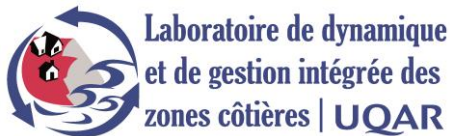


Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers (2014-2016) Rapport final

**Rapport remis
à la municipalité de Sainte-Luce**

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph. D.



Juin 2017



Direction et rédaction

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 1206 (laboratoire)

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

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

Équipe de recherche

Louis Cormier, B.Sc., Auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR

Levés terrain LiDAR et D-GPS, caméras de suivi et traitement des données

Stéphanie Van-Wiersts, M. Sc., LDGIZC, UQAR

Levés terrain LiDAR et D-GPS, traitement des données et rédaction

Nicholas Marion, B.Sc. Auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR

Levés terrain LiDAR, analyses sédimentologiques

Adrien Lambert, Ph. D. Professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR

Traitement des données de profils D-GPS

Simon Claveau, B.Sc., Auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR

Analyses sédimentologiques en laboratoire et assistant de terrain

Assistants de terrain : David Didier, Susan Drejza, Denys Dubuc, Steeve Dugas, Jean-David Dupuis, Myriane Houde-Poirier, Gabriel Ladouceur, Patrice Lapointe et Mathilde Lapointe Saint-Pierre

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

BERNATCHEZ, P. CORMIER, L., VAN-WIERTS, S., MARION N. 2017. *Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers (2014-2016) : rapport final*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis à la municipalité de Sainte-Luce, Juin 2017, 117 pages.

Photographie et image de la page de couverture : LDGIZC UQAR

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs du rapport	1
2. Description du site d'étude	2
3. Travaux de terrain.....	4
3.1 Données topographiques	4
3.1.1 Profils topographiques de la zone intertidale.....	5
3.1.2 Levé LiDAR terrestre	6
3.2 Granulométrie	9
3.3 Suivi photographique en continu.....	10
4. Traitement et analyse des données.....	11
4.1 Profils topographiques	11
4.2 Traitement des levés surfaciques de l'estran par le système mobile de laser terrestre	11
4.2.1 Processus du traitement des données.....	11
4.2.2 Calcul d'erreur du SMLT.....	13
4.2.3 Changements morphologiques.....	15
4.3 Granulométrie	17
5. Résultats et analyse	19
5.1 Suivi de la sédimentologie des sédiments de l'estran	19
5.2 Volume sédimentaire du haut estran	26
5.3 Évolution de la topographie et du volume sédimentaire de l'estran de l'anse aux Coques	29
5.3.1 Période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014	29
5.3.2 Période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014	31
5.3.3 Période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014	34
5.3.4 Période du 30 octobre 2014 au 12 juin 2015.....	36
5.3.5 Période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015.....	40
5.3.6 Période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015	42
5.3.7 Période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016.....	45
5.3.8 Période du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016.....	51
5.3.9 Période du 24 mai 2016 au 14 juin 2016	53
5.3.10 Période du 2 décembre 2015 au 17 novembre 2016	55
5.4 Synthèse des changements morphologiques de l'anse aux Coques à la suite de la recharge sédimentaire (octobre 2014 à novembre 2017).....	60
6. Données fournies	75
7. Conclusion.....	76
Références	77
ANNEXE 1 : Différence entre les profils topographiques du 30 octobre 2014 et le 17 novembre 2016 ...	79
ANNEXE 2 : Ensemble des profils topographiques réalisés du 30 octobre 2014 au 17 novembre 2017 (couverture totale incluant le bas estran)	86

ANNEXE 3 : Ensemble des profils topographiques de la plage (haut estran) réalisés du 30 octobre 2014 au 17 novembre 2017	99
ANNEXE 4 : Volume des différents compartiments pour chaque levé LiDAR	113

Liste des figures

Figure 1. Localisation du site d'étude de l'anse aux Coques	2
Figure 2. Localisation des profils topographiques réalisés au D-GPS entre le 30 octobre 2014 et le 17 novembre 2016	5
Figure 3. GPS-différentiel utilisé lors du projet à Sainte-Luce-sur-Mer (A) Récepteur de base R8 ; (B) Radio (Trimble HPB 430-450 MHz)	6
Figure 4. Système mobile de laser terrestre (A) Installation des instruments sur une plate-forme fixée derrière le véhicule (DMI, antennes GPS, Caméra, LiDAR, Génératrice) ; (B) Compartiment fermé à l'arrière contenant l'ordinateur, le multiplex, le PSC et un power supply ; (C) Le poste de contrôle est situé à l'avant du véhicule du côté passager et comprend un écran d'ordinateur et un clavier .	8
Figure 5. Localisation et vue des caméras de suivi installées à l'anse aux Coques	10
Figure 6. Workflow de l'acquisition et du traitement des données du SMLT	11
Figure 7. Propagation de l'erreur estimée XY et Z (σ) par le modèle de propagation Trimble (2013) en fonction de la distance (m) entre le véhicule et la cible	13
Figure 8. Aperçu du volume calculé entre la surface LiDAR et le niveau de référence pour une tranche 2D de l'estran	15
Figure 9. Échelle granulométrique utilisée par le logiciel GRADISTAT (modifiée de Udden (1914) et Wentworth (1922))	18
Figure 10. Échantillon prélevé directement dans la recharge en 2014	19
Figure 11. Texture des sédiments sur le haut estran en 2014	22
Figure 12. Vue d'ensemble du bas estran devant la recharge sédimentaire en 2014	23
Figure 13. Texture des sédiments typique du bas estran de l'anse aux Coques en 2014	23
Figure 14. Évolution sédimentologique du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2016. (Le R accolé à certains diagrammes indique que l'échantillon a été récolté directement sur la recharge sédimentaire)	24
Figure 15. Évolution sédimentologique du bas estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2016	25
Figure 16. Volume sédimentaire du haut estran (m^3/m^2) pour le secteur de la recharge sédimentaire (compartiments SL-03 à SL-15)	27
Figure 17. Volume sédimentaire (m^3/m) du haut estran calculé pour les 60 compartiments des 9 levés LiDAR	28
Figure 18. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014	30
Figure 19. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014	31
Figure 20. Évolution des travaux de recharge sédimentaire entre le 15 et le 23 octobre 2014 à l'anse aux Coques	31
Figure 21. Différentiels topographique et volumétrique de l'Anse-aux-Coques de la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2013	33
Figure 22. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014	34
Figure 23. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014	35
Figure 24. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015	36

Figure 25. Formation d'une encoche d'érosion sur le front de la recharge sédimentaire lors des hauts niveaux d'eau (2,45 m) du 24 novembre 2014.....	36
Figure 26. Photographies des caméras de suivi lors de hauts niveaux d'eau mesurés durant l'hiver 2014-2015	37
Figure 27. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015	38
Figure 28. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015	39
Figure 29. Évolution du profil D-GPS P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015	39
Figure 30. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015	40
Figure 31. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015	41
Figure 32. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015	42
Figure 33. Niveau d'eau atteint lors de la tempête du 29 octobre 2015 à l'anse aux Coques	43
Figure 34. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015	44
Figure 35. Évolution du profil D-GPS P-12 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015	44
Figure 36. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016	45
Figure 37. Localisation de points ponctuels de franchissement des vagues répertoriés au GPS lors de la tempête du 11 janvier 2016 à l'anse aux Coques.....	46
Figure 38. Présence de galets sur la promenade de l'Anse-aux-Coques projetés lors de la tempête du 11 janvier 2016 (photographie prise le 12 janvier 2016).....	47
Figure 39. Nappe de jet de rive sur la promenade de l'Anse-aux-Coques lors de la tempête du 13 janvier 2016	48
Figure 40. Évolution du profil P-11 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015	49
Figure 41. Formation d'une encoche d'érosion sur la recharge sédimentaire entre le 2 novembre 2015 et le 16 janvier 2016	50
Figure 42. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016	51
Figure 43. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016	52
Figure 44. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 24 mai au 14 juin 2016	53
Figure 45. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 24 mai 2016 au 14 juin 2016	54
Figure 46. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 14 juin 2016 au 17 novembre 2016	55
Figure 47. Évolution du front de la recharge lors de la tempête du 16 novembre 2016 (caméra ouest) .	56
Figure 48. Évolution du front de la recharge lors de la tempête du 16 novembre 2016 (caméra centre) .	57
Figure 49. Évolution du front de la recharge lors de la tempête du 16 novembre 2016 (caméra est)	58
Figure 50. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 2 décembre 2015 et le 17 novembre 2016	59
Figure 51. Évolution du profil D-GPS P-12 entre le 2 décembre 2015 et le 17 novembre 2016	59
Figure 52. Diagrammes simplifiés présentant l'évolution sédimentologique du haut estran et du bas estran (2014 : bleu, 2015 : rouge, 2016 : orange).....	60
Figure 53. Évolution du D50 des échantillons de haut estran entre 2014 et 2016.....	61
Figure 54. Recul du front de la recharge entre octobre 2014 et janvier 2016	62

Figure 55. Élévation de l'estran en octobre 2014, position des émissaires pluviaux et limite du front de la recharge en janvier 2016	63
Figure 56. Déplacement du front de la recharge sédimentaire entre le 23 octobre 2014 et le 16 janvier 2016 et changements topographiques entre le 23 octobre 2014 et le 15 octobre 2015	64
Figure 57. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 23 octobre 2014 au 15 octobre 2015	66
Figure 58. Évolution des profils topographiques D-GPS P-04 et P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 2 décembre 2015	67
Figure 59. Évolution des profils topographiques D-GPS P-04 et P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 17 novembre 2016	68
Figure 60. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques entre le 23 octobre 2014 et le 14 juin 2016	69
Figure 61. Recul du front de la recharge entre 23 octobre 2014 et 14 juin 2016	70
Figure 62. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 17 novembre 2016 au 31 mars 2017	71
Figure 63. Impact de la tempête du 30 décembre 2016 sur la recharge sédimentaire (caméra ouest) ...	71
Figure 64. Impact de la tempête du 30 décembre 2016 sur la recharge sédimentaire (caméra centre) ..	72
Figure 65. Évolution des profils de plage entre le 11 août 2014 et le 12 juin 2017	74
Figure 66. Arborescence des dossiers fournis à la municipalité de Sainte-Luce dans le cadre du projet de suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce	75

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres des niveaux d'eau marégraphiques et géodésiques de la station de Rimouski	3
Tableau 2. Temps de retour des niveaux d'eau extrêmes selon la distribution de Gumbel	3
Tableau 3. Dates d'acquisition des données topographiques (LiDAR et D-GPS).....	4
Tableau 4. Performance du scanneur et des mesures du LiDAR Riegl VQ-250	7
Tableau 5. Erreur calculée pour chacun des levés LiDAR effectués entre 2012 et 2016 à l'anse aux Coques	14
Tableau 6. Erreur propagée pour les 8 surfaces de différentiels utilisées	16

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Dans l'optique de protection de la promenade en bordure de la plage située dans le secteur ouest de l'anse aux Coques, une recharge en sédiments grossiers a été effectuée en octobre 2014 sur une distance d'environ 500 mètres (figure 1). Par conséquent, l'objectif de la recharge n'était pas de restaurer la plage mais bien de constituer une infrastructure de protection pour soustraire le mur et la promenade de l'action des vagues. Dans le cadre de ce projet de recharge de la plage à Sainte-Luce-sur-Mer, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques a exigé de la municipalité de procéder à un suivi environnemental permettant d'effectuer des mesures précises et récurrentes de la topographie de la plage pour évaluer les impacts potentiels de l'intervention et son efficacité à contrer l'érosion. Dans le cadre de ce projet, le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) a été mandaté pour réaliser un suivi géomorphologique à haute résolution spatiale sur l'ensemble du site d'étude de l'anse aux Coques pour la période de 2014 à 2016.

1.2 Objectifs du rapport

Ce rapport final présente les résultats obtenus du suivi réalisé en 2014, 2015 et 2016 de la plage de l'anse aux Coques. Ce suivi a été principalement effectué à l'aide d'un système mobile de laser terrestre (SMLT), de profils topographiques effectués avec un D-GPS, d'échantillons granulométriques et de photographies issues de caméras de suivi de la côte.

Ce projet vise les objectifs spécifiques suivants :

- 1) effectuer des levés topographiques surfaciques à haute résolution spatiale de la plage à l'aide de levés LiDAR terrestre ;
- 2) établir un bilan sédimentaire biannuel et annuel de la surface suivie ;
- 3) réaliser une analyse des conditions météo-marines responsables des changements morphologiques de la plage et de la recharge.

2. Description du site d'étude

Le site d'étude se situe sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, dans la municipalité de Sainte-Luce dans la région du Bas-Saint-Laurent. Le secteur à l'étude est l'anse aux Coques, entre le quai et la pointe est de l'anse sur une distance d'environ 3 km linéaire (figure 1). La zone littorale de l'anse est principalement composée d'une plage à prédominance de sable et gravier qui repose sur des argiles glacio-marines de la Mer de Goldthwait. Des bancs sableux caractérisent le bas estran. Sur la pointe aux Coques, la plage à substrat meuble est quasi absente et la plate-forme rocheuse affleure sur l'ensemble de ce petit secteur. Un affleurement rocheux est aussi visible sur l'extrémité est de l'anse sur le bas estran. Environ au milieu de l'anse, un ruisseau s'écoule sur l'estran créant un petit delta subaquatique et une forte dynamique sédimentaire à cet endroit.

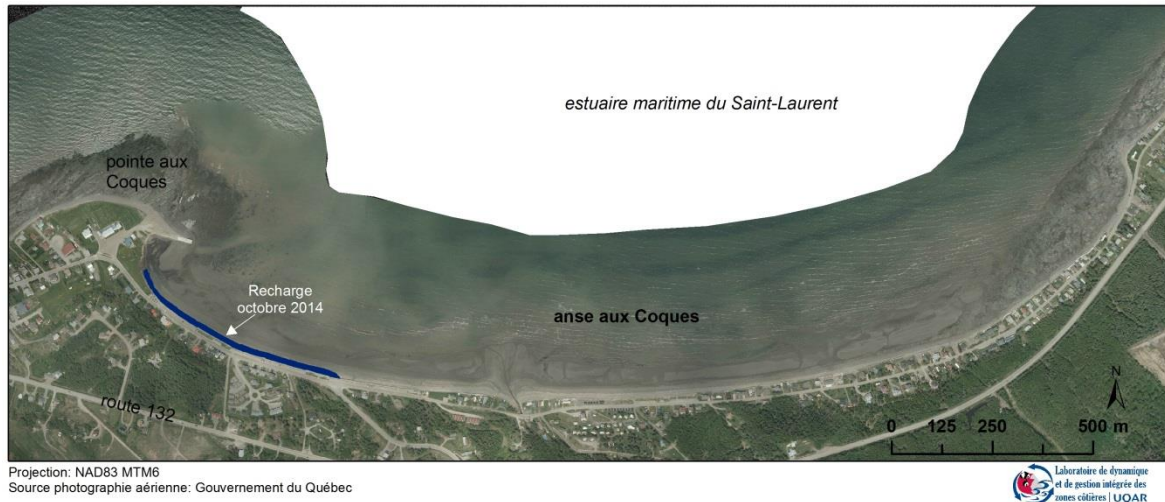


Figure 1. Localisation du site d'étude de l'anse aux Coques

Les données marégraphiques utilisées dans le cadre de ce projet et présentées au tableau 1 proviennent de la station de Rimouski du Service Hydrographique du Canada (SHC) (station n° 2985) qui est située à environ 15 kilomètres à l'ouest du site d'étude.

Tableau 1. Paramètres des niveaux d'eau marégraphiques et géodésiques de la station de Rimouski

Marée	Niveau marégraphique* (m)	Niveau géodésique (CGVD28) (m)
Pleines mers supérieures de grandes marées (PMSGM)	5,47	3,19
Pleines mers supérieures de marées moyennes (PMSMM)	4,8	2,52
Niveau moyen des mers (NMM)	2,3	0,02
Basses mers inférieures de marées moyennes (BMIMM)	0,7	-1,58
Basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM)	0,15	-2,13

*le niveau marégraphique correspond au zéro des cartes

Le temps de retour des niveaux d'eau extrêmes a été calculé à partir des données enregistrées à la station de Rimouski-Pointe-au-Père. La distribution de Gumbel a été utilisée pour le calcul (tableau 2).

