.1	rimp	-12.55	-4.13	-6.57
MIN-074	-2.27	0	0.3	0.3	-0.2	-2.4	-5.77	-0.85	0	-7.62	-4.26	-0.66	rimp	-6.05	-4.19	-0.66
MIN-182	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	imp	-11.1	0
MIN-073	-1.22	0	-0.2	-0.45	-0.15	0	0	-0.68	0	-4.32	rimp	0	0	0	0	-1.25
MIN-072	-2.57	rimp	-2.1	-0.1	-0.05	0	-3.5	0.05	0	-0.1	0	0	0	0	-0.59	-7.31
MIN-071	-4.17	-1.95	-3.28	-0.6	-0.55	-1.4	0	-0.2	0	-0.55	0	-0.75	-0.25	9.05	-1.66	-9.59
MIN-070	na	imp	-1.07	0	0	-0.1	0	0.05	0.05	-0.35	0.22	12.03	0	11.45	nd	-12.1



	8	11	13	16	23	33	35	38	42
1948-1967	-1.83	-0.67	0.02	-0.31	-1.83	-0.16	-0.26	-0.66	-1.51
1967-1976	-2.33	-3.31	-3.10	-0.65	0.30	1.56	1.69	0.58	-0.19
1976-1983	-3.76	-2.92	-0.32	-1.40	-2.04	-0.98	-0.92	1.50	2.22
1983-1989	-0.28	-0.89	-0.59	0.21	-0.27	-1.99	-1.30	0.10	-3.51
1989-1997	0.25	-0.35	-1.32	-1.66	0.02	0.65	-0.27	-2.15	
1997-2005	-0.07	-1.19							
1997-2009			-0.68	-1.56	-0.66	-0.72	-0.56		
2005-2014	-2.47	-3.45							
2009-2014			-4.99	-3.42	-5.88	-2.50	-0.79		
mmm_5ans	-2.92	-3.17	-0.80	-3.36	-3.70	-1.00	-1.58	-2.11	-0.23

Figure 104. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Longue-Pointe-de-Mingan 1

Ce site a fait l'objet d'une analyse par Corriveau et al. (2016). Les résultats de cette étude montrent que le volume de sédiments pour la plage devant ce segment côtier a été constamment plus faible que les secteurs adjacents (saison de suivi 2013-2014). Les plages y sont aussi plus étroites et plus pentues. Ce plus faible volume sédimentaire n'est vraisemblablement pas lié à un déficit sédimentaire à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire. En effet, les apports sableux au littoral sont abondants, qu'ils proviennent des falaises en amont, par rapport au sens de la dérive littorale ou de la rivière Saint-Jean (à l'ouest du foyer d'érosion). Les analyses réalisées dans le cadre de ce projet ont permis d'écarter un certain nombre de causes expliquant ce foyer d'érosion, mais n'ont pas permis d'identifier, à partir des données recueillies, la ou les causes exactes de ce foyer d'érosion. Par contre, l'hypothèse la plus probable à la suite à cette étude est que la bathymétrie influence les vagues et favorise les courants de retours qui contribuent à maintenir le déficit sédimentaire sur les plages de ce foyer d'érosion. Cette dynamique semble aussi avoir limité l'accolement de barres sableuses dans ce secteur. En effet, ailleurs à Longue-Pointe-de-Mingan, l'analyse des photographies aériennes historiques a permis d'observer ce phénomène. Aussi, durant l'année de suivi (2013-2014), le pied de glace formé sur ce site a occasionné un affouillement important. À la lumière des conclusions de Corriveau et al. (2006), le foyer d'érosion de Longue-Pointe-de-Mingan 1 pourrait être une combinaison entre

le type 11 (bathymétrie au large non uniforme), le type 19 (courant de retour) et, selon les conditions glacielles, le type 6 (affouillement au pied de structure naturelle ou anthropique rigide et verticale). Les auteurs de cette étude soutiennent que le déplacement de la route pour ce secteur est la solution à privilégier et que l'installation de structure rigide ou la mise en place d'enrochement aurait pour effet d'aggraver la situation. L'ensemble des caractéristiques relatives au site de Longue-Pointe-de-Mingan 1 sont résumées au tableau 21.

Tableau 21. Caractéristique du site d'étude de Longue-Pointe-de-Mingan 1

Caractéristique	LPM1
Étendue latérale (approx.)	3000 m
Durée d'existence	Persistante
Mode d'évolution historique	L'érosion est persistante, mais non linéaire
Vitesse de recul maximale, EPR	-6,85 m/an 2009-2014, transect 25
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-3,7 m/an 2006-2001, MIN-74
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-12,55 m 2013-2014, MIN-149
Processus et causes si identifiés	Hypothèse : bathymétrie et concentration des vagues, courant de retour et effet du pied de glace telle une structure rigide (affouillement)
Sens de la dérive	Vers l'est
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	Transversale
Possibilité de résolution du foyer d'érosion	Peu probable (voir Corriveau et al., 2016)
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque définie dans Corriveau et al. (2016)	Oui : la route 138 est atteinte selon les projections vers 2060 sur une longueur de 400 m.
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Oui
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Bathymétrie non uniforme au large (11), courant de retour (18), affouillement au pied de structure naturelle ou anthropique rigide et verticale/pied de glace (6)

2.3.12 Longue-Pointe-de-Mingan 2

L'analyse historique du foyer d'érosion de Longue-Pointe-de-Mingan 2 (figure 105 et figure 96, Longue-Pointe-de-Mingan Centre – Longue-Pointe-de-Mingan 2) présente des taux d'évolution positifs pour les transects 2 à 15 et généralement négatifs pour les transects suivants (figure 106).

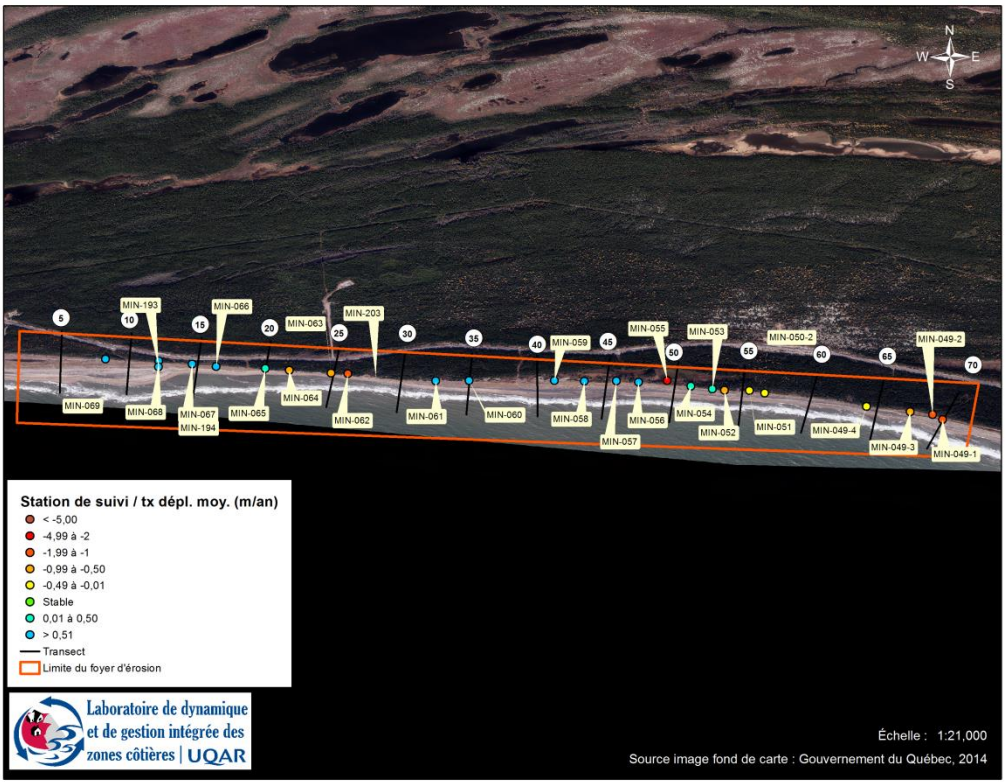


Figure 105. Localisation des stations de suivi et des transects d'analyse historique, Longue-Pointe-de-Mingan 2

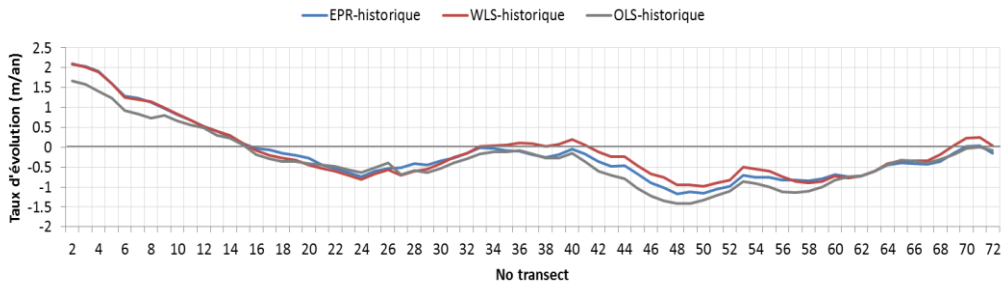


Figure 106. Taux d'évolution EPR-historique, WLS-historique et OLS-historique (sur toutes les lignes de rivage), Longue-Pointe-de-Mingan 2

L'analyse par intervalle montre que le littoral ne connaît pas une évolution historique négative (érosion) persistante (figure 107 et figure 108). L'évolution montre plutôt une alternance entre de l'accumulation et de l'érosion. Spatialement, ce sont les transects 43 à 61 qui présentent une évolution négative dominante. Cependant, ceux-ci connaissent une évolution positive au cours de la dernière période (2009-2014). C'est au cours des intervalles 1983-1989 et 1989-1997 que l'érosion était la plus étendue (couvrant essentiellement la totalité du site d'étude) (figure 107 et figure 108). Enfin, c'est sur le segment côtier où les lignes de rivage de 2009 et 2014 sont disponibles que l'on enregistre la vitesse de recul la plus importante avec -5,67 m/an (figure 109). Au cours d'une étude précédente, les levés lidar et topographiques (DGPS) 2013-2014 ont montré que cette section était caractérisée par des volumes de plage inférieurs aux volumes des zones adjacentes (centré sur compartiment LPM_29, figure 54 dans Corriveau et al., 2016).

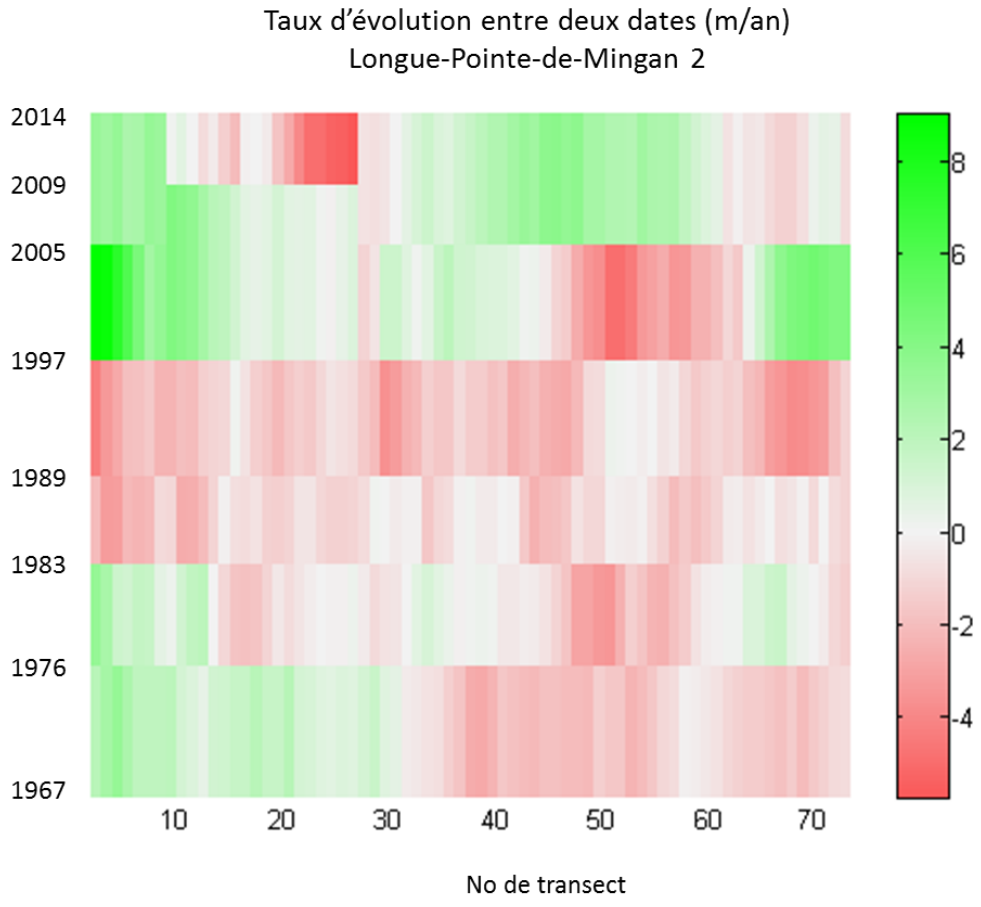


Figure 107. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles, Longue-Pointe-de-Mingan 2

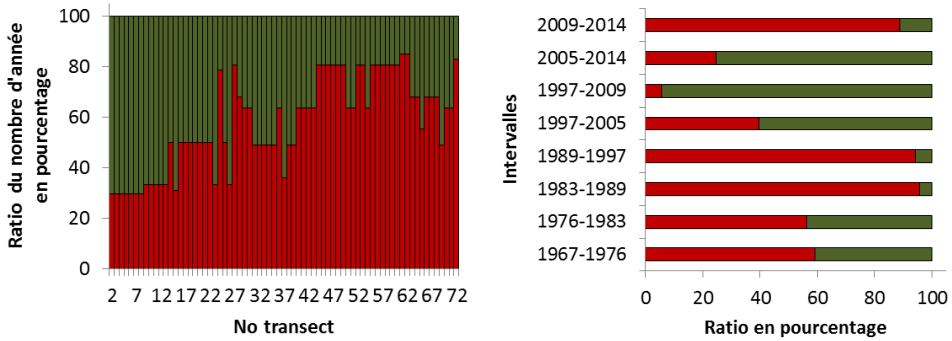


Figure 108. Ratio d'évolution positif (accumulation) et négatif (érosion) en pourcentage par transect et par intervalle, Longue-Pointe-de-Mingan 2

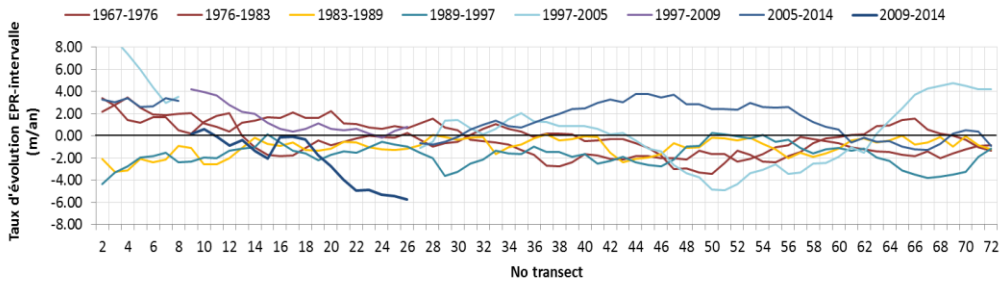
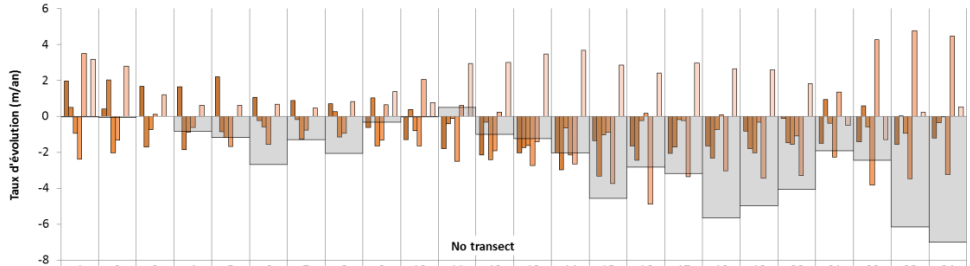


Figure 109. Taux d'évolution historique par intervalle, Longue-Pointe-de-Mingan 2

À la figure 110, on observe que les taux d'évolution (moyenne mobile minimum_5 ans) mesurés à l'aide des mesures *in situ* (stations de suivi) ne constituent pas toujours les valeurs de recul les plus sévères. Encore une fois, l'analyse historique permet de compléter le portrait du foyer d'érosion. Dans ce cas, on constate que le recul de la côte s'est déjà effectué à des vitesses plus rapides. Par contre, entre les transects 15 à 24 (à l'endroit où la route est le plus près de la côte), les vitesses de recul ont été généralement supérieures à ce qui avait été mesuré historiquement. Par exemple, à la station MIN-62, près du transect 24, toute la végétation herbacée côtière visible sur la photo de 2011 avait disparu et l'érosion avait atteint, en 2014, la limite forestière (figure 111).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1967-1976	1.97	0.41	1.67	1.65	2.22	1.06	0.87	0.70	-0.61	-1.30	-1.79	-2.16	-2.02	-2.04	-1.35	-1.65	-2.06	-1.64	-0.83	-0.11	-1.49	-1.41	-1.56	-1.20
1976-1983	0.50	2.04	-1.70	-1.84	-0.85	-0.25	-0.19	0.28	1.04	0.39	-0.40	-0.31	-1.75	-2.97	-3.31	-2.45	-1.69	-2.34	-1.81	-1.48	0.94	0.58	0.02	-0.35
1983-1989	-0.93	-2.04	-0.74	-0.89	-1.18	-0.59	-1.25	-1.14	-1.65	-0.81	-0.12	-2.40	-1.62	-0.64	-1.03	-0.23	-0.18	-0.75	-2.03	-1.55	-0.39	-0.58	-0.94	-0.04
1989-1997	-2.37	-1.32	0.13	-0.62	-1.69	-1.54	-0.76	-0.93	-1.31	-1.64	-2.50	-1.92	-2.74	-2.15	-0.89	0.17	-0.24	0.08	-0.32	-1.08	-2.27	-3.81	-3.47	-3.25
1997-2005	3.50								0.66	2.06	0.63	0.24	-1.41	-2.65	-3.73	-4.88	-3.34	-3.04	-3.44	-3.30	1.35	4.28	4.76	4.48
2005-2014	0.00	2.79	1.20	0.62	0.62	0.67	0.46	0.83																
2009-2014	3.17								1.38	0.76	2.95	3.01	3.47	3.69	2.86	2.41	2.97	2.64	2.59	1.84	-0.49	-1.28	0.23	0.52
mmm_5ans	-0.03	-0.04	0.00	-0.83	-1.17	-2.67	-1.29	-2.06	-0.31	-0.01	0.51	-0.99	-1.22	-2.03	-4.55	-2.83	-3.18	-5.65	-4.96	-4.05	-1.90	-2.45	-6.14	-7.00

Figure 110. Taux d'évolution annuels mmm_5ans bornes vs taux d'évolution EPR-intervalle des transects les plus près, Longue-Pointe-de-Mingan 2



Figure 111. Station de suivi MIN-62, photo du 22 août 2011 (photo du haut) et du 25 juin 2014 (photo du bas)

Enfin, l'analyse des positions de la ligne de rivage par rapport à la position « moyenne » (algorithme de Voronoï) montre le caractère cyclique de l'évolution de la ligne de rivage (figures 107 et 112). La mobilité de la ligne de rivage occupe par endroit des espaces allant jusqu'à près de 100 m (enveloppe de mobilité historique ; figure 113). On observe aussi que les cycles ne s'effectuent pas dans la même direction pour toute la côte à l'étude. En effet, pendant que certains segments sont en recul, d'autres avancent. Ceci est également visible à partir des données de stations de suivi qui montrent, pour une même année, des déplacements positifs et des déplacements négatifs (par ex. périodes 2007-2008, 2012-2013 et suivantes) (figure 114 et tableau 22).

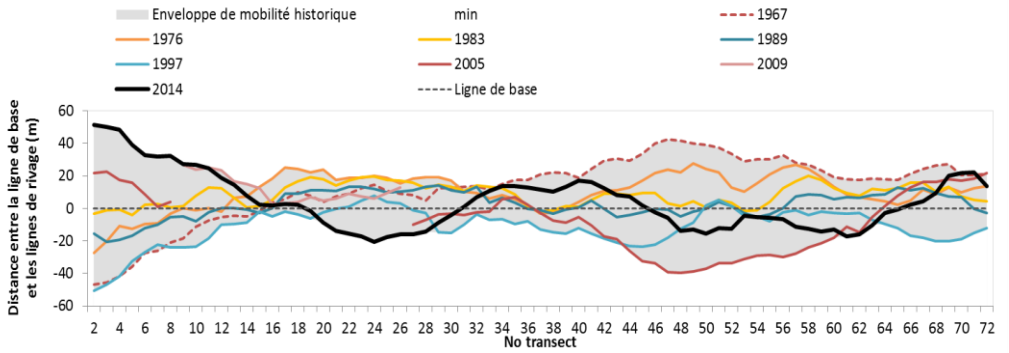


Figure 112. Distances (m) des lignes de rivage exprimées par rapport à la ligne de base (position « moyenne » du littoral, ligne de base créée selon l'algorithme de Voronoï, correspond à 0 m), Longue-Pointe-de-Mingan 2

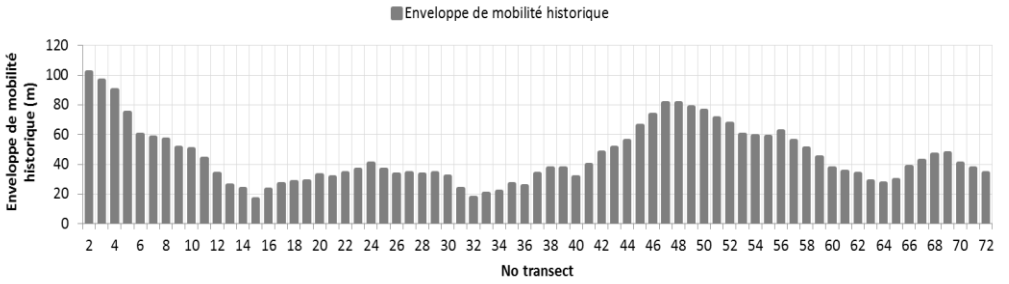


Figure 113. Enveloppe de mobilité historique, Longue-Pointe-de-Mingan 2

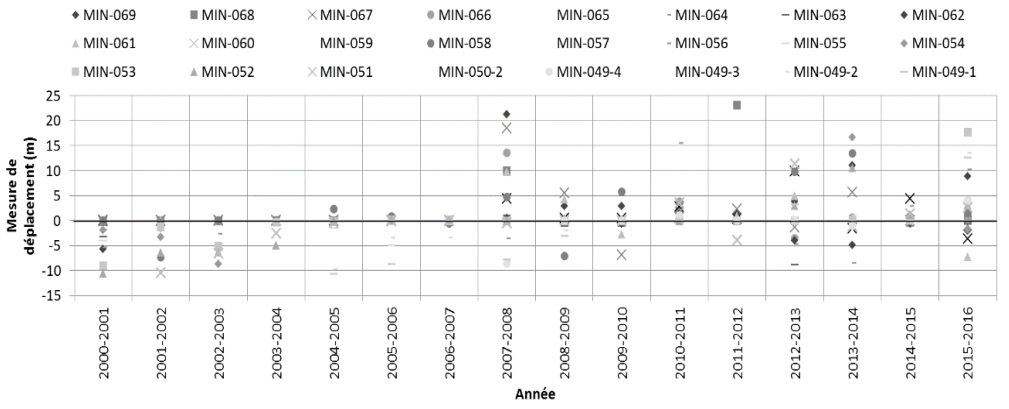


Figure 114. Mesures de déplacement du littoral à partir des stations de suivi, Longue-Pointe-de-Mingan 2

Tableau 22. Mesure de déplacement à partir des stations de suivi pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan 2

	2000-2001	2001-2002	2002-2003	2003-2004	2004-2005	2005-2006	2006-2007	2007-2008	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016
MIN-069	0	0	-0.17	0	0	0	0	21.3	2.9	2.9	0.4	0.3	3.8	11	nd	8.9
MIN-068	-0.17	0	-0.05	0	0	0	0.05	10	-0.4	-0.4	1.8	23.08	-0.13	0	-0.41	0.26
MIN-067	0	0	0	0	0	0	0	4.33	0.5	0.5	2.8	0.4	9.9	-1.6	4.4	-3.6
MIN-066	0	0	0	0	0	0	0	13.53	0.1	0.1	3.8	rimp	-3.5	0.55	-0.51	0.16
MIN-065	-2.22	-0.1	-0.25	0	0	0	0	9.9	0.2	0.2	-3.34	0	-0.14	-1.42	-0.96	-0.14
MIN-064	-1.87	-0.3	0	0	-0.33	0.43	-0.1	0	-0.02	-0.38	2.24	-0.16	-4.63	-8.42	-0.15	0
MIN-063	-3.2	0	0	0	0	0	-0.15	1.03	-1.03	0.55	3.39	-0.29	-8.8	rimp	rimp	-0.66
MIN-062	-5.7	-1.45	0	0	-0.2	-0.05	0.1	0.5	0.2	-0.7	1.32	1.38	-4.05	-4.95	-0.61	-2.09
MIN-061	0	0	0	0	0	0	0	9.73	4.27	-2.77	0.2	0.92	4.95	0.13	rimp	-7.25
MIN-060	-0.07	0	0	0	0	-0.05	0	18.45	5.52	-6.92	0.6	2.3	-1.3	5.6	-0.03	-0.97
MIN-059	-0.27	rimp	-0.1	0	2.4	1.2	1.9	1	2	1.4	-0.3	0.3	1.5	15.6	0.6	6.4
MIN-058	0	-7.3	0	0	2.33	0.87	-0.6	4.7	-7.11	5.73	0	-0.05	9.75	13.5	0.28	1.52
MIN-057	-1.67	-1.87	-2.96	0	0.4	-0.39	-2.6	6.67	-2.2	2.9	14.2	0	1.33	3.67	6.24	1.21
MIN-056	-5.32	rimp	-2.58	0	-0.2	0.35	0.7	-3.5	0.15	0.15	15.51	0.35	0.25	0.1	2.92	10.28
MIN-055	-3.97	-7.15	-4.65	rimp	-1.43	-4.97	an	an	an	an	an	an	an	an	na	na
MIN-054	-1.97	-3.33	-8.74	-0.1	0	0	0	0	0.24	-0.14	0.05	0	0	16.65	1.03	-1.83
MIN-053	-9	-1.22	-5.15	-0.3	-0.25	0.15	0.1	-0.1	-0.04	-0.11	0	0	-0.15	0	0	17.7
MIN-052	-10.55	-6.4	-6.33	-4.87	-0.08	0.13	0.05	-0.1	0.12	-0.02	-0.1	-0.15	3.05	10.6	1.13	3.07
MIN-051	imp	-10.46	-6.47	-2.5	-0.4	0	0	-0.4	0.15	0.05	3.57	-3.92	11.35	-1.1	1.42	2.68
MIN-050-	na	imp	-8.1	-7.9	0	-0.19	0.09	-5.95	9.7	4.43	0.5	-6.48	9.48	0	nd	-0.8
MIN-049-	na	na	na	na	na	na	imp	-8.6	0	0	1	0	0	-0.96	3.92	4.04
MIN-049-	na	na	na	imp	-1	-2	-6.5	rimp	-0.28	0.38	0	0.3	0	0	-0.25	2.85
MIN-049-	na	na	na	imp	-9.75	-3.38	-3.38	-8.05	-1.95	0.1	-0.22	-0.18	-0.6	1.1	-0.56	13.56
MIN-049-	na	na	na	imp	-10.66	-8.74	-0.8	-7.8	-3.04	-0.16	0.24	-0.22	3.18	0	nd	12.6

Dans la zone comprise entre les transects 5 à 30, qui correspond à l'endroit où la route est très proche du littoral, l'évolution historique montre des avancées et des reculs. Le corps sableux actuellement en migration vers l'est est en train de passer devant ce site. Comme l'ont indiqué Corriveau et al. (2016), la captation du sédiment en déplacement longitudinal à l'aide d'épis perpendiculaires à la côte permettrait de conserver une partie des sédiments en transit. La plage ainsi maintenue, même après le passage des sédiments, permettrait de retarder ou de réduire le recul de la côte à proximité de la route. Compte tenu de l'abondance de sédiments dans ce milieu, l'impact d'épis ne devrait pas être significatif sur les segments côtiers adjacents. Les caractéristiques relatives au site de Longue-Pointe-de-Mingan 2 sont résumées au tableau 23.

Tableau 23. Caractéristiques du site d'étude de Longue-Pointe-de-Mingan 2

Caractéristiques	LPM2
Étendue latérale (approx.)	3600 m
Durée d'existence	Cyclique
Mode d'évolution historique	Évolution cyclique où les inversions entre les périodes d'érosion et d'accumulation sont évidentes
Vitesse de recul maximale, EPR	-5,75 m/an 2009-2010, transect 26
Vitesse de recul maximale, mmm_5ans	-7,00 m/an 2003-2008, MIN-049-1
Déplacement annuel, recul maximal (stations de suivi)	-10,66 m 2004-2005, MIN-049-1
Processus et causes si identifiés	Migration de corps sédimentaires entraînant la fluctuation de la ligne de rivage (avancées et reculs)
Sens de la dérive	Vers l'est
Direction prédominante du transport sédimentaire responsable de l'érosion	Longitudinale
Possibilité de résolution du foyer d'érosion	Oui Épis (voir Corriveau et al., 2016)
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimitée par les projections de Corriveau et al. (2016)	Non : n'atteint pas la route selon les projections. Distance minimum entre la ligne blanche (côté mer) et la ligne de rivage projetée est de 7 m.
Présence d'enjeux dans la zone potentiellement à risque délimité à l'aide de la position de la ligne de rivage historiquement la plus reculée	Non
Type correspondant dans la liste de Kraus et Galgano (2001)	Transport longitudinal caractérisé par des vagues de sables (*sand wave*) (type 15)

2.4 Conclusion

Cette section a permis de présenter la typologie des foyers d'érosion telle que proposée par Kraus et Galgano (2001). La consultation de la littérature combinée à l'analyse des sites d'étude a permis d'adapter cette typologie (nouvelles caractéristiques) en plus d'ajouter six types de foyers d'érosion à la liste originale. Au total, dix sites répartis sur cinq secteurs d'étude ont fait l'objet d'une analyse historique. Cette analyse a permis de quantifier les vitesses d'évolution côtière, de caractériser la dynamique côtière et d'identifier les modes d'évolution de la côte et ainsi de les considérer selon une perspective temporelle.

3 OBJECTIF 2 : PROJECTIONS D'EVOLUTION COTIERE

Développer une méthode pour intégrer la dynamique des foyers d'érosion dans les projections d'évolution côtière servant à l'analyse de la vulnérabilité des infrastructures côtières.

Les sections suivantes présentent les éléments nécessaires pour réaliser des projections d'évolution côtière selon une approche empirique. Pour ce faire, il s'agit de tracer la ligne de rivage (trait de côte pour les falaises) (section 3.2) à partir d'imagerie (photos aériennes, image satellitaire) d'années différentes. À partir de ce traçage multi-dates, l'analyse de la cinétique de la ligne de rivage est réalisée et permet de déterminer des taux d'évolution historiques qui seront utilisés dans l'équation de la projection d'évolution côtière vers un horizon temporel donné. Le taux d'évolution calculé est fonction de deux choix méthodologiques importants, soit la méthode statistique pour le calcul du taux (section 3.3) et le choix de la période sur laquelle le taux est calculé (section 3.4). D'abord, la section 3.1 présente les fondements de la méthode, soit le modèle conceptuel d'évolution côtière (section 3.1.1) et l'équation de base pour réaliser des projections (section 3.1.3). Ce retour sur chacun des éléments nécessaires aux projections d'évolution côtière permet de faire un tour d'horizon des connaissances et des conclusions ayant été tirées dans la littérature par le passé afin de faire un choix éclairé quant aux décisions méthodologiques de projection qui sera réalisée ici.

Avant de décrire l'ensemble de ces éléments il est pertinent de mettre ici en perspective l'état d'avancement et les constats de la communauté scientifique quant aux méthodes de projection de la position de la ligne de rivage à partir d'une approche empirique de même que le regard qu'elle porte sur cette problématique. Ainsi, il y a moins d'une vingtaine d'années, Honeycutt et al. (2001) soulevaient qu'il n'y avait pas encore de consensus quant à la meilleure méthodologie pour prévoir la position future de la ligne de rivage. Et encore, quelques années plus tard, Miller et Dean (2004) portaient un regard très sévère sur l'état des connaissances en affirmant que malgré le nombre de questions complexes auxquelles les scientifiques et ingénieurs côtiers sont en mesure de répondre, « *we are still unable to adequately answer a much more basic question. Where will the shoreline be tomorrow? Next week? Next year? In a decade?* ». Ce type d'affirmation met rapidement en lumière l'ampleur de la problématique à laquelle nous tentons toujours de répondre et pour laquelle nous tentons toujours de trouver les méthodes pouvant mener aux prédictions les plus justes.

3.1 Fondements généraux des projections d'évolution côtière selon une approche empirique

Les projections d'évolution côtière réalisées dans le cadre de ce projet sont réalisées selon une **approche empirique**. Par contre, il est important de souligner ici qu'il existe aussi des méthodes de projections d'évolution côtière basées sur des modèles numériques plutôt que sur une approche empirique. Davidson et Turner (2009) rappellent dans l'introduction de l'article « *A behavioral template beach profile model for predicting seasonal to interannual shoreline position* » qu'il existe, au côté des approches empiriques et semi-empiriques, des méthodes de prédiction de la position de la ligne de rivage ou du trait de côte qui se basent sur la modélisation allant du 3D (par exemple DELFT3D) au 2D et 2DV (*2-d vertically integrated profile models*). Notons par ailleurs qu'il existe aussi toute une littérature sur l'évolution des falaises et sur les modèles qui ont été développés spécifiquement pour projeter l'évolution de ce type de côte (par ex. SCAPE) (Walkden et Dickson, 2006; Walkden et Hall, 2005, 2011).

À propos des côtes basses meubles telles que celles qui caractérisent une portion du littoral nord-côtier, Davidson et Turner affirmaient, toujours en 2009, que les modèles 3D étaient encore en développement et que les modèles 2D généraient encore des prédictions insatisfaisantes lorsqu'il s'agit d'horizons temporels supérieurs à quelques années. En effet, comme la position de la ligne de rivage est tributaire des conditions hydrodynamiques, de l'évolution du niveau marin, de la granulométrie, des pertes et des gains sédimentaires à la côte, du transport sédimentaire longitudinal et transversal, des impacts anthropiques et les modifications des conditions climatiques, la modélisation est une démarche extrêmement complexe. Enfin, toujours d'après les affirmations de Davidson et Turner (2009), l'utilisation de modèles 2D, 2DV ou 3D plutôt que de l'approche empirique ne serait donc actuellement pas supérieure ou meilleure à l'approche empirique. Les modèles actuels se sont améliorés depuis les affirmations de Davidson et Turner (2009), mais il demeure que dans le cas d'études concernant des territoires aussi vastes et diversifiés que ceux de la Côte-Nord, l'approche empirique est assurément la plus adéquate. Il sera néanmoins très intéressant d'éventuellement appliquer des modèles numériques sur des sites d'étude spécifiques le long des côtes du Québec maritime.

3.1.2 Modèle conceptuel de l'évolution côtière

Beaucoup des réflexions et des constats sur l'analyse historique de la cinétique de la ligne de rivage tirés de la littérature reposent sur un modèle conceptuel qui indique que l'évolution côtière, pour de nombreux littoraux, est non-linéaire (figure 115). Ce modèle suggère que l'évolution de la position de la ligne évolue par cycle et suit une tendance qui peut être soit à l'érosion, stable ou en accumulation. Notons que ce modèle n'exclut pas qu'il puisse avoir des côtes pour lesquelles la tendance change durant l'historique.

Bien entendu, ce modèle conceptuel ne s'applique pas aux falaises puisque celles-ci évoluent seulement dans une direction ; les falaises ne peuvent progresser vers la mer.

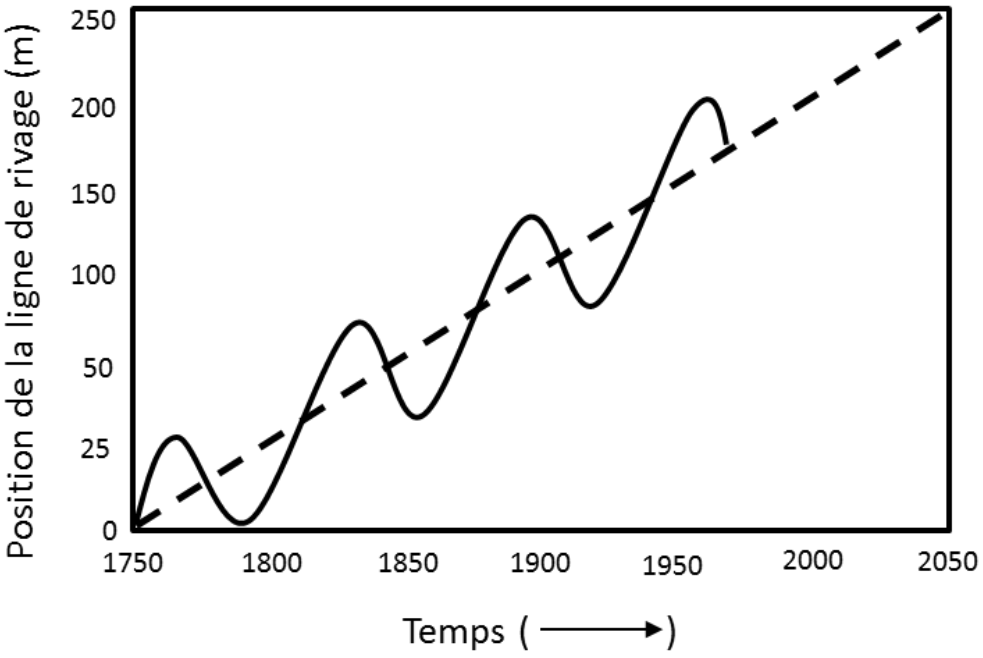


Figure 115. Modèle conceptuel de l'évolution côtière, modifié de Dolan et al., 1991 (exemple d'une côte où la tendance est positive, accumulation)

3.1.3 Équation de base

Dans l'approche empirique, la projection de la position de la ligne de rivage est produite à partir de l'équation de base suivante (équation 1). Cette équation indique simplement que la position future de la ligne de rivage est obtenue en multipliant le taux d'évolution historique par le nombre d'années pour atteindre l'horizon souhaité (figure 116). La prémisse à partir de laquelle cette équation est conçue est que le taux d'évolution historique est sensé refléter l'effet cumulatif des processus en causes dans l'évolution côtière (par ex., Dolan et al., 1991).

$$\boldsymbol{Position\ future\ de\ la\ ligne\ de\ rivage} = \left\lfloor \begin{array}{c}\textbf{Nombre d'années entre le tracé de la ligne de rivage le plus récent} \\ \textbf{et l'horizon de projection souhaité}\end{array} \right\rfloor * [\textbf{taux d'évolution historique en m/an}] \qquad (1)$$

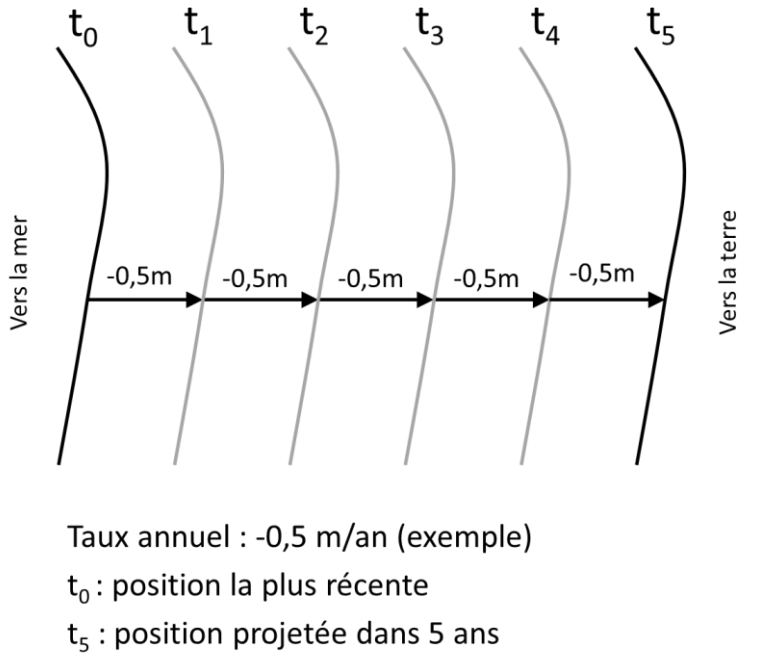


Figure 116. Illustration de l'équation de base de projections d'évolution côtière menant à un recul de 2,5 m en 5 ans

Le taux d'évolution historique utilisé dans l'équation dépend, d'après Dolan et al., (1991) :

1. De la précision du positionnement de la ligne de rivage ;
2. De la variabilité temporelle de la position de la ligne de rivage ;
3. Du nombre de points, c'est-à-dire du nombre de tracés de ligne de rivage disponibles (nombre d'années différentes pour lesquelles des photographies aériennes sont disponibles) ;
4. De la proximité de ces observations par rapport au temps d'un changement dans la tendance de l'évolution de la position de la ligne de rivage ;
5. De la période de temps entre les observations ;
6. De la couverture totale historique ;
7. De la méthode de calcul utilisée.

À propos de ces éléments, notons que la variabilité temporelle de la position de la ligne de rivage est tout simplement indépendante des méthodologies retenues par les chercheurs (élément 2). Aussi, il est important de savoir que parmi ces éléments, les chercheurs n'ont pas d'emprise sur plusieurs d'entre eux (3, 4, 5 et 6). En effet, les dates d'acquisitions passées (éléments 4 et 5), le nombre (élément 3) de même que la période de couverture des données de bases (photos aériennes) (élément 6) ne sont pas le résultat d'un plan d'acquisition de données. Les chercheurs travaillent simplement à partir des données historiques disponibles et non des données qui seraient souhaitées ou nécessaires. À ce sujet, Crowell et al. (1997) estiment que pour obtenir une base de données qui permettrait de comprendre les changements saisonniers, annuels, décennaux et séculaires, il serait nécessaire d'avoir deux positions de trait de côte par année pour plusieurs décennies et possiblement jusqu'à un siècle pour bien comprendre la cinétique de la ligne de rivage et en distinguer toutes les tendances. Ces auteurs soulignent, à la suite de ce constat, que les données actuellement disponibles sur la position de la ligne de rivage mènent inévitablement à des prédictions erronées. C'est en connaissant cette limite que les chercheurs tendent, tant bien que mal, à élaborer une approche générant le moins d'erreurs possible. Quant à la précision du positionnement de la ligne de rivage (élément 1), il est possible de calculer l'erreur et de l'inclure dans les calculs subséquents. À ce sujet, notons que Dolan et al. (1991) font un retour sur les trois types d'erreurs possibles, soit les erreurs « grossières » (*gross* ou *coarse*), les erreurs systématiques (*systematic*) et les erreurs aléatoires (*random*). Crowell et al. (1991), précisent que plus les changements de position de la ligne de rivage sont petits, plus l'erreur de positionnement aura un poids important dans le taux d'évolution historique calculé. Le positionnement de la ligne de rivage fait l'objet de la section 3.2. À

la lumière de ces précisions, on comprend qu'un des seuls éléments sur lequel les chercheurs peuvent prendre une décision en fonction du site et des objectifs d'une étude est la méthode de calcul du taux d'évolution (méthode statistique et période de calcul). Les différentes méthodes statistiques font l'objet de la section 3.3 et la période pour le calcul de ces taux fait l'objet de la section 3.5.

Enfin, dans un contexte de changement climatique, l'utilisation de taux d'évolution basés sur des données historiques constitue en elle-même une limite ayant été pointée et identifiée comme étant évidente notamment par Davisdson et Turner (2009). Pour d'autres auteurs, on prendra soin de bien spécifier que l'équation de base est applicable si les facteurs et les processus en cause dans l'évolution récente de la position de la ligne de rivage ne changent pas à moyen terme. En effet, dans un tel contexte, les observations historiques n'ont pas été réalisées sous des conditions climatiques similaires à celles qui sont anticipées pour le futur.

3.2 Positionnement de la ligne de rivage

Comme la ligne de rivage est l'objet que l'on trace et que l'on projette dans le futur, il est important la définir ici. À la lecture d'articles scientifiques, on constate rapidement que les auteurs qui s'intéressent au domaine côtier accordent une importance significative au positionnement de la ligne de rivage actuelle et future. À maintes reprises, différents auteurs introduisent leur sujet d'étude en soulignant combien le positionnement de la ligne de rivage est important tant pour les scientifiques eux-mêmes que pour les ingénieurs côtiers et les gestionnaires (par ex., Dolan et al., 1991 ; Genz et al., 2007 ; Honeycutt et al., 2001 ; Fenster et al., 1993, pour ne citer que ceux-là). Par exemple, aux États-Unis, sans entrer dans les détails législatifs, les taux d'évolution historiques de la ligne de rivage sont souvent utilisés pour définir la marge qui est utilisée dans le cadre des « *state and federal setback programs* » (National Research Council, 1990) de même que dans les stratégies de gestion côtière. Au Québec, les taux d'évolution côtière de la ligne de rivage ont contribué à la définition des marges de sécurité en érosion côtière (Ministère de la Sécurité publique, LDGIZC).

Le positionnement de la ligne de rivage s'effectue généralement à partir de photographies aériennes et, dans une moindre mesure, avec des images satellitaires (par ex., Cenci et al., 2015). Notons tout de même qu'avec l'utilisation de plus en plus répandue de l'imagerie 3D obtenue à partir de système tel que le LiDAR, d'autres méthodes sont développées pour le traçage de la ligne de rivage (voir section 3.1.2.6 de Corriveau et al., 2016).

Celles-ci sont pour la plupart tracées à l'aide d'une cote altimétrique basée sur un niveau d'eau. Néanmoins, on rencontre ponctuellement des auteurs qui développent des méthodes de positionnement de la ligne de rivage basées sur la morphologie des profils du domaine littoral (par ex. Crapoulet et al., 2015). Éventuellement, la cartographie automatisée basée sur des classements de rugosité (plage vs zones végétalisées) ou d'intensité de retour (végétation vs sédiments) pourrait constituer une avenue intéressante quant à la manière d'extraire automatiquement la position du trait de côte/ligne de rivage (Bretel et al., 2013).

Ainsi, la position de la ligne de rivage est un tracé sur le littoral suivant la limite d'un *indicateur* marquant la limite entre le domaine terrestre et le domaine marin. Plusieurs indicateurs coexistent dans la zone littorale et le choix de l'indicateur pour positionner la ligne de rivage dépend entre autres du type d'environnement, de la source et de la résolution des données (terrain, lidar, photographies aériennes), de l'échelle temporelle d'analyse de la mobilité de ladite limite et enfin, des objectifs de l'étude (Boak et Turner, 2005).

D'après la synthèse de Boak et Turner (2005), l'indicateur le plus largement utilisé est la ligne des hautes eaux (la *high water line*, HWL). Plusieurs autres indicateurs de la ligne de rivage, dont la HWL, sont liés à la position du niveau d'eau à la côte[1]. Ce type d'indicateur a donc pour inconvénient de représenter la position de la ligne de rivage à un moment ponctuel et non une condition moyenne. L'image peut donc refléter les conditions particulièrement énergétiques ou particulièrement calmes qui ont eu lieu juste avant la date d'acquisition. L'état de la côte peut ainsi être atypique et éloigné de l'état moyen de la côte. À titre d'exemple, Bosma et Dalrymple (1997, *in* Honeycutt et al., 2001) observent que la position de la ligne de rivage indiquée par la HWL peut varier de 5 à 20 m en fonction de la saison. Des écarts de 20 m dans la position de la HWL sont aussi observés en fonction des saisons par Smith et Zarillo (1990). Ces derniers indiquent d'ailleurs que ce bruit, c'est-à-dire les modifications journalières, mensuelles, saisonnières ou annuelles, introduit les erreurs les plus importantes dans leurs prédictions à long terme (décennies). Ces constats ont généré une divergence de points de vue quant à l'inclusion ou non des tracés de ligne de rivage influencés par une tempête ayant eu lieu peu de temps avant la prise de photos (par ex., Fenster et al., 2001 ; Honeycutt et al., 2001). Lorsqu'ils sont inclus, il demeure tout de même

[1] Concernant l'utilisation des lignes liées au niveau d'eau, Cenci et al. (2015) indiquent que malgré les incertitudes associées à cet indicateur, il présente l'avantage de pouvoir être utilisé dans les zones urbanisées où il n'y a pas de végétation.

essentiel de connaître l'historique des tempêtes de manière à faire une interprétation cohérente de la cinétique de la position de la ligne de rivage.

Les indicateurs utilisés au LDGIZC pour le positionnement de la ligne de rivage (et du trait de côte) sont présentés ici (section 3.2.1).

3.2.1 Choix méthodologique pour ce projet : positionnement de la ligne de rivage selon les indicateurs retenus par le LDGIZC

Les indicateurs à utiliser pour positionner la ligne de rivage, de même que le trait de côte, au LDGIZC, ont d'abord été définis dans le cadre des travaux du comité d'experts sur *l'Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période 1999-2003 (Entente spécifique,* Dubois et al., 2005). Au moment de définir les indicateurs qui seraient utilisés pour positionner la ligne de rivage, le comité d'experts s'affranchit des problèmes liés au positionnement de la ligne de rivage à l'aide d'indicateurs directement liés à la position du niveau d'eau à la côte. Ils rappellent que ce type d'indicateur est dépendant des conditions météo-marines au moment, ou alors précédant tout juste, l'acquisition des images. Ils soulèvent aussi que plusieurs plages du territoire nord-côtier sont caractérisées par la présence de résurgences ce qui interfère dans le positionnement d'une limite liée en partie à l'interprétation de l'humidité de la plage. Aussi, étant donné qu'un des objectifs des travaux est de suggérer un zonage préliminaire du risque d'érosion, ce type d'indicateur n'était pas adéquat puisqu'il ne correspond pas à l'espace côtier habitable. Au terme de leur réflexion, le comité d'expert préconise de positionner la ligne de rivage en fonction du type de zone côtière selon les situations suivantes pour le territoire nord-côtier :

1) À la limite supérieure des falaises et des microfalaises actives ou fixées par la végétation ;
2) À la limite de la végétation permanente dans les secteurs en accumulation ou à la limite inférieure de la végétation du schorre supérieur dans les zones de marais maritime ;
3) À la limite de la végétation dans les zones rocheuses ;
4) Dans les secteurs artificialisés, à la limite supérieure des ouvrages de protection, des quais et des remblais le long des routes.

Le comité d'experts indiquait alors que c'est également un indicateur lié à la végétation qui avaient été utilisé pour les études sur les côtes du Texas (Bolleter and Benton, 1985; Morton, 1974; Morton and Pieper, 1975 in Dubois et al., 2005) ou du Danemark (Bird, 1974 in Dubois et al., 2005) de même que par Briard (1980) et Dubois et Briard (1980) sur la Moyenne Côte-Nord, par Lessard et Dubois (1984b) pour le delta de la rivière Moisie ainsi que par

Bernatchez (2003) pour les péninsules de Manicouagan et de la rivière Betsiamites. À ceux-ci, on peut ajouter Ferreira et al. (2006) et Cenci et al. (2013) sur les côtes du Portugal (limite de la végétation dense) et Thomas et al. (2011) sur les côtes du Royaume-Uni (limite de la végétation). Aussi, d'après les travaux de Grenier et Dubois (1992), cette limite est plutôt constante et stable et constitue la meilleure limite à utiliser pour les côtes sans falaise dans une optique d'évolution côtière. Ce sont, depuis lors, ces indicateurs qui sont utilisés dans les travaux du LDGIZC et de la Chaire de recherche en géoscience côtière. Dans le cas des falaises, précisions que c'est le *trait de côte* qui est utilisé, soit :

1) La rupture de pente du haut de la falaise

Cette limite avait aussi été utilisée par Bernatchez (2003) sur la Côte-Nord, puis par Bernatchez et al. (2008) en Gaspésie et aux Îles-de-la-Madeleine. Le schéma suivant illustre la position de la ligne de rivage et du trait de côte selon des indicateurs adoptés par le LDGIZC. Dans le cadre du présent projet, ce sont, en toute logique, les tracés de la ligne de rivage tel que défini préalablement par le LDGIZC qui sont utilisés.

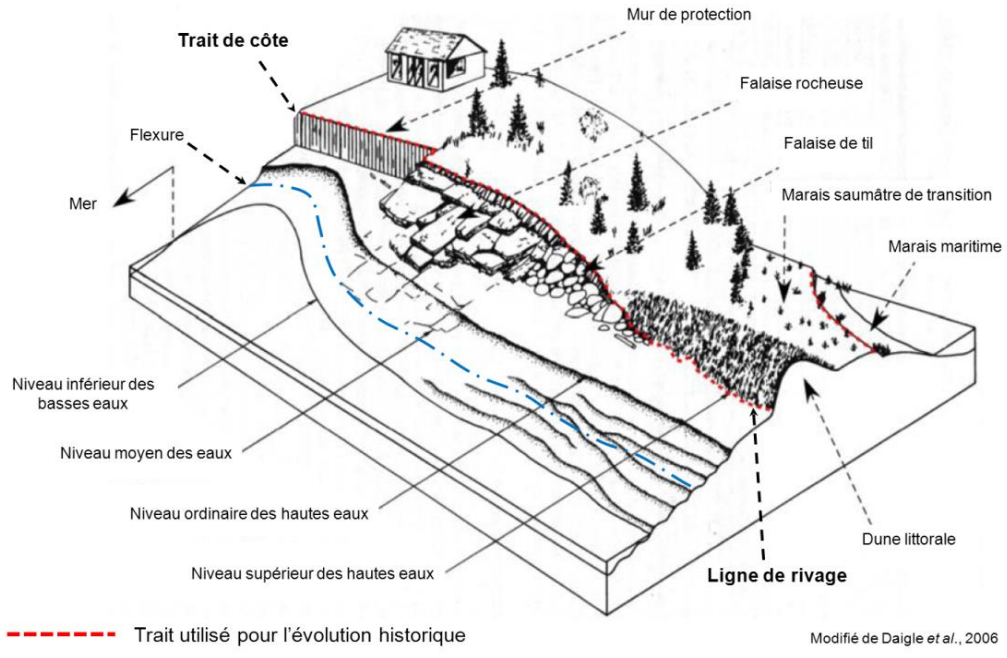


Figure 117. Tracés utilisés pour l'évolution historique du littoral selon différentes configurations de la côte (modifié de Daigle et al., 2006)

3.3 Méthodes de calcul des taux d'évolution historiques pouvant être utilisées pour les projections d'évolution côtière

Lorsque plusieurs lignes de rivage datant d'années différentes sont disponibles, il est possible de calculer le taux d'évolution historique (m/an). Dans la littérature, les méthodes de calcul du taux d'évolution historique les plus souvent rencontrées sont l'EPR (*End Point Rate*) et le LRR (*Linear Regression Rate*) aussi nommé l'OSL (*Ordinary Least Square*) (Dolan et al., 1991). Toutefois, c'est l'EPR qui est le plus largement utilisé. Plus spécifiquement, aux États-Unis, Dolan et al. (1990), ont fait le bilan des méthodes de calcul utilisées dans les études par les états côtiers des États-Unis et constatent que 70,3 % des taux d'évolution historiques sont calculés à partir de la méthode de l'EPR (Dolan et al., 1991). Les auteurs soutiennent qu'en raison du grand nombre d'études qui ne mentionne pas explicitement la méthode de calcul du taux, le pourcentage d'études qui utilisent la méthode de l'EPR serait vraisemblablement plus élevé. Le calcul des taux d'évolution continue d'être réalisé à partir de la méthode EPR et d'être utilisé pour les projections d'évolution côtière aujourd'hui (Jonah et al., 2015, par exemple). Par contre, on compte de plus en plus de publications dans lesquelles les taux d'évolution sont calculés à partir de régression linéaire (section 3.3.3). Dès 1999, Crowell et al. soutiennent que le calcul des taux d'évolution à l'aide de régression linéaire est privilégié par certains (sans référence précise) et rappellent du même souffle les avantages de cette méthode. À titre d'exemple, on sait que depuis 2003, les projections réalisées pour les côtes d'Hawaii le sont à partir du taux historique calculé à l'aide des moindres carrés pondérés (*reweighted least square*, RLS, section 3.3.3.3) (Genz et al., 2007).

Les méthodes de calcul du taux d'évolution historique ont fait l'objet de deux synthèses importantes. Il s'agit de l'article de Dolan et al. (1991), puis à partir de celle-ci, l'article de Genz et al. (2007). Fenster et al. (1993) indiquaient que, malgré l'importance du calcul du taux d'évolution historique dans les projections d'évolution côtière, la fiabilité des méthodes de calcul (par ex., EPR, AOR, OSL) n'avait pas été mise à l'épreuve. Près de 15 ans plus tard, soit en 2007, Genz et al. identifient seulement moins d'une dizaine de travaux dans lesquels les auteurs comparent les résultats obtenus à partir des différentes méthodes de calcul.

Les sous-sections suivantes présentent brièvement les différentes méthodes de calcul. Celles-ci sont illustrées à partir des résultats d'analyse de l'évolution de la côte à Longue-Pointe-de-Mingan 1 devant le transect 38 tel qu'obtenu à l'aide du logiciel MobiTC (section 2.3.1). Seules les méthodes statistiques incluses dans le logiciel MobiTC sont décrites ici. Il est important de spécifier

qu'il existe d'autres méthodes statistiques permettant de calculer des taux d'évolution. Quelques exemples sont décrits brièvement à la section 3.3.6.

3.3.1 Taux plus vieux - plus récent / End Point Rate (EPR)

La méthode de calcul par EPR est largement utilisée notamment en raison de sa simplicité. Décrite par Dolan et al. (1991), la méthode consiste à calculer la distance entre la ligne la plus ancienne et la plus récente puis de diviser cette distance par le nombre d'années écoulées entre les deux lignes. En plus de l'analyse historique la plus longue, ce calcul peut être réalisé pour tous les intervalles disponibles sur le territoire d'étude. Lorsque seulement deux lignes sont disponibles, la méthode de calcul par EPR est alors la seule possible.

La principale limite de cette méthode est qu'elle ne tient compte que de deux lignes, et ce, même si davantage sont disponibles. En ce sens, elle ne permet pas de tenir compte de la variabilité dans la cinétique de la ligne de rivage. Aussi, selon les positions retenues pour faire le calcul du taux d'évolution historique, celui-ci peut être très différent (Galgano et al., 1998). Sans nécessairement impliquer un renversement de tendance (négatif-positif), la dernière année de suivi disponible influence aussi ce taux. À la figure 118, on peut observer que le taux historique EPR (-0,16 m/an) aurait été plus important si la dernière photo disponible pour le tracé avait été celle de 2005 (avant dernier point). Aussi, comme le soulignait Crowell et al. (1997), si l'une des deux lignes de rivage a une position aberrante (erreur d'interprétation, erreur attribuable à la résolution des images ou erreur de géoréférencement, par exemple), le taux calculé sera lui aussi aberrant. L'utilisation de seulement deux lignes rend les résultats plus sensibles aux différentes sources d'erreurs que ne le sont, par exemple, les résultats obtenus à partir des moindres carrés (section 3.3.3).

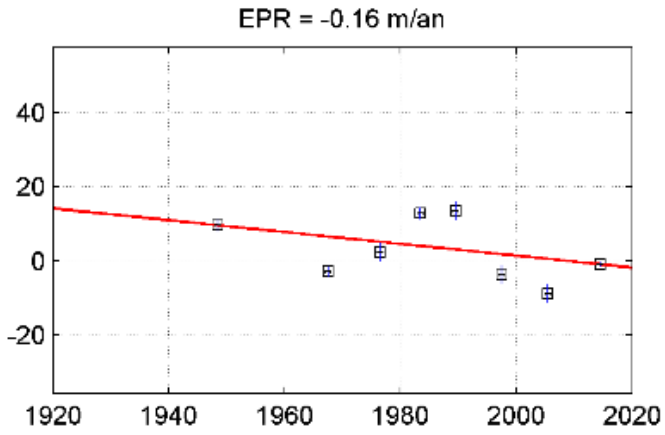


Figure 118. Calcul du taux d'évolution historique selon l'EPR pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.2 Moyenne des taux / Average of rates (AOR)

Décrite par Foster et Savage (1989), cette méthode consiste à calculer les taux d'évolution par EPR de tous les intervalles disponibles, puis d'en faire la moyenne (figure 119). La moyenne est calculée à partir des taux qui répondent à un critère de temps minimum (t_{min}), lequel tient compte de la marge d'erreur. Il s'agit d'une méthode sensible à des changements de tendance et à la variabilité des données, et ce, tout en filtrant la variabilité à court terme (considérée plutôt comme du bruit) grâce au critère t_{min}. Malgré certains avantages, Foster et Savage (1989 *in* Genz et al., 2007) ne recommandent pas l'usage généralisé de cette méthode. Ils suggèrent plutôt de l'utiliser aux côtés des méthodes par EPR et par LRR. Les auteurs avaient ciblé des segments côtiers dont l'évolution avait été identifiée comme linéaire ou constante ou encore sur des segments choisis sur la base leurs connaissances sur le milieu.

Dean et Malakar (1999) ont comparé les résultats obtenus avec les taux calculés selon les méthodes par OLS, EPR et AOR. En mettant en relation les résultats obtenus (calcul du coefficient de corrélation), ils observent que les trois méthodes sont cohérentes les unes avec les autres, mais que l'AOR est la méthode la moins bien corrélée aux deux autres. Il s'agit d'une conclusion équivalente à celle obtenue par Dolan et al. en 1991 ; la comparaison des méthodes les unes par rapport aux autres (EPR, OLS, JK et AOR) montrait que l'AOR était la plus variable. Inversement, dans le cas de Thieler et al. (1995, *in* Genz et al., 2007) qui comparent les résultats des projections obtenues à l'aide des taux historiques calculés selon les méthodes par OLS,

EPR et AOR, l'AOR s'avère être la méthode convenant le mieux à leur site d'étude. Il s'agit, à notre connaissance, d'un des rares exemples où l'AOR est la méthode donnant les meilleurs résultats.

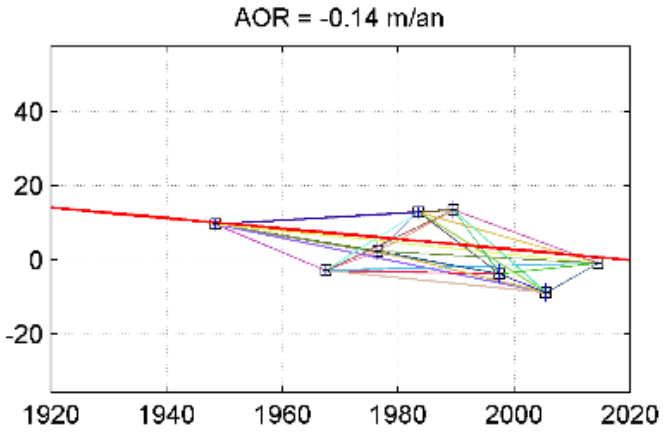


Figure 119. Calcul du taux d'évolution historique selon l'AOR pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.3 Modèles linéaires à l'aide des moindres carrés

Les modèles linéaires réalisés à l'aide des méthodes des moindres carrés et de ses variantes sont facilement réalisables et présentent, dans l'ensemble, l'avantage d'utiliser toutes les données disponibles. Les sous-sections suivantes présentent quelques-unes des différentes variantes (c'est-à-dire, celles dont le calcul est possible dans MobiTC).

3.3.3.1 *Moindres carrés (Ordinary least square – OLS)*

La méthode de calcul des moindres carrés (*Ordinary least square* – OSL – dans MobiTC et *Linear regression rate* – LRR – dans DSAS) est notamment décrite par Dolan et al. (1991). Tel que le rappellent Crowell et al. (1997), cette méthode est basée sur des concepts statistiques courants et généralement bien compris. Un des problèmes de cette méthode se présente lorsqu'un nombre de données est concentré dans le temps. Ceci a pour effet de donner plus de poids à ces valeurs, influençant alors le taux d'évolution obtenu. Cette situation est relativement fréquente en raison de la distribution des données disponibles dans le temps. En effet, les données disponibles sont généralement beaucoup plus fréquentes au cours de la période récente qu'au

cours de la période historique. L'analyse de l'évolution côtière à partir de ce type de régression linéaire a notamment été retenue par Cenci et al. (2013 ; 2015) sur les côtes de l'Italie et du Portugal ou alors par Maiti et Bhattacharya (2009) sur les côtes indiennes. Notons que Cenci et al. (2013) utilisent aussi le R^2 pour compléter l'analyse et décrire à quel point les taux d'évolution calculés à l'aide des régressions linéaires sont adéquats ou non. Enfin, Honeycutt et al. (2001) observent que les prédictions réalisées à partir des taux d'évolution calculés à l'aide de régressions linéaires (OLS) ont été meilleures que celles par EPR.

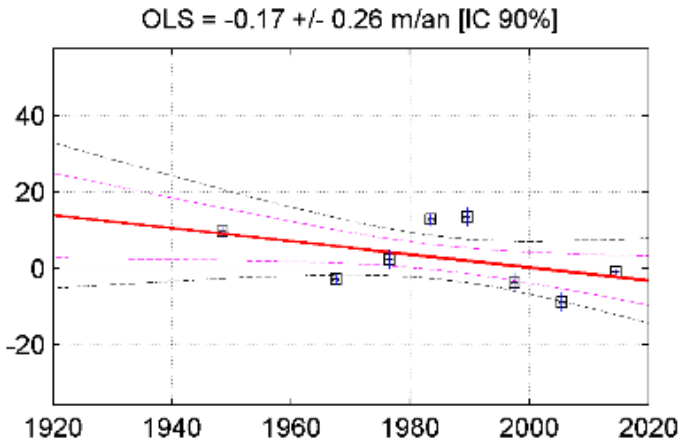


Figure 120. Calcul du taux d'évolution historique selon l'OSL pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.3.2 *Moindres carrés pondérés (Weighted least square – WLS)*

Cette méthode diffère de la première par la pondération des données en fonction de l'erreur associée à chacune d'elle. Il s'agit d'attribuer un poids (une influence) moins important aux données pour lesquelles l'erreur est plus importante et inversement. Dans l'exemple à la figure suivante (figure 121), le taux est légèrement différent de celui obtenu à l'aide de la méthode OLS (figure 120), avec des taux de -0,17 m/an et -0,14 m/an respectivement. L'écart entre les deux méthodes diffère selon les données et les erreurs associées à celles-ci. Dans la littérature, Spirandelli et al. (2016) par exemple, ont choisi cette méthode. Nous verrons à la section 3.3.7.2 que l'utilisation de cette méthode n'est pas toujours meilleure que la méthode non pondérée (OLS), et ce, notamment lorsque le nombre de lignes de rivage disponible est limité et que les erreurs qui y sont associées sont petites.

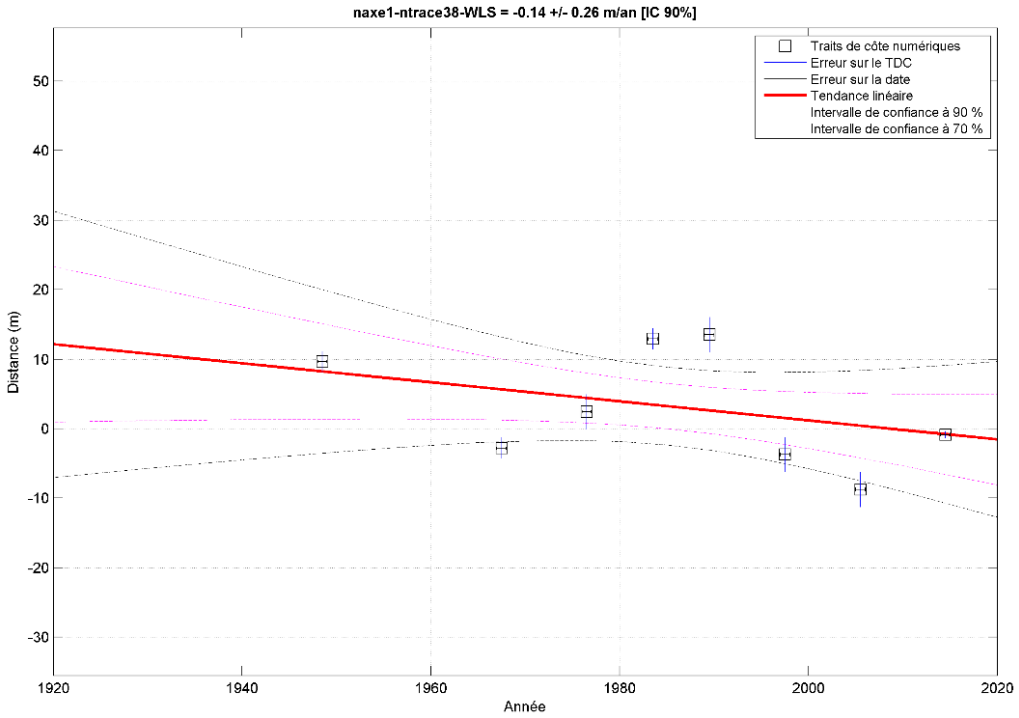


Figure 121. Calcul du taux d'évolution historique selon le WLS pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.3.3 *Moindres carrés repondérés (Reweighted least square – RLS)*

Dans le logiciel de calcul DSAS (WLR) et MobiTC (RLS), il est possible de calculer le RLS. Dans ce cas, il s'agit de ne pas tenir compte des positions de ligne de rivage et de trait de côte pour lesquelles la position s'écarte de plus ou moins l'écart type, puis de définir le modèle linéaire à l'aide de la méthode des moindres carrés (sans tenir compte de l'erreur, méthode non pondérée sur l'erreur). D'après notre compréhension, il pourrait s'agir d'une méthode intéressante lorsque les indicateurs de la position de la ligne de rivage sont liés à la position du niveau d'eau et donc plus variables (section 3.2). Cependant, les indicateurs utilisés au LDGIZC ne sont pas directement liés aux niveaux d'eau instantanés (lors de l'acquisition des images ou ayant précédés de peu l'acquisition), mais à des indicateurs plus stables tels que la ligne de végétation dense. Dans ce contexte, cette méthode, qui exclut des positions, n'apparaît pas avantageuse. Cette hypothèse nécessiterait d'être validée.

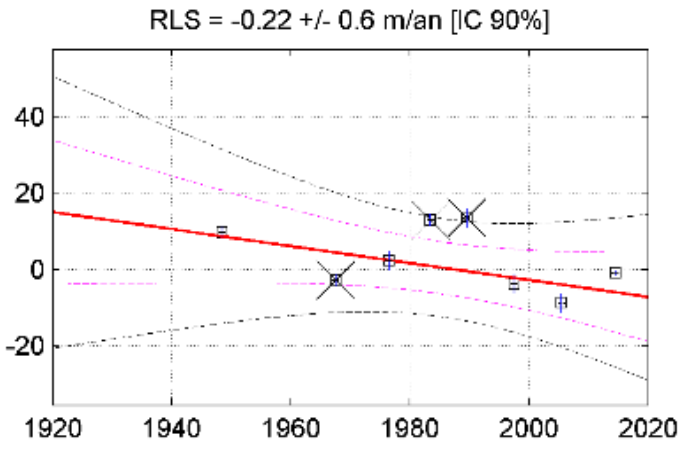


Figure 122. Calcul du taux d'évolution historique selon le RLS pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.3.4 *Moindres carrés pondérés repondérés (Reweighted weight least square – WRLS)*

La dernière variante consiste à ne pas tenir compte des positions de ligne de rivage pour lesquelles la position s'écarte de plus ou moins un écart type et de définir le modèle linéaire à l'aide de la méthode des moindres carrés pondérés (tient compte de l'erreur, méthode pondérée sur l'erreur).

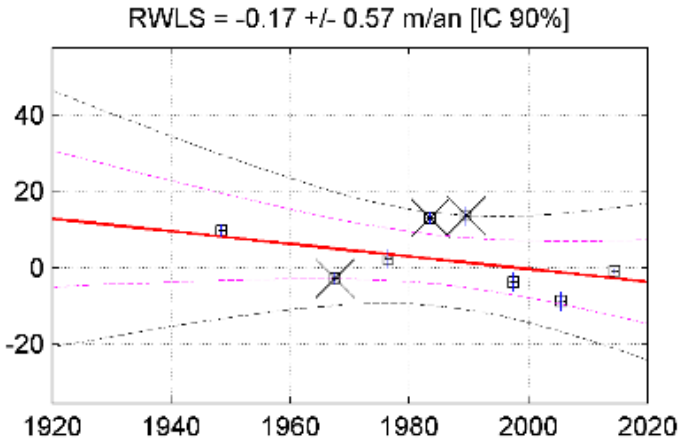


Figure 123. Calcul du taux d'évolution historique selon le RWLS pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.3.5 *Moindres écarts absolus (least absolute deviation – LAD) et Moindres écarts absolus pondérés (weighted least absolute deviation – WLAD)*

Il s'agit d'une méthode de régression linéaire dans laquelle les valeurs extrêmes ont un poids moins important. Elle s'effectue en minimisant la somme de la valeur absolue des résidus. La méthode peut aussi s'effectuer en pondérant les données (WLAD).

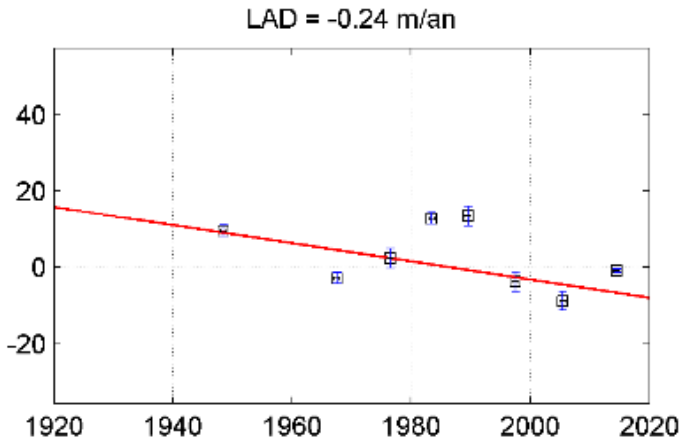


Figure 124. Calcul du taux d'évolution historique selon le LAD pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

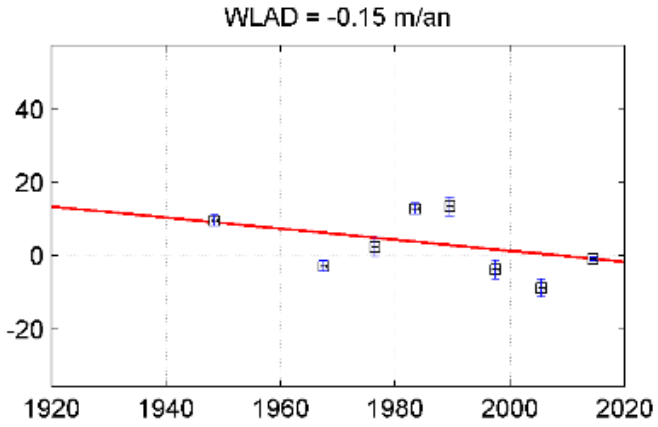


Figure 125. Calcul du taux d'évolution historique selon le WLAD pour le transect 38 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.4 Jackknifing (JK)

Le calcul du taux d'évolution historique à partir de la méthode par jackknifing implique le calcul de toutes les droites de régression (OLS) possibles en omettant un point à chaque calcul puis de moyenner toutes les pentes ainsi obtenues (Dolan et al., 1991). Il s'agit d'une méthode similaire à celle de la régression linéaire, à laquelle on ajoute un niveau de calcul. Comme la régression linéaire, elle présente l'avantage d'utiliser toutes les positions de la ligne de rivage pour calculer le taux historique. Dans ce cas, par contre, cette méthode a l'avantage d'accorder moins de poids aux données regroupées et aux valeurs extrêmes.

À la lumière de nos connaissances, cette méthode a parfois été utilisée afin de comparer les résultats de différentes méthodes statistiques, mais son utilisation pour réaliser des projections est limitée.

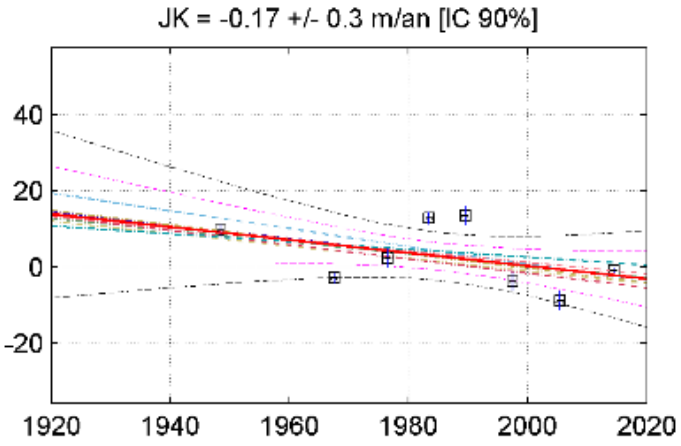


Figure 126. Calcul du taux d'évolution historique selon le JK pour le transect 35 du site de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.5 MDL (minimum description length)

Cette méthode statistique est plus complexe que la régression linéaire. Son principal intérêt vient du fait qu'elle permette d'identifier le meilleur modèle/équation (obtention du meilleur R^2) reproduisant l'évolution de la ligne de rivage tel qu'observé à l'aide des photographies historiques (Crowell et al., 1997). Il peut s'agir de modèle linéaire ou polynomial. Les étapes de la méthode sont décrites dans Fenster et al. (1993). Bien qu'un modèle polynomial puisse être identifié comme le meilleur, l'équation de celui-ci n'est jamais utilisée directement pour réaliser des projections. Les modèles

identifiés par MDL, lorsqu'ils ne sont pas des modèles linéaires, permettent d'identifier la date du changement dans la tendance selon le modèle en question (point critique ou *critical point*) (figure 127). Selon cette méthode, les projections ne sont pas réalisées à partir de l'équation du meilleur modèle, mais plutôt selon une régression linéaire. La première option consiste à réaliser une régression linéaire à partir du point critique le plus récent et d'omettre toutes les observations précédentes. Il s'agit alors de la « *zero weight line* » sur le graphique B de la figure 127. La seconde option consiste à réaliser une régression linéaire accordant un poids réduit aux points qui précèdent le point critique. Dans ce cas, il s'agit de la « *low weight line* » sur le graphique B de la figure 127. C'est le taux calculé à partir de l'une ou l'autre de ces régressions qui est utilisé dans l'équation de base des projections.

Les résultats obtenus grâce à cette méthode ont été analysés par Crowell et al., 1997. Ces derniers ont constaté que les prédictions réalisées à partir de régressions linéaires (OLS) ont été meilleures que celles réalisées à partir du MDL dans 67 % à 75 % des exemples testés. Même si les prédictions faites à l'aide de MDL ont parfois été meilleures que celle par OLS, elles étaient pires et extrêmement imprécises dans les autres cas. Aussi, les auteurs constatent que les prédictions faites selon les MDL de « *zero-weight* » étaient habituellement pires que celles faites avec le MDL « *low-weight* ». Enfin, la principale critique émise par Crowell et al. (1997) est que la méthode ne précise pas sur quel horizon de temps ces projections sont valables. En effet, on constate sur la figure 127 que les projections issues de cette méthode (évolution positive) ne vont pas nécessairement dans le même sens que la tendance historique (évolution négative).

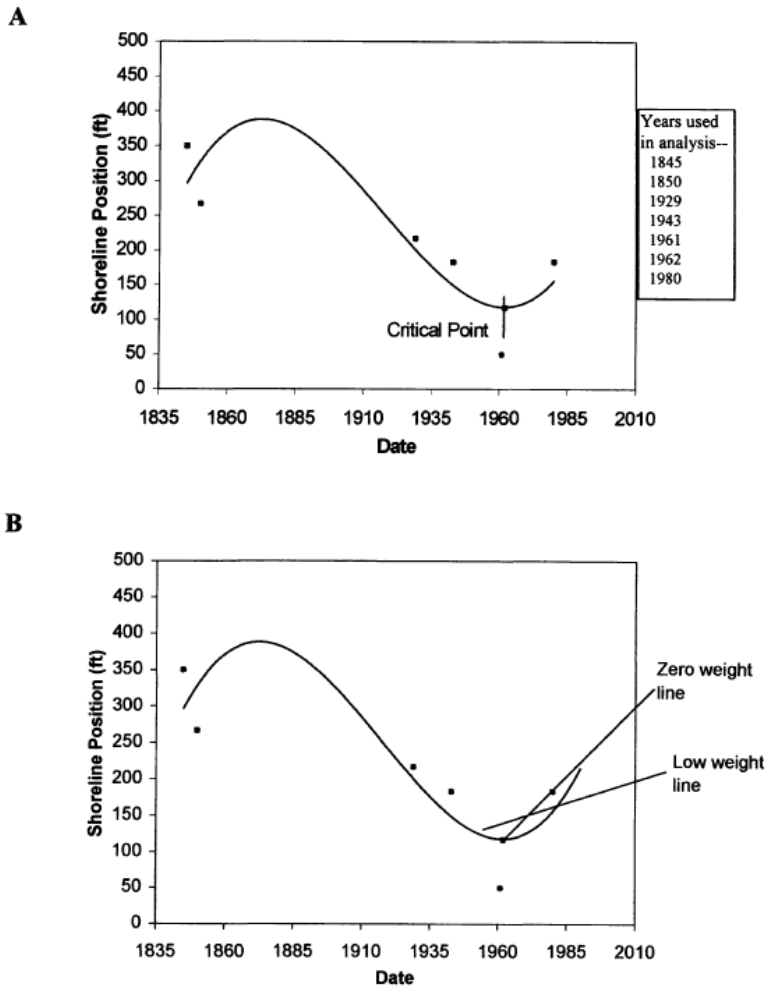


Figure 127. Projection à partir d'un modèle polynomial selon la méthode par MDL, tiré de Crowell et al., 1997

3.3.6 Autres méthodes statistiques pour le calcul des taux d'évolution

Les méthodes décrites brièvement ici ne sont que quelques exemples des autres méthodes statistiques de calcul des taux d'évolution. La littérature sur le sujet est vaste et il n'est pas indiqué ici d'en faire une revue exhaustive. Ces méthodes de calcul, rappelons-le, ne sont pas incluses dans les logiciels DSAS et MobiTC et n'ont pas été explorées dans le cadre de ce projet.