Tableau 2. Temps de retour des niveaux d'eau extrêmes selon la distribution de Gumbel

Période de retour (années)	100	50	20	10	5	2	1.01
Niveau marégraphique (m)	5.4	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.8
Niveau géodésique (m)	3.15	3.08	2.97	2.90	2.81	2.69	2.49

3. Travaux de terrain

Les travaux de terrain se sont étendus d'août 2014 à novembre 2016. Toutefois, des levés LiDAR ont été réalisés en septembre 2012 et les résultats ont été intégrés à l'analyse. Les principales données acquises lors de ces levés terrain sont des données topographiques lors de levés LiDAR sur l'ensemble de l'anse aux Coques et de levés au D-GPS sur le site de la recharge sédimentaire. Des échantillons de sédiments ont été récoltés aux mêmes endroits sur l'estran en 2014, 2015 et 2016 afin de quantifier l'évolution sédimentologique à la suite de la mise en place de la recharge sédimentaire. Pour connaître les conditions météo-marines et les changements sur l'estran, des caméras de suivi ont été installées à l'automne 2014.

3.1 Données topographiques

Les levés topographiques ont été réalisés entre le 11 août 2014 et le 17 novembre 2016, avec un levé supplémentaire le 21 septembre 2012. Deux types de données topographiques ont été acquis, pour un total de 15 levés terrain (tableau 3). Les huit levés LiDAR permettent de suivre la variabilité morphologique de l'ensemble de la surface de l'anse aux Coques et quantifier le bilan sédimentaire. Ensuite, sept levés de profils topographiques permettent de suivre les changements sur le site de la recharge sédimentaire entre octobre 2014 et novembre 2016.

Tableau 3. Dates d'acquisition des données topographiques (LiDAR et D-GPS)

Date du levé	Type de levé	Couverture
21 septembre 2012	LiDAR	Anse-aux-Coques
11 août 2014	LiDAR	Anse-aux-Coques
23 octobre 2014	LiDAR	Anse-aux-Coques
30 octobre 2014	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
4 novembre 2014	LiDAR	Anse-aux-Coques
21 avril 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
12 juin 2015	LiDAR	Anse-aux-Coques
15 octobre 2015	LiDAR	Anse-aux-Coques
19 octobre 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
2 novembre 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
2 décembre 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
14 janvier 2016	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
24 mai 2016	LiDAR	Anse-aux-Coques
14 juin 2016	LiDAR	Anse-aux-Coques
17 novembre 2016	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)

3.1.1 Profils topographiques de la zone intertidale

Sur le site de la recharge sédimentaire, 13 profils de plage ont été réalisés au D-GPS à une fréquence de points de 0,5 m entre la ligne de rivage et la limite des basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM) (figure 2). Onze profils sont situés directement sur la recharge et 2 sont situés aux extrémités est et ouest. Un total de 91 profils de plage a été réalisé entre octobre 2014 et novembre 2016. La méthode des profils de plage est simple, mais elle est encore la plus utilisée dans la littérature pour connaître les changements morphologiques sur une plage (Baptista *et al.*, 2008 ; Dornbusch, 2010 ; Emery, 1961). Les principales limites morphologiques soit la ligne de rivage, la flexure séparant le haut et le bas estran et la base de la recharge sédimentaire sont notées afin d'assurer un suivi de ces limites. En complément aux levés topographiques LiDAR, les levés topographiques au D-GPS permettront de quantifier les changements morphologiques de la plage ainsi que d'identifier le déplacement des cordons de bas estran.

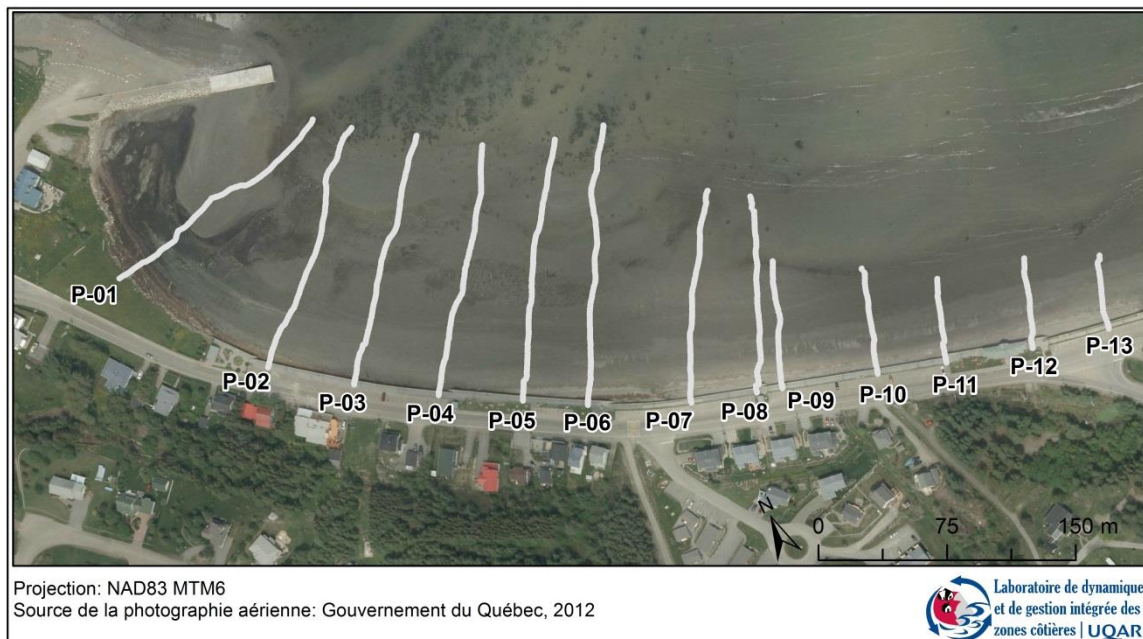


Figure 2. Localisation des profils topographiques réalisés au D-GPS entre le 30 octobre 2014 et le 17 novembre 2016

3.1.1.1 GPS-différentiel (D-GPS)

Le GPS-différentiel (D-GPS) utilisé est le Trimble R8 GNSS Modèle 3 incluant un émetteur/récepteur radio UHF interne de 430-450 MHz (figure 3A). Une radio Trimble HPB 430-450 MHz est utilisée en mode répétitrice, permettant de s'éloigner de 8 à 12 km de la base (figure 3B). La distance d'éloignement varie selon les conditions météorologiques et les particularités topographiques du secteur. Le récepteur permet la poursuite des constellations

GPS L2C et L5, GLONASS L1 et L2 ainsi que GALILEO (satellites expérimentaux GIOVE-A et GIOVE-B) autant pour le récepteur de base que pour le mobile. Le carnet d'acquisition utilisé est le TSC3. Lors des relevés, le GPS-différentiel est utilisé en deux modes distincts, *RTK* et *enregistrement*. Le mode *RTK* est utilisé pour les points de contrôle et permet la correction en temps réel. Le temps d'acquisition de chaque point est de 5 secondes. Les fichiers sont ensuite téléchargés directement en fichiers de forme (*shapefiles*) compatibles au logiciel ArcGIS. Le mode *enregistrement* est utilisé pour créer le fichier d'observation de la base du Système mobile de LiDAR terrestre (SMLT). Les profils de plage sont réalisés en mode *topo continu* qui permet d'acquérir un point automatique à 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 améliorer considérablement la rapidité du temps d'acquisition. Dans le cadre de ce projet, l'ensemble des données acquises au D-GPS sont référencées sur le système de projection planimétrique NAD83 MTM6 et le système altimétrique CGVD28 avec le modèle de géoïde HT2.0.

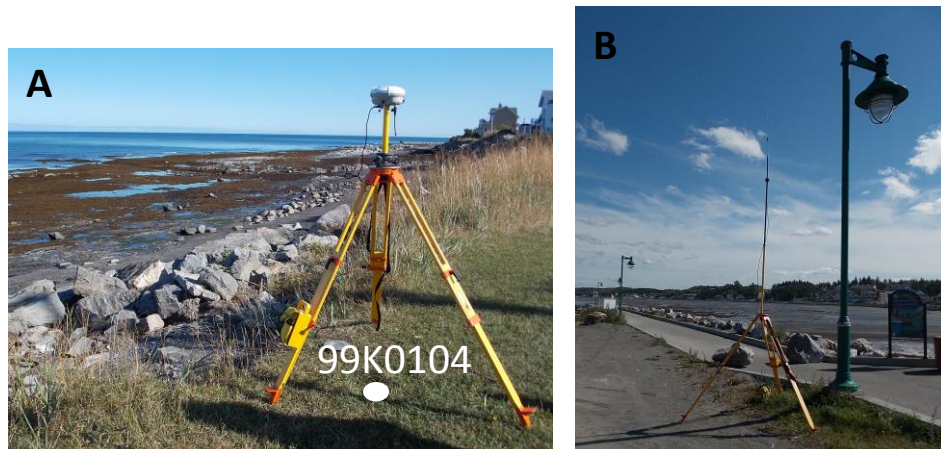


Figure 3. GPS-différentiel utilisé lors du projet à Sainte-Luce-sur-Mer (A) Récepteur de base R8 ; (B) Radio (Trimble HPB 430-450 MHz)

3.1.2 Levé LiDAR terrestre

3.1.2.1 Instrumentation du SMLT

Le système mobile de laser terrestre (SMLT) est constitué de trois principales composantes montées dans la boîte arrière d'un véhicule tout-terrain : un scanneur laser, une caméra et un système de navigation inertiel GPS-INS (figure 4A). Le balayeur laser est un Riegl VQ-250 qui a une couverture de 360 °. Ses caractéristiques techniques sont présentées au **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** (Riegl, 2012). La portée minimale est de 1,5 m et la portée maximale est de 130 m pour une surface réfléchive à 10 % et de 380 m pour une surface réfléchive à 80 % (Riegl, 2012). Une caméra est utilisée en complément au capteur laser afin d'aider à l'interprétation du nuage de points. La caméra à capteur CCD est la PointGrey

Grasshopper GRAS-50S5C-C à résolution de 2448 par 2048 pixels. Pour enregistrer les mouvements et la position du véhicule, un système de navigation inertiel GPS-INS est utilisé. Le système est composé d'un IMU-17 Applanix et du POS LV 220 Applanix. La précision de navigation en post-traitement évaluée par le fabricant est de 0,02 m pour le positionnement horizontal (X, Y), 0,05 m pour le positionnement vertical (Z), de 0,02 ° de roulis et tangage et de 0,025 ° pour l'angle d'azimut (Applanix, 2013). Ce système de navigation est composé de deux antennes GPS Trimble Zephyr model 2, d'une centrale inertielle (IMU) et d'un instrument de mesure de distance (DMI) (figure 4A). Les données GNSS brutes sont enregistrées dans un petit ordinateur appelé POS System Computer (PSC) (figure 4B). Deux antennes (primaire et secondaire) installées sur le véhicule à deux mètres de distance sont utilisées par le système GAMS (GNSS Azimuth Measurement Subsystem) afin d'augmenter la précision des données associées à la direction horizontale (azimut). Les constellations GPS et GLONASS sont utilisées. La centrale inertielle permet de corriger les angles de tangage, de roulis et de lacet. Pour corriger la trajectoire du système de navigation mobile par post-traitement des données GPS-INS, un récepteur de base statique Trimble R8 est positionné sur un point géodésique connu à moins de 15 km du site d'étude. Un DMI génère un certain nombre de pulsations à chaque rotation de la roue qu'il multiplie par un facteur d'échelle pour convertir les pulsations en distance parcourue en mètre. Le DMI est utilisé pour augmenter la précision du système ainsi qu'assurer la correction des données lors d'une courte perte de signal GPS ou GLONASS.

Tableau 4. Performance du scanneur et des mesures du LiDAR Riegl VQ-250

Performance du Laser Riegl VQ-250 (Riegl, 2012)	
Mécanisme	Miroir rotatif
Longueur d'onde	Proche infrarouge
Portée minimum	1.5m
Vitesse de scan	100 scans/sec
Fréquence maximum	300 000 mesures/sec
Résolution d'angle	0.001°
Exactitude	10mm
Précision	5mm
Résolution spatiale	7mm à l'ouverture
	18mm à 50m
	36mm à 100m
Température d'opération	-10°C à 40°C

Pour que le système inertiel mesure les mouvements des autres capteurs (laser et caméra), les instruments sont installés sur une seule structure en aluminium fixée par des joints anti-vibration dans la boîte arrière du véhicule tout-terrain (figure 4A). Les capteurs sont branchés à un ordinateur ainsi qu'à un multiplexeur Trimble M119 où converge l'information des différents instruments vers la plate-forme d'acquisition (figure 4B). Un poste de contrôle permet d'effectuer l'acquisition des données à partir des logiciels Trimble T3D CAM Capture, Trimble T3D Laser Capture et Applanix LV POS View (figure 4C). Le courant (power) provient d'une génératrice Honda 2000.

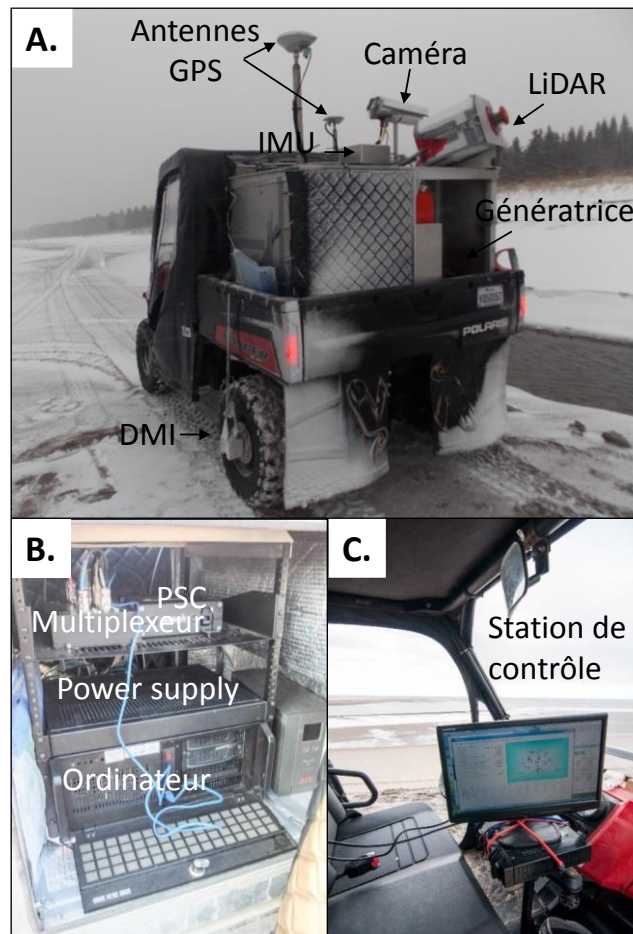


Figure 4. Système mobile de laser terrestre (A) Installation des instruments sur une plate-forme fixée derrière le véhicule (DMI, antennes GPS, Caméra, LiDAR, Génératrice) ; (B) Compartiment fermé à l'arrière contenant l'ordinateur, le multiplex, le PSC et un power supply ; (C) Le poste de contrôle est situé à l'avant du véhicule du côté passager et comprend un écran d'ordinateur et un clavier

3.1.2.2 Description du levé

Les levés terrain sont effectués au maximum de la période de marée basse afin de couvrir le plus de superficie de plage possible. Le levé est donc effectué environ 1h30 avant et 1h30 après la marée basse pour totaliser une période d'acquisition d'environ 3h. 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 couvert sur la durée d'une période de marée basse (3h). 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. Afin de faciliter le traitement des données en diminuant le poids des fichiers LiDAR et d'imagerie, nous effectuons des lignes d'acquisition de 3 à 4 km. L'arrêt à tous les quelques kilomètres permet à l'opérateur de s'assurer de la bonne précision du système de navigation.

Même si nous connaissons l'erreur théorique du système, une validation des nuages de points est réalisée lors de tous les levés afin d'assurer un contrôle de qualité. Le contrôle de qualité des données LiDAR est effectué en calculant l'erreur de positionnement du nuage de points LiDAR par rapport à des points de contrôle acquis au D-GPS RTK Trimble R8 sur l'ensemble des sites d'étude à chaque levé. Pour assurer la qualité de comparaison entre les points de contrôle et les données LiDAR, la même base statique Trimble R8 est utilisée en simultanée pour les deux systèmes (SMLT et D-GPS mobile). L'acquisition de ces points de contrôle est réalisée par une équipe terrain complémentaire à l'équipe d'opérateurs du SMLT. Cette équipe doit couvrir le secteur d'étude avant le passage du SMLT afin d'assurer que l'ensemble du territoire balayé par le SMLT soit couvert de cibles. Chacun des points de contrôle acquis au D-GPS est comparé verticalement (Z) avec les points correspondants sur le nuage de points LiDAR. Afin d'assurer une réelle concordance entre les points de contrôle et les points LiDAR, seulement les points de contrôle au sol sont utilisés.