Ainsi, dans leur article de 2012, Goncalves et al. utilisent une méthode de calcul nommé le *neural netwok multilayer perception* (MLP) et une méthode

nommée *robust estimation model* (REM) au côté d'une régression linéaire (OLS) pour réaliser l'analyse de la cinétique de la ligne de rivage sur un site situé au Brésil. Lorsqu'ils comparent les résultats obtenus avec trois méthodes de calcul (REM, OLS, MLP) pour une prévision *a posteriori* à court terme, ce sont les taux calculés à partir du REM qui offrent les meilleurs résultats et les taux OSL qui donnent les moins bons résultats (figure 128).

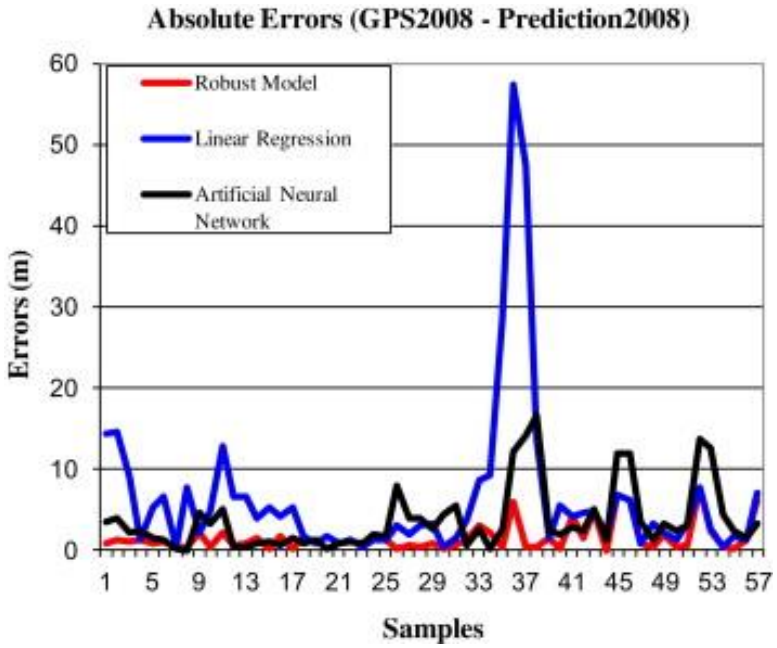


Figure 128. Résultats de Goncalves et al. (2012) : distance entre la ligne observée et la ligne prédite selon trois modèles

Dans le cas de BaMassoud et Byrne (2013), qui travaillent dans les Grands Lacs, les auteurs utilisent une méthode qu'ils nomment le *Lake Level Predictor* (LLP). Il s'agit d'un modèle linéaire basé sur les niveaux d'eau et qui, selon leurs résultats, performe bien pour les segments littoraux où la position de la ligne de rivage est fortement liée aux niveaux d'eau.

3.3.7 Application des méthodes statistiques pour le calcul des taux d'évolution sur le territoire nord-côtier

Lorsqu'il est question de projeter l'évolution côtière vers un horizon temporel donné, il ne s'agit pas de choisir des taux décrivant simplement l'évolution historique, mais bien de les choisir afin de projeter le plus adéquatement la position de la ligne de rivage dans le futur. Tel qu'indiqué plus haut, le taux d'évolution utilisé au LDGIZC a toujours été calculé à partir de la méthode EPR. Dans plusieurs cas, il s'agissait de la seule méthode possible puisque le taux était calculé sur seulement deux positions de ligne de rivage. Cependant, dès que l'on retient plus de deux positions de ligne de rivage, il est possible d'envisager différentes méthodes de calcul.

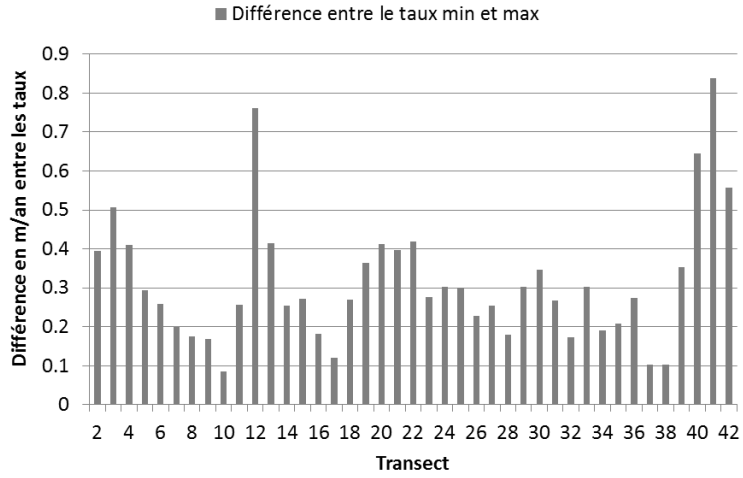
Les sous-sections suivantes permettent d'illustrer à partir d'exemple du territoire nord-côtier les différences entre les taux d'évolution obtenus selon différentes méthodes statistiques (section 3.3.7.1). Nous avons aussi voulu déterminer si l'utilisation de méthodes statistiques pondérées sur les erreurs était adéquate pour le projet (section 3.3.7.2). À la lumière de ces résultats, le choix des méthodes statistiques pouvant être utilisé pour ce projet fait l'objet d'une justification à la section 3.3.7.3.

3.3.7.1 *Différences entre les taux calculés selon différentes méthodes statistiques*

Afin de faire un choix éclairé quant aux différentes méthodes statistiques, nous avons exploré les résultats obtenus à l'aide de toutes les méthodes de calcul disponibles dans le logiciel MobiTC pour un site d'étude. Les différences entre les taux calculés selon les différentes méthodes statiques varient d'un site à l'autre. Nous présentons ici les résultats de Longue-Pointe-de-Mingan afin d'illustrer l'ordre de grandeur de ces différences.

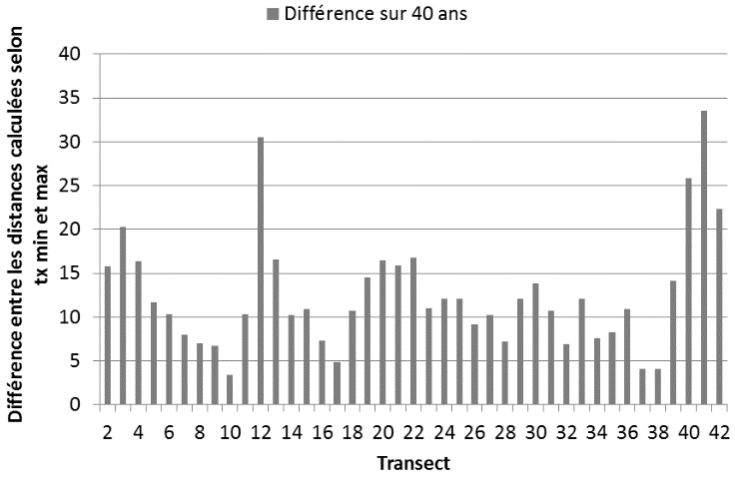
À Longue-Pointe-de-Mingan 1, les différences trouvées entre les taux calculés étaient somme toute assez importantes. Par exemple, pour un même transect (transect 3 à Longue-Pointe-de-Mingan) les taux d'évolution minimum et maximum, selon différentes méthodes de calcul, avaient un écart de 0,5 m (min. -1,78 m/an et max. -1,27 m/an). Ceci correspondrait à une différence de 20 m sur les projections (40 ans). Dans l'ensemble, toujours pour Longue-Pointe-de-Mingan 1, l'écart entre les taux calculés peut être aussi important que 0,84 m/an et est d'en moyenne 0,31 m/an. Une fois projetées sur 40 ans, ces différences se traduisent par des différences, en termes de distance, d'en moyenne 12,51 m et allant jusqu'à près de 34 m (figure 129 et figure 130).

Comme les taux minimum ou maximum ne sont pas toujours obtenus à partir des mêmes méthodes de calculs, l'effet du choix d'une méthode de calcul par rapport à tous les taux calculés diffère d'un transect à l'autre. Par exemple, sur la figure 131, qui illustre cette affirmation, on voit que le taux calculé le plus sévère a été obtenu à partir de la méthode LAD sur les transects du début (3, 4, 5 et 6, cercle bleu) alors que ce sont les méthodes de calcul WLAD et EPR qui donnent les taux les plus sévères devant les transects centraux (22, 23, 24 et 25, cercle bleu).



Statistiques descriptives des différences entre les taux	
Minimum	0,09 m/an
Maximum	0,84 m/an
Moyenne	0,31 m/an
Écart-type	0,16 m/an

Figure 129. Différence entre les taux minimum et maximum obtenus pour chaque transect, Longue-Pointe-de-Mingan 1



Statistiques descriptives des différences entre les taux	
Minimum	3,44 m/an
Maximum	33,56 m/an
Moyenne	12,51 m/an
Écart-type	6,59 m/an

Figure 130. Effet sur les distances de projection d'évolution côtière sur 40 ans selon l'utilisation du taux minimum ou maximum obtenu pour chaque transect, Longue-Pointe-de-Mingan 1

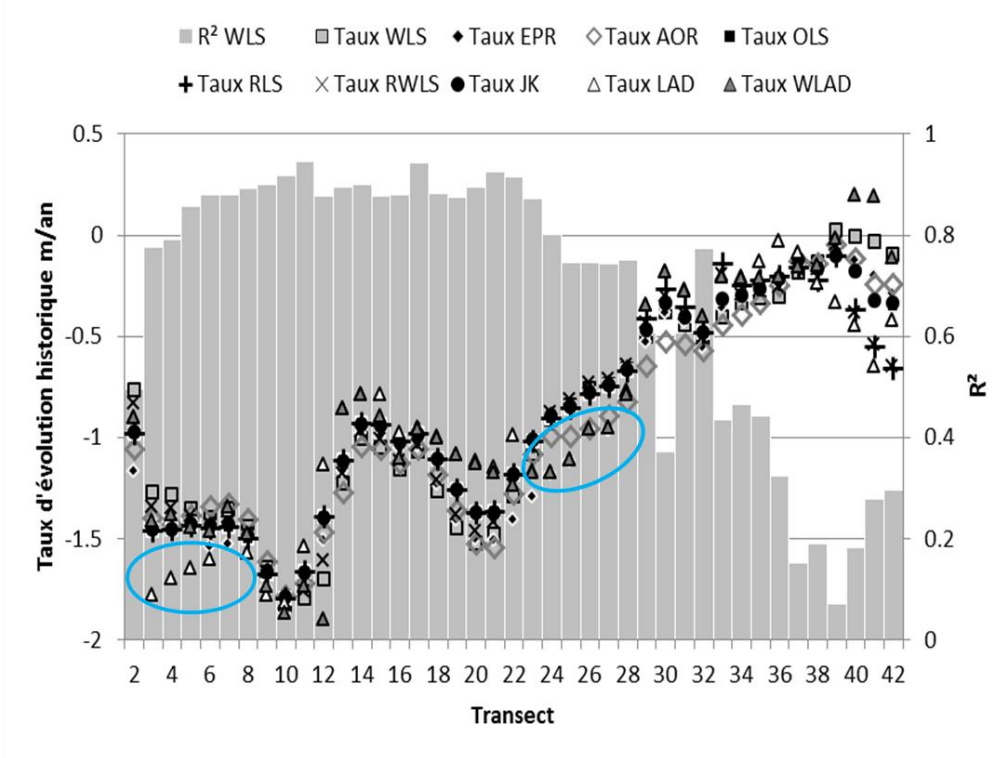


Figure 131. Taux calculés selon différentes méthodes pour les transects de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.3.7.2 *Différence entre les méthodes pondérées et les méthodes non pondérées*

Genz et al. (2007) affirment, au terme de leur revue des méthodes statistiques de calcul des taux d'évolution, qu'il est préférable d'utiliser des calculs pondérés, soit le WLS, RWLS ou le WLAD, lorsque les erreurs des positions des lignes de rivage sont connues et importantes (*major uncertainties*). Néanmoins, il n'est pas spécifié ce qui est entendu par « *major uncertainties* ». Ils indiquent, inversement, que dans le cas où les erreurs/incertitudes sont inconnues ou non quantifiables, les méthodes non pondérées constituent le seul choix possible.

Afin d'explorer plus en détail les différences entre une méthode pondérée ou une méthode non pondérée, les taux obtenus à l'aide de la méthode OLS (moindres carrés non pondérés) et de la méthode WLS (moindres carrés pondérés) ont été analysés (données de Gallix 1). Dans le cadre de ce projet,

les erreurs associées au positionnement des lignes de rivage sont petites puisque les distances entre les lignes de rivage et les lignes de base ont fait l'objet d'une correction pour limiter au minimum l'erreur de géoréférencement (±1 m pour chacun en résiduelle à la correction, au jugé). En conséquence, les erreurs sont assez petites. Le tableau 24 présente les erreurs évaluées pour les différentes positions de ligne de rivage de Gallix 1.

Tableau 24. Erreurs évaluées pour chacune des positions de la ligne de rivage pour Gallix 1

Année	Erreur ± m
1930	3
1970	3
1996	1
2001	3
2005	1
2010	1

Les taux d'évolution historiques OLS et WLS ont été calculés à partir des données historiques (toutes les lignes de rivage disponibles). Il se trouve que l'utilisation d'une méthode statistique pondérée (WLS) ou non (OLS) donne des résultats très similaires lorsque les taux calculés le sont sur une longue période (historique) ou alors lorsque le nombre de positions de ligne de rivage est relativement important (six dans ce cas). À la figure 132, on constate que les taux d'évolution ont, dans ce cas, toujours été dans la même direction (positif) et que les écarts entre ceux-ci étaient minimes avec des différences moyennes de l'ordre du centimètre (figure 133).

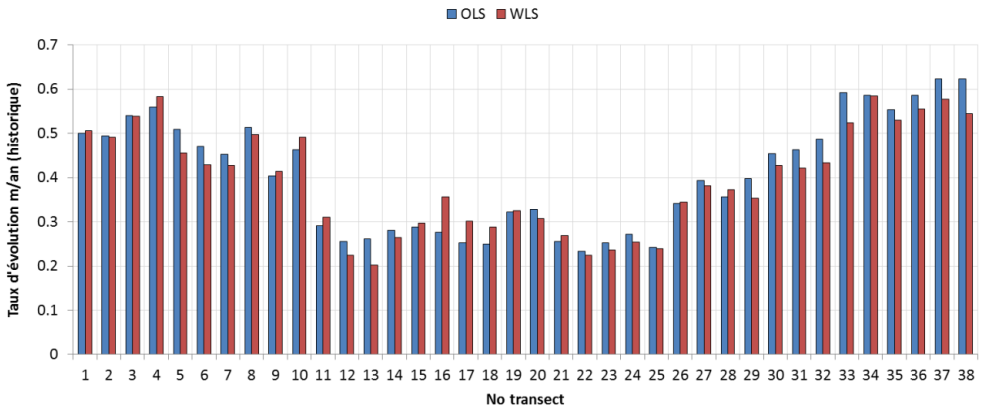


Figure 132. Taux calculés selon la méthode OLS et WLS, Gallix 1, période historique (toutes les lignes de 1930 à 2010)

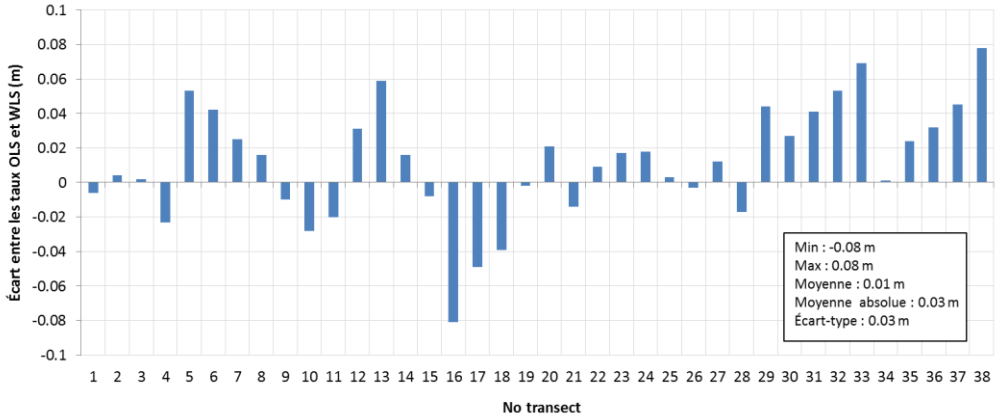


Figure 133. Écarts entre les taux calculés selon la méthode OLS et WLS, Gallix 1, période historique (toutes les lignes de 1930 à 2010)

Par la suite, ces calculs ont été répétés pour les trois autres périodes de calcul disponibles (1970-2009, 1996-2009 et 2001-2009). La figure 134 présente la différence entre les taux mesurés selon ces deux méthodes, et ce, pour les différentes périodes. On constate que l'écart entre les deux méthodes s'élève de manière considérable pour la période 2001-2009 avec des différences de plus de 1 m.

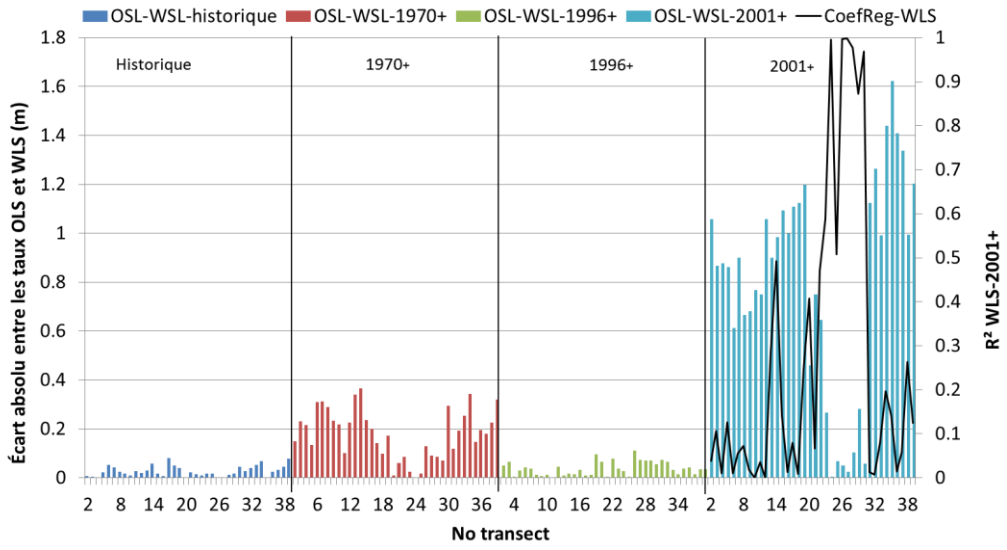


Figure 134. Écart entre les taux OSL et WLS pour différentes périodes

Pour la période 2001-2010 (trois lignes de rivage), les taux obtenus selon les deux méthodes statistiques ne sont pas toujours dans la même direction pour un même transect et les écarts entre les taux sont de l'ordre du mètre (figure 135). Par exemple, au transect 17, l'écart entre le taux OSL (+0,35 m/an) et le taux WLS (-0,76 m/an) est très important (1,11 m) en plus de ne pas être dans la même direction (positif vs négatif).

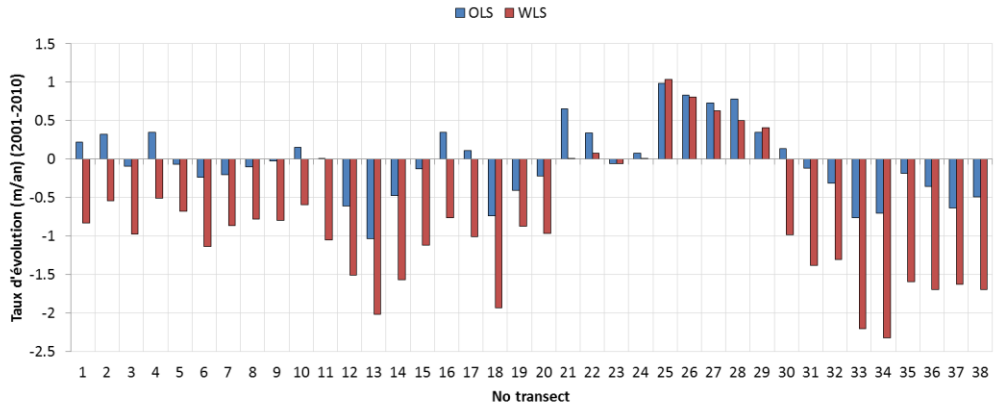


Figure 135. Taux calculés selon la méthode OLS et WLS, Gallix 1, période 2001-2009

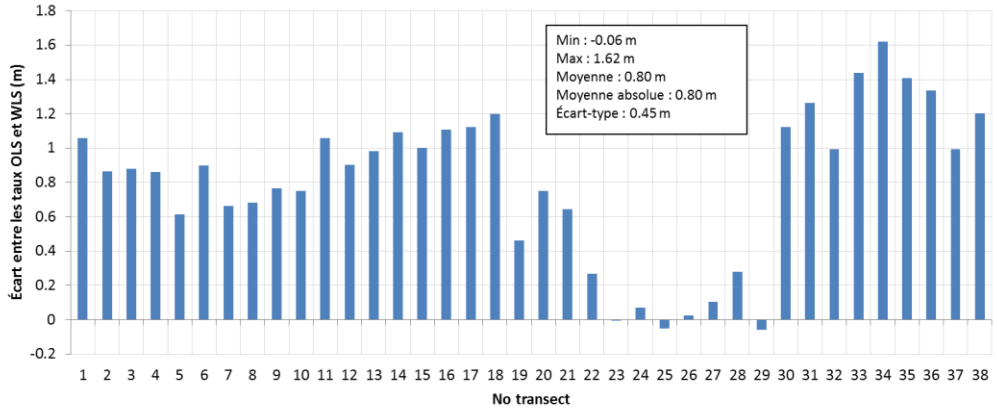


Figure 136. Écart entre les taux calculés selon la méthode OLS et WLS, Gallix 1, période 2001-2009

En considérant l'exemple du transect 17, on comprend que l'erreur associée à la position de la ligne de rivage en 2001 (résolution moins élevée, échelle 1:40 000 et surexposition de l'image), qui est plus importante que celles associées aux positions de 2005 et de 2010, fait en sorte que le taux d'évolution obtenu est négatif avec la méthode statistique pondérée WLS. Effectivement, bien que l'évolution entre 2001 et 2005 ainsi qu'entre 2001 et 2010 ait été positive, c'est l'évolution négative entre 2005 et 2010 qui ressort (figure 137). Ainsi, lorsque le nombre de positions de ligne de rivage est limité, une erreur associée à une année peut inverser la tendance qui aurait été obtenue par la méthode non pondérée (OLS).

Les différences entre les taux calculés sont plus importantes lorsque l'évolution du littoral a été non linéaire (changement de direction de l'évolution entre érosion et accumulation) comme dans le cas du transect 17. L'évolution du littoral, lorsqu'elle est plus linéaire, limite les différences entre les méthodes pondérées ou non. Par exemple, à la figure 138, les positions du littoral devant le transect 23 ont suivi une évolution plus linéaire et l'écart entre les deux méthodes était de seulement 0,27 m. Ce constat est aussi visible à la figure 134 : les différences entre les méthodes OLS et WLS (période 2001-2010 en turquoise) sont les moins élevées pour les transects où le R^2 est le plus élevé. En d'autres mots, quand l'évolution du littoral est non linéaire entre trois points, le fait d'attribuer un poids moins important à l'un d'eux peut faire en sorte que l'écart entre les taux d'évolution calculés par OSL et WLS soit très important. Bref, au-delà de la période choisie, c'est le nombre de points, leur distribution et les erreurs associées qui expliquent les résultats de

l'exemple utilisé ici. À la lumière des résultats obtenus, on comprend que pour des périodes pour lesquelles on compte trois positions de ligne de rivage et pour lesquelles les erreurs sont petites, il est peu avantageux d'utiliser la méthode de calcul pondérée (WLS). Cette conclusion ne va pas tout à fait dans le même sens que ce qui est avancé par Genz et al. (2007), qui favorisent les méthodes de calcul pondérées.

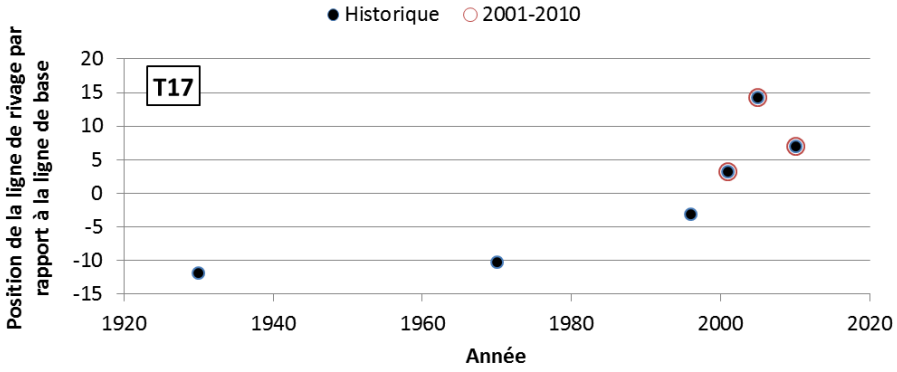


Figure 137. Évolution de la distance entre la ligne de base et la ligne de rivage devant le transect 17 de Gallix 1

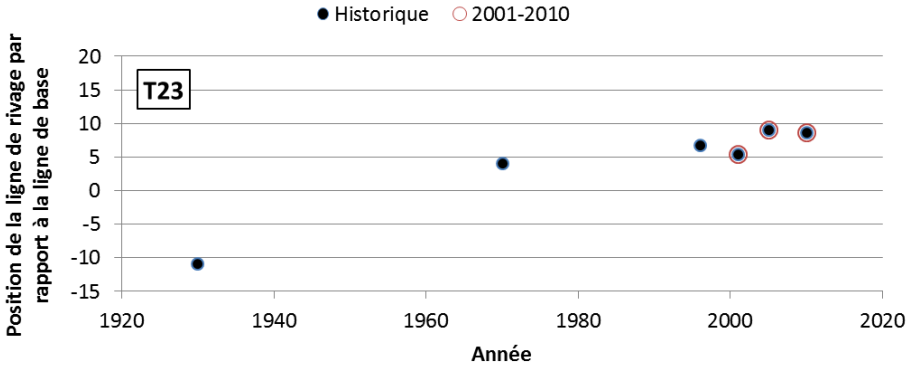


Figure 138. Évolution de la distance entre la ligne de base et la ligne de rivage devant le transect 23 de Gallix 1

3.3.7.3 *Choix méthodologique pour ce projet : méthodes statistiques pour le calcul des taux d'évolution à projeter*

Parmi les méthodes statistiques énoncées dans la littérature, nous excluons d'ores et déjà les méthodes LAD et WLAD. Bien que ces dernières soient recommandées par Genz et al. (2007), nous ne pouvons en faire de même. D'une part, le logiciel DSAS, le plus utilisé pour l'analyse de la cinétique de la ligne de rivage, ne permet pas d'effectuer les calculs du LAD et du WLAD. D'autre part, bien que le logiciel MobiTC permette les calculs du LAD et du WLAD, ils nécessitent un temps de calcul important. Dans l'expérimentation effectuée pour ce projet, le calcul des taux selon les méthodes de calcul LAD et WLAD n'a pas été possible pour tous les sites en raison de limites techniques. Ces calculs nécessitaient plus de mémoire que ce qui était disponible sur l'ordinateur utilisé. L'amélioration des outils informatiques et/ou l'ajout de cette technique dans le logiciel DSAS pourraient mener à reconsidérer les résultats obtenus selon ce type de calcul.

À la lumière de la littérature scientifique consultée, nous excluons aussi l'utilisation de la méthode AOR, qui s'avère la plus variable (Dean et Malakar, 1999 *in* Genz et al., 2007 ; Dolan et al., 1991), et la méthode MDL qui, malgré son intérêt pour caractériser la dynamique côtière, s'avère inadéquate pour le calcul des taux à utiliser pour réaliser des projections d'évolution côtière. Au terme de leur revue, Genz et al. (2007) proposent un arbre décisionnel pour choisir la méthode la plus adéquate pour le calcul du taux d'évolution historique et des projections ; ils ne suggèrent pas non plus l'utilisation de ces méthodes de calcul.

Enfin, compte tenu du fait que les erreurs attribuées aux positions de lignes de rivage sont petites pour tous les sites pour lesquels des projections sont réalisées et compte tenu des résultats obtenus à la section 3.3.7.2, nous excluons l'utilisation des méthodes pondérées, soit les méthodes WLS et WRLS.

Il est important de spécifier que la meilleure méthode statistique pour le calcul des taux à projeter est différente d'un site à l'autre, et ce, même à l'intérieur des limites d'un même site d'étude. Par exemple, dans un exercice de projections *a posteriori*[2], BaMassoud et Byrne (2013) observent que les taux calculés selon l'EPR donnent de meilleurs résultats sur certains segments alors que pour d'autres, c'est le taux calculé à l'aide d'une régression linéaire

[2] Projections *a posteriori* : démarche dans laquelle des projections sont réalisées à partir des lignes de rivage passées. Celle-ci permet de comparer la ligne connue et la ligne projetée selon différents taux et d'identifier quels ont été les taux permettant d'obtenir le meilleur résultat.

(OLS). Dans le cadre de cette étude menée sur le littoral d'un site relativement petit (Point Pelée, lac Érié, Ontario, Canada), les auteurs indiquent que : « local differences in shoreline response to environmental conditions can be significant in influencing which is the most accurate method for shoreline position prediction in the system in question ». Les auteurs concluent qu'il n'y a pas de méthode unique pouvant être appliquée, même sur un site d'étude de dimension limitée.

Dans le cadre de ce projet, les calculs ont été systématiquement réalisés à partir des méthodes OLS (LLR dans DSAS) et EPR. Ces deux méthodes font l'objet d'un usage répandu dans la communauté scientifique. Le choix des taux retenus pour réaliser les projections d'évolution côtières est fait en fonction des caractéristiques de l'évolution historique et de l'état actuel de la côte propres à chacun des sites d'étude. L'importance du regard d'expert est défendue dans la littérature notamment dans les publications de Pilkey et Cooper (2004).

3.4 Périodes pour le calcul des taux utilisés dans les projections

Dans la littérature scientifique, la période à partir de laquelle sont calculés les taux d'évolution historiques (utilisés ou non pour faire des projections) diffère d'un auteur à l'autre. Ce sont d'abord les données disponibles qui limitent l'étendue de cette période. Mais, au-delà de cette limite, les auteurs peuvent choisir ou non de diminuer l'étendue de cette période en excluant, par exemple, les positions de ligne de rivage les plus anciennes (figure 139). Ainsi, certains auteurs soutiennent qu'il est nécessaire d'utiliser la plus longue période d'enregistrement disponible (par ex., Douglas et al., 1998) alors que d'autres indiquent que les périodes de calcul doivent tenir compte des changements d'origine naturelle ou anthropique majeurs et, donc, être limitée (par ex., Cenci et al., 2013 ; Bernatchez et al., 2013). Bref, les arguments sur les choix de la période sont tous valables puisqu'ils tiennent compte des objectifs des travaux et des spécificités des sites d'étude.

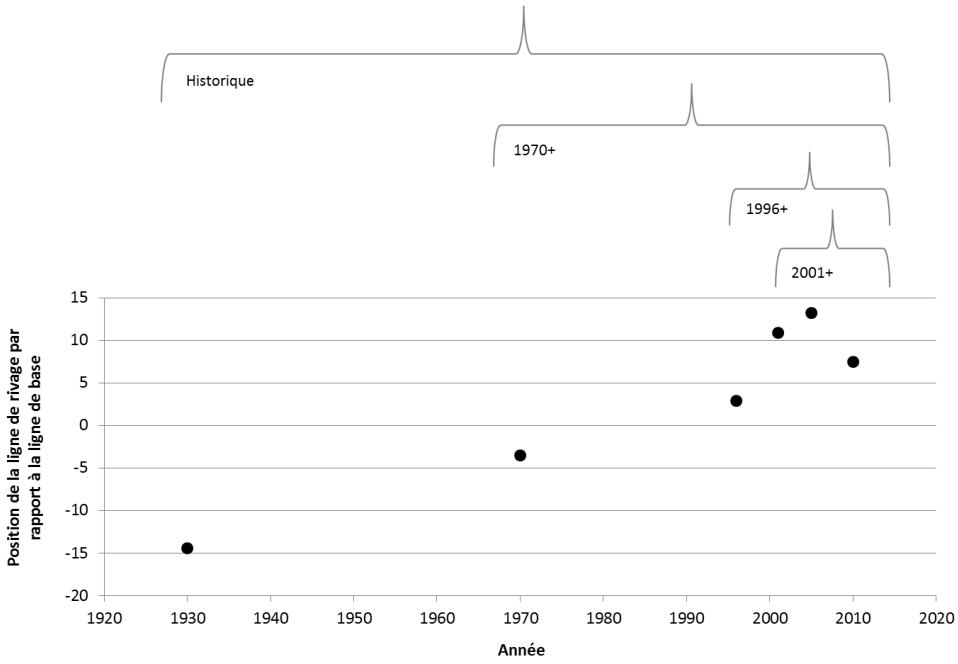


Figure 139. Illustration des périodes pouvant être retenues pour les calculs de taux d'évolution à utiliser dans l'équation des projections d'évolution côtière, exemple issu de Gallix 1, transect 20

Par ailleurs, les auteurs peuvent aussi choisir d'exclure certaines positions de leur analyse. Les positions extrêmes de la ligne de rivage ou les positions mesurées directement après l'avènement d'une tempête sont parfois exclues. Les arguments et les résultats soutenant le choix d'exclure ou non certaines positions sont nombreux dans la littérature, mais ne seront pas présentés ici. Dans le cadre de ce projet, notons simplement qu'aucune position de ligne de rivage n'a été rejetée.

Comme pour les méthodes statistiques, nous avons voulu quantifier les différences obtenues entre les taux d'évolution en fonction de l'utilisation de périodes différentes (section 3.4.2). Mais d'abord, la section 3.4.1 propose un retour sur les différentes périodes de calcul utilisées au LDGIZC.

3.4.1 Périodes de calcul utilisées dans différents projets précédemment réalisés au LDGIZC pour le calcul des taux à utiliser dans l'équation de projections d'évolution côtière

Au cours des projets menés par le LDGIZC, différentes périodes ont été choisies pour réaliser les calculs des taux d'évolution à utiliser pour la réalisation de projections d'évolution côtière. Notons que c'est en 2008, à travers le projet « *Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques* », que l'évolution historique a été réalisée à des fins de caractérisation de la dynamique côtière **et** de projections pour la première fois au laboratoire. Rappelons que dans tous les cas, c'est la méthode statistique EPR qui a été utilisée.

Bien qu'il existe des différences méthodologiques entre les projets réalisés au LDGIZC, il s'agissait chaque fois d'ajuster ou d'améliorer la méthode. L'objectif était chaque fois d'intégrer les connaissances des sites d'étude ainsi que le contexte de changements climatiques aux projections d'évolution côtière grâce au choix éclairé de la période sur laquelle le taux d'évolution devait être calculé, réduisant ainsi une des limites de l'approche empirique.

Notons que plusieurs des périodes retenues au LDGIZC pour le calcul des taux d'évolution à projeter sont récentes et comptent un nombre plus ou moins important d'années. Par exemple, dans Bernatchez et al. (2013), un projet réalisé sur la péninsule de Penouille dans le Parc Forillon, les auteurs indiquent que la durée de la période 1993-2010 a été jugée suffisamment longue pour bien représenter les cycles d'avancées et de reculs (17 ans). À ce sujet, Ferreira et al. (2006), partagent aussi ce point de vue et affirment que : « the use of a decadal time scale (12 years for the cases test) for shoreline evolution analysis is sufficient to integrate most of long-term causes of coastal evolution and largely reduces the influence of short-term (inter-annual) shoreline fluctuations due to, for example, the effects of smaller storms ».

Les sous-sections présentent les différentes périodes ayant été retenues au LDGIZC de même que le contexte qui justifiait ces choix.

3.4.1.1 *Période historique (taux EPR sur la période historique)*

Dans certains travaux et scénarios retenus au LDGIZC, l'utilisation de la période historique pour projeter l'évolution côtière a été retenue. Dans la plupart des cas, cette option correspondait à un scénario parmi d'autres, scénario selon lequel l'évolution future serait conforme à la tendance calculée selon cette méthode (scénario probable dans Bernatchez et al., 2008 ; Bernatchez, 2012b ; Boucher-Brossard et Bernatchez, 2013).

3.4.1.2 *Période d'évolution la plus rapide ou la plus lente (taux EPR sur intervalle d'évolution la plus rapide (si érosion) ou la plus lente (si accumulation))*

Dans le cadre de certains projets (par ex., Bernatchez et al., 2008 ; Bernatchez et al., 2012b), figuraient parmi les scénarios des projections basées sur le taux d'évolution négatif le plus rapide pour les côtes en érosion et le taux d'évolution positif le plus lent pour les côtes en accumulation. Ici, la période utilisée est donc variable d'un site à l'autre. Pour ce faire, le taux EPR de tous les intervalles disponibles doit être calculé préalablement. La période utilisée pour le calcul compte donc seulement deux positions et varie entre les unités géomorphologiques homogènes[3] (segment côtier pour les projections). Le choix du taux le plus rapide (érosion) est porté par le principe de précaution qui permet de connaître les secteurs vulnérables si la côte évoluait à la vitesse la plus rapide ayant été mesurée durant l'historique et ce, alors que les auteurs sont conscients qu'il ne s'agit probablement pas de la situation la plus probable (ex. Ferreira et al., 2006).

3.4.1.3 *Période choisie selon l'analyse littoral-climat (taux EPR sur la période choisie)*

Le choix de l'intervalle à utiliser pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière peut aussi être réalisé au jugé en fonction des connaissances sur le milieu et de l'évolution du climat. Ainsi, une des approches développées au LDGIZC consiste à choisir la période à utiliser pour

[3] Définition de « unités géomorphologiques homogènes » (aussi nommées zones homogènes) tirée de Bernatchez et al. (2015) : « [Les unités géomorphologiques homogènes] s'apparentent aux *cliff behavior units* de Lee et Clark (2002), qui représentent des sections de falaises comprenant une géologie et une hydrodynamique similaire. Les caractéristiques de l'unité sont définies selon le type de côte, la composition lithologique et stratigraphie de la côte, les vitesses de déplacement du littoral et le patron d'évolution côtière. L'identification des unités géomorphologiques homogènes doit aussi s'effectuer en tenant compte des limites des cellules hydrosédimentaires et de la direction du transport sédimentaire par la dérive littorale ».

le calcul du taux d'évolution en se basant sur une analyse combinée littoral-climat. Le choix de l'intervalle pour le calcul du taux (méthode EPR) résultait d'une démarche reposant sur : i) l'analyse de l'évolution du climat (données existantes des stations météorologiques telles que températures, précipitations, vents, événements météorologiques extrêmes) ; ii) l'évolution de la hausse du niveau marin relatif ; iii) l'analyse de l'évolution du littoral ; iv) l'identification et la quantification des facteurs clés d'évolution ; et v) le couplage climat-érosion et projection du littoral. La prémisse sous-tendant cette approche est qu'il est probable que l'évolution future du littoral corresponde à l'évolution du littoral d'une période au cours de laquelle les facteurs climatiques clés de l'évolution du système ont été similaires ou comparables (ou le plus proche) à ce qui est attendu dans un contexte de changement climatique. Cette approche a été élaborée dans Bernatchez et al. (2008) puis a été reprise et améliorée ou adaptée au cours de projets subséquents. Selon cette approche, la période retenue pour le calcul du taux n'était pas nécessairement une période récente. Néanmoins, elle l'était généralement. Une variante ayant déjà été utilisée a été de simplement prendre l'intervalle le plus récent (section 3.4.1.3.1) ou la période récente (section 3.4.1.3.2).

3.4.1.3.1 Intervalle le plus récente : considérations climatiques (taux EPR sur l'intervalle le plus récent)

Dans le cadre de certains projets, l'analyse climat-littoral n'a pas nécessairement fait l'objet d'une analyse détaillée (incluant l'analyse statistique climatique et d'évolution côtière sur tous les intervalles disponibles). Les taux d'évolution étaient alors calculés à partir du dernier intervalle disponible, c'est-à-dire le plus récent. Par exemple, dans Boucher-Brossard et Bernatchez (2013), l'un des scénarios de projection possible était basé sur le taux d'évolution calculé entre 2000 et 2012. Ce type de scénario a été choisi lorsqu'il était vraisemblable que la côte évolue au même rythme que l'intervalle le plus récent puisque cette période était représentative des conditions climatiques projetées pour le futur. Dans ce cas, seulement les lignes de rivage tracées sur les deux dernières années disponibles sont utilisées.

3.4.1.3.2 Période récente : considérations climatiques (taux EPR-intervalle récent)

Une version similaire à la précédente consiste à utiliser une période récente (et non *la plus* récente). Par exemple, dans Bernatchez et al. (2013), c'est la période comprise entre le début des années 1990 (1993) et l'actuel (position de la ligne de rivage la plus récente disponible, soit 2010) qui a été choisie pour le calcul du taux. Encore une fois, il s'agit de cibler une période pour

laquelle les conditions climatiques sont semblables à ce qui est prévu dans le contexte des changements climatiques. Dans ce cas, on peut compter plusieurs lignes de rivage (plus de 2) durant la période choisie.

3.4.2 Différences entre les taux calculés selon différentes périodes

Le choix de la période pour réaliser les calculs des taux d'évolution qui seront utilisés dans l'équation de projections d'évolution historique influence grandement les résultats obtenus. Afin d'illustrer l'impact de ce choix sur les taux d'évolution des équations, ceux-ci ont été calculés pour toutes les périodes pour le site d'étude de Gallix 1. Il s'agit en fait de calculer les résultats de l'évolution historique en réduisant progressivement la période sur laquelle les calculs sont effectués. Chaque fois, la ligne de rivage la plus ancienne est retirée pour déterminer la période suivante (figure 139**)**.

Les résultats suivants montrent clairement que le choix de la période pour les calculs des taux d'évolution influence aussi les taux calculés. Dans l'exemple de Gallix 1, les taux EPR et OLS ont été calculés pour les différentes périodes temporelles. Les figures 40 et 41 présentent les résultats obtenus. Si l'on considère le taux minimum et le taux maximum calculés (figures 40 ou 41) pour un transect selon une même méthode statistique (EPR ou OLS), mais pour des périodes temporelles différentes, l'écart est élevé, sans compter que cet écart implique dans certains cas le passage entre un taux positif et un taux négatif (ex. transect 14, figure 141). La figure 142 montre que dans l'exemple de Gallix 1, le choix de la période de calcul implique des écarts allant jusqu'à plus de 1 m. En moyenne, l'écart entre le taux minimum et le taux maximum calculé pour les différentes périodes est de 0,69 m (EPR) et de 0,80 m (OLS). La différence dépasse parfois 1 m.

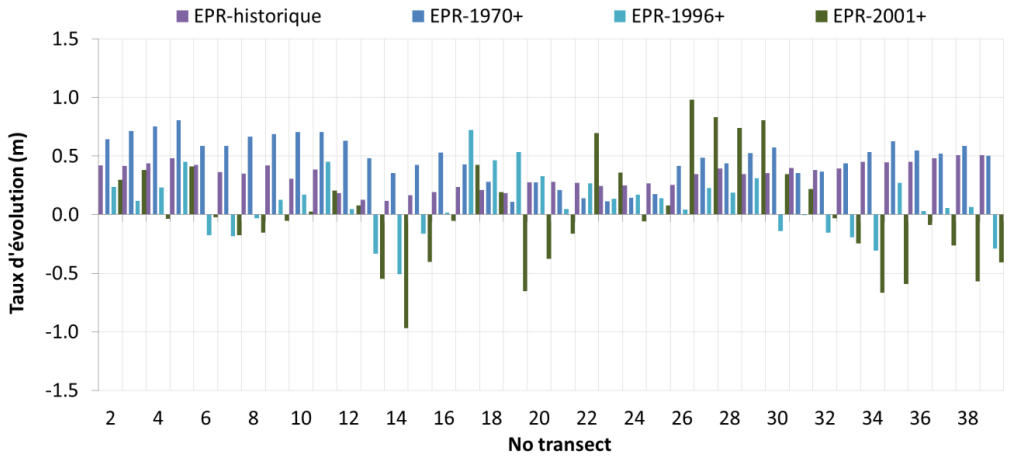


Figure 140. Taux EPR calculés pour les différentes périodes temporelles, Gallix 1

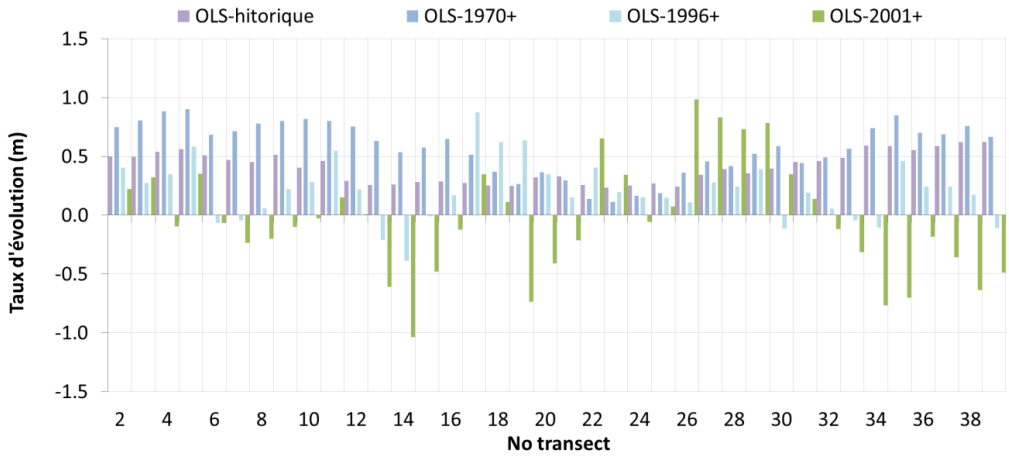


Figure 141. Taux OLS calculés pour les différentes périodes temporelles, Gallix 1

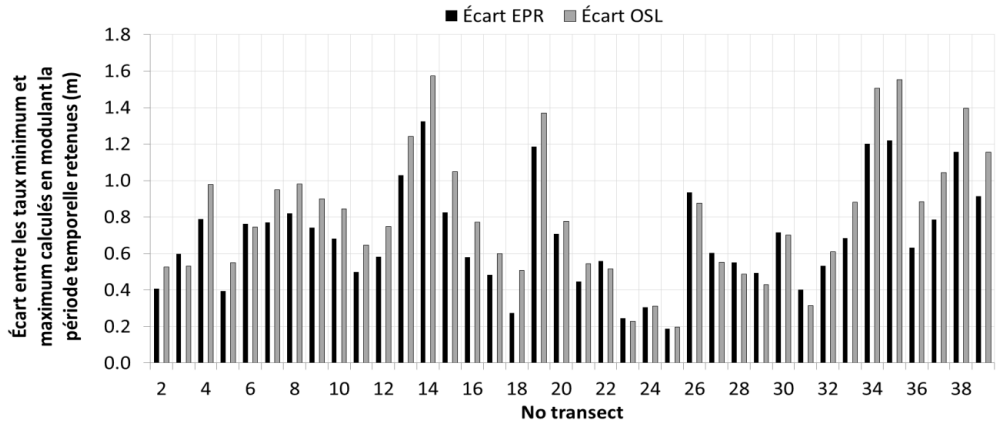


Figure 142. Écart entre le taux minimum et le taux maximum calculé selon différentes périodes temporelles

3.4.3 Choix méthodologique pour ce projet : période pour le calcul des taux

De manière général, le choix de la période d'analyse pour le calcul des taux d'évolution à projeter doit tenir compte des spécificités du milieu. Il est essentiel de considérer les impacts des changements environnementaux (bilan sédimentaire par exemple) et anthropologiques qui auraient eu un impact significatif sur la dynamique côtière (ex. Cenci et al. 2013 ; Bernatchez et al., 2013). L'analyse de la dynamique côtière à l'échelle historique doit aussi être réalisée afin d'identifier le mode d'évolution de la côte de même que les changements de tendance ayant pu survenir (par ex., Ferreira et al., 2006). C'est seulement à la lumière de l'ensemble de ces connaissances que le choix de la période à utiliser pour le calcul des taux d'évolution peut être réalisé.

Dans le cadre de ce projet, sauf avis contraire, il a été jugé nécessaire que la période retenue pour le calcul des taux à projeter réponde, en plus des considérations énumérées au paragraphe précédent, à deux critères. Premièrement, lorsque le mode d'évolution est cyclique, la période doit couvrir des cycles d'avancées et de reculs. Deuxièmement, la période doit être suffisamment longue pour intégrer les vitesses de recul les plus rapides ayant été observées dans les limites du site d'étude. Ce critère permet de s'assurer que les taux projetés tiennent compte des zones et des vitesses d'érosion sévère qui ont eu cours par le passé et ainsi de tenir compte de la mobilité de ces zones. Le choix de la période pour le calcul des taux sera spécifié et justifié au début de chaque section relative aux projections d'évolution côtière de chaque site d'étude (section 3.7).

3.5 Méthode de déplacement de la ligne de rivage : forme de la ligne de rivage de la projection

La morphologie de la ligne de rivage projetée peut différer en fonction de la méthode retenue pour réaliser les projections. Il existe principalement deux méthodes possibles. La première consiste à projeter une ligne « en bloc » pour un segment homogène et la seconde, à projeter une ligne en appliquant les taux d'évolution calculés pour chacun des transects, mais en ayant appliqué une moyenne mobile. Les sections suivantes décrivent ces méthodes.

3.5.1 Projections en « blocs »

La figure 143 présente une projection « en bloc » où on voit ce qu'il advient si l'on projette la ligne de rivage en fonction des taux d'évolution uniques par segment (moyenne des taux des transects associés à chacun des segments). Puisqu'ils évoluent à des vitesses différentes, la ligne projetée est scindée. Sur l'exemple de la figure 143, le tracé résultant serait scindé en deux à la jonction entre une zone en érosion (taux d'évolution négatifs) et une zone en accumulation (taux d'évolution positifs). Dans les travaux réalisés par le LDGIZC, on compte quelques projets pour lesquels cette méthode avait été retenue (par ex., Bernatchez et al., 2008). Les segments côtiers auxquels est appliqué un taux d'évolution unique constituent des unités géomorphologiques homogènes (Bernatchez et al., 2015). Cette méthode permet de conserver une morphologie cohérente pour chacune des unités, mais ne permet pas la production d'un tracé morphologiquement cohérent à l'échelle d'un site d'étude.

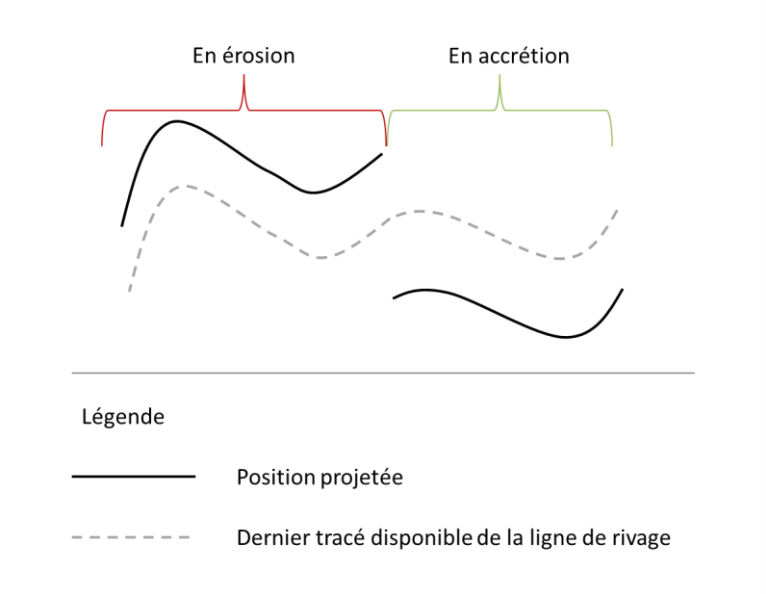


Figure 143. Schéma du problème lié à la conservation d'une cohérence morphologique lors des projections d'évolution côtière

3.5.2 Projection selon une moyenne mobile

À notre connaissance, la seule méthode qui permette de conserver une morphologie cohérente sur l'ensemble d'un site d'étude est de lisser l'évolution à l'aide d'une moyenne mobile. Au LDGIZC, le lissage s'effectue généralement sur cinq transects placés au 50 m (distance totale de 250 m). Cette méthode est aussi utilisée par bon nombre d'auteurs dans la littérature scientifique. Par exemple, Ferreira et al. (2006) utilisent une moyenne mobile sur trois transects (250 m entre les transects, 750 m au total) et Anderson et al. (2015), une moyenne mobile sur cinq transects (20 m, 100 m au total). Tel que précisé dans Boucher-Brossard et Bernatchez (2013), le lissage doit être réalisé uniquement entre les transects voisins pour lesquels le type de côte est similaire. Par exemple, le passage d'une moyenne mobile sur cinq transects où certains traversent une côte à terrasse de plage et certains, un marais maritime, ne serait pas adéquat.

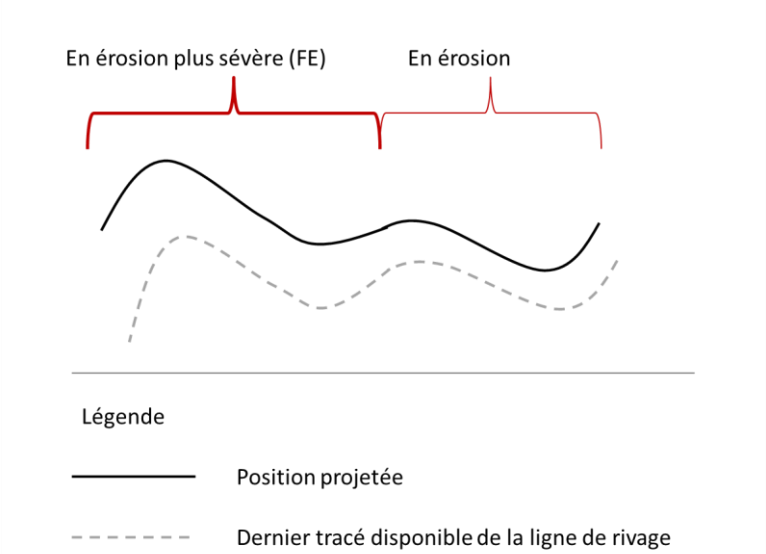


Figure 144. Schéma de la modification de la morphologie de la ligne de rivage rendue possible grâce au lissage par moyenne mobile

Cette méthode par moyenne mobile permet de projeter une ligne de rivage morphologiquement cohérente pour l'ensemble d'un site d'étude. En effet, grâce à cette méthode, on obtient une ligne de rivage projetée qui est continue. De plus, elle permet une modification de la forme de la ligne de rivage initiale en fonction des vitesses d'évolution projetées.

3.5.3 Choix méthodologique pour ce projet : méthodes de déplacement/projection de la ligne de rivage (morphologie)

Le lissage a été effectué en utilisant les taux mesurés de part et d'autre de chaque transect sur une longueur de 250 m, ce qui équivaut à deux transects de chaque côté en plus du transect lui-même (espacement entre les transects, 50 m).

3.6 Modification de l'équation de base et ajout de variables cartographiques complémentaires

L'équation de base présentée à la section 3.1.3 peut être adaptée et complétée grâce à l'ajout de variables complémentaires. Celles-ci peuvent modifier la ligne projetée (ajustement sur le taux par exemple) ou être des variables cartographiques complémentaires (zones et lignes) qui s'ajoutent aux cartes de projection. Le choix des variables complémentaires varie en fonction des caractéristiques des sites d'étude et des objectifs visés par les études.

Les sous-sections suivantes décrivent quelques-unes des variables complémentaires (revue non exhaustive) pouvant être intégrées à l'équation de base ou à la cartographie.

3.6.1 Modification de l'équation de base : ajustement du taux d'évolution en fonction des vitesses d'évolution historiques

Dans le cas des falaises de Rivière Saint-Jean à l'étude dans Boucher-Brossard et Bernatchez (2013), l'évolution unidirectionnelle de l'évolution de la côte (les falaises ne font que reculer) a permis d'intégrer, à l'équation de base, le changement de vitesse d'évolution qui était observée. Cette démarche repose sur l'analyse de l'évolution de la vitesse de recul des falaises entre chacun des intervalles. Pour ce faire, le calcul des taux par intervalle s'effectue à l'aide de la méthode par EPR. Puis, une droite de régression linéaire est ajustée sur ces données. La pente de cette droite quantifie l'évolution moyenne annuelle de la vitesse de recul. La figure suivante présente schématiquement l'intégration d'une vitesse d'accélération à la projection future (figure 145). Il s'agit d'une manière d'intégrer les changements climatiques à la projection d'évolution côtière pour ce type de côte (falaises).

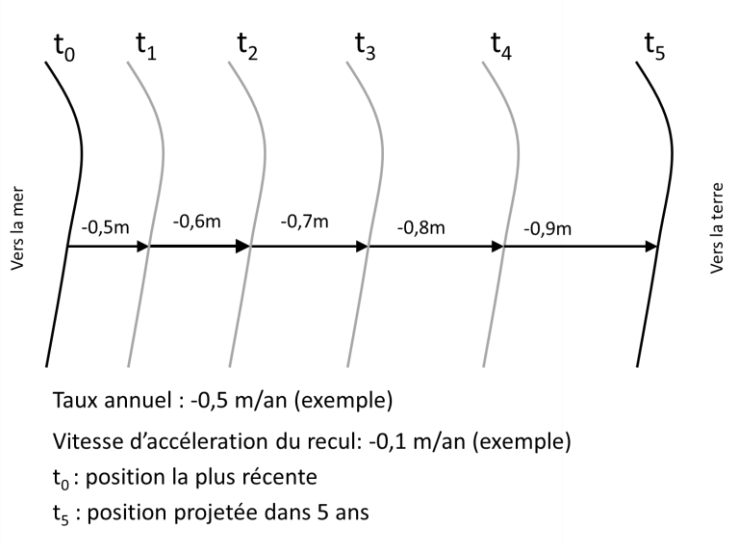


Figure 145. Schéma représentant l'intégration d'une vitesse d'accélération dans les projections d'évolution côtière

3.6.2 Modification de l'équation de base : ajustement du taux d'évolution en fonction des variations du niveau marin relatif

Les méthodes qui permettent d'intégrer l'évolution du niveau marin relatif sont actuellement en développement et soulèvent l'intérêt de plusieurs chercheurs en raison de l'importance de la hausse du niveau de la mer prévue dans le contexte des changements climatiques (Nicholls et al., 2007 ; Rahmstorf, 2007 ; Vermeer et Rahmstorf, 2009). Quelques méthodes ont été explorées jusqu'ici dans la littérature scientifique, mais aucune, à notre connaissance, n'a été jugée satisfaisante ni ne fait l'objet d'un consensus. Cette section a pour but, néanmoins, de présenter quelques-unes de ces approches.

Une approche empirique a été développée pour intégrer l'effet de la hausse du niveau de la mer sur l'évolution côtière. Hwang (2005 *in* Anderson et al., 2015) propose de multiplier le taux d'évolution historique par un facteur d'ajustement empirique. Par exemple, pour un site d'étude où on prévoit une accélération de 10 % de la hausse du niveau marin entre l'historique et le futur, le taux d'évolution historique sera lui aussi augmenté de 10 %. Anderson et al. (2015) indiquent que cette approche ne permet pas d'accélération et assume que l'effet de la hausse est proportionnel au taux d'évolution côtière historique, ce qui n'est pas physiquement justifiable.

Un grand nombre d'auteurs ont choisi d'utiliser la loi de Bruun (1962) pour intégrer l'impact de la hausse de niveau de la mer aux projections d'évolution côtière, et ce, malgré les limites de la méthode et les nombreuses critiques qu'elle soulève (Cooper et Pilkey, 2004 ; Davidson-Arnott, 2005). Parmi ceux-ci, Ferreira et al. (2006) proposent l'ajustement du taux d'évolution côtière à partir de la loi de Bruun pour positionner les *set-back lines* (marge de sécurité, érosion et submersion), dans un environnement sableux. Ils projettent la position de la ligne de rivage en fonction des taux d'évolution historiques, y ajoutent un recul attribuable à la hausse du niveau marin via la loi de Bruun et une zone délimitée à partir des équations de *runup (*jet de rive*)* de Battjes (1971) pour un temps de retour de 50 ans. L'utilisation de plusieurs modèles simples qui permettent, à première vue, d'intégrer l'évolution côtière, la hausse du niveau marin et les vagues est attrayante. Or, selon les critiques émises par Pilkey et Cooper (2004) sur la loi de Bruun, ceux-ci donnent des résultats inexacts. Anderson et al. (2015), quant à eux, appliquent un modèle hybride géométrique-historique (équation + taux d'évolution historique), lequel sera notamment repris par Spirandelli et al. (2016). Ce modèle n'utilise pas Bruun, mais une équation d'une forme similaire soit le modèle géométrique nommé R-DA proposé par Davidson-Arnott (2005).

Dans le contexte nord-côtier où les stocks sédimentaires hérités de la dernière glaciation sont abondants, l'utilisation d'un modèle (Brunn) qui ne tient pas compte de la mobilité longitudinale des sédiments (l'équation de Bruun permet le déplacement des sédiments seulement le long d'un profil transversal) n'est vraiment pas adéquate. De plus, selon cette loi, lorsqu'elle est appliquée à toutes sortes d'environnements côtiers, la hausse du niveau marin entraîne nécessairement le recul des côtes. Pourtant, comme le font remarquer Anderson et al. (2015), qui s'intéressent au littoral hawaïen, les côtes ont été en érosion et/ou en accumulation alors que le niveau marin était à la hausse. Plus exactement, les auteurs observent, sur leur territoire d'étude, qu'au cours du dernier siècle, la hausse du niveau marin relatif a été de 1,50 mm/an à 2,32 mm/an et de manière assez uniforme autour des îles et que les vitesses d'évolution côtière ont été variables, en érosion ou en accumulation (valeur entre -1,8 ±0,3 m/an et +1,7 ±0,6 m/an). Les auteurs démontrent donc assez simplement, mais de manière efficace, que l'influence du niveau marin relatif, à l'échelle temporelle qui nous intéresse, est limitée par rapport à la disponibilité sédimentaire (gain et perte de sédiment dans les systèmes côtiers) et aux autres processus d'évolution côtière. À l'opposition entre le modèle simple qu'est la loi de Bruun et la complexité des systèmes côtiers, s'ajoutent des limites liées aux équations utilisées pour le calcul de certaines des variables qui entrent dans l'équation de Bruun. Par exemple, Ranasinghe et al. (2012) explorent les résultats obtenus à partir de quatre équations empiriques

largement utilisées pour le calcul de la *depth of closure* (DoC) des profils côtiers (*h* dans l'équation de Bruun) et obtiennent des écarts considérables qui, utilisés dans l'équation de Bruun, génèrent des différences de l'ordre de 500 %. On comprend donc quelques-unes des limites d'un modèle 2D tel que celui de Bruun.

Pilkey et Cooper (2004) dénoncent, dans un court texte publié dans *Science,* l'utilisation répandue de la loi de Bruun et vont même jusqu'à affirmer que les modèles peuvent représenter un risque pour la société et qu'il s'agit certainement là d'un exemple[4]. Ces auteurs recommandent de réaliser des projections d'évolution côtière basées sur les analyses historiques considérées sous un regard d'experts. En raison des nombreuses critiques, mais surtout des limites de la loi de Bruun, celle-ci n'est pas retenue pour ajuster l'équation de base des projections d'évolution côtière dans le cadre de la présente étude. Il est, selon nous, préférable de continuer les recherches afin d'obtenir d'autres solutions pour l'intégration de la hausse du niveau de la mer dans les projections. Il demeure que l'intégration de la hausse du niveau marin aux projections d'évolution côtière présente un intérêt certain dans le contexte des changements climatiques et de la hausse accélérée du niveau marin prévue. Néanmoins, à notre connaissance, encore aucun modèle adéquat ne permet de réaliser des projections d'évolution qui en tiennent compte.

3.6.3 Modification de l'équation de base : ajout d'une valeur de recul événementiel

L'intégration d'une donnée sur le recul événementiel dans l'équation permet de réaliser des projections côtières qui intègrent l'effet des événements de tempête majeurs générant des reculs importants. Pour ce faire, il s'agit d'ajouter un déplacement de la côte qui corresponde à l'effet d'un événement de tempête sur la côte à l'étude.

Au LDGIZC, le recul événementiel correspond au recul maximum mesuré à l'aide du réseau de suivi du Laboratoire (bornes) en un seul événement pour un même type de côte localisé dans une même unité (unité de gestion, unités géomorphologiques homogènes ou cellules hydrosédimentaires (par ex. : Boucher-Brossard et Bernatchez, 2013). En d'autres mots, on retient la valeur de recul la plus sévère ayant été mesurée à partir de toutes les bornes implantées dans le même type de côte à l'intérieur des limites choisies (par

[4] Traduction libre de : « *models can be hazard to society, and this is certainly an example of such* » (Pilkey et Cooper. 2004).

ex. : cellule hydrosédimentaire). La même valeur est donc ajoutée à l'équation pour différents transects. L'équation prend alors la forme suivante :

Taux d'évolution * nombre d'années vers l'horizon choisi + recul événementiel

Ferreira et al. (2006) proposent eux aussi d'intégrer l'effet des tempêtes extrêmes dans la délimitation de marge d'érosion et de submersion (*set back lines).* Comme le réseau de suivi LDGIZC trouve peu ou aucun équivalent dans le monde, les auteurs ne peuvent s'appuyer sur des déplacements mesurés et proposent alors l'utilisation d'une méthode théorique basée sur le calcul des effets d'événements de tempête (marée et onde de tempête) ayant un temps de retour de 50 ans à partir du modèle de Kriebel et Dean (1993) (*convolution model*).

3.6.4 Variable cartographique complémentaire : vitesse de recul maximum historique maintenue sur 5 ans

Dans l'optique d'intégrer les foyers d'érosion aux cartographies de projection d'évolution côtière, nous proposons l'ajout d'une ligne qui projette sur une période de 5 ans la vitesse de recul maximum ayant été mesurée durant l'un ou l'autre des intervalles historiques. Le fait d'utiliser la vitesse de recul maximale provenant d'intervalles différents selon les transects permet d'intégrer l'évolution spatiale des foyers d'érosion. On sait que l'érosion sévère n'est pas toujours localisée au même endroit le long de la côte durant le temps. La figure 146 illustre cette affirmation. Ainsi, si l'on tient compte seulement du taux d'évolution le plus récent (intervalle le plus récent, 2005-2009 par exemple), les zones d'érosion les plus sévères dans le futur seront localisées exactement à la même place que les zones d'érosion les plus sévères de l'actuel. Cependant, on reconnaît facilement grâce à l'analyse historique que les zones d'érosion les plus sévères sont souvent mobiles et ne se produisent pas nécessairement au même endroit. En ce sens, à défaut de connaître l'évolution spatiale des zones d'érosion les plus sévères dans le futur, cette ligne présente la position de la côte si la vitesse de recul la plus importante ayant été mesurée était maintenue sur une période de 5 ans, et ce, pour chacun des transects de l'ensemble d'un site d'étude.

Nous avons choisi de calculer les déplacements à partir des vitesses maximales pour une période de 5 ans. Comme les intervalles historiques les plus petits sont généralement de cet ordre, il s'agissait de la durée maximale sur laquelle il était cohérent de maintenir un recul rapide. Par exemple, si les vitesses maximales proviennent de l'intervalle 2005-2010 (5 ans), il est correct de les projeter pour 5 ans, mais il aurait été incorrect de les projeter sur 10 ou 15 ans puisque les vitesses les plus rapides mesurées n'ont pas perduré sur

des périodes aussi importantes. Inversement, si la vitesse de recul provient d'un intervalle d'une durée de 15 ans, il est correct de projeter cette vitesse d'évolution sur une période de 5 ans. Bref, il s'agit en quelque sorte du plus petit dénominateur commun.

Cette ligne est nommée « Position atteinte si le recul maximal est maintenu sur 5 ans » (ligne Rmax_5ans). Comme pour les lignes de projections, celle-ci est produite à la suite d'un lissage par moyenne mobile sur 5 transects (250 m).

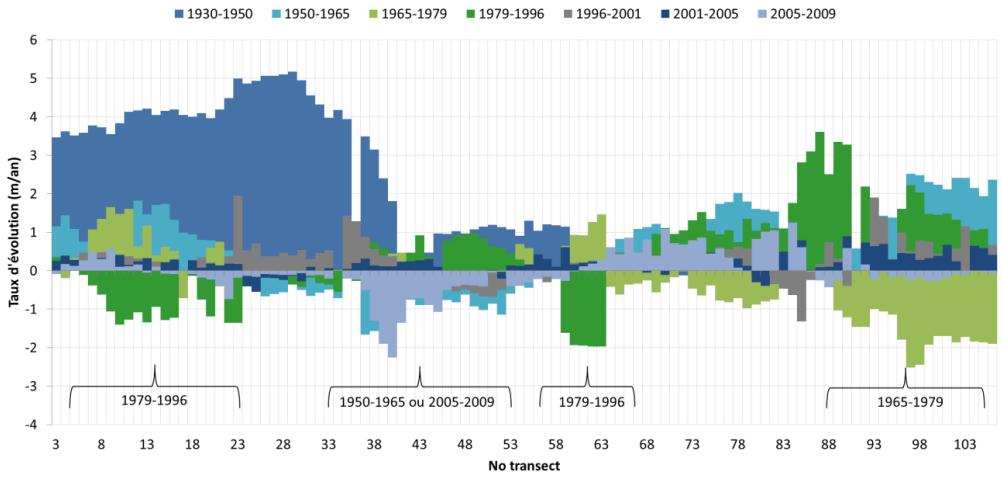


Figure 146. Mobilité spatiale des zones où l'érosion est la plus sévère durant la période historique, Sept-Îles

3.6.5 Variable cartographique complémentaire : enveloppe de mobilité historique

Récemment, les cartes de projection d'évolution côtière ont été bonifiées par l'ajout des enveloppes de mobilité historique (Corriveau et al., 2016). L'ajout de l'enveloppe de mobilité historique (EMH) permet de représenter l'espace affecté par la mobilité de la ligne de rivage au cours de la période historique. L'EMH permet de savoir si l'évolution côtière projetée vers un horizon choisi est à l'intérieur ou à l'extérieur de cette dernière.

Aussi, les résultats tels que ceux observés à Longue-Pointe-de-Mingan ont montré qu'un segment côtier peut avoir un taux de recul historique pratiquement nul, mais une enveloppe de variabilité de plusieurs dizaines de mètres (Corriveau et al., 2016). Ainsi, la position de la ligne de rivage la plus

ancienne et celle de la plus récente pourraient être positionnées presque aux mêmes endroits. Le taux d'évolution historique (EPR) serait alors près de 0 m/an. Toutes les positions intermédiaires pourraient être ou comprises entre ces deux lignes, ou très distantes de part et d'autre de celles-ci. Ainsi, pour un même EPR-historique, deux situations types sont possibles : la première étant que la ligne de rivage s'est déplacée sur une faible distance (enveloppe de petite dimension) et que sa position est relativement stable (faible EPR-historique) (figure 147, situation a) ; la seconde étant que la ligne de rivage s'est déplacée sur une grande distance (enveloppe de grande dimension), mais qu'elle a retrouvé une position peu éloignée de sa position la plus ancienne (faible EPR-historique) (figure 147, situation b). Ce type de situation montre combien il est utile d'inclure cette information dans les projections d'évolution côtière dans une perspective de gestion du territoire. En effet, toute la surface contenue à l'intérieur les limites de l'EMH a déjà été en bas d'une ligne de rivage historique et donc, a déjà fait partie du domaine marin. Un bâtiment ou une infrastructure construit, ou que l'on pourrait prévoir construire, à l'intérieur des limites de l'EMH aurait nécessairement été sur la plage ou dans l'eau à certains moments au cours de la période historique. L'omission de l'enveloppe de mobilité historique, que ce soit par choix ou par manque de données, peut avoir des impacts importants. Par exemple, dans la méthode de délimitation des marges d'érosion-submersion proposée par Ferreira et al. (2006) pour les côtes sableuses, aucune marge pour l'érosion n'est applicable sur les côtes présentant une stabilité relative (taux d'évolution près de 0 m/an). Pourtant, tel que décrit plus haut, il est possible d'observer un EPR qui soit près de 0 m/an alors que le risque d'érosion est bel et bien présent lorsque l'on considère l'enveloppe de mobilité historique. Ce constat est particulièrement juste pour les côtes basses sablonneuses puisque leur évolution s'effectue par une succession d'avancées et de reculs dans le temps (Bernatchez et Dubois, 2004).

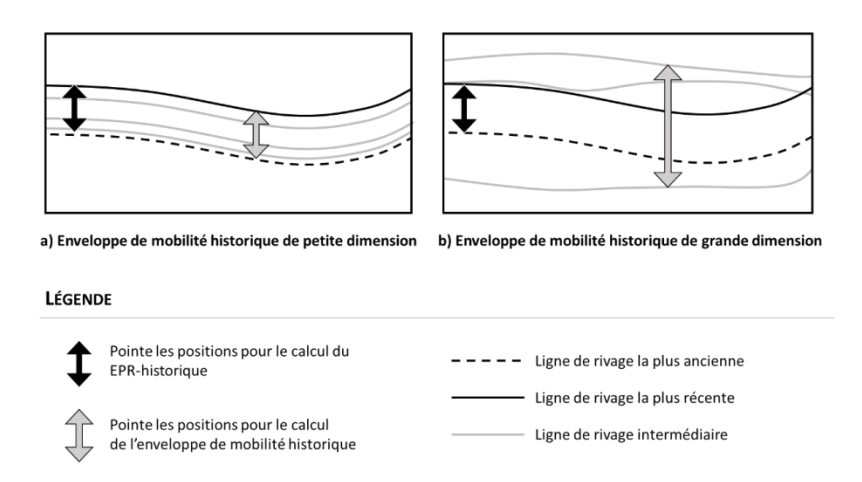


Figure 147. Situations d'évolution historique différentes pour un EPR-historique identique

3.6.6 Variable cartographique complémentaire : surfaces d'erreur quadratique moyenne

Douglas et Crowell (2000) soulèvent comme plusieurs autres auteurs que l'utilisation des taux d'évolution projetés vers un horizon futur comporte inévitablement des erreurs. Ces derniers affirment que cette erreur doit nécessairement être intégrée au plan de gestion. En plus des erreurs liées aux données de base (section 3.1.3), le modèle (équation obtenue avec l'EPR, l'OLS ou autres méthodes statistiques) utilisé pour réaliser ces projections comporte lui aussi des erreurs. La capacité du modèle à prédire les positions de la ligne de rivage est quantifiée à partir de différents indicateurs. Dans la littérature, l'écart type et l'intervalle de confiance sont des indicateurs qui sont souvent utilisés (par ex., l'écart type dans Genz et al., 2007).

Dans le cadre de ce projet, pour illustrer cartographiquement l'amplitude des cycles autour de la tendance, nous avons choisi d'utiliser **l'erreur quadratique moyenne**[5] (EQM). L'EQM correspond à l'erreur moyenne entre les données observées (position de la ligne de rivage) et celles prédites par le modèle

[5] Notons que l'utilisation de l'EQM donne plus de poids aux erreurs importantes puisque les erreurs sont élevées au carré avant d'être moyennées, contrairement à l'erreur absolue moyenne (EAM) pour laquelle toutes les erreurs ont un poids équivalent. Pour une même distribution, la valeur de l'EQM est donc supérieure à celle de l'EAM (Willmott et Matsuura, 2005). En ce sens, l'utilisation de l'EQM est mieux adaptée à l'objectif d'ajout d'une zone d'erreur que ne l'est l'EAM dans une perspective d'aménagement du territoire.

(régression linéaire) et pondérées par le carré de l'erreur (figure 148). Willmott et Matsuura (2005) montrent que pour une même distribution, la valeur de l'EQM est supérieure à celle de l'erreur absolue moyenne (EAM). Ces derniers soutiennent que l'utilisation de l'EAM est la mesure la plus adéquate pour exprimer la moyenne des erreurs. Cependant, dans le cadre de ce projet, l'attribution d'un poids plus important aux points les plus éloignés de la tendance est idéale.

L'EQM s'exprime, comme la position de la ligne de rivage, en mètres. Plus les points sont éloignés de la tendance, plus la valeur de l'EQM sera grande (figure 148). Inversement, plus les points sont proches de la tendance, plus la valeur de l'EQM sera petite (figure 149). L'ajout de cette zone tampon autour de la ligne de rivage projetée représente en partie la mobilité de la côte par rapport à la tendance mesurée (figure 115). Par exemple, si nous avions suivi l'évolution de la côte en continu (figure 115), l'équation obtenue par la régression linéaire donnerait la tendance et l'EQM, l'amplitude moyenne des cycles autour de cette tendance.

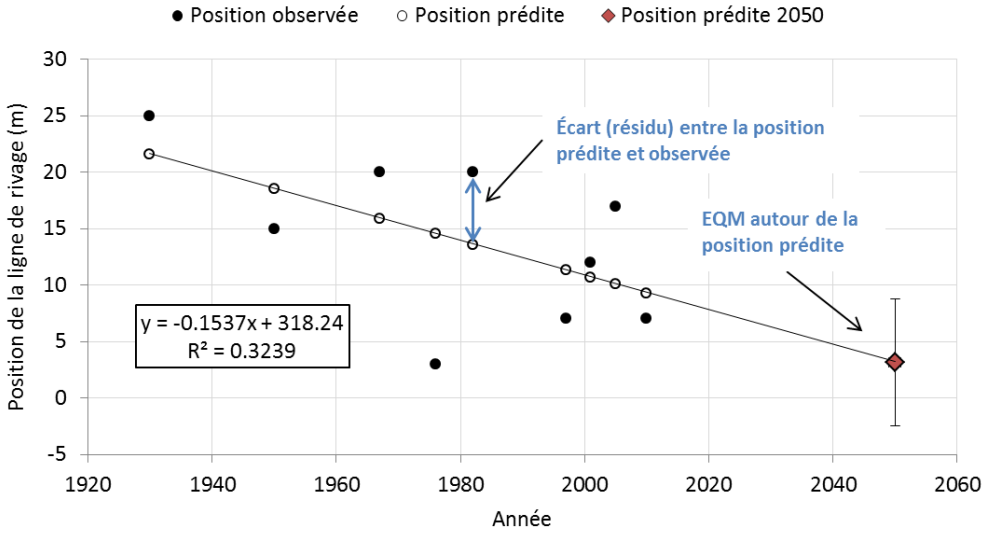


Figure 148. Illustration de l'erreur quadratique moyenne pour des observations éloignées de la régression linéaire (tendance)

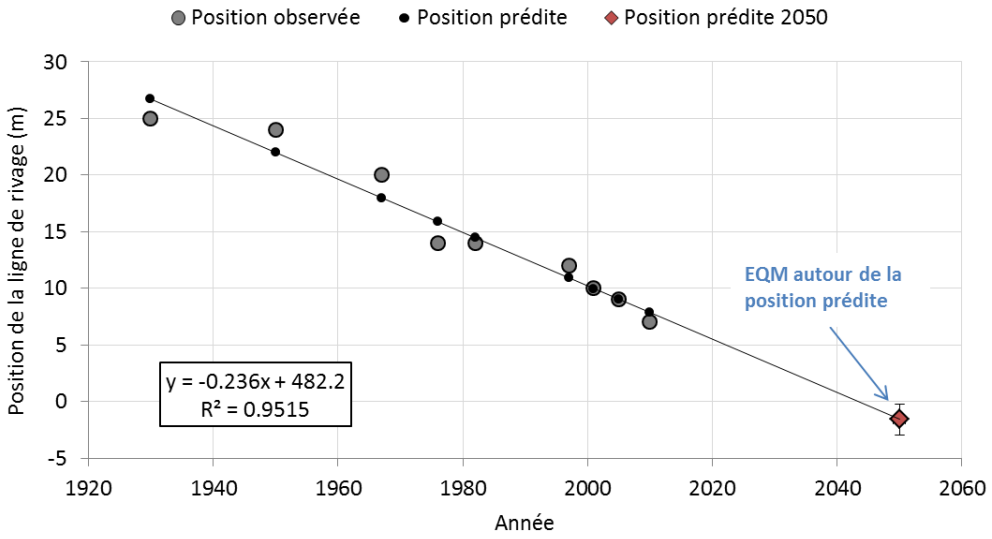


Figure 149. Illustration de l'erreur quadratique moyenne pour des observations rapprochées de la régression linéaire (tendance)

3.7 Projections d'évolution côtière : sites d'étude

Les projections d'évolution côtière réalisées sur la Côte-Nord remontaient à 2005 avec le dépôt du document de Dubois et al. (2005) résultant de l'entente spécifique. Dans le cadre de ce projet d'envergure, les taux d'évolution étaient calculés sur les périodes historiques à partir de la méthode statistique EPR. Les projections étaient faites en appliquant un taux d'évolution unique sur un segment côtier homogène (moyenne des taux de tous les transects dans le segment). Notons que des mises à jour ont été réalisées pour certains secteurs de la Côte-Nord en 2010 (Manicouagan et Minganie).

Les méthodes de projection ont pu être améliorées aujourd'hui en raison essentiellement du plus grand nombre de positions de ligne de rivage disponible. Le traçage de plusieurs lignes de rivage à l'aide de l'imagerie de différentes années est exigeant en temps, mais fournit des connaissances essentielles sur la dynamique littorale. L'utilisation de plusieurs positions de ligne de rivage permet de réaliser des projections d'évolution historiques basées sur des choix méthodologiques qui correspondent aux connaissances issues de la littérature scientifique en plus de permettre d'adapter les méthodes aux caractéristiques du site d'étude. Pour chacun des sites d'étude pour lesquels des projections ont été réalisées, la période sur laquelle le taux d'évolution à projeter est calculé et la méthode statistique pour le calcul de ce taux ont fait l'objet d'un choix visant à obtenir les projections d'évolution côtière qui soient les plus cohérentes possible avec l'évolution historique et l'état actuel de la côte. Les sous-sections suivantes présentent les différentes méthodes retenues pour les projections et, ensuite, les résultats pour les sites d'étude en question.