3.2 Granulométrie

Des échantillons ont été prélevés le 30 octobre 2014, le 2 novembre 2015 et le 17 novembre 2016. L'emplacement des échantillons a été positionné au D-GPS en 2014 afin d'assurer qu'ils soient récoltés exactement aux mêmes endroits les années suivantes. La localisation précise des échantillons est présentée dans les figures de résultats (figure 14 et 15). Dix-sept échantillons ont été récoltés sur le haut estran et 11 échantillons sur le bas estran, ce qui totalise 84 échantillons pour les 3 années de suivi. L'ensemble des échantillons ont été récoltés sur les transects des profils topographiques réalisés entre le 30 octobre 2014 et le 17 novembre 2016.

3.3 Suivi photographique en continu

Un suivi photographique en continu permet une analyse qualitative des événements morphologiques et météo-marins sur la côte. Une caméra a été installée du 15 au 30 octobre 2014, pendant les travaux de la recharge sédimentaire. Trois caméras ont été installées le 18 novembre 2014 sur des poteaux existants sur la promenade de l'Anse-aux-Coques pour l'ensemble de la période de suivi (figure 5). Les caméras sont configurées pour prendre des photos à intervalle de 10 minutes du lever au coucher du soleil. En les combinant avec les données météorologiques et hydrodynamiques, les photographies permettent principalement de cibler les événements de tempêtes qui ont un impact sur la morphologie de la plage.



Figure 5. Localisation et vue des caméras de suivi installées à l'anse aux Coques

4. Traitement et analyse des données

4.1 Profils topographiques

Les profils topographiques permettent de connaître l'évolution de la morphologie de l'estran et de déterminer s'il y a des échanges sédimentaires entre le haut et le bas de l'estran. L'évolution en 2 dimensions des profils topographiques a été réalisée à partir de l'extension ArcGIS 3D Analyst et Excel. L'enveloppe minimale et maximale a été calculée à partir de MATLAB.

4.2 Traitement des levés surfaciques de l'estran par le système mobile de laser terrestre

Préalablement au levé de terrain LiDAR, une calibration dynamique des instruments a été réalisée. D'abord, tous les capteurs (antennes GNSS, laser, camera) sont référencés au IMU puisqu'il est le centre de référence de la navigation. Les bras de levier sont mesurés et sont intégrés dans le logiciel d'acquisition LV POS View. Les angles de visée (roulis, tangage, lacet) sont calculés à partir d'une méthode manuelle utilisant des points de contrôle au D-GPS ou une méthode automatique avec des surfaces planes de différents angles.

4.2.1 Processus du traitement des données

Le workflow des données LiDAR est constitué de trois grandes étapes : le levé terrain (voir section 3.1.2), le post-traitement et le traitement (figure 6).

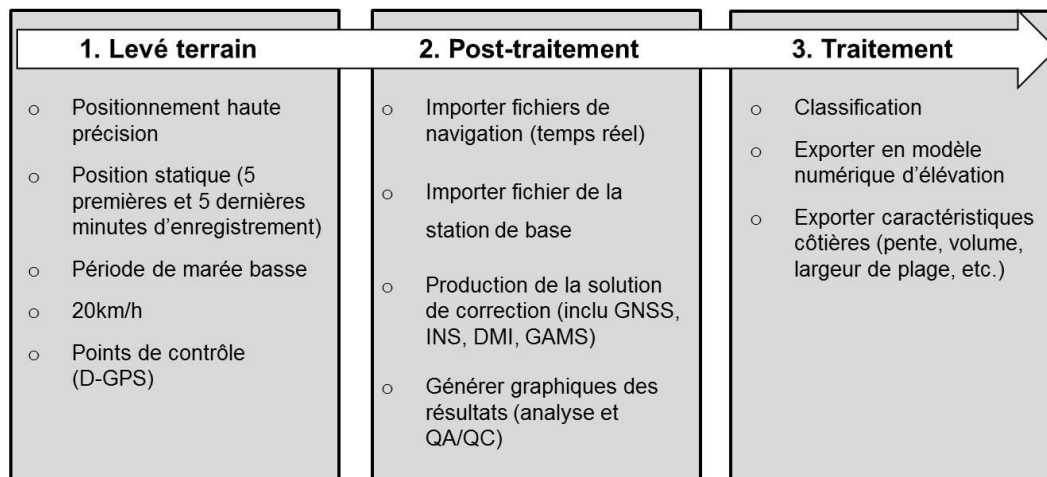


Figure 6. Workflow de l'acquisition et du traitement des données du SMLT

La synchronisation des données GNSS-INS et la correction de la trajectoire sont effectuées par le logiciel PosPAC MMS. Ce logiciel permet d'obtenir un maximum de précision sur le géoréférencement des capteurs utilisant des données GNSS-INS. PosPAC MMS permet de :

- importer des données de navigation et de capteurs acquises en temps réel ;
- importer les données de la station de base ;
- produire une solution de correction incluant les données GNSS, INS, DMI et GAMS et les traiter dans les deux directions ;
- générer des graphiques des résultats de précision de positionnement et de navigation.

Le logiciel permet donc de connaître les erreurs de positionnement (X, Y, Z) et de navigation (caractéristiques GNSS) en fonction du temps GPS lors du levé. La solution de post-traitement GNSS-INS est ensuite appliquée à la trajectoire accompagnant les nuages de points LiDAR et les séquences d'images grâce à une fonction disponible dans le logiciel Trimble Trident Analyst. Les trajectoires corrigées sont importées dans le système de coordonnées désiré soit le NAD83 (SCRS), dans la projection MTM (Modify Transverse Mercator) en planimétrie et dans le modèle de géoïde HT2.0 en altimétrie.

Une classification est effectuée afin d'extraire les points non voulus tels que les débris ligneux, les structures anthropiques présentes sur la plage et garder seulement les points au sol. La classification est réalisée dans un premier temps dans le logiciel Trident à partir des valeurs de l'intensité de retour. Afin de faciliter l'extraction de caractéristiques côtières telles que la pente, la largeur de l'estran et le volume de sédiments, les nuages de points LiDAR sont généralement transformés en modèle numérique de terrain (MNT). La résolution spatiale élevée des nuages de points permet de créer des MNT à une résolution spatiale élevée et ainsi conserver la variabilité microtopographique. Pour chacun des levés LiDAR effectués, un modèle numérique de terrain (MNT) est généré à une résolution spatiale de 0,50 m. La haute résolution spatiale des nuages de points LiDAR permet d'utiliser une méthode d'interpolation simple de réseau de triangles irréguliers (TIN) pour générer les surfaces. Ces modèles numériques sont des surfaces topographiques qui facilitent l'utilisation des données LiDAR pour extraire des résultats, notamment pour le calcul du volume sédimentaire. L'extension *LP360* de QCoherent utilisée dans le logiciel ArcGIS permet d'exporter les fichiers de points LAS 1.2 en surfaces topographiques. La classification est appliquée afin que seulement les données au sol soient utilisées pour constituer la surface topographique. Les modèles numériques de terrain sont disponibles avec les données fournies avec ce rapport dans le dossier LiDAR (surface). La marge d'erreur utilisée est présentée à la section suivante (4.2.2).

4.2.2 Calcul d'erreur du SMLT

4.2.2.1 Erreur théorique

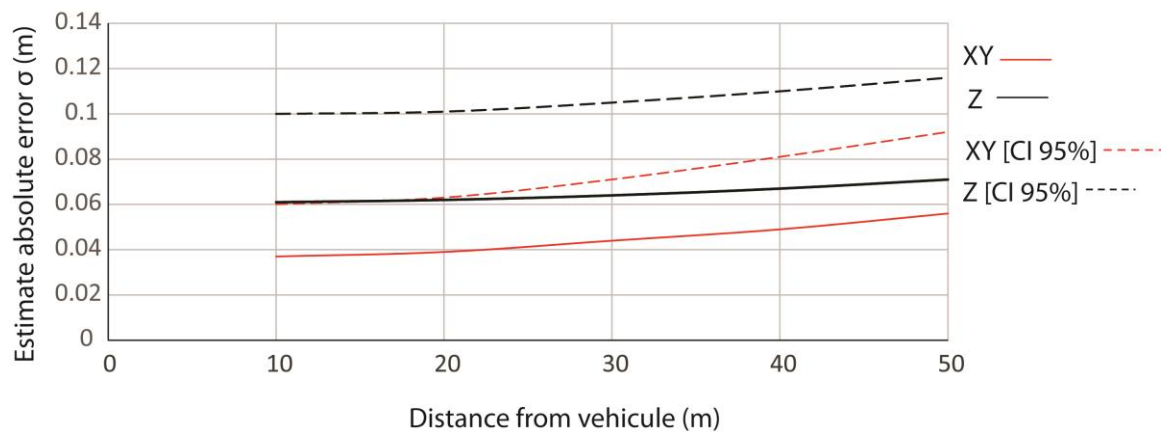
L'erreur utilisée est constante pour l'ensemble des levés puisqu'elle est théorique et prend en considération l'erreur intrinsèque associée aux instruments principaux, soit le LiDAR et le système de navigation inertiel ainsi que l'erreur de navigation fournie par le fabricant. Cette erreur est estimée à partir du modèle de propagation de Trimble qui utilise les caractéristiques des instruments de navigation POS-LV 220 et le LiDAR Riegl VQ-250 (Trimble, 2013). Ce modèle prend en compte 5 éléments en fonction de la distance entre le véhicule et la cible : 1) erreur de positionnement estimée en X et Y ; 2) erreur de positionnement estimée en Z ; 3) erreur de positionnement estimée en roulis, tangage et lacet ; 4) erreur estimée dans la mesure des bras de levier (décalage entre les capteurs et le IMU) ; 5) portée estimée du laser et les erreurs d'angle (Trimble, 2013).

Le modèle de propagation se traduit par la formule suivante (Trimble, 2013)

(1)

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + R_b^m(H_I, R_I, P_I) \cdot \begin{bmatrix} R_l^b(B_{XL}, B_{YL}, B_{ZL}) \cdot \begin{bmatrix} r_L \cdot \cos(\theta_L) \cdot \cos(\varphi_L) \\ r_L \cdot \sin(\theta_L) \cdot \cos(\varphi_L) \\ r_L \cdot \sin(\varphi_L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

La figure 7 montre les résultats du modèle de propagation de l'erreur estimée en fonction de la distance entre le véhicule et la cible.



Source : selon Trimble (2013)

Figure 7. Propagation de l'erreur estimée XY et Z (σ) par le modèle de propagation Trimble (2013) en fonction de la distance (m) entre le véhicule et la cible

Dans le cadre des levés côtiers, cette erreur est généralement assez faible en raison de l'environnement ouvert de la zone côtière qui permet une excellente qualité de la réception GNSS, ce qui évite une perte de signal lors du levé et assure un bon PDOP. En effet, à l'exception de sites d'étude qui bordent des falaises côtières, le signal GPS n'est pas dégradé par de hauts éléments tels que des bâtiments ou des arbres comme certains auteurs observent en milieu urbain (Haala *et al.*, 2008). Pour tous les levés présentés, presque l'ensemble du temps de navigation présente un PDOP de moins de 2,5, ce qui est considérée comme une valeur idéale d'après Puente *et al.* (2013).

4.2.2.2 Erreur calculée

L'erreur calculée est la différence entre les points de contrôle et les points LiDAR. Pour chacun des levés, l'erreur (RMS delta) est présentée au tableau 5. Le RMS des 8 levés réalisés à l'anse aux Coques varie entre 0,019 m et 0,064 m et le RMS calculé sur l'ensemble des points de contrôle, indépendamment des levés, est de 0,036 m. L'erreur calculée a été utilisée dans le traitement de données, notamment pour calculer la marge d'erreur des volumes sédimentaires de l'estran.

Tableau 5. Erreur calculée pour chacun des levés LiDAR effectués entre 2012 et 2016 à l'anse aux Coques

Date du levé	Nombre de points	RMS delta Z (m)	Étendue delta Z (m)
21 septembre 2012	48	0,019	-0.063 à 0,029
11 août 2014	6	0,064	-0.081 à -0,051
23 octobre 2014	23	0,05	-0.083 à -0,035
4 novembre 2014	14	0,06	-0.094 à -0,001
12 juin 2015	17	0,033	-0.058 à 0,002
15 octobre 2015	16	0,029	-0.065 à 0,009
24 mai 2016	28	0,02	-0.045 à 0,02
14 juin 2016	16	0,028	-0.029 à 0,028
TOTAL	168	0,036	-0.094 à 0,029

4.2.3 Changements morphologiques

4.2.3.1 Volume sédimentaire

D'abord, le volume sédimentaire du haut estran a été calculé pour 60 compartiments de 50 mètres de largeur linéaire côtière pour chaque levé d'acquisition LiDAR. Les calculs ont été effectués dans l'extension *3D Analyst* du logiciel *ArcGIS 10.2*. Le niveau de base de référence utilisé pour le calcul du volume est -1,58 m, ce qui équivaut au niveau des basses mers moyennes (BMM) à la station marégraphique de Rimouski (n° 2985) (figure 8). Puisque les zones n'ont pas la même superficie, le volume a été normalisé par la surface, c'est-à-dire que le volume est exprimé en m^3 pour chaque m^2 (m^3/m^2) sur l'estran. Cette méthode permet de comparer ensuite les zones entre elles, et de comparer l'évolution d'une même zone dans le temps. Un tableau contenant l'ensemble des données de volume brut et de volume surfacique ainsi que les marges d'erreur associées à chaque valeur est présenté en annexe. La marge d'erreur utilisée est l'erreur absolue calculée en altitude sur les données LiDAR (Z) (voir section 4.2.2.2). Par exemple, pour un volume de $2,97 \text{ m}^3$, la marge d'erreur pourrait être de 0,05 m et serait exprimée de la façon suivante : $2,97 \text{ m}^3/\text{m}^2 (\pm 0,05 \text{ m})$ et qui correspondrait à un volume brut de $2294,08 \text{ m}^3 (\pm 38,67 \text{ m}^3)$.

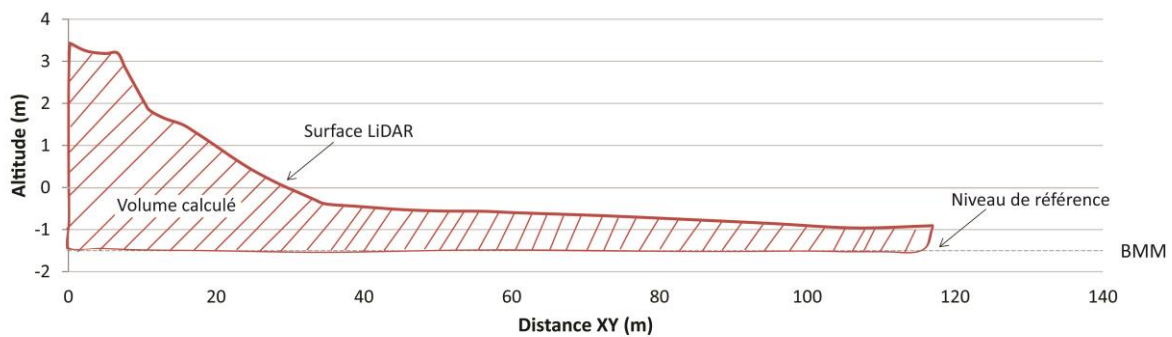


Figure 8. Aperçu du volume calculé entre la surface LiDAR et le niveau de référence pour une tranche 2D de l'estran

4.2.3.1 Différentiel topographique

Afin d'observer les zones d'érosion et d'accumulation, la différence topographique a été calculée en soustrayant deux surfaces d'élévation, soit une récente à une plus ancienne. L'incertitude des deux levés LiDAR utilisés doit être prise en compte pour connaître la marge d'erreur associée à la surface différentielle. Pour calculer la propagation de l'erreur entre les levés, plusieurs auteurs (Brasighnton *et al.*, 2003 ; Montreuil *et al.*, 2014 ; Wheaton *et al.*, 2010) utilisent la formule suivante :

(2)

$$\delta_{\text{différentiel}} = \sqrt{(\delta z_{\text{récent}})^2 + (\delta z_{\text{ancien}})^2}$$

Où $\delta_{\text{différentiel}}$ est l'erreur propagée sur la surface différentielle, $\delta z_{\text{récent}}$ est l'erreur LiDAR du levé le plus récent et δz_{ancien} l'erreur du levé le plus ancien utilisé.

L'erreur utilisée pour chaque levé est le RMS présenté au tableau 5. Pour chacune des surfaces différentielles, le résultat de l'erreur propagée est comme marge d'erreur et les différences à l'intérieur de la marge d'erreur n'apparaissent pas sur les figures afin d'éviter d'interpréter les changements non significatifs comme des changements morphologiques. Le tableau 6 présente la marge d'erreur pour chacun des différentiels topographiques utilisés dans le cadre de ce rapport. Cette marge d'erreur est aussi représentée par des barres d'erreur sur les digrammes de changements volumétriques.

Tableau 6. Erreur propagée pour les 8 surfaces de différentiels utilisées

Différentiel	Date surface ancienne	Erreur ancien (m)	Date surface récent	Erreur récent (m)	Erreur différentiel (m)
1	21 septembre 2012	0,019	11 août 2014	0,06	0,062
2	11 août 2014	0,06	23 octobre 2014	0,05	0,078
3	23 octobre 2014	0,05	4 novembre 2014	0,06	0,078
4	4 novembre 2014	0,06	12 juin 2015	0,033	0,068
5	12 juin 2015	0,033	15 octobre 2015	0,29	0,043
6	15 octobre 2015	0,29	24 mai 2016	0,02	0,036
7	24 mai 2016	0,02	14 juin 2016	0,028	0,027
8	21 septembre 2012	0,019	15 octobre 2015	0,29	0,035
9	11 août 2014	0,06	15 octobre 2015	0,29	0,067
10	23 octobre 2014	0,05	15 octobre 2015	0,29	0,058

4.3 Granulométrie

L'ensemble des échantillons a été analysé en laboratoire afin de déterminer le pourcentage de représentativité de chacune des tailles granulométriques à l'intérieur des échantillons récoltés. La fraction grossière (>2 mm) et la fraction fine (<2 mm) ont d'abord été séparées à l'aide d'un tamis de 2 mm. La matière organique et les coquilles ont été enlevées à la main pour les échantillons ne contenant pas de limons et d'argile. Pour ces derniers, un traitement à l'acide chlorhydrique, au peroxyde d'hydrogène et à l'ammoniac a permis la destruction de la matière organique. L'analyse de la fraction grossière a été réalisée par la méthode de tamisage à sec avec 10 tamis de tailles différentes (2 mm ; 2,36 mm ; 2,8 mm ; 3,35 mm ; 4 mm ; 4,75 mm ; 6,3 mm ; 8 mm ; 9,5 mm et 11,2 mm). Chaque tamis a ensuite été pesé et le pourcentage de représentation de chacune des tailles granulométriques des échantillons a été pris en note. L'analyse de la fraction fine a été réalisée à l'Institut des Sciences de la Mer de Rimouski (ISMER). D'abord, les sous-échantillons ont été mélangés à de l'eau et du calgon afin de disperser les particules et ont ensuite été culbutés dans un agitateur rotatif pendant 3 heures. Une deuxième phase de dispersion a eu lieu dans le séparateur de particule *LS 13320 Beckman-Coulter Particle Size Analyser*. Le pourcentage de représentation de chacune des tailles granulométriques à l'intérieur du sous-échantillon est alors connu. Le logiciel GRADISTAT (Plott, 2000) a été utilisé pour calculer les statistiques granulométriques des échantillons. L'échelle granulométrique utilisée pour différencier les classes granulométriques par GRADISTAT est modifiée d'Edden (1914) et Wentworth (1922) (figure 9).

Taille des grains		Description	
phi	mm		
-10	1024	Très large	Bloc
-9	512	Large	
-8	256	Moyen	
-7	128	Petit	
-6	64	Très petit	
-5	32	Très grossier	Gravier
-4	16	Grossier	
-3	8	Moyen	
-2	4	Fin	
-1	2	Très fin	
0	1	Très grossier	Sable
1	500	Grossier	
2	250	Moyen	
3	125	Fin	
4	63	Très fin	
5	31	Très grossier	Limon
6	16	Grossier	
7	8	Moyen	
8	4	Fin	
9	2	Très fin	
		Argile	

Figure 9. Échelle granulométrique utilisée par le logiciel GRADISTAT (modifiée de Udden (1914) et Wentworth (1922))

5. Résultats et analyse

5.1 Suivi de la sédimentologie des sédiments de l'estran

Le suivi sédimentologique permet l'analyse de l'évolution de la taille granulométrique de la plage à la suite de la mise en place de la recharge sédimentaire. Les cartes des figures 14 et 15 spatialisent l'évolution sédimentologique de l'estran pour les trois années de suivi. Les diagrammes montrent le pourcentage représenté pour les grandes classes sédimentologiques pour chaque échantillon (figure 9). En 2014, des échantillons ont été prélevés directement dans les matériaux de la recharge et les résultats de ceux-ci sont indiqués dans les diagrammes avec un « R » dans la partie supérieure droite (figure 10).



Figure 10. Échantillon prélevé directement dans la recharge en 2014

La figure 10 montre la texture des sédiments de 17 échantillons récoltés sur le haut estran le 30 octobre 2014, quelques jours suivant la recharge sédimentaire, le 2 novembre 2015, un an après la recharge et le 17 novembre 2016. Tout d'abord, regardons les échantillons prélevés aux extrémités de la recharge (profils 1 et 13). Lors de la mise en place de la recharge sédimentaire, le profil 1 était situé à la limite de l'infrastructure devant une section qui servait de passage pour les camions sur un remblai temporaire. Ce remblai a été démantelé à la fin des travaux. La plage était composée principalement de sable fin et moyen en 2014 (P1-HE-1) alors qu'en 2015 au même emplacement, la plage est dominée par la fraction de gravier fin et moyen et de sable fin à grossier. En 2016, la plage est composée de sable fin à grossier avec un peu moins de 25 % de gravier fin et moyen. Toujours pour le profil 1, la partie inférieure de la plage près de la flexure entre le haut et le bas estran (P1-HE-2), était composée en 2014 principalement de gravier fin et moyen tandis qu'en 2015 cette dernière fraction domine toujours, mais en association avec du sable grossier. On constate qu'en 2016, le sable grossier domine en association avec la fraction de sable fin à moyen alors que la fraction de gravier fin à moyen est faiblement représentée. Le profil 13 est situé à environ 50 m de l'extrémité est de la recharge. On constate qu'en 2014 l'ensemble de la plage était constitué principalement de sable moyen à fin (P13_HE-1 et 2). En 2015 et 2016, la partie supérieure de la plage est dominée par du sable moyen à grossier avec aussi une importante fraction de gravier fin et moyen alors que la partie inférieure de la plage est dominée par du gravier fin et moyen qui atteint même 75 % en 2015 (P13_HE-2) alors que cette fraction était absente en 2014. Les caractéristiques sédimentologiques du profil 13 en 2015 sont ainsi similaires à la composition sédimentologique des échantillons situés devant la recharge, quoique légèrement moins grossière. On constate donc un déplacement vers l'est des matériaux qui sont érodés de la recharge. Ceci n'est pas surprenant puisqu'il existe une dérive littorale convergente dans l'anse aux Coques, c'est-à-dire que selon les conditions de vagues, la dérive principale des sédiments peut être aussi bien vers l'est que vers l'ouest.

Les échantillons récoltés directement sur la recharge sédimentaire en 2014 étaient principalement constitués de gravier, à moins de 50 % de gravier fin et moyen (4 à 16 mm) et à environ 50 % à 60 % de gravier grossier (16 à 32 mm). Durant l'année suivant la mise en place de la recharge, le front de l'infrastructure a reculé de plusieurs mètres. En 2015, les échantillons ont été récoltés aux mêmes endroits, mais à la suite du recul du front de l'infrastructure, ces échantillons étaient alors situés sur le haut estran, devant la recharge sédimentaire. Ces échantillons contiennent toujours une grande proportion de gravier en 2015, mais les fractions granulométriques sont plutôt mixtes, contenant plus de 50 % de sable pour trois échantillons sur 5 à l'exception de P3_HE-1 et P12_HE1 où la fraction de gravier fin et moyen est nettement dominante. En 2016, la proportion de gravier domine seulement pour deux échantillons sur cinq (P2-HE-1 et P3-HE-1) alors que pour les autres échantillons les fractions granulométriques sont plutôt mixtes.

Les échantillons récoltés sur le haut estran devant la recharge sédimentaire en 2014 étaient principalement composés de sable fin et moyen (figure 11), à l'exception de l'échantillon P11_HE-1 où la fraction de gravier fin et moyen était dominante. En 2015, le portrait avait complètement changé puisque les échantillons étaient composés presque exclusivement de gravier, dont une grande proportion de gravier fin et moyen (4 à 16 mm). Ce changement de texture est directement lié à l'apport des sédiments érodés de la recharge qui viennent alimenter la plage. En 2016, le portrait a de nouveau changé, le sable est dominant comme en 2014, mais à la différence que c'est plutôt les fractions de sable grossier et moyen qui sont prédominantes. Pour l'échantillon P11-HE-1, tout comme en 2014 et 2015, c'est la fraction de gravier fin et moyen qui est prédominante. Pour ce qui est des échantillons prélevés près de la flexure de la plage (HE-2), les sédiments sont généralement plus grossiers que sur le reste de la plage en 2014, sauf pour l'échantillon P12-HE-2 qui ne présente pas de gravier. On constate toutefois que la distribution des tailles granulométriques est assez hétérogène, les différentes fractions sont représentées, et ce, pour les trois périodes d'analyse. De manière générale, il n'est pas possible de déterminer si l'augmentation de la fraction sableuse observée sur la plage en 2016 s'inscrit dans une tendance vers un retour à des caractéristiques sédimentologiques initiales en raison du nombre d'années trop faible d'observation. Les processus naturels ont tout de même permis d'alimenter la plage en sable en 2016. On constate effectivement à partir des levés LiDAR une accrétion sur la plage à l'été 2016, sédiments provenant sans doute du bas estran par les vagues de beaux temps.



Figure 11. Texture des sédiments sur le haut estran en 2014

Le bas estran est principalement composé de sable fin avec une petite proportion de sable moyen et de limon-argile (figure 15). La lithologie du bas estran est homogène, il ne semble pas avoir de gradient est-ouest ou bas-haut (figure 12 et 13). Dans l'ensemble, la taille granulométrique des sédiments du bas estran a très peu évolué entre 2014 et 2016, aucun changement significatif n'a été mesuré. Le seul changement observé se situe au niveau des échantillons P1-BE-2 et de P4-BE-2 pour la période de 2016 où on observe une forte proportion d'argile et limon. Cette forte proportion de particules fines semble être liée à la présence d'une quantité importante d'algues déposées sur l'estran au niveau de ces deux secteurs d'échantillonnage lors de cette période. Les algues favorisent la sédimentation et le piégeage des particules fines. La recharge en matériaux grossiers du haut estran ne semble pas avoir eu d'influence sur la taille granulométrique des sédiments du bas estran. Comme il est possible de constater sur les différents profils topographiques qui ont été réalisés sur le bas estran entre octobre 2014 et novembre 2016, il y a une variabilité de la morphologie tant saisonnière qu'annuelle en raison notamment du déplacement de bancs sableux de faible amplitude. La contribution de ces apports d'origine naturelle est plus importante que celle qui pourrait provenir de la recharge, de sorte que cette dernière a peu d'influence sur la distribution de la taille granulométrique sur le bas estran.



Figure 12. Vue d'ensemble du bas estran devant la recharge sédimentaire en 2014



Figure 13. Texture des sédiments typique du bas estran de l'anse aux Coques en 2014

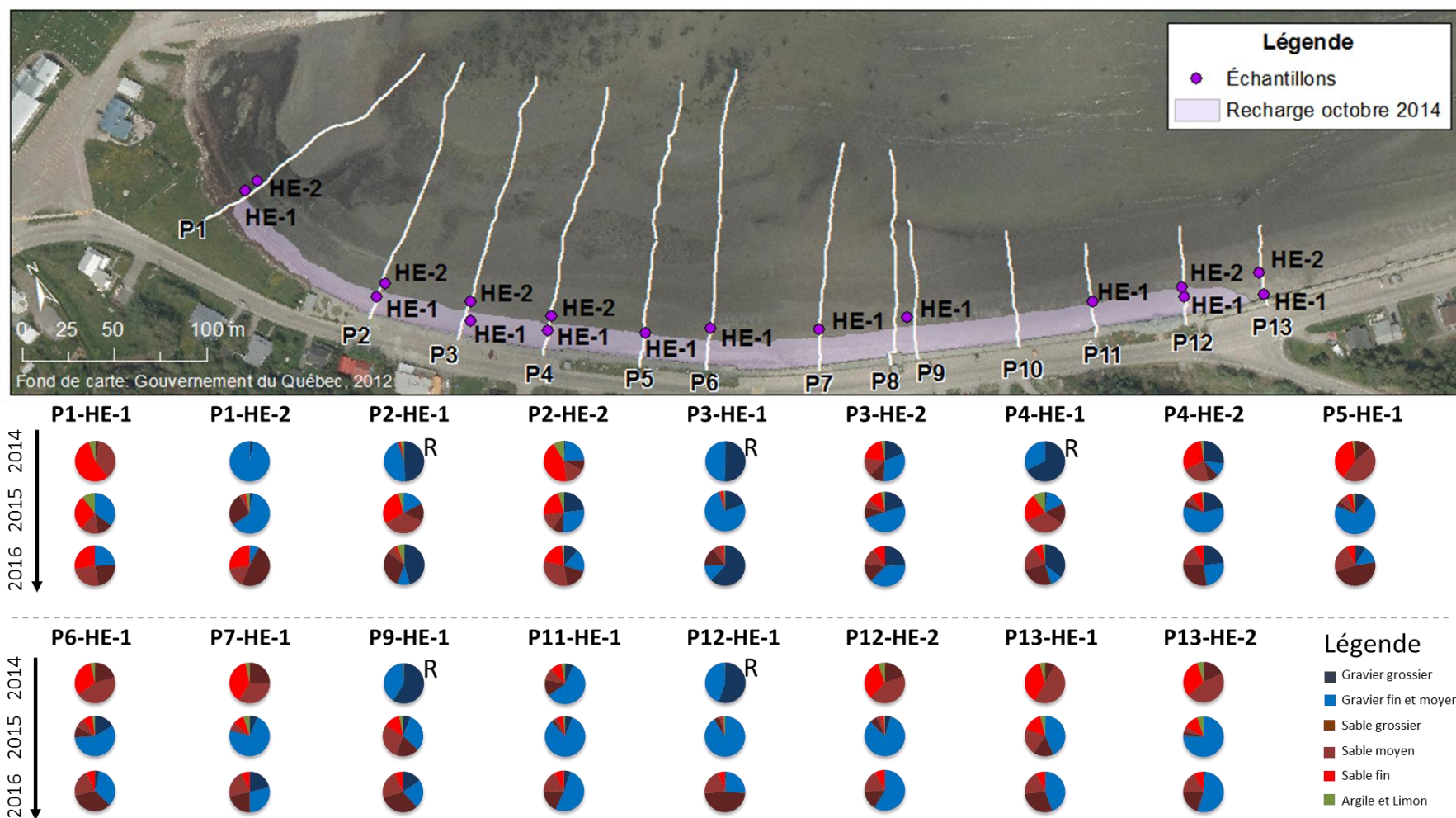


Figure 14. Évolution sédimentologique du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2016. (Le R accolé à certains diagrammes indique que l'échantillon a été récolté directement sur la recharge sédimentaire)

5.2 Volume sédimentaire du haut estran

Les résultats du volume sédimentaire calculé sur le haut estran pour les 8 levés LiDAR entre 2012 et 2016 sont présentés aux figures 16 et 17. Les résultats sont exprimés en volume normalisé par la surface, soit en m^3/m^2 .