La projection d'évolution côtière nécessite un questionnement méthodologique concernant les points suivants ; les réponses seront différentes en fonction des objectifs poursuivis :

1) Le choix de la période ;
2) Le choix de la méthode de calcul des taux d'évolution à utiliser dans l'équation de base de projection ;
3) Choix des variables complémentaires ;
4) Choix de la méthode de déplacement de la ligne de rivage.

Dans tous les cas, les choix méthodologiques nécessaires pour la réalisation de projection d'évolution côtière reposent sur une bonne connaissance et une bonne compréhension de l'évolution du système côtier à l'étude et des changements environnementaux, qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique.

Dans le cadre de ce projet, les projections vers 2050 qui permettent, dans une certaine mesure, d'intégrer les foyers d'érosion aux projections s'effectuent grâce à des projections qui considèrent l'évolution (taux) de tous les transects d'un site donné. Ces derniers sont ensuite lissés grâce à une moyenne mobile (5 transects pour 250 m) (section 3.5.2). Aussi, en raison de leur mobilité spatiale, il est important de considérer les foyers d'érosion du passé dans les projections puisque ceux-ci peuvent potentiellement être réactivés si les conditions le permettent. Pour ce faire, nous avons choisi de projeter la position de la ligne de rivage qui résulterait du maintien de la vitesse de recul la plus importante ayant été observée au cours de la période d'analyse historique (EPR-intervalle) durant une période de 5 ans (section 3.6.4). On obtient une ligne qui tient compte des foyers d'érosion récents tout autant que ceux plus anciens. De plus, les projections vers 2050 sont combinées à la zone correspondant à l'EQM du modèle choisi (par ex., OLS sur 1950-2010) (3.6.6). Enfin, les cartographies intègrent également l'enveloppe de mobilité historique (3.6.5).

Cette section présente les projections d'évolution des sites de Gallix 1 et 2, de Sept-Îles et de Moisie[6] 1 l'horizon 2050. Chacune des projections est précédée des explications quant aux choix de la période de calcul des taux à utiliser dans les projections et aux choix de la méthode statistique pour le calcul de ces taux. Les choix méthodologiques sont faits à la lumière des connaissances présentées aux sections précédentes et de l'analyse des résultats d'évolution historique. Enfin, notons que des projections avaient déjà été réalisées pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan (Corriveau et al, 2016). De nouveaux résultats de projection, obtenus selon la méthode actuellement proposée, sont présentés ici.

[6] Moisie 2 ne compte que deux positions de ligne de rivage. Il n'a donc pas été retenu pour les projections.

3.7.1 Gallix 1

Dans le secteur de Gallix 1, la tendance historique est à l'accumulation. Cependant, les données récentes laissent envisager un possible changement de tendance.

3.7.1.1 *Choix de la période pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

La période 1996-2010 est la période d'analyse récente qui aurait généralement été favorisée méthodologiquement en raison des conditions climatiques qui s'apparentent le plus à celles prévues pour l'horizon de projection 2050. Cependant, dans le cas présent, on remarque que le choix de cette période aurait pour effet de projeter des taux d'évolution moins uniformes spatialement. Le site évolue par avancées et reculs qui ne s'effectuent pas au même endroit et au même moment. En choisissant une période moins longue pour le calcul des taux d'évolution à projeter, on amplifie les avancées et les reculs les plus récents (période 1996-2010) alors qu'il est fort probable qu'ils ne se produisent pas aux mêmes endroits. La figure 150 montre l'amplification locale des taux calculés à partir des périodes de calcul 1996-2010 et 2001-2010 comparativement aux taux de la période 1970-2010 ou 1930-2010 (historique) qui eux, présentent moins de variations localisées importantes.

La période 1970-2010 n'a pas non plus été retenue. En effet, comme l'évolution entre 1930 et 1970 a été faible (stable ou léger recul ou avancée), l'exclusion de la position de 1930 fait en sorte que la vitesse d'avancée de la côte serait surestimée (figure 151). Sur les transects 1 à 14, l'avancée projetée serait plus importante que celle obtenue à partir de la période historique et de la période 1996-2010. On remarque d'ailleurs que la position de 1970 est éloignée de la droite de régression et même exclue par les méthodes statistiques RLS et RWLS pour plusieurs transects (par ex., transect 13, figure 152).

De manière générale, tous les taux calculés selon les différentes périodes ont des valeurs inférieures à 1 m (positif et négatif) (figure 150). Cependant, en termes de projections, même un taux relativement peu élevé implique des déplacements de la ligne de rivage qui puissent être importants. Par exemple, un taux d'évolution de -0,50 m/an projeté sur 40 ans (2010 à 2050), se traduira par un recul anticipé de l'ordre de 20 m.

L'analyse de la position des lignes de rivage de 1930 à 2010 et de la tendance générale indique que l'utilisation de la période historique (1930-2010) (taux d'évolution positifs sur tout le transect) constitue vraisemblablement la

meilleure option. Néanmoins, les conclusions sur l'évolution historique étaient que le site de Gallix 1 avait possiblement subi un changement de tendance au cours de la période récente (tendance vers l'érosion au cours des dernières années). Il aurait donc été cohérent de projeter des taux d'évolution négatifs pour le futur. Malheureusement, ce changement de tendance, s'il en est bien un, est trop récent pour calculer des taux d'évolution qui puissent être projetés. Il serait donc hasardeux de projeter sur 40 ans les taux calculés sur les lignes de rivage de 2001, 2005 et 2010 (taux 2001-2010 illustrés à la figure 150), et ce, en partie parce que les taux amplifieraient les zones d'accumulation et d'érosion, ce qui serait incohérent avec la mobilité de ces zones. Une réévaluation de l'évolution du littoral grâce à l'ajout de la position de la ligne de rivage de 2017 sera nécessaire.

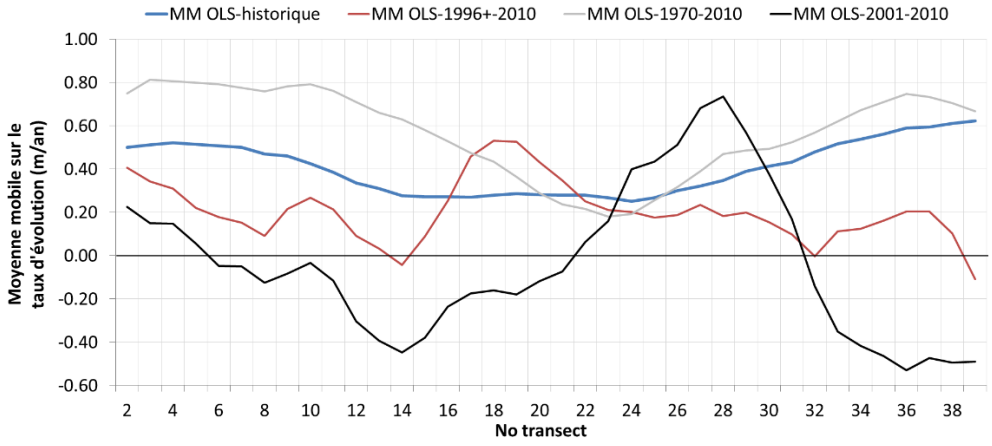


Figure 150. Taux d'évolution OLS (moyenne mobile) à projeter obtenus à partir de quatre périodes de calcul (historique, 1970-2010, 1996-2010 et 2001-2010), Gallix 1

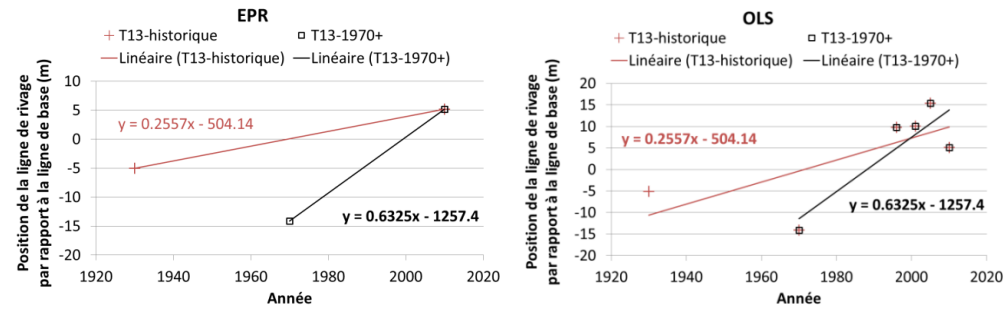


Figure 151. Taux calculés (EPR et OLS) pour la période historique et la période 1970-2010 pour le transect 13 à Gallix 1

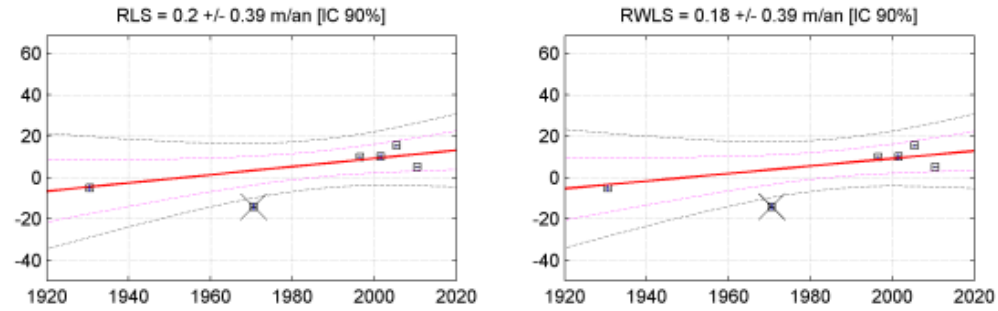


Figure 152. Rejet de la position de la ligne de rivage de 1970 par les méthodes RLS et RWLS, transect 13 à Gallix 1

3.7.1.2 *Choix de la méthode statistique pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

En raison de la tendance observée à l'accumulation, mais du recul mesuré au cours de l'intervalle récent (2005-2010), ce sont les taux calculés par EPR qui permettent le mieux d'obtenir la tendance à projeter puisque la droite de régression s'aligne sur la dernière position de la ligne de rivage (figure 154). Les vitesses d'avancée sont donc un peu moins rapides avec cette méthode de calcul (figure 153), ce qui s'avère plus cohérent avec l'évolution récente (1996-2010) durant laquelle l'avancée s'est produite moins rapidement. La figure 150 illustre ce constat à l'aide de l'exemple des résultats obtenus pour le transect 13.

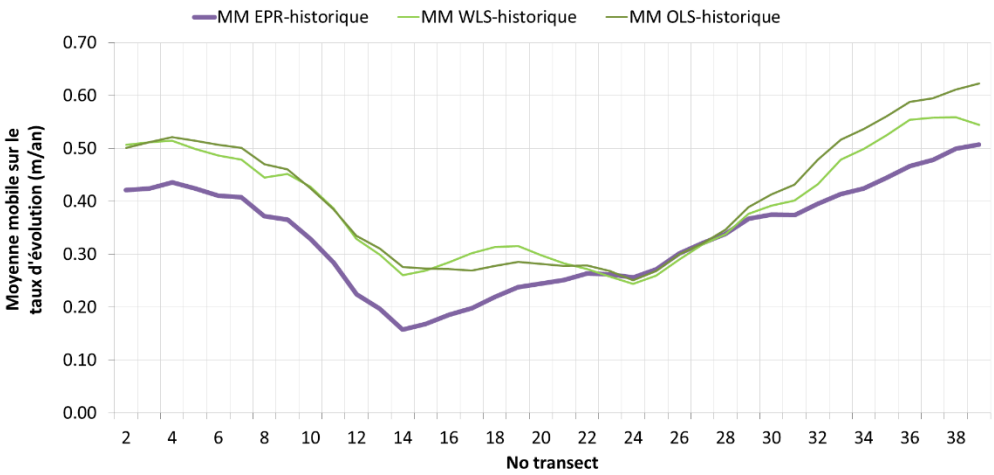


Figure 153. Taux d'évolution calculés selon différentes méthodes (EPR, WLS, OLS) pour la période historique, Gallix 1

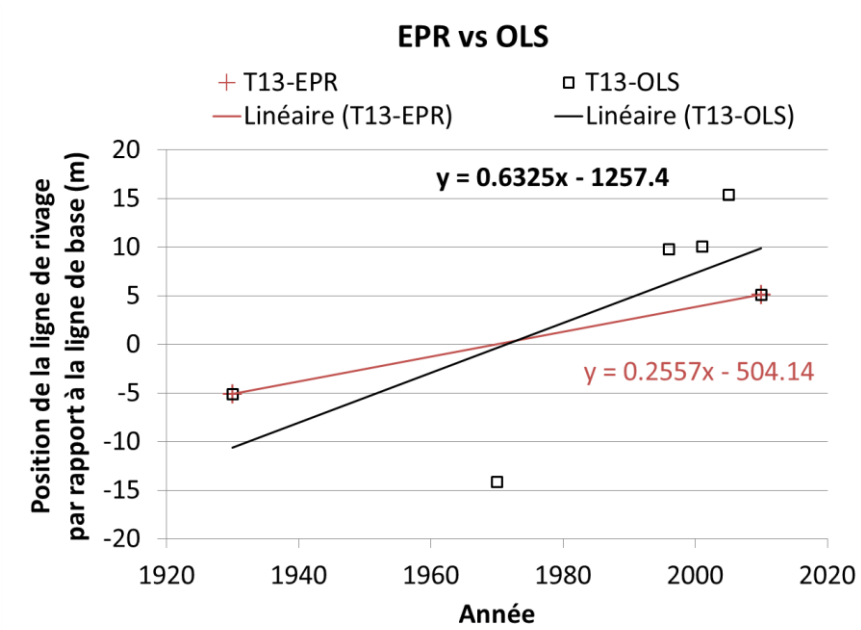


Figure 154. Choix entre la méthode EPR et OLS, transect 13 à Gallix 1

3.7.1.3 *Vitesses de recul maximales*

Les vitesses de recul maximales ayant été projetées sur 5 ans ont été mesurées au cours de l'intervalle 2005-2010 (30 transects, 5 ans) et de 1996-2001 (7 transects, 5 ans).

3.7.1.4 *Cartes de projection d'évolution côtière*

Gallix 1 : méthode EPR, période historique (1930-2010)

La projection vers 2050 (tendance) prévoit une progradation moyenne du littoral de 13 m. Les avancées varient entre un minimum de 5 m et un maximum de 20 m (tableau 25). Avec des zones d'EQM variant entre ±2 m et ±9 m au total et d'une moyenne de ±6 m, on comprend que la cyclicité captée autour de cette tendance est somme toute assez importante comparativement à l'avancée prévue. En d'autres mots, les projections basées sur les données historiques indiquent que l'on devrait s'attendre à une légère progradation de la ligne de rivage s'effectuant au fil de cycles d'avancées et de reculs moyens de ±6 m (EQM). Cette évolution n'exclut pas l'avènement de périodes de reculs rapides localisés sur le littoral. Ainsi, la ligne Rmax_5ans prévoit des reculs moyens de 8 m. Les reculs varient entre un minimum de 2 m et un maximum de 14 m. À plus court terme, si des zones entraient en érosion aux vitesses les plus rapides enregistrées par le passé, le recul atteindrait cette ligne sur un horizon de 5 ans. Cette perspective est envisageable pour des zones localisées. Tout le littoral ne devrait pas entrer en recul avec des vitesses aussi importantes durant 5 années consécutives.

Comme il a été expliqué un peu plus haut (section 3.7.1.1), une certaine incertitude demeure quant à la projection vers 2050 en raison de l'identification d'un possible changement de tendance au cours des années récentes (vers l'érosion). En ce sens, l'EMH constitue aussi une alternative intéressante pour réfléchir à l'état de la côte dans le futur, bien que celle-ci ne soit pas associée à un horizon temporel futur donné. La position récente du littoral (2010) était encore très avancée par rapport à la limite côté terre de l'EMH. Ainsi, si le possible changement de tendance récent était durable, il n'est pas exclu que la ligne de rivage retrouve éventuellement cette position. Plusieurs habitations sont à l'intérieur des limites de l'EMH. La carte suivante (figure 155) présente les résultats de la projection vers l'horizon 2050[7].

[7] Le géoréférencement de la photo 2017 utilisée comme fond de carte et celui de la ligne récente (dans ce cas 2010) ne sont pas réalisés à partir de la même référence. En ce sens, la comparaison directe entre la ligne récente et la photo comporte une incertitude et limite

Tableau 25. Évolution de la ligne de rivage, Gallix 1

	Projection 2050	Largeur de la surface d'erreur quadratique moyenne	Rmax_5ans
Moyenne	13 m	±6 m	-8 m
Minimum	5 m	±2 m	-2 m
Maximum	20 m	±9 m	-14 m

l'interprétation visuelle de l'évolution de la côte entre les deux dates. Ce constat est valable pour toutes les cartes de projections.



Figure 155. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050, Gallix 1

3.7.2 Gallix 2

Dans le secteur de Gallix 2, l'évolution côtière a été marquée par un changement de tendance, soit de l'accumulation vers l'érosion, à la suite de la destruction de la saillie triangulaire sableuse entre 2005 et 2010. Notons immédiatement qu'en raison des spécificités décrites dans les sections précédentes et suivantes, nous présentons deux horizons de projection ; l'une vers 2030 et l'autre vers 2050.

3.7.2.1 *Choix de la période pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Comme pour Gallix 1, la période 1996-2013 est la période d'analyse récente qui aurait généralement été favorisée méthodologiquement en raison des conditions climatiques qui s'apparentent le plus à celles prévues pour l'horizon de projection 2050. Les taux de recul calculés à partir de la période récente (2001-2013) sont négatifs et très sévères et sont directement liés à la destruction de la saillie. Les taux calculés sur la période 1996-2013 sont eux aussi négatifs bien que moins sévères que ceux de la période 2001-2013 (figure 156).

Nous évaluons, d'après les conditions du milieu et les connaissances actuelles, que la projection d'évolution côtière doit être négative. Tel qu'indiqué à la section 2.3.3, la côte subit encore de l'érosion actuellement (photos obliques de septembre 2017). Cependant, nous évaluons qu'il est peu probable que ce rythme de recul assez sévère perdure durant 37 ans (horizon 2050). Par conséquent, une projection pour 2050 basée sur un calcul du taux de la période récente (1996-2013 ou 2001-2013) risque de surestimer le recul. Afin d'obtenir une projection plus plausible de l'évolution côtière, nous avons choisi de réaliser une projection vers 2030 (17 ans) qui permet selon nous de limiter cette surestimation. Il s'agit d'une projection de 17 ans (2013 à 2030) construite à partir d'une période ayant exactement le même nombre d'années (1996-2013).

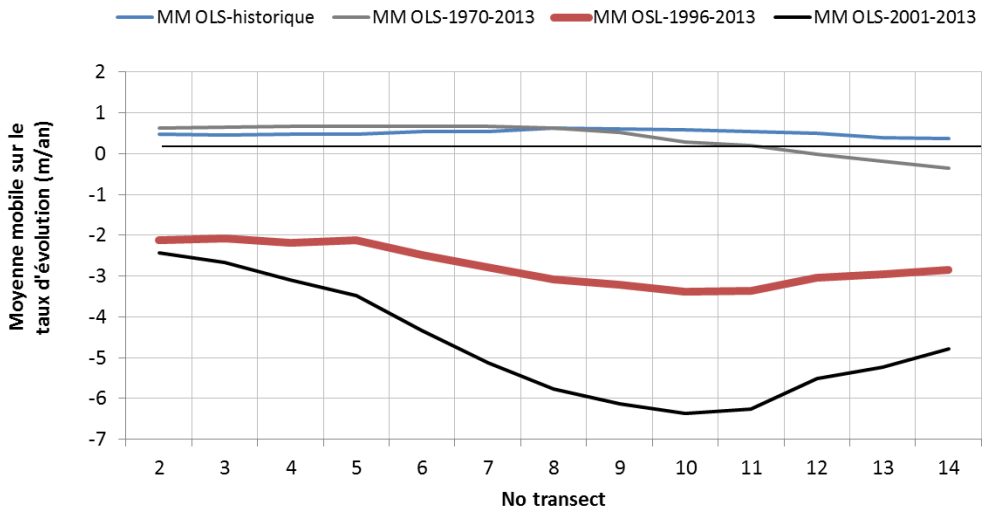


Figure 156. Taux d'évolution OLS (moyenne mobile) à projeter obtenus à partir de quatre périodes de calcul (historique [1930-2013], 1970-2013, 1996-2013 et 2001-2013), Gallix 2

3.7.2.2 *Choix de la méthode statistique pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Dans le cas de Gallix 2, la méthode OLS s'avère la meilleure méthode de calcul des taux d'évolution à projeter. Dans ce cas précis, les taux calculés à partir de la méthode OLS sont légèrement moins rapides que ceux obtenus à l'aide des calculs EPR (figure 157). Les reculs très sévères directement liés à la disparition de la saillie sableuse se sont déjà produits et, dans un tel contexte, il n'est pas envisagé que des reculs toujours aussi importants se maintiennent. Déjà, les mesures *in situ* montrent des signes de ralentissement (même si de manière absolue il s'agit toujours de reculs majeurs). Dans cette perspective, les taux OSL (taux un peu moins rapides) ont été préférés au taux EPR.

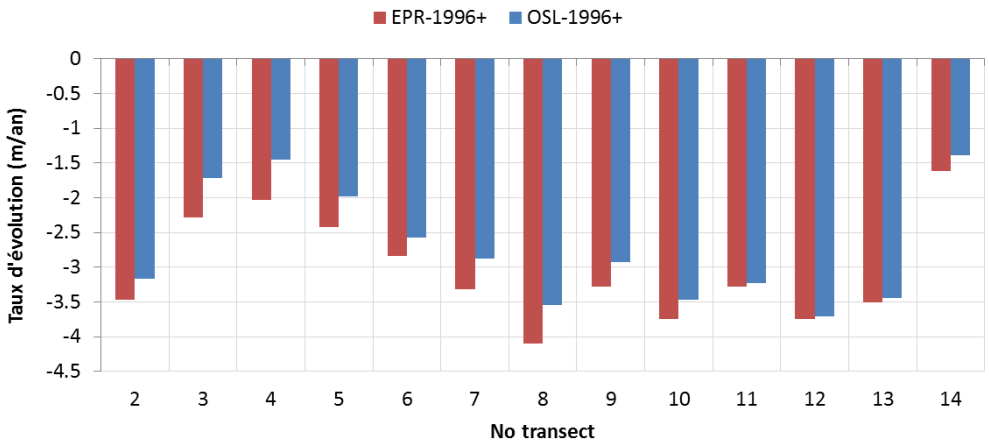


Figure 157. Taux d'évolution calculés selon différentes méthodes (EPR, OLS) pour la période 1996-2013, Gallix 2

3.7.2.3 *Vitesses de recul maximales*

Dans le cas de Gallix 2, les vitesses de recul maximales ont été mesurées durant l'intervalle 2010-2013 (3 ans) pour 12 transects et durant l'intervalle 2001-2005 (4 ans) pour 2 transects.

3.7.2.4 *Cartes de projection d'évolution côtière*

Gallix 2 : méthode OLS, période historique (1996-2013)

La projection vers 2050 prévoit un recul moyen du littoral de 101 m. Les reculs varient entre un minimum de 77 m et un maximum de 125 m. La projection vers 2030, quant à elle, prévoit un recul moyen du littoral de 46 m. Les reculs varient entre un minimum de 24 m et un maximum de 63 m (tableau 26). Il s'agit de projections d'évolution côtière pour lesquelles les reculs prédits sont majeurs. Les zones d'EQM autour des projections sont en moyenne de ±16 m, d'au moins ±6 m et d'au plus ±26 m. Au cours de la période d'analyse, les vitesses de recul les plus rapides ont été si sévères que la ligne Rmax_5ans correspond à des reculs moyens de 63 m, d'au moins 35 m et d'au plus 90 m. Ces reculs amènent la ligne Rmax_5ans derrière la position de la projection vers 2030.

Même si les projections ont été réalisées à partir de ce qui est considéré comme les meilleurs choix méthodologiques possibles, celles-ci ne sont pas totalement plausibles. En effet, si aucune saillie de sable ne se développe devant le site, il est plutôt vraisemblable que le site adopte une vitesse

d'évolution qui s'inscrive dans un contexte spatial plus large ; le développement d'une concavité dans la ligne de rivage ne devrait vraisemblablement pas se produire à l'endroit du site d'étude par rapport aux côtes adjacentes.

Actuellement, la nouvelle pointe de sable construite tout juste à l'est pourrait limiter les avancées dans la portion est du site de Gallix 2. En effet, celle-ci capte une partie des sédiments en provenance de l'est (dérive littorale principale de l'est vers l'ouest). Cette situation correspond à une des causes de foyer d'érosion décrites dans Kraus et Galgano (2001), soit le type 13 (blocage du transit sédimentaire longitudinal). En raison de la longueur (perpendiculairement à la côte), la saillie contribue aussi à l'isolation d'un segment côtier du transport sédimentaire longitudinal (cause de foyer d'érosion 17 dans la typologie de Kraus et Galgano, 2001) (figure 158). Comme expliqué par ces auteurs, il s'agit de la déviation vers le large des sédiments sur une certaine distance avant que ceux-ci soient ramenés vers la côte plus loin par rapport au sens de la dérive (transport s'effectuant en croissant plutôt que de manière linéaire).

Enfin, on peut penser que si le recul se maintient, la position de la ligne de rivage pourrait rejoindre au moins sa position historique la plus reculée vers les terres (limite côté terre de l'enveloppe de mobilité historique). La carte suivante (figure 159) présente les résultats de la projection vers l'horizon 2030 et 2050.

Tableau 26. Évolution de la ligne de rivage, Gallix 2

	Projection 2030	**Projection 2050**	**Largeur de la surface d'erreur quadratique moyenne**	**Rmax_5ans**
Moyenne	-101 m	-46 m	±16 m	-63 m
Minimum	-125 m	-63 m	±6 m	-35 m
Maximum	-77 m	-24 m	±26 m	-90 m

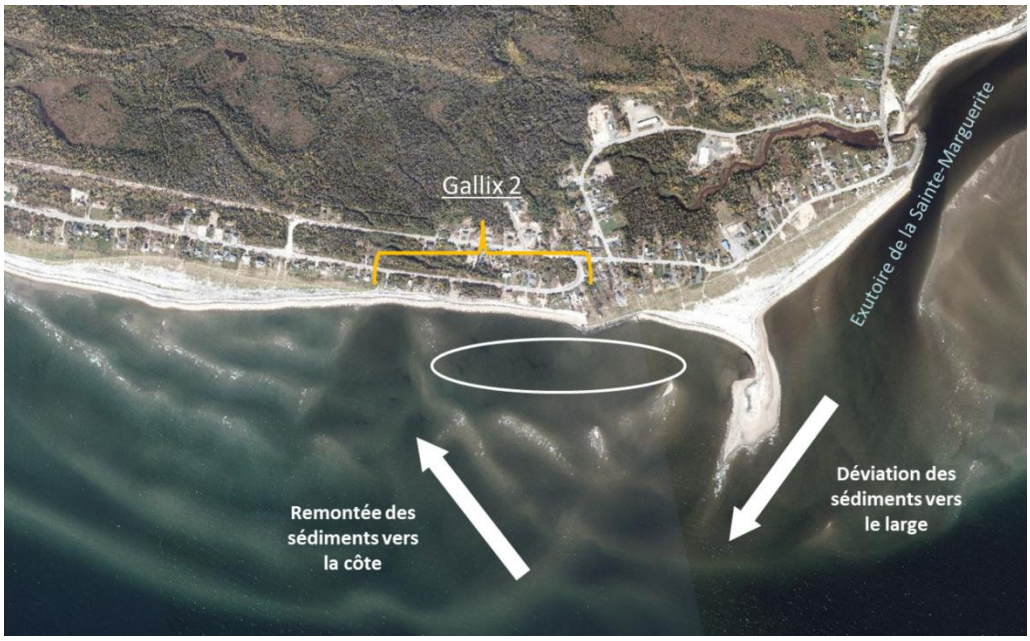


Figure 158. Isolation d'un segment côtier à Gallix 2, l'ellipse blanche montre la zone isolée

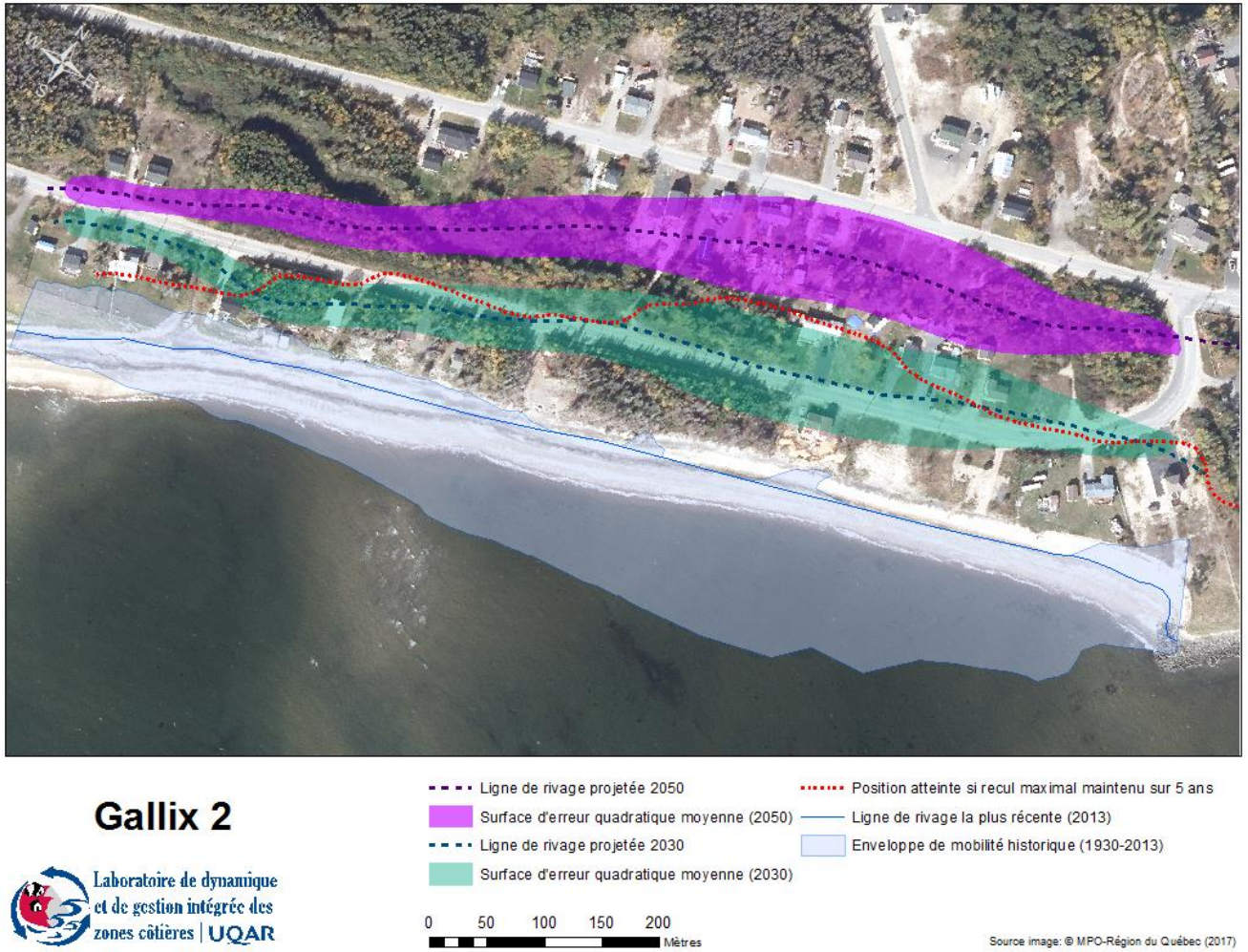


Figure 159. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2030 et 2050, Gallix 2

3.7.3 Sept-Îles

Dans le secteur de Sept-Îles, nous avons vu que l'évolution côtière a été marquée par une avancée de la ligne de rivage particulièrement importante entre 1930 et 1950. Par la suite, la côte a plutôt évolué par des alternances entre des avancées et des reculs. Les projections doivent donc tenir compte de cette dynamique d'évolution cyclique (avancée-recul).

3.7.3.1 *Choix de la période pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Dans le cas de Sept-Îles, il est nécessaire de prendre une période qui soit assez longue pour capter des avancées et des reculs sans quoi les projections risquent de surestimer la tendance au recul ou à l'avancée. Les périodes 1996-2009 et 1979-2009 ne permettent pas de capter ces cycles pour tous les transects. Par exemple, à la figure 160, on observe que l'utilisation de la période 1979-2009 n'aurait pas intégré de cycle complet pour les transects encadrés. Dans ce cas, la période la plus récente qui permette de capter des avancées et des reculs pour tous les transects est la période 1965-2009. Les taux obtenus à partir de cette période prévoient une stabilité relative de la côte (taux près de 0 m/an) ou alors une progression de la côte (figure 161). Le long de ce secteur, on observe la présence d'enrochements. On constate que l'avancée de la ligne de rivage a été possible devant des enrochements (figure 162) et donc qu'il est acceptable de projeter des avancées. Bien que la période choisie doive capter l'ensemble des cycles d'avancées et de reculs, il est également souhaitable qu'elle représente le plus justement le contexte environnemental et météo-marin actuel ou récent. La période doit donc aussi être la plus récente possible.

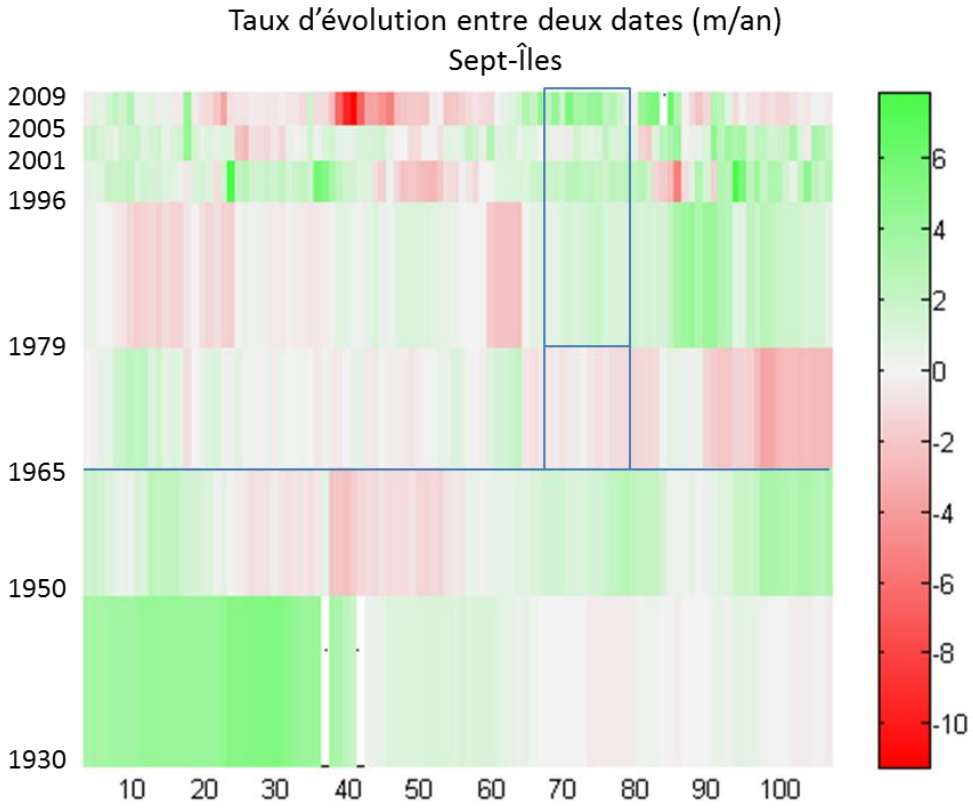


Figure 160. Matrice de couleurs représentant l'évolution historique par transects et intervalles (EPR-intervalle), Sept-Îles

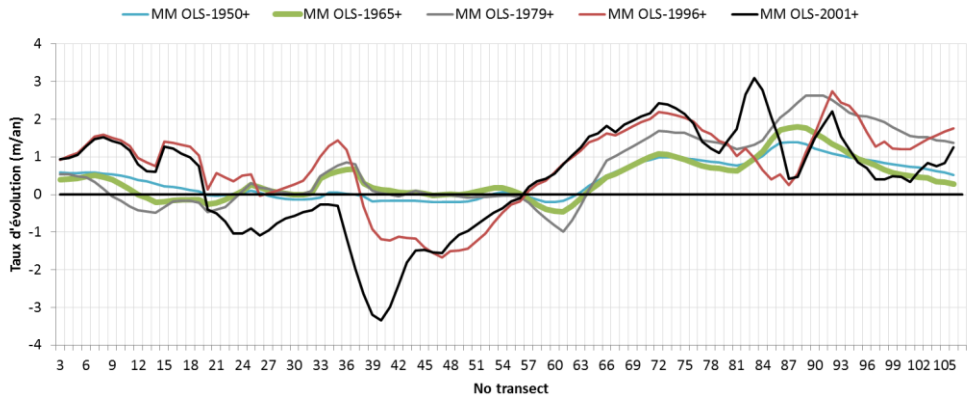


Figure 161. Taux d'évolution OLS (moyenne mobile) à projeter obtenus à partir de cinq périodes de calcul (1950-2009, 1965-2009, 1979-2009, 1996-2009 et 2001-2009), Sept-Îles



Figure 162. Avancée de la ligne de rivage devant un enrochement encore partiellement visible, transect 6, Sept-Îles, photo oblique septembre 2017

3.7.3.2 *Choix de la méthode statistique pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Les taux d'évolution calculés selon les deux méthodes sont souvent similaires (par exemple les transects 66 à 78) ; quelques fois, les taux OLS sont plus élevés que les taux EPR (érosion ou accumulation) et inversement. La méthode statistique retenue pour le calcul des taux d'évolution est l'OLS. Rappelons que c'est la méthode statistique qui, au terme de la revue de la littéraire, est apparue comme étant celle qui présentait le plus d'avantages.

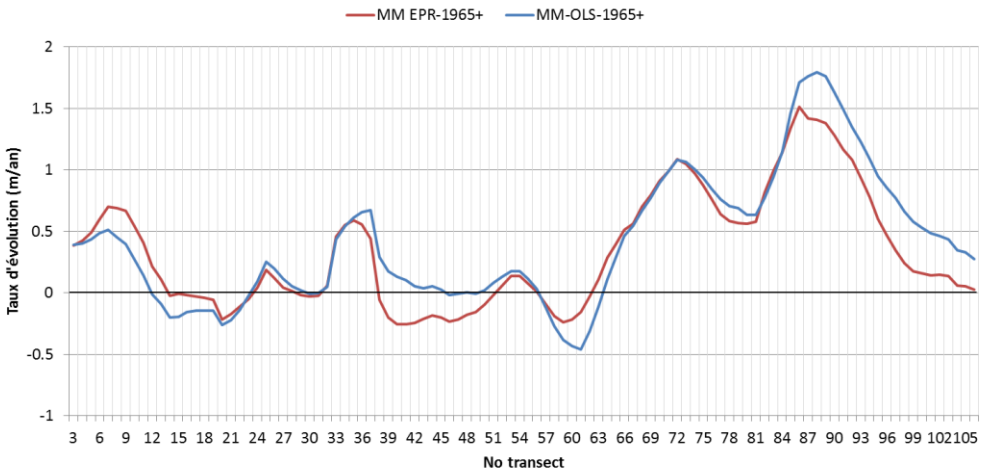


Figure 163. Taux d'évolution calculés selon différentes méthodes (EPR, OLS) pour la période 1965-2009, Sept-Îles

3.7.3.3 *Vitesses de recul maximales*

Les vitesses de recul les plus importantes mesurées à Sept-Îles ne proviennent pas toujours du même intervalle, ce qui signifie que les vitesses maximales observées ont été maintenues durant un nombre d'années différent entre les transects (tableau 27).

Tableau 27. Nombre de transects pour lesquels les vitesses ont été enregistrées au cours des différents intervalles d'analyse

Intervalle (durée en année)	Nombre de transects pour lesquels la vitesse maximale de recul a été enregistrée au cours de l'intervalle
1930-1950 (20 ans)	1
1950-1965 (15 ans)	3
1965-1979 (14 ans)	32
1979-1996 (17 ans)	19
1996-2001 (5 ans)	13
2001-2005 (4 ans)	12
2005-2009 (4 ans)	23

3.7.3.4 *Cartes de projection d'évolution côtière*

Sept-Îles : méthode OLS, période 1965-2010

Sur le site de Sept-Îles, on projette une évolution de la côte positive et négative. Les reculs prévus sur l'horizon 2050 sont en moyenne de 7 m, d'au moins 0,1 m et d'au plus 19 m (tableau 28). Ceux-ci sont prévus devant 24 transects. Les projections d'évolution positives touchent pour leur part 80 transects. Les avancées prévues sont d'en moyenne 24 m, d'au moins 0,3 m et d'au plus 74 m. La surface d'erreur quadratique moyenne est d'en moyenne 17 m, d'au moins 3 m et d'au plus 38 m.

Sur un site où les tendances évolutives, tant positives que négatives, indiquent des déplacements de la ligne de rivage somme toute limités, la ligne Rmax_5ans est importante. Nous avons vu que des vitesses de recul très rapides pouvaient être observées sur la côte durant la période d'analyse. En ce sens, même si l'évolution à moyen terme (tendance) est limitée (faible déplacement), le développement de zones d'érosion sévère est envisageable et implique des reculs d'en moyenne 10 m, d'au moins 1 m et d'au plus 38 m. Enfin, l'enveloppe de mobilité nous rappelle explicitement que le développement s'est fait sur des territoires récemment gagnés sur la mer. La carte suivante (figure 164) présente les résultats de la projection vers l'horizon 2050.

Tableau 28. Évolution de la ligne de rivage, Moisie 1

	Projection 2050	Projection 2050 positif	Projection 2050 négatif	Largeur de la surface d'erreur quadratique moyenne	Rmax_5ans
Moyenne	17 m	24 m	-7 m	17 m	-10 m
Minimum	-19 m	0,3 m	-19 m	3 m	-1 m
Maximum	74 m	74 m	-0,1 m	38 m	-38 m



Figure 164. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050, Sept-Îles

3.7.4 Moisie 1

Historiquement, le littoral de Moisie 1 a été relativement stable, voire en accumulation. Comme le littoral de Moisie 1, l'évolution côtière à Moisie 1 s'effectue par cycle d'avancées et de reculs.

3.7.4.1 *Choix de la période pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Comme pour le site de Moisie 1, il est nécessaire d'utiliser une période pour le calcul des taux d'évolution à projeter qui compte à la fois des intervalles marqués par des reculs et par des avancées. L'utilisation de la période 1979-2009 permet de remplir cette condition pour presque tous les transects et la période de 1965, pour la totalité des transects. Cependant, ce sont les taux calculés à partir de 1950 qui s'avèrent les plus adéquats pour réaliser les projections.

En effet, alors que pour la plupart des transects du site d'étude de Moisie 1, les taux d'évolution sont très faibles, ceux localisés à l'est du transect 30 sont beaucoup plus importants (figure 165 et figure 166). Nous avons vu que l'évolution de ce secteur a été dirigée par l'accolement d'un cordon ayant engendré une avancée importante de la ligne de rivage. Par la suite, la ligne de rivage a reculé assez rapidement pour retrouver une position similaire à celle de 1950. L'utilisation des taux calculés à partir des périodes 1965-2009 et 1979-2009 aurait pour effet de projeter un recul de la côte qui, d'après notre analyse, est peu probable puisque le recul lié à l'érosion du cordon est déjà chose du passé. D'ailleurs, les conditions actuelles (2017) de la côte, c'est-à-dire l'absence de signes d'érosion sévère et la présence d'une plage large et de bancs sableux sur le bas estran (figure 167), indiquent que la plage présente un équilibre sédimentaire peu propice à l'activation de processus d'érosion comme ceux observés par le passé (figure 167). L'état actuel et l'analyse historique indiquent que, à moins du passage d'un autre cordon sableux, les vitesses d'évolution des transects 30 et plus devraient s'approcher des vitesses observées pour les autres transects. En ce sens, ce sont les taux obtenus à partir de la période 1950-2009 qui offrent les meilleurs résultats.

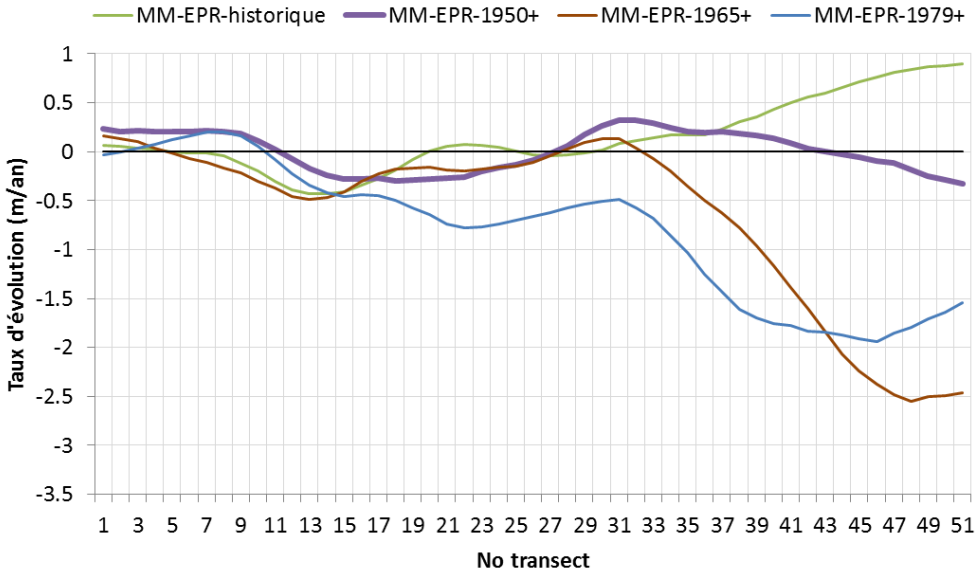


Figure 165. Taux d'évolution (EPR) calculés selon différentes périodes, Moisie 1

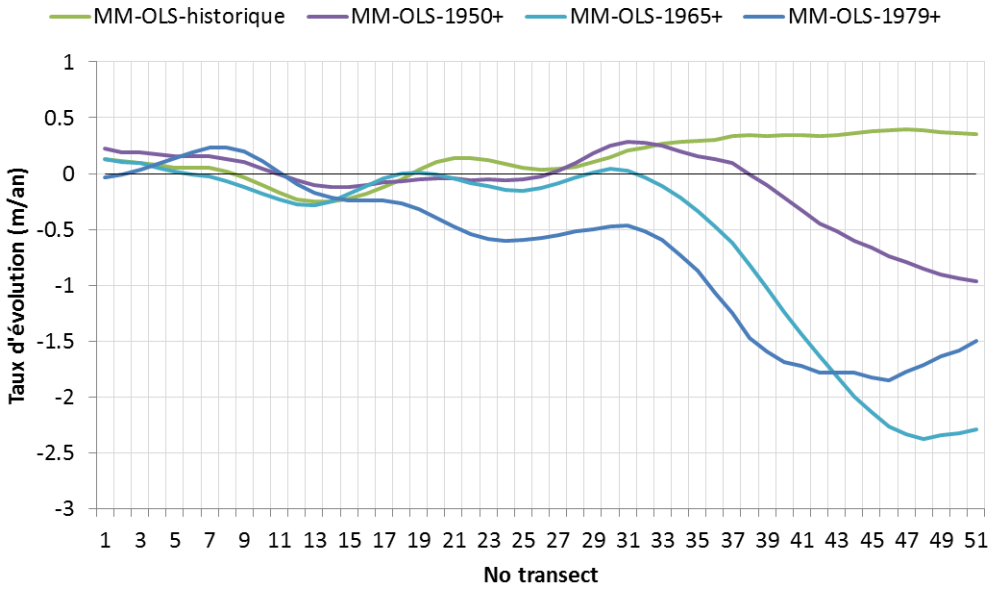


Figure 166. Taux d'évolution (OLS) calculés selon différentes périodes, Moisie 1



Figure 167. État de la côte en septembre 2017 devant le transect 44

3.7.4.2 *Choix de la méthode statistique pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Dans ce cas, c'est la méthode de calcul par EPR qui donne les taux d'évolution les plus cohérents. L'utilisation de cette méthode plutôt que l'OLS fait en sorte que la droite obtenue n'est pas influencée par les positions plus avancées (vers 1965) en raison de l'accolement du cordon sableux (figure 168). L'EPR permet en quelque sorte d'ignorer le passage du cordon et conséquemment d'en réduire l'influence sur le taux calculé. Le calcul et donc l'illustration de la zone correspondant à l'EQM (RMSE) sera plus large et permettra de représenter la dynamique historique propre aux transects ayant été touchés par le passage du cordon. Les taux ainsi calculés sont plus uniformes le long du site (figure 169).

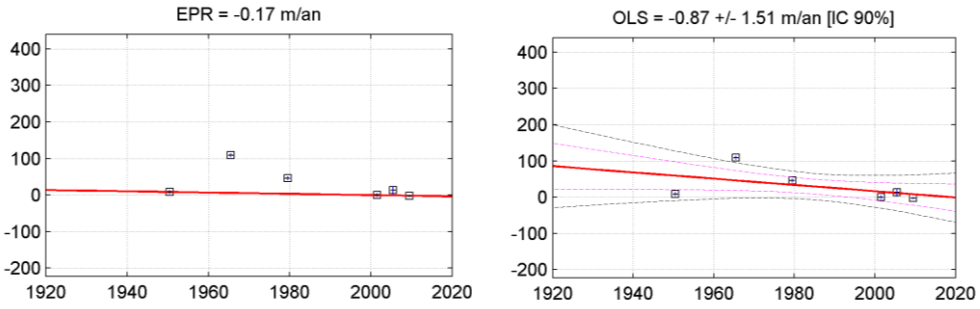


Figure 168. Taux calculés selon les méthodes statistiques EPR et OLS au transect 49

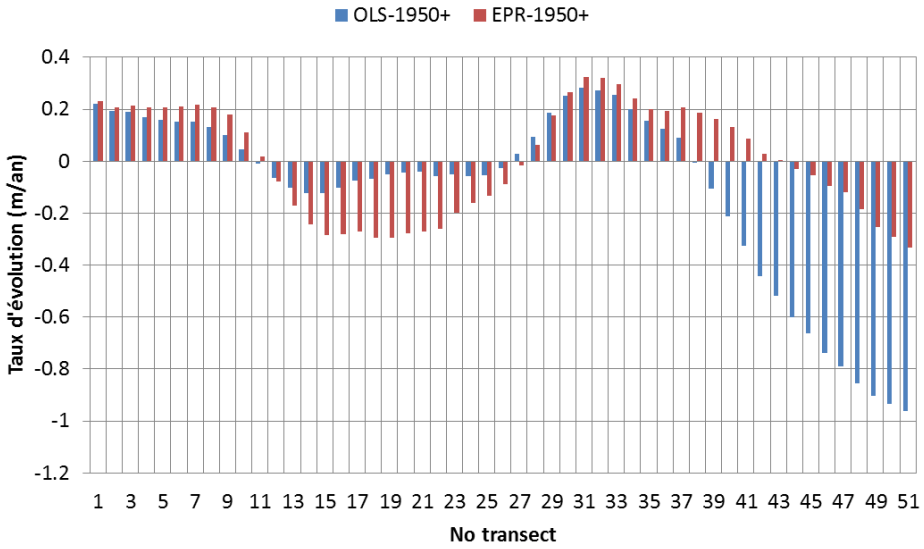


Figure 169. Taux d'évolution calculés sur la période 1950-2009 à l'aide des méthodes statistiques EPR et OLS

3.7.4.3 *Vitesses de recul maximales*

Les vitesses de recul les plus importantes mesurées à Moisie 1 proviennent surtout des intervalles de 1931-1950 (19 ans) et de 2005-2009 (4 ans), avec respectivement 15 transects et 28 transects (tableau 29).

Tableau 29. Nombre de transects pour lesquels les vitesses ont été enregistrées au cours des différents intervalles d'analyse

Intervalle (durée en année)	Nombre de transects pour lesquels la vitesse maximale de recul a été enregistrée au cours de l'intervalle
1931-1950 (19 ans)	15
1950-1965 (15 ans)	2
1965-1979 (14 ans)	6
1979-2001 (22 ans)	0
2001-2005 (4 ans)	0
2005-2009 (4 ans)	28

3.7.4.4 *Cartes de projection d'évolution côtière*

Moisie 1 : méthode EPR, période 1950-2009

Les projections réalisées pour l'horizon 2050 sur le site de Moisie 1 sont parfois négatives, parfois positives (tableau 30). Plus exactement, on compte 27 transects pour lesquels une avancée de la ligne de rivage est prévue. La progradation prévue est en moyenne de 7 m, d'au moins 0,2 m et d'au plus 13 m. À l'inverse, ce sont 24 transects pour lesquels un recul de la côte est prévu. Ces reculs sont en moyenne de 8 m, d'au moins 1 m et d'au plus 28 m. Aux deux extrémités du site d'étude, les projections sont à l'intérieur de l'enveloppe de mobilité historique. Au centre, la ligne de rivage 2050 est localisée derrière l'enveloppe de mobilité historique. La surface d'erreur quadratique en moyenne de ±21 m, d'au moins ±4 m et d'au plus ±55 m. C'est à l'extrémité est que cette surface est la plus large. Ceci est attribuable à l'historique d'accolement de cordons dans cette zone.

La ligne Rmax_5 ans indique que de l'érosion sévère (vitesse de recul maximale mesurée durant la période d'analyse) maintenue durant 5 ans pourrait générer des reculs variant entre 2 m et 28 m et en moyenne de 13 m. La carte suivante (figure 170) présente les résultats de la projection vers l'horizon 2050.

Tableau 30. Évolution de la ligne de rivage, Moisie

	Projection 2050	**Projection 2050 positif**	**Projection 2050 négatif**	**Largeur de la surface d'erreur quadratique moyenne**	**Rmax_5 ans**
Moyenne	0,2 m	7 m	-8 m	±21 m	-13 m
Minimum	-14 m	13 m	-1 m	±4 m	-2 m
Maximum	13 m	0,2 m	-14 m	±55 m	-28 m

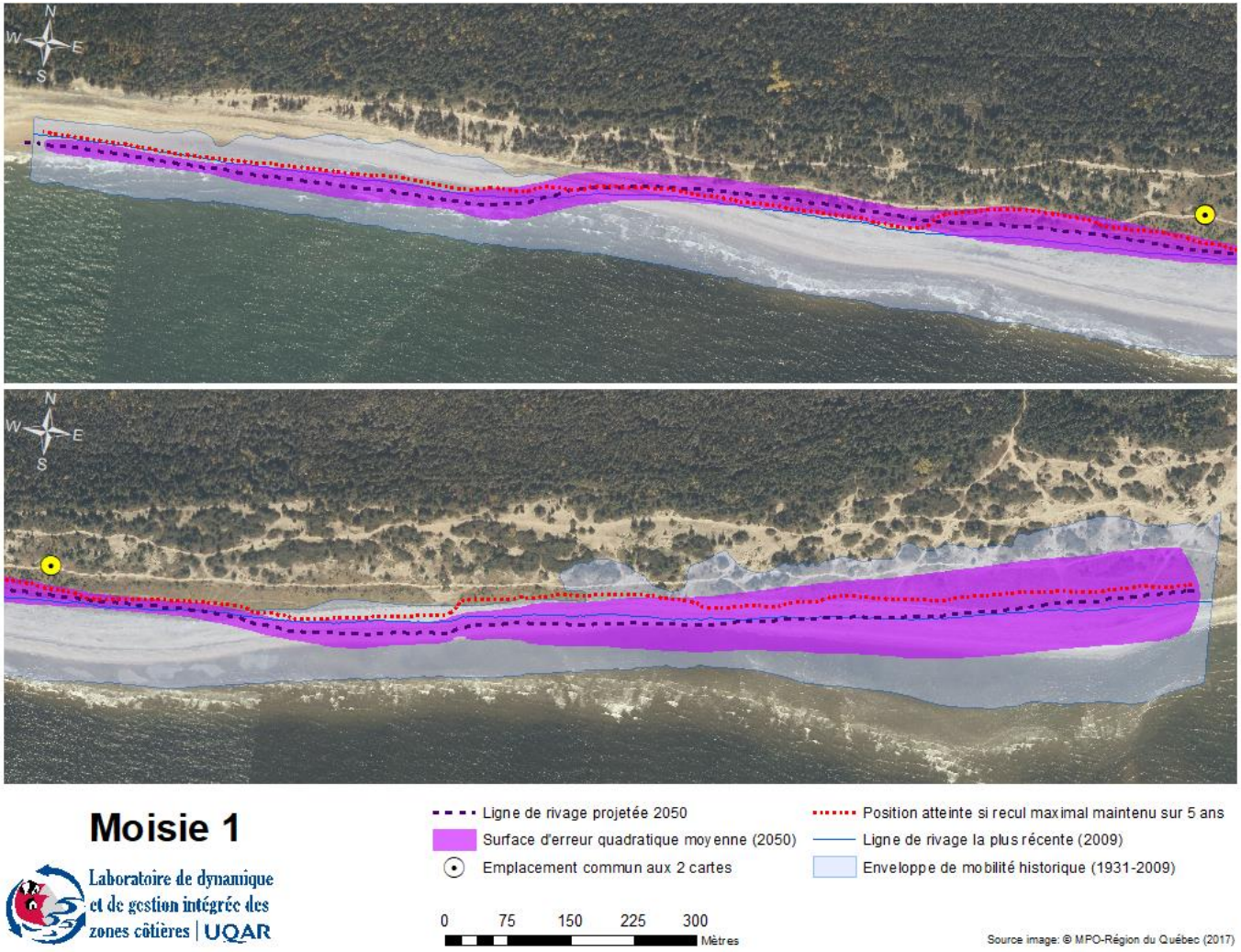


Figure 170. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050, Moisie 1

3.7.5 Longue-Pointe-de-Mingan 1

Selon les résultats de l'analyse historique réalisée sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan 1, l'érosion a été persistante, mais non exclusive. Mis à part un court tronçon à l'extrémité est du segment à l'étude, la dernière position de la ligne de rivage disponible (2014) est la plus reculée de toute la période d'analyse (figure 101). Les périodes et transects pour lesquels il y a eu un peu d'accumulation étaient sporadiques et ponctuels.

3.7.5.1 *Choix de la période pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

La période la plus récente (2005/2009-2014) est trop courte pour bien représenter la vitesse d'évolution de la côte. À la figure 171, on constate combien les reculs ont été largement plus rapides durant cet intervalle. Par exemple, devant le transect 23, le taux d'évolution est de 6,41 m (moyenne mobile) alors que pour les autres périodes de calcul, il oscille entre 0,96 m/an et 1,74 m/an. L'analyse de l'évolution de la côte sur des périodes un peu plus longues, par exemple 1997-2014, indique que les vitesses de recul telles que celles survenues durant l'intervalle 2005/2009-2014 ne se maintiennent vraisemblablement pas durant de longues périodes. Ce taux est vraisemblablement trop sévère pour être projeté et maintenu jusqu'à l'horizon 2050. En effet, avec des taux d'évolution de -6 m/an, le recul projeté (36 ans, de 2014 à 2050) serait supérieur à 200 m alors qu'il a été d'au plus une centaine de mètres en 66 ans (1948-2014).

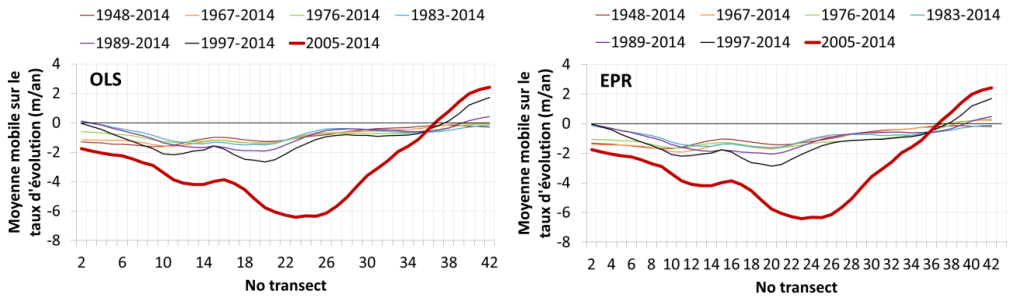


Figure 171. Taux d'évolution pour la période 2005-2014 comparativement aux autres périodes de calcul selon les méthodes EPR et OLS (la période 2005/2009-2014 ne compte que deux points, expliquant les résultats identiques entre les méthodes OLS et EPR), Longue-Pointe-de-Mingan 1

La période 1997-2014 est la période d'analyse récente qui aurait généralement été favorisée méthodologiquement en raison des conditions climatiques qui s'apparentent le plus à celles prévues pour l'horizon de projection 2050. Cependant, cette dernière est encore trop courte pour tenir compte des vitesses d'érosion les plus rapides de 1976-1983 mesurées aux transects 2 à 10 (figure 172). La période 1997-2014 ne permettrait donc pas d'intégrer les vitesses d'érosion les plus sévères ayant été mesurées durant l'ensemble de la période historique.

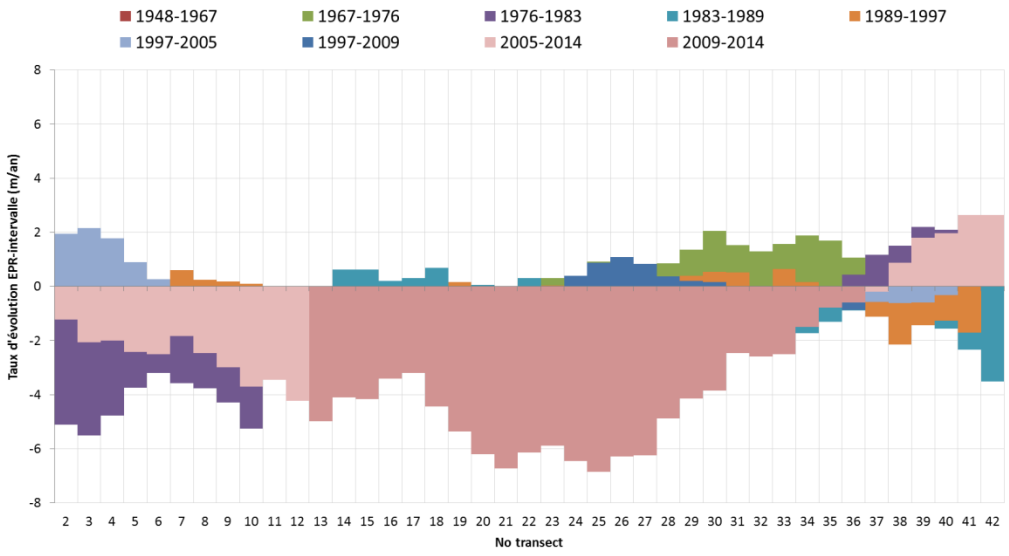


Figure 172. Vitesses de recul lors des différents intervalles, Longue-Pointe-de-Mingan 1

Les périodes de calcul ainsi disponibles sont 1948-2014 (historique), 1967-2014 et 1976-2014. Si l'on compare les taux d'évolution (OLS) obtenus pour ces périodes de calcul, les différences sont en moyenne assez limitées, avec des valeurs de 0,00 m, 0,04 m et 0,04 m (figure 173 et tableau 31). Les moyennes presque nulles indiquent que pour certains transects, les taux d'évolution calculés sur les périodes comparées sont parfois plus élevés et inversement, parfois moins élevés pour l'une ou l'autre des périodes ; en moyenne, le taux d'évolution moyen (tous les transects) est presque le même (avec -0,89, -0,89 et -0,85, respectivement). Les différences entre les taux s'observent spatialement. Deux zones présentent des écarts plus importants entre les différentes périodes de calcul, soit les zones comprises entre les transects 2 à 10 et entre les transects 28 à 39. Sur la zone 2-10, le taux

d'évolution le plus sévère est calculé à partir de la période 1948-2014 et sur la zone 28-39, à partir de la période 1976-2014. Afin d'éviter de surestimer ou de sous-estimer le recul pour l'une ou l'autre de ces zones, c'est vraisemblablement la période de calcul 1967-2014 qui présente la meilleure alternative.

Tableau 31. Différences entre les taux calculés par OLS sur les périodes de calcul 1948-2014, 1967-2014 et 1976-2014

Différence en m (méthode OLS)	1948-2014 vs 1967-2014	1948-2014 vs 1976-2014	1967-2014 vs 1976-2014
Minimum	-0,22	-0,39	-0,25
Maximum	0,26	0,70	0,55
Moyenne (tous les transects)	0,00	0,04	0,04
Moyenne des différences absolues (MAE)	**0,14**	**0,27**	**0,18**

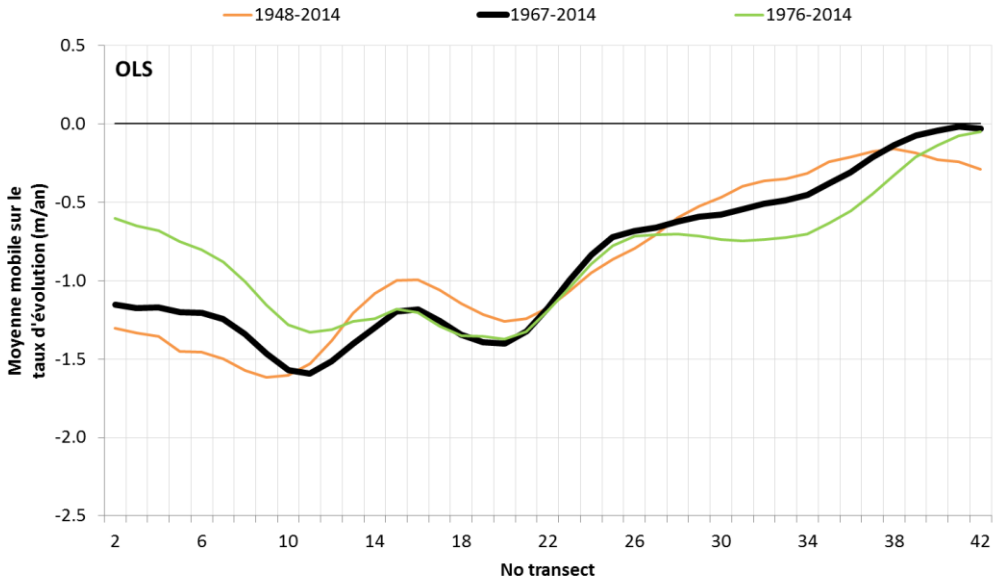


Figure 173. Taux d'évolution OLS (moyenne mobile) à projeter obtenus à partir de trois périodes de calcul (historique-1948-2014, 1976-2014, 1976-2014), Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.7.5.2 *Choix de la méthode statistique pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

Il a été conclu au fil des sections précédentes que la méthode OLS offre le plus d'avantages. Dans ce cas précis, la différence entre les taux calculés varie entre -0,33 et 0,25 m et est en moyenne de 0,21 m (EAM) (figure 174).

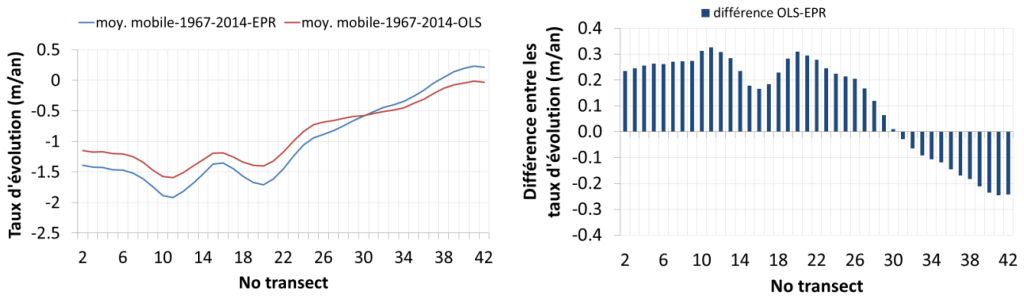


Figure 174. Taux calculés selon les méthodes EPR et OSL (graphique de gauche) et différence entre ces deux méthodes (graphique de droite)

L'analyse des résultats obtenus à l'aide des deux méthodes sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan 1 permet d'identifier une limite de la méthode EPR qui n'avait pas encore été soulevée jusqu'ici. En utilisant que deux positions, les modèles (équation de la droite) obtenus à partir de la méthode EPR peuvent présenter des biais systématiques (liés à l'échantillonnage). On constate visuellement à la figure 175 que le modèle (droite) obtenu à l'aide de la méthode EPR présente un biais systématique positif par rapport aux données observées pour les dates comprises entre le premier et le dernier point (*end point rate*). En d'autres mots, ce modèle prédit systématiquement une position plus avancée (figure 175) de la ligne de rivage que ce qui a été observé durant le passé. L'exemple de la figure 176, quant à lui, présente une situation dont le biais systématique est négatif. L'utilisation de la méthode OLS évite ce type de situations en plus d'être plus cohérant avec la représentation de la surface EQM.

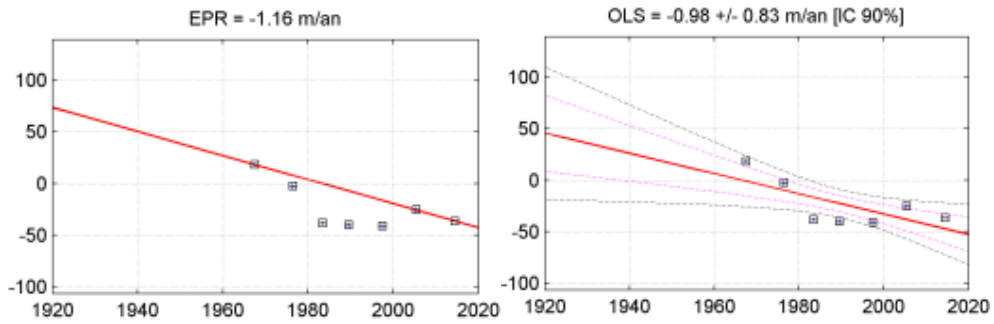


Figure 175. Biais positif de l'équation obtenue à l'aide de la méthode EPR, transect 2, Longue-Pointe-de-Mingan 1

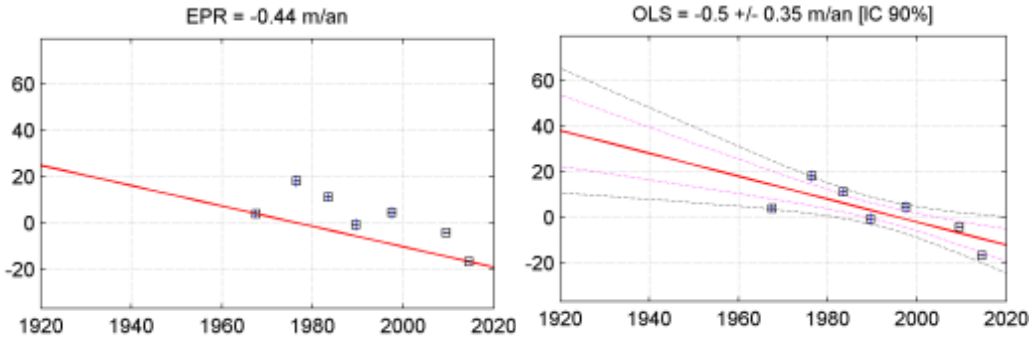


Figure 176. Biais négatif de l'équation obtenue à l'aide de la méthode EPR, transect 33, Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.7.5.3 *Vitesses de recul maximales*

Les vitesses de recul maximales (moyenne mobile 250 m) ont surtout été mesurées durant l'intervalle 2009-2014 (21 transects) et, dans une moindre mesure, durant les intervalles 2005-2014 (2 transects), 1989-1997 (3 transects), 1983-1989 (3 transects) et 1976-1983 (8 transects).

Tableau 32. Nombre de transects pour lesquels les vitesses ont été enregistrées au cours des différents intervalles d'analyse

Intervalle (durée en année)	Nombre de transects pour lesquels la vitesse maximale de recul a été enregistrée au cours de l'intervalle
1948-1967 (19 ans)	0
1967-1976 (9 ans)	0
1976-1983 (7 ans)	8
1983-1989 (6 ans)	3
1989-1997 (8 ans)	3
1997-2005 (8 ans)	0
1997-2009 (12 ans)	0
2005-2014 (9 ans)	2
2009-2014 (5 ans)	25

3.7.5.4 *Cartes de projection d'évolution côtière*

Longue-Pointe-de-Mingan 1 : méthode OLS, période 1967-2014

La projection pour le secteur de Longue-Pointe-de-Mingan 1 prévoit seulement des reculs. L'érosion prévue implique un recul moyen de 32 m par rapport à la position de la ligne de rivage de 2014 et s'élève jusqu'à un maximum de 57 m devant le transect 11 (tableau 33). La surface d'erreur quadratique est en moyenne de ±10 m de part et d'autre de la projection 2050, d'au moins ±6 m et d'au plus ±16 m et est d'une largeur assez homogène tout au long du secteur d'analyse. Si les vitesses de recul les plus rapides ayant été mesurées étaient maintenues sur une période de 5 ans, la ligne de rivage projetée serait en moyenne à 20 m derrière la ligne de rivage de 2014. Le recul serait tout au plus de 32 m et d'au moins 5 m. Comme le système est presque exclusivement en érosion depuis 1948, les projections (2050 et Rmax_5ans) sont positionnées à l'extérieur (vers les terres) de l'enveloppe de mobilité historique (figure 178).

Tableau 33. Évolution de la ligne de rivage, Longue-Pointe-de-Mingan

	Projection 2050	Largeur de la surface d'erreur quadratique moyenne	Rmax_5ans
Moyenne	-32,06 m	±9,81 m	-19,66 m
Minimum	-57,3 m	±5,56 m	-32,05 m
Maximum	-0,59 m	±16,24 m	-4,82 m

Les résultats de Longue-Pointe-de-Mingan 1 permettent d'illustrer l'importance de l'intégration des quatre variables cartographiques proposées dans le cadre de ce projet dans un contexte d'aménagement du territoire (projection 2050 + surface d'erreur quadratique moyenne, enveloppe de mobilité historique et ligne Rmax_5ans). En effet, à l'extrémité est du segment analysé, là où l'enveloppe de mobilité historique et la surface d'erreur quadratique moyenne se superposent, on remarque que la position actuelle de la ligne de rivage (2017[8]) est déjà derrière la position projetée par le modèle pour 2050 et derrière la ligne Rmax_5ans (figure 178). Dans ce cas précis, on constate que la projection pour 2050 n'implique presque pas de recul puisque le site a été caractérisé par des avancées et des reculs et une certaine stabilité à l'échelle historique. Aussi, la vitesse de recul maximale y ayant été captée est assez faible. En conséquence, la projection 2050 et la ligne Rmax_5ans sont très près de la ligne de rivage de référence, soit la position de 2014. L'usage de ces deux variables cartographiques n'aurait pas permis de prendre des décisions adéquates quant à l'aménagement du territoire. La position de la ligne de rivage en 2017 est cependant, sauf sur une centaine de mètres environ, à l'intérieur des limites de la surface d'erreur quadratique moyenne et de l'enveloppe de mobilité historique. L'intégration des quatre variables aux cartes de projections d'évolution côtière est donc essentielle aux prises de décisions relatives à l'aménagement du territoire. Enfin, le fait qu'il y ait eu un recul sévère dans une zone où celui-ci n'était pas prévisible sur la base de l'analyse des données historiques soulève de nouveau les difficultés associées à la mobilité spatiale et temporelle des zones d'érosion sévère. Les cartes suivantes (figure 177 et figure 178) présentent les résultats de la projection vers l'horizon 2050.

[8] L'imagerie 2017 a été acquise à la toute fin du projet si bien que la ligne de rivage 2017 n'a pas été intégrée à l'analyse historique.

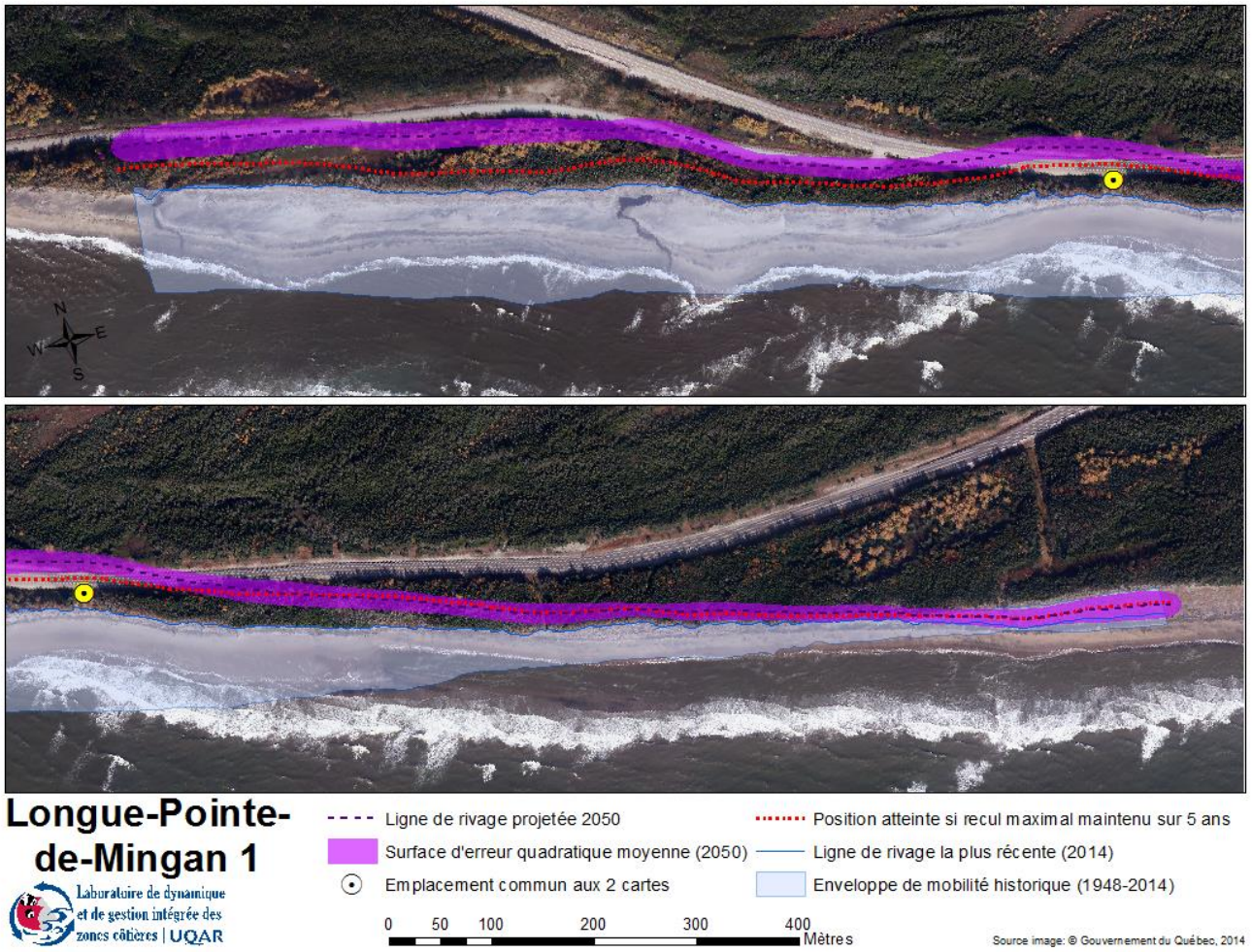


Figure 177. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050, Longue-Pointe-de-Mingan 1

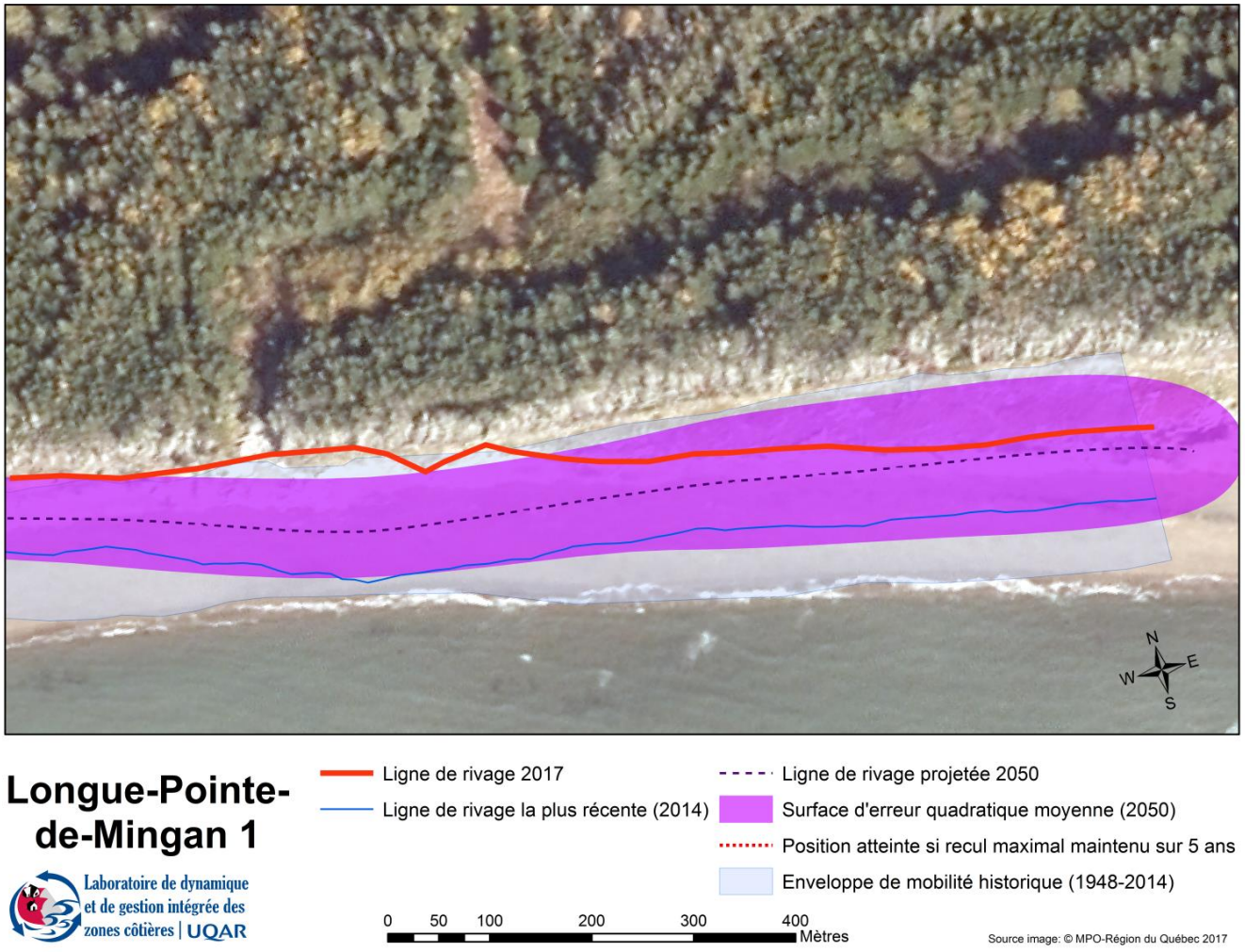


Figure 178. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050, extrémité est de Longue-Pointe-de-Mingan 1

3.7.6 Longue-Pointe-de-Mingan 2

Sur le site de Longue-Pointe-de-Mingan 2, l'érosion est dominante sur la période historique, mais s'effectue selon des cycles d'érosion et d'accumulation.