Les résultats montrent l'important gain sédimentaire du haut estran à la suite de la mise en place de la recharge sédimentaire en octobre 2014. De plus, on constate sur les résultats des levés du 21 septembre 2012 et du 11 août 2014, que le secteur de la recharge sédimentaire présentait une disponibilité sédimentaire faible comparativement aux autres secteurs de l'anse aux Coques (figure 17). Il y a une variabilité sédimentaire importante, autour des compartiments SL-24 et 25, qui correspond à la présence d'un ruisseau qui s'écoule sur l'estran. Pour l'ensemble des levés, il y a une faible disponibilité sédimentaire du haut estran aux compartiments 49 et 50. Le volume sédimentaire de la portion est de l'anse aux Coques semble assez stable sur l'ensemble des levés. On remarque toutefois que les volumes sédimentaires sur l'ensemble de la plage (haut estran) de l'anse aux Coques sont inférieurs en 2016 comparativement à 2014 et 2015.

Pour les levés du 23 octobre 2014 au 14 juin 2016, le volume de la recharge sédimentaire est inclus dans le volume calculé pour les compartiments 3 à 15. Un volume complet a été calculé pour cette zone sur chacun des levés (figure 16). Durant cette période, il y a une érosion constante du volume de sédiments de la zone de la recharge sédimentaire jusqu'au 15 octobre 2015, passant de $3,48 \text{ m}^3/\text{m}^2 (\pm 0,05 \text{ m})$ à $3,09 \text{ m}^3/\text{m}^2 (\pm 0,029 \text{ m})$. Le volume de la zone de la recharge du 15 octobre 2015 ($3,09 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0,029 \text{ m}$) correspond à environ la moitié du volume qui sépare l'avant et l'après-mise en place de l'infrastructure entre le 11 août 2014 ($2,80 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0,064 \text{ m}$) et le 23 octobre 2014 ($3,48 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0,05 \text{ m}$). On constate une stabilité entre le 15 octobre 2015 et le 14 juin 2016. Comme nous allons le voir avec les résultats des profils topographiques, il y a ensuite eu une forte érosion entre le 14 juin 2016 et le 17 novembre 2016. L'évolution volumétrique est présentée dans la section 5.3 en fonction des périodes entre les levés topographiques réalisés au LiDAR.

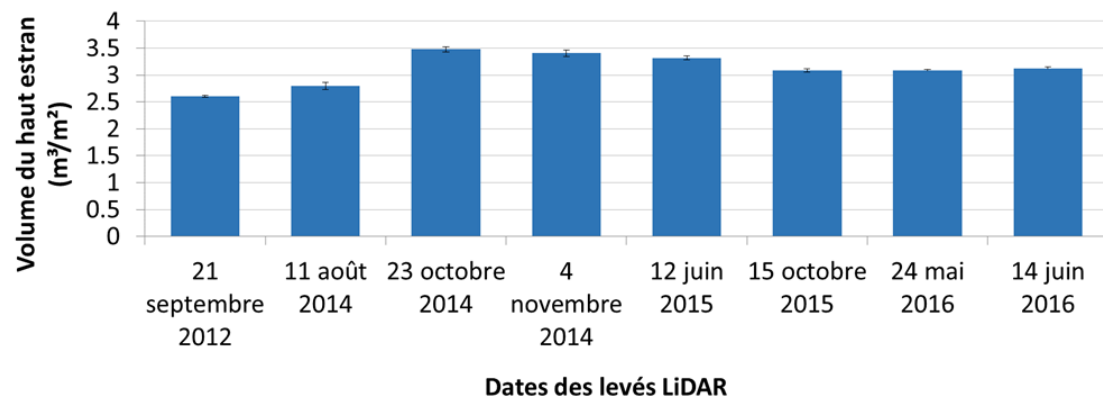


Figure 16. Volume sédimentaire du haut estran (m^3/m^2) pour le secteur de la recharge sédimentaire (compartiments SL-03 à SL-15)

5.3 Évolution de la topographie et du volume sédimentaire de l'estran de l'anse aux Coques

Afin de comprendre la dynamique sédimentaire de l'anse aux Coques à la suite de la recharge en sédiments grossiers, dix périodes d'analyses sont présentées. Ces périodes permettent de quantifier l'évolution topographique et volumétrique de l'estran ainsi que d'identifier les conditions météo-marines qui ont contribué à la dynamique sédimentaire. Seulement quelques profils topographiques sont présentés dans l'analyse, mais l'ensemble des profils sont présentés en annexe 1 du document.

5.3.1 Période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014

La période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014 est la deuxième période la plus longue entre deux levés s'étalant sur près de 2 ans (689 jours). Cette période permet d'avoir un aperçu de la dynamique sédimentaire avant la mise en place de la recharge sédimentaire en octobre 2014. Les changements topographiques montrent une grande zone d'accumulation sur le haut estran devant le muret dans la partie ouest de l'anse (figure 18). La zone d'accumulation s'étend du quai jusqu'au compartiment SL-13, atteignant près de $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$ d'accumulation pour plusieurs compartiments. Devant cette zone, une zone d'érosion linéaire est visible sur le bas estran, près de la limite de la flexure de la plage. Le ruisseau a entraîné une érosion de la plage durant cette période (SL-24 et SL-25). En aval de l'exutoire du ruisseau, une zone d'accumulation sur le bas estran et une zone de faible érosion se partagent l'espace en fonction de la dynamique du ruisseau. Il est aussi possible d'observer quelques zones d'érosion, notamment sur le bas estran où des cordons sableux semblent avoir migré entre les deux levés. De manière générale, il semble y avoir eu un transfert de sédiments du bas estran vers le haut estran entre les deux périodes.

À l'est du ruisseau, une zone d'érosion d'environ 500 mètres est visible sur le bas estran, immédiatement au bas de la flexure de la plage. Les volumes sédimentaires montrent une érosion marquée du haut estran entre les compartiments SL-31 à SL-39 atteignant une érosion maximale de $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^2$. Le secteur le plus à l'est (SL-46 à SL-60) semble être le moins dynamique et montre une faible accumulation sédimentaire sur le haut estran. Par contre, les volumes accumulés sont en partie à l'intérieur de la marge d'erreur. Cette stabilité peut s'expliquer par la présence d'un bas estran qui devient rocheux en allant vers l'est ce qui contribue à diminuer les échanges sédimentaires possibles entre les hauts et bas estrans, contrairement au reste de l'anse où le bas estran est sableux.

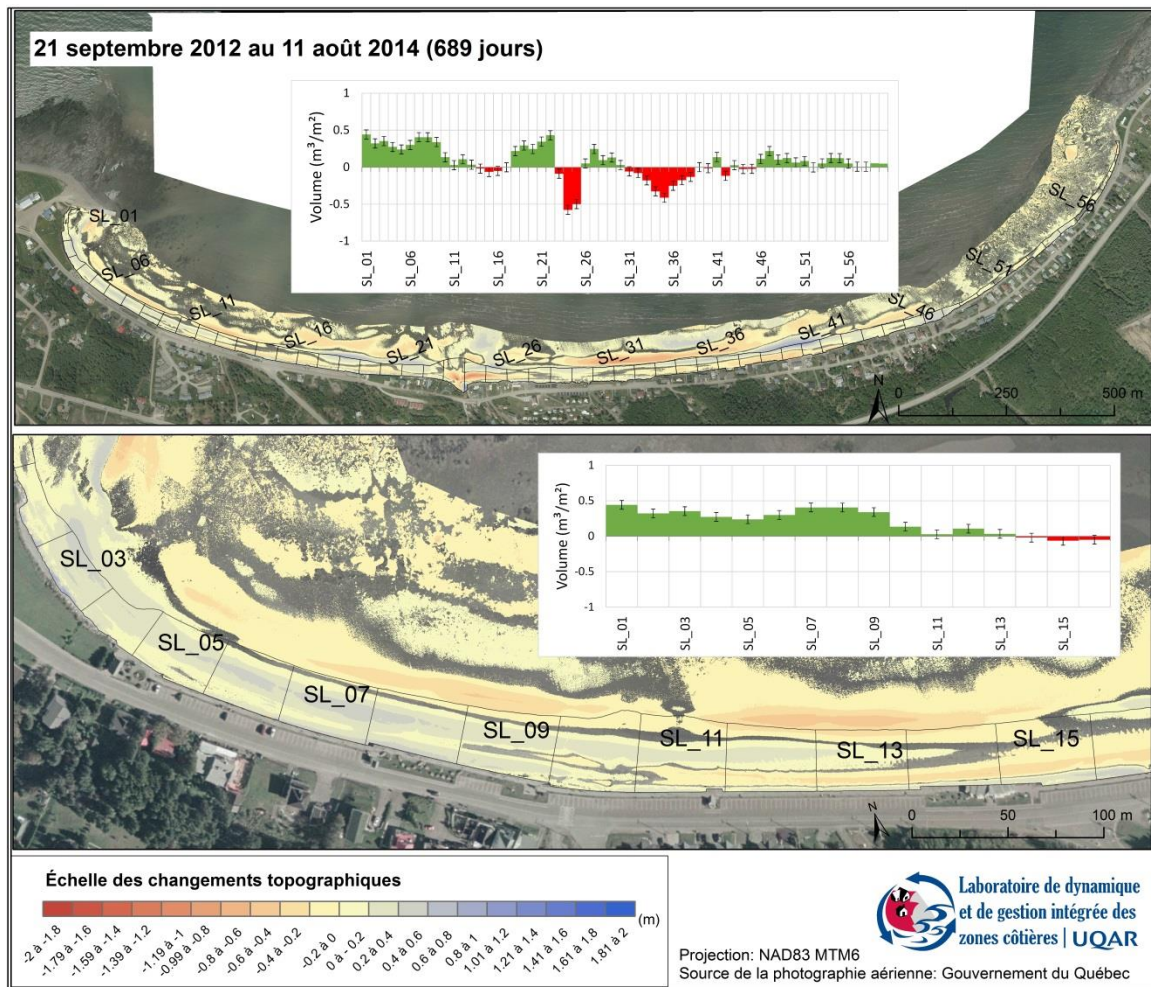


Figure 18. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014

5.3.2 Période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014

La période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014 correspond à la période pré et post-recharge sédimentaire. Les travaux de recharge sédimentaire ont eu lieu du 15 au 23 octobre 2014. Durant cette période, il y a eu trois périodes de marées de vives-eaux, mais aucun niveau d'eau exceptionnel n'a été mesuré (figure 19). Les photographies de la figure 20 montrent l'évolution des travaux entre le 15 octobre 2014 et le 23 octobre 2014.

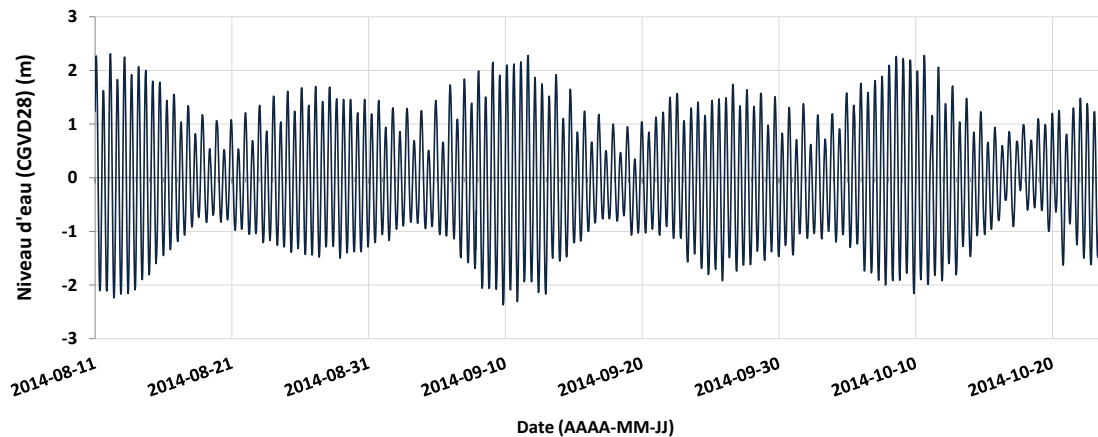


Figure 19. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014



Figure 20. Évolution des travaux de recharge sédimentaire entre le 15 et le 23 octobre 2014 à l'anse aux Coques

Le bas estran de l'ensemble de l'anse aux Coques a subi une faible accumulation, principalement à l'aval de l'embouchure du ruisseau. Entre le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014, le secteur entre les compartiments SL-03 et SL-15 présente une forte accumulation sur le haut estran en raison de l'ajout d'un important volume de sédiments grossiers (figure 21). Le volume net de sédiments entre août 2014 et octobre 2014 correspond à un gain de 8837m^3 , ce qui correspond environ au volume d'ajout prévu lors de la recharge sédimentaire (MDDELCC, 2014). L'accumulation de sédiments atteint $1\text{ m}^3/\text{m}^2$ à certains endroits, principalement dans la section ouest de la recharge sédimentaire. Le volume total du haut

estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a augmenté de $0,68 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,078 \text{ m}$), passant de $2,8 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,064 \text{ m}$) à $3,48 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05 \text{ m}$) entre août et octobre 2014. La zone d'érosion linéaire devant la recharge qui était visible lors de la période précédant la recharge sédimentaire est toujours présente. Par contre, cette zone d'érosion semble s'être déplacée sur le haut estran, contrairement à la période précédente où elle était près de la flexure, mais sur le bas estran. Malgré cela, la recharge sédimentaire crée une forte accumulation sur le haut estran.

À l'extrémité est de la recharge, le haut estran a subi une perte sédimentaire s'accroissant jusqu'au ruisseau (SL-25). Le secteur à l'est du ruisseau montre peu de changements au cours de cette période. À l'exception d'une petite zone d'accumulation ponctuelle au compartiment SL-35, la majorité des changements volumétriques sont à l'intérieur ou très près de la marge d'erreur. La faible variabilité sédimentaire observée est expliquée notamment par la courte période d'observation et que durant cette période, les conditions météo-marines sont calmes, ce qui contribue à minimiser les changements morphologiques de l'estran. L'apparition de petites zones d'accumulation ayant la forme de cordons de bas estran est tout de même visible à trois endroits sur le bas estran. Il semble y avoir eu une migration vers la plage des bancs d'accumulation. Au droit de l'exutoire du ruisseau, l'érosion se manifeste seulement au niveau du chenal alors qu'il y a eu accumulation en bordure et en aval du ruisseau.

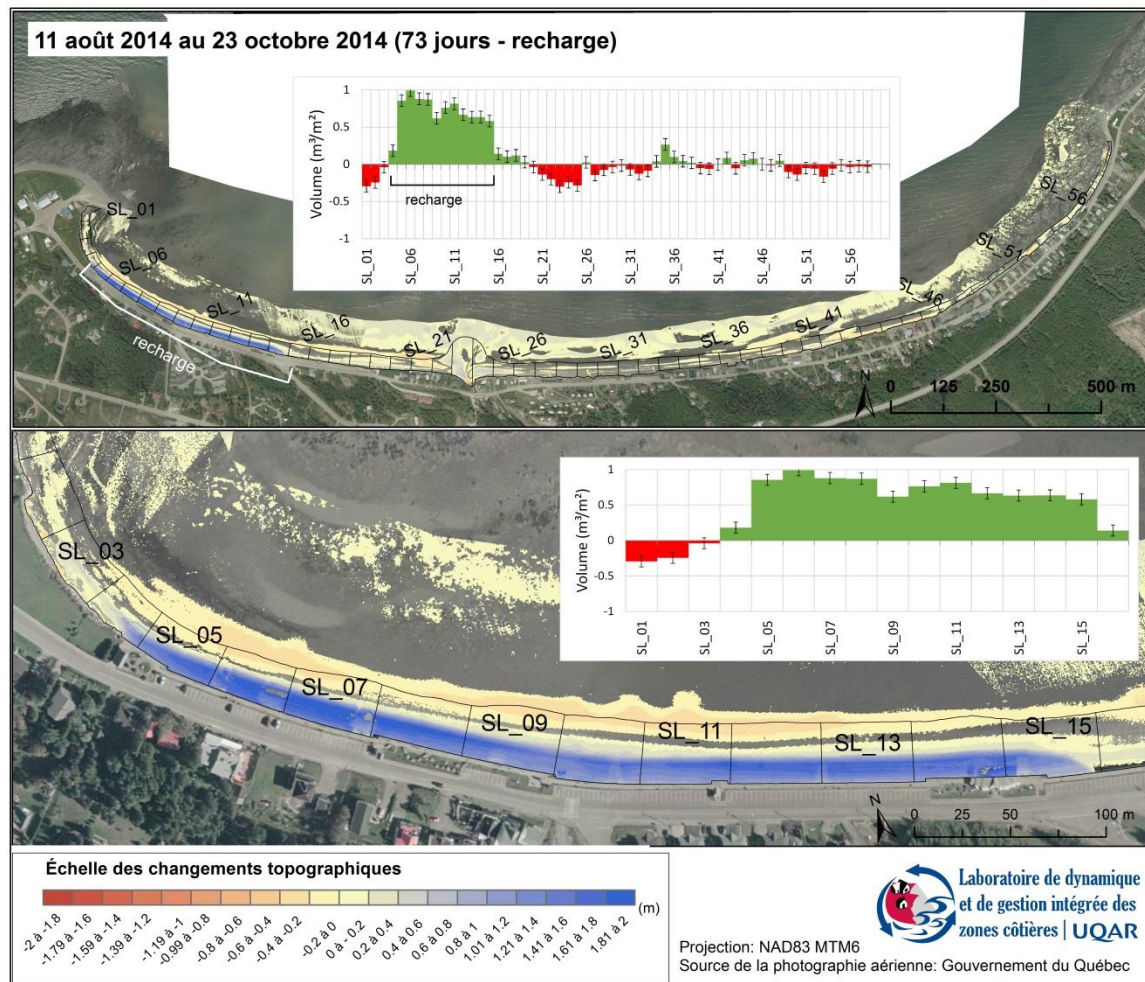


Figure 21. Différentiels topographique et volumétrique de l'Anse-aux-Coques de la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2013

5.3.3 Période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014

La période entre le 23 octobre 2014 et le 4 novembre 2014 est très courte, mais elle permet de comprendre la dynamique sédimentaire à court terme à la suite de la recharge en sédiments grossiers. Durant cette période, aucun niveau d'eau exceptionnel n'a été mesuré à la station de Rimouski (figure 22).