3.7.6.1 *Choix de la période pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

La période de calcul pour le taux à projeter doit tenir compte du mode d'évolution historique (érosion dominante et évolution par cycle) et donc, intégrer des périodes d'avancées et de reculs pour tous les transects, ce que la période la plus récente (2005/2009-2014) ne permet pas. En raison des valeurs élevées des taux d'avancée et de recul mesurés, elle ne permettrait pas non plus de conserver la cohérence morphologique du trait de côte (figure 179).

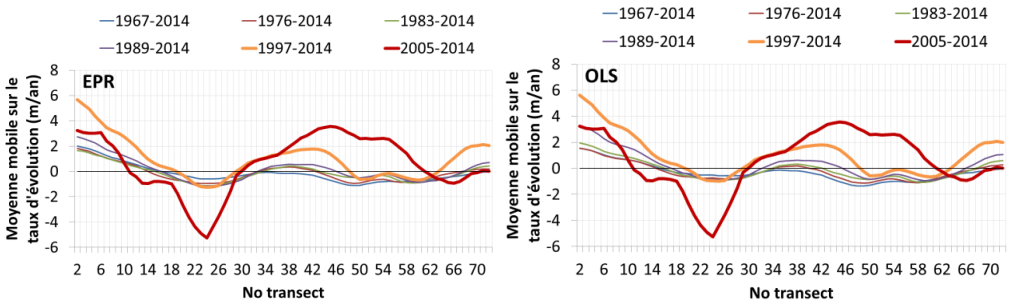


Figure 179. Taux d'évolution pour la période 2005-2014 comparativement aux autres périodes de calcul selon les méthodes EPR et OLS (la période 2005/2009-2014 ne compte que deux points , expliquant les résultats identiques entre les méthodes OLS et EPR), Longue-Pointe-de-Mingan 2

La période 1997-2014 aurait été la période retenue en raison des similitudes qu'elle présente avec les conditions climatiques futures. Par contre, elle ne permet pas d'intégrer les vitesses de recul maximales de tous les transects. À la figure 180, on observe que l'on doit remonter à 1967 pour intégrer la vitesse d'évolution la plus rapide. C'est donc la période 1967-2014 qui permet de tenir compte des vitesses de recul maximales et qui est retenue (figure 181).

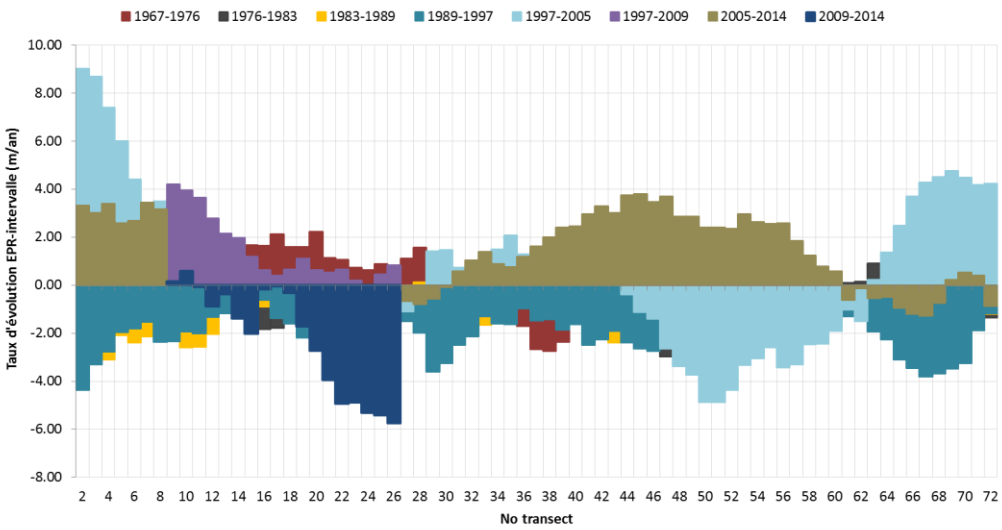


Figure 180. Vitesses de recul lors des différents intervalles, Longue-Pointe-de-Mingan 2

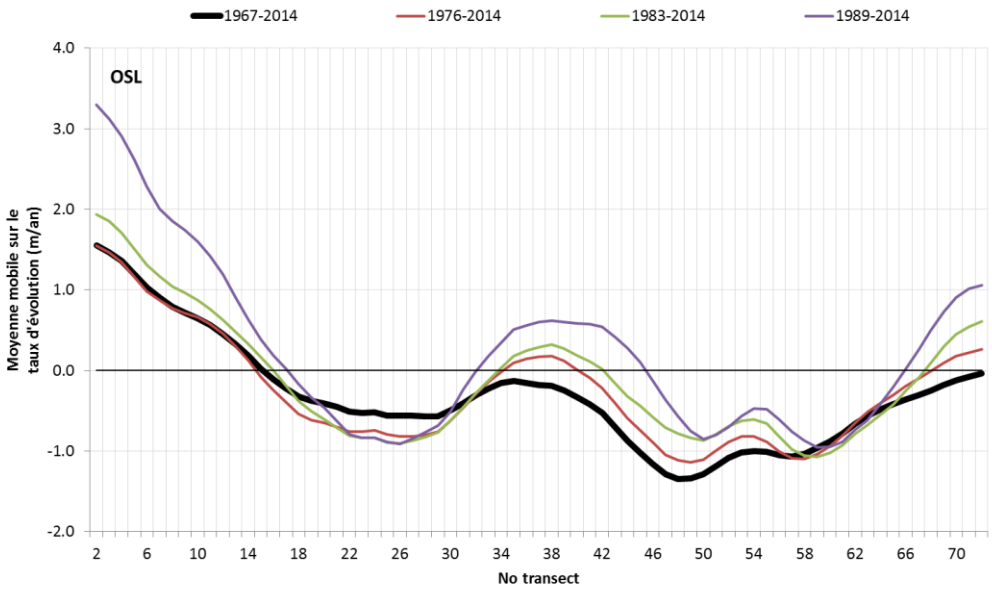


Figure 181. Taux d'évolution OLS (moyenne mobile) à projeter obtenus à partir de quatre périodes de calcul (historique-1967-2014, 1976-2014, 1983-2014 et 1989-2014), Longue-Pointe-de-Mingan 2

3.7.6.2 *Choix de la méthode statistique pour le calcul du taux d'évolution à utiliser pour les projections d'évolution côtière*

La méthode OLS est retenue ici pour le calcul des taux d'évolution côtière à projeter et ce, en raison des avantages présentés jusqu'ici. Dans ce cas précis, le taux d'évolution calculé à partir de la méthode OLS est généralement inférieur à celui obtenu à partir de la méthode EPR (figure 182).

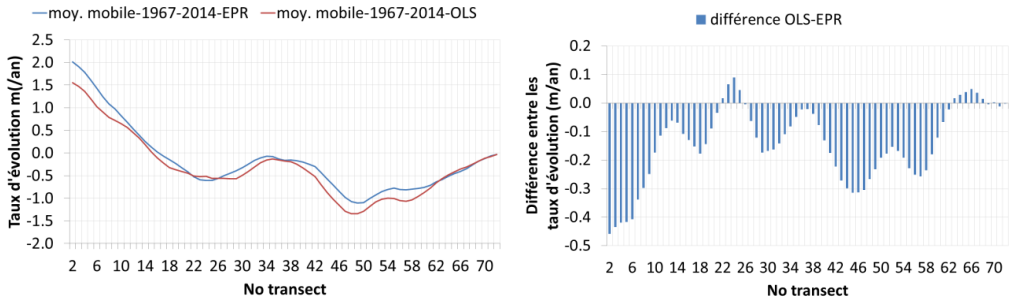


Figure 182. Taux calculés selon les méthodes EPR et OSL (graphie de gauche) et différence entre ces deux méthodes (graphique de droite)

3.7.6.3 *Vitesses de recul maximales*

Les vitesses maximales utilisées pour tracer la ligne Rmax_5ans ont principalement été mesurées au cours des intervalles 1989-1997 (29 transects), 1997-2005 (14 transects) et 2009-2014 (10 transects) et, dans une moindre mesure, durant les intervalles 1967-1976 (6 transects), 1983-1989 (6 transects) et 1976-1983 (3 transects).

Tableau 34. Nombre de transects pour lesquels les vitesses ont été enregistrées au cours des différents intervalles d'analyse

Intervalle (durée en année)	Nombre de transects pour lesquels la vitesse maximale de recul a été enregistrée au cours de l'intervalle
1967-1976 (9 ans)	6
1976-1983 (7 ans)	3
1983-1989 (6 ans)	6
1989-1997 (8 ans)	29
1997-2005 (8 ans)	14
1997-2009 (12 ans)	0
2005-2014 (9 ans)	0
2009-2014 (5 ans)	10

3.7.6.4 *Cartes de projection d'évolution côtière*

Longue-Pointe-de-Mingan 2 : méthode OLS, période 1967-2014

Les projections réalisées pour le site de Longue-Pointe-de-Mingan 2 sont parfois négatives (érosion) et parfois positives (progradation) (tableau 35). Plus exactement, on prévoit une avancée de la ligne de rivage pour la zone comprise entre les transects 2 à 15, soit à l'extrémité ouest du site d'étude, et de l'érosion pour tous les transects suivants. Les avancées prévues vont jusqu'à un maximum de 56 m et sont en moyenne de 6 m. Les reculs prévus, quant à eux, vont jusqu'à 48 m et sont en moyenne de 17 m. On observe que la surface d'erreur quadratique moyenne est plus large dans l'extrémité ouest du site d'étude où elle s'étend de part et d'autre de la ligne projetée pour 2050 sur une distance allant jusqu'à 23 m, alors que c'est en moyenne 9 m sur l'ensemble du site d'étude. Ceci signifie qu'à cet endroit la position de la ligne de rivage présente une plus grande variabilité autour de la tendance calculée. Pour l'ensemble du site, si les vitesses de recul les plus rapides ayant été mesurées historiquement étaient maintenues durant 5 ans, le recul serait en moyenne de 14 m et pourrait s'élever jusqu'à 29 m. Enfin, la ligne projetée pour 2050 est parfois à l'intérieur de l'enveloppe de mobilité historique et parfois à l'extérieure.

À la lumière de l'analyse de l'évolution du site d'étude, on sait que le corps sédimentaire sableux qui s'est accolé à la plage dans l'extrémité ouest a permis une progression importante vers le large de la ligne de rivage (Corriveau et al., 2016). Les images de 2014 et de 2017 montrent que ce

corps sédimentaire est en migration vers l'est, dans le sens de la dérive littorale (figure 183). Sous de telles conditions, on devrait s'attendre à un ralentissement de l'avancée de la ligne de rivage à l'ouest au profit des zones adjacentes tout juste à l'est, qui devraient alors, à leur tour, connaître une avancée. Cet exemple montre que les projections d'évolution côtière basées sur les données historiques ne permettent pas d'intégrer le caractère spatial d'une telle dynamique. En ce sens, les projections côtières doivent aussi être accompagnées d'une analyse des conditions récentes et de la dynamique côtière à l'échelle du système. La carte suivante (figure 184) présente les résultats de la projection vers l'horizon 2050.

Tableau 35. Évolution de la ligne de rivage, Longue-Pointe-de-Mingan 2

	Projection 2050	Projection 2050 positif	Projection 2050 négatif	Largeur de la surface d'erreur quadratique moyenne	Rmax_5 ans
Moyenne	-11,33 m	5,68 m	-17,01 m	±9,33 m	-13,59
Minimum	-48,37 m	0,00 m	-48,37 m	±2,71 m	-28,75
Maximum	55,81 m	55,81 m	0,00 m	±22,89 m	-4,94

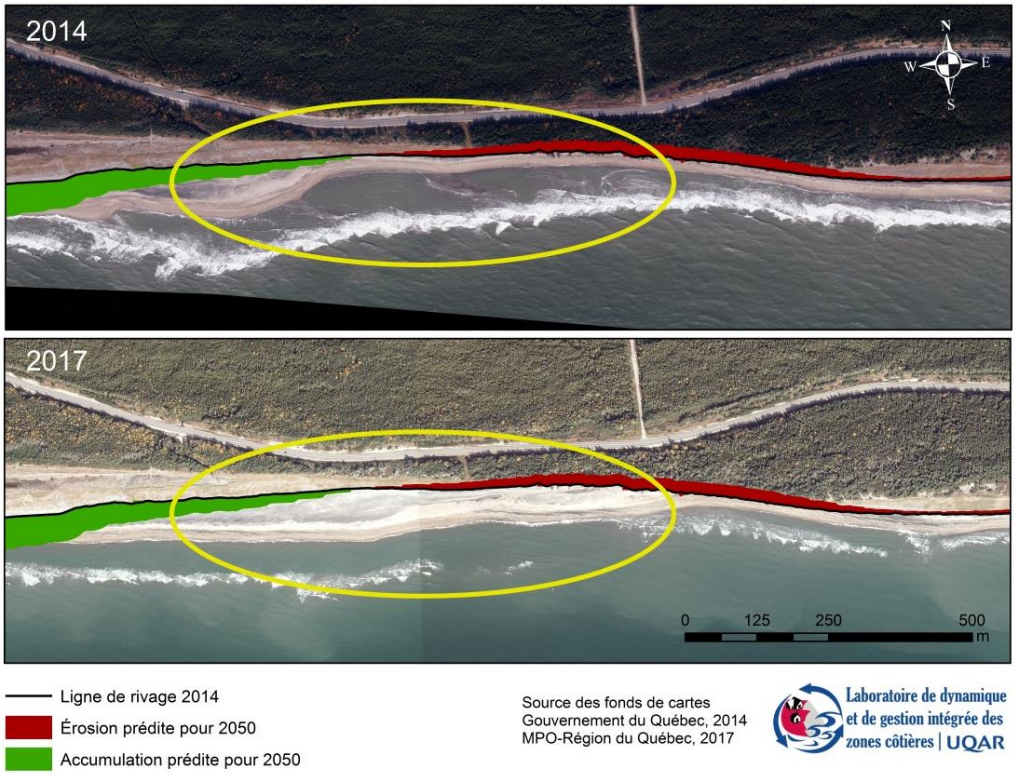


Figure 183. Évolution récente de la côte (2014-2017) et migration du corps sédimentaire vers l'est

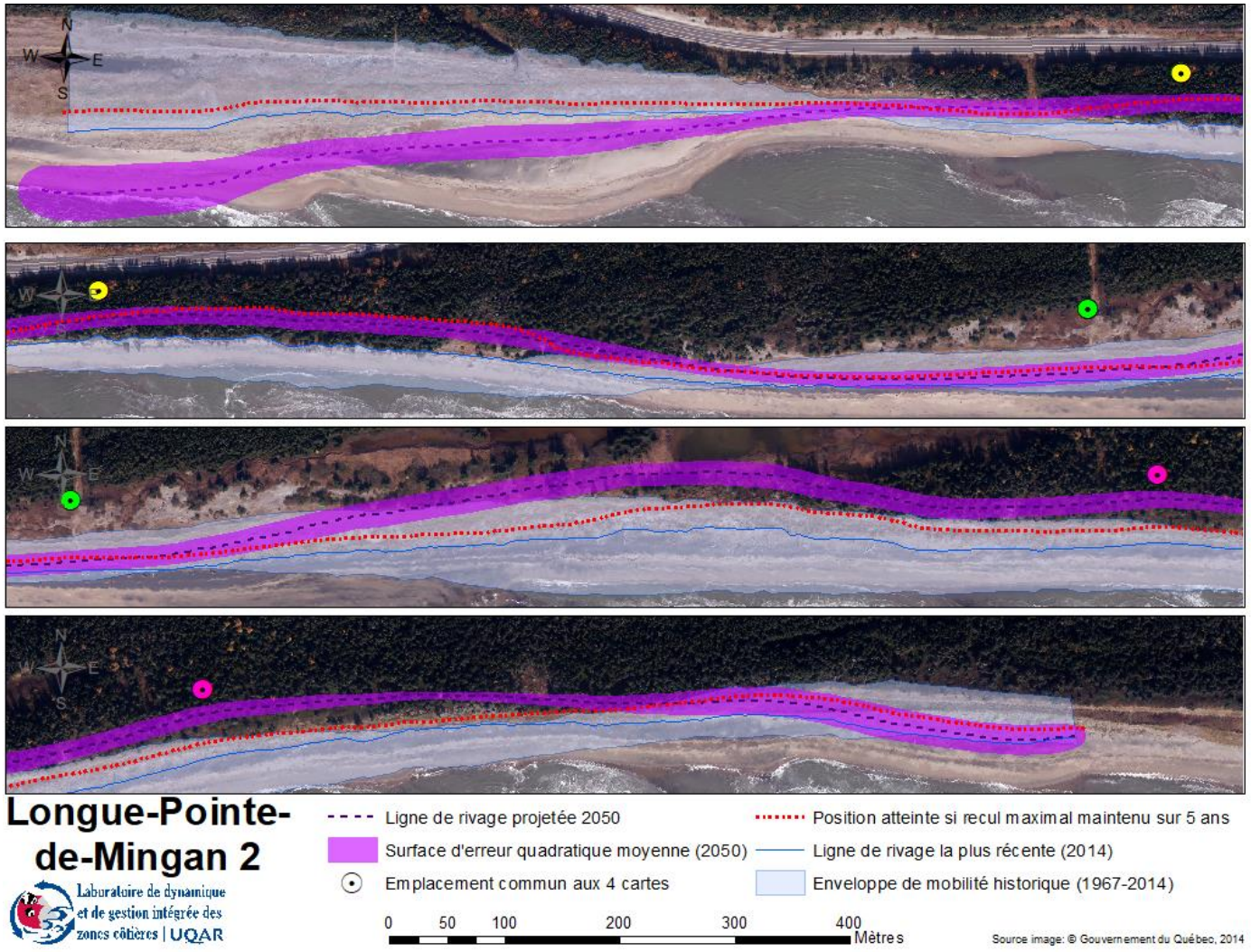


Figure 184. Projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050, Longue-Pointe-de-Mingan 2

3.8 Perspectives

Les développements futurs visant l'amélioration des projections à travers l'approche purement empirique (taux d'évolution historique) sont somme toute assez restreints. Nous avons fait une revue sur les choix méthodologiques, pour lesquels les chercheurs sont en mesure d'agir, et appliqué cette méthode sur quatre sites d'étude. Lorsque des changements environnementaux majeurs (par ex., Gallix 2) ou les changements récents (confirmés ou non) de tendance (par ex., Gallix 1) ont été observés, il est difficile de d'utiliser adéquatement les données du passé pour produire des projections d'évolution côtière. Aussi, en introduction, nous avons vu que les modèles numériques pour simuler l'évolution de la côte à moyen terme (projection 30, 40 ou 50 ans) ne sont pas encore satisfaisants ou alors nécessitent des temps de calcul encore trop longs pour envisager leur usage (par ex. : simuler une journée exige une journée en temps de calcul sur XBeach).

La production toute récente des séries temporelles de vagues (WaveWatch III) pour l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent permet d'envisager tester et utiliser la méthode de projection proposée par Ranasinghe et al. (2012). Ceux-ci proposent un modèle, *le probabilistic coastline recession model* (*PCR model*) basé sur les travaux de Larson (2004), combiné à l'utilisation des projections d'élévation du niveau de la mer (scénarios) et de séries temporelles de tempête pour calculer les déplacements négatifs de la ligne de rivage. Les intrants nécessaires pour appliquer leur modèle sont les scénarios de hausse du niveau marin (par ex. : scénarios selon l'IPCC) et des séries temporelles de vagues (générées à l'aide de WaveWatch III, par exemple). Une revue de la littérature permettrait d'identifier d'autres méthodes de projections côtières pouvant être testées.

Au Québec, la réduction du couvert de glace de mer (Senneville et Saucier, 2007) et de la protection offerte par le pied de glace (Senneville et al., 2014) sont parmi les changements environnementaux attendus qui auront, à moyen terme, sans doute le plus d'impacts sur l'évolution du littoral. Ces changements auront des impacts sur les conditions de vagues à la côte. En ce sens, les méthodes qui permettent d'intégrer les vagues aux projections d'évolution côtière et l'évolution du niveau marin (sans utiliser Brunn) sont particulièrement intéressantes dans le contexte québécois.

3.9 Conclusion

Dans cette section dédiée aux projections d'évolution côtière, un retour sur les concepts de base a été effectué. Le modèle conceptuel de l'évolution côtière, l'équation de base pour réaliser les projections d'évolution côtière, le choix des indicateurs pour le traçage des lignes de rivage ont d'abord été présentés. Le retour sur les fondements a permis de mettre en lumière les éléments sur lesquels les chercheurs peuvent effectuer des choix méthodologiques. Par exemple, la disponibilité (nombres et années) des photographies aériennes est indépendante des chercheurs. Par contre, la méthode statistique pour le calcul des taux et la période de calcul sur laquelle ces taux sont calculés sont eux, dépendant de choix méthodologiques. En ce sens, grâce à une revue de la littérature, les différentes méthodes statistiques pour le calcul des taux d'évolution ont été décrites. Les justifications des choix de la période sur laquelle ce taux est calculé ont aussi été présentées.

À l'aide des données provenant d'un des sites d'étude, les taux d'évolution ont été calculés selon toutes les méthodes possibles à l'aide du logiciel MobiTC afin d'exemplifier l'impact du choix de la méthode statistique de calcul sur les résultats (taux). Les différences entre les taux étaient somme toute importantes, surtout lorsque ceux-ci sont utilisés pour réaliser des projections d'évolution côtière. En effet, un écart de 0,5 m entre les taux correspond à une différence de 20 m lorsque projeté sur 40 ans. Cet exercice a aussi été réalisé pour les périodes de calcul du taux ; le choix de la période de calcul implique lui aussi que les taux calculés seront très différents. Il a été conclu que la méthode des moindres carrés ordinaire (OLS, *ordinary least square*) était la méthode présentant le plus d'avantages. Néanmoins, la possibilité d'utiliser les taux plus vieux – plus récents (EPR, *end point rate*) n'a pas été complètement exclue. En effet, cette méthode statistique s'est avérée être le meilleur choix dans le cas de Moisie 1.

La période sur laquelle les taux d'évolution sont calculés est choisie de manière à représenter les conditions climatiques futures. En ce sens, il s'agit essentiellement d'utiliser une période récente. Cependant, nous avons vu que ce choix méritait d'être adapté en fonction de la dynamique côtière des sites d'étude si bien que dans certains cas, la période choisie était l'historique (date la plus ancienne à la plus récente). Par exemple, si le littoral évolue par cycles d'avancées et reculs, il est incohérent de réaliser une projection qui serait basée sur une période durant laquelle la côte a seulement reculé. Les projections obtenues surestimeraient alors grandement le recul prévu en omettant une partie de la dynamique côtière.

En plus de choisir la méthode statistique et la période pour le calcul des taux, il est possible d'ajuster le taux ou l'équation ou encore d'ajouter des variables cartographiques complémentaires. Une revue de la littérature a permis d'en identifier un certain nombre. Une variable cartographique complémentaire a été proposée pour permettre d'intégrer les foyers d'érosion côtière aux projections. Il s'agit d'une ligne qui représente la position de la ligne de rivage si la vitesse de recul la plus sévère ayant été mesurée au cours de la période historique était de nouveau atteinte et maintenue sur une période de 5 ans (la ligne Rmax_5ans). Cette ligne de rivage n'est pas une projection proprement dite de la position de la ligne de rivage dans 5 ans. En effet, compte tenu de la mobilité des foyers d'érosion, il est à peu près impossible que tout le littoral entre dans une période de recul intense en même temps pour une durée de 5 ans. Par contre, cette approche permet de tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle des foyers d'érosion et d'intégrer une donnée cartographique aux projections, permettant d'en tenir compte dans une perspective de gestion et d'aménagement du territoire côtier.

Finalement, des projections d'évolution côtière ont été réalisées pour quatre sites d'étude. Pour chacun de ces sites, l'analyse historique et la configuration actuelle ont servi de base pour la justification des choix méthodologiques. La dynamique côtière des sites d'étude était différente pour tous ces sites et il a été nécessaire d'effectuer des choix méthodologiques différents pour chacun d'eux. En ce sens, l'application uniforme d'une méthodologie unique menant à la réalisation de projection d'évolution côtière pour de vastes territoires d'étude ne devrait pas être envisagée.

Par rapport aux dernières méthodes de projection d'évolution côtière utilisées sur la Côte-Nord, les éléments apportés dans ce projet ont permis, et permettront, de réaliser des projections côtières améliorées. Malgré tous les efforts déployés pour réaliser des projections de grande qualité, nous avons été confrontés à des limites importantes notamment lorsque le littoral avait subi des changements environnementaux récents. Ainsi, les projections d'évolution côtière ne doivent pas être l'unique élément sur lequel sont basées les décisions de gestion et d'aménagement du territoire côtier.

4 OBJECTIF 3 : ÉVALUATION DE L'ORIGINE ET DE LA DYNAMIQUE DES FOYERS D'EROSION DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN

Le présent projet avait également comme objectif d'évaluer l'origine et la dynamique des foyers d'érosion en bordure de la route 138 où celle-ci est menacée à court (moins de 5 ans) et moyen termes (5 à 10 ans) à Longue-Pointe-de-Mingan. En effet, un précédent rapport a mis en lumière une dynamique importante potentiellement à l'origine des foyers d'érosion qu'on observe à deux endroits sur ce site (Corriveau et al., 2016). Les conclusions indiquent qu'une meilleure compréhension de la dynamique littorale, soit des variations morphologiques de la plage et des conditions hydrodynamiques à l'origine, était souhaitable pour bien orienter les actions à entreprendre. Un rappel de ce projet est présenté à la section 4.1. La présente section vise à caractériser davantage la dynamique de vagues présente sur le littoral de Longue-Pointe-de-Mingan. Pour ce faire, différents instruments de mesure ont été mis en place et la morphologie de la plage a été relevée à plusieurs reprises en 2015 et 2016.

4.1 Rappel du projet sur Longue-Pointe-de-Mingan

Le projet de recherche intitulé « Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changement climatique » (Corriveau et al., 2016) et réalisé par l'équipe du LDGIZC entre 2014 et 2016 a décrit le contexte géomorphologique et son évolution tant holocène, qu'historique et annuelle. En somme, ce rapport indique que la zone côtière de la région de Longue-Pointe-de-Mingan résulte d'abord d'un abaissement rapide du niveau marin à l'origine de la mise en place d'un delta à la sortie de la rivière Saint-Jean, qui s'étendait au-delà de la position actuelle du littoral. La remontée subséquente du niveau marin relatif a par la suite engendré l'érosion du front du delta et façonné les falaises meubles actuelles qu'on observe de part et d'autre de l'embouchure de la rivière Saint-Jean. Toujours selon ce rapport, une partie des apports sédimentaires issue de l'érosion des falaises de même que la charge sédimentaire de la rivière se seraient accumulées pour former la pointe de Mingan, dont l'arrière-côte est entièrement constituée de formes d'accumulation, notamment de plages soulevées.

Ces mêmes apports sédimentaires seraient également à l'origine de la formation des barres sableuses qui agissent comme point de déferlement des vagues lorsqu'elles se trouvent sur le bas estran. Elles contribuent ainsi à

élargir et relever le niveau altimétrique du haut estran lorsqu'elles se déplacent vers la côte. En raison de leur mobilité, de leur présence ou de leur absence momentanée, elles ont une incidence sur le comportement morphologique de l'estran et, par conséquent, sur la position de la ligne de rivage.

L'analyse de l'évolution côtière historique (1948-2014) et récente (2013-2014) de la zone côtière de Longue-Pointe-de-Mingan a été étudiée dans le cadre de l'étude de Corriveau et al. (2016). Les auteurs se sont concentrés sur deux secteurs problématiques, soit les secteurs « A » et « B » correspondant en partie aux secteurs « ouest » et « centre » de la présente étude (figure 185). Notons ici que les secteurs « centre » et « ouest » font référence aux sites d'étude LPM1 et LPM2 des sections précédentes. Leurs conclusions stipulent que le secteur « A » présente un taux de déplacement de -1,00 m alors que cette valeur est plutôt de -0,80 m pour le secteur « B » pour l'horizon 1948-2014. À l'échelle récente, on y a observé des reculs ponctuels de 22 m et 11 m entre 2013 et 2014.

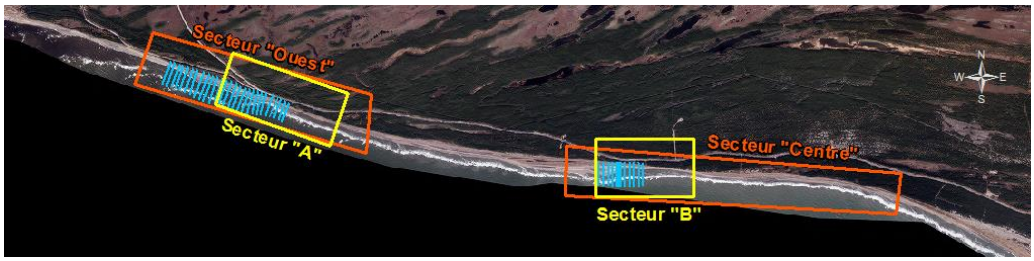


Figure 185. Localisation des secteurs d'étude à Longue-Pointe-de-Mingan investigués dans le cadre du projet de recherche de Corriveau et al. (2016) (en jaune) et de ceux du présent projet de recherche (orangé)

Leur analyse des caractéristiques de l'estran pour la zone côtière de Longue-Pointe-de-Mingan a mis en lumière que le haut estran est généralement plus étroit, plus pentu et moins volumineux sur les plages des secteurs « A » et « B » que celui des zones adjacentes. Ceci témoigne notamment d'une dynamique importante localisée à ces deux endroits qui est potentiellement à l'origine des foyers d'érosion qu'on y observe.

Les recommandations faites dans ce rapport sont de relocaliser la route 138 dans le secteur « A » (ouest) et d'utiliser des ouvrages visant le captage des sédiments en transit pour le secteur B (centre). Parmi les exemples proposés, on retrouve entre autres les épis et les épis Maltais-Savard. Une bonification

de la compréhension de la dynamique littorale devient nécessaire pour bien orienter les actions à entreprendre. Une analyse plus approfondie de l'hydrodynamique locale est donc nécessaire pour bien comprendre la dynamique locale de ce foyer d'érosion à Longue-Pointe-de-Mingan.

Pour ce faire, des instruments pour mesurer les caractéristiques des vagues au large ainsi que près de la côte ont été déployés sur la zone côtière. La section 4.3.1 présentera plus en détail la liste des appareils utilisés, leur positionnement et leur période de déploiement. Afin de comparer le climat de vagues avec les variations morphologiques des plages, un suivi de l'évolution de la morphologie de la plage a été effectué entre le 20 février 2015 et le 15 décembre 2016 à l'aide de relevés topographiques au DGPS ou via le Système Mobile de Laser Terrestre (SMLT) développé par le LDGIZC.

4.2 Description du site et justification du choix du site

4.2.1 Localisation du site

Le site de Longue-Pointe-de-Mingan fut choisi comme site d'étude en raison des deux foyers d'érosion déjà connus qui s'y trouvent, soit un premier dans le secteur où se trouve la jonction entre l'ancienne route 138 et la nouvelle, secteur nommé « secteur ouest », et un second nommé « secteur centre » situé environ 3 km à l'est du premier (figure 186). Les deux segments côtiers étudiés présentent des problématiques d'érosion côtière qui menacent l'intégrité de la route 138 à court ou moyen terme. Le ministère des Transports du Québec est donc à la recherche de solutions pour préserver adéquatement ce lien routier.



Figure 186. Localisation des sites ouest et centre à Longue-Pointe-de-Mingan

4.2.2 Conditions hydrographiques

Le régime hydrographique du site se traduit par des marées de type mixte à prédominance semi-diurne. Le marnage moyen à Mingan est de 1,7 m alors que celui des grandes marées est de 2,5 m. Le niveau moyen de l'eau est de 1,1 m. L'amplitude extrême mesurée serait de l'ordre de 3,89 m (Logimer, 1986 dans Corriveau et al., 2016). Les différents niveaux d'eau marégraphiques sont présentés au tableau 36.

Tableau 36. Niveaux d'eau marégraphiques et géodésiques à la station marégraphique de Mingan (# 2470)

	Marégraphique (m)	Géodésique (m)
Niveau moyen des mers (NMM)	1,1	0
Basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM)	0,1	-1
Basses mers inférieures de marées moyennes (BMIMM)	0,4	-0,7
Pleines mers supérieures de marées moyennes (PMSMM)	2,1	1
Pleines mers supérieures de grandes marées (PMSGM)	2,6	1,5

*Service hydrographique du Canada, 2011 (Extrait de Corriveau et al., 2016)

4.2.3 Exposition de la côte

La côte longiligne et orientée ouest -¼-nord (280°) à est -¼-sud (100°). Le type de côte évolue d'une basse falaise meuble (secteur ouest), où une haute plage végétalisée est parfois présente, à une terrasse de plage vers l'est. La dérive littorale principale est de l'ouest vers l'est.

Les principales sources de sédiments littoraux proviennent de la rivière Saint-Jean et des falaises en érosion composées de sable et de silt argileux. Les sédiments sableux deltaïques, issus du cône sédimentaire à l'embouchure de la rivière Saint-Jean, se disposent sous la forme de barres d'avant-côte sous l'action des courants de marée (Tessier, 1987). On observe également à marée basse la présence de cordons sableux de bas estran (figure 187).



Figure 187. Cordon sableux de bas estran à Longue-Pointe-de-Mingan (secteur centre)

Enfin, des courants fluviaux sont aussi engendrés par la rivière Saint-Jean qui a un débit de 1035 m^3/s en crue et de 85 m^3/s à l'étiage (Cataliotti-Valdina et Long, 1983). La vitesse maximale des courants est de 4,0 nœuds pour le flot et de 3,0 nœuds pour le jusant (Service hydrologique du Canada, 2008). Les houles proviennent principalement de l'ouest-sud-ouest et, dans une moindre mesure, du sud-est. Les courants de marée sont alternatifs, parallèles à la côte et vont vers l'ouest lors du flot et vers l'est lors du jusant. Ils varient entre 24 et 50 cm/s en période de vives-eaux et entre 15 et 28 cm/s en période de mortes-eaux (Ross et Long, 1989).

4.3 Analyse de l'hydrodynamique locale de Longue-Pointe-de-Mingan

4.3.1 Instruments de mesure de vagues déployés à Longue-Pointe-de-Mingan

4.3.1.1 *Capteurs de pression et courantomètres*

Afin de mieux comprendre la dynamique hydrosédimentaire du site de Longue-Pointe-de-Mingan, plusieurs instruments ont été déployés. Dans un premier temps, des capteurs de pression Virtuoso *Dwave* de la compagnie RBR (figure 188a et c) ont été installés tout près des deux secteurs identifiés comme foyers d'érosion, soit les secteurs « ouest » et « centre » (figure 189), pour obtenir des mesures de niveaux d'eau et de vagues à proximité de la côte. Ces derniers sont fixés sur l'estran à l'aide de pieux vissés dans le substrat (figure 188 b) (Didier et al., 2017).

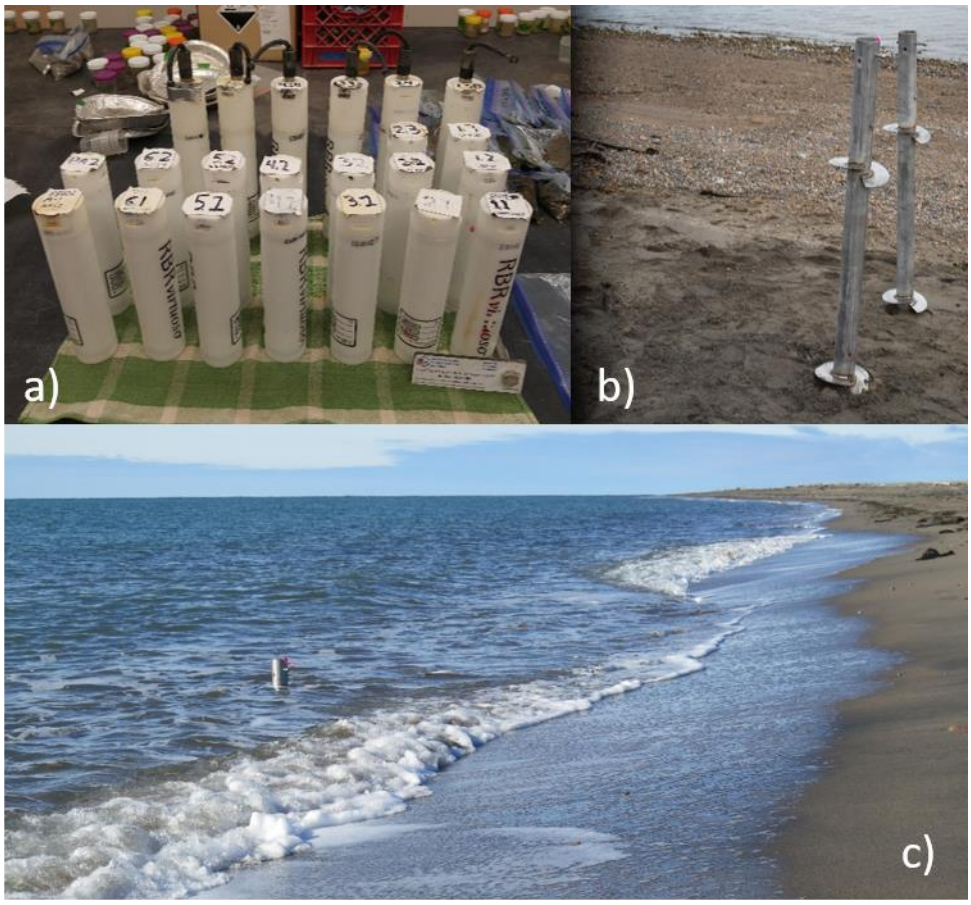


Figure 188. a) Capteurs de pression RBR ; b) Vis d'installation des capteurs ; c) Capteur en place sur la plage de Longue-Pointe-de-Mingan

Les capteurs de pression sont positionnés le long d'un profil perpendiculaire à la côte sur trois isobathes différentes, soit : sur le bas estran à la limite des basses mers maximales, à l'endroit de la flexure ainsi que sur le haut estran (figure 189). Ces instruments permettent de quantifier les paramètres non directionnels (spectraux) des vagues et les niveaux d'eau en acquérant les données de dénivellation de la surface libre en continu à une fréquence de 4 Hz soit 4 données par seconde.



Figure 189. Localisation des instruments de mesure de vagues et des profils de plage

Le spectre entier des vagues enregistrées aux capteurs (*full spectrum*) considérant les phénomènes entre 1 et 100 secondes de période a été utilisé pour réaliser ces analyses. La comparaison des spectres gravitaire et infragravitaire sur les séries de données a été réalisée tant sur les capteurs en bas estran et à la flexure que sur le haut estran. Dans tous les cas, on peut observer que les ondes gravitaires dominent le spectre.

Les données du spectre entier permettent d'obtenir notamment les valeurs de la hauteur significative (Hs), de la période moyenne entre 2 crêtes (Tm01), de la période moyenne entre deux passages au niveau moyen « *0 cossin point* » (Tm02), de la période pic « *periode peak* » (Tp), de la profondeur relative (Prof.Rel.) et de la profondeur absolue appelée ici niveau d'eau (NE). Parmi ces paramètres, seuls la Hs, la Tm02 et le NE sont exploités pour les présentes analyses. À partir de ces valeurs, on calcule également le niveau d'eau total (NET) via l'addition de la Hs et du NE observés au capteur (équation 2).

$$\boldsymbol{NET = \mathrm{Niv.eau} + \mathrm{Hs}} \qquad (2)$$

La plupart des capteurs de pression a été déployée entre la fin juillet et le début décembre 2015 ainsi qu'entre le début juin et la mi-novembre ou la mi-décembre 2016. Ceux-ci doivent être retirés durant la période glacielle afin de ne pas être endommagés. Le tableau 37 présente dans le détail les périodes de déploiement de chacun des capteurs et indique aussi les pertes, remplacements et redécouvertes d'instruments qui sont survenus au cours de l'étude.

Tableau 37. Période de déploiement des capteurs de pression et des courantomètres

	No. de capteur	Printemps 2015		Été 2015 (mois-jour)		Automne 2015		Hiver 2015	
		Dép.	Réc.	Dép.	Réc.	Dép.	Réc.	Dép.	Réc.
Secteur Ouest	1.0	Non déployé		07-31	10-14	10-14	Perdu (retrouvé Nov. 2016) 01-17*		
	1.1	Non déployé		07-31	10-14	10-14	12-02	Non déployé	
	1.2	Non déployé		07-29	10-14	10-14	12-02	Non déployé	
	1.3	Non déployé		07-29	10-14	10-14	12-02	Non déployé	
Secteur Centre	2.1	Non déployé		07-29	10-14	10-14	12-02	Non déployé	
	2.2	Non déployé		07-29	10-14	10-14	Perdu (retrouvé juin 2016)		
	2.4	Non déployé		Non déployé		10-18	12-02	Non déployé	
	ADV #1	Non déployé		07-30	Perdu (jamais retrouvé)				
	No. de capteur	**Printemps 2016**		**Été 2016**		**Automne 2016**		**Hiver 2016**	
		Dép.	**Réc.**	**Dép.**	**Réc.**	**Dép.**	**Réc.**	**Dép.**	**Réc.**
Secteur Ouest	1.0	06-01	07-31	07-31	09-14	09-14	Déployé 11-01*		12-15
	1.1	06-01	Perdu (retrouvé en mai 2017)						
	1.2	06-01	07-30	07-30	09-15	Remplacé par l'ADV			
	1.3	06-01	07-31	07-31	09-15	09-15	11-14	Non déployé	
	ADV #2	Non déployé				09-16	11-18	Non déployé	
Secteur Centre	2.1	06-01	07-31	07-31	09-14	09-14	12-12	12-12	12-14
	2.2	06-01	07-30	07-30	09-15	09-15	Déployé		12-14
	2.4	06-01	07-31	07-31	09-15	09-15	11-18 (11-14*)	Non déployé	

Dep. : Déploiement
Rec. : Récupération
*Le capteur s'est arrêté seul à la date précisée

Il faut toutefois noter que le capteur 1.0 n'a pas été retrouvé lors de la campagne de retrait des instruments en décembre 2015, mais plutôt en novembre l'année suivante, ce qui explique que les données soient disponibles jusqu'au 17 janvier 2016. À cette date, le capteur a perdu son autonomie, soit après le retrait hivernal des instruments. Un nouveau capteur a été déployé en 2016 au même endroit.

Le capteur 1.1 n'a pas été retrouvé après son installation au printemps 2016. Toutefois, celui-ci a été retrouvé en mai 2017. Ceci explique pourquoi les données sont disponibles seulement jusqu'au 5 septembre 2016, date de fin de l'autonomie du capteur.

Le capteur 2.2 n'a pu être récupéré lors de la campagne de retrait en novembre 2015, mais l'a été lors de la campagne suivante en juin 2016. Ceci explique pourquoi les données sont disponibles jusqu'au 31 décembre 2015, date de fin d'autonomie du capteur.

4.3.1.2 *Courantomètre à effet Doppler (**ADV**)*

Dans le but de parfaire la caractérisation du climat de vagues à la côte, un courantomètre à effet Doppler (**ADV**) de type Vector (Nortek) a été installé sur le bas estran du profil de capteurs du secteur centre en 2015. Ce type d'instrument permet non seulement de mesurer les mêmes paramètres de vagues que les capteurs, mais peut également déterminer la vitesse et la direction des courants côtiers.

L'ADV installé en 2015 n'a jamais pu être récupéré. Il est probable que celui-ci ait été complètement enfoui, déplacé par les forces hydrodynamiques ou peut-être même volé. Ce dernier a été remplacé par un capteur de pression 2.4 en octobre 2015 (tableau 37). Un autre ADV a été installé en 2016 à la flexure dans le secteur ouest (figure 190).



Figure 190. Courantomètre à effet Doppler (ADV) de type Vector (Nortek) installé à Longue-Pointe-de-Mingan

Lorsque celui-ci a pu être déployé en cours de saison ; il a remplacé le capteur 1.2. Le nouvel ADV a été implanté dans le secteur ouest plutôt que le secteur centre où les apports sédimentaires risquaient de l'ensevelir à nouveau. Celui-ci a été déployé du 9 septembre au 18 novembre 2016 à la flexure. Cependant, les données sont exploitables seulement du 16 septembre au 10 octobre environ, soit un total de 24 jours. Il est fort probable qu'après cette date, l'instrument s'est retrouvé enseveli. Plusieurs traitements sont encore nécessaires pour nettoyer ces données et les analyser. Compte tenu de la courte durée de données exploitables, la climatologie des courants côtiers ne pourra pas être décrite dans cette étude.

4.3.1.3 *Profileur de courant muni d'un capteur de houle (AWAC)*

Afin de caractériser, le climat de vagues au large, un profileur de courant muni d'un capteur de houle directionnel « *Acoustic Wave And Current meter* » (AWAC), a été déployé au large de Longue-Pointe-de-Mingan, soit depuis octobre 2015. Celui-ci est positionné à 3,8 km de la côte à une profondeur d'environ 15 m, soit à la limite de l'avant côte (aussi appelée point de fermeture). Les campagnes d'installation et d'entretien nécessitent les services de plongeurs professionnels deux fois l'an. Les batteries qui alimentent l'appareil lui confèrent une autonomie d'environ 6 mois (Didier et al., 2017). Les coordonnées géographiques de sa position sont : 50,243367 N ; -64,313 402 O (figure 189).

Cet appareil permet de mesurer les différents types de houles ainsi que la vitesse et la direction du courant sur l'ensemble de la colonne d'eau, soit d'un mètre à partir du fond, jusqu'à la surface. La précision des mesures de vagues par l'AWAC est de l'ordre de 1 cm (Didier et al., 2017). Les données de courants n'ont toutefois pas fait l'objet d'analyse dans le cadre de ce projet. Les mesures de vagues peuvent être réalisées du fond jusqu'à un maximum de 35 m de profondeur avec une fréquence d'échantillonnage de 2 Hz.

4.3.1.4 *Période d'acquisition de données et variables retenues*

La période d'acquisition de données de vagues à l'AWAC s'étend entre le 16 octobre 2015 et le 15 juin 2017, à l'exception de quelques jours durant lesquels celui-ci a dû être sorti de l'eau pour des travaux de maintenance. Ainsi, 2048 échantillons toutes les heures sont traités pour produire une donnée horaire de paramètres de vagues obtenue par analyse spectrale. Toutefois, certaines données ne peuvent être exploitées en raison d'un

mauvais retour du signal émis par l'instrument. Au final, la série de données acquise est exploitable pour 13 193 h, soit 90 % du temps.

Dans le cadre du présent projet, seules les variables relatives à la hauteur significative, au niveau d'eau et à la direction des vagues ont été interprétées. Étant donné que la hauteur des vagues devient un facteur morphogène important lorsqu'il est combiné à un niveau d'eau élevé, le niveau d'eau total (NET) a été aussi été calculé. Comme pour les capteurs, celui-ci résulte de l'addition du niveau d'eau observé à l'AWAC et de la hauteur significative des vagues (équation 2, section 4.3.1.1).

Le spectre entier des vagues est enregistré par l'AWAC. La comparaison des spectres gravitaire et infragravitaire des séries de données a aussi été réalisée pour les données de vagues au large ; les ondes gravitaires dominent le spectre. Le climat de vague est décrit en considérant les séries de données du spectre complet (*full spectrum*) considérant les phénomènes entre 1 et 100 secondes de période.

4.3.2 Climat de vagues général aux capteurs et à l'AWAC

La comparaison des moyennes et des 95^{e} percentiles des Hs de vagues à la côte enregistrées par les capteurs des secteurs ouest et centre indique sans surprise que ces valeurs sont moins élevées près de la côte (à l'endroit de la flexure) qu'à la limite inférieure du bas estran. Le tableau 38 présente les valeurs moyennes et le 95^{e} percentile pour les durées totales des périodes d'acquisition de données de chacun des instruments de même que leur nombre total de jours d'opération. Il faut rappeler que les capteurs sont rarement tous déployés et que les différences observées entre les deux sites peuvent être liées à la durée d'échantillonnage qui diffère d'un site à l'autre de même que d'un capteur à l'autre.

Tableau 38. Valeurs moyennes et du 95e percentile des Hs enregistrées aux différents capteurs pour leur durée totale d'acquisition

Secteur	Capteurs	Nb jrs opération	Hs moyenne	95^{e} p. de Hs	NET moyen	95^{e} p. de NET
Ouest	1.2 (flexure)	219	0,31	0,80	nd	nd
	1.3 (Bas estran)	281	0,40	1,04	0,55	1,74
Centre	2.2 (flexure)	309	0,26	0,65	nd	nd
	2.4 (Bas estran)	281	0,33	0,77	0,50	1,60

*Valeur en mètre
**nd : non disponible

4.3.2.1 *Les hauteurs significatives (Hs) de vagues*

Dans les prochaines lignes, les variations mensuelles des valeurs moyennes et du 95^{e} percentile des Hs enregistrées aux différents capteurs sont décrites. Ces valeurs sont également comparées avec les variations mensuelles observées à l'AWAC (figures 191 et 192). Certaines séries de données étant incomplètes pour un mois donné, en raison du retrait ou de l'arrêt des appareils, seuls les mois ayant 20 jours ou plus de données ont été conservés pour cette comparaison. Toutefois, pour les mois pour lesquels moins de 20 jours d'enregistrement sont disponibles, les valeurs sont exprimées au moyen de bâtonnets hachurés dans les graphiques. L'ensemble des valeurs mensuelles moyennes et du 95^{e} percentile des différents capteurs sont présentés à l'annexe C.



Figure 191. Moyenne des hauteurs significatives (Hs) aux différents instruments

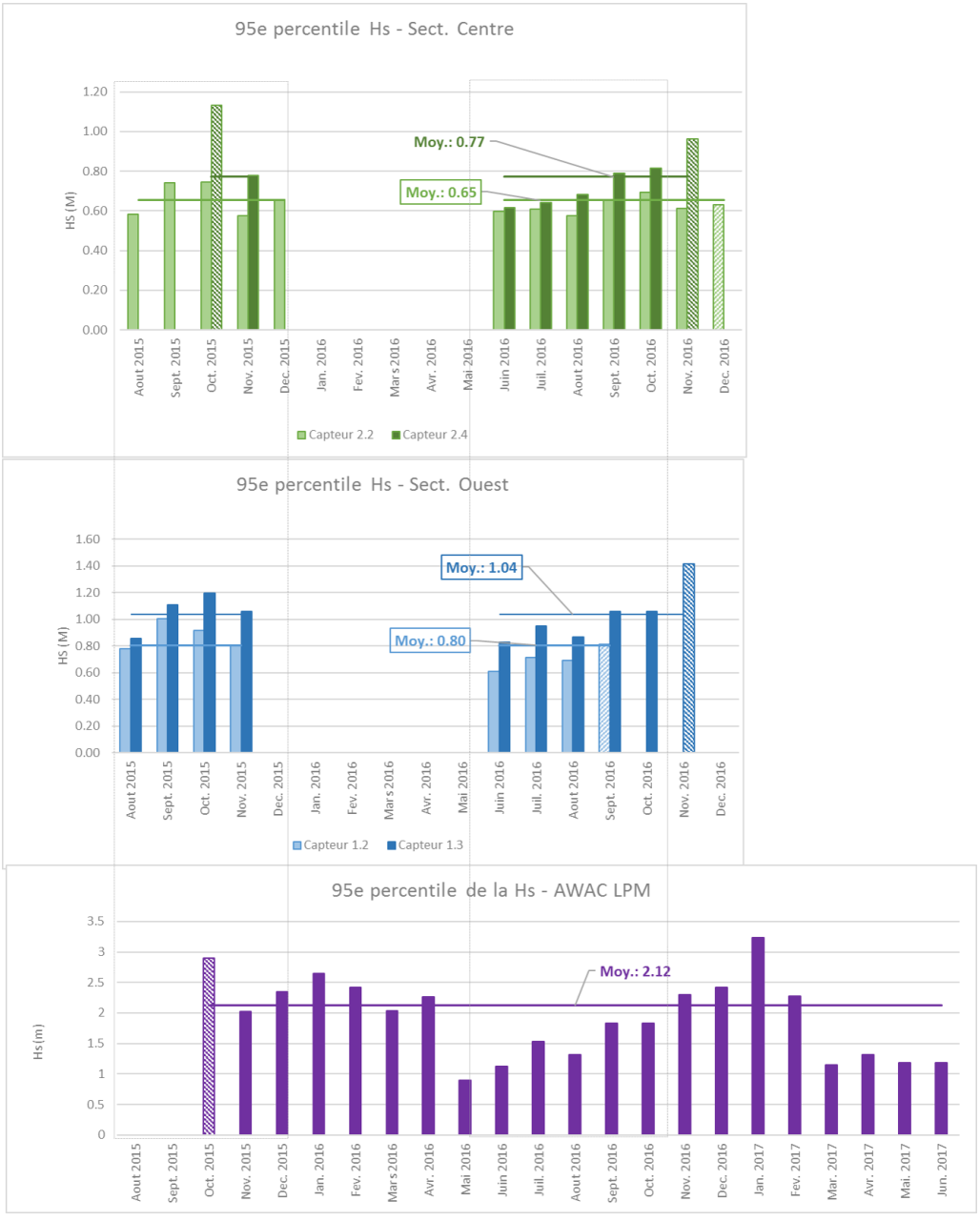


Figure 192. 95^{e} percentile des hauteurs significatives (Hs) aux différents instruments

On observe que pour le secteur centre, la moyenne mensuelle des Hs de vagues varie entre 0,20 et 0,38 m alors que pour le secteur ouest, ces valeurs sont légèrement plus élevées, soit entre 0,24 et 0,50 m (figure 191). Ceci peut s'expliquer par la différence de profondeur entre les capteurs des deux

secteurs, ceux de l'ouest étant installés à des élévations de 60 à 80 cm plus profond que ceux du centre. Les capteurs du secteur centre affichent des valeurs mensuelles de 95^{e} percentile pour les Hs entre 0,57 et 0,81 m alors que dans le secteur ouest, celles-ci varient entre 0,61 et 1,20 m (figure 191).

Si l'on compare les valeurs du 95^{e} percentile et de la moyenne de la Hs des différents capteurs et de l'AWAC, on remarque une augmentation des Hs entre août et septembre 2015 pour les capteurs 1.2, 2.2 et 2.4.

Entre septembre et octobre 2015, les valeurs du 95^{e} percentile diminuent pour le capteur 1.2, augmentent pour le 1.3 et sont à peu près équivalentes pour le capteur 2.2. Les valeurs des Hs moyennes augmentent pour ces trois capteurs.

Entre octobre et novembre 2015, on observe une diminution de la moyenne et du 95^{e} percentile pour les capteurs 1.2, 1.3 et 2.2. Cette diminution est toutefois plus faible pour les capteurs 1.2 et 1.3, soit dans le secteur ouest, tant pour la moyenne que pour le 95^{e} percentile. Ce constat semble indiquer que le climat de vagues est demeuré plus dynamique dans le secteur ouest au cours du mois de novembre mais encore une fois, la différence de profondeur des capteurs peut être à l'origine de cette distinction. Le capteur 2.4 et l'AWAC ayant tous deux été déployés le 18 octobre, les valeurs moyennes et du 95^{e} percentile mensuelles sont nécessairement biaisées par le faible nombre de jours. C'est pourquoi les valeurs mensuelles ne sont pas comparées pour les mois d'octobre et novembre.

Entre novembre et décembre 2015, les seuls instruments encore présents, soit le capteur 2.2 au centre et l'AWAC au large, montrent une augmentation du 95^{e} percentile. Toutefois, pour la moyenne des Hs, si celle-ci augmente au large, elle reste sensiblement la même au capteur 2.2.

Entre janvier et juin, les capteurs sont retirés des plages et seul l'AWAC peut documenter le climat de vagues hivernales. Durant cette période, on observe que les valeurs de la moyenne et du 95^{e} percentile diminuent au cours de l'hiver (janvier à mars), mais présente une certaine recrudescence en avril. Ces valeurs sont ensuite plutôt faibles en mai et juin.

Au début de l'été, tous les capteurs sont de nouveau en place. Entre juin et juillet 2016, on observe une diminution de la moyenne pour tous les instruments, mais une augmentation du 95^{e} percentile. Cette inversion de tendance entre les deux variables peut s'expliquer par le fait qu'au cours du mois de juillet, on a pu observer un nombre d'heures de Hs au-dessus du 95^{e} percentile moyen (capt. 1.2 : 0,80 m, capt. : 1.3 : 1,04 m, capt. 2.2 : 0,65 m et

capt. 2.4. : 0,77 m) de toute la série temporelle disponible de l'AWAC (oct. 2015 à juin 2017) vraiment plus important qu'au cours du mois de juin (tableau 39), soit une augmentation variant entre 8 et 22 h. Ceci indique que les événements plus dynamiques ont pu être plus fréquents en juillet même si dans l'ensemble, les Hs de vagues étaient moindres.

Tableau 39. Nombre d'heures où la Hs est supérieur au 95e percentile de toute la série de données disponible pour chacun des instruments

	Secteur Ouest		Secteur Centre		Large
Mois	**Capteur 1.2 (95e p. : 0,80 m)**	**Capteur 1.3 (95e p. : 1,04 m)**	**Capteur 2.2 (95e p. : 0,65 m)**	**Capteur 2.4 (95e p. : 0,77 m)**	**AWAC**
Août 2015	32	12	24		
Sept. 2015	68	49	53		
Oct. 2015	60	67	58	56	18
Nov. 2015	29	35	12	31	36
Déc. 2015			33		37
Janv. 2016					36
Févr. 2016					27
Mars 2016					34
Avr. 2016					36
Mai 2016					29
Juin 2016	2	3	11	0	32
Juil. 2016	22	11	24	22	36
Août 2016	10	39	18	15	28
Sept. 2016	15	40	32	37	36
Oct. 2016		40	46	47	37
Nov. 2016			24	23	27
Déc. 2016			13		35

De juillet à août 2016, les 95^{e} percentiles des Hs pour les capteurs 1.2 et 2.2, à la flexure, sont restés sensiblement les mêmes alors que ceux du capteur 1.3 (bas estran) et à l'AWAC ont plutôt diminué. Les moyennes ont quant à elle très peu varié durant cette période.

Entre les mois d'août et septembre 2016, les 95^{e} percentiles des Hs augmentent pour les capteurs du secteur centre (2,2 et 2,4) et au large (AWAC), mais demeurent semblables pour le capteur 1.3 à l'ouest. Le capteur 1.2 ayant seulement 14 jours d'opération en septembre 2016, celui-ci n'est pas comparé ici. Quant à la moyenne des Hs, elle augmente pour les trois capteurs en activité et à l'AWAC. Ce changement de tendance vers une augmentation de la dynamique de vagues est le constat attendu pour le mois de septembre alors que s'amorcent des conditions atmosphériques automnales qui s'accompagnent généralement de plus de vent.

Les 95^{e} percentiles des Hs de vagues demeurent semblables entre septembre et octobre 2016 pour les capteurs du secteur centre et au large (AWAC) alors qu'on y observe une légère augmentation de la moyenne. Les capteurs du secteur ouest ayant été retirés à la mi-septembre et à la mi-octobre, la comparaison ne peut se faire durant cette période.

Si les variations mensuelles des Hs sont semblables entre la côte et le large pour les valeurs moyennes et du 95^{e} percentile, il en est quelque peu différent pour les valeurs maximales.

En effet, on observe sur la figure 193 que durant toutes les périodes d'opération des capteurs, les vagues atteignent 1,24 et 1,41 m pour les capteurs situés à la flexure et 1,59 et 1,91 m pour les capteurs situés sur le bas estran, pour les secteurs centre et ouest respectivement. Au large, la Hs maximale des vagues est évidemment plus importante, soit entre 1,13 et 2,9 m durant la période d'opération des capteurs. On constate aussi que le niveau maximal à l'AWAC est égal ou inférieur à 2,5 m durant l'été (juin à août) et supérieur à 3,4 m à l'automne. Cet écart semble beaucoup plus marqué que la différence entre les saisons estivale et automnale à la côte (capteurs).

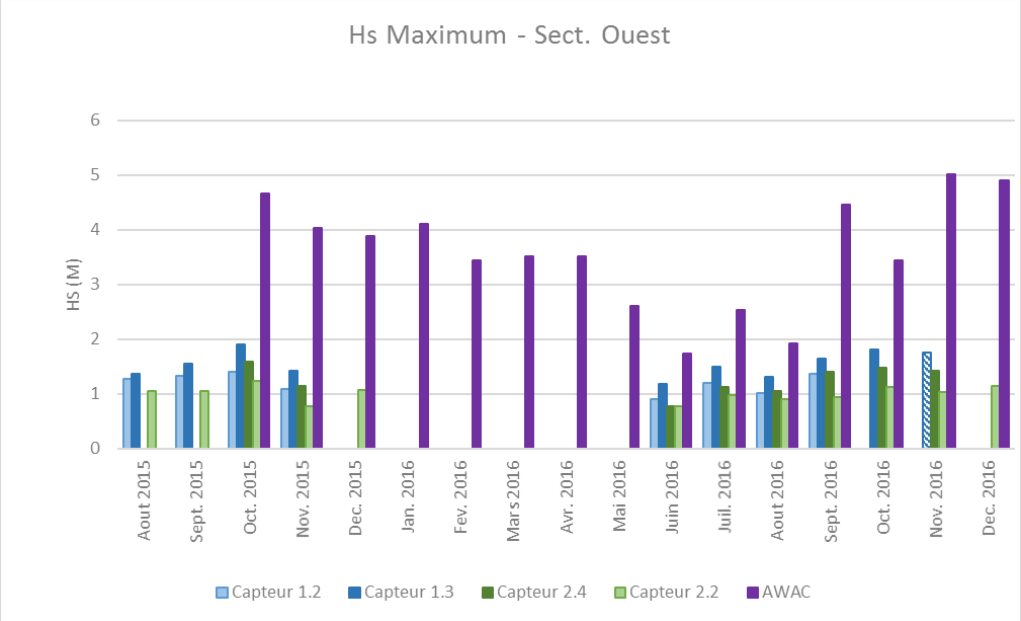


Figure 193. Hauteurs significatives (Hs) maximales aux différents instruments

4.3.2.2 *Les niveaux d'eau totaux (NET)*

La variation du niveau de la plage à la flexure en 2015 a rendu impossible le calcul du NET pour les capteurs 1.2 et 2.2. Par conséquent, le NET ne peut être calculé pour ceux-ci. La moyenne du NET est semblable pour les 2 secteurs, soit 0,50 m au centre et 0,55 m à l'ouest (figure 194). Évidement le niveau d'eau absolu est le même pour les deux sites puisque ceux-ci sont distants de seulement 3 km environ. Néanmoins, la moyenne plus élevée pour le NET au site ouest confirme que les vagues qu'on y observe y sont plus hautes. La moyenne du NET à l'AWAC (0,75 m) montre également que les vagues sont plus importantes au large pour un niveau d'eau similaire.

Lorsque l'on compare les variations des moyennes pour les NET (figure 194) on constate que celle-ci sont très semblable pour l'ensemble des instruments soit une diminution de juin à août suivi d'une remontée des valeurs mensuelles en septembre et en octobre.

Lorsque l'on observe les valeurs des 95^{e} percentiles, on remarque une diminution entre juin et août suivie d'une augmentation à partir de septembre (figure 195). Toutefois, ces tendances mensuelles sont légèrement différentes au large (AWAC) où l'on observe plutôt une augmentation du 95^{e} percentile du NET au début de l'automne.

La figure 196, qui présente les NET maximaux, montre que ceux-ci sont très semblables entre la côte et le large durant la période estivale, même que le NET mensuel maximal du capteur 1.3 (au bas estran du secteur ouest) a surpassé celui de l'AWAC en juillet et septembre 2016. En contrepartie, les écarts sont assez importants durant les mois de novembre 2015 et d'octobre 2016 lorsque cette comparaison est possible. Malheureusement, il est impossible de corroborer ce constat sur les deux années de suivi étant donné la discordance des périodes de déploiement de chacun des instruments. Les valeurs maximales de NET enregistrées (durant toutes les périodes d'opération des capteurs) atteignent 2,99 m pour le secteur centre et 3,38 m pour le secteur ouest. Au large, la valeur maximale de NET enregistrée depuis le déploiement de AWAC (octobre 2015 à juin 2017) est de 5,85 m en novembre 2015 alors que les capteurs étaient en fonction.



Figure 194. Moyenne du Niveau d'Eau Total (NET) aux différents instruments



Figure 195. 95^{e} percentile du Niveau d'Eau Total (NET) aux différents instruments

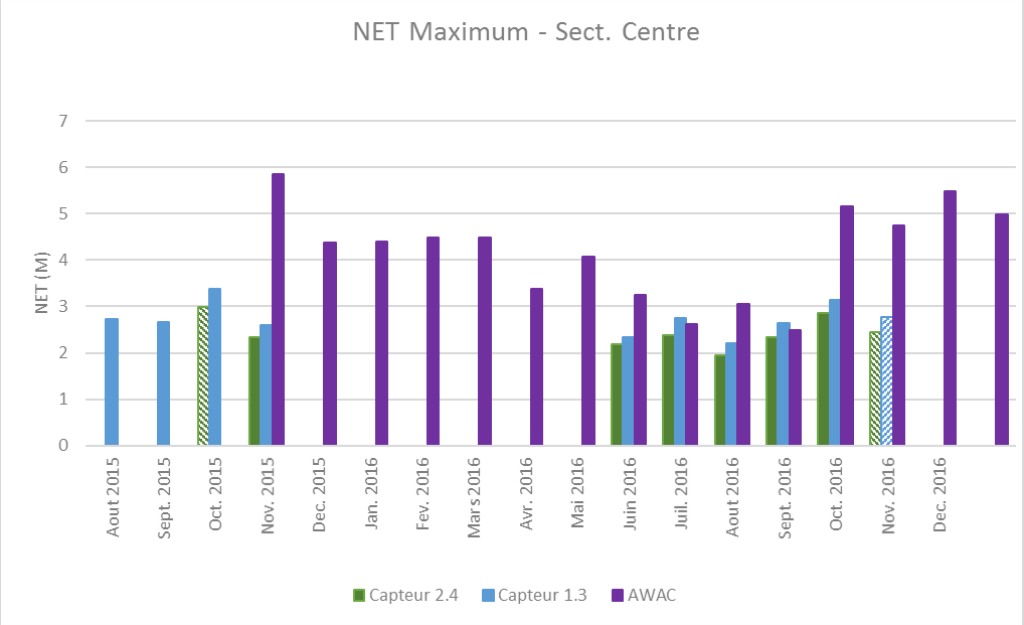


Figure 196. Niveau d'Eau Total (NET) maximal pour les deux capteurs de bas estran et de l'AWAC (au large)

Essentiellement, la comparaison des valeurs du 95^{e} percentile et des moyennes mensuelles des Hs aux différents capteurs et au large permet de mettre en lumière une augmentation des Hs (valeur moyenne et 95^{e} percentile) à l'arrivée de l'automne (comparaison août et septembre 2015 et 2016) et une à la mi-printemps en mai. On y constate également une dynamique potentiellement plus importante (Hs plus élevées) dans le secteur ouest que dans le secteur centre, ce qui indique que la profondeur à laquelle est positionné le capteur a possiblement une incidence notable sur l'interprétation des données de vagues à la côte. Finalement, l'analyse des NET maximaux permet de constater que les NET sont semblables en période estivale, mais semblent présenter des écarts importants à l'automne entre la côte et le large.

4.3.3 Climat de vagues général à l'AWAC

4.3.3.1 *Hauteur de vagues et de niveau d'eau*

Pour la période d'acquisition de données 2015-2017, la hauteur significative (Hs) moyenne est de 0,74 m (figure 197). Sur la figure suivante (figure 198), on observe que la moyenne mensuelle est généralement plus élevée durant les mois de septembre à février et est moins importante durant les mois de mai et

juin 2016-2017 et de juillet et août 2016. Par ailleurs, le début du printemps a été plus agité en 2016 qu'en 2017. Les Hs maximales mensuelles varient, elles, entre 1,62 (mai 2016) et 5,01 m (nov. 2016) (figure 199).

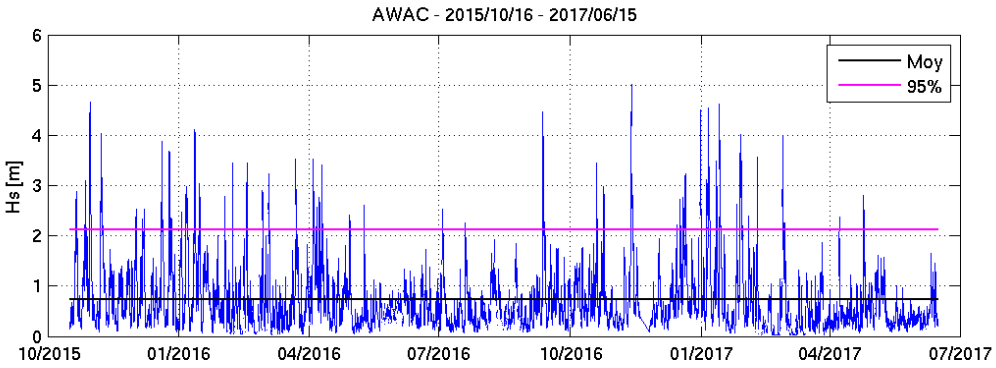


Figure 197. Courbes de Hs à l'AWAC pour la période d'acquisition 2015-2017

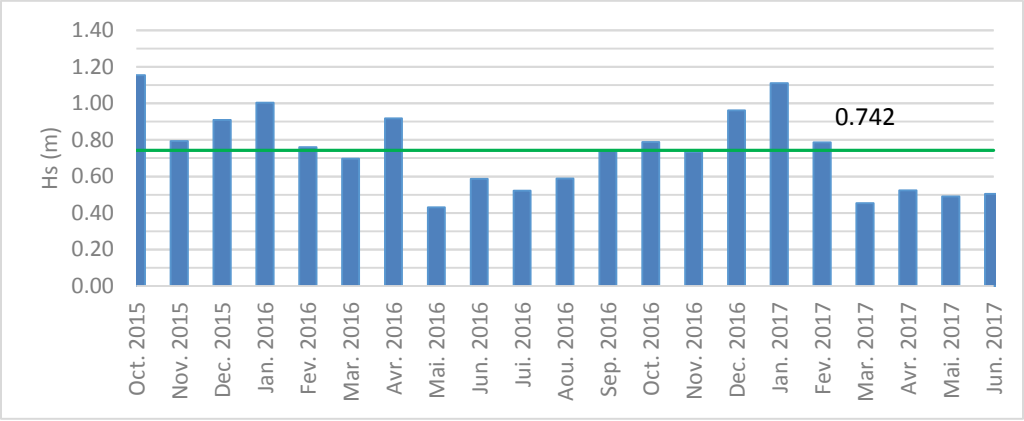


Figure 198. Hauteur significative (Hs) moyenne mensuelle (AWAC)

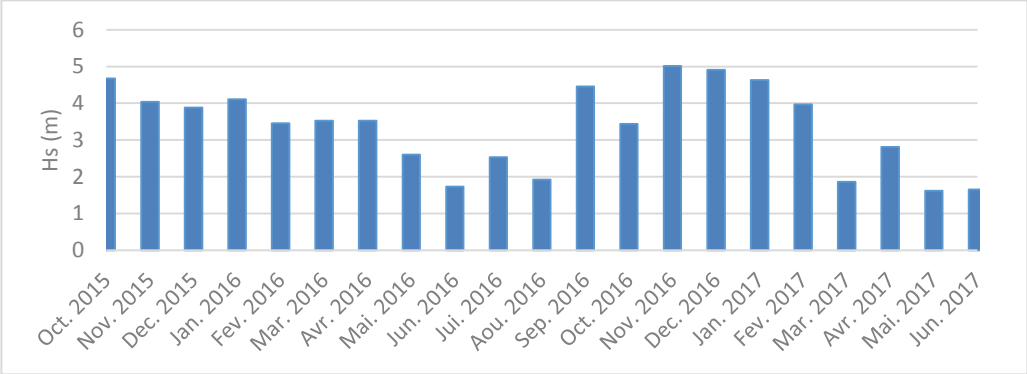


Figure 199. Hauteur significative (Hs) maximale mensuelle (AWAC)

La hauteur associée au 95^{e} percentile des Hs pour la période 2015-2017 est de 2,12 m. Toutefois, lorsqu'on considère le 95^{e} percentile mensuel, cette valeur s'avère plus élevée pour les mois d'octobre 2015 à avril 2016 ainsi que pour les mois de novembre 2016 à février 2017, soit essentiellement les périodes hivernales (figure 200).

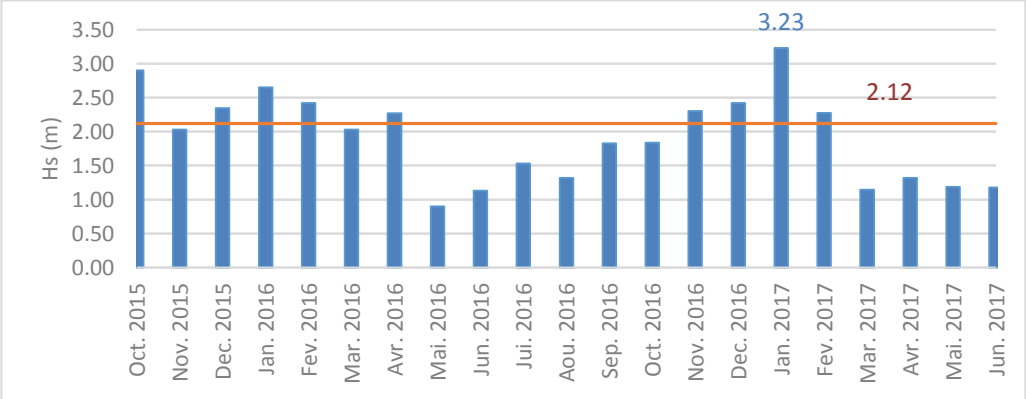


Figure 200. 95^{e} percentile mensuel de la Hs - AWAC LPM

Par ailleurs, la figure 201 présente le nombre d'heures de dépassement mensuel du 95^{e} percentile de la Hs. On y remarque que la durée totale de dépassement est plus importante durant les mois de janvier. On peut d'ailleurs se souvenir que plusieurs tempêtes ont sévi sur le Québec maritime en début d'année 2017. La figure 202 présente la Hs et le NET observés à l'AWAC

durant ce mois de janvier alors qu'on observe que les fortes vagues ont souvent engendré de hauts niveaux d'eau (NET) susceptibles d'affecter la morphologie de la plage. L'ensemble des graphiques des données de Hs et de NET mensuelles à l'AWAC est présenté à l'annexe C.

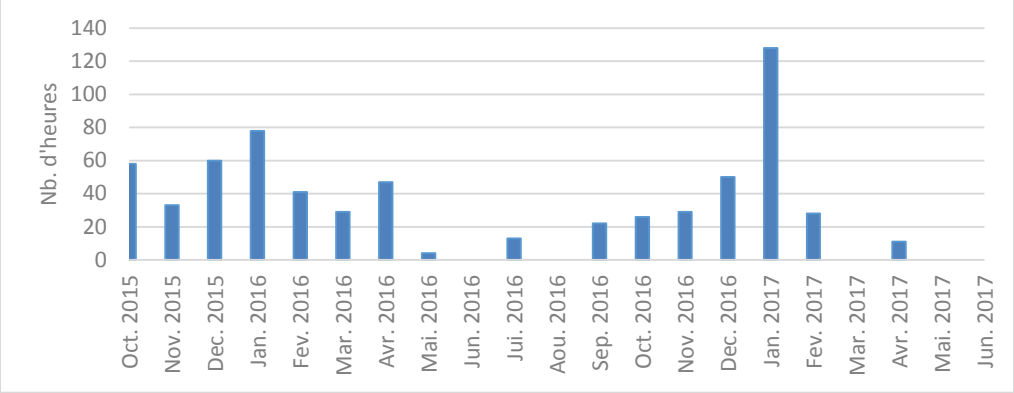


Figure 201. Nombre d'heures par mois de dépassement du 95e p. de la Hs 2015-2017 - AWAC LPM

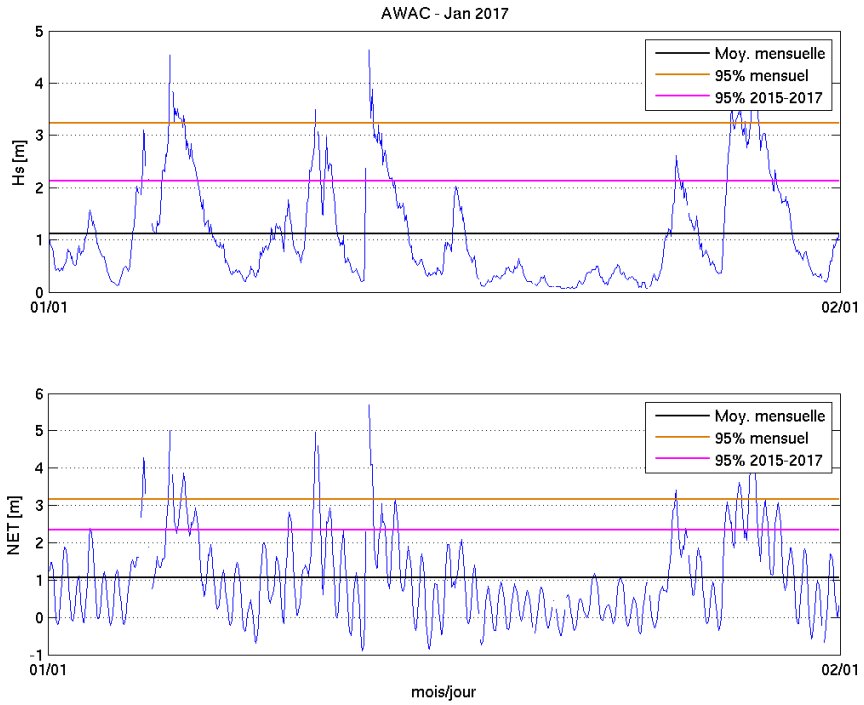


Figure 202. Courbes de Hs et de NET à l'AWAC LPM pour janvier 2017

Bien que la valeur du NET soit intimement liée à la valeur de la Hs, on observe qu'à certains moments, le nombre d'heures de Hs supérieur au 95^{e} percentile était plus élevé que le nombre d'heures pour le NET supérieur au 95^{e}, ce qui indique que même si les vagues étaient fortes, le niveau de l'eau ne leur permettait pas d'atteindre le niveau supérieur de la plage (figure 203). À l'inverse, le NET peut parfois être élevé sans que les vagues ne soient particulièrement hautes. Par conséquent, ce n'est pas parce que l'un ou l'autre de ces deux paramètres dépassent le seuil du 95^{e} percentile que les conditions hydrodynamiques sont particulièrement morphogènes sur l'estran ; la combinaison des deux est importante.

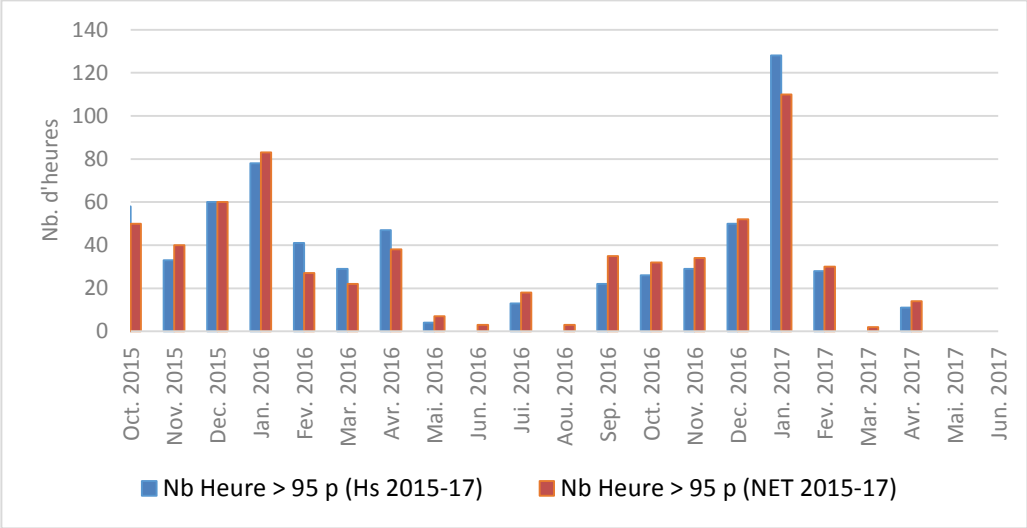


Figure 203. Nombre d'heures de dépassement du 95e p. de la Hs et du NET – AWAC LPM

4.3.3.2 *Direction des vagues*

Les vagues mesurées à l'AWAC proviennent principalement du cadran sud-ouest, plus précisément des directions ouest à sud-sud-est correspondant à l'exposition de la côte. Les roses des vagues indiquant la direction des vagues en fonction de la Hs (figure 204) et de la période (figure 205) montrent que la majorité de celles-ci viennent plus spécifiquement de l'ouest. C'est en fait 43 % des vagues qui proviennent de cette direction. La présence de l'Île d'Anticosti et, dans une moindre mesure, de l'archipel de Mingan localisés au sud-est de la zone d'étude semble jouer un rôle important dans la distribution de l'orientation des vagues. De ce fait, le fetch devant la zone d'étude est beaucoup plus grand en direction du sud-ouest.

Le gradient de couleur montre aussi que les vagues les plus hautes viennent de cette même direction ou, dans une moindre mesure, du sud-ouest. La période des vagues ne semble toutefois pas varier en fonction de leur direction. En effet, les vagues les plus longues proviennent de toutes les directions tout comme les plus courtes.

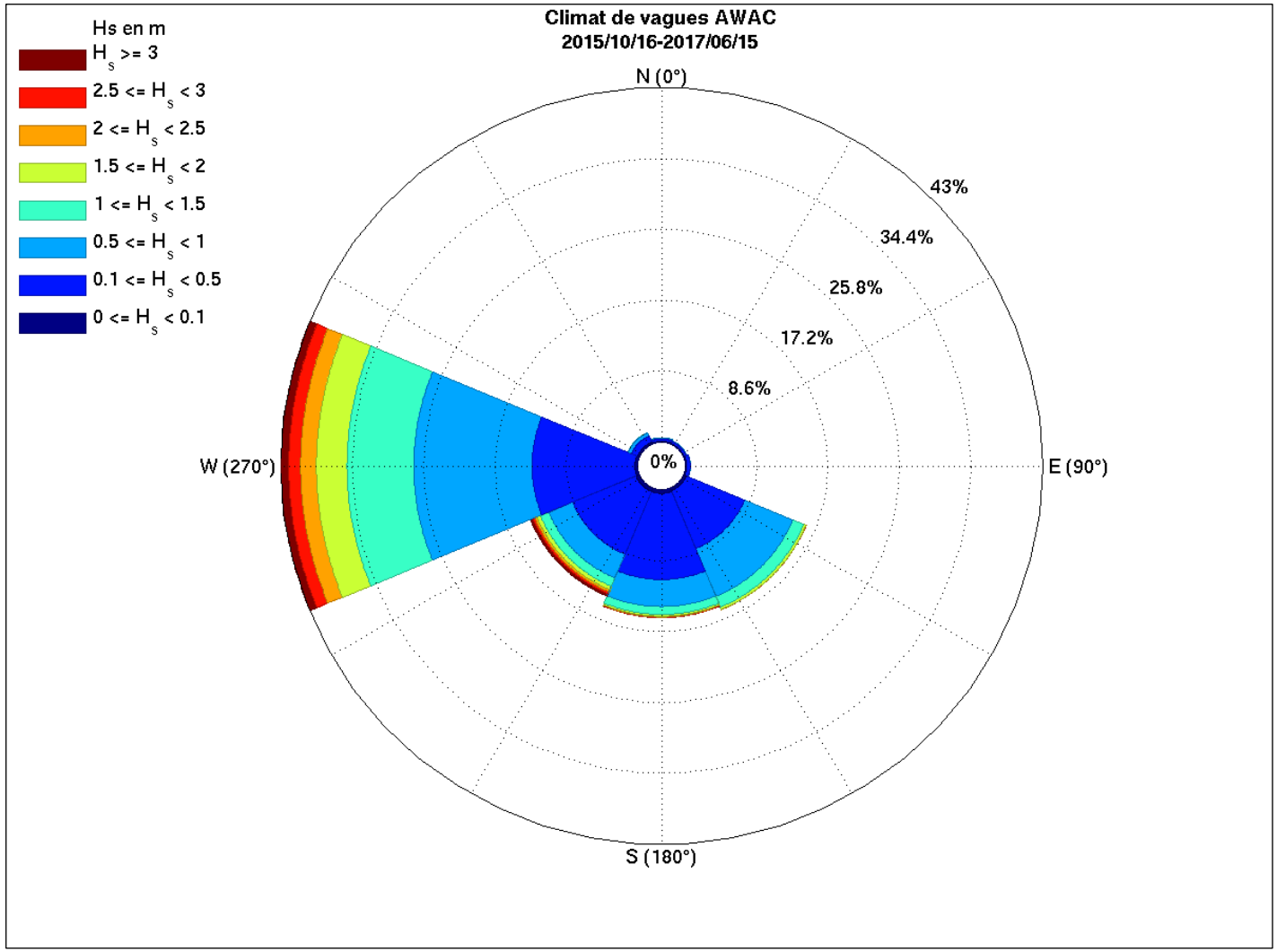


Figure 204. Rose des vagues en fonction des Hs

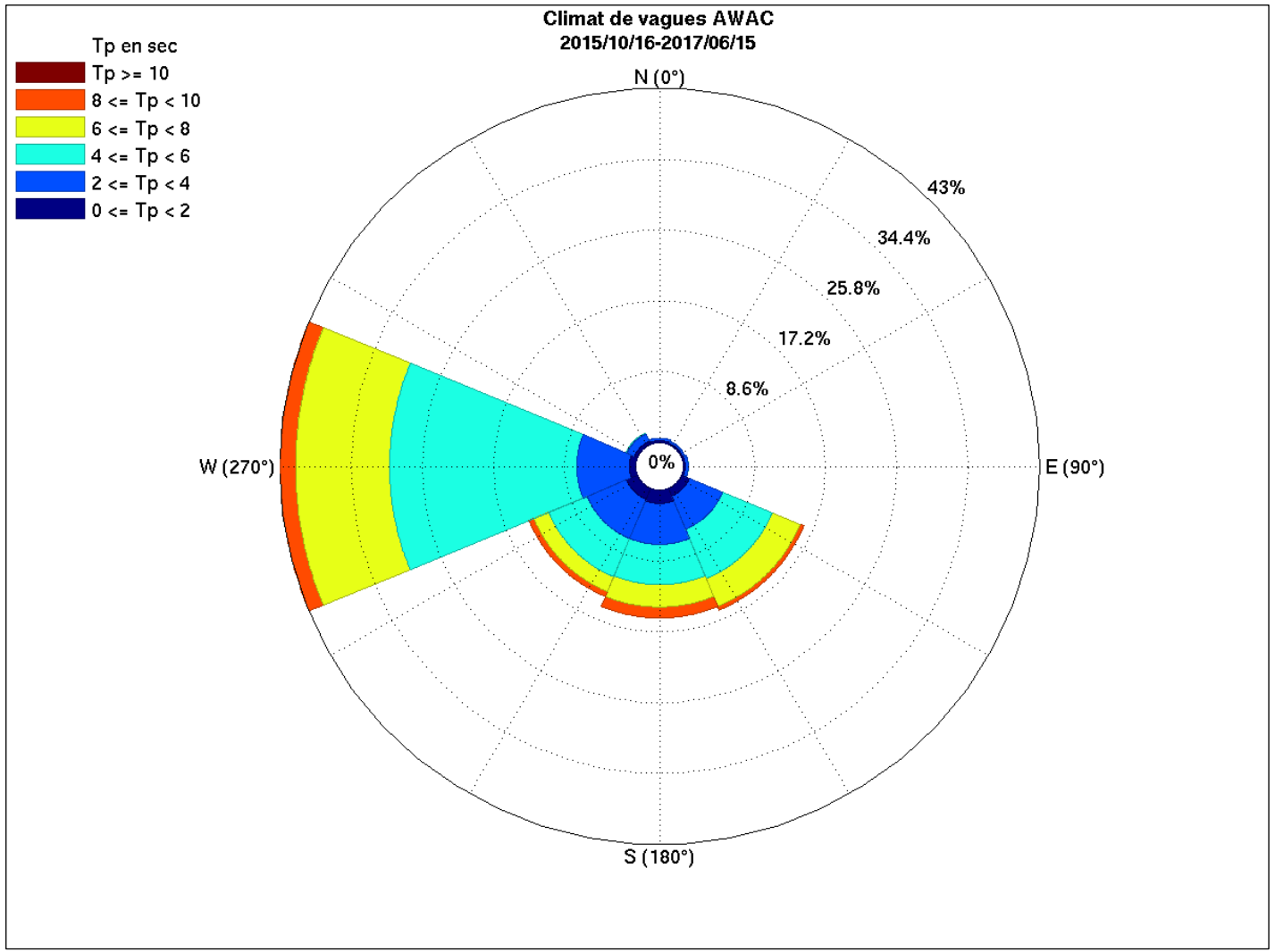


Figure 205. Rose des vagues en fonction des périodes de vagues

Une classification de la direction des vagues par rapport à la côte a été réalisée. Les classes de 1 à 5 sont déterminées en fonction de l'angle d'incidence des vagues par rapport à un segment parallèle à la côte tracé visuellement dans ArcGIS. Cette classification est basée sur la prémisse que l'action des vagues sur le transit littoral augmente entre 0 et 45° et diminue entre 45 et 90° (Charles et al., 2012 ; Falqués et al., 2011) (figure 206). On peut en déduire que leur potentiel de transport littoral s'en trouve également accentué lorsque l'angle d'incidente est près de 45°. Ainsi, en fonction de l'azimut du segment côtier et de la position de l'eau, la direction des vagues a été convertie en angle absolu par rapport à la côte pour ainsi déterminer l'angle d'incidence et lui attribuer une classe. Pour Longue-Pointe-de-Mingan, la classe 1 correspond aux vagues d'incidence de 265,5 à 288°, la classe 2 de 20,5 à 265,5°, la classe 3 de 175,5 à 220,5°, la classe 4 de 130,5 à 175,5 et la classe 5 de 103 à 130,5°.

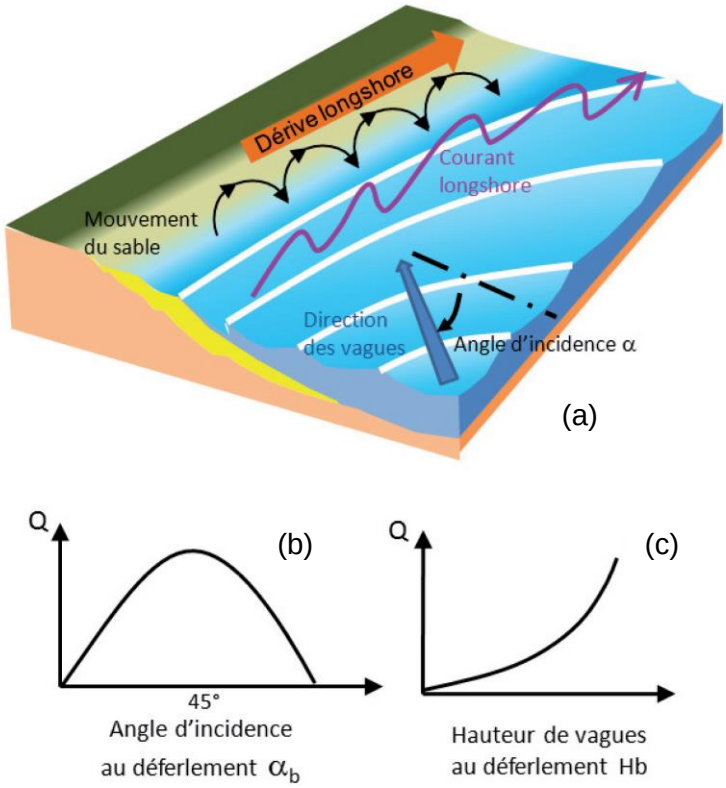


Figure 206. a) Schéma des mécanismes induisant le transport longitudinal des sédiments*, adapté des schémas du cours d'océanographie physique de The University of Western Ontario (http : //instruct.uwo.ca) (b, c) : schémas traduisant la dépendance des flux de sédiment longitudinal Q en fonction de l'angle d'incidence (b) et de la hauteur (c) des vagues au déferlement, respectivement à hauteur et à angles constants (tirée de Charles et al., 2012).**
*Transit sédimentaire longitudinal
**dérive littorale

Les vagues les plus fréquentes à Longue-Pointe-de-Mingan étant de direction ouest, soit entre 247,5° et 292,5°, sont associées aux classes 1 et 2, des directions très favorables au transit sédimentaire vers l'est (figure 207). Une rose des directions indiquant les degrés est fournie à l'annexe E pour visualiser les directions mentionnées dans le texte. D'ailleurs, la formation de la pointe de Mingan résulte de l'effet de ce transit vers l'est.

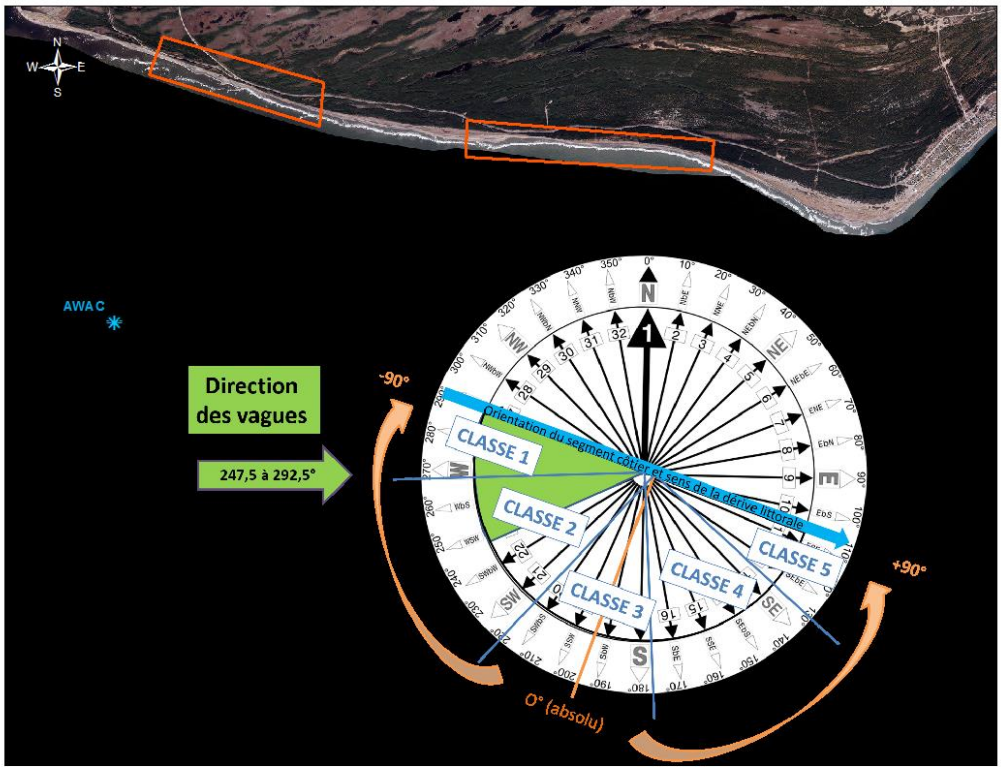


Figure 207. Direction des vagues les plus fréquentes

Par ailleurs, les figures 208 et 209 montrent que les vagues les plus hautes proviennent le plus souvent des directions situées entre 240° et 275°, soit davantage de l'ouest-sud-ouest. Ce spectre de direction étant légèrement plus rapproché de l'angle d'incidence de 45° par rapport à la côte, on peut en déduire que le transit sédimentaire longitudinal peut être particulièrement important par temps de hautes vagues.

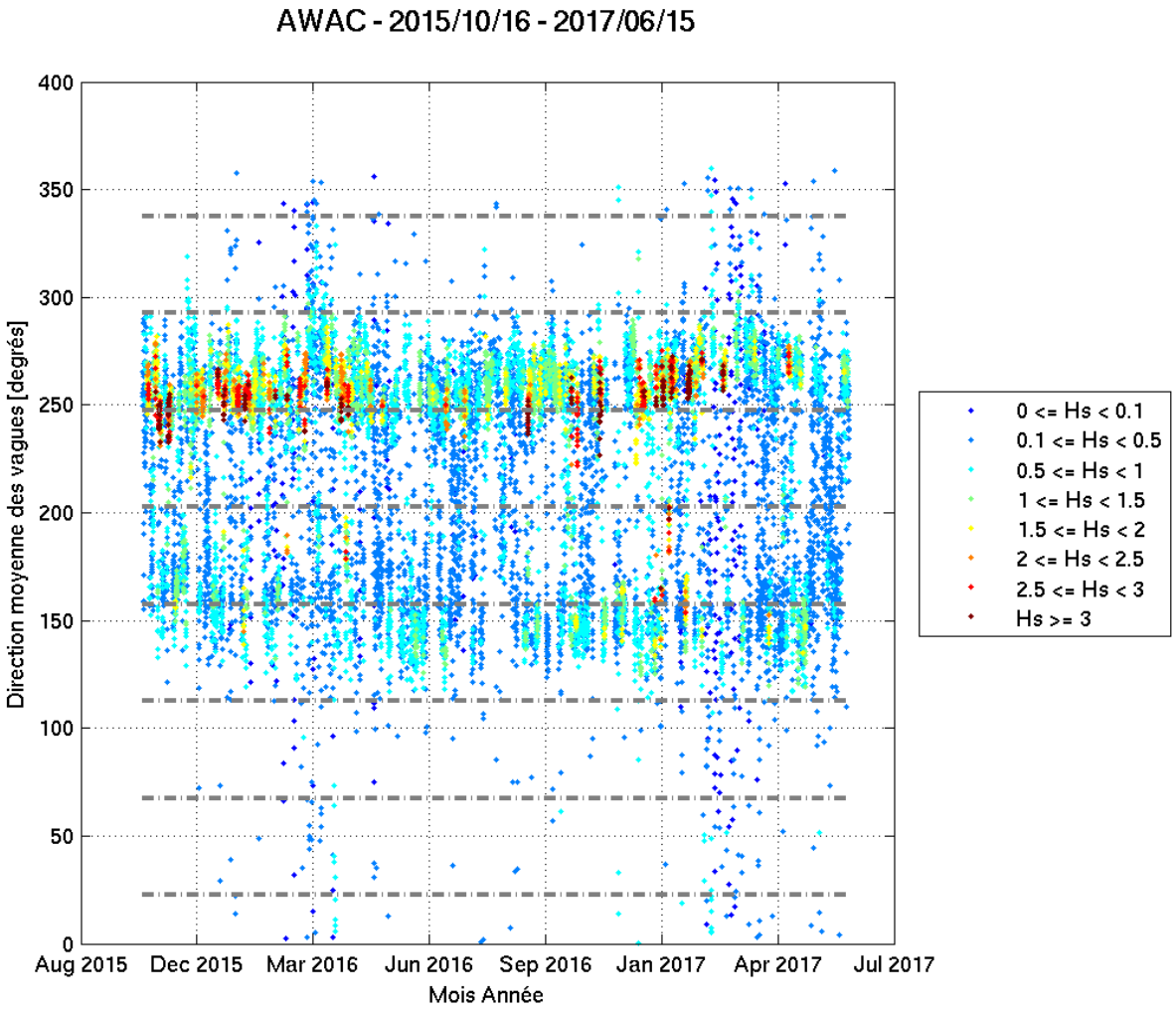


Figure 208. Direction moyenne des vagues et gradation de la Hs entre les 16 oct. 2015 et 15 juin 2017

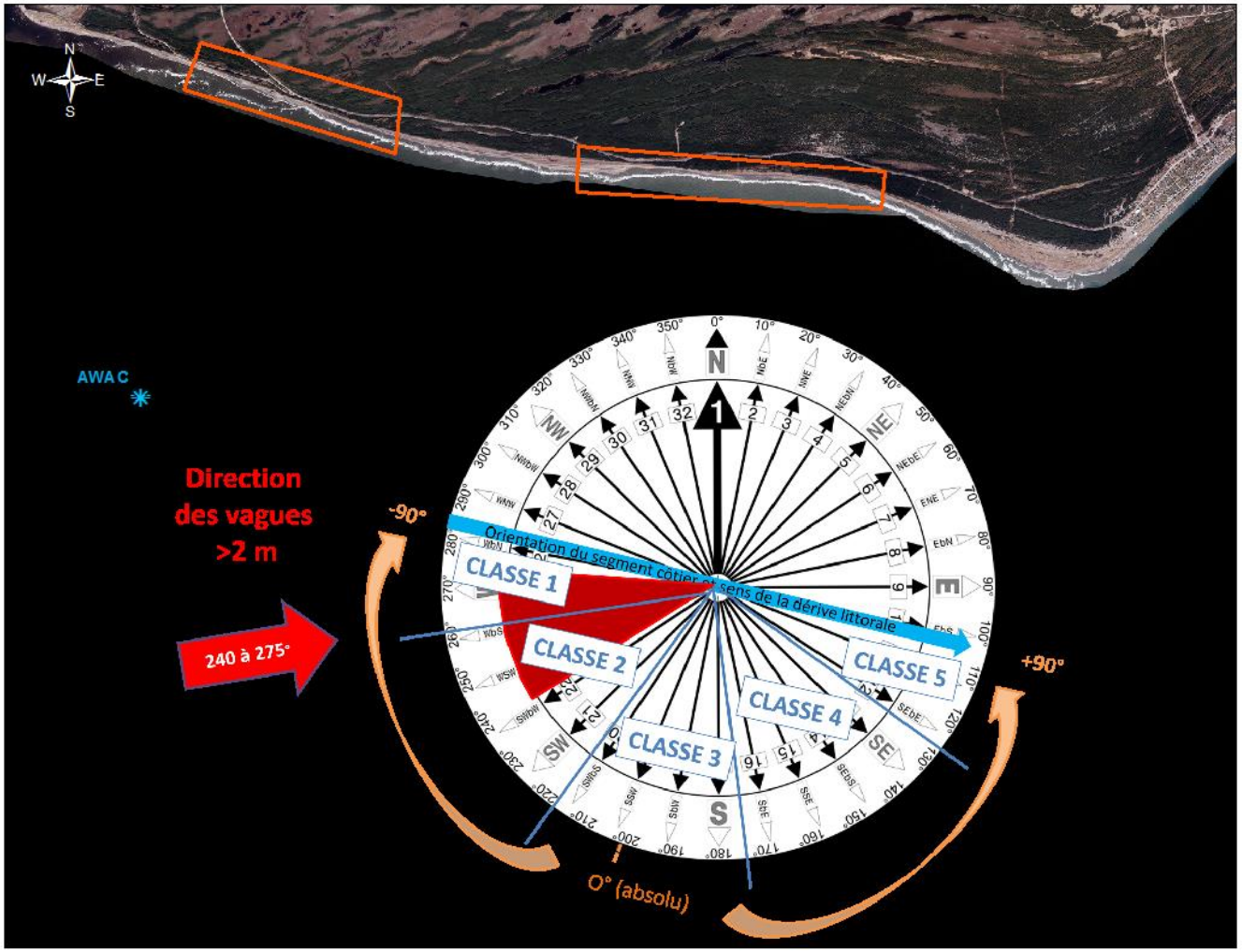


Figure 209. Direction des vagues supérieures à 2 m et classification de l'angle d'incidence des vagues

4.4 Analyse des variations morphologiques du haut estran à Longue-Pointe-de-Mingan

4.4.1 Méthodologie de l'analyse morphosédimentaire

Dans le but d'évaluer l'évolution morphologique de la plage, deux types de relevés topographiques ont été réalisés, soit des profils de plage au DGPS et des levés Lidar à l'aide du Système Mobile de LiDAR Terrestre. Les relevés topographiques sont effectués lors des basses mers de grandes marées afin de maximiser les chances de localiser les cordons de bas estran et ceux sur l'infralittoral peu profond. Idéalement, l'intervalle entre deux relevés est d'environ 2 mois durant la période interglacielle et au moins un levé est effectué durant la présence du pied de glace (février). Dans certains cas, des contraintes logistiques ou climatiques ont pu freiner la réalisation de relevés topographiques. Toutefois, en d'autres temps, l'existence d'autres projets d'étude a permis d'ajouter des relevés comme au cours de l'automne 2016. Les dates de relevés de profils de plage et LiDAR sont présentées au tableau 40. Les deux sections suivantes présentent les deux méthodes de relevé ainsi que les démarches de traitement des données recueillies pour réaliser ultimement les analyses des variations morphologiques des plages.

Tableau 40. Liste des profils disponibles.

Secteur	Date du relevé	Type de relevé	Surface couverte
Ouest/Centre	2015-02-20	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2015-04-18	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2015-04-19	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2015-05-16	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2015-05-17	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest/Centre	2015-05-17	Lidar	Tout le secteur de LPM
Ouest	2015-07-31	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2015-08-02	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest/Centre	2015-08-30	Lidar	Tout le secteur de LPM
Ouest	2015-09-27	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest/Centre	2015-09-28	Lidar	Tout le secteur de LPM
Centre	2015-09-29	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest Ouest/Centre	2015-11-26	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2016-02-09	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2016-02-11	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2016-05-05	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2016-05-07	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2016-09-16	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2016-06-06	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest/Centre	2016-09-16	Lidar	Tout le secteur de LPM
Ouest	2016-10-13	DGPS	Tous les profils (27)
Centre	2016-10-14	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2016-11-04	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2016-11-14	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest/Centre	2016-11-15	Lidar	Tout le secteur de LPM
Centre	2016-12-11-	DGPS	Tous les profils (27)
Ouest	2016-12-12	DGPS	Profil 1 à 14 + 18 à 27
Ouest/Centre	2016-12-15	Lidar	Tout le secteur de LPM

4.4.1.1 *Méthode de relevés LiDAR*

Les levés topographiques LiDAR sont réalisés à l'aide du système mobile de laser terrestre développé par le LDGIZC. Ce dernier est installé sur un véhicule « côte-à-côte ». Le détail de cet équipement est présenté à l'annexe F (ou voir l'article VanWierts et al., 2018). La démarche de calcul de l'erreur du système et le processus de traitement des données sont présentés respectivement aux annexes G et H. Un total de six levés Lidar a été réalisé entre les mois de mai et septembre 2015 et de septembre à décembre 2016, soit pour les dates présentées au tableau 40.

Les levés terrain sont effectués à l'intérieur d'une période d'environ 1h30 avant et après la marée basse pour totaliser une période d'acquisition d'environ 3h afin de couvrir le plus de superficie de plage possible durant la période de basse mer. Les levés sont d'ailleurs effectués durant la période des basses

mers inférieures de grandes marées afin de maximiser la superficie couverte. Celle-ci s'étend de l'embouchure de la rivière Saint-Jean jusqu'au village de Longue-Pointe-de-Mingan. La collecte des données se fait à une vitesse moyenne de 20 km/h. Le temps et la superficie couverte varient en fonction des conditions météorologiques et morphologiques, pour un maximum de 30 km couverts sur la durée d'une période de marée basse (3h). La superficie couverte à chaque levé inclut les deux secteurs d'intérêt pour cette étude (ouest et centre). Afin de diminuer les zones d'occlusion sur le jeu de données, entre 1 et 3 passages sont effectués de manière parallèle à la plage, selon les caractéristiques morphologiques de la plage. Par exemple, lorsqu'il y a une berme, une première ligne de levé est effectuée sur la partie supérieure de la plage et une deuxième sur la partie inférieure. Lorsqu'il y a des cordons de bas estran émergés à marée basse, il est possible de faire une troisième ligne en avançant avec le véhicule sur ces cordons lorsqu'ils sont accessibles.

4.4.1.2 *Conversion des données Lidar en MNE puis en MNT*

Afin de réaliser diverses analyses de la topographie de la plage, les nuages de points Lidar sont transformés en modèle numérique d'élévation (MNE-Lidar). La résolution spatiale établie à 0,5 m (taille des cellules) des nuages de points permet de créer des MNE et ainsi conserver la variabilité microtopographique. L'extension LP360 de la suite ArcGIS permet de visualiser le nuage de points en trois dimensions et de procéder à un filtrage des données afin d'exclure de l'analyse topographique la végétation, les débris ligneux ou anthropiques ou tous autres objets jugés non pertinents. L'opération de filtrage progresse à un rythme de 0,5 à 1 km par jour selon la complexité des secteurs. Les MNE ainsi épurés facilitent l'utilisation et l'exploitation des données Lidar notamment pour évaluer les variations morphologiques. Une fois filtrée, on parle de MNT (modèle numérique de terrain).

4.4.1.3 *Méthode de relevé des profils de plage*

Les relevés de profils de plage sont effectués lors des périodes de basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM) sur deux secteurs du site de Longue-Pointe-de-Mingan, soit les secteurs centre et ouest. L'altimétrie de la plage est mesurée à l'aide d'un DGPS. Le secteur ouest comporte un total de 27 profils alors que le secteur centre en comporte 11 ou 12 selon les dates de relevés (figure 210). Les profils sont distants l'un de l'autre d'environ 50 m et les points de chacun des profils sont enregistrés à chaque 50 cm environ. Les relevés s'effectuent sur une distance variant de 40 à 280 m entre la ligne de rivage et la limite inférieure de la plage accessible par les techniciens du

laboratoire munis de bottes-pantalon imperméables ou d'une combinaison étanche (figure 211).

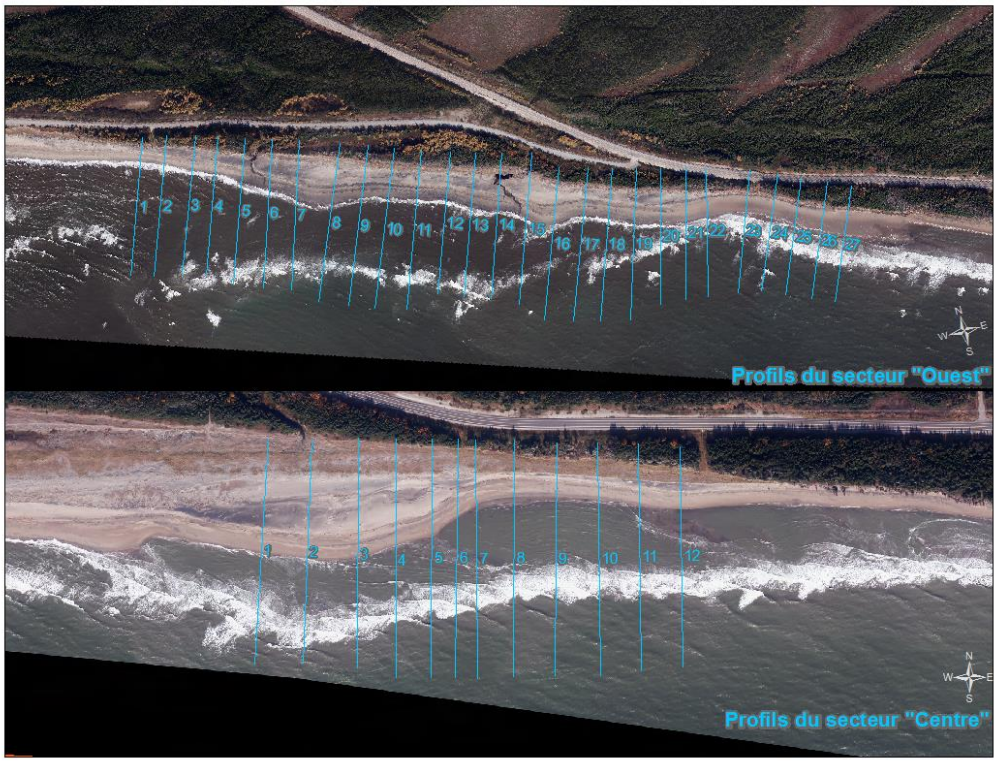


Figure 210. Localisation des profils de plage réalisés dans les secteurs « Ouest » (27 profils) et « Centre » (11 ou 12 profils)



Figure 211. Relevé de profils de plage au DGPS

Les détails des appareils utilisés au cours des différentes campagnes de terrain sont présentés à l'annexe I. Les profils de plage sont réalisés en mode « *topo continu »,* ce qui permet d'acquérir un point automatique tous les 0,50 m lors du déplacement avec le récepteur mobile. Ce mode permet d'installer le jalon du récepteur mobile sur une roue et d'améliorer considérablement la rapidité du temps d'acquisition (figure 211). Dans le cadre de ce projet, l'ensemble des données acquises au DGPS sont référencées sur le système de projection planimétrique NAD83 MTM5 et le système altimétrique CGVD28 avec le modèle de géoïde HT2.0.

4.4.1.4 *Conversion des données de profil de plage en MNT*

Les levés de profils de plage ont permis de générer des modèles numériques de terrain (MNT) à l'aide d'une démarche d'interpolation par krigage de type ordinaire réalisée avec l'extension *Geostatical Analyst* de la suite ArcGIS. Le type de modèle « Gaussien » a semblé le meilleur ajustement lors d'analyses précédentes réalisées sur le même site et avec des données similaires (Corriveau et al., 2016). Dans le but de maximiser la précision des modèles de prédiction d'élévation (*Prediction Map*), le nombre maximal et minimal de

points considérés dans l'interpolation a été défini respectivement à 12 et 6 points.

Les modèles prédits par cette première analyse ont ensuite été convertis au format *raster* à une résolution de 0,5 m. Finalement, ces derniers ont été découpés à l'aide d'un polygone « emporte-pièce » délimitant l'enveloppe des points de profils afin d'éliminer les valeurs trop loin des profils et donc, où l'erreur était forcément trop grande. Il en résulte des MNT comme celui présenté à la figure 212 pour chaque date de relevé DGPS avec lesquels on peut par la suite comparer l'élévation de la plage d'une date à l'autre. Le processus de validation des MNT est présenté en annexe J et l'ensemble des MNT produit à partir des profils ou des levés Lidar est présenté à l'annexe K.

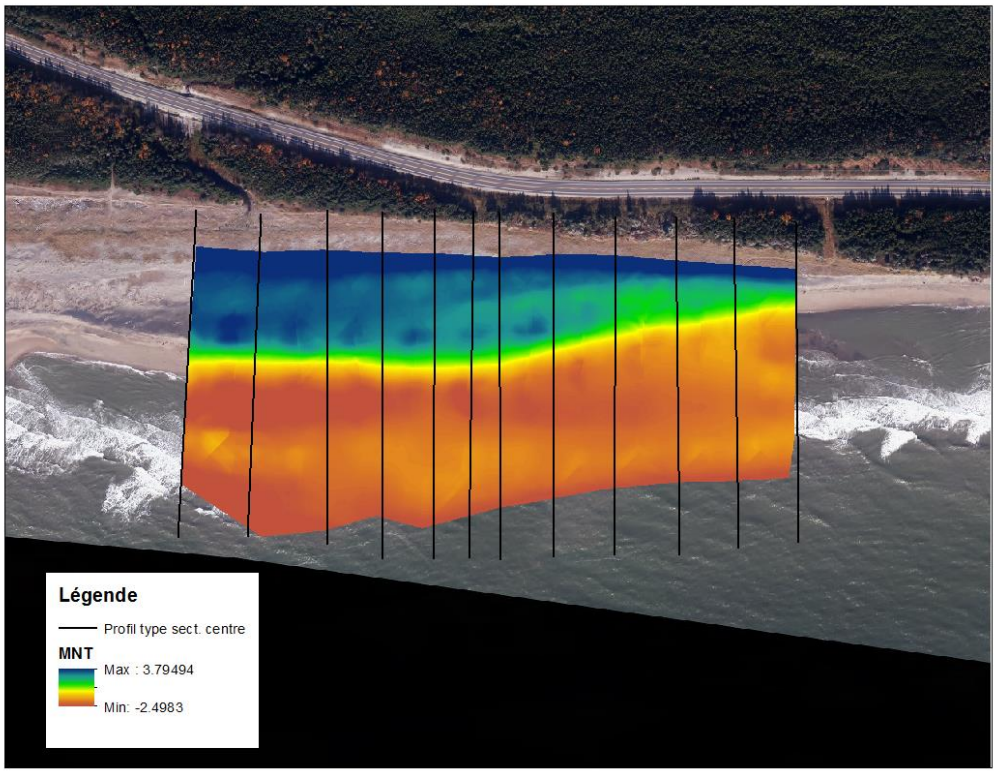


Figure 212. Exemple de MNT produit avec *Geostatical Analyst* (secteur centre)

4.4.1.5 *Différentiel entre les relevés*

La comparaison des MNT issus des profils de plage ou des levés Lidar permet d'évaluer l'évolution morphologique de la plage d'une date à l'autre. Cette

comparaison s'effectue aussi avec ArcGIS à l'aide de l'outil « Minus » de *Saptial Analyst/Math*. Cette opération soustrait la valeur d'élévation d'un pixel de la date la plus ancienne à la valeur du pixel de la date la plus récente pour un endroit donné. Il en résulte des fichiers *raster* illustrant le différentiel entre deux levés. Les périodes analysées sont présentées dans le tableau 41 pour les secteurs ouest et centre.

Tableau 41. Période d'analyse morphologique par site

SECTEUR OUEST		SECTEUR CENTRE	
Période	**Type de données comparées**	**Période**	**Type de données comparées**
2015-02-20 au 2015-04-18	MNT/MNT	2015-02-20 au 2015-04-19	MNT/MNT
2015-04-18 au 2015-05-17	MNT/MNT	2015-04-19 au 2015-05-16	MNT/MNT
2015-05-17 au 2015-09-27	MNT/MNT	2015-05-16 au 2015-08-02	MNT/MNT
2015-09-27 au 2015-11-26	MNT/MNT	2015-08-02 au 2015-09-29	MNT/MNT
2015-11-26 au 2016-02-09	MNT/MNT	2015-09-29 au 2015-11-26	MNT/MNT
2016-02-09 au 2016-05-05	MNT/MNT	2015-11-26 au 2016-02-11	MNT/MNT
2016-05-05 au 2016-09-16	MNT/MNT	2016-02-11 au 2016-05-07	MNT/MNT
2016-09-16 au 2016-10-13	MNT/MNT	2016-05-07 au 2016-09-16	MNT/MNT
2016-10-15 au 2016-11-14	MNT/MNT	2016-09-16 au 2016-10-14	MNT/MNT
2016-11-14 au 2016-12-12	MNT/MNT	2016-10-14 au 2016-11-15	MNT/MNT
2016-11-14 au 2016-12-15	MNT/Lidar	2016-11-15 au 2016-12-11	MNT/MNT
2016-11-15 au 2016-12-15	Lidar/Lidar	2016-11-15 au 2016-12-15	MNT/Lidar

4.5 Description des variations morphologiques et des conditions hydrodynamiques observées

Les figures nommées « Différentiel d'élévation observé » présentées dans la présente section illustrent spatialement les variations morphologiques observées. Pour ce faire, la symbologie de couleur graduée des *rasters* générés a été ajustée pour présenter les valeurs de différentiel allant du rouge au bleu au rouge en passant par le jaune, soit une représentation des valeurs entre -1 et 1 m. Les valeurs inférieures ou supérieures à cette plage étant systématiquement illustrées par le rouge ou le bleu le plus foncé.

Dans les lignes suivantes, ces images différentielles seront décrites pour chacune des périodes inter-relevés. Les teintes rougeâtres indiquent l'érosion verticale de la plage entre deux relevés. À l'inverse, les zones en bleu décriront les zones en accumulation ou en accrétion, ce qui signifie que l'élévation de la plage s'est accrue entre les deux relevés. L'image utilisée comme fond est une photographie aérienne de septembre 2014 et vise seulement à positionner visuellement la distance de la route. Les éléments de la plage, comme la limite du haut estran ou la flexure, visibles sur l'image ne doivent pas être considérés comme référence lors de l'interprétation des MNT.

Le climat de vagues observé à l'endroit des capteurs de pression situés à la flexure (1.2 et 2.2) et sur le bas estran (1.3 et 2.4) de même que les directions et hauteurs de vagues enregistrées au large à l'aide de l'AWAC seront également décrits, lorsque disponibles, à l'aide des figures nommées : « Climat de vagues des capteurs XX Secteur XXX – dates. Les données relatives aux capteurs 1.0, 1.1, et 2.1 n'ont pas été exploitées puisque ceux-ci sont rarement dans l'eau.

Dans certains cas, la description fera aussi référence à la direction des vagues observées à l'AWAC durant cette période. La classification de vagues dont il est question est celle abordée à la section 4.3.3.2 : Direction des vagues.

Plusieurs événements potentiellement morphogènes ont pu être repérés durant les différentes périodes d'analyse de la morphologie de la plage. Les événements potentiellement morphogènes se définissent ici par les remontées du NET à un niveau supérieur au 95^{e} percentile au même moment que des vagues étaient aussi de Hs supérieure au 95^{e} percentile. Graphiquement, nous pouvons les repérer à l'aide des pics qui s'élèvent au-dessus des lignes roses (95^{e} percentile 2015-2016) pour les Hs et le NET (figure 213).

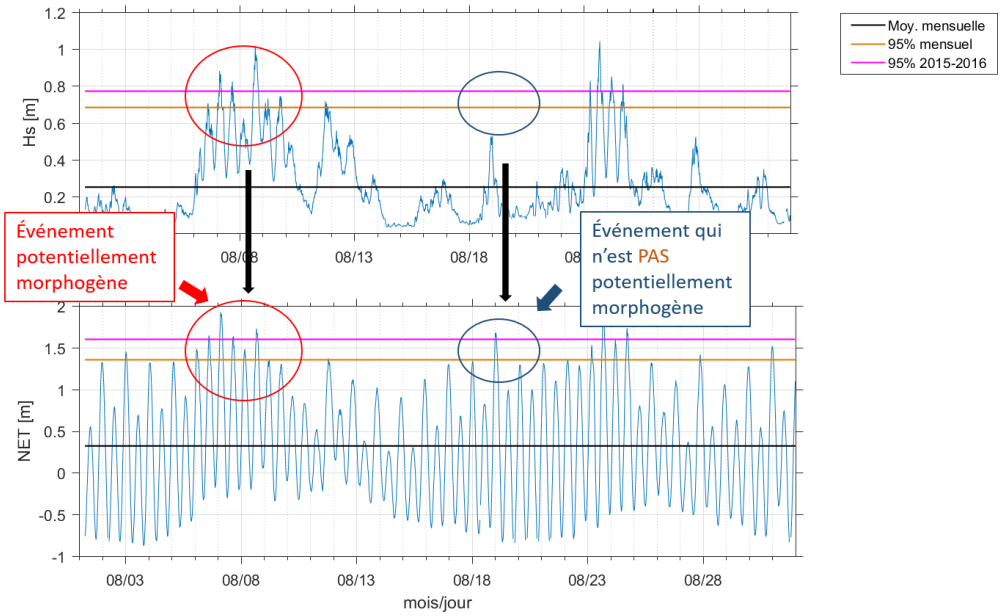


Figure 213. Identification d'événements potentiellement morphogènes

4.5.1 Secteur ouest

4.5.1.1 *Période du 20 février au 17 mai 2015*

Variations morphologiques

Entre le 20 février et le 18 avril 2015, on observe surtout un abaissement de la partie inférieure de la plage directement en bordure du pied de glace de haut estran (figure 214). Tout comme il avait été observé en 2013 et 2014 (Corriveau et al., 2016), la réflexion des vagues contre la microfalaise du pied de glace entraîne un abaissement et une érosion verticale de la partie inférieure de la plage. Ce phénomène est particulièrement intense entre les profils 1 à 8 et 14 à 27 où la plage était déjà plus étroite et pentue avant la mise en place du pied de glace. On constate, sur les profils topographiques de février, un surcreusement devant le front du pied de glace. Au fur et à mesure que le front du pied de glace recule, il y a érosion verticale de la plage nouvellement dégagée (figure 215). Devant les profils 9 à 12, le mode d'évolution est différent en raison de la présence d'un cordon sableux de bas estran à proximité de la plage. D'une part, le cordon atténue l'énergie des vagues et favorise le déferlement et d'autre part, les sédiments du cordon alimentent la partie inférieure de la plage, ce qui se traduit par une accrétion

de la partie inférieure de la plage et de la partie supérieure du bas estran tel qu'observé sur la figure 214. À la mi-avril, le pied de glace est fortement en décrépitude. Comme il est très chargé en sédiments, il fond sur place en s'amenuisant verticalement par fusion alors que le front recule par l'action mécanique des vagues et par thermo-érosion (figure 216). Lors de la phase finale de la fonte du pied de glace en avril, des sédiments sont redistribués vers le bas de plage, soit directement par les sédiments contenus dans et sur le pied de glace et délestés lors de la fonte et du recul du pied de glace, mais aussi par de nombreux ruisseaux de fonte supraglaciels qui transportent des sédiments du pied de glace vers la partie inférieure de la plage (figure 217). Ces processus entraînent momentanément une accrétion de la plage entre le 18 avril et le 17 mai 2015, se traduisant par un bilan sédimentaire plutôt positif (figure 218 et figure 219).

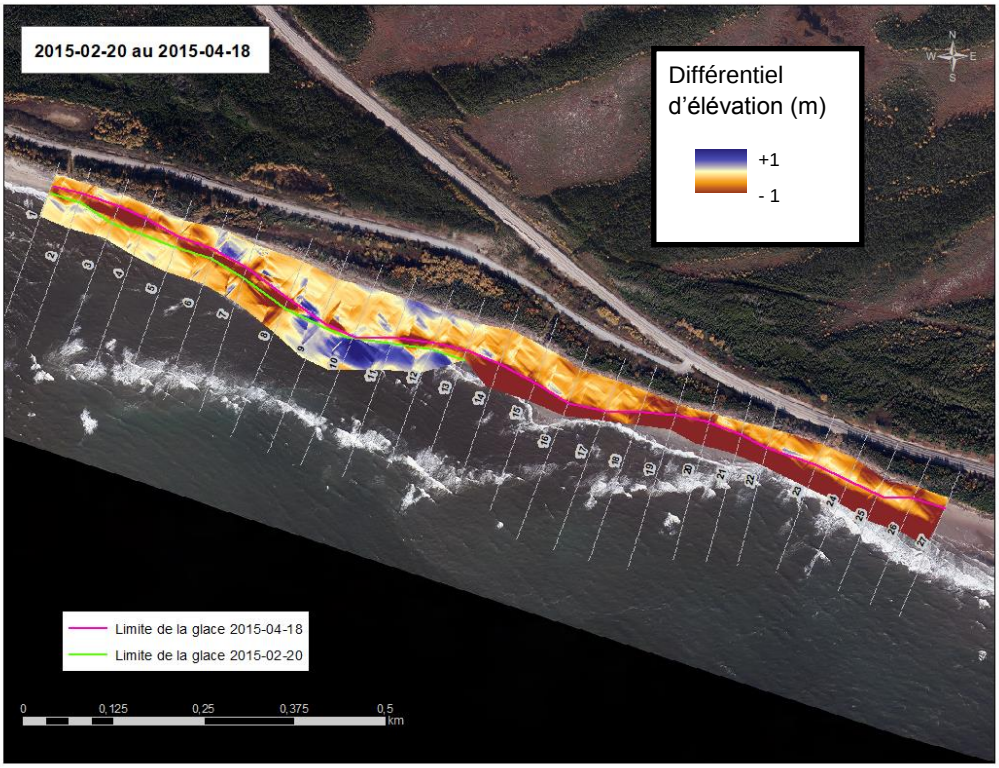


Figure 214. Différentiel d'élévation observé – secteur ouest – entre le 20 février et 18 avril 2015

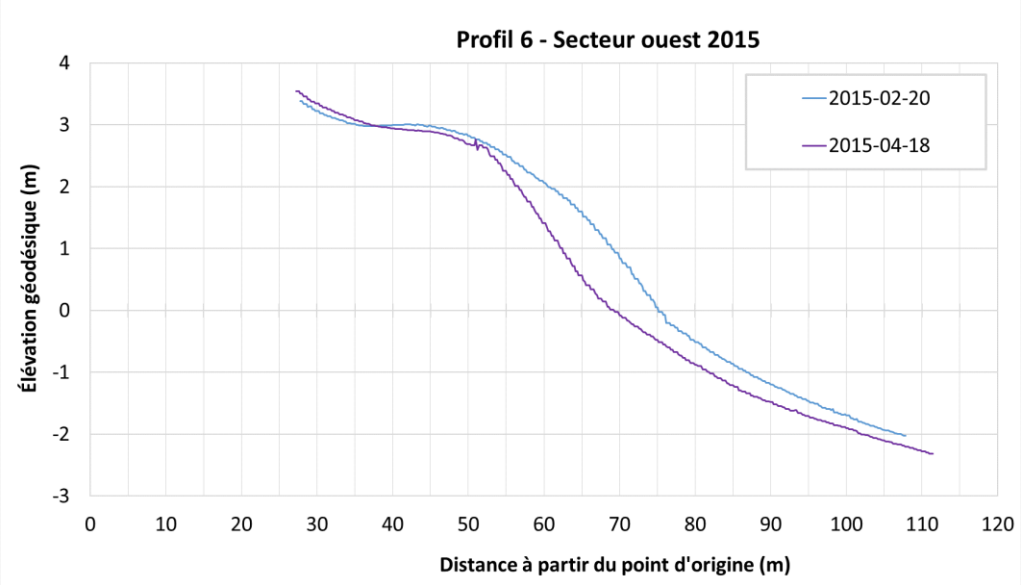


Figure 215. Évolution du profil 6 à l'hiver 2015



Figure 216. Pied de glace chargé en sédiments (19 avril 2015)



Figure 217. Transfert de sédiments du pied de glace vers la plage provenant d'un chenal supraglaciel (19 avril 2015).

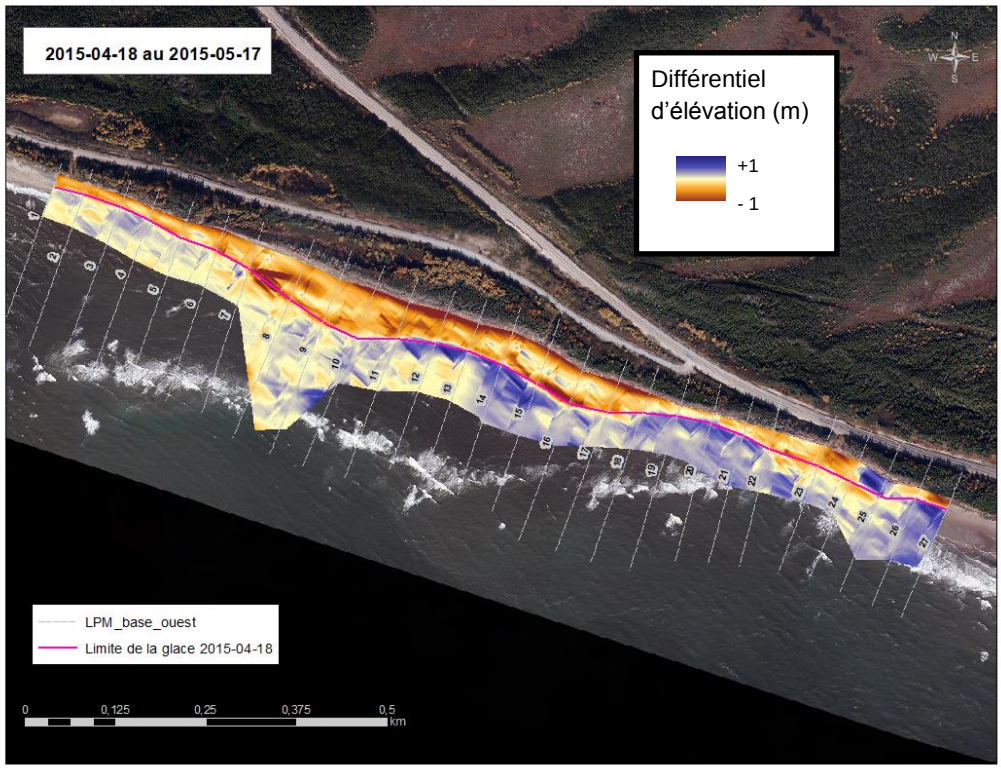


Figure 218. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 18 avril et le 17 mai 2015

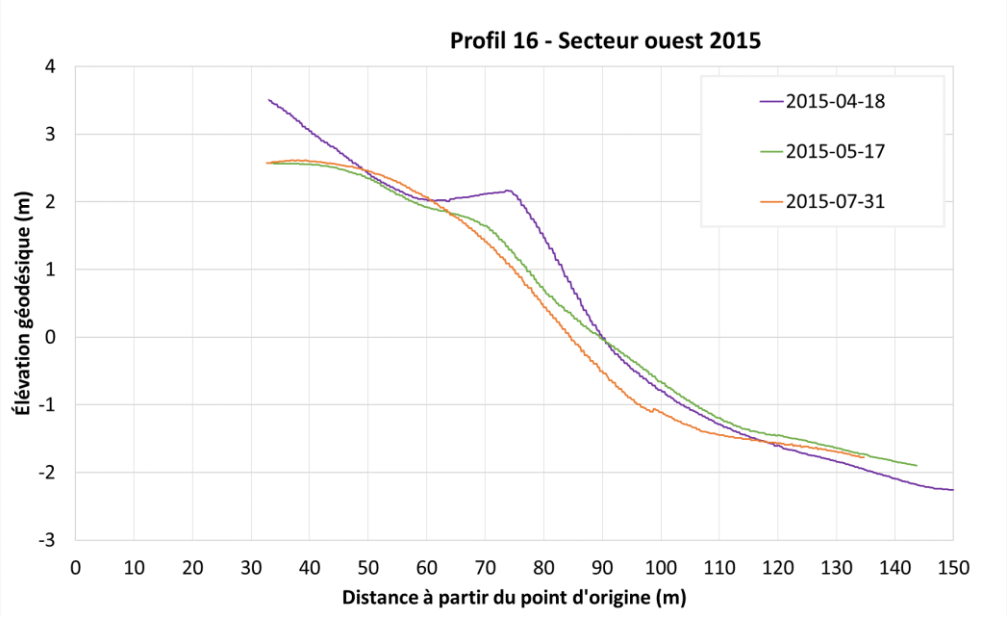


Figure 219. Évolution du profil 16 entre le 18 avril et le 31 juillet 2015.

Conditions de vagues à la côte (capteurs) et au large (AWAC)

A l'hiver et au printemps 2015, aucun appareil de mesure hydrodynamique n'était encore en place.

4.5.1.2 *Période du 17 mai au 27 septembre 2015*

Variations morphologiques

La période du 17 mai au 31 juillet 2015 montre de grands changements morphologiques (figure 220). Au-delà d'une érosion généralisée observée sur le différentiel d'élévation, il y a des patrons d'évolution morphologique assez différents spatialement (figure 221). Tout d'abord dans la section ouest (profils 1 à 6 et 9 à 11), on constate un abaissement de la partie supérieure de la plage ainsi que du bas estran et une accumulation sur la partie inférieure de la plage. Ce profil morphologique est le résultat d'un recul et d'un abaissement de la partie supérieure de la plage lors d'un haut niveau d'eau ainsi que d'un transfert des sédiments vers le bas de plage. L'analyse des images des caméras Reconyx permet de confirmer que de hauts niveaux d'eau à la côte se sont produits lors de cette période, particulièrement le 8 juillet 2015 quand le niveau d'eau total à la côte a été influencé par des vagues. Au même moment, en aval de ces profils, soit aux profils 7 et 8 et 13 à 15, l'ensemble de

la plage a reculé en gardant la même morphologie, effectuant ainsi une translation vers les terres. Une microfalaise s'est même formée dans la berme formant la haute plage. En aval, vis-à-vis les profils 16 à 18, on observe une accentuation de la pente de la plage engendré par un recul et un transfert de sédiments vers la partie supérieure de la plage (figure 221). Ce transfert de sédiments vers la partie supérieure de la plage est encore plus accentué en aval (profils 22 à 27), où il se forme une véritable crête de plage. La formation de cette crête de plage sur sa partie supérieure provient non seulement d'un transfert de sédiment du bas de plage vers le haut de plage (transfert perpendiculaire), mais aussi d'un transfert latéral des sédiments par la dérive littorale. On constate aussi à l'extrémité est du secteur la migration d'un cordon sableux de la partie inférieure du bas estran vers sa partie supérieure.

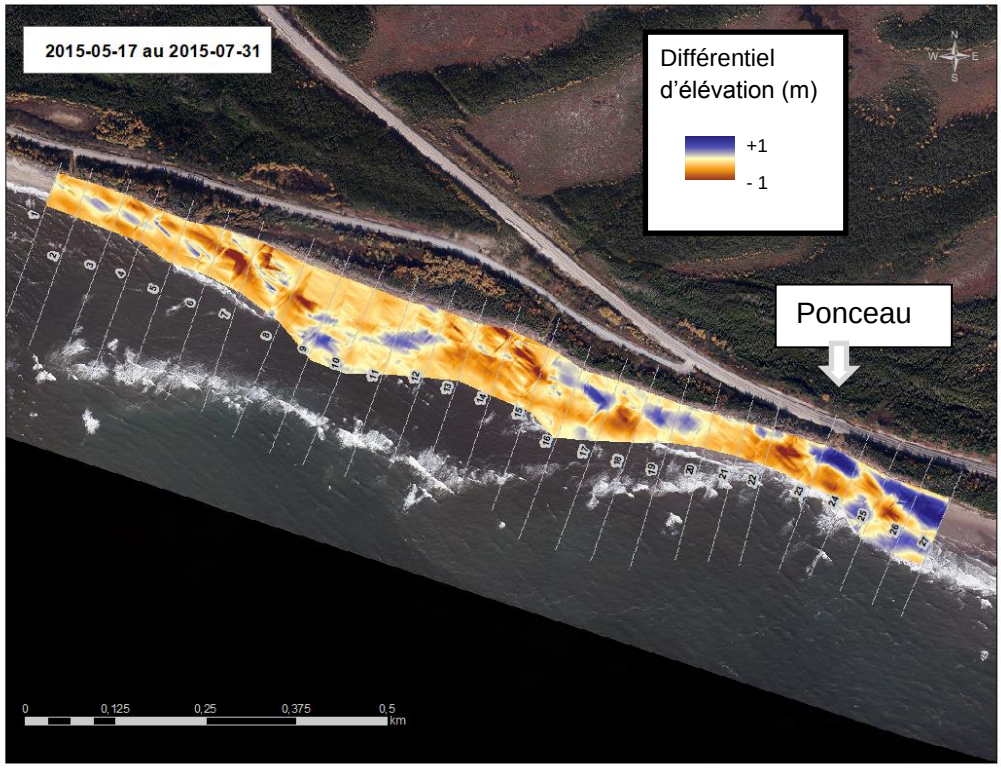


Figure 220. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 17 mai et le 31 juillet 2015

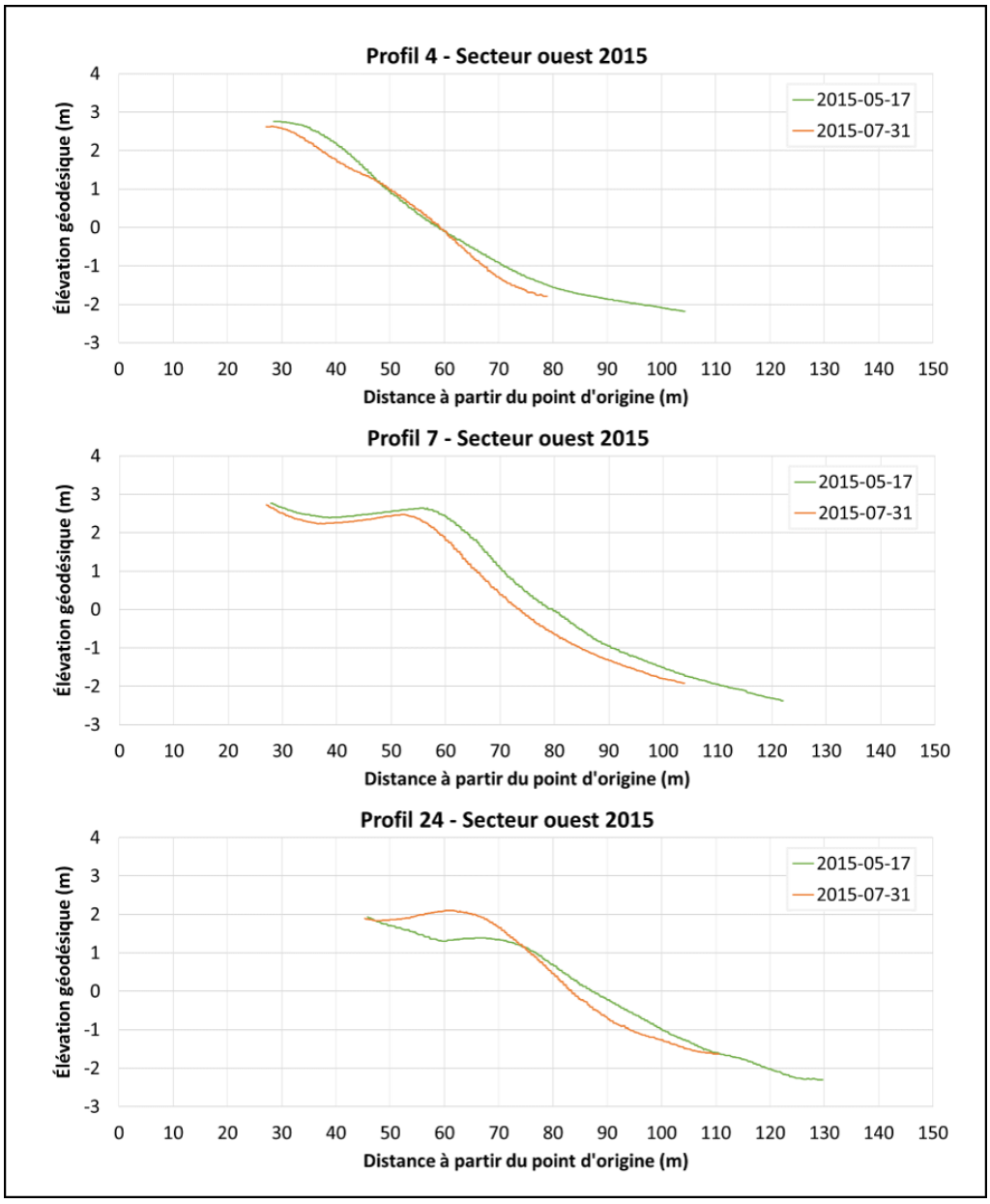


Figure 221. Évolution morphologique de la plage entre le 17 mai 2015 et le 31 juillet 2015

Pour la date du 27 septembre 2015, seules les données des profils 1 à 17 sont disponibles. On constate généralement une importante accumulation sédimentaire tant sur la plage que sur le bas estran (figure 222). Le profil morphologique passe dans bien des cas d'un profil concave (érosion) en juillet à un profil convexe (profil d'accumulation) à la fin septembre. Certains profils

enregistrent un abaissement de la partie supérieure de la plage (profils 3, 4, 5) ou de la partie médiane supérieure de la plage (profils 12, 13, 14) avec un transfert des sédiments vers le bas estran. Enfin, les profils 16 et 17 ont connu un abaissement de leur profil de plage.

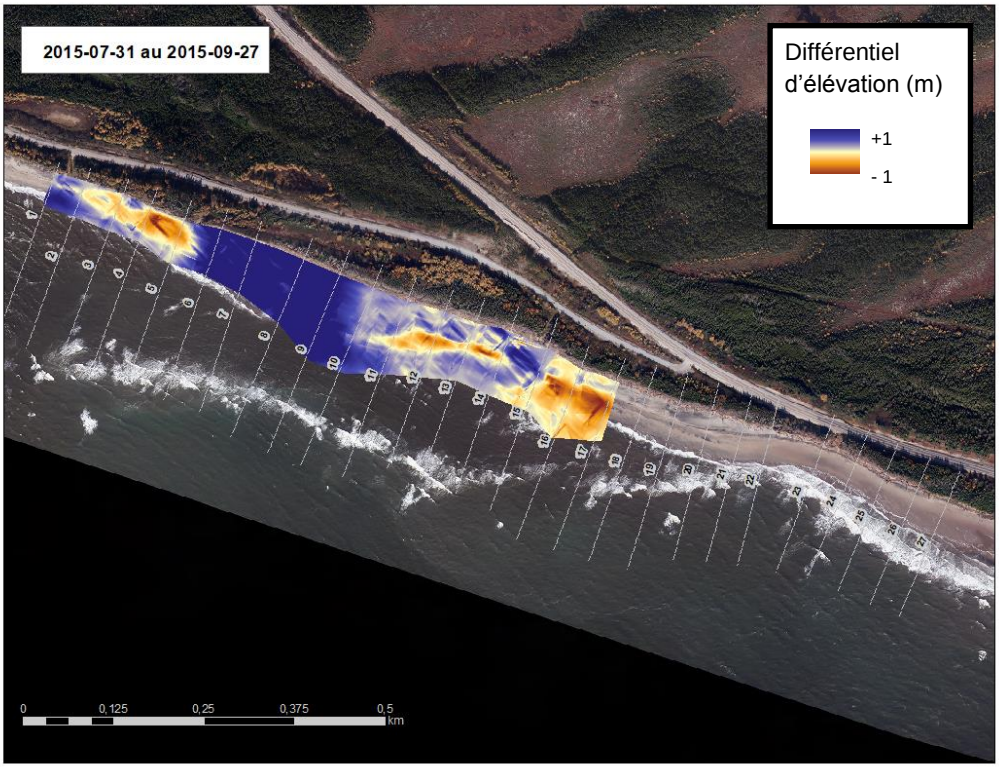


Figure 222. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 31 juillet et 27 septembre 2015

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Les données des capteurs 1.2 et 1.3 situés respectivement à la limite inférieure du bas estran et à la flexure indiquent dans les deux cas que la hauteur significative des vagues a atteint ou dépassé le 99^{e} percentile lors de sept événements du 31 juillet au 27 septembre 2015. Pour cette période, les seuils du 95^{e} percentile sont de 0,8 et 0,9 m pour ces capteurs.

Pour le capteur 1.3, 54 heures sur un total de 1366 (4 %) avaient un potentiel morphogène. L'analyse du graphique de la figure 223 permet de cibler 13 événements durant lesquels peuvent être réparties ces 54 heures.

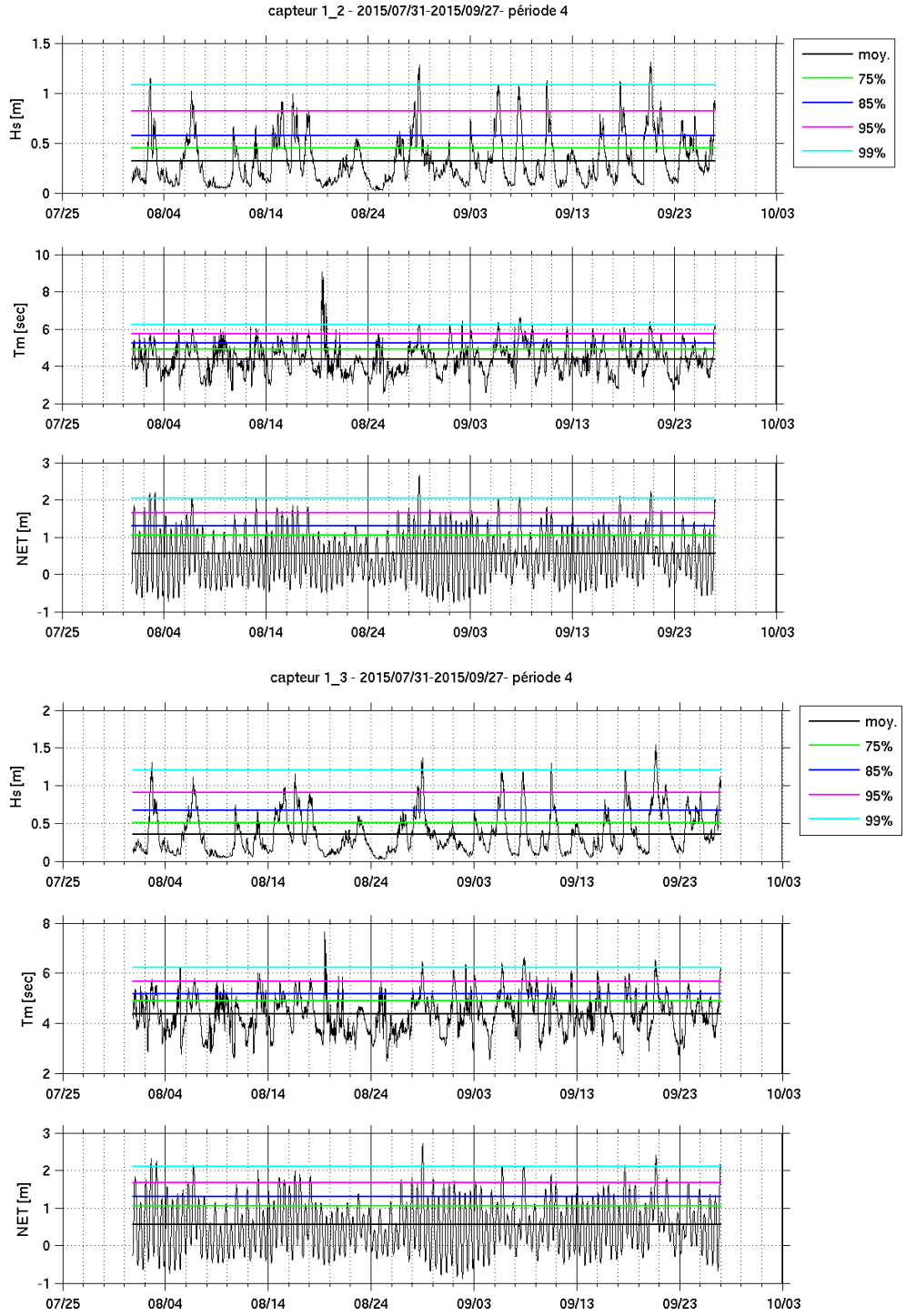


Figure 223. Climat de vagues des capteurs 1.2 et 1.3 Secteur ouest – 31 juillet au 27 septembre 2015

4.5.1.3 *Période du 27 septembre au 26 novembre 2015*

Variations morphologiques

Du 27 septembre 2015 au 26 novembre 2015, on constate par endroit une inversion dans le bilan sédimentaire de la plage (figure 224). On constate une accumulation sur la partie ouest du secteur (profils 1 à 4) alors qu'en aval, on constate un abaissement du profil de la plage prenant par endroit un profil plutôt concave (profils 6 à 10 et 14 à 17). On constate aussi lors de cette période une migration vers la côte des cordons sableux prélittoraux rehaussant par endroit la partie supérieure du bas estran (figure 225). De manière générale, la période du 31 juillet au 26 novembre 2015 montre une tendance au démaigrissement de la plage, sauf pour les trois premiers profils à l'ouest où le bilan a été plutôt positif. On observe un transfert de sédiments de la partie supérieure de la face de la plage vers le bas de plage ainsi qu'une migration des cordons sableux prélittoraux vers la côte. Ces deux modes de transfert de sédiments engendrent ainsi une accumulation sur la partie inférieure de la plage et la partie supérieure du bas estran (profils 4 à 12 et 16 à 27). Dans le secteur entre les profils 7 à 15, il y a un haut de plage bien développé au droit duquel il y a eu une accrétion assez importante entre juillet et septembre qui a permis de maintenir un bilan sédimentaire positif sur le haut de plage entre juillet et novembre 2015, malgré une érosion entre septembre et novembre 2015.

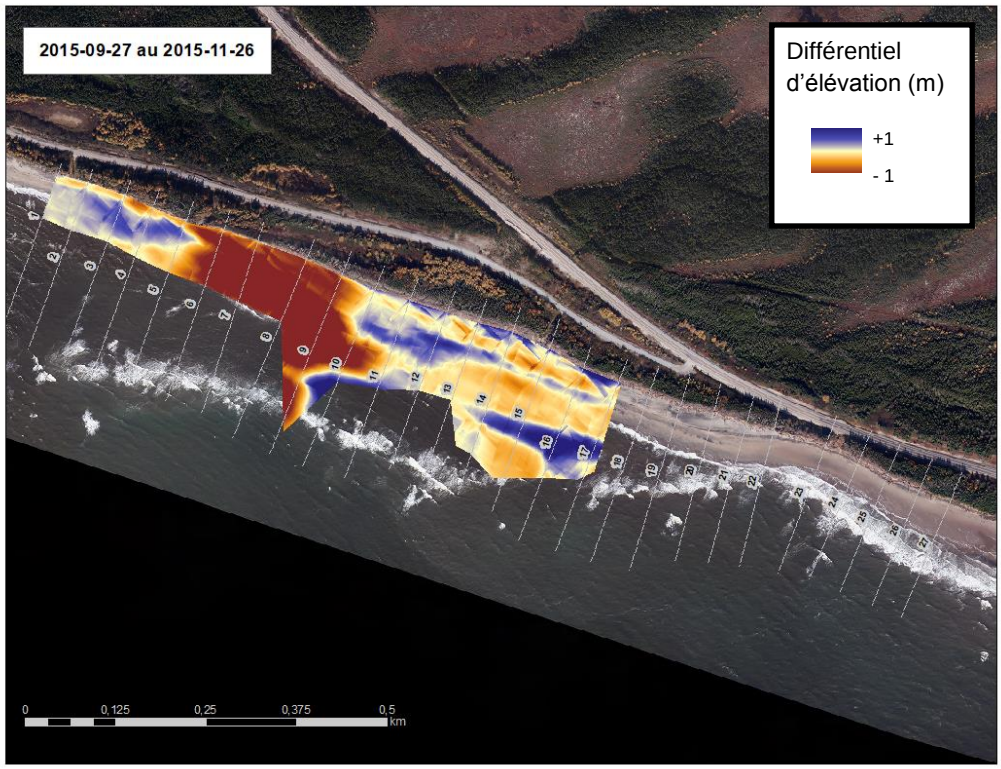


Figure 224. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 27 septembre et le 26 novembre 2015

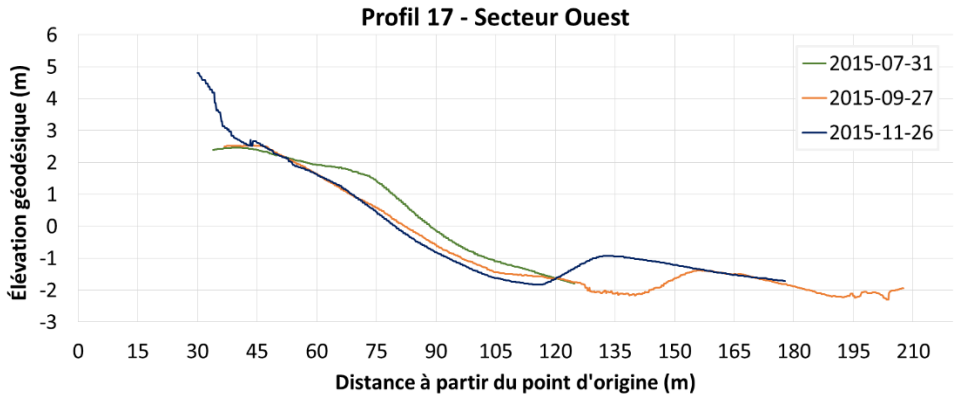


Figure 225. Évolution du profil 17 entre le 31 juillet et le 26 novembre 2015

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Durant la période du 27 septembre au 26 novembre 2015, les Hs de vagues enregistrées à la côte (capteurs) indiquent que le seuil du 95^{e} percentile est atteint ou dépassé lors de huit événements à la flexure (capteur 1.2), mais seulement lors de six événements au capteur 1.3 (figure 226).

Conditions de vagues au large (AWAC)

Les données de l'AWAC (au large) sont disponibles à partir du 16 octobre 2015 (figure 227). Celles-ci montrent que des quatre événements de fortes vagues (> 2 m) survenus entre cette date et le 10 novembre 2015, les deux premiers étaient en provenance de l'ouest (250 à 280°) alors que les deux suivants provenaient de l'ouest-sud-ouest (235 à 260°). On y observe aussi une grande proportion de vagues de provenance du sud (près de 30 %).

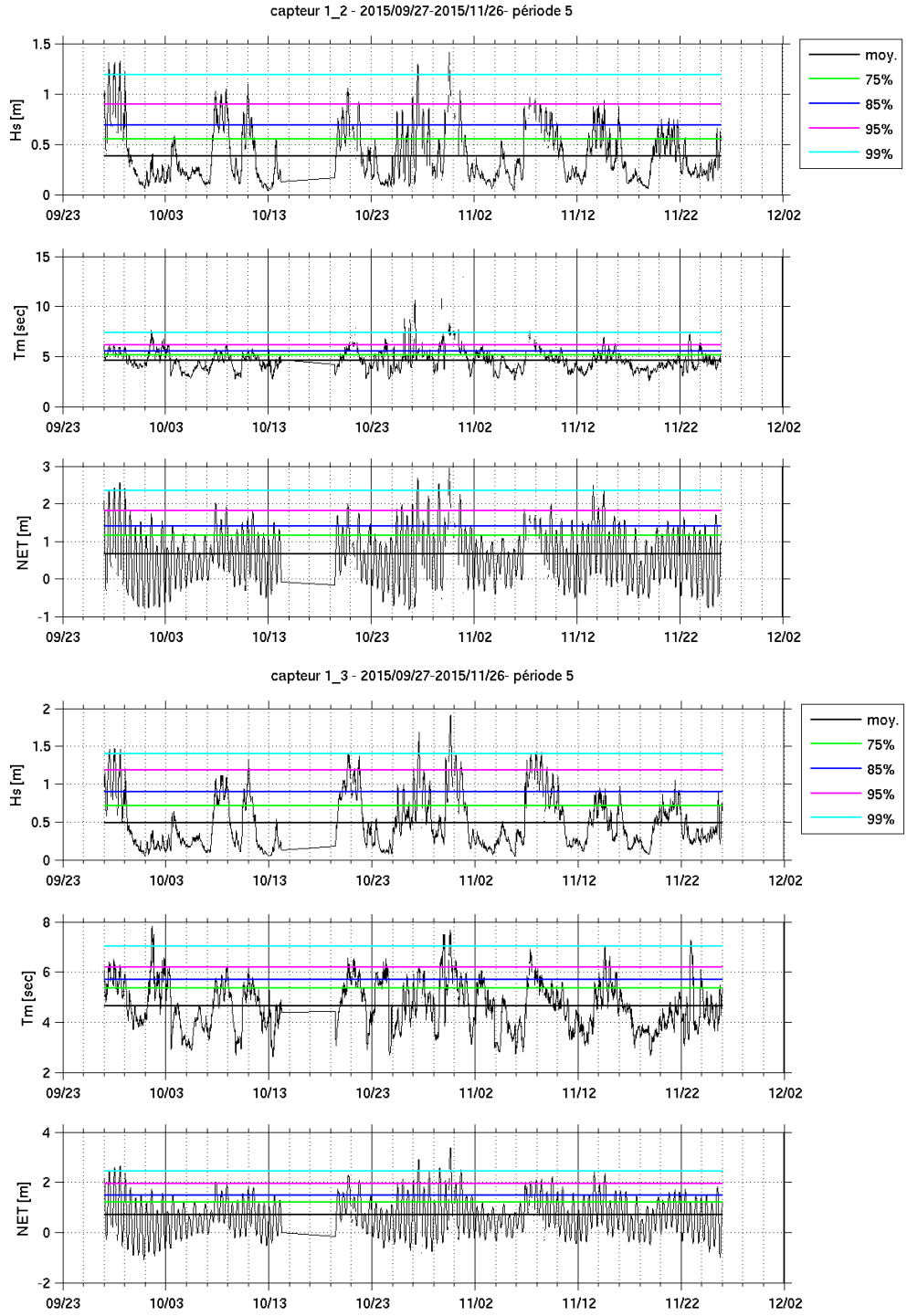
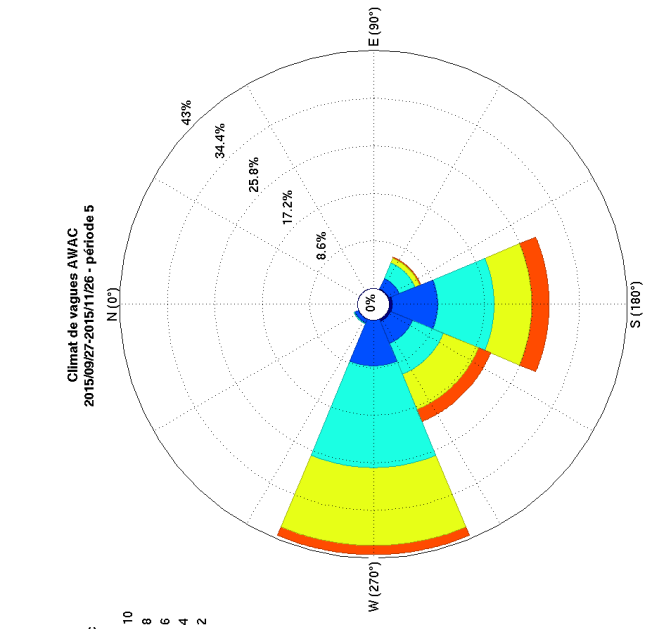
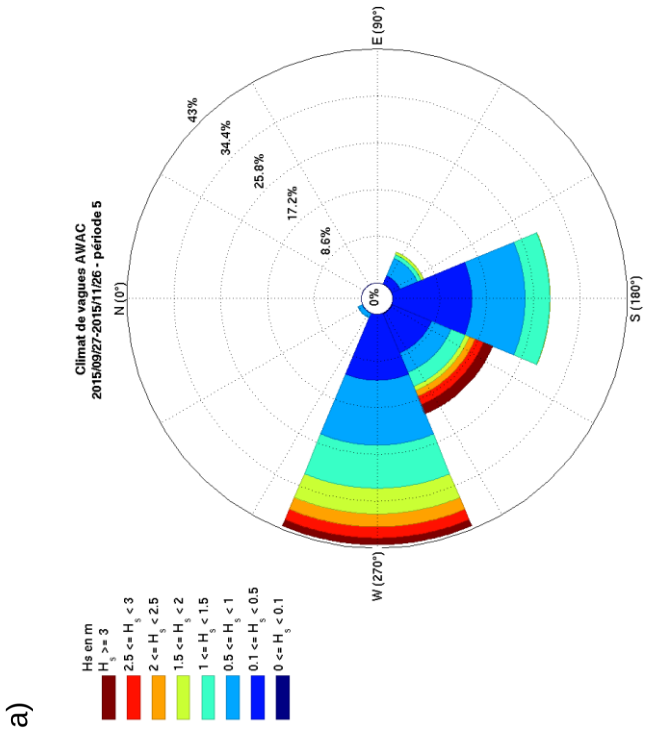


Figure 226. Climat de vagues des capteurs 1.2 et 1.3 Secteur ouest – du 27 septembre au 26 novembre 2015


b)
Climat de vagues AWAC
2015/09/27-2015/11/26 - période 5
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%


a)
Climat de vagues AWAC
2015/09/27-2015/11/26 - période 5
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%

c)

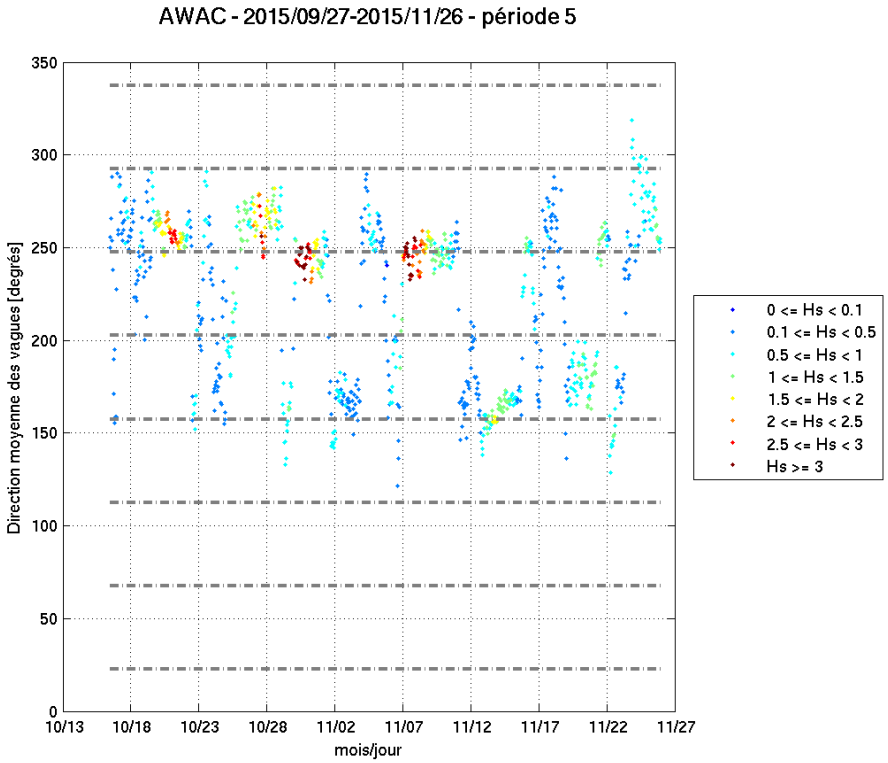


Figure 227. Rose des vagues en fonction a) de la Hs, b) de la période et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 16 octobre au 26 novembre 2015

4.5.1.4 *Période du 26 novembre 2015 au 6 juin 2016*

Variations morphologiques

L'évolution du profil morphologique de la plage entre le 26 novembre 2015 et le 9 février 2016 a été fortement conditionnée par la formation et l'extension du pied de glace sur le haut estran (figure 228). En l'absence du pied de glace de bas estran, on constate une très forte érosion de la plage au front du pied de glace de haut estran (profils 4 à 11, 15, 16 et 19 à 27). La réflexion des vagues contre le pied de glace entraîne un abaissement du bas de plage qui lui confère un profil très concave (figure 229). Les sédiments du bas de plage érodés dans la partie amont sont en partie transférés latéralement en aval sur le bas estran vis-à-vis les profils 12 à 14 où il y a une forte accumulation. On constate aussi entre les profils 17 et 21, la migration vers la côte d'un cordon sableux prélittoral qui entraîne une accrétion du bas estran. Avec le recul du front du pied de glace au printemps, on constate que la concavité du profil de la plage en mai 2016 s'accentue particulièrement sur la partie médiane et supérieure de la plage, indiquant une érosion de la plage toujours en raison de la réflexion des vagues sur le pied de glace (profils 1 à 11). Les sédiments érodés à la plage sont transférés vers le bas estran qui connait une accrétion. On constate aussi en aval de ces derniers profils un transfert de sédiments dans le sens de la dérive littorale qui entraîne une accrétion importante du bas de plage au niveau des profils 12 à 16. Le cordon sableux de bas estran observable en février entre les profils 17 et 27 a migré vers la côte entre le 9 février et le 5 mai 2016 tout en se déplaçant dans le sens de la dérive littorale, entraînant ainsi une forte accumulation sur la plage au niveau des profils 18 à 21 et de la partie supérieure du bas estran entre les profils 22 à 27. On constate aussi qu'il y a eu un fort abaissement de la partie supérieure de la plage entre les profils 19 à 24, soit où la largeur du pied de glace a été la plus étroite au cours de l'hiver (figure 230). Cet abaissement semble avoir précédé la migration du cordon sableux et la formation de la crête de plage qui était déjà présente le 24 avril 2016 (figure 231). Des levés topographiques ont aussi été réalisés le 6 juin 2016. On constate déjà un reprofilage de la plage où les sédiments du bas estran et de la partie inférieure de la plage ont migré vers la partie supérieure de la plage (profils 2 à 15 et 18 à 23). Par conséquent, la partie médiane et supérieure de la plage a tendance à prendre un profil davantage convexe, typique des profils de beaux temps (profil d'été). Par contre, à l'extrémité est du secteur (profils 24 à 27), on constate plutôt une érosion de la plage et un engraissement du cordon de bas estran suggérant un déplacement des sédiments vers la mer.