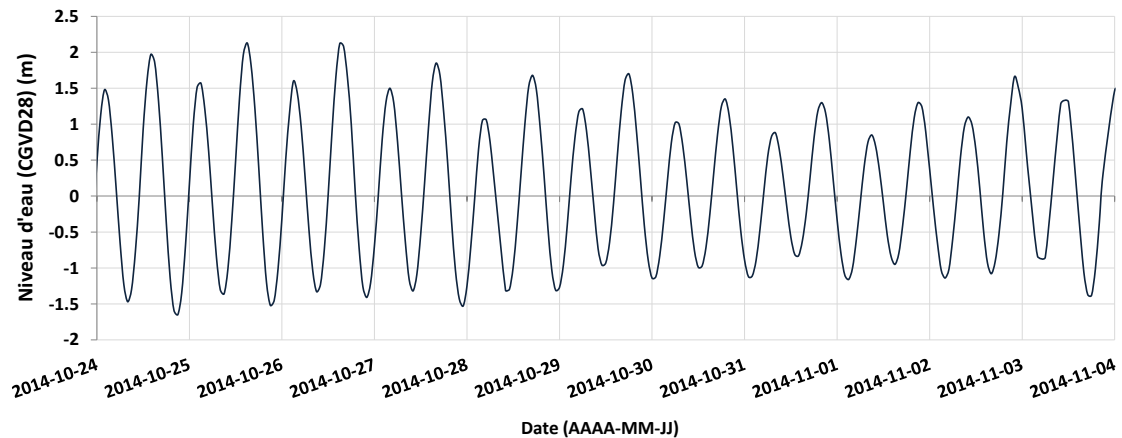


Figure 22. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014

Entre le 23 octobre et le 4 novembre 2014, il y a eu un recul rapide du front de la recharge sédimentaire, principalement pour les compartiments SL-05 à SL-09 ainsi que SL-14 à SL-16 (figure 23). La figure 23 illustre très bien l'érosion linéaire de la recharge sur le différentiel topographique. Devant la recharge sédimentaire, il y a une vaste zone d'accumulation entre les compartiments SL-08 à SL-15 et qui s'étend vers l'est au pourtour de la flexure, dans la partie inférieure du haut estran et la partie supérieure du bas estran. Ce changement montre que les sédiments accumulés en peu de temps proviennent fort probablement de l'érosion de la recharge. À l'exception de cette zone d'accumulation, il y a eu très peu de changements significatifs sur le bas estran durant cette courte période. Durant les quelques jours qui ont immédiatement suivi les travaux de recharge sédimentaire, le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) est resté assez stable avec une diminution de $0,07 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,078 \text{ m}$), passant de $3,48 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,06 \text{ m}$) à $3,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05 \text{ m}$). Cette stabilité est expliquée par l'étalement sur l'estran des sédiments érodés de la recharge. Somme toute, il y a donc très peu de changement dans la disponibilité de sédiments sur l'estran durant cette période.

À l'est du ruisseau, (SL-26 à SL-60), il y a eu très peu de changements malgré une alternance entre des zones d'érosion et d'accumulation. Par contre, la plupart des changements volumétriques calculés sont à l'intérieur ou très près de la marge d'erreur associée aux données LiDAR utilisées pour le calcul des volumes (tableau 5).

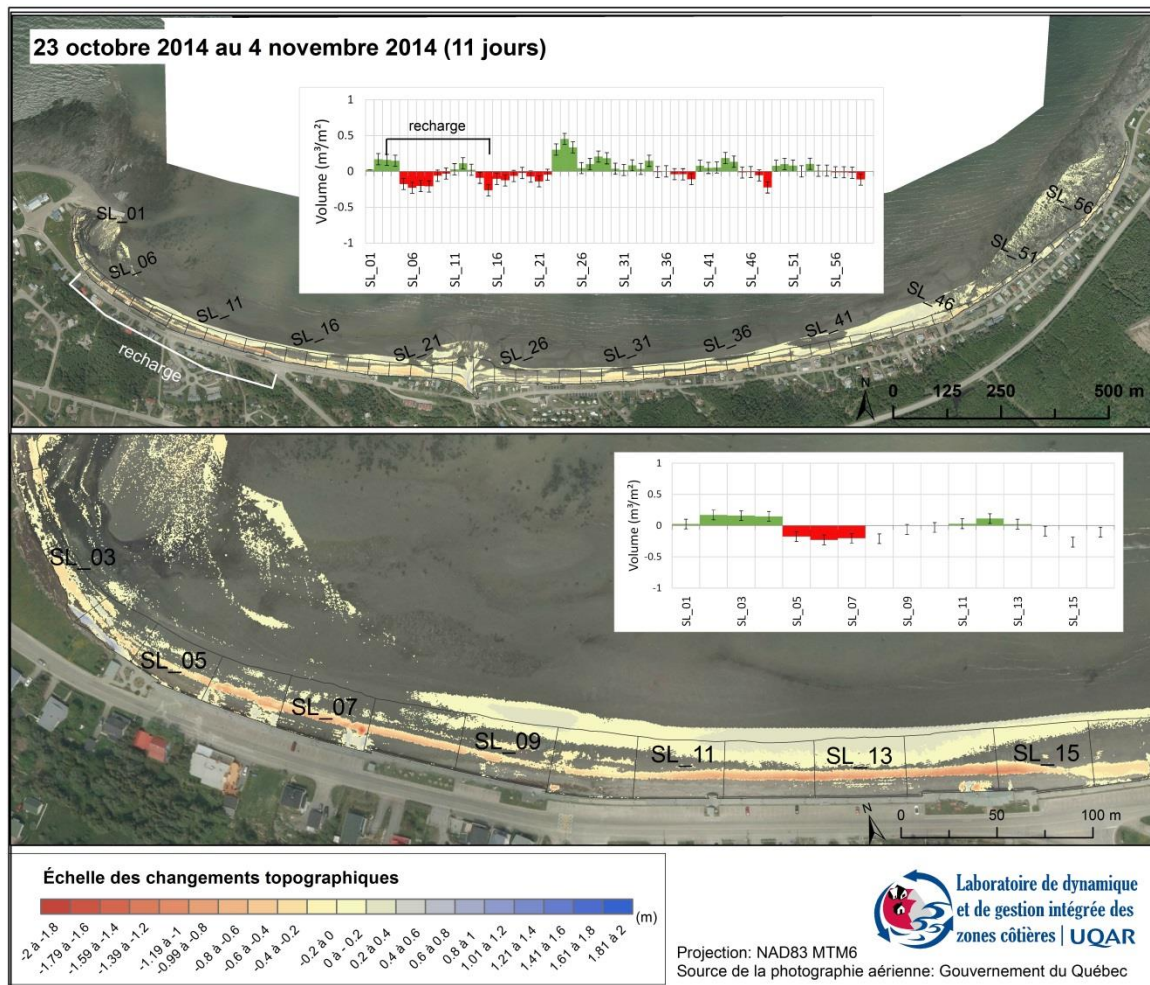


Figure 23. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014

5.3.4 Période du 30 octobre 2014 au 12 juin 2015

Durant la période du 30 octobre 2014 au 12 juin 2015, des niveaux d'eau supérieurs à 2,5 m ont été observés à 5 occasions (flèches rouges de la figure 24). D'abord, le 9 novembre 2014, puis le 24 novembre 2014.

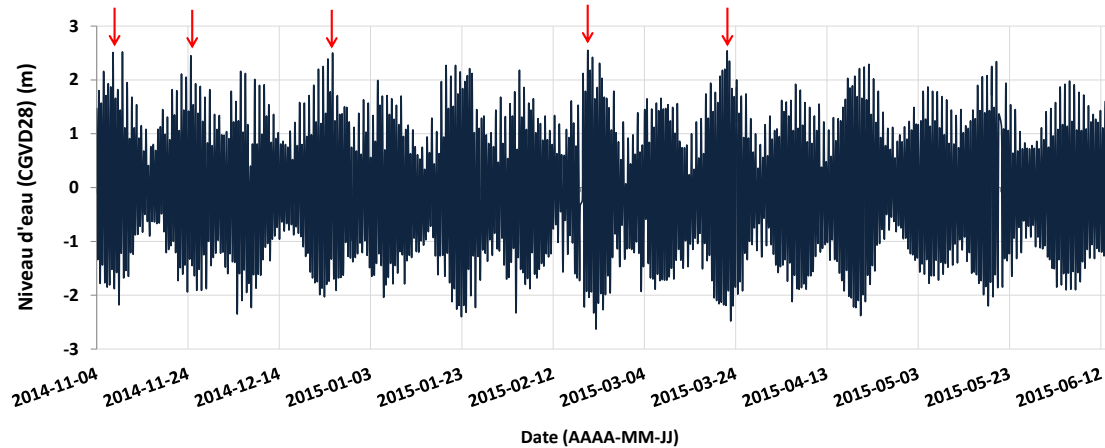


Figure 24. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015

Le 24 novembre 2014, les hauts niveaux d'eau ont frappé le front de la recharge. Les photographies des caméras de suivi montrent la formation d'une encoche d'érosion sur le front de la recharge (figure 25).



Figure 25. Formation d'une encoche d'érosion sur le front de la recharge sédimentaire lors des hauts niveaux d'eau (2,45 m) du 24 novembre 2014

Les trois autres dates où les niveaux d'eau enregistrés étaient très hauts sont : 25 décembre 2014, 19 février 2015 et 22 mars 2015. Dans les trois cas, la présence d'un pied de glace a empêché les hauts niveaux d'eau d'atteindre la recharge (figure 26). Les photographies des caméras de suivi montrent que déjà le 5 décembre 2014 une petite crête de glace était formée devant la recharge sédimentaire et le 14 décembre 2014, un pied de glace de haut estran

était formé. La présence de glace tôt en saison pourrait avoir grandement contribué à la protection et au maintien de la structure sédimentaire durant la fin de l'automne et la période hivernale.

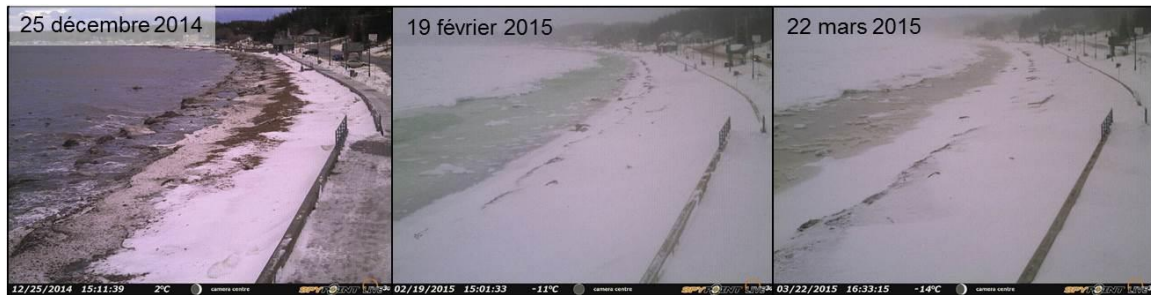


Figure 26. Photographies des caméras de suivi lors de hauts niveaux d'eau mesurés durant l'hiver 2014-2015

Les différentiels topographiques entre le 4 novembre 2014 et le 12 juin 2015 montrent une alternance entre des zones d'érosion et d'accumulation sur le haut estran de l'anse aux Coques (figure 27). Durant cette période, le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a faiblement diminué de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,068 \text{ m}$), passant de $3,41 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05 \text{ m}$) à $3,32 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,033 \text{ m}$). Plusieurs encoches d'érosion se sont formées au front de la recharge durant cette période, notamment dans les compartiments SL-06, SL-09, SL-12 et SL-14/SL-15. L'encoche située à la limite entre les compartiments SL-14 et SL-15 semble être celle qui s'est formée lors des hauts niveaux d'eau du 24 novembre 2014 (figure 25). La forte érosion du compartiment SL-06 ($-0,46 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0,068 \text{ m}$) est expliquée par la présence de deux encoches formées au cours de la période. L'accumulation observée dans les compartiments SL-09 et SL-10 est la zone d'accumulation créée au pied de la recharge par les sédiments érodés sur le front de l'infrastructure. Par contre, devant cette dernière, il y a une zone de faible érosion sur le bas estran.

À l'extrémité de la recharge sédimentaire, une accumulation est visible sur 100 m sur le haut estran. Cette accumulation se traduit par un petit gain sédimentaire de $0,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ et $0,10 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,68 \text{ m}$) pour les compartiments SL-16 et SL-17. Le haut estran à l'ouest du ruisseau est caractérisé par une zone d'accumulation. Le chenal du ruisseau ainsi que le delta en aval sont en érosion ainsi qu'une zone d'environ 300 m vers l'est sur le haut estran (SL-26 à SL-33). La portion est de l'anse est principalement caractérisée par une accumulation dans la partie supérieure du haut estran ainsi qu'en bordure de la flexure, dans la partie inférieure du haut estran et supérieure du bas estran. Par contre, pour les compartiments SL-49 à SL-58, les changements volumétriques ne sont pas significatifs. Il y a aussi une quasi-absence de changements sur le bas estran dans cette zone.

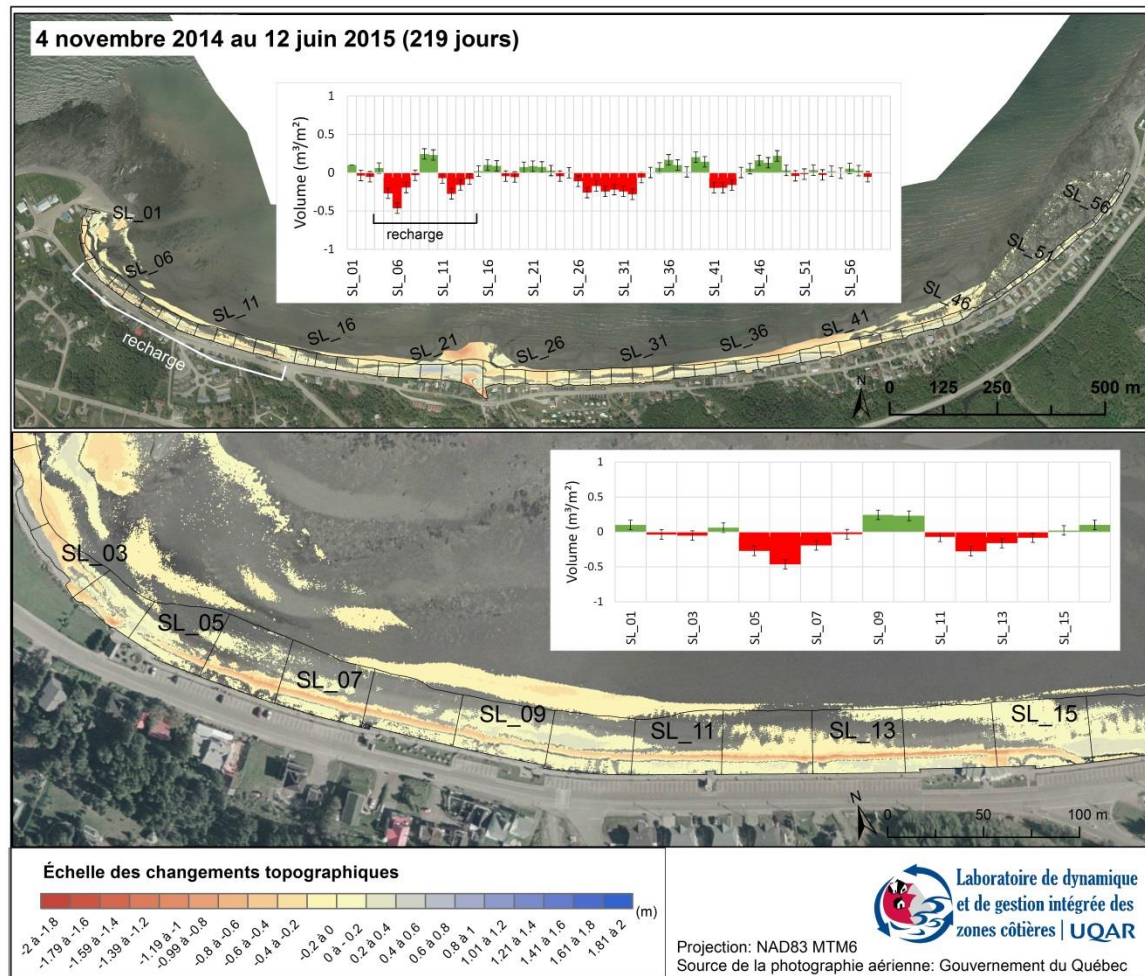


Figure 27. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015

Les profils P-4 et P-10 effectués à l'aide du D-GPS permettent d'illustrer l'évolution de la recharge sédimentaire entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015 (figure 28 et 29). Le front de la recharge a reculé d'un peu plus de 2 mètres. Ce retrait du front concorde avec les résultats du différentiel topographique entre le 4 novembre 2014 et le 12 juin 2015 (figure 27). La petite accumulation visible au-dessus de la recharge en avril 2015 correspond à la présence de glace résiduelle lors du levé topographique. Le profil du haut estran s'est abaissé dans son ensemble alors qu'il y a très peu de changements topographiques sur le bas estran. La flexure s'est déplacée vers la partie supérieure du haut estran, ce qui cause une diminution de la largeur du haut estran.

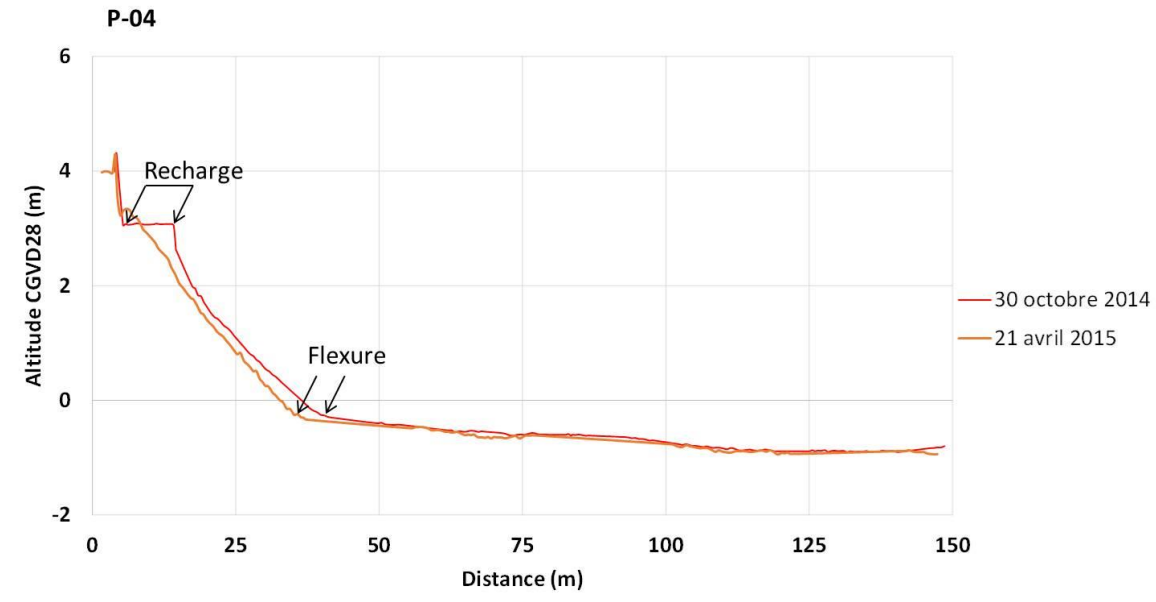


Figure 28. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015

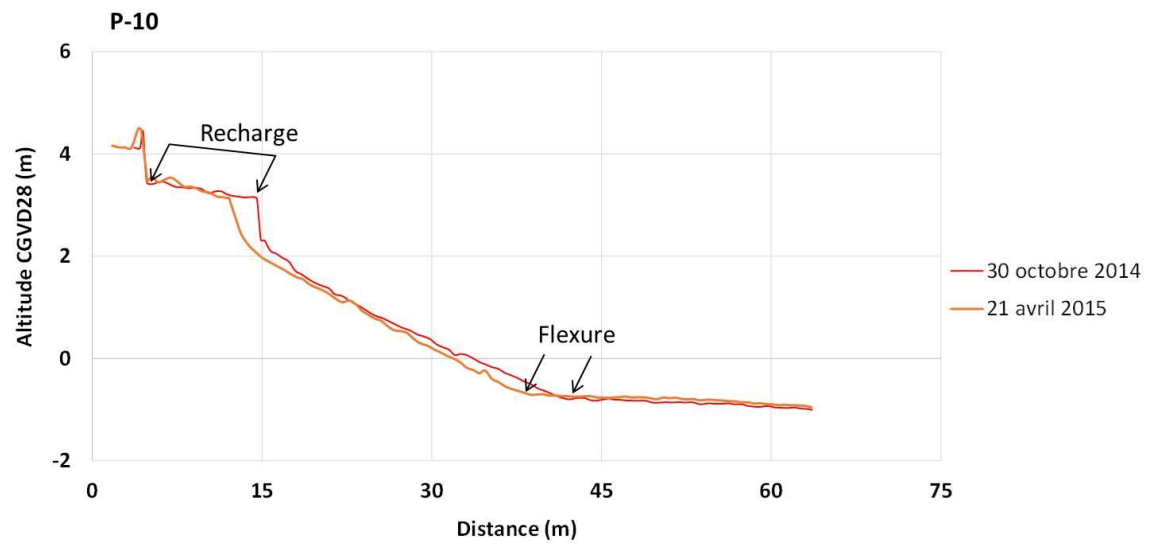


Figure 29. Évolution du profil D-GPS P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015

5.3.5 Période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015

Durant la période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015, aucun niveau d'eau exceptionnel n'a été enregistré (figure 30).

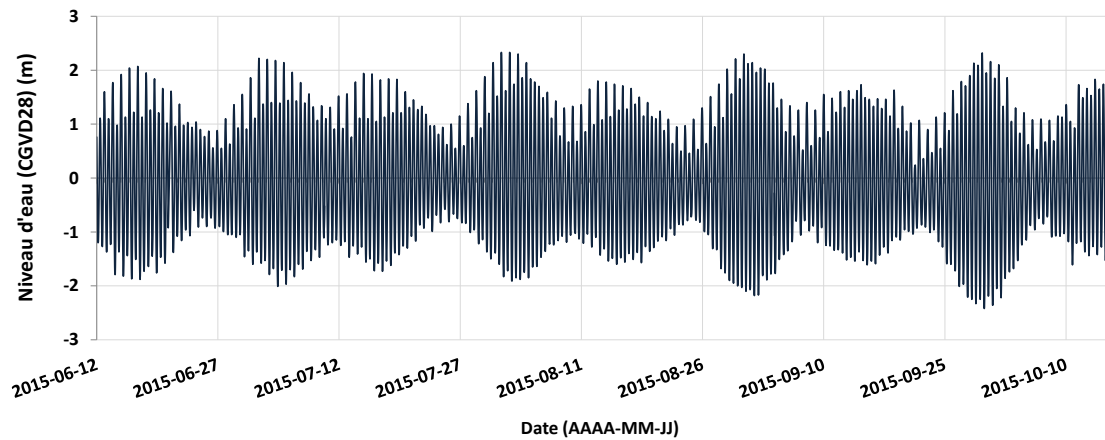


Figure 30. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015

La période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015 est celle où il y a eu le plus de perte sédimentaire sur le haut estran au niveau de la recharge (figure 31). Durant cette période, le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a diminué de $0,23 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,043 \text{ m}$), passant de $3,32 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,033 \text{ m}$) à $3,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,029 \text{ m}$). Cette perte sédimentaire correspond à la période d'érosion la plus importante du suivi. Bien qu'il y ait une forte érosion de l'infrastructure, l'accumulation des sédiments sur le haut estran permet un bilan positif pour les compartiments SL-05 et SL-06.

La section ouest du bas estran, devant la recharge sédimentaire, montre peu de changements. Puisque le haut estran a subi une forte perte de sédiments, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une partie de ces sédiments s'est étalée sur le bas estran devant, notamment en raison de l'absence d'érosion dans cette section en comparaison à la section est.

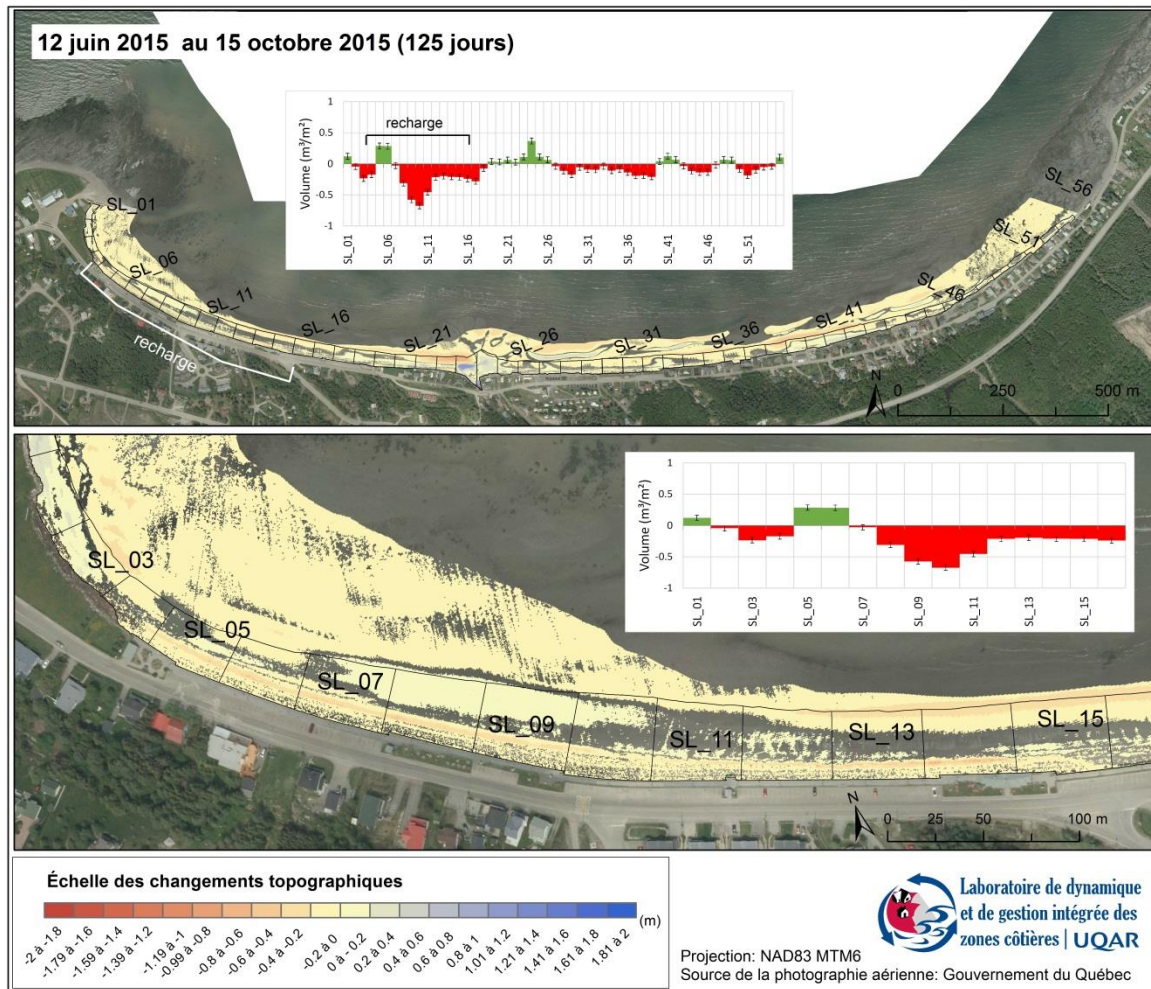


Figure 31. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015

5.3.6 Période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015

La période du 15 octobre au 2 décembre 2015 a connu une tempête côtière. Le 29 octobre 2015, le niveau d'eau a été enregistré à Rimouski à 2,82 m alors qu'il était prédit à 2,02 m, ce qui représente une surcote de 0,80 m (figure 32). Ce niveau d'eau équivaut à un niveau d'eau avec un temps de retour de 5 ans (tableau 2).

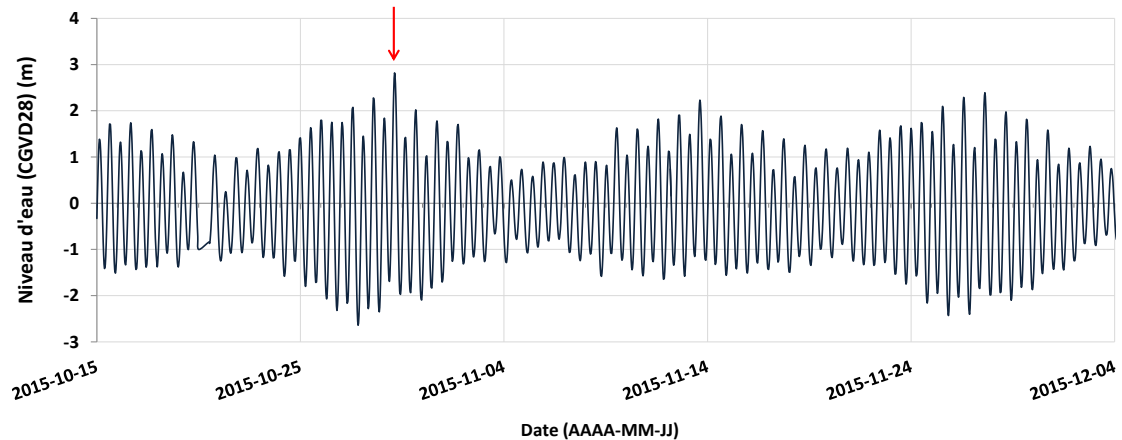


Figure 32. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015

Lors de cette tempête, les vagues se brisaient sur le front de la recharge et seulement le jet de rive a submergé le dessus de la recharge (photo 1, figure 33). Les images captées par les caméras de suivi permettent de constater que le niveau d'eau était haut, mais que la mer était calme et qu'il y avait de faibles vagues. À l'extrémité est, là où il n'y a pas de recharge, les vagues se brisaient directement contre le mur de la promenade (photo 2, figure 33). La photo 3 de la figure 33 montre les laisses de jet de rive qui bordent le bas du mur de la promenade de l'Anse-aux-Coques.



Figure 33. Niveau d'eau atteint lors de la tempête du 29 octobre 2015 à l'anse aux Coques

Entre le 19 octobre 2015 et le 2 novembre 2015, les profils topographiques du secteur ouest (P-04) montrent un léger recul du front de la recharge sédimentaire ainsi qu'une faible érosion du haut estran dans les 10 mètres devant la recharge (figure 34). Entre le 2 novembre 2015 et le 2 décembre 2015, une encoche à la base de la recharge semble s'être formée. Le haut estran s'est abaissé et la flexure s'est déplacée de quelques mètres vers les terres, ce qui en résulte une diminution de la largeur du haut estran. À l'exception d'une mince accumulation entre le 2 novembre et le 2 décembre 2015 sur le front (côté terre) de la barre de bas estran, il n'y a pas de changements topographiques visibles sur le bas estran. On observe aussi un léger recul du front de la recharge à son extrémité ouest entre le 19 octobre 2015 et le 2 novembre 2015 (P-12) ainsi qu'un léger abaissement sur la partie inférieure de la recharge (figure 35). Il y a très peu de changement entre le 2 novembre 2015 et le 2 décembre 2015 dans la partie est de la recharge.