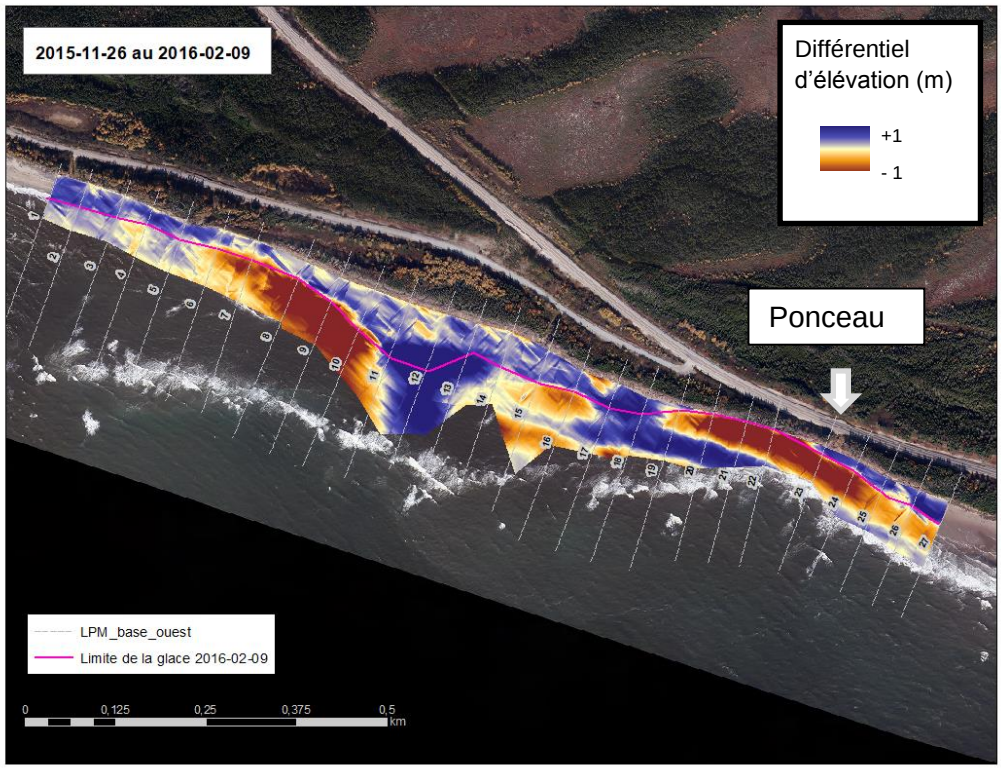


Figure 228. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 26 novembre 2015 et le 9 février 2016

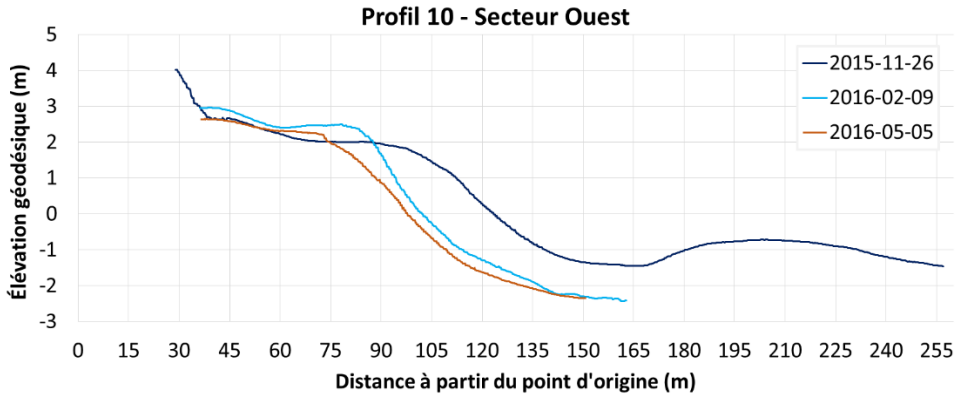


Figure 229. Évolution du profil 10 entre le 26 novembre 2015 et le 5 mai 2016

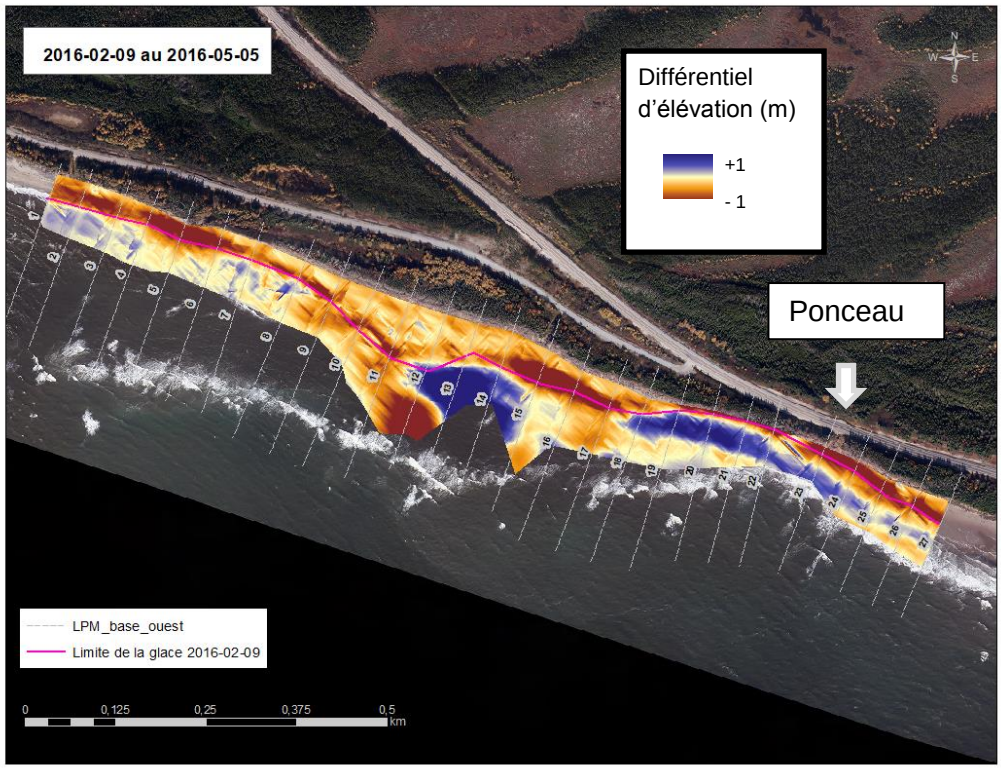


Figure 230. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre 9 février et le 5 mai 2016



Figure 231. Formation d'une crête de plage devant une microfalaise d'érosion sur la partie supérieure de la plage vis-à-vis les profils 23 à 27, 24 avril 2016

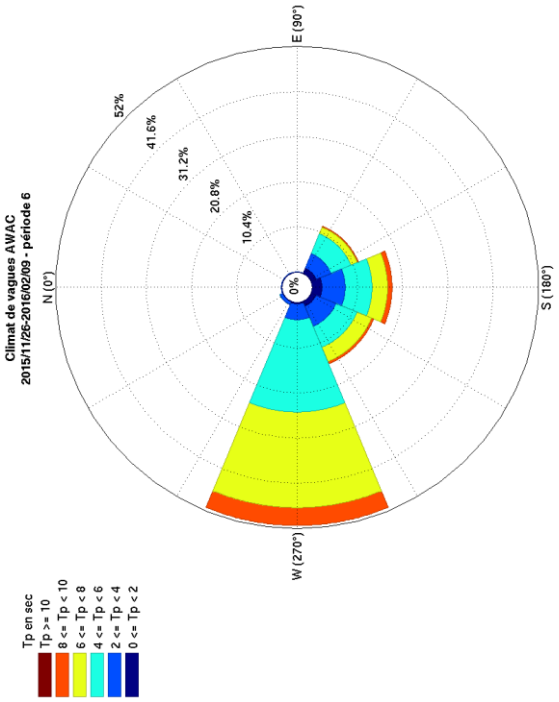
Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Les capteurs de pression ne sont pas déployés durant la saison hivernale.

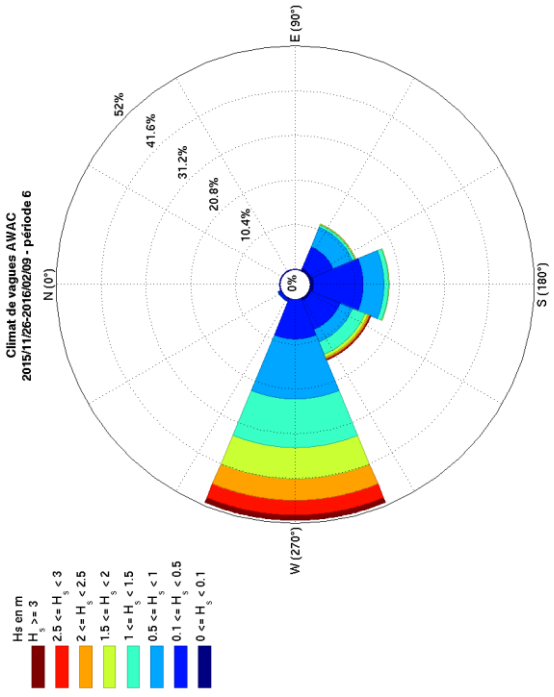
Conditions de vagues au large (AWAC)

Entre le 26 novembre 2015 et le 9 février 2016 (figure 232), les données d'AWAC montrent au moins huit événements durant lesquels les vagues au large étaient de plus de 2 m (Hs). Leur orientation variait toujours entre l'ouest et l'ouest-sud-ouest (250 à 275°). D'ailleurs, d'après les roses des vagues, la très grande majorité des vagues (>50 %) au cours de cette période provenait de cette direction comparativement à moins de 20 % pour les autres directions. À partir des enregistrements de vagues au large à l'AWAC pour la période du 9 février au 5 mai 2016 (figure 233), on peut observer environ six événements de fortes vagues (Hs >2 m) durant lesquels celles-ci provenaient essentiellement (49 %) de l'ouest et l'ouest-sud-ouest (245 à 275°), soit des classes 1 à 2.

b)


Climat de vagues AWAC
2015/11/26-2016/02/09 - période 6
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
10.4%
20.8%
31.2%
41.6%
52%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2015/11/26-2016/02/09 - période 6
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
10.4%
20.8%
31.2%
41.6%
52%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

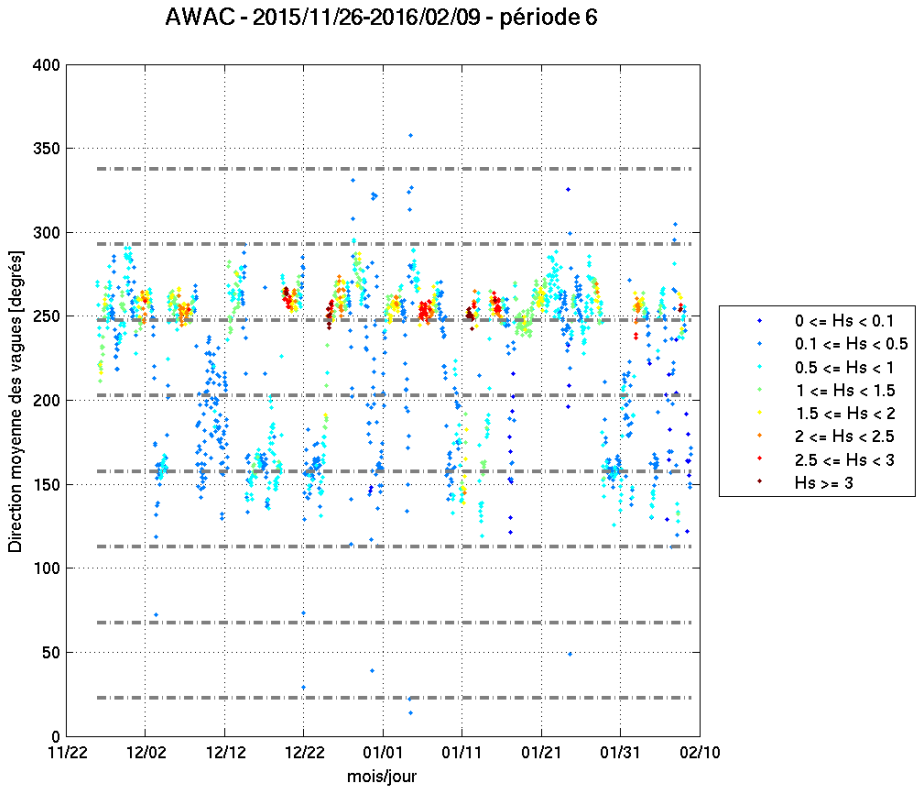
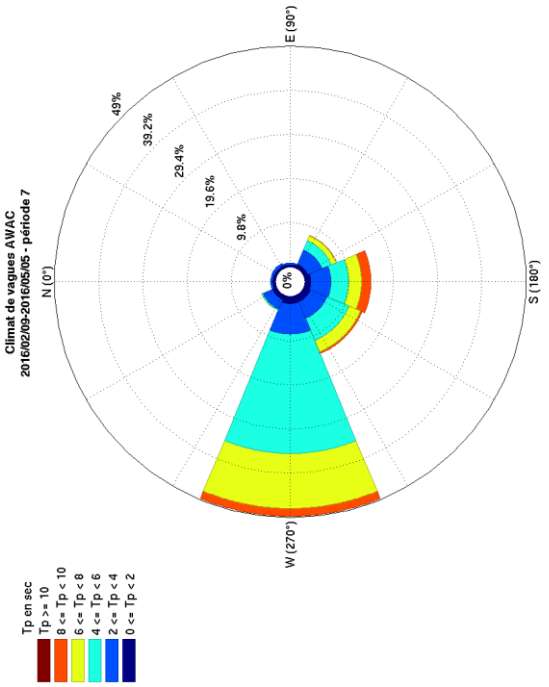
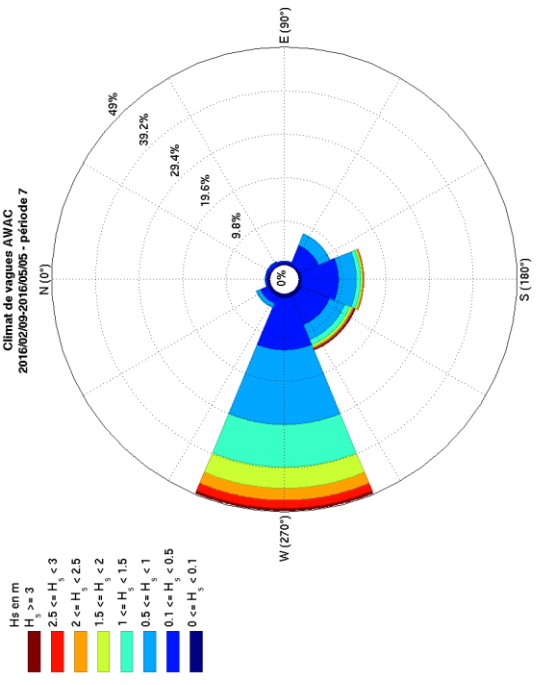


Figure 232. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 26 novembre 2015 au 9 février 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/02/09-2016/05/05 - période 7
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
49%
39.2%
29.4%
19.6%
9.8%
0%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/02/09-2016/05/05 - période 7
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
49%
39.2%
29.4%
19.6%
9.8%
0%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

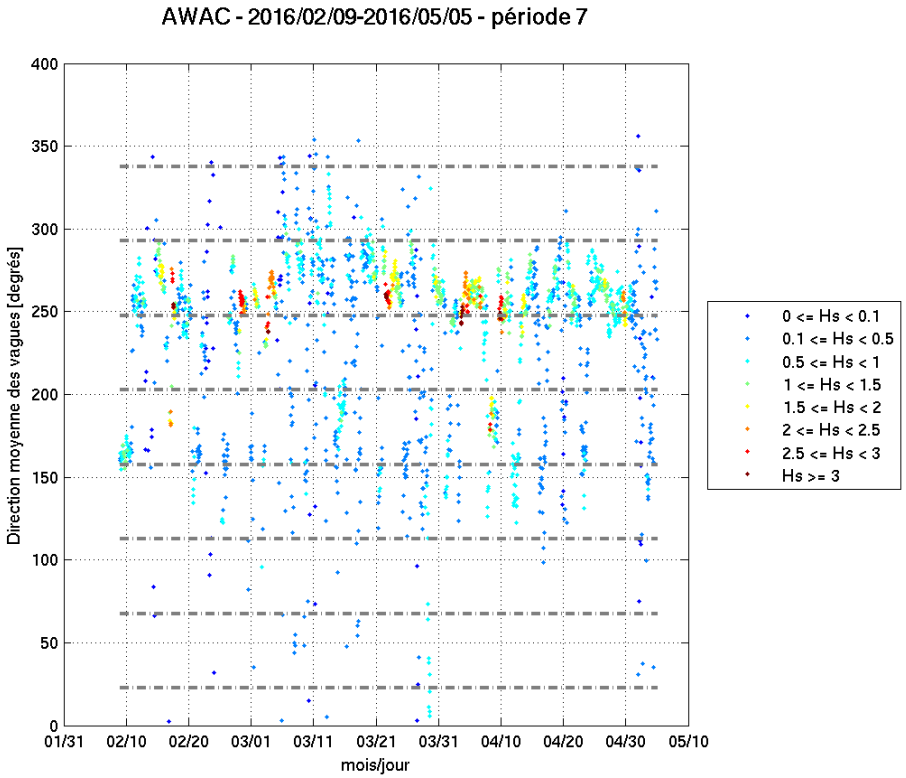


Figure 233. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 9 février au 5 mai 2016

4.5.1.5 *Période du 5 mai au 16 septembre 2016*

Variations morphologiques

De manière générale, la période du 5 mai au 16 septembre est caractérisée par une importante accumulation sur la plage, particulièrement sur sa partie supérieure (profils 1 à 7, 15 et 19 à 24 ; figure 234). On observe aussi la formation d'un imposant cordon sableux sur la partie inférieure du bas estran et de la zone prélittorale peu profonde entre les profils 1 à 7 (figure 235). Il se produit ainsi un transfert de sédiments vers la côte. Sur certains profils, la face de la plage recule alors que le bilan sédimentaire sur la partie supérieure de la plage est toujours positif (profils 8 à 14). Seuls les profils 16 à 18 enregistrent un abaissement de leurs profils de plage. Enfin, les profils 26 et 27 subissent une translation vers la côte, qui se traduit par un recul de la plage et une migration du cordon sableux vers le bas de plage.

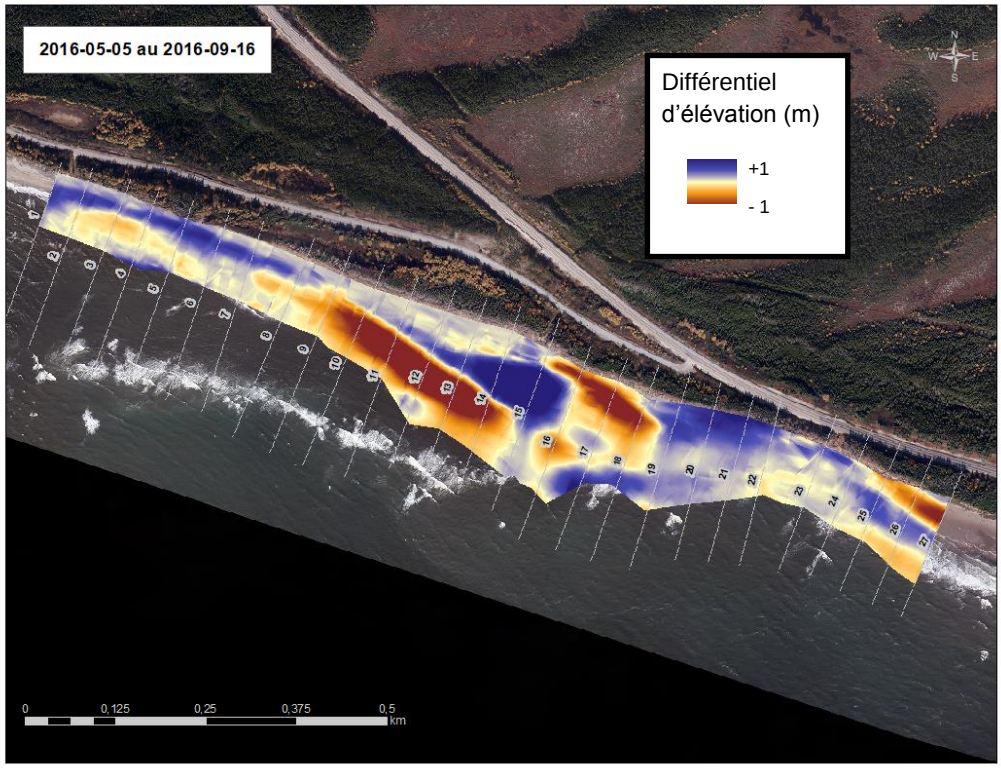


Figure 234. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 5 mai et le 16 septembre 2016

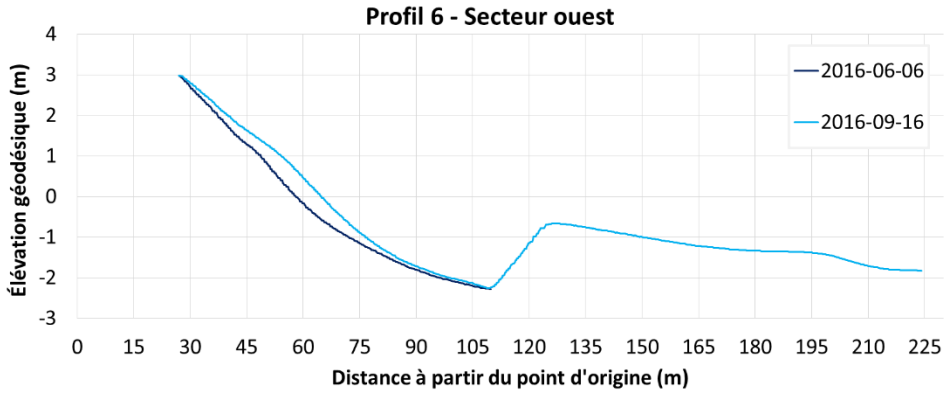


Figure 235. Évolution du profil 6 entre le 6 juin et le 16 septembre 2016

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

D'après les données des capteurs de pression pour la période du 4 juin au 16 septembre 2016, un événement de haut niveau d'eau et de fortes vagues s'est produit tout juste avant le relevé de septembre, ce qui est susceptible d'expliquer l'abaissement du bas estran au centre du site (figure 236). Outre cet événement, la période estivale est aussi marquée par de nombreux dépassements tant du seuil du 95^{e} percentile de la Hs que du NET. Il est possible que les hauts niveaux d'eau combinés à de fortes vagues soient responsables de l'érosion observée devant les profils 16-17-18 et 26-27.

Conditions de vagues au large (AWAC)

Par ailleurs, les données de l'AWAC indiquent que les vagues lors de cet événement étaient orientées de l'ouest au ouest-sud-est (245 à 255°), soit des vagues de classe 2, donc d'une direction qui favorise le déplacement sédimentaire. Les roses des vagues montrent d'ailleurs que 43 % des vagues de la période du 6 juin au 16 septembre provenaient de l'ouest (figure 238).

Par ailleurs, les roses des vagues de la période du 5 mai au 6 juin montrent que les vagues provenaient plutôt de directions multiples, voire en proportion quasi égale (15 à 20 %) entre le sud-est et l'ouest (figure 237).

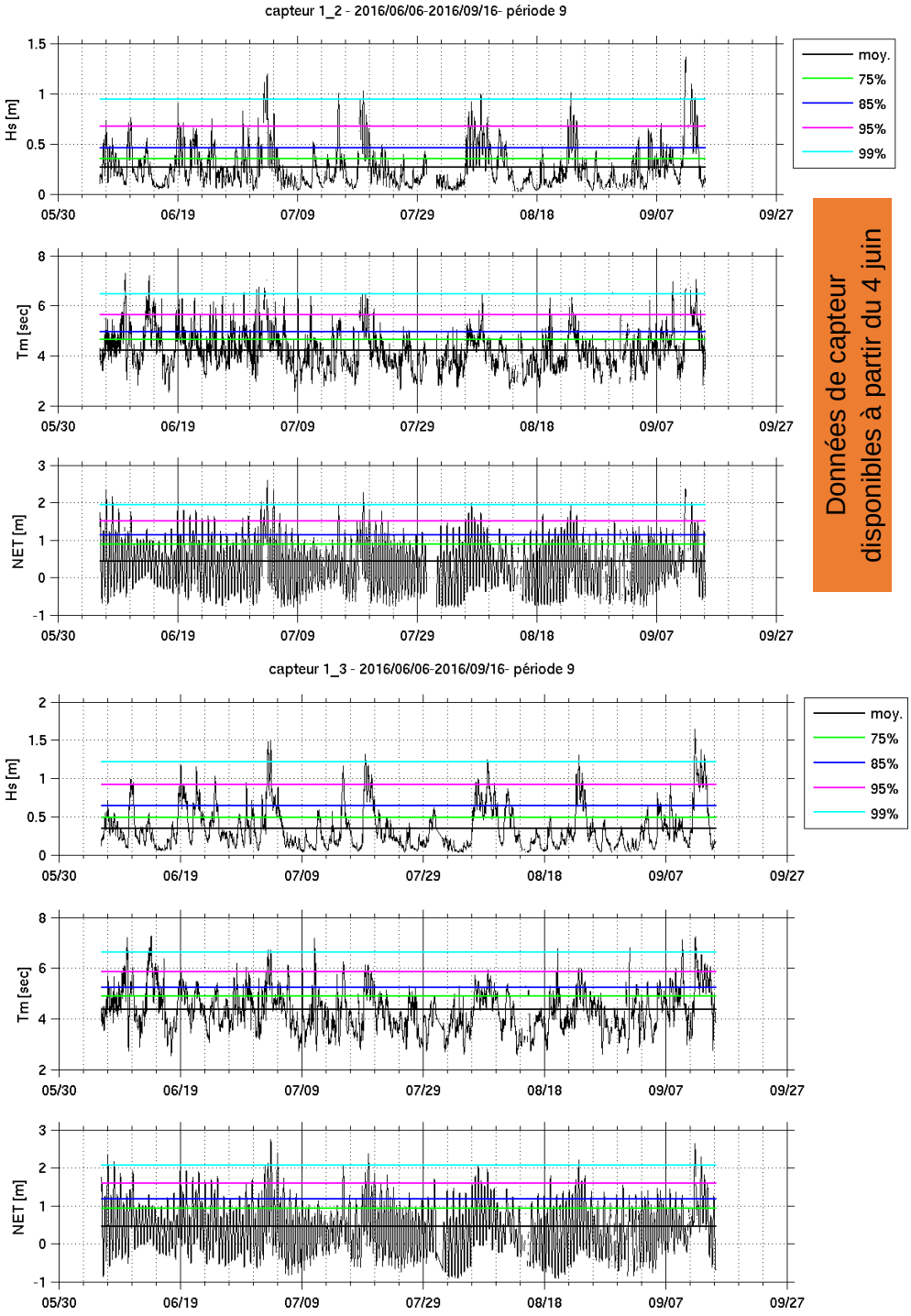
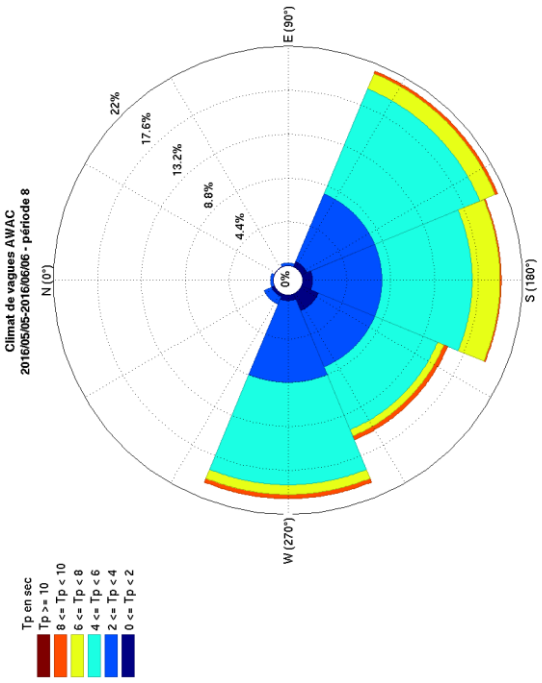
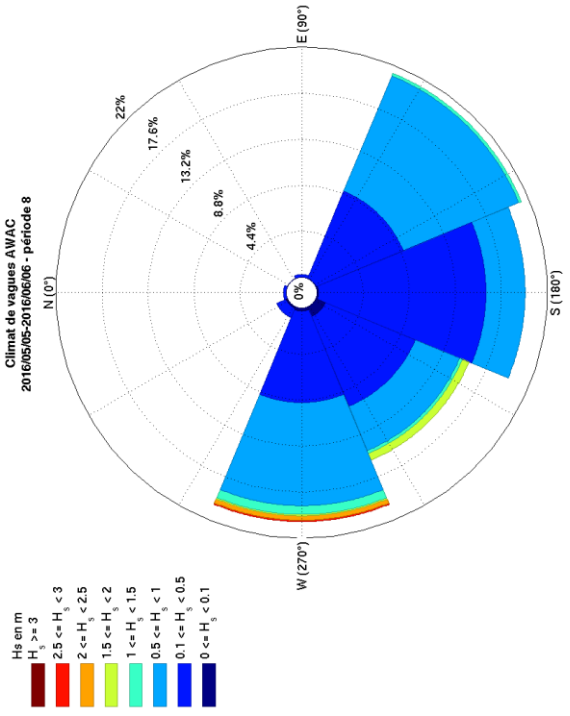


Figure 236. Climat de vagues des capteurs 1.2 et 1.3 – Secteur ouest – 4 juin au 16 septembre 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/05/05-2016/06/06 - période 8
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
4.4%
8.8%
13.2%
17.6%
22%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/05/05-2016/06/06 - période 8
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
4.4%
8.8%
13.2%
17.6%
22%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

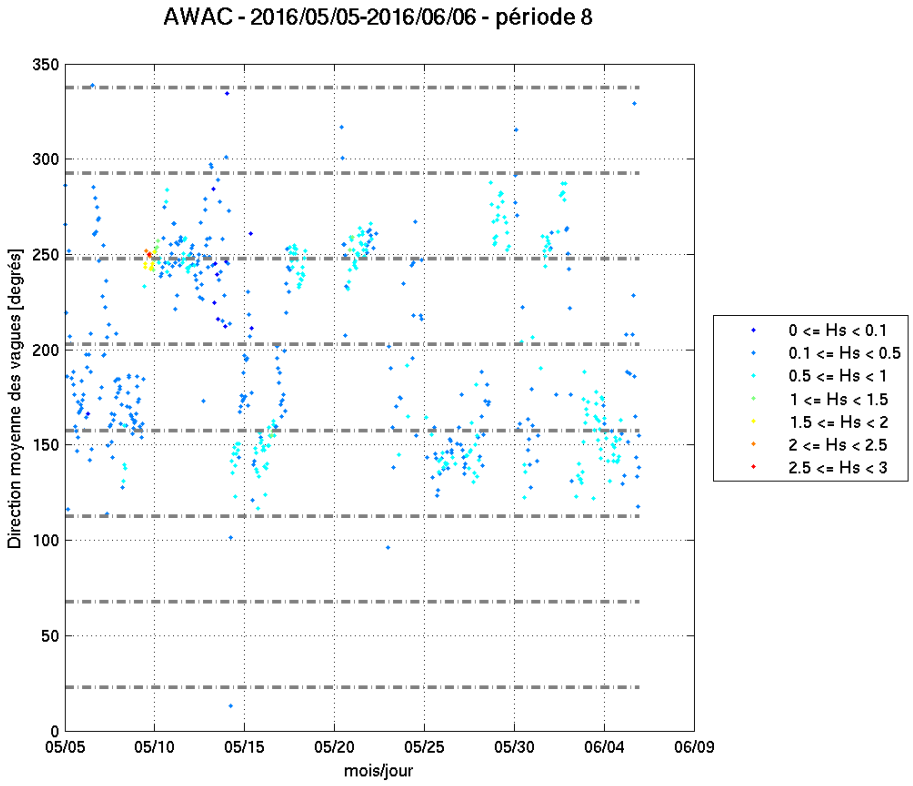
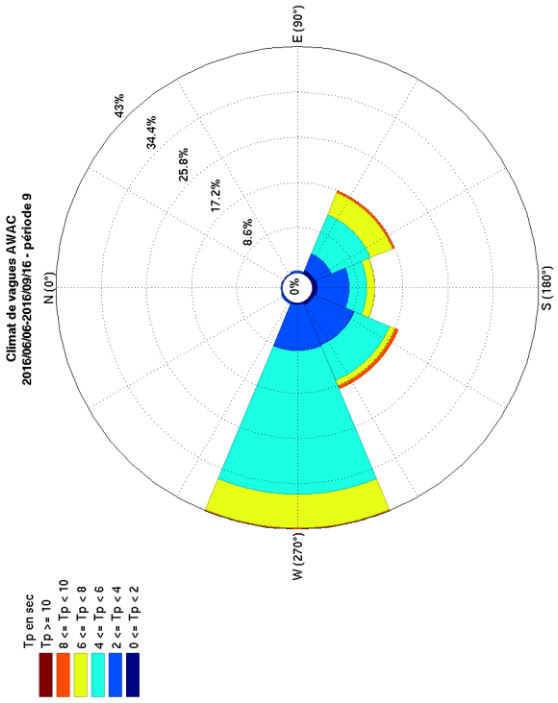
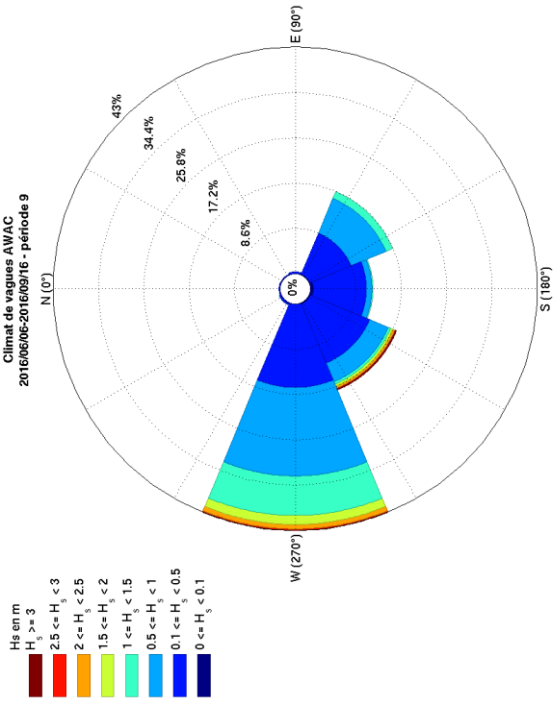


Figure 237. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 5 mai au 6 juin 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/06/06-2016/09/16 - période 9
E (90°)
S (180°)
W (270°)
N (0°)
43%
34.4%
25.8%
17.2%
8.6%
0%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/06/06-2016/09/16 - période 9
E (90°)
S (180°)
W (270°)
N (0°)
43%
34.4%
25.8%
17.2%
8.6%
0%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

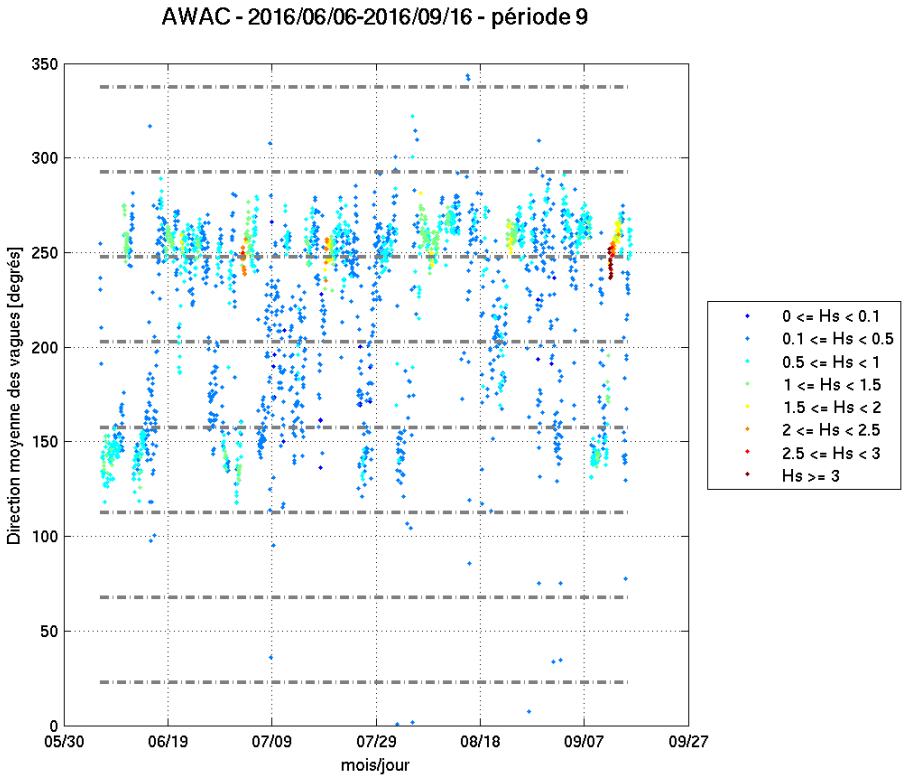


Figure 238. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 6 juin au 16 septembre 2016

4.5.1.6 *Période du 16 septembre au 12 décembre 2016*

Variations morphologiques

Pour la période automnale 2016, des levés topographiques ont été réalisés de manière mensuelle entre le 16 septembre et le 12 décembre 2016. Tout d'abord, on constate que la proximité des cordons sableux de bas estran de la plage influence grandement le profil morphologique de la plage et son bilan sédimentaire. Lors de cette période les cordons sableux prélittoraux se sont déplacés vers la côte. Dans certains cas, le cordon est venu s'accoler à la plage et nous observons dans ce cas une accrétion de la plage particulièrement entre le 13 octobre et le 14 novembre (profils 1 à 6). Entre le 16 septembre et le 13 octobre (figure 239), malgré le déplacement du cordon sableux prélittoral vers la partie inférieure du bas estran, il est encore trop loin pour alimenter la plage et on observe plutôt une érosion de la plage entre les profils 1 à 4 et pour le profil 7. Le creusement des parties médiane et inférieure de la plage s'accentuent et le profil prend une allure très concave. Cependant, vis-à-vis les profils 5 et 6, le cordon sableux avait déjà atteint la partie supérieure du bas estran le 13 octobre et on constate une accumulation sur la plage. La migration du cordon vers la plage se poursuit entre le 14 novembre et le 12 décembre et le rehaussement de la plage se poursuit et atteint maintenant le profil 7. Entre les profils 8 à 10, il n'y a pas de cordon de bas estran et on constate une érosion généralisée du profil particulièrement accentuée sur la partie supérieure de la plage et un transfert de sédiments vers le bas estran. Entre les profils 11 à 15, la face de la plage recule et il y a un abaissement du bas estran alors qu'il y a une accumulation sur le haut de plage. Entre les profils 16 et 22, il y a migration du cordon sableux de bas estran vers la plage qui se traduit par une accumulation sur la plage particulièrement entre octobre et novembre (figure 240). La plage prend même un profil convexe. On constate aussi l'apparition d'un nouveau cordon sableux dans la zone prélittorale peu profonde. On constate tout de même une forte érosion de la partie supérieure de la plage entre octobre et novembre avec un transfert de sédiments vers le bas de plage entre les profils 22 et 27.

La migration du cordon sableux vers la plage sur la partie ouest du secteur se poursuit entre le 14 novembre et le 12 décembre et le rehaussement de la plage se poursuit et atteint maintenant le profil 7. Pour cette même période, on constate une érosion du bas de plage et un transfert de sédiments vers la partie supérieure de la plage aux profils 8 à 9 et 12 à 14, alors que le bilan est positif sur l'ensemble de la plage pour les profils 10 et 11. Pour les profils 18 à 27, on constate un surcreusement de la plage avec, contrairement à la période précédente, une accumulation sur la partie supérieure de la plage (figure 241).

.

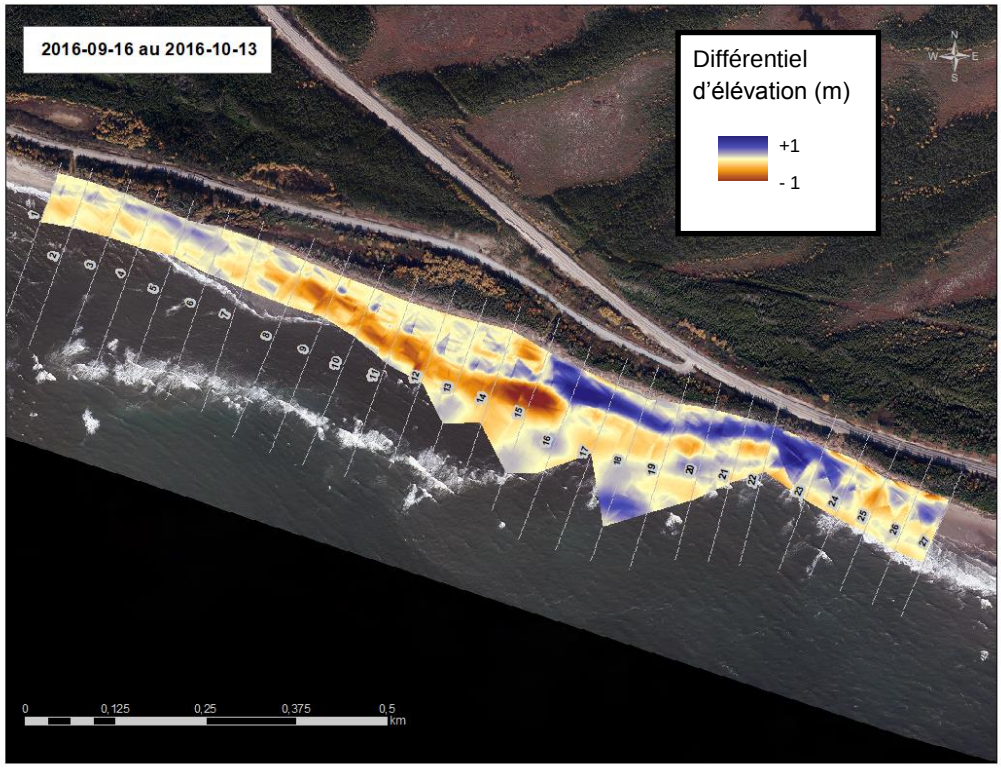


Figure 239. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 16 septembre et le 13 octobre 2016

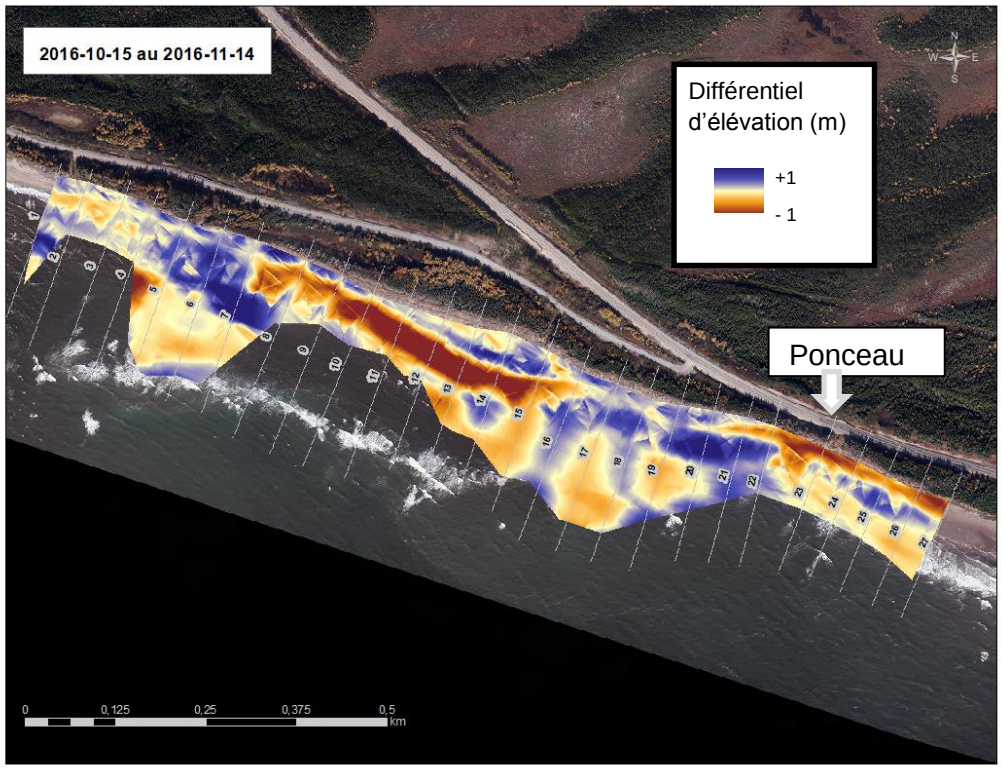


Figure 240. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 15 octobre et le 14 novembre 2016

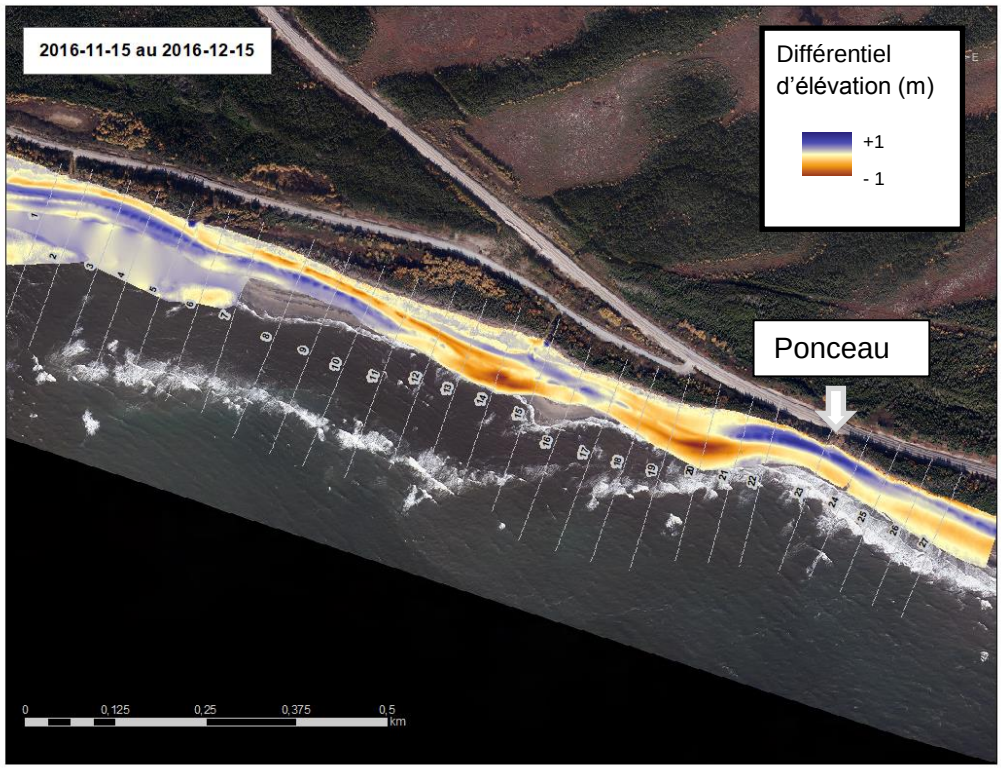


Figure 241. Différentiel d'élévation observé – Secteur ouest - entre le 15 novembre et le 15 décembre 2016

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Les données pour la période du 16 septembre au 13 octobre 2016 sont disponibles que pour le capteur 1.3. (figure 242). Néanmoins, on remarque que sur le bas estran (capteur 1.3) sept événements ont eu lieu durant lesquels la Hs a atteint le seuil du 95^{e} percentile pour cette période alors que le NET a atteint ce seuil 11 fois.

Les données pour la période du 15 octobre au 14 novembre 2016 sont disponibles que pour le capteur 1.3. (figure 243). Le 95^{e} percentile de la Hs pour le capteur durant cette période est de 1,27 m, soit une des périodes durant lesquelles les Hs sont les plus élevées. Ce seuil a été dépassé lors de trois événements, dont le dernier tout juste avant la date du relevé du 14 novembre 2016 alors que les Hs ont atteint 1,7 m. Des levés ont aussi été effectués entre les 4 et 14 novembre 2016 à l'endroit où les 27 profils ont été relevés dans le secteur ouest. Les données de capteurs pouvaient également

couvrir cette période. Ces derniers montrent qu'un événement potentiellement morphogène a eu cours entre les 11 et 14 novembre. Si on observe les effets morphologiques de cet événement (figure 244), on constate qu'un seul événement peut avoir des effets considérables sur la morphologie de la plage. Dans ce contexte, un espacement temporel mensuel ou plus pour attester des variations morphologiques en fonction du climat de vague s'avère parfois trop long.

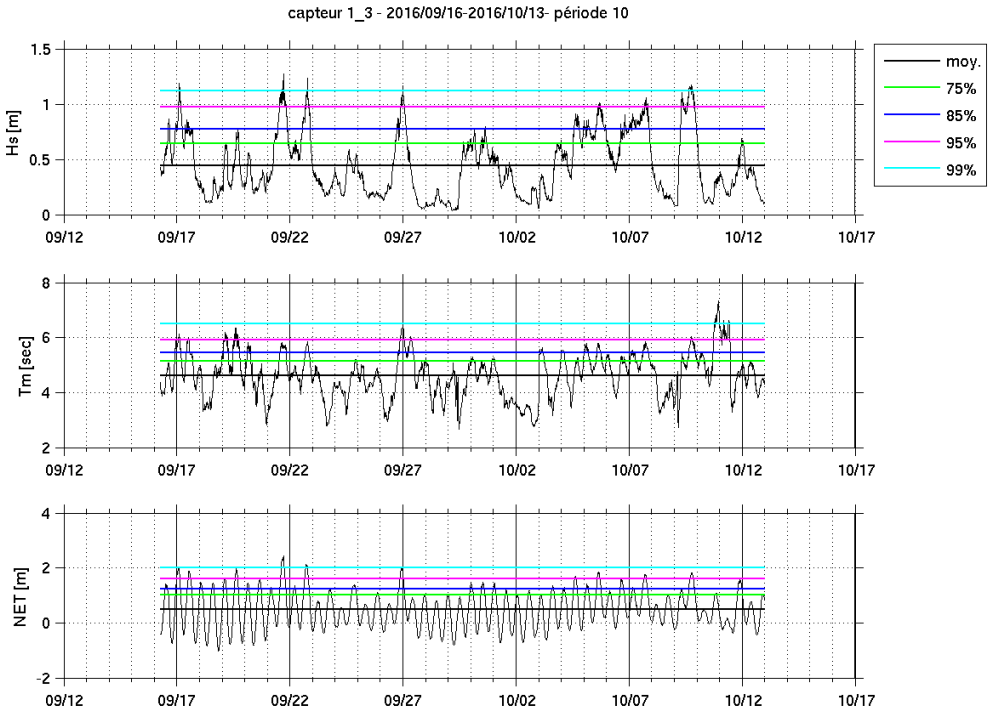


Figure 242. Climat de vagues du capteur 1.3 Secteur ouest –16 septembre au 13 octobre 2016

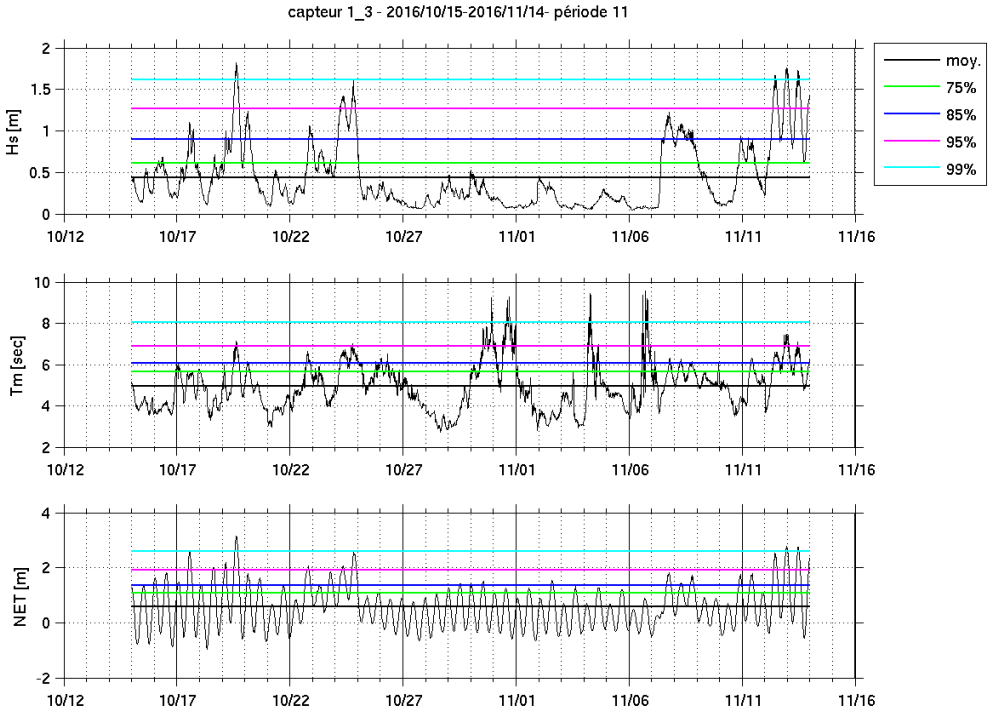


Figure 243. Climat de vagues du capteur 1.3 Secteur ouest – 15 octobre au 14 novembre 2016

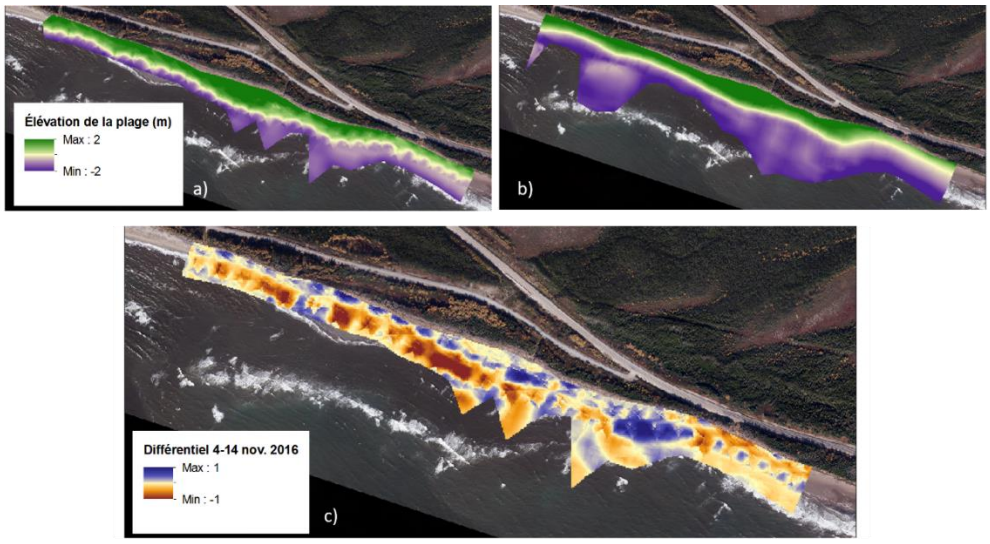


Figure 244. Évolution morphologique de la plage : a) élévation de la plage le 4 novembre 2016 ; b) élévation de la plage le 14 novembre 2016 ; c) différentiel d'élévation entre le 4 et le 14 novembre 2016

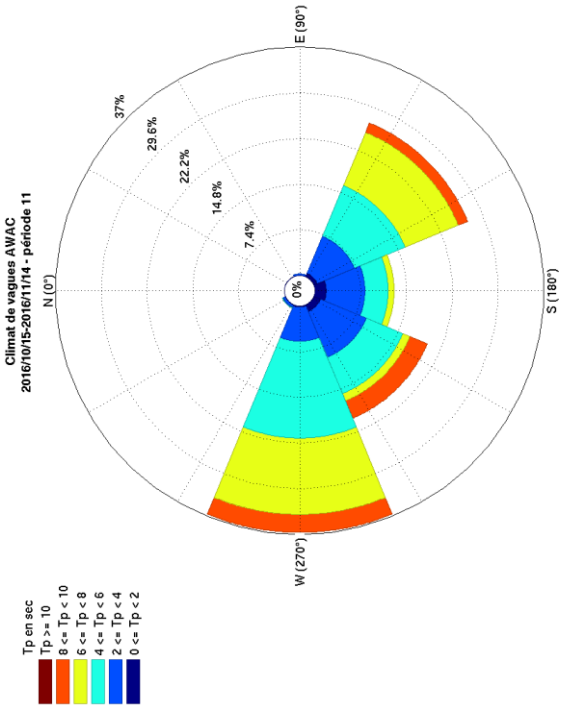
Conditions de vagues au large (AWAC)

En regard des vagues observées au large pour la période du 16 septembre au 13 octobre 2016, on constate que les vagues n'ont pas dépassé une Hs de 2 m et que leur direction était principalement (60 %) d'ouest (250 à 300°), soit de classe 1. Ces vagues seraient donc moins morphogènes ou favorables au déplacement sédimentaire d'importance.

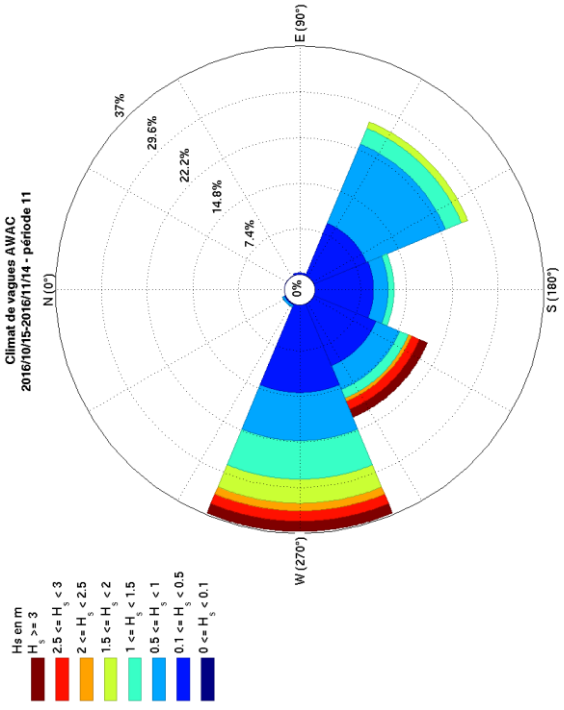
Au large, on observe trois événements de vagues dont les Hs sont supérieures à 2 m pour la période du 15 octobre au 14 novembre 2016 (figure 245). La direction de celles-ci varie de 225 à 275°, soit un spectre directionnel de classe 2, donc très oblique par rapport à la côte. Rappelons que les vagues les plus près d'un angle d'incidence de 45° sont potentiellement les plus morphogènes. La rose des vagues en fonction de la Hs montre d'ailleurs que des vagues de plus de 3 m venaient du cadran sud-ouest. De plus, on y observe que près de 25 % des vagues proviennent aussi du sud-est, dont des vagues entre 1,5 et 2 m de Hs, ce qui est plutôt rare pour cette direction.

Au large, pour la période du 14 novembre au 15 décembre 2016, on peut remarquer deux événements de vagues avec des vagues entre 1,5 et 2 m en provenance du sud-est vers les 17 novembre et 2-3 décembre (figure 246). On observe également un autre événement cette fois-ci en provenance de l'ouest-sud-ouest le 14-15 décembre. Bien que les vagues n'aient pas été de grande amplitude lors de ces trois événements, leur direction se situe tout de même dans les classes 2 et 4. Pour cette période, 35 % des vagues provenaient d'ailleurs de direction entre 130,5 et 175,5°, soit de classe 4. L'angle d'incidence des vagues de classe 4 étant oblique, le potentiel de transport sédimentaire s'en trouve accru. De plus, ces vagues sont en sens contraire de la dérive littorale habituelle.

b)


Climat de vagues AWAC
2016/10/15-2016/11/14 - période 11
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
7.4%
14.8%
22.2%
29.6%
37%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/10/15-2016/11/14 - période 11
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
7.4%
14.8%
22.2%
29.6%
37%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

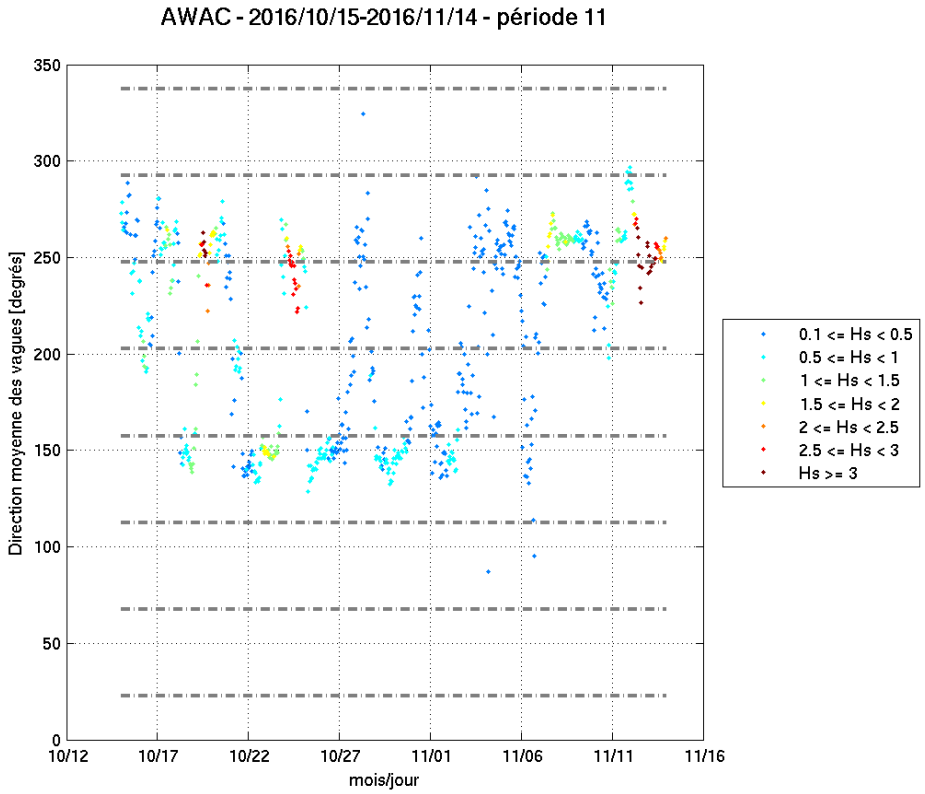
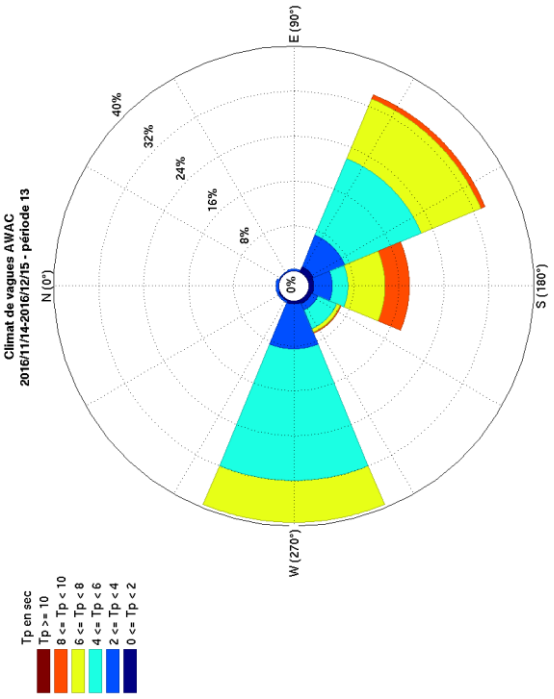
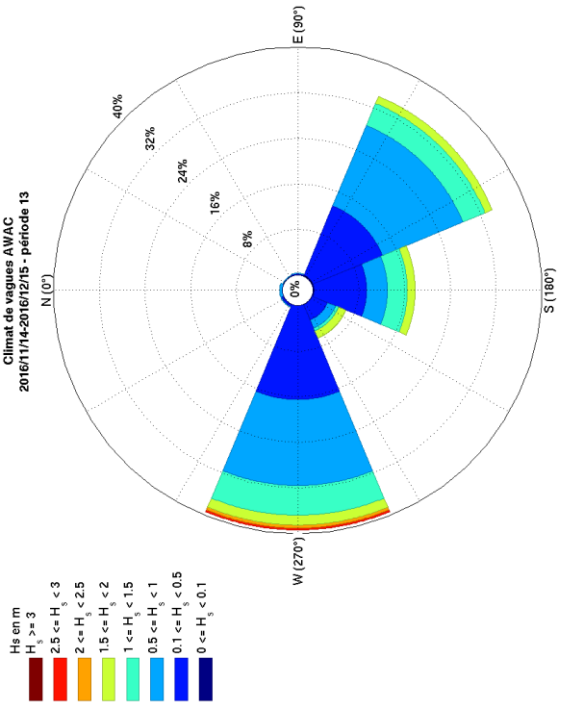


Figure 245. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 15 octobre au 14 novembre 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/11/14-2016/12/15 - période 13
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8%
16%
24%
32%
40%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/11/14-2016/12/15 - période 13
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8%
16%
24%
32%
40%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

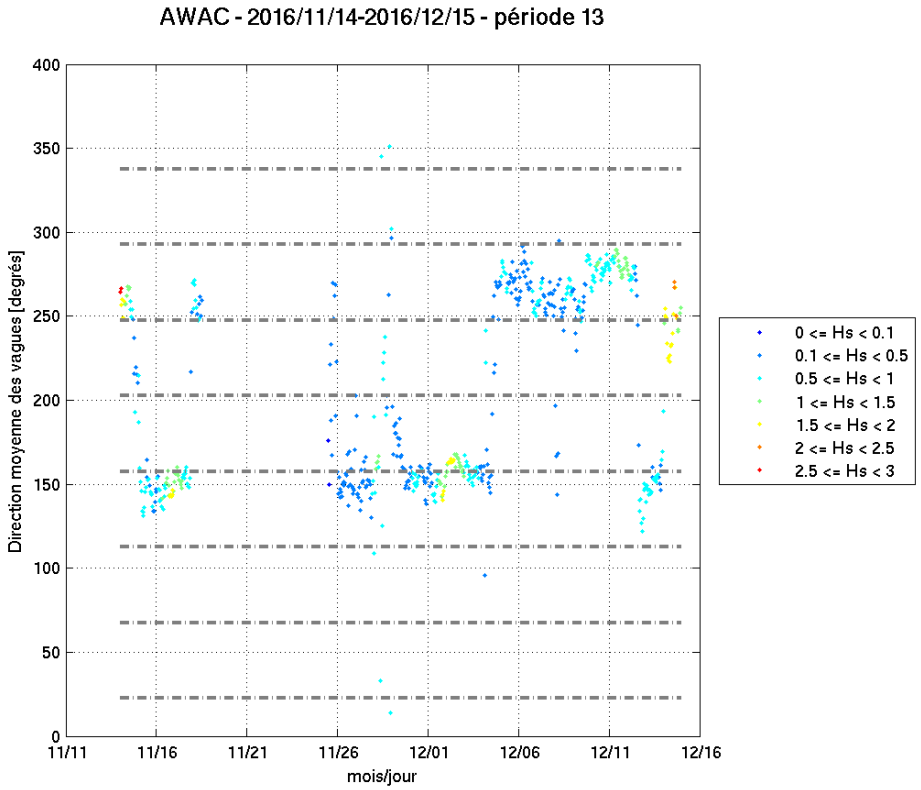


Figure 246. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 14 novembre au 15 décembre 2016

4.5.2 Secteur centre

4.5.2.1 *Période du 20 février au 16 mai 2015*

Variations morphologiques

La période du 20 février au 19 avril 2015 est caractérisée par la présence d'un pied de glace qui recouvre seulement le haut estran. La réflexion des vagues contre le front du pied de glace entraîne un surcreusement de la partie inférieure de la plage (figure 247). Avec le recul du front du pied de glace entre le 20 février et le 19 avril, la surface de la plage connait aussi un abaissement de son profil et les sédiments sont évacués vers le bas estran et vers l'aval de la dérive littorale entre les profils 1 à 9 (figure 248). Dans ce secteur, les courants de retour générés par la réflexion des vagues engendrent un déplacement du cordon de bas estran vers le large. Dans le secteur des profils 10 à 12 où le haut estran est plus étroit, on constate plutôt une forte accumulation sur la plage au front du pied de glace et un abaissement du bas estran et de la zone prélittorale peu profonde. Avec la fonte du pied de glace entre le 19 avril et le 16 mai 2015, on constate la formation d'une crête de plage. Le cordon sableux de bas estran est mieux définit à plusieurs endroits et une partie de ses sédiments se sont déplacés vers la côte venant combler partiellement le sillon entre la plage et le cordon (figure 249).

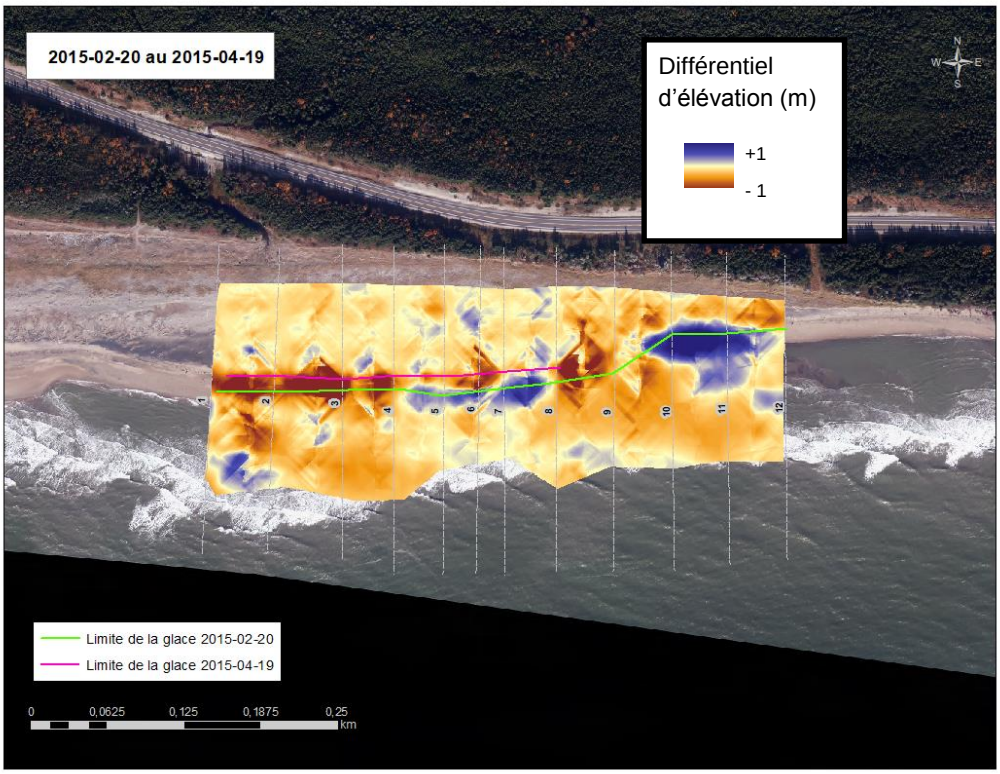


Figure 247. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - entre le 20 février et le 19 avril 2015

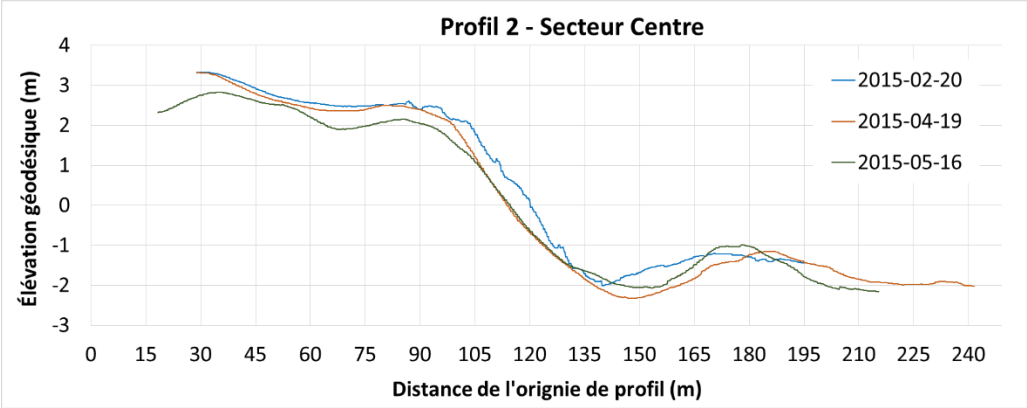


Figure 248. Évolution du profil 2 entre le 20 février et le 16 mai 2015

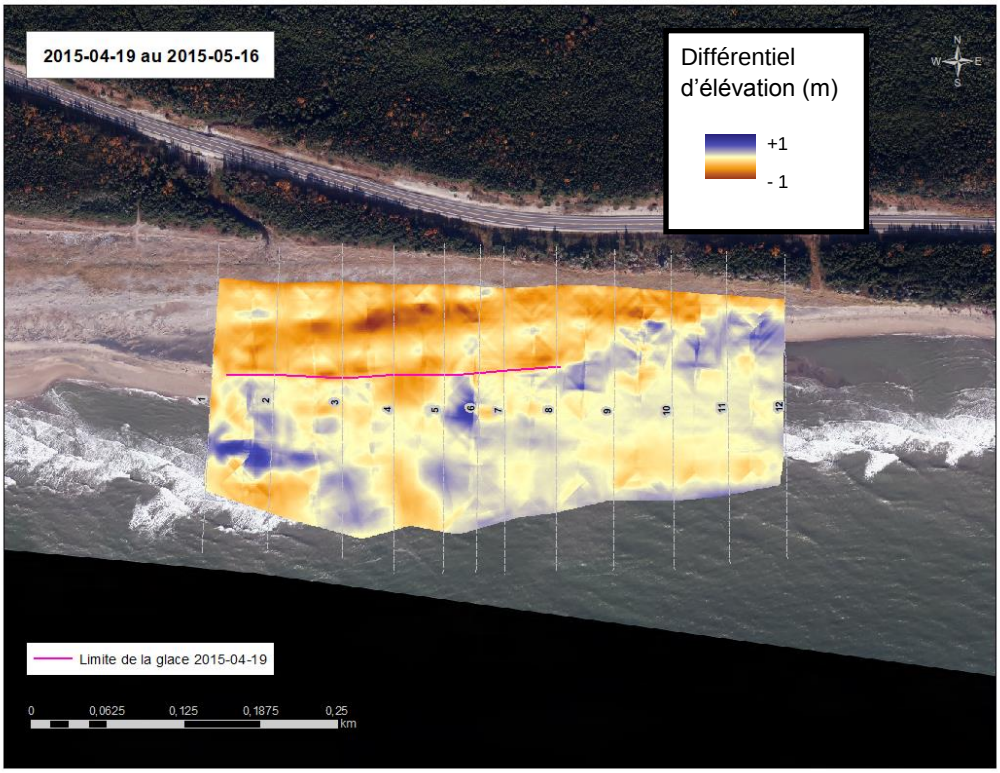


Figure 249. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - Entre le 19 avril et le 16 mai 2015

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Les capteurs de pression ne sont pas déployés durant les saisons hivernale et printanière.

Conditions de vagues au large (AWAC)

L'AWAC n'était pas encore déployé à cette période.

4.5.2.2 *Période du 16 mai au 29 septembre 2015*

Variations morphologiques

Entre la mi-mai et le début août, il y a un transfert de sédiments de la partie inférieure de la plage vers la partie supérieure de la plage entre les profils 1 à 6 (figure 250). On constate aussi une migration vers la côte du cordon sableux de bas estran. Entre les profils 7 et 11, non seulement le cordon de bas estran

migre vers la côte, mais il s'engraisse aussi et on constate que l'ensemble de la plage connait un bilan plutôt positif. Le transfert de sédiments en direction de la côte se poursuit entre le début août et le 29 septembre 2015 (figure 251). La face de la plage recule entre les profils 1 à 6 alors qu'entre les profils 7 et 12, la plage s'engraisse alimentée par les sédiments du cordon sableux de bas estran.

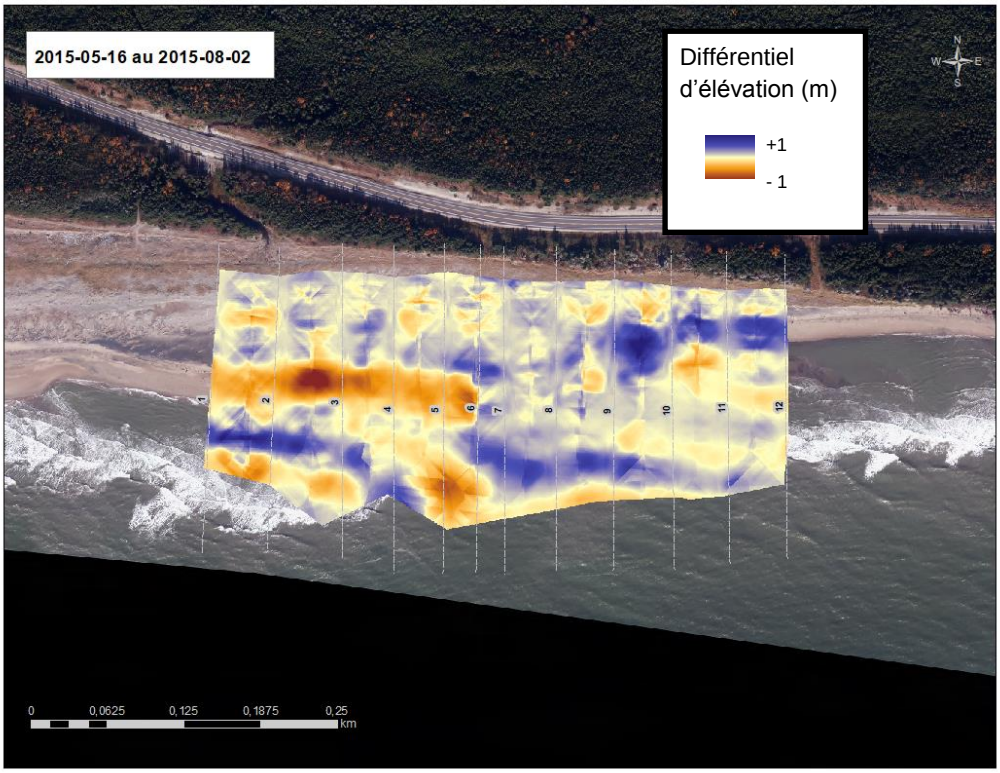


Figure 250. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre – entre le 16 mai et le 2 août 2015

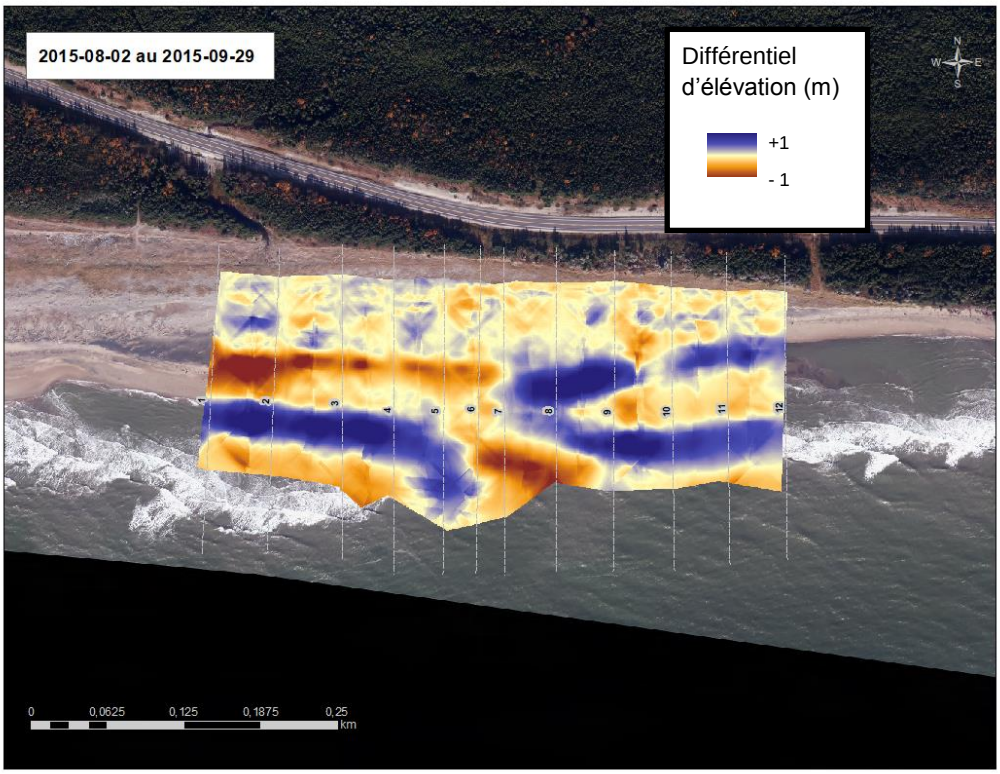


Figure 251. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre – entre le 2 août et le 29 septembre 2015

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Au début de l'été 2015, aucun appareil de mesure hydrodynamique n'était installé. Les capteurs de pression ont été déployés à partir du 30 juillet, ce qui donne seulement trois jours de données exploitables pour cette période. Par conséquent, le contexte hydrodynamique n'est pas analysé pour cette période.

Pour la période du 2 août au 29 septembre 2015, on constate sur le capteur 2.2 à la flexure que plusieurs événements de vagues ont atteint des Hs et un NET supérieurs au 95^{e} percentile de cette période, et ce, particulièrement dans les derniers jours avant le relevé (figure 252). Le climat de vagues sur le bas estran ne peut être caractérisé pour cette période en raison de la perte de l'ADV en 2015.

Conditions de vagues au large (AWAC)

L'AWAC n'était pas encore déployé à cette période.

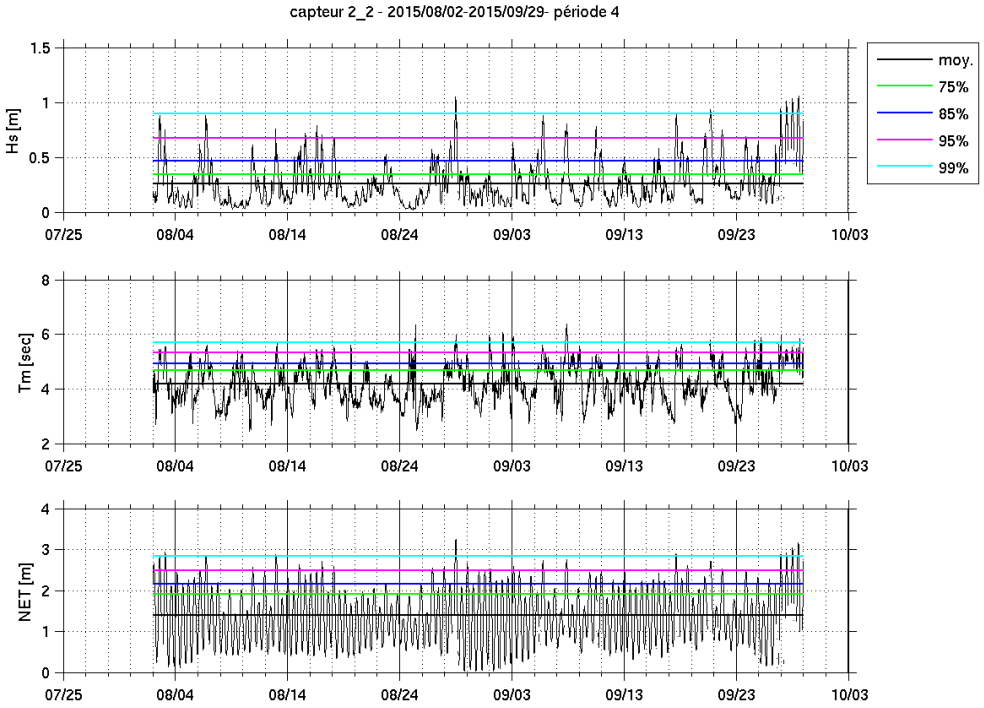


Figure 252. Climat de vagues du capteur 2.2 – Secteur centre – 2 août au 29 septembre 2015

4.5.2.3 *Période du 29 septembre au 26 novembre 2015*

Au cours de la période du 29 septembre au 26 novembre 2015, on constate que la belle crête convexe formée sur la partie supérieure de la plage au cours de l'été s'est érodée donnant un profil concave à la plage. Seuls les profils de plage 10 à 12 enregistrent une accumulation en raison du transfert latéral des sédiments érodés à la plage des profils amont ainsi que l'érosion du bas estran et un transfert vers la côte. La face abrupte de la plage des profils 3 à 9 ont connu un fort recul avec dans certains cas un transfert de sédiments vers le haut de plage (profils 6 à 8). Le cordon sableux de bas estran a poursuivi sa migration vers la côte lors de cette période (figure 253).

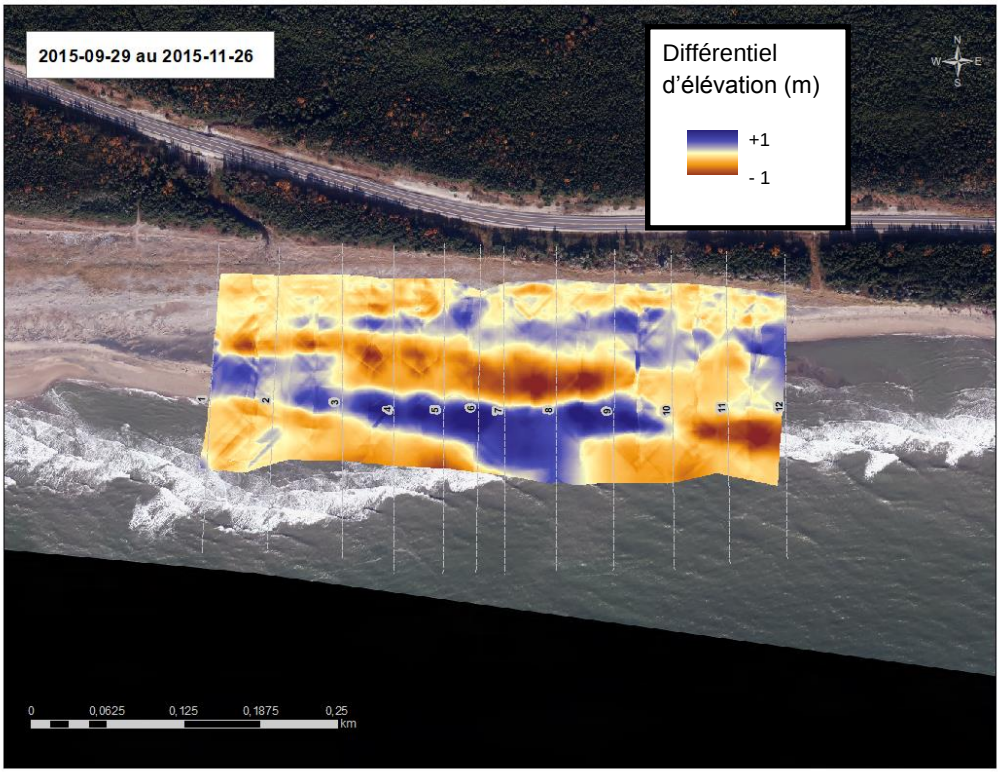


Figure 253. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - entre le 29 septembre et le 26 novembre 2015

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Il faut noter ici que le capteur 2.4 a été déployé seulement le 18 octobre 2015 après la perte de l'ADV à cette position. Les dates sur les graphiques suivants présentent donc un décalage.

Sur les capteurs 2.2 et 2.4, on peut observer de hauts niveaux d'eau entre le 25 octobre et le 1er novembre ainsi qu'aux alentours du 9 novembre (figure 254). Dans les deux cas, les vagues provenaient de l'ouest-sud-ouest (230 à 255°). Un autre événement générant de hauts niveaux d'eau est survenu autour du 15 novembre. Lors de ce dernier, on remarque que la direction des vagues au large (AWAC) était du sud-est. Fait intéressant, l'élévation des Hs atteint le 95e percentile seulement au capteur 2.2 durant cet événement.

Conditions de vagues au large (AWAC)

L'AWAC a été déployé le 16 octobre. Les enregistrements ne couvrent donc pas la totalité de la période du 29 septembre au 26 novembre 2015. Néanmoins, les roses des vagues montrent que 43 % des vagues provenaient de l'ouest et plus de 25 % du sud. Les vagues du sud-est représentent une très faible proportion (<8 %), mais incluent justement les vagues entre 1,5 et 2 m mentionnées plus haut pour l'événement du 15 novembre (figure 255).

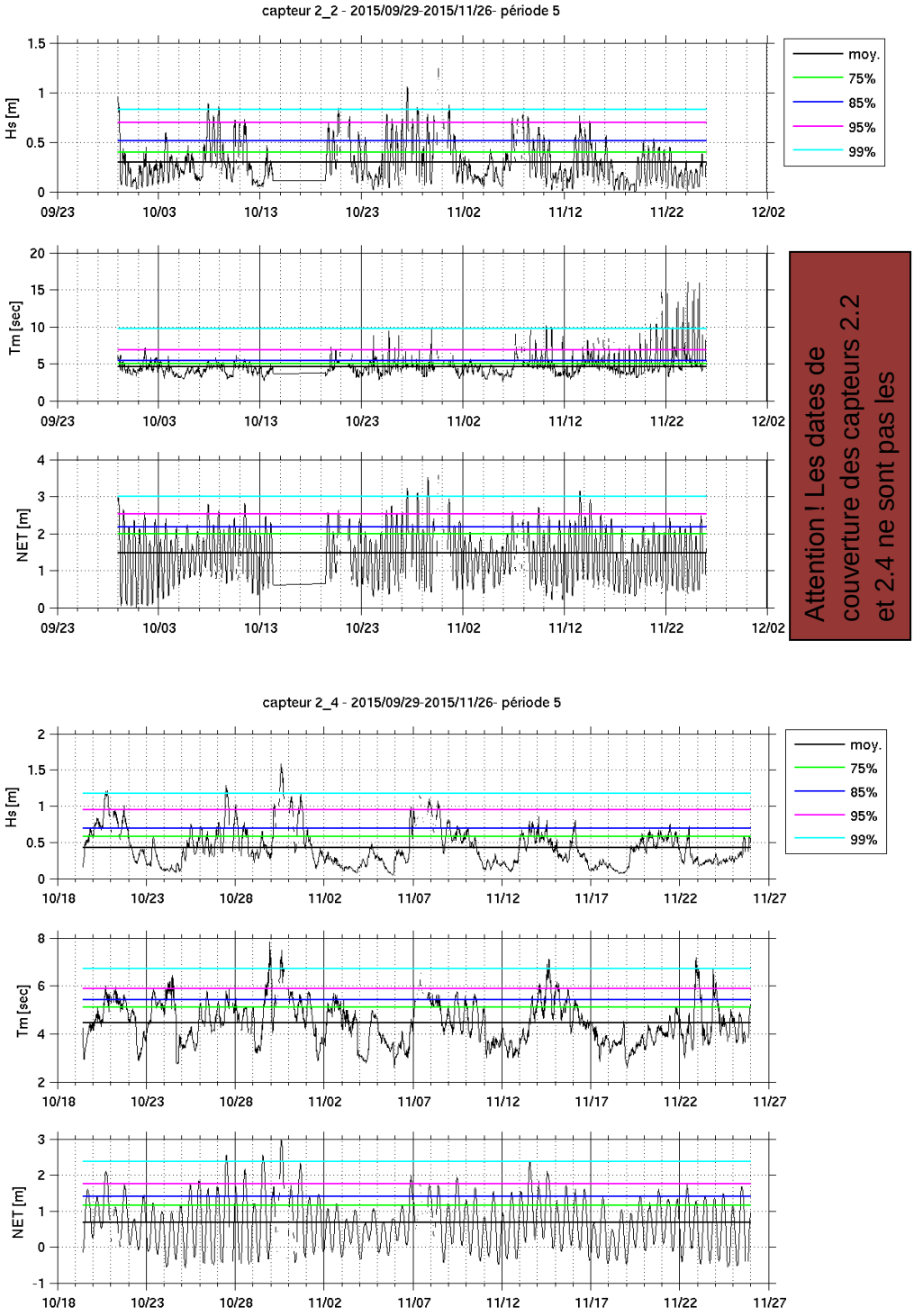
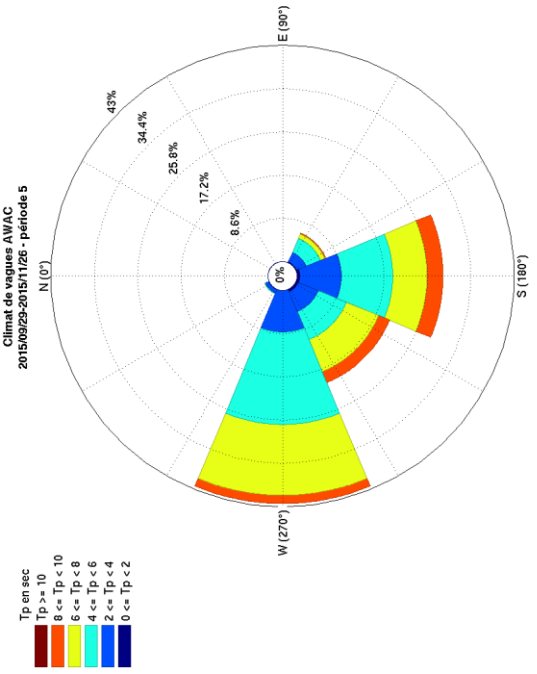
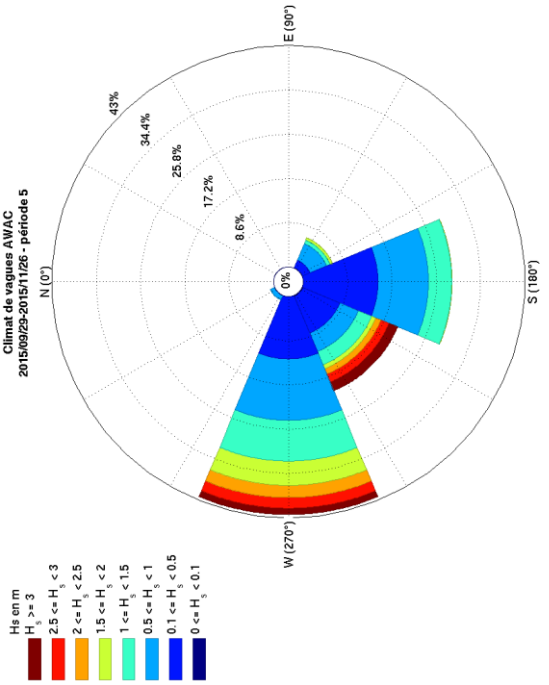


Figure 254. Climat de vagues des capteurs 2.2 et 2.4 – Secteur centre – 29 septembre au 26 novembre 2015

b)


Climat de vagues AWAC
2015/09/29-2015/11/26 - période 5
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2015/09/29-2015/11/26 - période 5
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

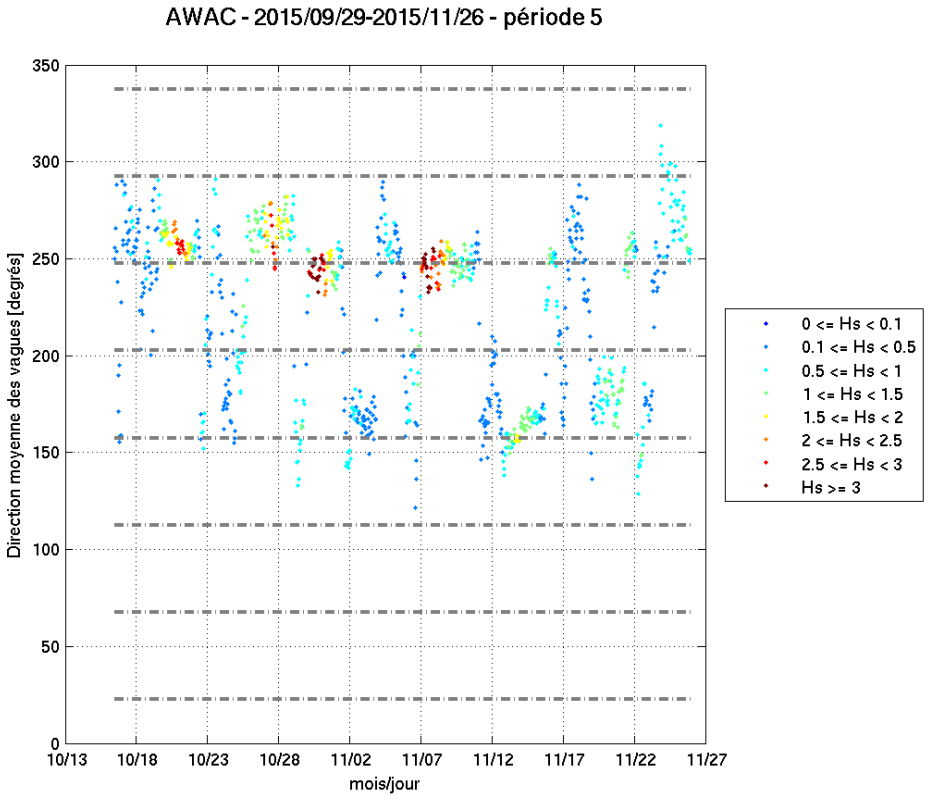


Figure 255. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 29 septembre au 26 novembre 2015

4.5.2.4 *Période du 26 novembre 2015 au 6 juin 2016*

Variations morphologiques

Entre le 26 novembre et le 11 février, on observe sans surprise une surélévation sur le haut estran lié à la formation du pied de glace (figure 256). On remarque également au front du pied de glace un abaissement du bas estran et la disparition du cordon sableux qui était présent le 26 novembre 2015. À plusieurs endroits, on constate un surcreusement sur la partie inférieure de la plage et du bas estran. Les sédiments semblent en partie s'être déplacés vers le large où il y a par endroit la formation du cordon sableux prélittoral dans la zone peu profonde (figure 257). On constate qu'avec le recul du pied de glace au printemps, il y a eu un surcreusement de la partie inférieure de la plage et du bas estran donnant une allure fortement concave à la plage (figure 258 et figure 259). Toutefois, il y a eu entre le 26 novembre 2015 et le 7 mai 2016 une forte accrétion de la face abrupte de la plage. En aval, vis-à-vis les profils 9 à 12, un cordon vient même s'accoler à la plage pour former une importante crête de plage (figure 260). L'analyse des images des caméras Reconyx nous permet de déterminer que la formation de cette crête de plage a eu lieu en avril avec la fonte du pied de glace (figure 261). Dans l'ensemble, le bilan sédimentaire est demeuré plutôt stable entre le 7 mai et le 6 juin 2016 avec un léger recul de la face de la plage (figure 262). Les plus importants changements morphologiques ont eu lieu dans la section aval (profils 8 à 11) où l'érosion de la plage et du bas estran a été plus importante. Le transit sédimentaire et la migration du cordon sableux vers l'est ont entraîné cependant une accrétion de la plage et du bas estran vis-à-vis le profil 12.

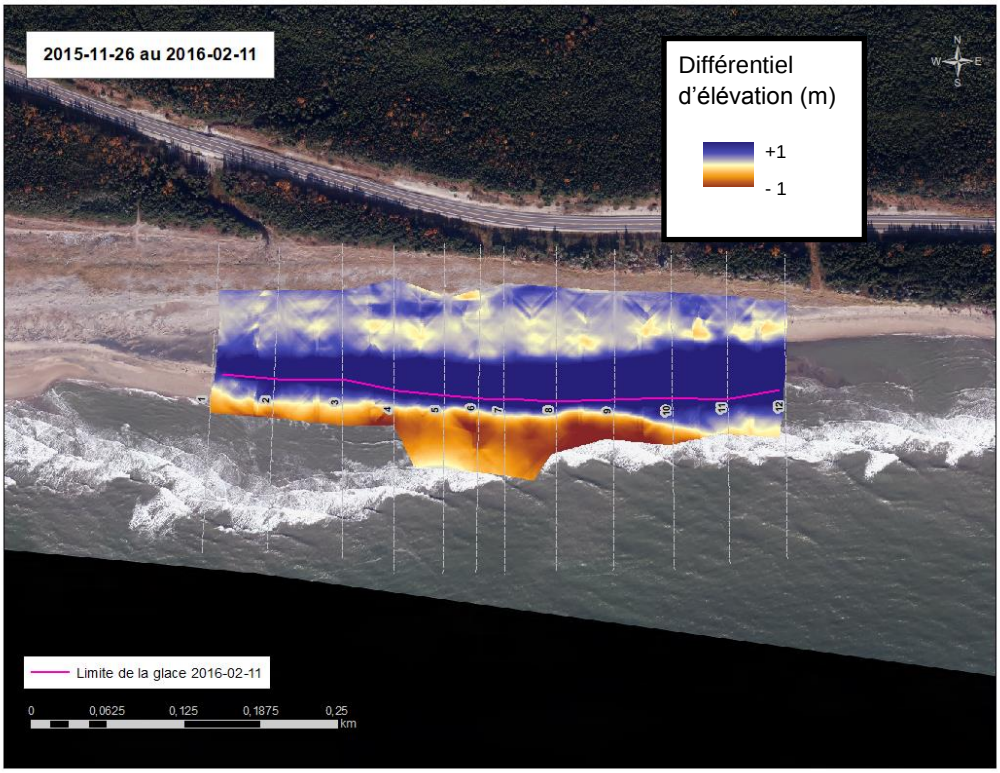


Figure 256. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - entre le 26 novembre 2015 et le 11 février 2016

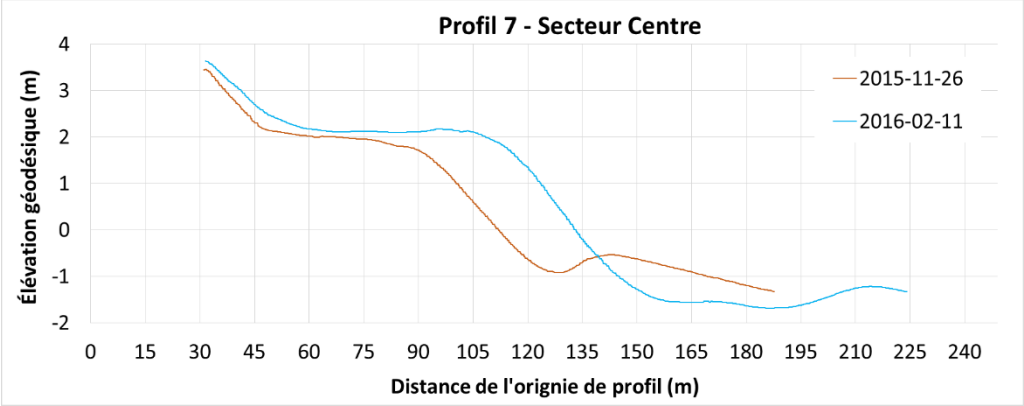


Figure 257. Évolution du profil 7 entre le 26 novembre 2015 et le 11 février 2016

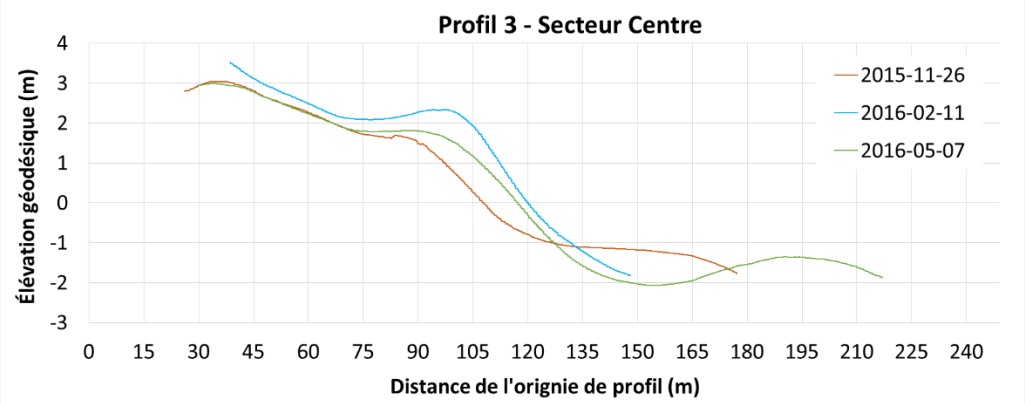


Figure 258. Évolution du profil 3 entre le 26 novembre 2015 et le 7 mai 2016

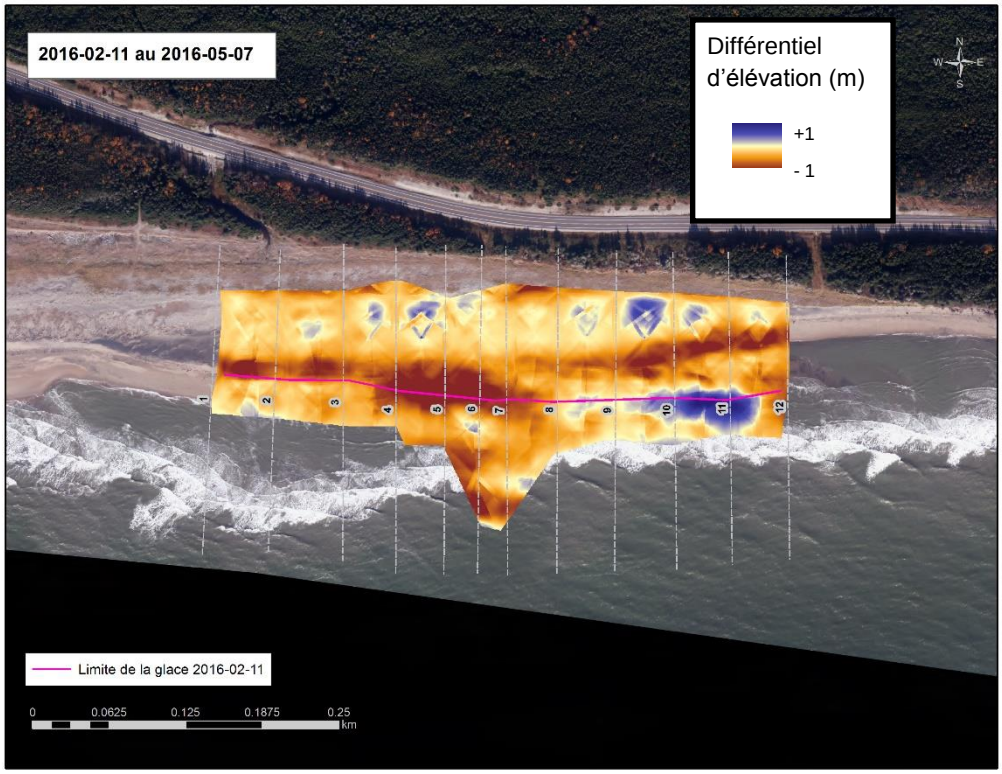


Figure 259. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - entre le 11 février et le 7 mai 2016

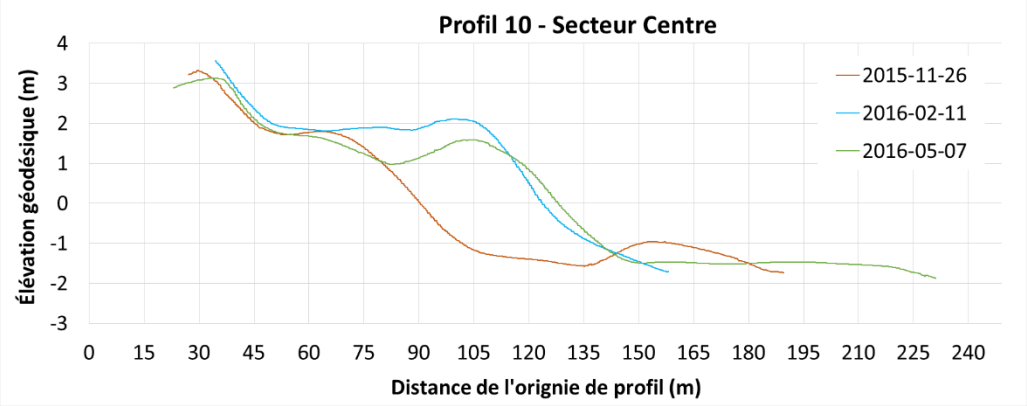


Figure 260. Évolution du profil 10 entre le 26 novembre 2015 et le 7 mai 2016

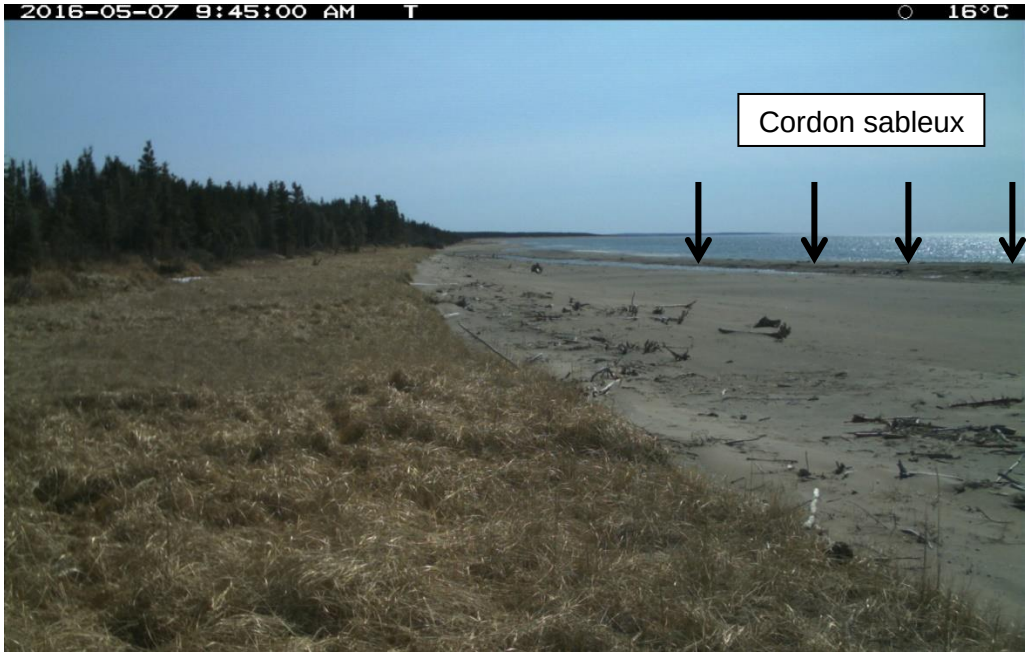


Figure 261. Formation d'un cordon sableux en bordure de la plage

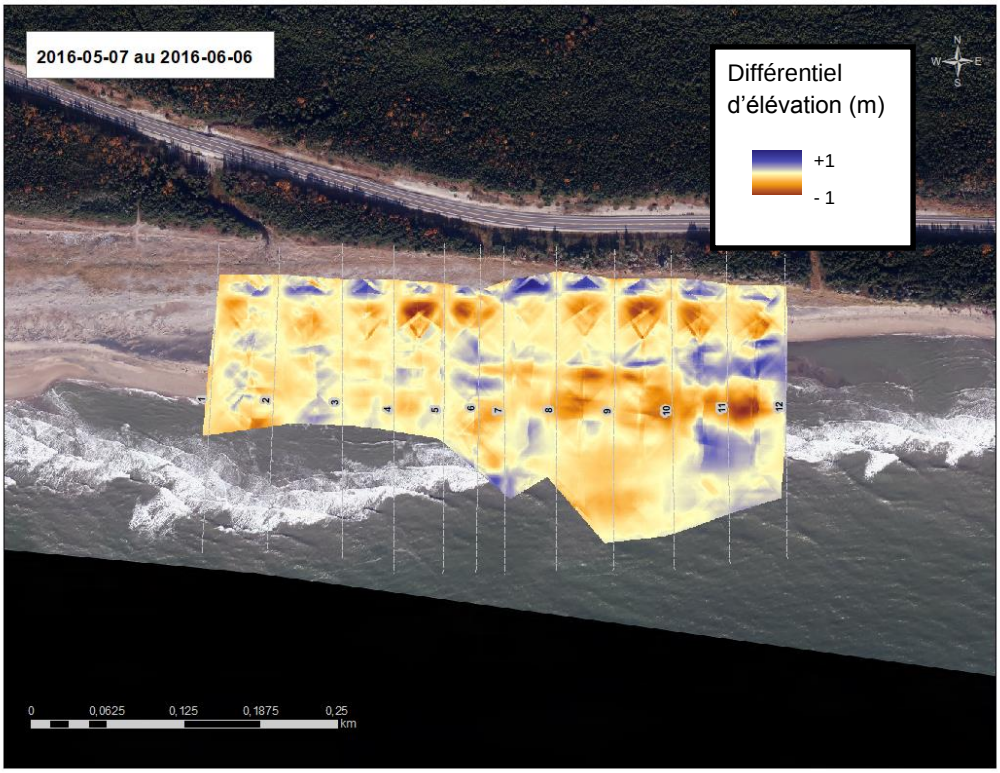


Figure 262. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - entre le 7 mai et le 6 juin 2016

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Les enregistrements du capteur 2.2 du 26 novembre 2015 au 17 janvier 2016 indiquent que de fortes vagues et de hauts niveaux d'eau sont survenus entre le 24 et 28 décembre 2015, entre le 5 et le 7 janvier de même qu'entre le 11 et le 13 janvier 2016 (figure 263).

Conditions de vagues au large (AWAC)

Au large du 26 novembre 2015 au 11 février 2016, la distribution temporelle des vagues montre qu'elles étaient régulièrement supérieures à 2 m et majoritairement (50 %) en provenance de l'ouest (figure 264). La rose des vagues indique aussi de fortes vagues de l'ouest-sud-ouest.

Du 11 février au 7 mai 2016, les vagues proviennent principalement de l'ouest (50 %). Les vagues supérieures à 2 m se situent aussi principalement dans le

cadran ouest (250 à 275°), mais aussi en provenance des directions sud-ouest et sud (figure 265).

Du 7 mai au 5 juin 2017, les enregistrements de l'AWAC indiquent que les vagues sont généralement de faible amplitude pour cette période et proviennent en proportion presque égale de toutes les directions du spectre d'exposition de la côte (figure 266).

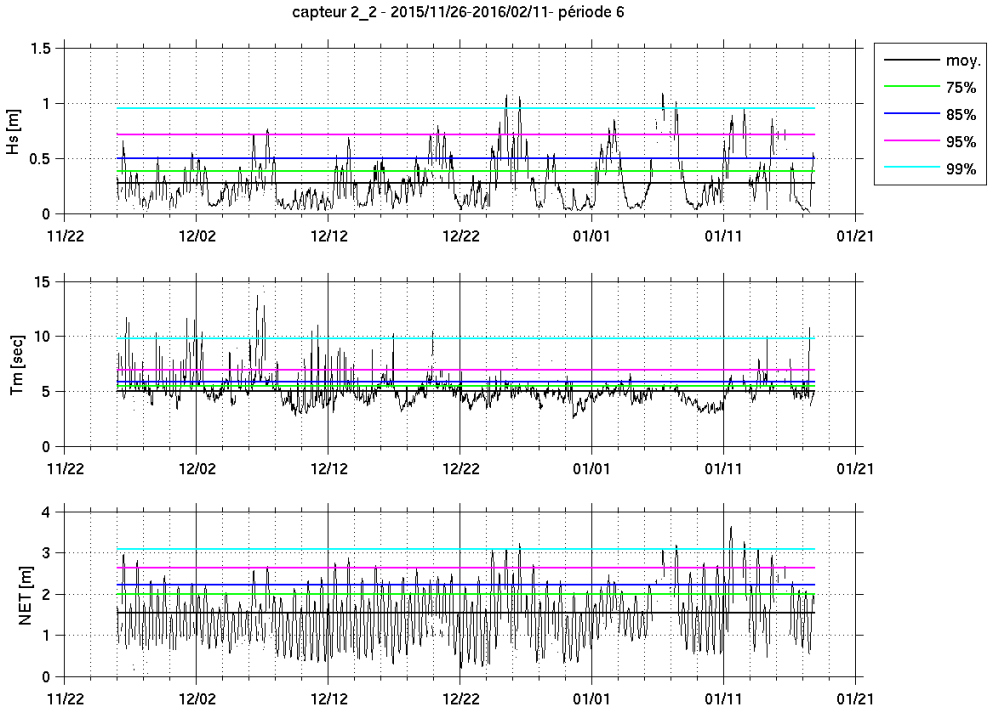
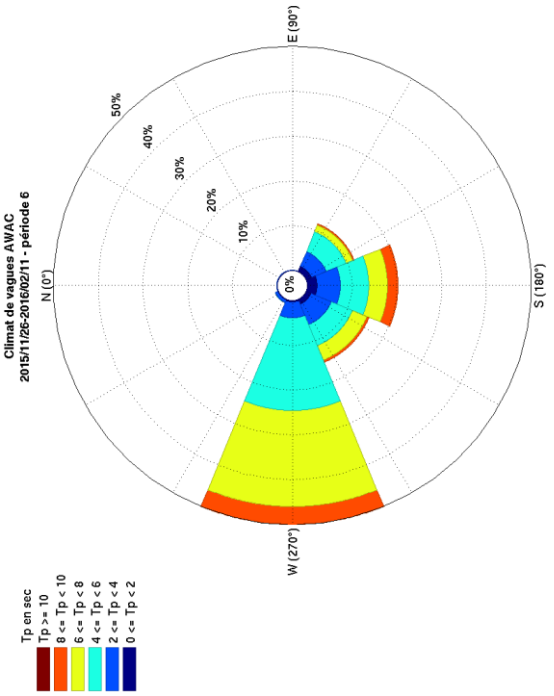
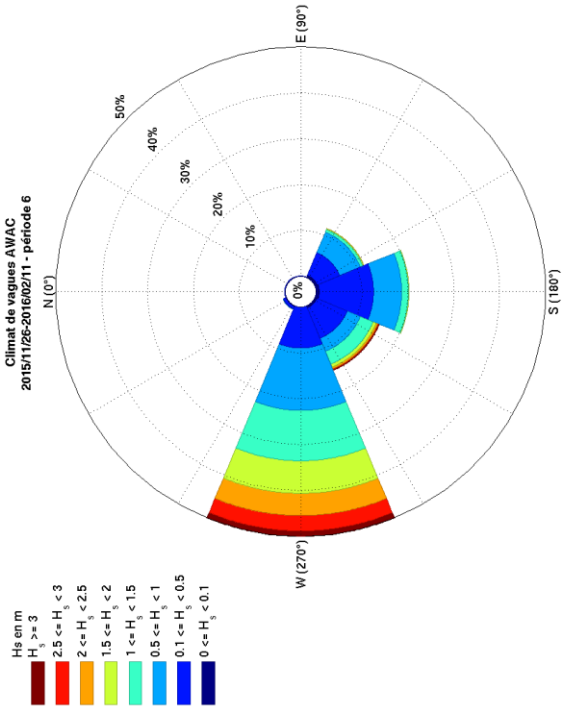


Figure 263. Climat de vagues du capteur 2.2 – Secteur centre – 26 novembre 2015 au 11 février 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2015/11/26-2016/02/11 - période 6
E (90°)
S (180°)
W (270°)
N (0°)
10%
20%
30%
40%
50%
0%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2015/11/26-2016/02/11 - période 6
E (90°)
S (180°)
W (270°)
N (0°)
10%
20%
30%
40%
50%
0%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

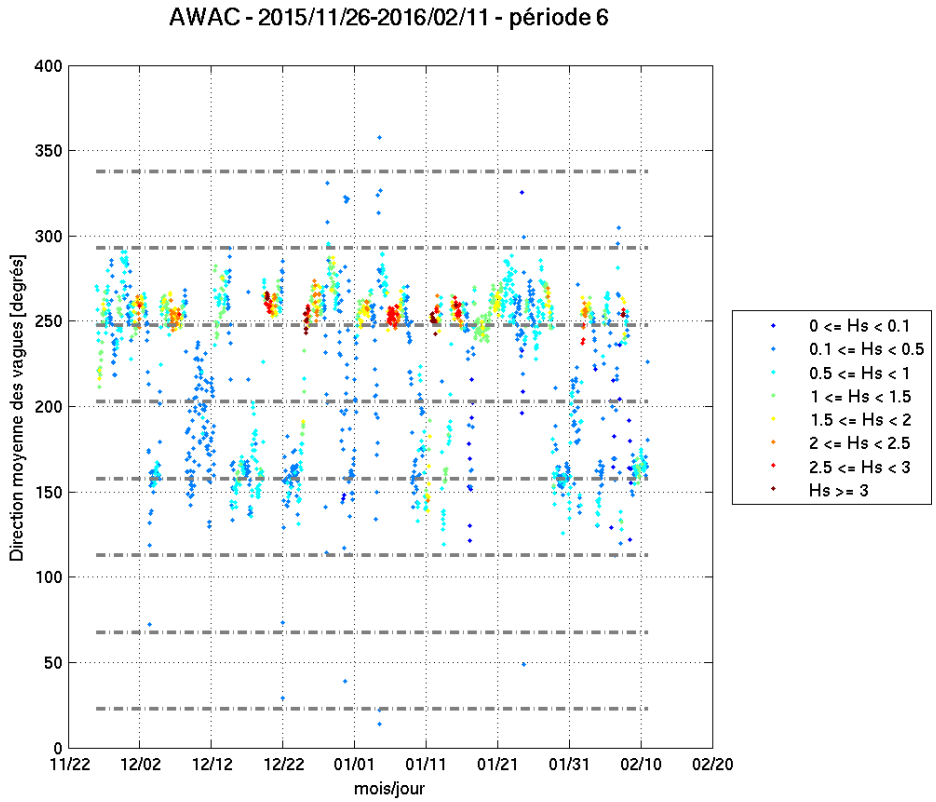
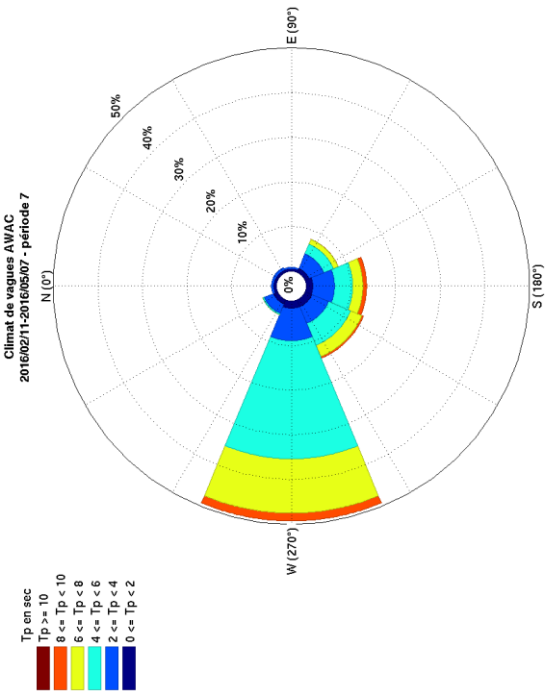
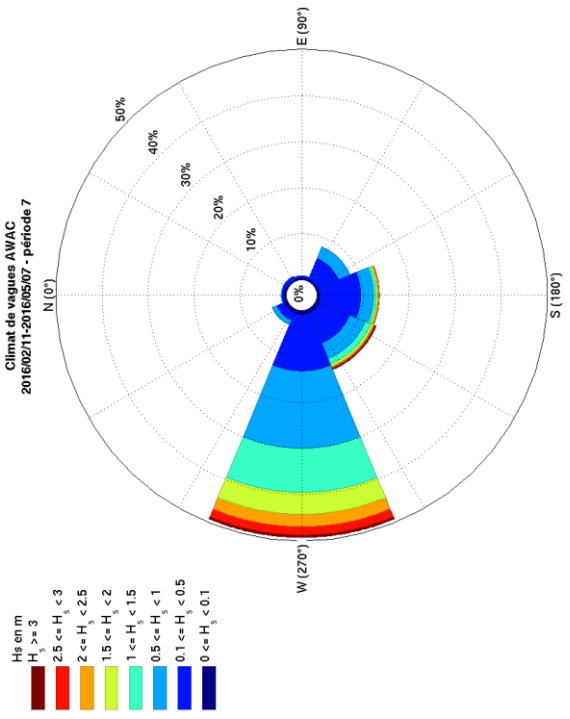


Figure 264. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 26 novembre 2015 au 11 février 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/02/11-2016/05/07 - période 7
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
10%
20%
30%
40%
50%
0%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/02/11-2016/05/07 - période 7
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
10%
20%
30%
40%
50%
0%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

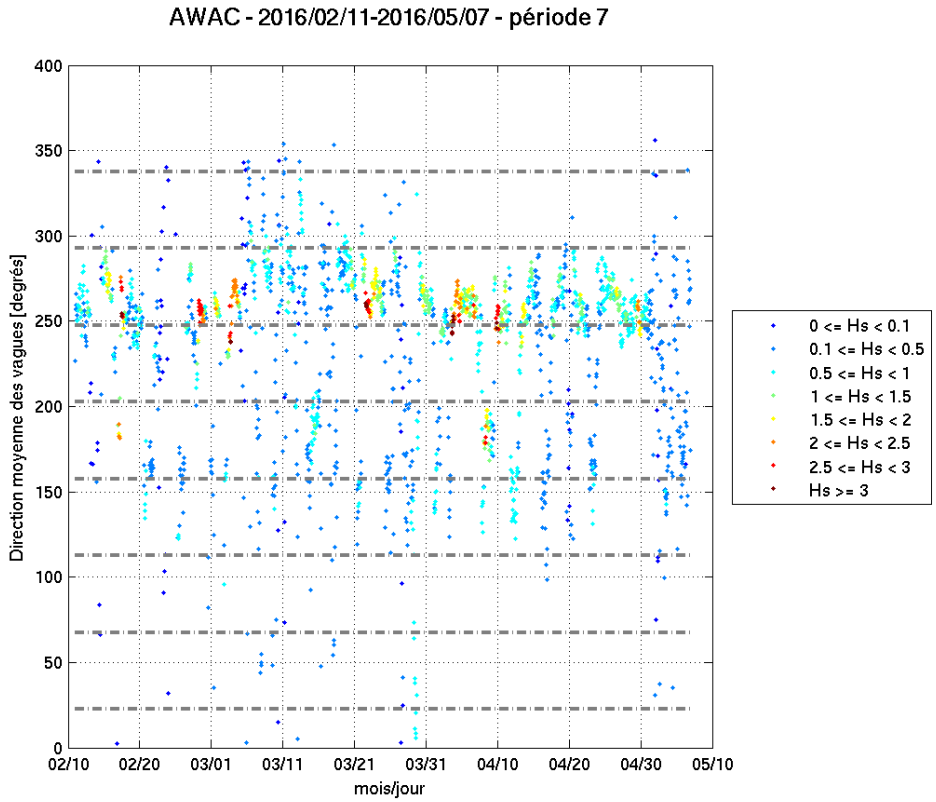
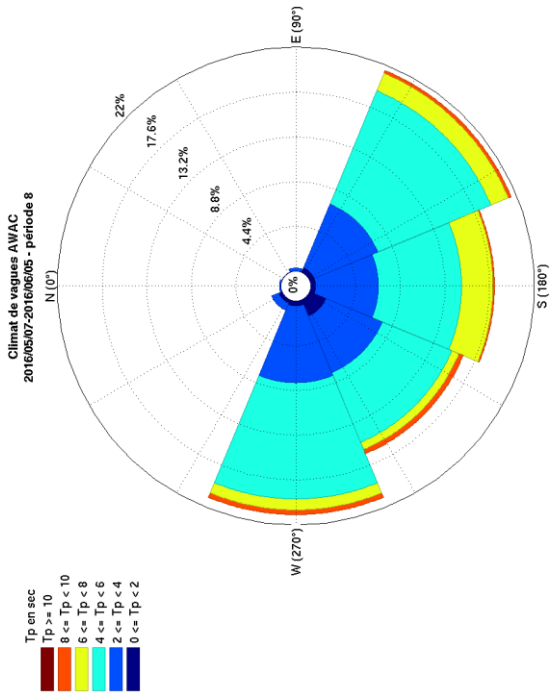
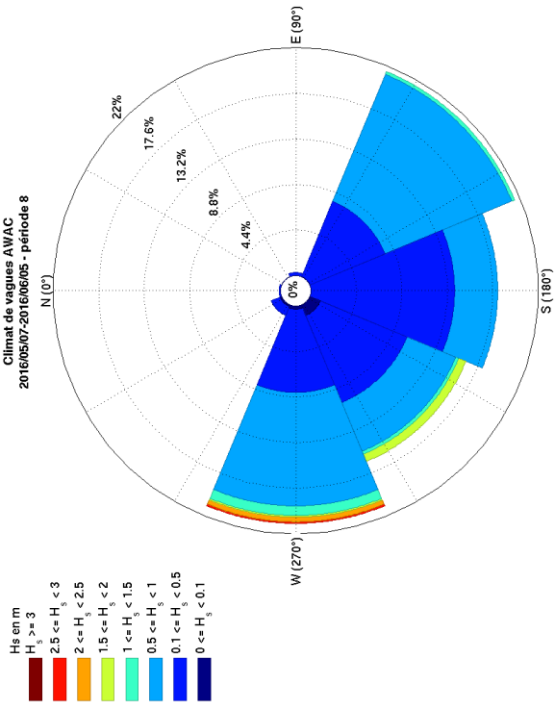


Figure 265. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 11 février au 7 mai 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/05/07-2016/06/05 - période 8
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
4.4%
8.8%
13.2%
17.6%
22%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/05/07-2016/06/05 - période 8
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
4.4%
8.8%
13.2%
17.6%
22%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

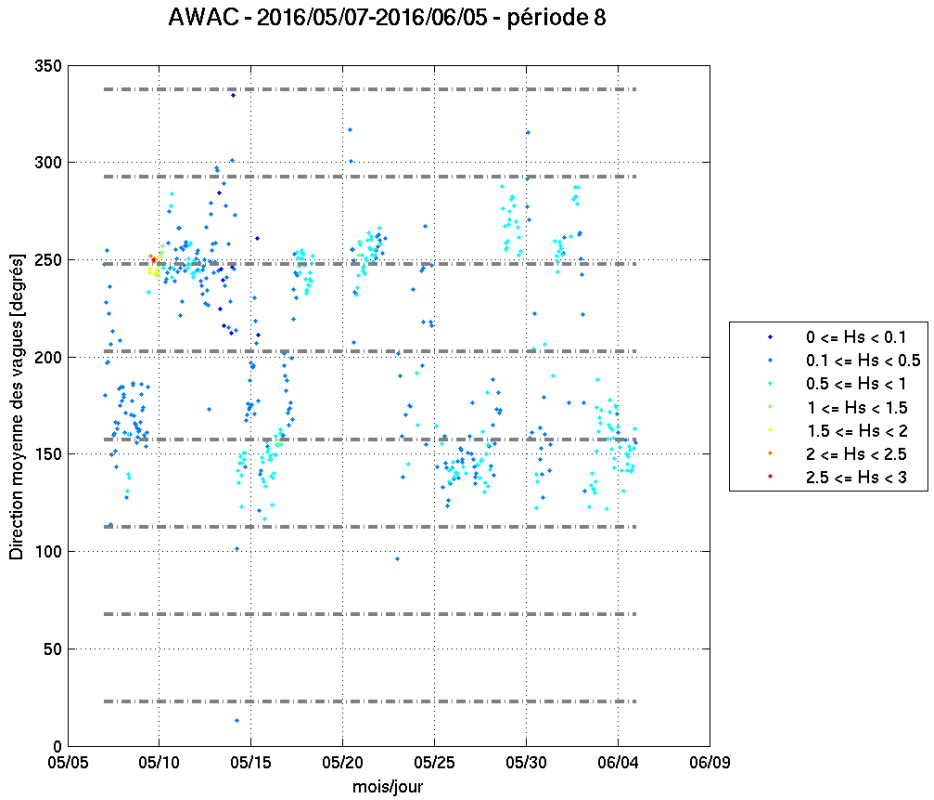


Figure 266. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 7 mai au 5 juin 2016

4.5.2.5 *Période du 6 juin au 17 septembre 2016*

Variations morphologiques

Au cours de la période estivale 2016, on constate de manière générale un transfert de sédiments de la partie médiane et inférieure de la plage vers la partie supérieure de la plage et le haut de plage contribuant à l'édification d'une crête de plage (figure 267). La plage prend ainsi un profil plus convexe, typique d'une plage en accrétion. Après avoir observé une très forte accumulation au printemps devant les profils 9 à 12 avec l'accolement du cordon sableux au haut estran, on constate néanmoins pour ce secteur un fort recul de la face abrupte de la plage entre le 6 juin et le 17 septembre 2016. Cette période est aussi caractérisée par la construction et l'engraissement d'un cordon sableux sur la partie supérieure de la zone prélittorale.

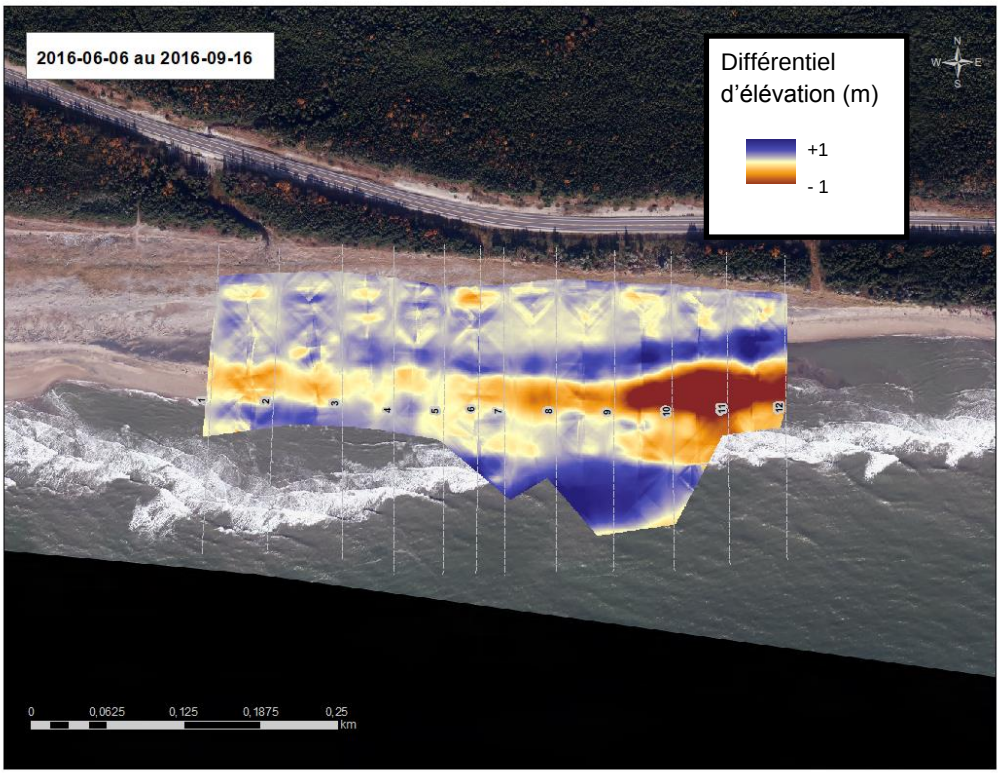


Figure 267. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre - entre le 6 juin et le 16 septembre 2016

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Les enregistrements des capteurs montrent que le NET a dépassé le niveau du 95^{e} percentile lors d'au moins sept événements (figure 268).

Conditions de vagues au large (AWAC)

Les données de l'AWAC montrent que cette période est surtout caractérisée par des vagues inférieures à 2 m, principalement de direction ouest (43 %). On observe toutefois trois courts événements durant lesquels les Hs ont dépassé 3 m entre les 12 et 15 septembre, soit tout juste avant le relevé (figure 269). Cet événement est caractérisé par des vagues de l'ouest-sud-ouest (240 à 255°) soit de classe 2.

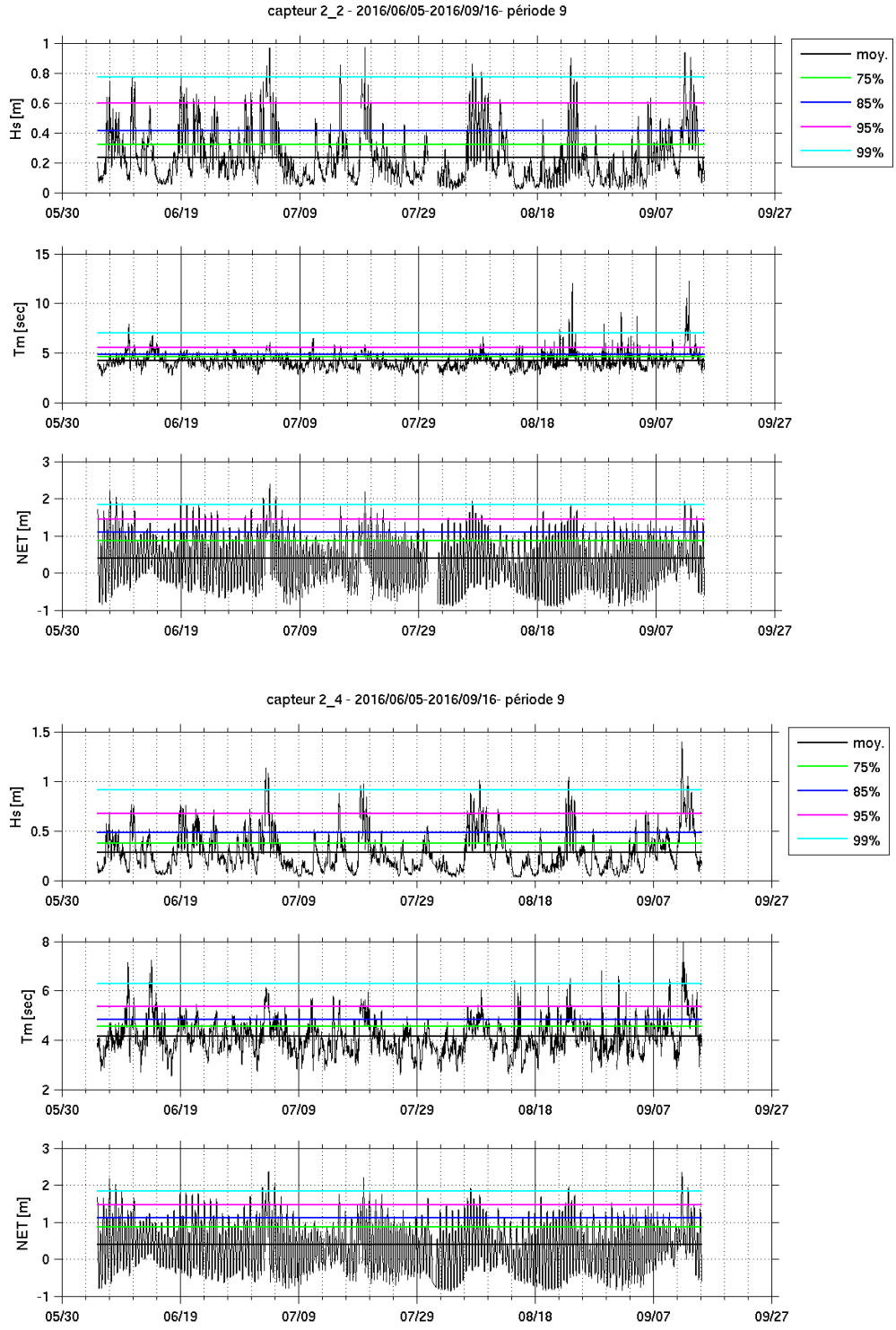
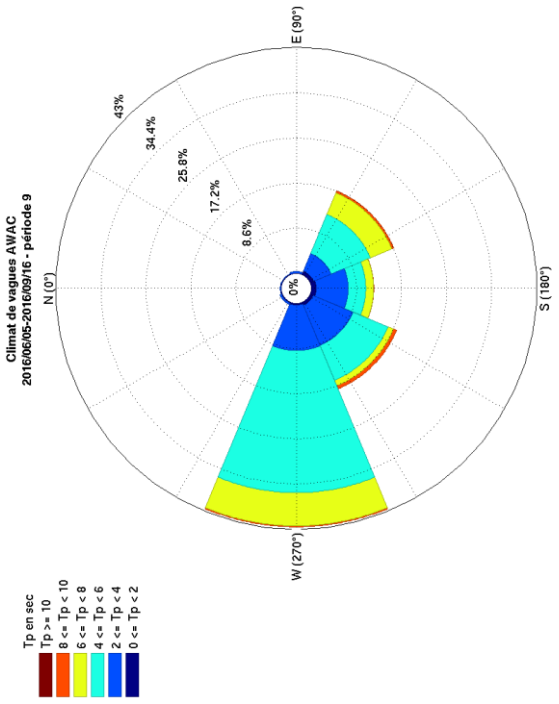
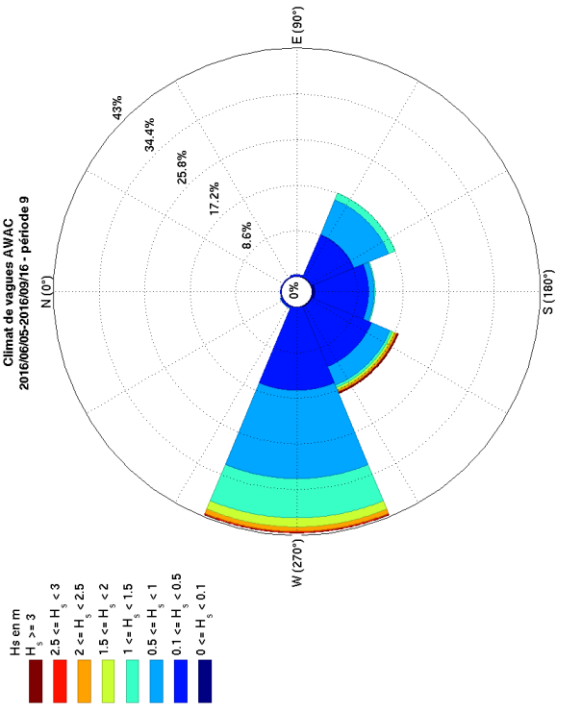


Figure 268. Climat de vagues des capteurs 2.2 et 2.4 – Secteur centre – 5 juin au 16 septembre 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/06/05-2016/09/16 - période 9
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/06/05-2016/09/16 - période 9
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

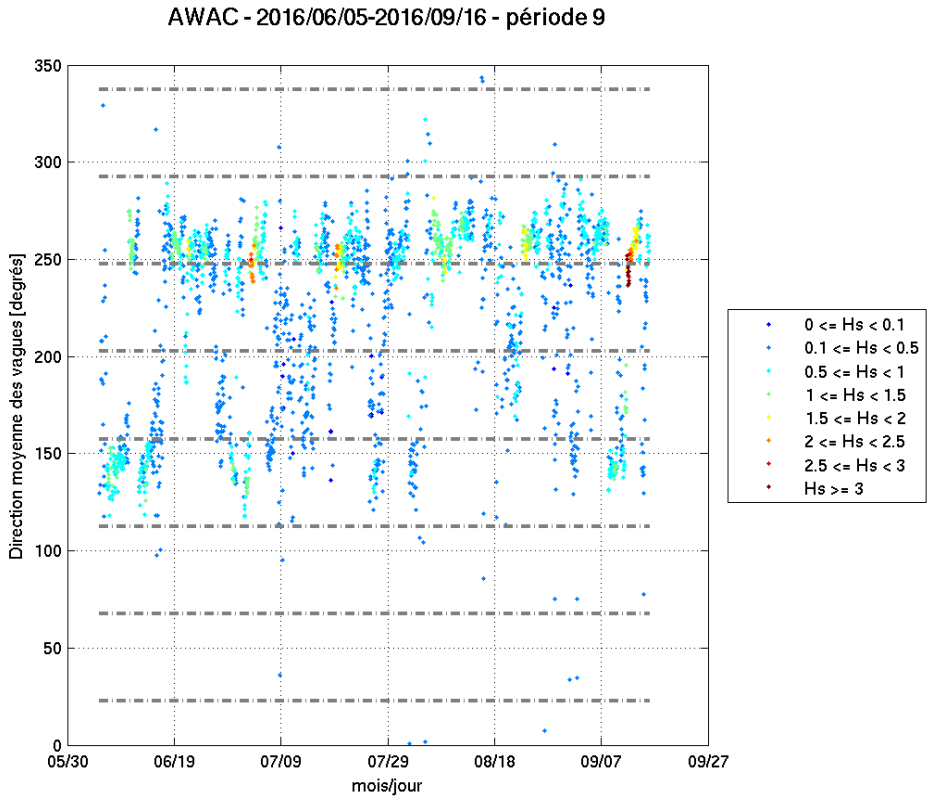


Figure 269. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 5 juin au 16 septembre 2016

4.5.2.6 *Période du 16 septembre au 15 décembre 2016*

Variations morphologiques

Des levés topographiques mensuels ont été réalisés au cours de l'automne 2016 (figure 270 et figure 271). On constate de manière générale une érosion de la face de la plage, le profil passant d'une forme convexe estivale à une forme concave particulièrement prononcée en décembre 2016 (figure 272 et figure 273). La partie supérieure de la plage et le haut de plage ont connu quant à eux un engraissement. Lors de cette période, le cordon sableux prélittoral migre aussi vers la côte tout en changeant de forme. On constate en effet un abaissement du revers du cordon lui donnant une forme plus allongée et aplatie.

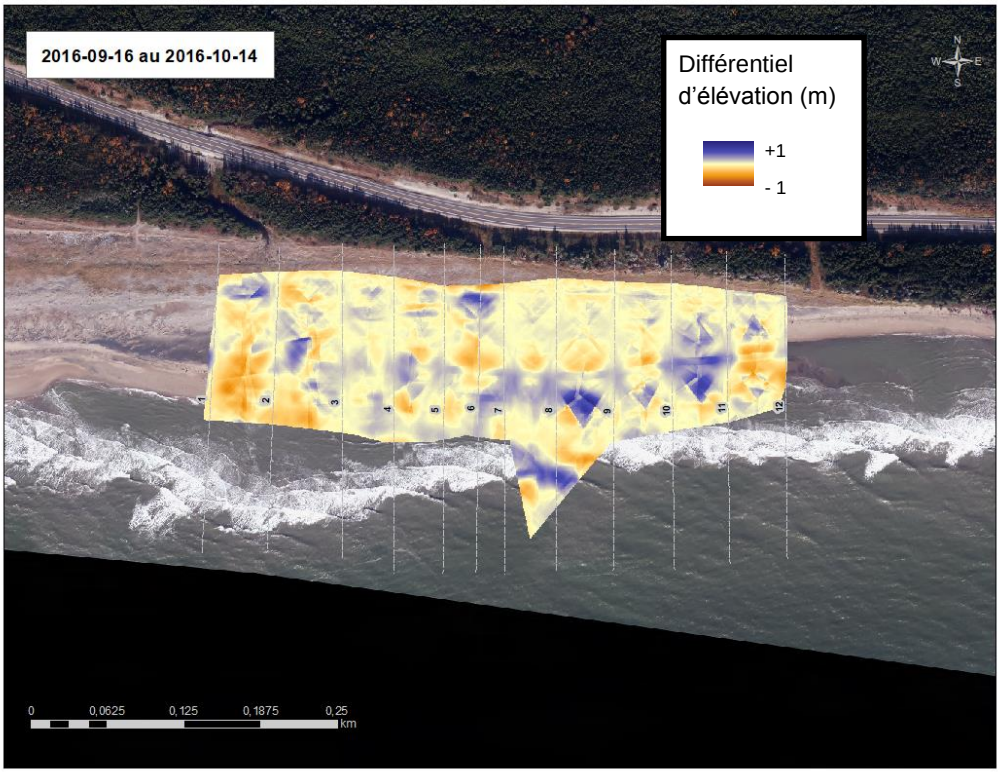


Figure 270. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre – entre le 16 septembre et le 14 octobre 2016

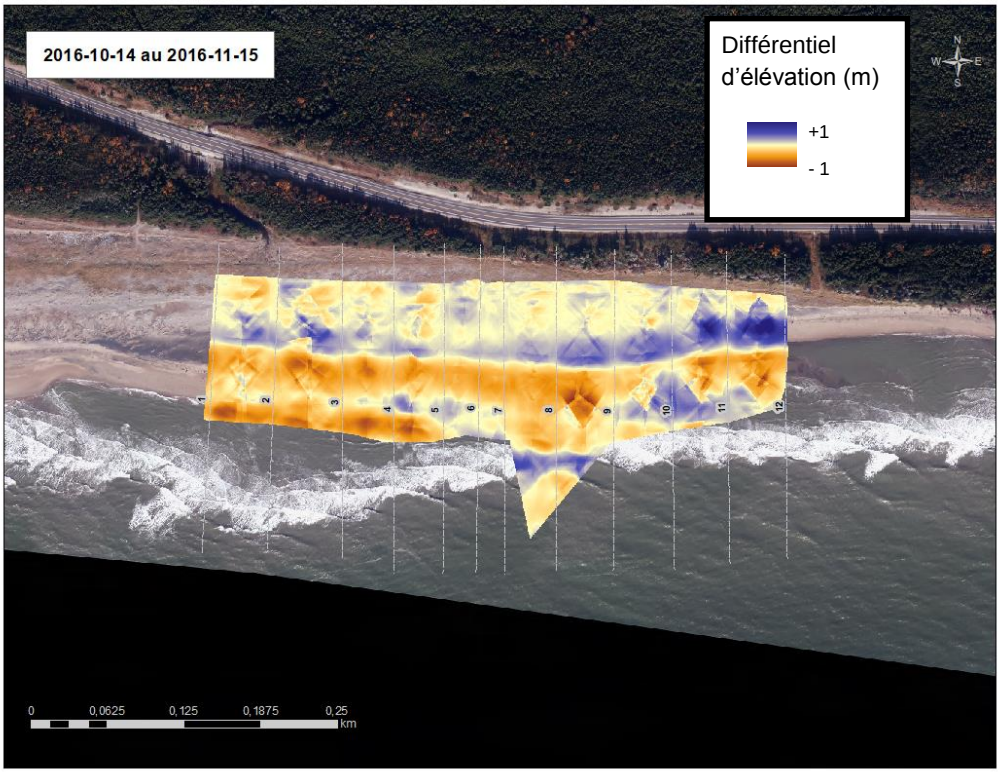


Figure 271. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre – entre le 14 octobre et le 15 novembre 2016

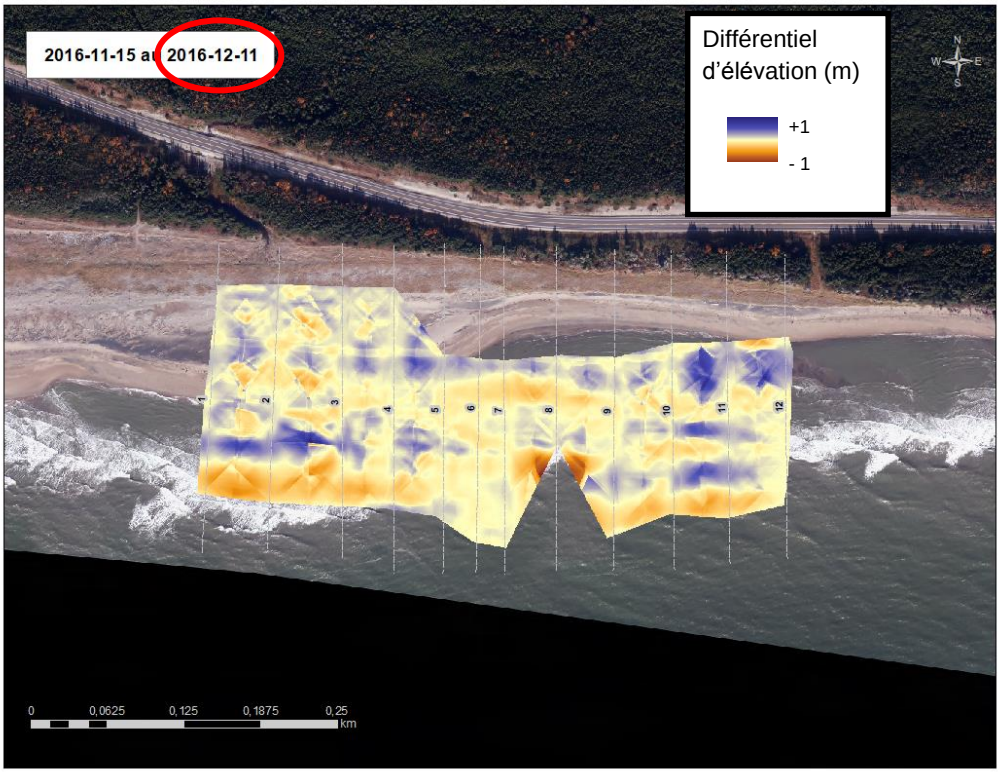


Figure 272. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre – entre le 15 novembre et le 11 décembre 2016

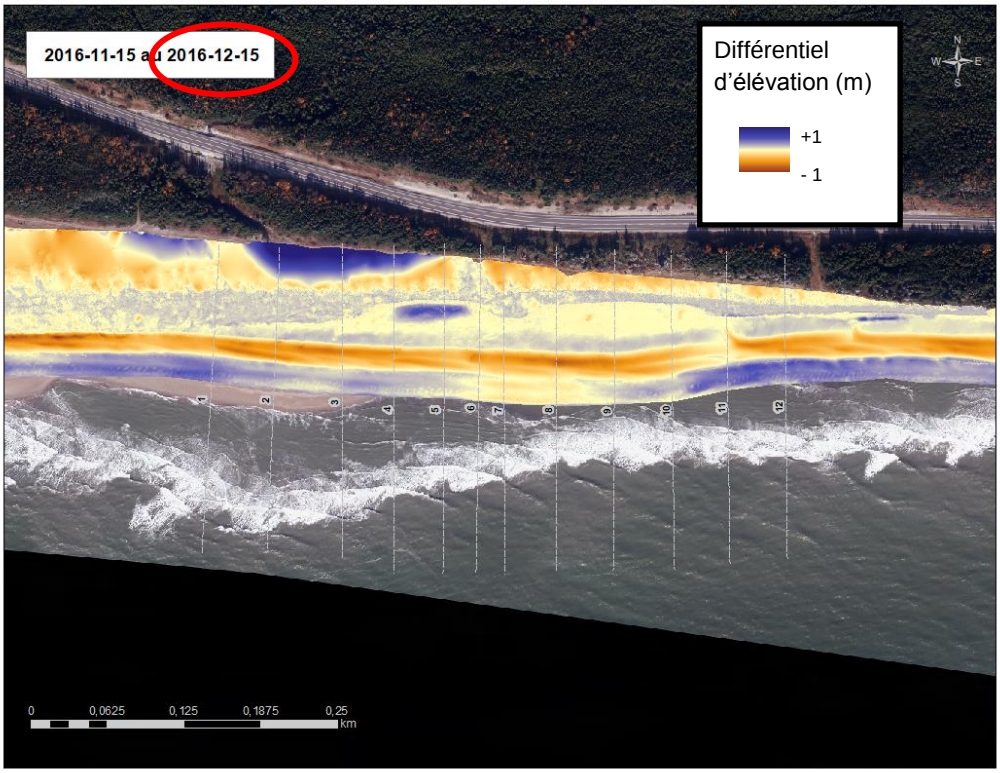


Figure 273. Différentiel d'élévation observé – Secteur centre – entre le 15 novembre et le 15 décembre 2016

Conditions de vagues à la côte (capteurs)

Sur les capteurs de la période du 16 septembre au 14 octobre 2016, le seuil des 95^{e} percentiles de la Hs et du NET est souvent atteint (figure 274). On remarque plus particulièrement les événements des 22 et 27 septembre de même que les hautes vagues entre les 4 et 10 octobre 2016.

Sur les graphiques des capteurs 2.2 et 2.4, on remarque trois événements durant lesquels les Hs et les NET ont atteint le seuil du 95^{e} percentile lors de la période du 14 octobre au 15 novembre 2016 (figure 275).

Pour la période du 15 novembre au 15 décembre 2016, les Hs de vagues ainsi que le NET à la côte (capteurs de la flexure 2.2) ont dépassé le 95^{e} percentile vers la mi-novembre (17 et 20 novembre), au début décembre (2 et 3 décembre) et aux alentours du 11 décembre (figure 276). Toutefois, les graphiques montrent clairement que l'événement du 14-15 décembre a engendré des vagues dont les Hs s'élevaient à plus d'un mètre alors que le

95^{e} percentile était de 0,57 m pour cette même période et la moyenne était de 0,25 m. Le capteur 2.4 situé sur le bas estran avait été retiré pour cette période en prévision de la période hivernale.

Conditions de vagues au large (AWAC)

Du 16 septembre au 14 octobre 2016, au large, la hauteur des vagues indiquées par l'AWAC est néanmoins de plus faible amplitude (<2 m). Bien que la majorité des vagues, dont les plus hautes, soient d'orientation ouest (66 %), on remarque quelques épisodes du sud-est (figure 277).

Pour la période du 14 octobre au 15 novembre 2016, les trois événements observés sur les capteurs près de la côte sont également perceptibles sur les données de l'AWAC et montrent, pour les trois, une direction ouest-sud-ouest (225 à 270°), soit de classe 4 (figure 278).

Pour la période du 15 novembre au 15 décembre 2016, la hauteur des vagues au large est relativement faible même lors de cette tempête, soit généralement inférieure à 2 m avec quelques valeurs entre 2 et 2,5 m. Les vagues étaient de direction ouest lors de l'événement. Toutefois, durant la période 14 octobre au 15 décembre 2016, celles-ci venaient plus fréquemment qu'à l'habitude du cadran sud-est (figure 279).

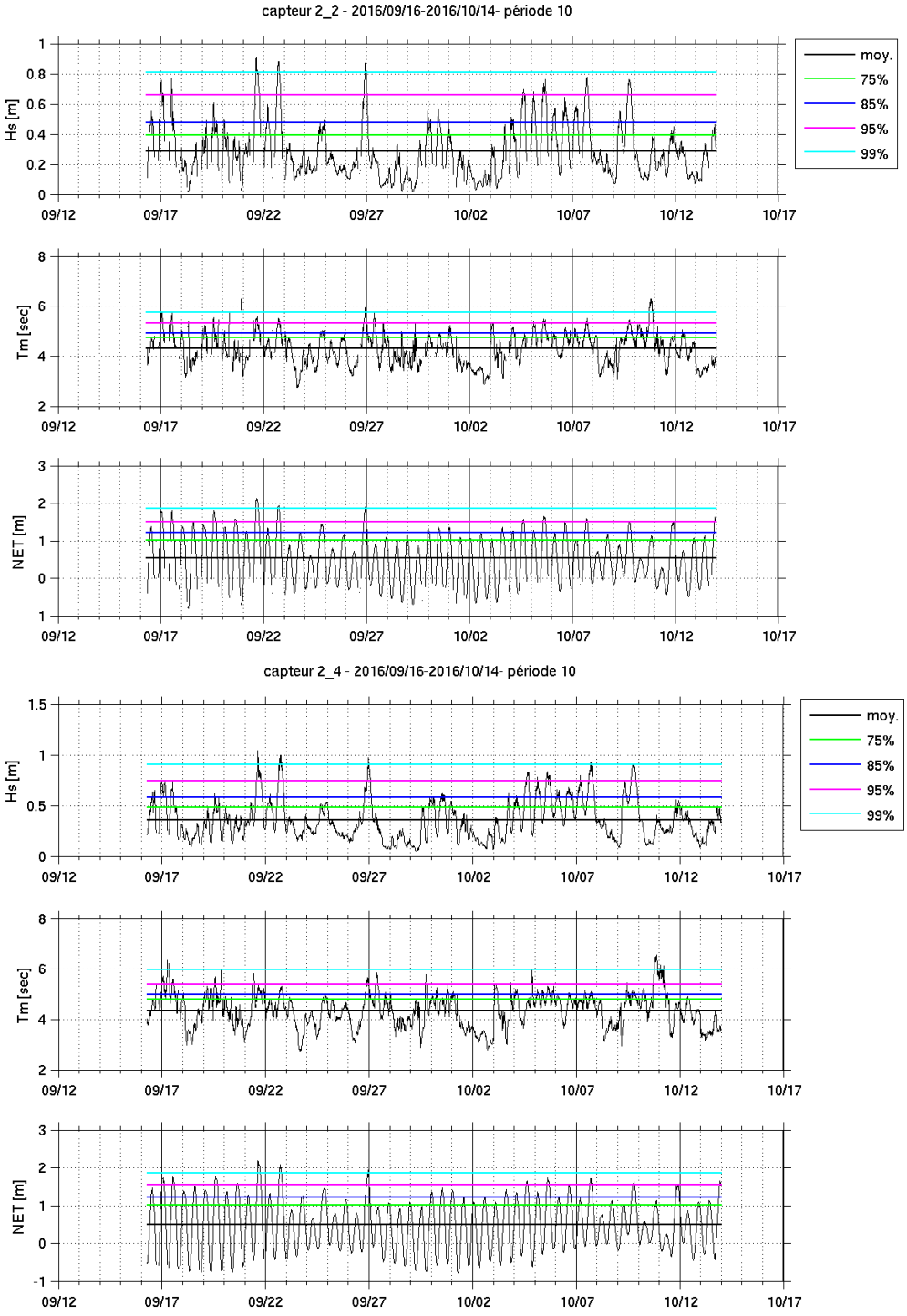


Figure 274. Climat de vagues des capteurs 2.2 et 2.4 – Secteur centre – 16 septembre au 14 octobre 2016

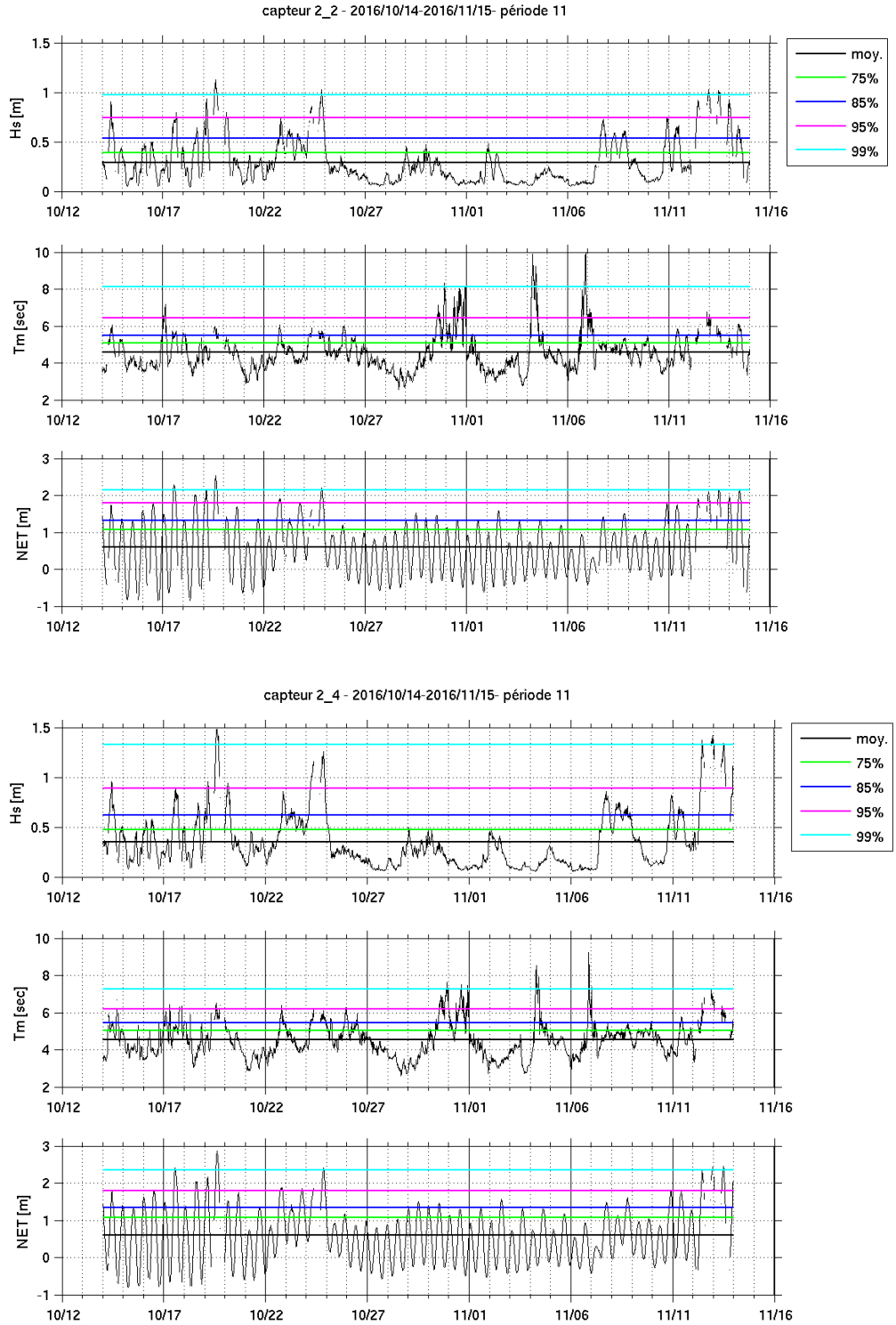


Figure 275. Climat de vagues des capteurs 2.2 et 2.4 – Secteur centre – 14 octobre au 15 novembre 2016

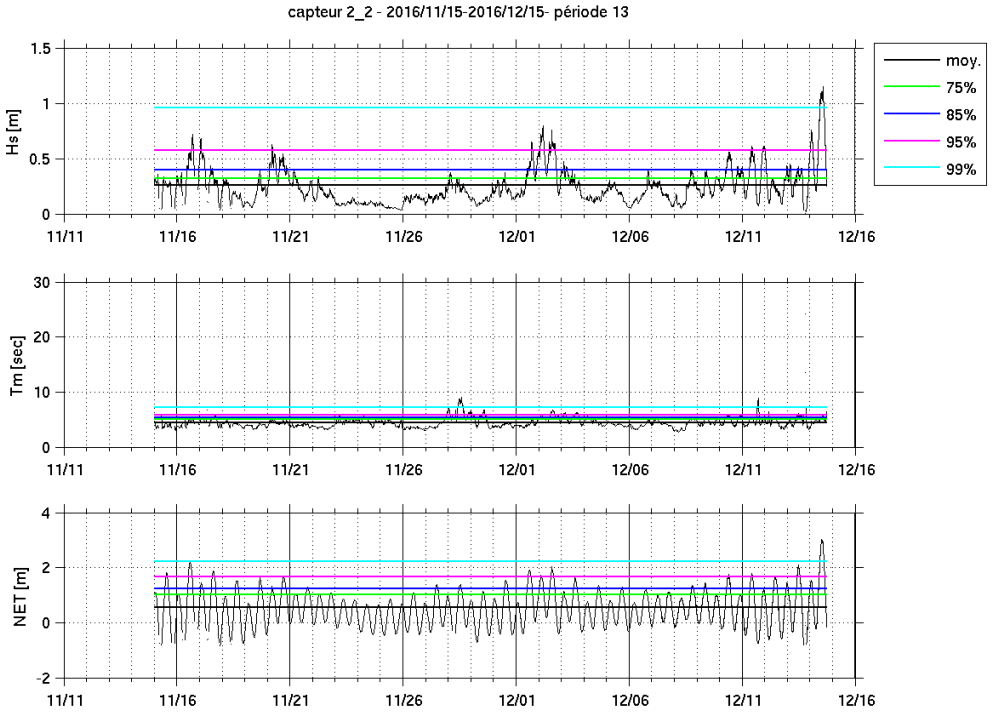
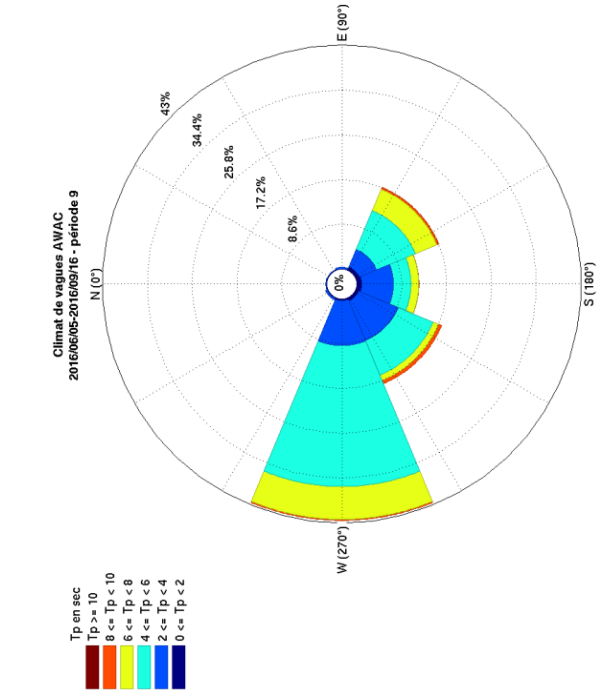
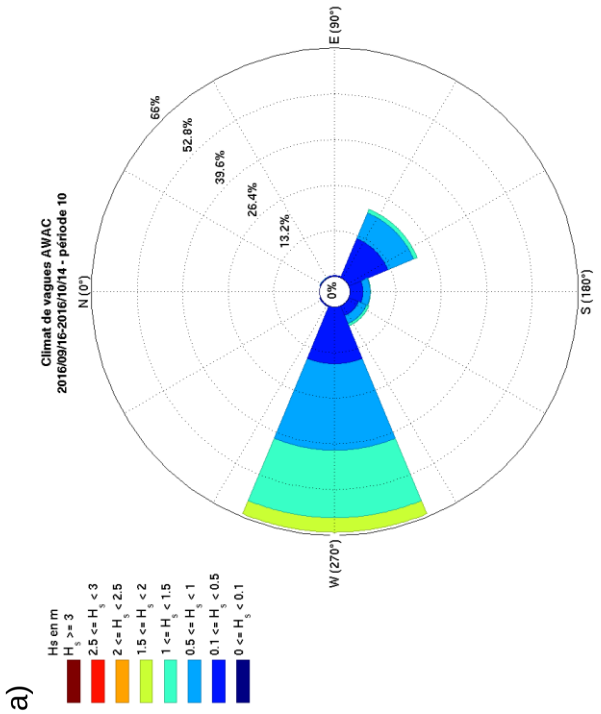


Figure 276. Climat de vagues du capteur 2.2 – Secteur centre – 15 novembre au 15 décembre 2016


b)
Climat de vagues AWAC
2016/06/05-2016/09/16 - période 9
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
8.6%
17.2%
25.8%
34.4%
43%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2


a)
Climat de vagues AWAC
2016/09/16-2016/10/14 - période 10
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
13.2%
26.4%
39.6%
52.8%
66%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

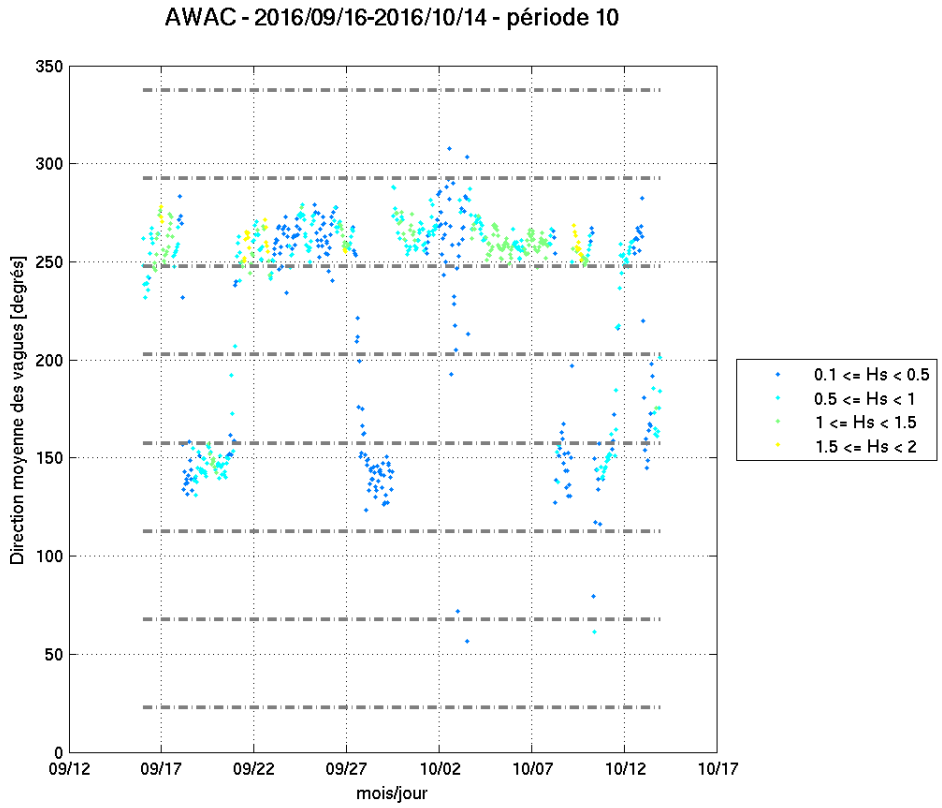
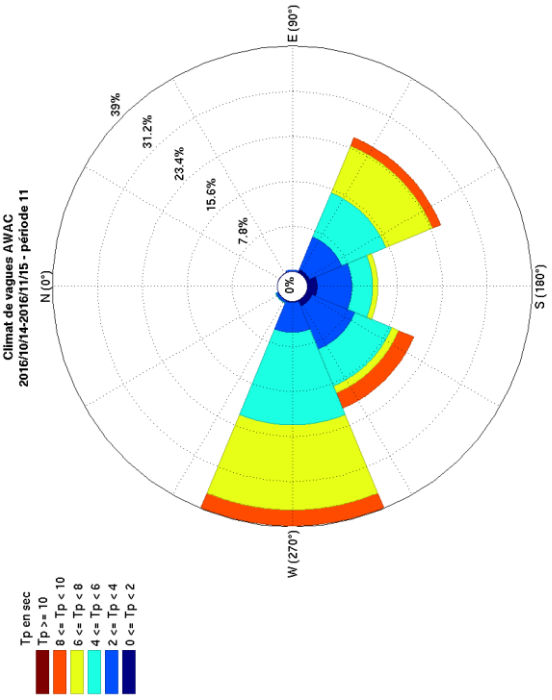
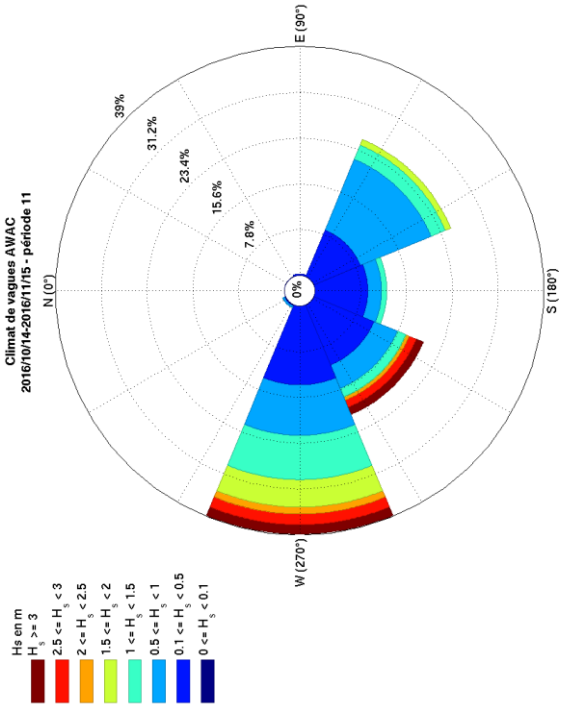


Figure 277. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 16 septembre au 14 octobre 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/10/14-2016/11/15 - période 11
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
7.8%
15.6%
23.4%
31.2%
39%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/10/14-2016/11/15 - période 11
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
7.8%
15.6%
23.4%
31.2%
39%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

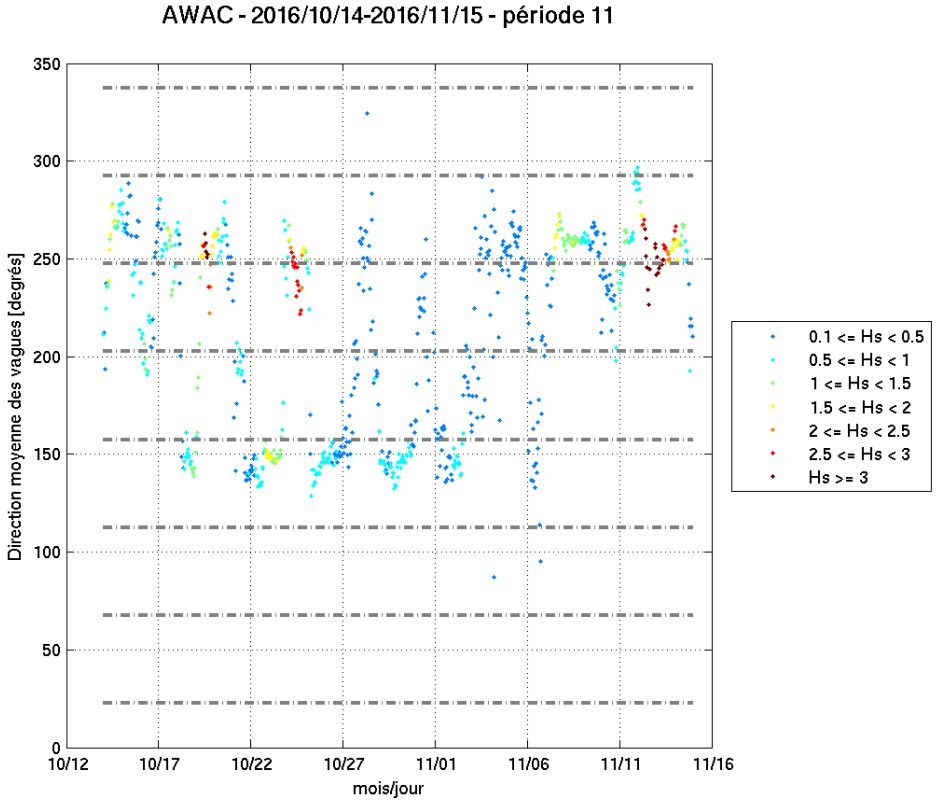
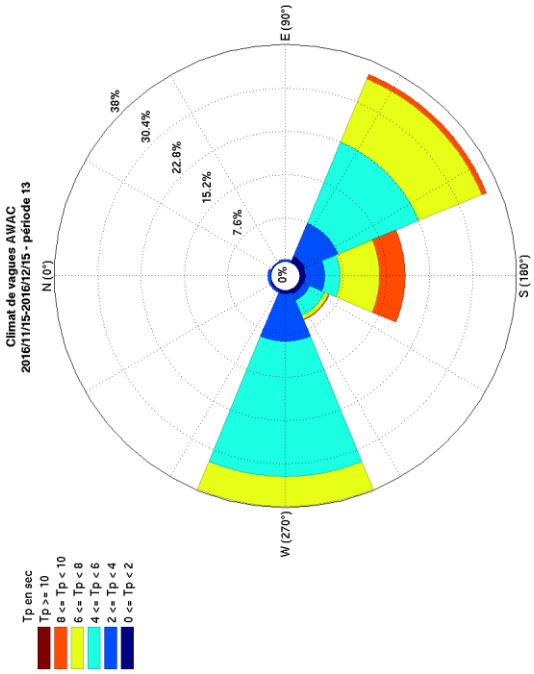
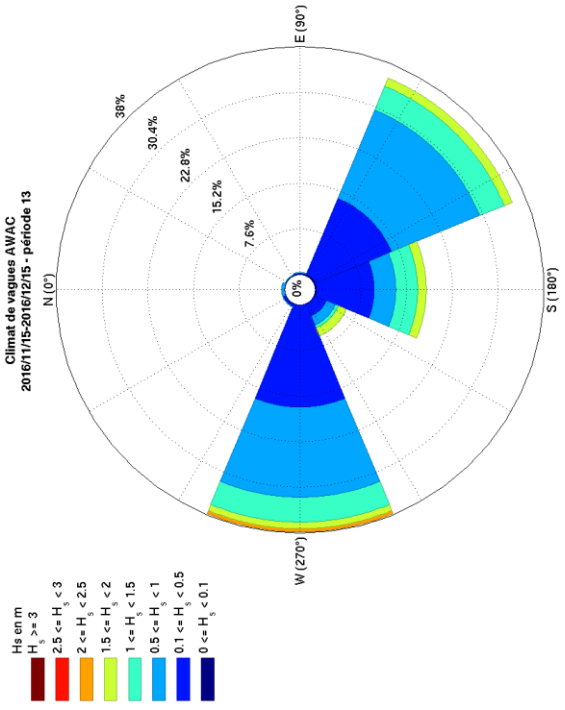


Figure 278. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 14 octobre au 15 novembre 2016

b)


Climat de vagues AWAC
2016/11/15-2016/12/15 - période 13
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
7.6%
15.2%
22.8%
30.4%
38%
Tp en sec
Tp >= 10
8 <= Tp < 10
6 <= Tp < 8
4 <= Tp < 6
2 <= Tp < 4
0 <= Tp < 2

a)


Climat de vagues AWAC
2016/11/15-2016/12/15 - période 13
N (0°)
E (90°)
S (180°)
W (270°)
0%
7.6%
15.2%
22.8%
30.4%
38%
Hs en m
Hs >= 3
2.5 <= Hs < 3
2 <= Hs < 2.5
1.5 <= Hs < 2
1 <= Hs < 1.5
0.5 <= Hs < 1
0.1 <= Hs < 0.5
0 <= Hs < 0.1

c)

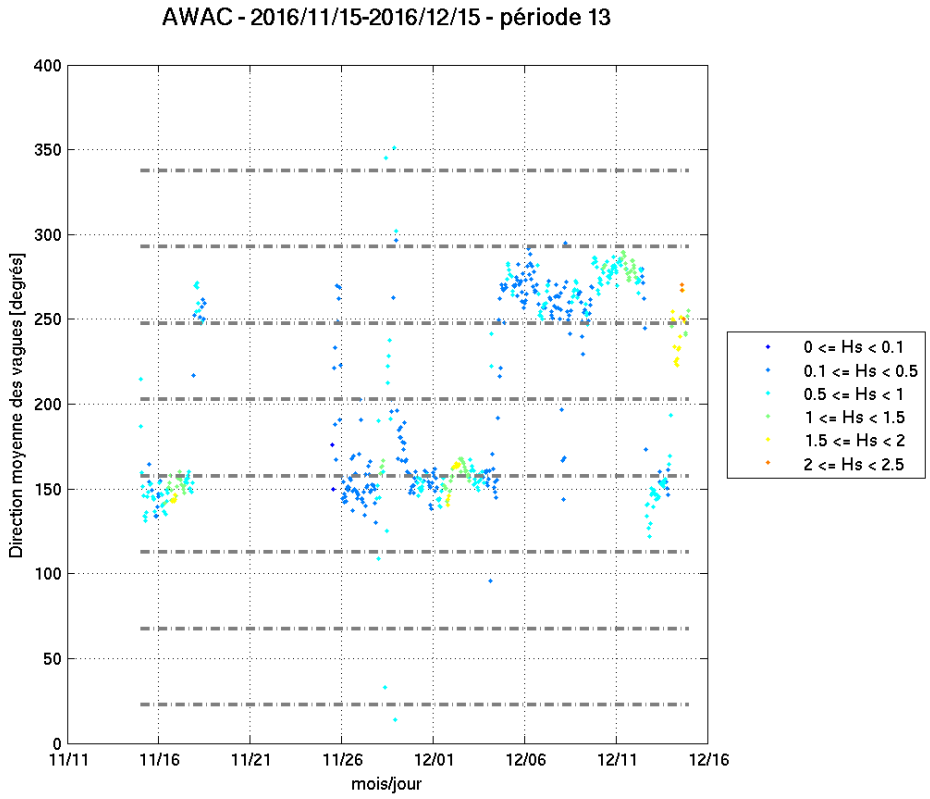


Figure 279. Rose des vagues en fonction a) de la Hs ; b) de la période ; et c) Direction moyenne et Hs des vagues du 15 novembre au 15 décembre 2016

4.6 Synthèse de la dynamique hydrosédimentaire à Longue-Pointe-de-Mingan

4.6.1 Variations morphologiques saisonnières : dynamique d'une plage à barres sableuses

Les deux secteurs suivis à l'aide des profils topographiques DGPS et LiDAR ont été sélectionnés pour couvrir les différents patrons d'évolution morphologiques représentatifs de la plage de Longue-Pointe-de-Mingan tout en suivant des secteurs où la route 138 est à proximité de la ligne de rivage. Cette région côtière a la particularité d'être formée d'une série de plusieurs barres sableuses prélittorales ainsi que de cordons sableux de bas estran (figure 280). Ces corps sédimentaires se déplacent non seulement de manière perpendiculaire à la côte, mais aussi d'ouest en est dans le sens de la dérive littorale. L'interaction entre les cordons sableux et la plage influence directement l'évolution de la morphologie de la plage et par conséquent le déplacement de la ligne de rivage. On constate ainsi de manière longitudinale que le profil de la plage à un temps donné décrit un patron en bosse et en creux dicté par l'accolement des cordons sableux à la partie inférieure de la plage et leur migration vers l'aval en raison de la dérive littorale à la manière d'une flèche littorale. Ce type de morphologie et d'évolution a aussi été décrit dans la région de Sept-Îles (Moign, 1972 ; Bernatchez et Fraser, 2012).

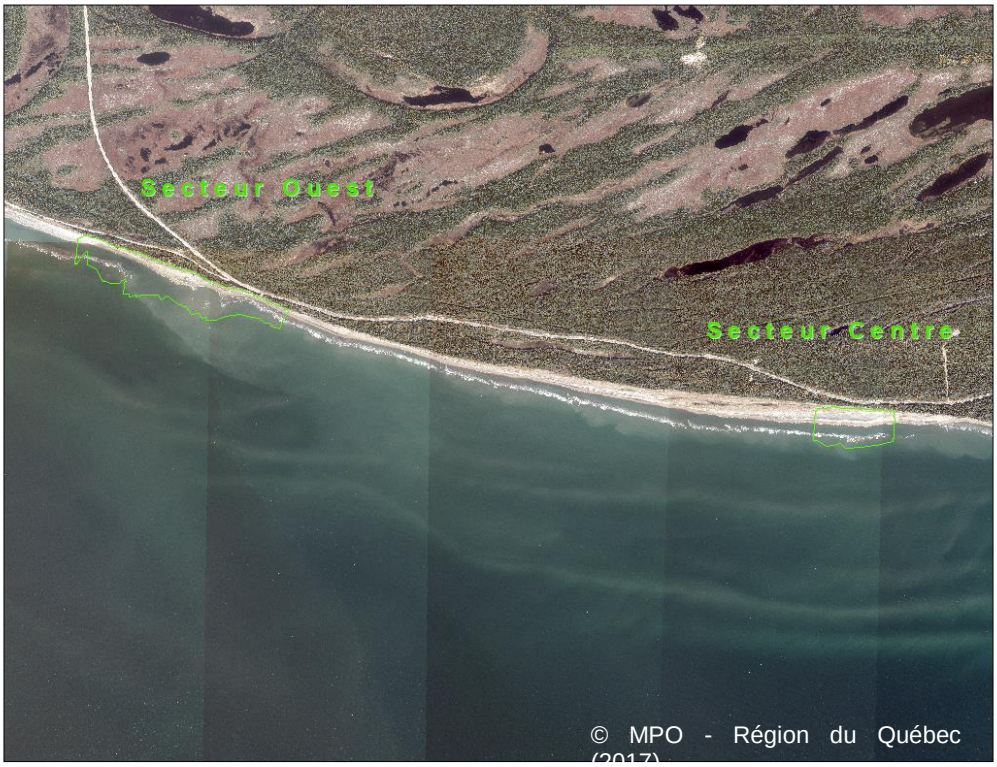


Figure 280. Barres sableuses sur la zone prélittorale de Longue-Pointe-de-Mingan devant les zones d'étendue maximale de relevés topographiques des secteurs ouest et centre (encadrés verts)

Les systèmes de barres et de cordons sont étudiés depuis fort longtemps (King et Williams, 1949). Les barres prélittorales ont fait l'objet de plusieurs études particulièrement depuis les années 80 en raison notamment de leur intérêt pour atténuer l'énergie des vagues et protéger les côtes (Yu et Mei, 2000), mais aussi pour mieux comprendre leur lien avec l'évolution de la ligne de rivage (Philipps et al., 2017). Curieusement, les cordons sableux de bas estran ont été moins étudiés malgré leur plus grande accessibilité (Masselink et al., 2006). Les études sur la morphodynamique des plages à barres sableuses ont principalement été réalisées en milieu océanique de forte à faible énergie et sans couvert de glace (Lippmann et Holman, 1990 ; Larson et Kraus, 1992 ; Kroon et Masselink, 2002 ; Scott et al., 2011 ; Jackson et al., 2016 ; Lopez-Doriga et Ferreira, 2017 ; Cohn et al., 2017). Dans ces régions, les deux grands modes d'évolution sont décrits par deux profils morphodynamiques types : le profil d'été et le profil d'hiver (Aubrey et Ross, 1985 ; Larson, 1988). Le profil d'été correspond à la période de beaux temps

et de faible énergie durant laquelle les sédiments migrent des barres prélittorales vers la plage engendrant une accrétion de la plage et un profil plutôt convexe. Le profil d'hiver est souvent nommé profil de tempête puisque cette saison est caractérisée par une fréquence et une intensité plus importantes des tempêtes qui génèrent des courants de retour importants sur le fond et un transfert de sédiments de la plage vers les barres prélittorales. Par conséquent, la plage enregistre un déficit sédimentaire et son profil est plutôt concave (Cooper et al., 2000 ; Splinter et al., 2018).

Dans la région d'étude, la présence d'un couvert de glace sur la plage (haut estran) en hiver modifie et complexifie cette classification morphodynamique largement répandue. Lors des années de suivi, il s'est développé un pied de glace sur le haut estran, alors qu'il n'y avait pas de pied de glace de bas estran et de glace de mer, ou sinon sur de très courtes durées. Dans ce contexte, des échanges sédimentaires étaient possibles entre la zone prélittorale et le bas estran. Dans cette zone sans couvert de glace, l'érosion, le transport sédimentaire et l'accumulation étaient possibles. Sur la plage au sens strict (haut estran), du moment où la plage était gelée et qu'un pied de glace se formait, l'érosion de la surface de la plage n'était plus possible alors que l'accumulation de sédiment était possible jusqu'au moment où l'épaisseur de la glace devenait supérieure au niveau d'eau total (marée+surcote+vague). Ainsi, au fur et à mesure que le pied de glace s'accroît verticalement, les sédiments étaient piégés à l'intérieur du pied de glace. Lors du franchissement du front du pied de glace par le jet de rive, des sédiments se sont aussi accumulés à sa surface. En hiver, les levés ont montré au front du pied de glace, un abaissement et un surcreusement de la surface de la partie inférieure de la plage ainsi que sur le bas estran en raison de la réflexion des vagues contre le pied de glace. Le pied de glace agit ainsi comme une structure rigide. Cette dynamique morphosédimentaire a été observée tant dans le secteur ouest que centre. Ces sédiments érodés se déplacent tant vers le large que dans le sens de la dérive littorale. On constate même que lorsqu'un cordon sableux était présent sur la partie supérieure du bas estran, il se déplaçait vers le large probablement en raison des courants de retour générés par la réflexion des vagues contre le pied de glace. Les barres sableuses localisées dans la zone prélittorale peu profonde tendent quant à elles à se déplacer vers la côte. Avec le recul du front du pied de glace au printemps, le surcreusement gagne la partie médiane de la plage et parfois même la partie supérieure toujours en raison de la réflexion des vagues contre le pied de glace, donnant ainsi un profil concave à la plage. La période printanière (fin avril et mai) constitue une période de transition au niveau morphosédimentologique. La fusion du pied de glace entraîne une redistribution de son contenu en sédiments vers la partie inférieure de la plage et le bas estran. Dans certains secteurs, il se forme aussi

des chenaux supraglaciels qui transportent des sédiments vers le bas de plage.

La période estivale a généralement été caractérisée par un engraissement de la plage. Un seul événement énergétique peut toutefois retarder ce processus d'accumulation comme il a été constaté entre le 17 mai et le 31 juillet 2015 alors que le bilan de la plage a été négatif. Mise à part cette exception, déjà en juin, les sédiments du bas estran et de la partie inférieure de la plage sont transférés vers la partie supérieure de la plage, engendrant un profil davantage convexe typique des profils de beaux temps (profil d'été). La période estivale, jusqu'en septembre, correspond à une forte accumulation sur la plage ainsi que sur le bas estran. Des cordons sableux se forment sur le bas estran et la partie supérieure de la zone prélittorale. Il y a clairement un transfert de sédiments de la zone prélittorale vers la côte nécessitant un transport sédimentaire perpendiculaire à la côte.

La période de septembre à décembre présente des changements morphologiques importants avec généralement un démaigrissement de la plage passant d'un profil convexe à un profil concave. Les sédiments de la partie supérieure de la plage sont transférés vers le bas de plage. Dans le détail, l'évolution morphologique de la plage est beaucoup plus complexe et dépend fortement de la présence ou non d'un cordon littoral sur le bas estran et de sa distance par rapport au haut estran. En l'absence d'un cordon littoral sur la partie supérieure du bas estran, la plage est fortement déficitaire lors de cette période. La présence de cordon littoral sur la partie supérieure du bas estran en septembre ou en octobre a pour effet non seulement de dissiper l'énergie des vagues, mais aussi d'alimenter en sédiments la plage. Dans certains cas, le cordon vient même s'accoler à la plage et entraîne un bilan sédimentaire positif, voire même un profil plutôt convexe. La migration des cordons sableux vers la côte lors de la période automnale entraîne aussi une accumulation sur le bas estran. De manière générale, les cordons sableux prélittoraux peu profonds ont aussi tendance à migrer vers la côte lors de cette période.

Sachant que les barres sableuses amoindrissent l'énergie des vagues qui se propagent sur la plage, on peut conclure que leur absence favorise l'exposition de la côte à de fortes vagues et aux hauts niveaux d'eau liés au jet de rive de celles-ci. Conséquemment, un automne durant lequel les processus hydrodynamiques sont très actifs et les cordons, moins bien développés rendrait la plage plus sensible aux tempêtes et aux niveaux d'eau élevés qui surviennent au début de l'hiver alors que le pied de glace ne protège pas encore la côte. La dynamique d'évolution de la ligne de rivage est par

conséquent fortement liée à l'évolution morphologique de la plage, qui elle-même est influencée par la dynamique morphologique de la zone intertidale et prélittorale (Davidson et al., 2013).

Dans le cadre de ce projet, les professionnels de recherche pouvaient atteindre seulement le premier cordon ou barre localisé sur le bas estran ou sur la zone prélittorale peu profonde (pas toujours, selon les conditions de vagues). La fenêtre temporelle à marée basse durant laquelle leur relevé est possible (à l'aide du DGPS) est très courte et la profondeur d'eau dans les sillons qui précèdent les cordons est parfois trop importante pour permettre aux professionnels chargés des campagnes de terrain de les atteindre. À titre d'exemple, les cordons que l'on distingue sur la figure 281 ont pu être atteints pour 7 des 12 profils (ceux vers l'est) lors de la campagne du 16 septembre 2017, soit six jours avant la prise de l'image oblique. Des levés monofaisceaux ou multifaisceaux seront nécessaires pour bien faire la relation entre les barres prélittorales et l'évolution de la plage. Dans cette optique, un projet de moto-marine multicapteurs est en cours de développement à l'UQAR et des premiers levés devraient être réalisés à l'automne 2018.

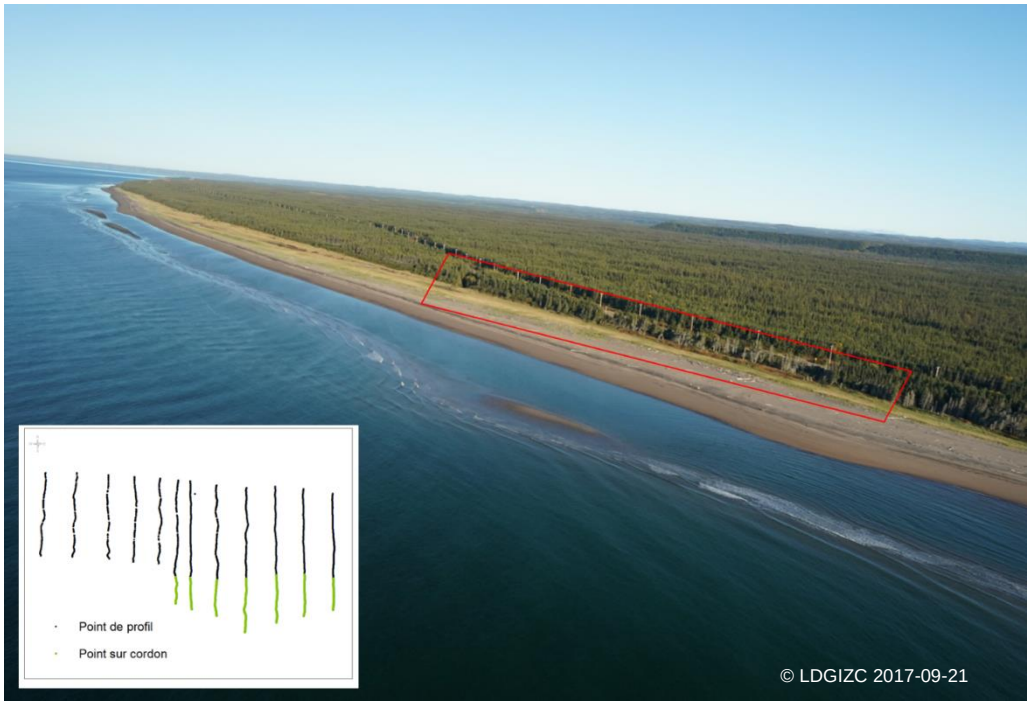


Figure 281. Cordon littoral relevés à Longue-Pointe-de-Mingan et localisation approximative de la zone de profils

5 OBJECTIF 4 : IDENTIFICATION DES SOLUTIONS D'ADAPTATION LES PLUS APPROPRIEES SELON LA DYNAMIQUE COTIERE POUR LE FOYER D'EROSION DE LONGUE-POINTE-DE-MINGAN EN BORDURE DE LA ROUTE 138

Dans le cadre du projet X016.1. « Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques », des scénarios d'intervention avaient été évalués pour deux segments côtiers où la route 138 était à proximité du trait de côte entre la rivière Saint-Jean et Longue-Pointe-de-Mingan (Corriveau et al., 2016). Nous présentons dans un premier temps une mise à jour de l'évolution du trait de côte à la sortie du ponceau dans le secteur ouest où la route 138 est maintenant à quelques mètres du trait de côte ainsi qu'une synthèse des événements tempétueux à partir des conditions hydrodynamiques au large. Sur la base de ces nouvelles connaissances, nous confirmons les solutions qui avaient été retenues en 2015.

5.1 Évolution du trait de côte par rapport à la route aux abords de la sortie de ponceau dans le secteur ouest de Longue-Pointe-de-Mingan

Le trait de côte (sommet de la falaise de sable) a été tracé sur chacun des six levés Lidar entre mai 2015 et décembre 2016 dans le secteur où la route 138 est à proximité du trait de côte. Le segment numérisé s'étend à environ 150 m de part et d'autre du ponceau #152 356.

Pour ce faire, le fichier numérique de points recueilli avec le SMLT a été exposé à l'écran à l'aide du logiciel Trident et le mode visuel « orthométrique » a été utilisé pour tracer le trait de côte numérique.

Il résulte de ces tracés que la position du segment situé à l'est du ponceau est demeurée stable entre mai 2015 et décembre 2016. Toutefois, on peut observer un recul d'environ 10 à 12 m pour celui à l'ouest. Ce recul se serait produit entre le 28 septembre 2015 et le 16 septembre 2016 (figure 282).

À la suite des reculs observés partout sur la Côte-Nord et dans le Québec maritime au cours de l'hiver 2016-2017, un dernier relevé a été effectué en novembre 2017 afin de peaufiner cette prise de mesure. Lors de cette campagne de terrain, le trait de côte a été relevé à l'aide d'un DGPS. Les

points ont par la suite été reliés dans ArcGis pour obtenir une ligne continue. On voit à partir de celle-ci que c'est plutôt le segment à l'est qui a reculé entre décembre 2016 et novembre 2017 d'environ 10 m. De plus, un petit segment d'environ 40 mètres de longueur directement à l'ouest du ponceau a aussi reculé d'environ 8 m (figure 282).

L'analyse des données de l'AWAC au large permet d'identifier des événements majeurs durant lesquels la hauteur des vagues et NET ont atteint des valeurs importantes (figure 283). Le NET a été supérieur à 5 m lors des événements du 30 octobre 2015 (5,87 m), 11 septembre 2016 (5,14 m), 12-13 novembre 2016 (5,48 m), 5 janvier 2017 (5,01 m), 13 janvier 2017 (5,7 m), 28 janvier 2017 (5,10 m) et 10 novembre 2017 (5,69 m). Alors que la valeur maximale a été atteinte le 30 octobre 2015, le mois de janvier 2017 a été particulièrement tempétueux.

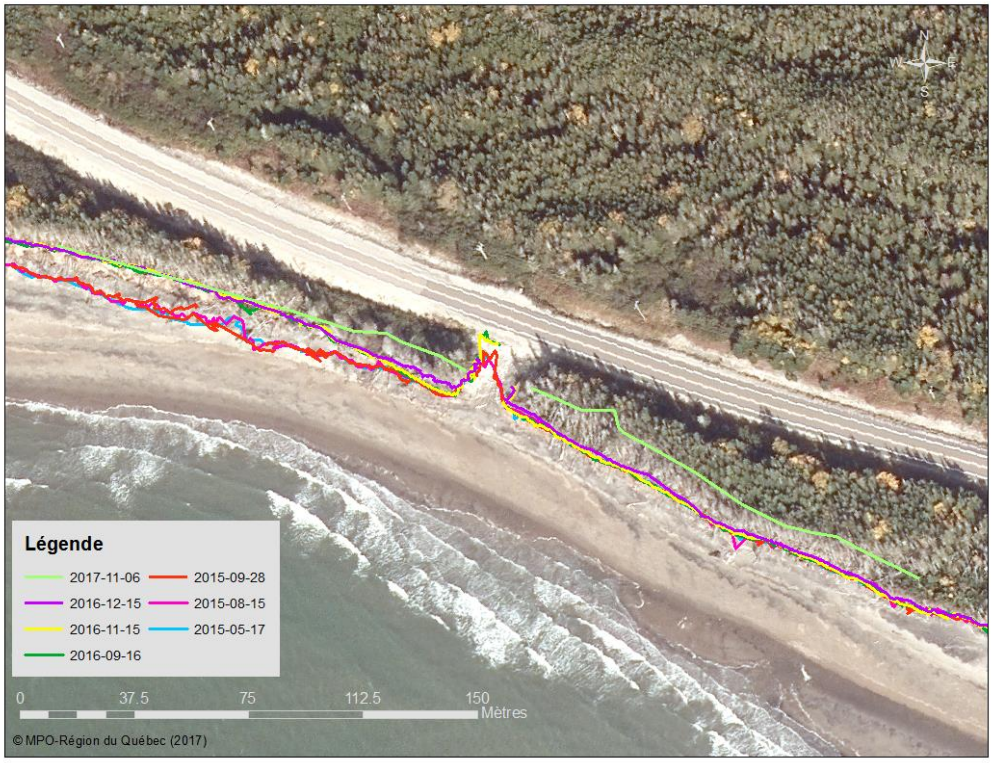


Figure 282. Évolution du trait de côte entre mai 2015 et novembre 2017 à proximité du ponceau à Longue-Pointe-de-Mingan

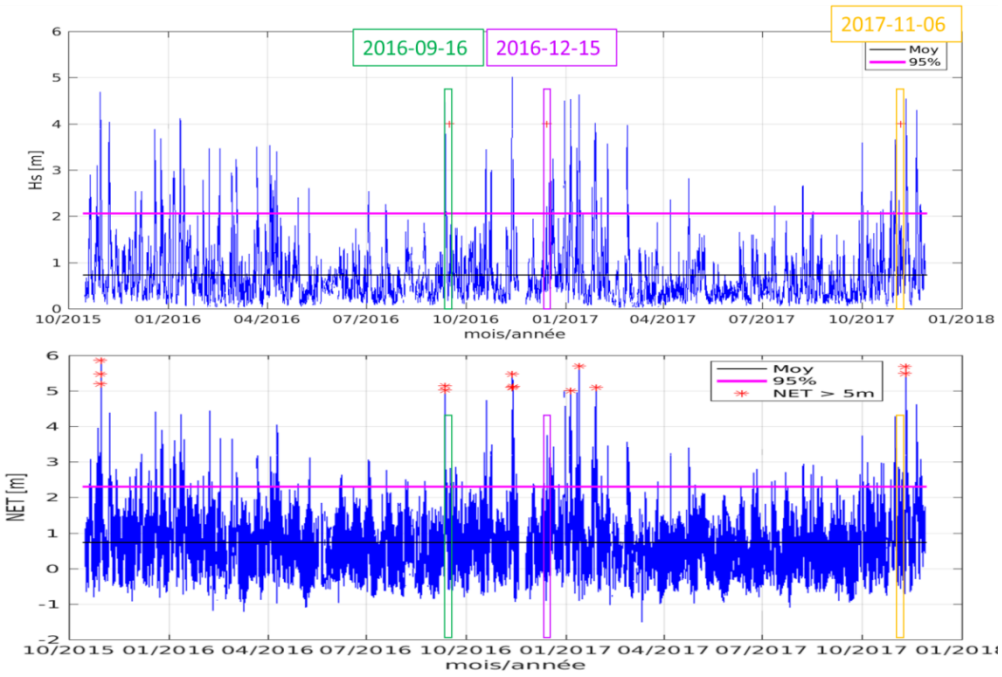


Figure 283. Hs et NET du 18 octobre 2015 au 16 novembre 2017 au large (AWAC)

5.2 Recommandations des solutions pour les secteurs ouest et centre

Le secteur ouest présente une tendance lourde au recul du trait de côte peu importe l'échelle temporelle, de l'Holocène récent à aujourd'hui (Corriveau et al., 2016). Malgré les apports sédimentaires provenant de l'érosion de la falaise entre Magpie et Rivière Saint-Jean, des apports fluviaux de la rivière Saint-Jean, des apports de la dérive littorale et sous-marins, la côte de ce secteur est en érosion. L'évolution saisonnière et annuelle de la plage montre des changements morphologiques rapides et des variations verticales substantielles qui atteignent régulièrement plus d'un mètre en un mois. Ces changements sont directement liés à la dynamique du système plage-cordon de bas estran-barre prélittorale induit par un transport sédimentaire important tant perpendiculaire que longitudinal à la côte. Des courants parallèles importants se forment au niveau du sillon entre la plage et le cordon lors du déferlement des vagues, ce qui favorise le surcreusement du sillon et le raidissement de la partie inférieure de la plage. Devant le secteur du ponceau de la route 138 (figure 284), le cordon de bas estran est généralement discontinu en raison de courants de retour qui forment plutôt des cordons en forme de croissant. Les ruisseaux de ce secteur, parfois intermittents, entraînent aussi les sédiments de la plage vers le bas estran, ce qui contribue au déficit sédimentaire de la plage et à la sensibilité de la côte à l'érosion.

En 2015, la sortie du ponceau a été enrochée mais le recul de la falaise de sable s'est poursuivie (figures 285 et 286). Dans ce contexte, la seule solution viable est de relocaliser la route 138 au moins au-delà de la limite projetée la plus à l'intérieur des terres présentée à la figure 177. Considérant le tracé actuel de la route et la géomorphologie de l'arrière-côte, Corriveau et al. (2016) ont proposé un nouveau tracé (figure 287).



Figure 284. Secteur du ponceau enroché en bordure la route 138, septembre 2017



Figure 285. Sortie du ponceau le 11 octobre 2014, sans enrochement



Figure 286. Sortie du ponceau le 24 avril 2016 avec enrochement

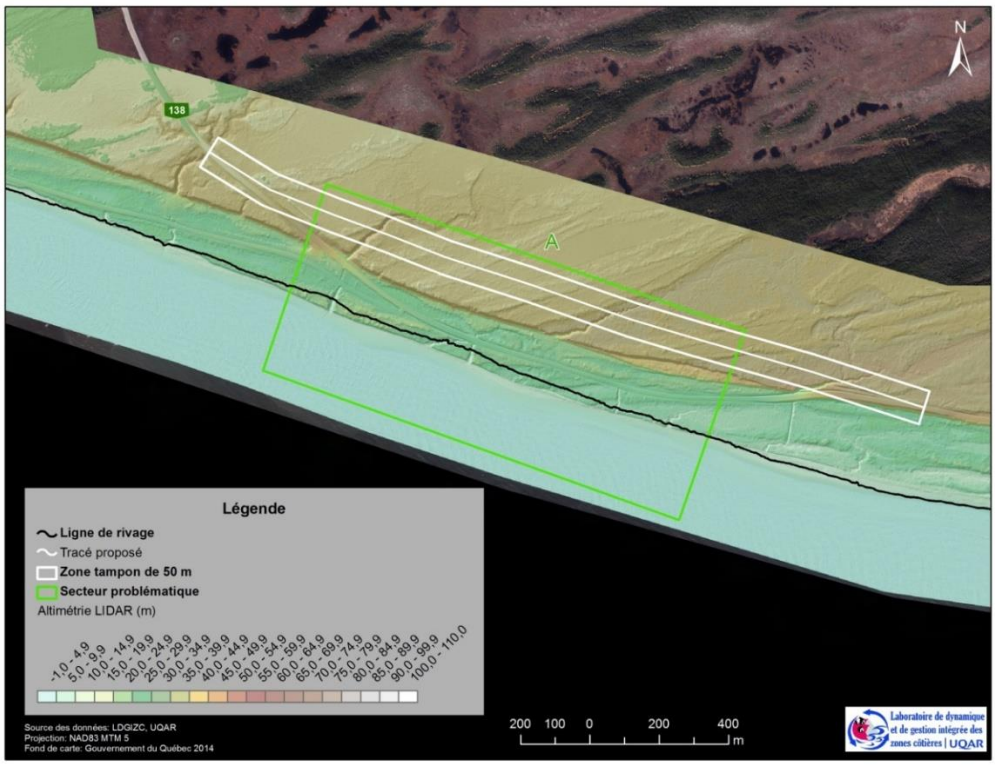


Figure 287. Proposition de tracé pour la relocalisation de la route 138 dans le secteur ouest (tirée de Corriveau et al., 2016)

Le secteur centre est caractérisé par une long cordon sableux longitudinal se situant à la limite des basses mers et agissant comme une barre de déferlement (Ross et Long, 1989). Ce secteur est aussi formé par une plage assez large ainsi qu'une large terrasse de plage (figure 288). Dans le secteur centre, la limite supérieure de la projection d'évolution côtière pour l'horizon 2060 réalisée par Corriveau et al. (2016) arrive près de la route 138 sans l'atteindre. Immédiatement à l'ouest de ce secteur, le bilan a été plutôt positif récemment et on constate une tendance à l'engraissement de la plage en direction de l'est, soit dans le sens de la dérive littorale (figure 183). Toutefois, immédiatement en aval de la zone d'accumulation, où la route 138 est la plus proche de la côte, la plage est très étroite et des reculs importants du trait de côte sont enregistrés. La nouvelle méthode de projection utilisée donne des résultats un peu moins sévère que celle utilisée par Corriveau et al., (2016), avec un recul maximal de 48 m pour l'horizon 2050 (figure 184). Même si à long terme la relocalisation de la route est souhaitable, la meilleure solution à court terme en raison du transit et des apports sédimentaires importants serait la mise en place d'un système d'épis de bois. Un système d'épi central avec des épis transversaux à la manière des épis Maltais-Savard est à préconiser pour briser les courants de retour. À la lumière des résultats des analyses des profils de plage, le mois de juin constitue le meilleur moment pour implanter les épis pour bénéficier d'une recharge sédimentaire naturelle optimale.



Figure 288. Barre de déferlement dans le secteur centre, septembre 2017

6 OBJECTIF 5 : TRANSFERT DES CONNAISSANCES VERS LES RESSOURCES DU MINISTERE DES TRANSPORTS DU QUEBEC

Il est prévu dans le cadre du projet d'assurer le transfert des connaissances vers les ressources du ministère des Transports du Québec. À cet effet, une réunion finale de présentation des résultats est prévue avec les directions concernées par le projet afin d'assurer le transfert des connaissances, résultats et livrables numériques du projet aux utilisateurs du Ministère. La liste des livrables numériques ayant été remis est présentée à l'annexe M.

7 CONCLUSIONS GENERALES

7.1 Conclusion objectif 1

Le travail réalisé pour répondre à l'objectif de localisation, de cartographie et de caractérisation des foyers d'érosion de la Côte-Nord a été effectué à partir de la définition et de la typologie de Kraus et Galgano (2001). La consultation de la littérature scientifique, la connaissance du territoire côtier du Québec maritime par les auteurs et l'analyse des dix sites d'étude répartis sur quatre secteurs ont permis d'adapter la typologie originale. Le nombre de caractéristiques utilisé pour décrire les foyers d'érosion a été augmenté et six types de foyers d'érosion ont été ajoutés.

La localisation des foyers d'érosion a été effectuée à partir des données récentes issues du réseau de suivi de l'érosion côtière du LDGIZC (2000-2015). Cette approche permet l'identification des segments côtiers qui ont enregistré des vitesses de recul supérieures aux côtes adjacentes. Après avoir été considérés spatialement, ceux-ci ont été étudiés selon une perspective temporelle grâce à l'analyse historique. Cette analyse a permis de connaître les taux d'évolution historiques, les taux d'évolution par intervalle (entre deux dates) et l'enveloppe de mobilité historique pour chacun des sites d'étude. L'analyse historique constitue aussi la base nécessaire à la réalisation de projections d'évolution côtière selon une approche empirique (objectif 2).

Les données d'évolution historiques ont aussi été comparées aux données d'évolution récentes mesurées *in situ* (2000-2015). Ceci a permis d'observer que des vitesses d'évolution historiques avaient parfois été plus rapides dans le passé (intervalles récents comme anciens). Il s'agit notamment du cas de Gallix 1 et 2, de Longue-Pointe-de-Mingan 1 et 2 et de Sept-Îles. Cette observation soulève l'importance de considérer les données historiques pour déterminer adéquatement les vitesses de recul les plus rapides pouvant être observées sur le littoral d'un foyer d'érosion.

Les résultats des analyses historiques ont permis de soulever la question de la mobilité des foyers d'érosion. En effet, les vitesses de recul les plus rapides ne sont pas toujours localisées aux mêmes endroits exactement. Aussi, il a été observé que les zones enregistrant récemment des vitesses de recul très élevées s'inscrivaient, dans certains cas, dans une continuité historique (tendance généralisée à l'érosion) (par ex., Longue-Pointe-de-Mingan 1). Dans d'autres cas, les vitesses de recul très élevées marquaient parfois un changement de tendance par rapport à un historique d'évolution positive

(accumulation) (par ex., Gallix 2) ou alors, s'inscrivaient dans un mode d'évolution cyclique (par ex. Moisie 1).

À la lumière de ces observations et résultats, il est suggéré d'intégrer la composante temporelle grâce aux données d'évolution historiques à la typologie et à la cartographie des foyers d'érosion pour les projets subséquents. Cette approche implique donc que des foyers d'érosion non récents (c'est-à-dire, non visibles avec les mesures du réseau de suivi de l'érosion côtière) puissent être ajoutés. L'analyse des foyers d'érosion récents et historiques permettrait d'étudier plus en profondeur la mobilité des foyers d'érosion de même que d'identifier les conditions géomorphologiques qui favorisent leur apparition, leurs déplacements ou leur disparition. Ce type d'analyse intégrée spatiale-temporelle devrait être effectué au moins à l'échelle de la cellule hydrosédimentaire.

7.2 Conclusion objectif 2

Le travail réalisé pour répondre à l'objectif d'intégration de la dynamique des foyers d'érosion dans les projections d'évolution côtière a débuté avec une importante revue de la méthode empirique de projections d'évolution côtière. Le concept de base, l'équation de base, les indicateurs géomorphologiques pour le positionnement des lignes de rivage, les méthodes statistiques de calcul des taux d'évolution historiques et les périodes sur lesquelles sont calculés ces taux ont été décrits. L'impact du choix de la méthode statistique et de la période de calcul sur les taux d'évolution obtenus a été quantifié et jugé important.

La réalisation de projections d'évolution côtière vers l'horizon 2050 pour quatre sites d'étude a permis de mettre en lumière que les choix méthodologiques préalables à la réalisation des projections doivent reposer sur une analyse historique et sur l'état actuel de la côte. Bien que la méthode OLS (*ordinary least square*) et le calcul des taux sur une période récente s'approchant des conditions climatiques futures soient, à la base, privilégiés les choix finaux se sont avérés différents pour chacun des sites d'étude. Il a été conclu que l'application uniforme d'une méthodologie unique menant à la réalisation de projection d'évolution côtière pour de vastes territoires d'étude ne devrait pas être envisagée.

Par rapport aux dernières méthodes de projection d'évolution côtière utilisées sur la Côte-Nord, les éléments apportés dans ce projet ont permis, et permettrons, de réaliser des projections améliorées. Néanmoins, malgré tous

les efforts déployés pour réaliser des projections de grande qualité, nous avons été confrontés à des limites importantes notamment lorsque le littoral avait subi des changements environnementaux récents. Dans une perspective d'aménagement du territoire, les projections d'évolution côtière ne doivent donc pas être l'unique élément sur lequel sont basées les décisions de gestion et d'aménagement du territoire côtier.

La revue de la littérature a permis d'identifier un certain nombre de méthodes d'ajustement des taux ou de l'équation de base, notamment pour tenir compte de l'évolution du niveau de la mer. Aussi, différentes variables cartographiques complémentaires méritent d'être ajoutées aux cartes de projections d'évolution côtière. Dans le cadre de ce projet, l'enveloppe de mobilité a été ajoutée aux cartes afin de localiser les territoires ayant déjà été touchés par le déplacement de la ligne de rivage durant la période d'analyse. Aussi, la zone d'erreur quadratique moyenne a été ajoutée à la ligne de rivage projetée. L'objectif de cette zone est de représenter cartographiquement la variabilité de la position de la ligne de rivage observée autour de la tendance historique ayant été calculée. Enfin, le développement d'une ligne (nommée Rmax_5ans) a été réalisé afin de représenter les zones d'érosion sévère et donc d'intégrer les foyers d'érosion côtière aux projections. Il s'agit d'une ligne qui représente la position de la ligne de rivage si la vitesse de recul la plus sévère ayant été mesurée au cours de la période historique était de nouveau atteinte et maintenue sur une période de 5 ans (la ligne Rmax_5ans). Cette ligne de rivage n'est pas une projection proprement dite de la position de la ligne de rivage dans 5 ans. En effet, compte tenu de la mobilité des foyers d'érosion, il est à peu près impossible que tout le littoral entre dans une période de recul intense en même temps pour une durée de 5 ans. Par contre, cette approche permet de tenir compte de la variabilité spatiale et temporelle des foyers d'érosion et d'intégrer une donnée cartographique aux projections qui permette d'en tenir compte dans une perspective de gestion et d'aménagement du territoire côtier.

7.3 Conclusion objectif 3

L'origine des foyers d'érosion de Longue-Pointe-de-Mingan peut être associée à l'importante dynamique morphosédimentaire que l'on y observe. Cette dynamique a été caractérisée au moyen de levés topographiques par profils de plage et au moyen de levés Lidar terrestres. Essentiellement, on observe plusieurs changements morphologiques pour la grande majorité des périodes interrelevés analysées tant dans le secteur ouest que centre. Sur plusieurs des

MNT produits dans le cadre de ce projet, on peut également observer la migration entre les périodes de cordons de bas estran et de barres prélittorales témoignant d'une dynamique sédimentaire longitudinale et perpendiculaire importante. Cette dynamique influence directement la morphologie de la plage et son bilan sédimentaire, qui à leur tour influence la vitesse de recul du trait de côte. La présence de courants de retour localement contribue à maintenir des secteurs de plage déficitaire et favorise la formation de foyer d'érosion. Des levés multifaisceaux seraient nécessaires pour évaluer la relation entre les barres d'avant-côte et celles en zone prélittorale peu profonde et ainsi mieux comprendre la répartition spatiale des courants de retour.

Des capteurs de pression ont été déployés sur la plage de Longue-Pointe-de-Mingan à la flexure et à la limite inférieure du bas estran, dans les secteurs ouest et centre. De plus, un profileur de courant muni d'un capteur de houle a été déployé au large du site d'étude. Les données de niveaux d'eau, de hauteurs significatives de vagues et de leurs directions (au large seulement) ont été analysées pour caractériser le climat de vagues tant à la côte qu'au large. L'analyse des caractéristiques des vagues a montré que les valeurs de hauteur de vagues sont plus élevées en automne. Tant à la côte qu'au large, la hauteur des vagues, et par conséquent des niveaux d'eau totaux, est moindre durant la période estivale.

La mesure des vagues étant possible au large en hiver, celles-ci sont encore plus élevées durant cette période. Dans un contexte de changement climatique, la diminution de la protection des côtes par la glace côtière est susceptible d'exposer la côte non seulement plus longtemps aux processus hydrodynamiques, mais également à des vagues encore plus importantes.

L'analyse de la direction des vagues au large indique que celles-ci proviennent majoritairement de l'ouest, mais que les vagues les plus fortes (Hs supérieure au 95^{e} percentile) proviennent plutôt de l'ouest-sud-ouest. La classification de l'orientation des vagues montre que les vagues les plus fortes ont un angle d'incidence plus oblique par rapport à la côte, ce qui est susceptible de favoriser le transit sédimentaire et d'affecter la morphologie de la plage.

7.4 Conclusion objectif 4

L'objectif 4 consistait à évaluer les solutions d'adaptation en regard de l'évolution de la dynamique côtière depuis la formulation de recommandations en 2016. On constate, à la lumière des résultats, que la falaise sablonneuse en bordure du secteur ouest a poursuivi son recul. La plage en bordure du

ponceau enroché présente toujours un bilan sédimentaire négatif, une pente plus abrupte et une plage plus étroite que les secteurs adjacents et un recul de la côte plus important. La recommandation de relocaliser vers l'intérieur des terres le segment routier en bordure du secteur ouest demeure la solution la plus adaptée à la dynamique côtière. Pour le secteur centre, on constate que la nouvelle méthode de calcul des projections côtières génère des vitesses de recul plus faibles. Dans ce contexte, à court terme, l'implantation d'un système d'épis constituerait une solution adaptée à ce milieu avec un fort transit sédimentaire et des apports sédimentaires non négligeables. Les mesures effectuées dans ce projet pourraient servir à calibrer la hauteur et la longueur des épis ainsi que le nombre d'épi nécessaire, la distance entre chaque épi et leur orientation.

8 REFERENCE

ANDERSON, T. R., FLETCHER, C. H., BARBEE, M. M., FRAZER, L. N. et ROMINE, B. M. 2015. Doubling of coastal erosion under rising sea level by mid-century in Hawaii. Natural Hazards, 78(1), 75-103.

AUBREY, D. G., et ROSS, R. M. 1985. The quantitative description of beach cycles. Marine Geology, 69(1-2), 155-170.

BATTJES, J. A. 1971. Run-up distributions of waves breaking on slopes. Journal of Waterways and Harbors Division, 97(Paper 7923).

BAMASOUD, A. et BYRNE, M. L. 2013. The predictive accuracy of shoreline change rate methods in Point Pelee, Canada. Journal of Great Lakes Research, 39(1), 173-181.

BENEDET, L., FINKL, C. W. et HARTOG, W. M. 2007. Processes controlling development of erosional hot spots on a beach nourishment project. Journal of Coastal Research, 23(1), 33-48.

BERNATCHEZ, P., 2003. Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 460 p.

BERNATCHEZ, P. et DUBOIS, J. M. 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. Géographie physique et Quaternaire, 58(1), 45-71.

BERNATCHEZ P. et S. DREJZA. 2015. Réseau de suivi de l'érosion côtière du Québec maritime - Guide pour les utilisateurs. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières et Chaire de recherche en géoscience côtière. Université du Québec à Rimouski, octobre 2015, 52 p.

BERNATCHEZ, P., et FRASER, C. 2011. Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada. Journal of coastal research, 28(6), 1550-1566.

BERNATCHEZ, P., FRASER, C., FRIESINGER, S., JOLIVET, Y., DUGAS, S., DREJZA, S. et MORISSETTE, A. 2008. Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones

côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.

BERNATCHEZ, P., FRASER, C., DUGAS, S. et DREJZA, S. 2012a. Marges de sécurité en érosion côtière : évolution historique et future du littoral de la MRC d'Avignon. 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, août 2012, 49 p. et annexes.

BERNATCHEZ, P., FRIESINGER, S., DENIS, C. et Y. JOLIVET, 2012b. Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté de Uashat mak Mani-Utenam dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des Affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 239 pages.

BERNATCHEZ, P., QUINTIN, C., FRASER, C., NEUMEIER, U., JOLIVET, Y., HOUDE-POIRIER, M., HÉTU, B., GIBEAULT, C., BOUCHER-BROSSARD, G. et MARIE, G. 2013. Dynamique de l'écosystème côtier de la péninsule de Penouille dans un contexte de changements climatiques, Parc national du Canada Forillon : Rapport final. Rapport remis au Parc national du Canada Forillon. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, mai 2013, 410 p.

BERNATCHEZ, P., DUGAS, S., FRASER, C., DA SILVA, L. 2015. Évaluation économique des impacts potentiels de l'érosion des côtes du Québec maritime dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis à Ouranos, 45 p. et annexes.

BIRD E., 2008. Coastal Geomorphology, An Introduction, Second Edition, John Willey & Sons Ltd. Imprimé à Chippenham (Angleterre). 411 p.

BOAK, E. et TURNER, I. 2005. Shoreline definition and detection: A review, Journal of coastal research, 214: 688-703.

BOUCHER-BROSSARD, G. et BERNATCHEZ, P. 2013. Analyse historique et récente de l'érosion du talus côtier, secteur des Cayes, municipalité de Rivière-Saint-Jean, Côte-Nord. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au ministère des Transports du Québec, Direction de la Côte-Nord, 37 p.

BURNINGHAM, H., et FRENCH, J. 2017. Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. Geomorphology, 282, 131-149.

BRETEL, P., FROIDEVAL, L., MONFORT, O. et LEVOY, F. 2013. Coastline identification from airborne lidar surveys : a multicriteria approach, Coastal Dynamic's 13, Archchoin, France, 2013

BRUUN, P. 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. Journal of the Waterways and Harbors division, 88(1), 117-132.

BURNINGHAM, H., et FRENCH, J. 2017. Understanding coastal change using shoreline trend analysis supported by cluster-based segmentation. Geomorphology, 282, 131-149.

CATALIOTTI-VALDINA, D. et LONG, B. F., 1983. Évolution du débit liquide et de la charge d'un estuaire sub-boréal: Rivière Saint-Jean. Canadian Journal of Earth Sciences, 20: 184-194.

CENCI, L., DISPERATI, L., SOUSA, L. P., PHILLIPS, M. et ALVE, F. L. 2013. Geomatics for Integrated Coastal Zone Management: multitemporal shoreline analysis and future regional perspective for the Portuguese Central Region. Journal of Coastal Research, 65(sp2), 1349-1354.

CENCI, L., PERSICHILLO, M. G., DISPERATI, L., OLIVEIRA, E. R., ALVES, F. L., PULVIRENTI, L., REBORA, N., BONI, G. et PHILLIPS, M. 2015. Remote sensing for coastal risk reduction purposes: Optical and microwave data fusion for shoreline evolution monitoring and modelling. In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015, July, IEEE International (pp. 1417-1420). IEEE.

CHARLES, E., 2012. Impact du changement climatique sur le climat de vagues en zone côtière, par régionalisation dynamique : application à la côte aquitaine. Thèse doctorale Océanographie. Université Toulouse III - Paul Sabatier, 2012. Français.

COHN, N., RUGGIERO, P., de VRIES, S., et GARCÍA-MEDINA, G. 2017. Beach growth driven by intertidal sandbar welding. In Proceedings of the Coastal Dynamics Conference (pp. 1059-1069).

COOPER, N. J., LEGGETT, D. J., et Lowe, J. P. 2000. Beach-Profile Measurement, Theory and Analysis: Practical Guidance and Applied Case Studies. Water and Environment Journal, 14(2), 79-88.

CORRIVEAU, M., FRASER, C., CARON, T., BERNATCHEZ, P., BUFFIN-BÉLANGER, T. et VAN-WIERTS, S., 2016. Étude de la dynamique morphosédimentaire des côtes basses sablonneuses en bordure de la route 138 sur la Côte-Nord du Saint-Laurent en contexte de changements climatiques : Rapport final. Projet X016.1. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère des Transports du Québec, Mars 2016, 421 p. + annexes.

CRAPOULET, A., HÉQUETTE, A., LEVOY, F. et BRETEL, P., 2015. Évaluation de l'évolution du trait de côte et du bilan sédimentaire littoral en baie de Wissant (nord de la France) par LiDAR aéroporté. Géomorphologie: relief, processus, environnement, 21(4), 313-330.

CROWELL, M., DOUGLAS, B. C. et LEATHERMAN, S. P. 1997. On forecasting future US shoreline positions: a test of algorithms. Journal of Coastal Research, 1245-1255.

CROWELL, M., HONEYCUTT, M., et HATHEWAY, D. 1999. Coastal erosion hazards study: phase one mapping. Journal of Coastal Research, 10-20.

DAIGLE, R. 2006. Impacts de l'élévation du niveau de la mer et du changement climatique sur la zone côtière du sud-est du Nouveau-Brunswick. . Environnement Canada, 644 p.

DAVIDSON, M. A. et TURNER, I. L. 2009. A behavioral template beach profile model for predicting seasonal to interannual shoreline evolution. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 114 (F1).

DAVIDSON, M. A., SPLINTER, K. D., & TURNER, I. L. 2013. A simple equilibrium model for predicting shoreline change. Coastal Engineering, 73, 191-202.

DAVIDSON-ARNOTT, R. G. 2005. Conceptual model of the effects of sea level rise on sandy coasts. Journal of Coastal Research, 1166-1172.

DEAN, R. G., et MALAKAR, S. B. 1999. Projected flood hazard zones in Florida. Journal of Coastal Research, 85-94.

DIDIER, D., BERNATCHEZ, P., AUGEREAU, E., CAULET, C., DUMONT, D., BISMUTH, E., CORMIER, L., FLOC'H, F., et DELACOURT, C. 2017. LiDAR Validation of a Video-Derived Beachface Topography on a Tidal Flat. Remote Sensing, 9(8), 826.

DIDIER, D., LALANNE, P.-A., CORMIER, L., et BERNATCHEZ, P. 2017. Suivi environnemental des côtes du Québec maritime (2016-2019) : rapport de gestion des instruments. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, mars 2017, 45 p.

DOLAN, R., FENSTER, M. S. et HOLME, S. J. 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. Journal of coastal research, 723-744.

DOLAN, R., TROSSBACH, S., et BUCKLEY, M. 1990. New shoreline erosion data for the Mid-Atlantic Coast. Journal of Coastal Research, 471-477.

DOUGLAS, B. C., et CROWELL, M. 2000. Long-term shoreline position prediction and error propagation. Journal of Coastal Research, 145-152.

DOUGLAS, B. C., CROWELL, M., et LEATHERMAN, S. P. 1998. Considerations for shoreline position prediction. Journal of Coastal Research, 1025-1033.

DUBOIS, J.-M. M., BERNATCHEZ, P., BOUCHARD, J.-D., DAIGNEAULT, B., CAYER, D. et DUGAS, S. 2005. Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003. Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 pages, annexes.

FALQUÉS, A., CALVETE, D., ET RIBAS, F. 2011. Shoreline Instability due to Very Oblique Wave Incidence: Some Remarks on the Physics. Journal of Coastal Research, 27-2 p.291-295

FENSTER, M. S., DOLAN, R. et ELDER, J. F. 1993. A new method for predicting shoreline positions from historical data. Journal of Coastal Research, 147-171.

FENSTER, M. S., DOLAN, R. et MORTON, R. A. 2001. Coastal storms and shoreline change: signal or noise?. Journal of Coastal Research, 714-720.

FERREIRA, O., GARCIA, T., MATIAS, A., TABORDA, R. et DIAS, J. A. 2006. An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. Continental shelf research, 26(9), 1030-1044.

GALGANO, F. A., DOUGLAS, B. C. et LEATHERMAN, S. P. 1998. Trends and variability of shoreline position. Journal of Coastal Research, 282-291.

GENZ, A. S., FLETCHER, C. H., DUNN, R. A., FRAZER, L. N. et ROONEY, J. J. 2007. The predictive accuracy of shoreline change rate methods and

alongshore beach variation on Maui, Hawaii. Journal of Coastal Research, 87-105.

GONCALVES, R. M., AWANGE, J. L., KRUEGER, C. P., HECK, B. et DOS SANTOS COELHO, L. 2012. A comparison between three short-term shoreline prediction models. Ocean & Coastal Management, 69, 102-110.

GRENIER, A. et DUBOIS, J.-M.M. 1992. Évolution littorale récente par télédétection: synthèse méthodologique. Photo-interprétation. n. 1990-6. p. 3-16.

HONEYCUTT, M. G., CROWELL, M. et DOUGLAS, B. C. 2001. Shoreline-position forecasting: impact of storms, rate-calculation methodologies, and temporal scales. Journal of Coastal Research, 721-730.

JACKSON Jr, C. W., ALEXANDER, C. R. et BUSH, D. M. 2012. Application of the AMBUR R package for spatio-temporal analysis of shoreline change: Jekyll Island, Georgia, USA. Computers & Geosciences, 41, 199-207.

JACKSON, D. W., COOPER, J. A. G., O'CONNOR, M., GUISADO-PINTADO, E., LOUREIRO, C., et ANFUSO, G. 2016. Field measurements of intertidal bar evolution on a high-energy beach system. Earth Surface Processes and Landforms, 41(8), 1107-1114.

JONAH, F. E. 2015. Managing coastal erosion hotspots along the Elmina, Cape Coast and Moree area of Ghana. Ocean & Coastal Management, 109, 9-16.

KING, C. A. M., et WILLIAMS, W. W. 1949. The formation and movement of sand bars by wave action. The Geographical Journal, 113, 70-85.

KRAUS, N. C. et GALGANO, F. A. 2001. Beach erosional hot spots: types, causes, and solutions. Engineer research and development center Vicksburg ms coastal and hydraulics lab.

KRAUS, N. C. et MCDOUGAL, W. G. 1996. The effects of seawalls on the beach: Part I, an updated literature review. Journal of coastal research, 691-701.

KRIEBEL, D. L., et DEAN, R. G. 1993. Convolution method for time-dependent beach-profile response. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 119(2), 204-226.

KROON, A., et MASSELINK, G. 2002. Morphodynamics of intertidal bar morphology on a macrotidal beach under low-energy wave conditions, North Lincolnshire, England. Marine geology, 190(3-4), 591-608.

LARSON, M. 1988 Quantification of beach profile change. LUND UNIV (SWEDEN) DEPT OF WATER RESOURCES ENGINEERING.

LARSON, M., et KRAUS, N. C. 1992. Analysis of cross-shore movement of natural longshore bars and material placed to create longshore bars (No. CERC-DRP-92-5). COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER VICKSBURG MS.

LARSON, M., ERIKSON, L., et HANSON, H. 2004. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. Coastal Engineering, 51(8-9), 675-696.

LIPPMANN, T. C., et HOLMAN, R. A. 1990. The spatial and temporal variability of sand bar morphology. Journal of Geophysical Research: Oceans, 95(C7), 11575-11590.

LIST, J. H., FARRIS, A. S., et SULLIVAN, C. 2006. Reversing storm hotspots on sandy beaches: spatial and temporal characteristics. Marine Geology, 226(3), 261-279.

LÓPEZ-DÓRIGA, U., et FERREIRA, Ó. 2017. Longshore and Cross-Shore Morphological Variability of a Berm–Bar System under Low to Moderate Wave Energy. Journal of Coastal Research, 33(5), 1161-1171.

MAITI, S., et BHATTACHARYA, A. K. 2009. Shoreline change analysis and its application to prediction: a remote sensing and statistics based approach. Marine Geology, 257(1-4), 11-23.

MASSELINK, G., KROON, A., et DAVIDSON-ARNOTT, R. G. D. 2006. Morphodynamics of intertidal bars in wave-dominated coastal settings—a review. Geomorphology, 73(1-2), 33-49.

MILLER, J. K., et DEAN, R. G. 2004. A simple new shoreline change model. Coastal Engineering, 51(7), 531-556.

MOIGN, Y., 1972. Étude dynamique d'une plage subarctique : Sept-Îles. Thèse de doctorat, Brest, Université de Bretagne Occidentale, 303 p.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL. 1990. Managing coastal erosion. National Academies Press.

NICHOLLS, RJ, WONG, PP, BURKETT, VR, CODIGNOTTO, J, HAY, J, MCLEAN, R, RAGOONADEN, S, et WOODROFFE, CD. 2007. Coastal systems and low-lying areas, in Parry, ML, Canziani, OF, Palutikof, JP, van der Linden, PJ, and Hanson, CE (ed) Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2007, 315-356.

PHILLIPS, M. S., HARLEY, M. D., TURNER, I. L., SPLINTER, K. D., et COX, R. J. 2017. Shoreline recovery on wave-dominated sandy coastlines: the role of sandbar morphodynamics and nearshore wave parameters. Marine Geology, 385, 146-159.

PILKEY, O. H., et COOPER, J. A. G. 2004. Society and sea level rise. Science, 303(5665), 1781-1782.

RAHMSTORF, S. 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science, 315(5810), 368-370.

RANASINGHE, R., CALLAGHAN, D. et STIVE, M. J. 2012. Estimating coastal recession due to sea level rise: beyond the Bruun rule. Climatic Change, 110(3-4), 561-574.

ROSS, N. et LONG, B., 1989. Évolution morpho-sédimentaire de la barre de déferlement: un exemple dans le golfe du Saint-Laurent, Québec, Géographie physique et quaternaire, 43(3), 377-388.

SCHWARTZ, M. (Ed.). 2006. Encyclopedia of coastal science. Springer Science & Business Media.

SCOTT, T., MASSELINK, G., et RUSSELL, P. 2011. Morphodynamic characteristics and classification of beaches in England and Wales. Marine Geology, 286(1-4), 1-20.

SENNEVILLE, S. et SAUCIER, F. J., 2007. Étude de la sensibilité de la glace de mer au réchauffement climatique dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent, Rapport préparé pour Ouranos et soumis le 30 octobre 2006.

SENNEVILLE, S., ST-ONGE DROUIN, S., DUMONT, D., BIHAN-POUDEC, A.-C., BELEMAALEM, Z., CORRIVEAU, M., BERNATCHEZ, P., BÉLANGER, S. TOLSZCZUK-LECLERC, S. et VILLENEUVE, R. 2014, « Rapport final : modélisation des glaces dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent dans la perspective des changements climatiques », ISMER-UQAR, Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec, pp 384.

SMITH, G. L. et ZARILLO, G. A. 1990. Calculating long-term shoreline recession rates using aerial photographic and beach profiling techniques. Journal of Coastal Research, 111-120.

SPIRANDELLI, D. J., ANDERSON, T. R., PORRO, R., et FLETCHER, C. H. 2016. Improving Adaptation Planning for Future Sea-Level Rise: Understanding Uncertainty and Risks Using a Probability-Based Shoreline Model. Journal of Planning Education and Research, 36(3), 290-303.

SPLINTER, K. D., GONZALEZ, M. V., OLTMAN-SHAY, J., RUTTEN, J., et HOLMAN, R. 2018. Observations and modelling of shoreline and multiple sandbar behaviour on a high-energy meso-tidal beach. Continental Shelf Research, 159, 33-45.

TESSIER, B., 1987. Système de barres sableuses sur la Moyenne côte-Nord du Saint-Laurent : formation et modélisation. Mémoire et maîtrise. UQAR, 339 p.

THIELER, E. R., HIMMELSTOSS, E. A., ZICHICHI, J. L. et ERGUL, A. 2009. The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-an ArcGIS extension for calculating shoreline change (No. 2008-1278). US Geological Survey.

THOMAS, T., PHILLIPS, M. R., WILLIAMS, A. T., et JENKINS, R. E. 2011. A multi- century record of linked nearshore and coastal change. Earth Surface Processes and Landforms, 36(8), 995-1006.

TOUE, T. et WANG, H. 1991. Three dimensional effects of seawall on the adjacent beach. In Coastal Engineering 1990 (pp. 2782-2795).

VAN-Wierts, S., BERNATCHEZ, P., et LAROUCHE, C. 2017. Suivi topographique côtier au moyen d'un système LiDAR mobile terrestre: exemple d'une recharge sédimentaire de plage. GEOMATICA, 71(4), 194-212.

VERMEER, M. et RAHMSTORF, S. 2009. Global sea level linked to global temperature. Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(51), 21527-21532.

WALKDEN, M. et DICKSON, M. 2006. The response of soft rock shore profiles to increased sea-level rise. Tyngall Centre for Climate Change Research Working Paper, 105, 16 p.

WALKDEN, M. J. et HALL, J. W. 2005. A predictive Mesoscale model of the erosion and profile development of soft rock shores. Coastal Engineering, 52(6), 535–563.

WALKDEN, M. J et HALL, J. W. 2011. A Mesoscale Predictive Model of the Evolution and Management of a Soft-Rock Coast. Journal of Coastal Research, 27(3), 529–543.

WALTON, T. L. et SENSABAUGH, W. 1979. Seawall design on the open coast.

WILLIAMS, A. et MICALLEF, A. 2011. Beach management: Principles and practice. Routledge.

WILLMOTT, C. J., et MATSUURA, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Climate research, 30(1), 79-82.

YU, J., et MEI, C. C. 2000. Do longshore bars shelter the shore?. Journal of Fluid Mechanics, 404, 251-268.