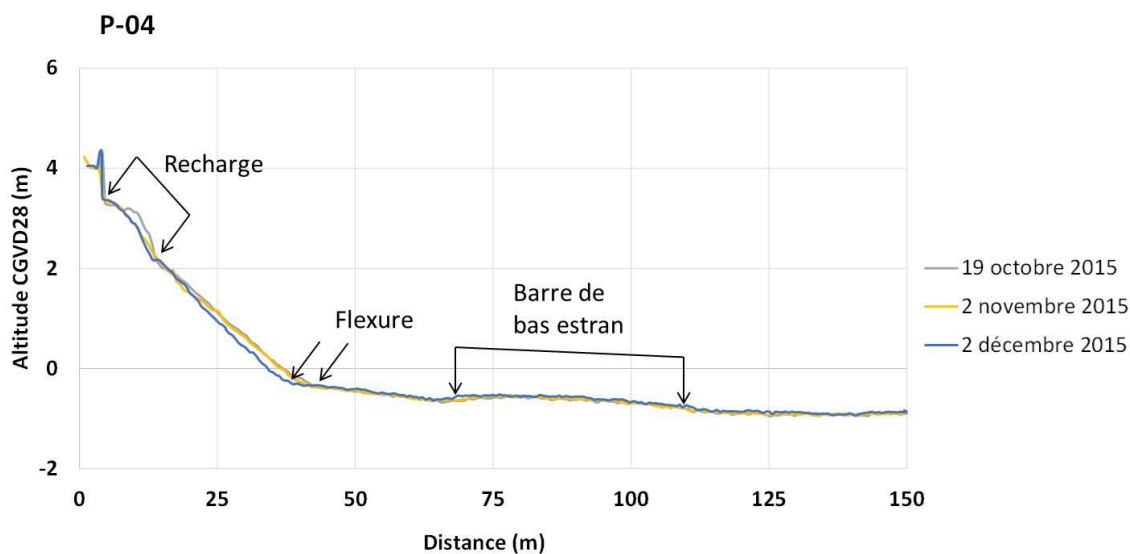


Figure 34. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015

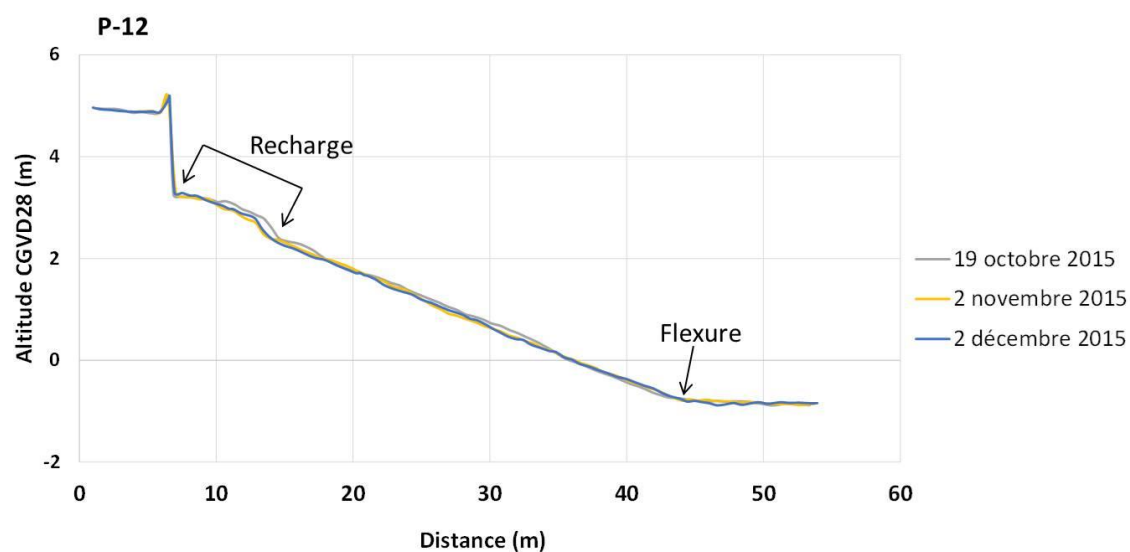


Figure 35. Évolution du profil D-GPS P-12 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015

5.3.7 Période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016

Les 11 et 13 janvier 2016, le littoral du Bas-Saint-Laurent a été affecté par deux tempêtes côtières consécutives (figure 36). Le niveau d'eau enregistré à la station de Rimouski le 11 janvier 2016 était de 2,66 m alors que la marée haute était prédite à 2,24 m. Le haut niveau d'eau du 11 janvier 2016 était jumelé à de fortes vagues, contrairement au 29 octobre 2014 où il y avait une quasi-absence de vagues. En effet, même si les niveaux d'eau étaient 15 cm plus élevés le 29 octobre 2015, il y a eu plus de débordements côtiers le 11 janvier 2016 en raison de la combinaison du haut niveau d'eau à de fortes vagues.

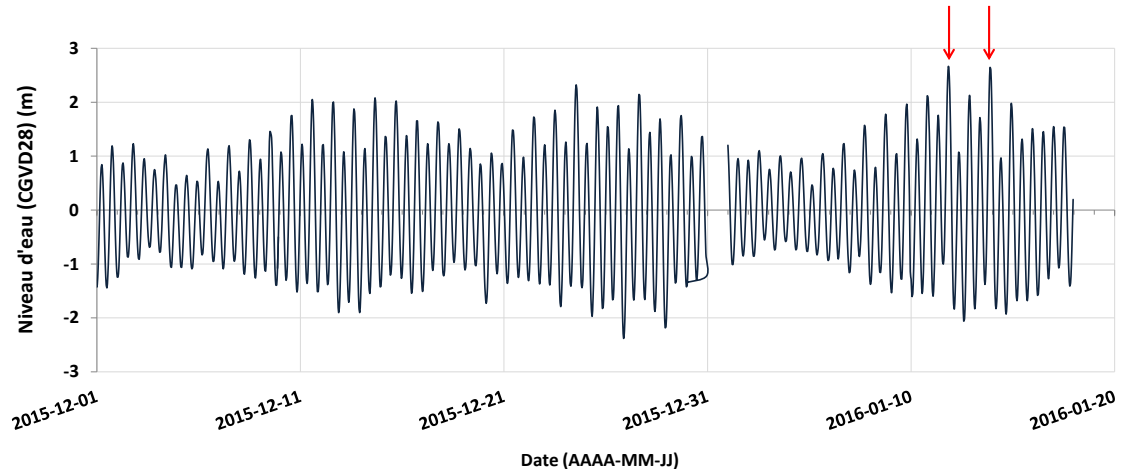


Figure 36. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016

Bien que les niveaux d'eau enregistrés correspondent à une récurrence de seulement 2 ans (tableau 2), la combinaison des hauts niveaux d'eau et des vagues a créé des débordements ponctuels au-dessus du mur de la promenade de l'Anse-aux-Coques. Durant cette tempête, les vagues atteignaient le mur de la promenade, ce qui a causé de la submersion au-dessus du mur par des nappes d'eau en raison du franchissement des vagues. La ligne bleue de la figure 37 montre le front de la recharge le 14 janvier 2016, soit quelques jours après la tempête. Quelques encoches d'érosion ont été observées sur la recharge, notamment là où plusieurs points ponctuels de franchissement des vagues ont été répertoriés. La photo 2 de la figure 37 montre une nappe de jet de rive ayant franchi le mur de la promenade à cet endroit. Par ailleurs, quelques mètres à l'est de la recharge sédimentaire, la promenade a été presque entièrement submergée par des nappes d'eau sur environ 100 mètres (photo 3, figure 37).



Figure 37. Localisation de points ponctuels de franchissement des vagues répertoriés au GPS lors de la tempête du 11 janvier 2016 à l'anse aux Coques

Durant cette tempête, des galets ont été projetés sur la promenade de l'Anse-aux-Coques. La photographie de la figure 38 prise le lendemain, soit le 12 janvier 2016, montre la présence de plusieurs galets sur la promenade. Les galets sont aussi visibles à travers la nappe d'eau de la photo 2 de la figure 37.



Figure 38. Présence de galets sur la promenade de l'Anse-aux-Coques projetés lors de la tempête du 11 janvier 2016 (photographie prise le 12 janvier 2016)

Une deuxième tempête a eu lieu le 13 janvier 2016. Le niveau d'eau maximum enregistré à la station de Rimouski était de 2,64 m alors que la marée haute était prédite à 2,04 m. De façon similaire à la dynamique observée 2 jours précédemment, des nappes d'eau ont submergé la promenade de l'Anse-aux-Coques de façon ponctuelle (photographie de la figure 39). Par contre, les températures de l'air très froides du 13 janvier 2016 ont permis la formation de frasil, ce qui a considérablement diminué la force des vagues à la côte et sans doute contribué à diminuer les débordements côtiers.



Figure 39. Nappe de jet de rive sur la promenade de l'Anse-aux-Coques lors de la tempête du 13 janvier 2016

La figure 40 montre l'évolution d'un profil topographique entre le 2 décembre 2015 et le 14 janvier 2016. La petite accumulation à la base du mur correspond à la présence de glace lors de la prise de données. Durant cette période, le front de la recharge a reculé de près de 2 mètres. Les photographies des caméras de suivi montrent qu'en décembre 2015 jusqu'au 11 janvier 2016, de la glace couvrait le haut estran, ce qui avait un effet de protection de la plage face aux conditions météo-marines. Lors de la tempête du 11 janvier 2016, la glace a été complètement brisée et évacuée par les fortes vagues et les niveaux d'eau. Les fortes vagues et les hauts niveaux d'eau des tempêtes des 11 et 13 janvier 2016 ainsi que l'absence de glace ont fortement contribué au recul de 2 mètres du front de la recharge lors de cette courte période. Les profils montrent aussi une légère accumulation sur le haut estran et dans la partie supérieure du bas estran, sédiments qui proviennent sans doute de l'érosion du front de la recharge.

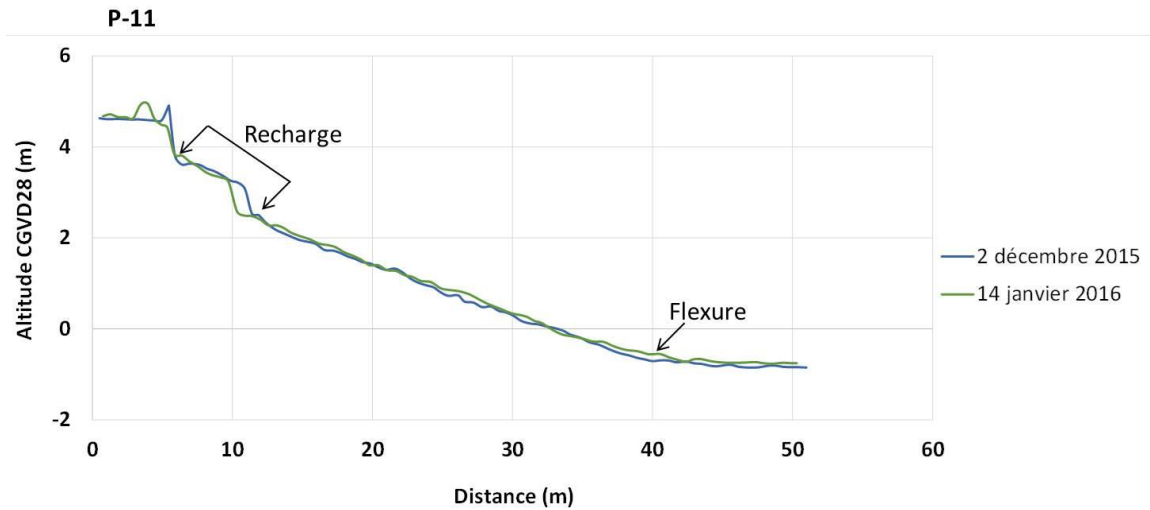


Figure 40. Évolution du profil P-11 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015

Près du profil P-12, une grande encoche s'est formée lors des tempêtes des 11 et 13 janvier 2016. Cette encoche semble être au même endroit ou très près de celle qui s'était formée lors de la tempête du 24 novembre 2014, tout juste devant le bâtiment sanitaire de la promenade de l'Anse-aux-Coques (figure 41). Les limites du front de la recharge ont été tracées sur les photographies issues des caméras de suivi. La photographie prise le 12 janvier 2016 montre l'encoche ouest, où la recharge a été érodée quasi complètement.

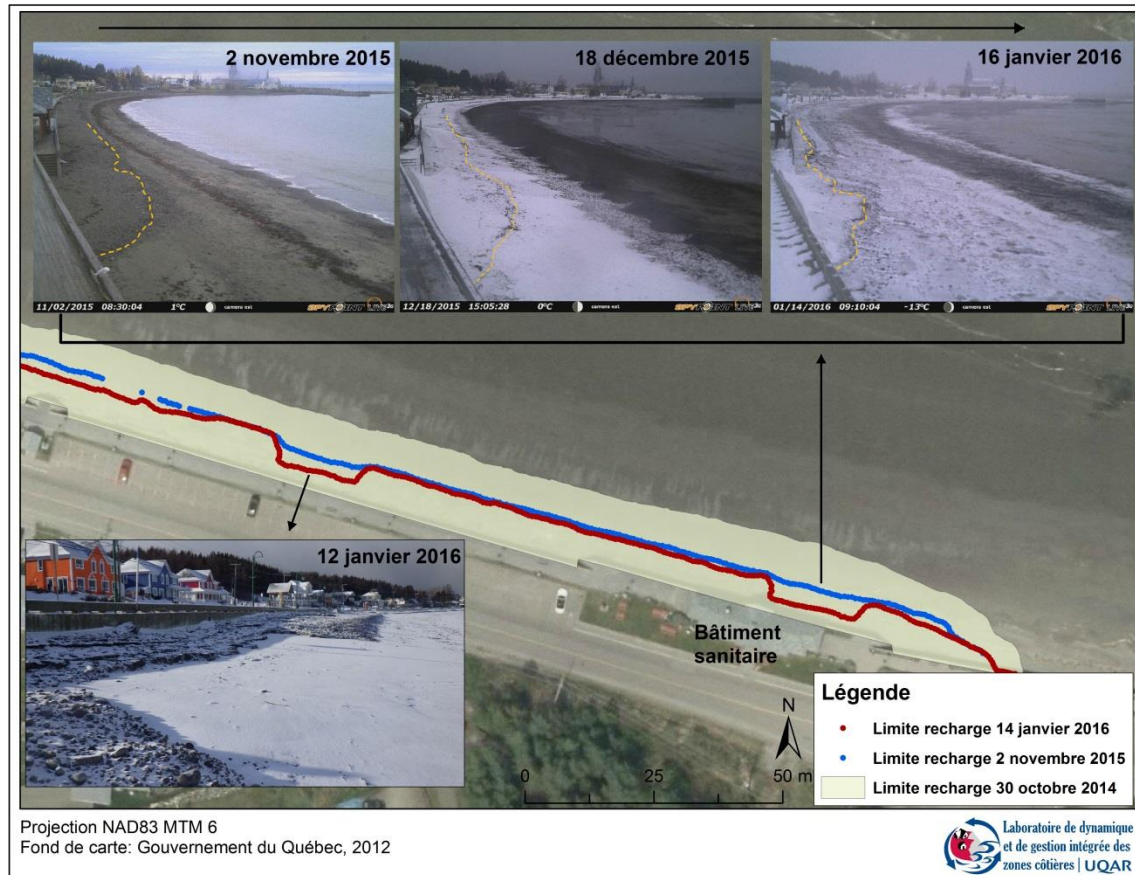


Figure 41. Formation d'une encoche d'érosion sur la recharge sédimentaire entre le 2 novembre 2015 et le 16 janvier 2016

5.3.8 Période du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016

La période du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016 a connu 5 événements où des surcotes relativement importantes ont été enregistrées (figure 42). Comme nous l'avons déjà mentionné, les tempêtes du 11 et 13 janvier 2016 ont provoqué un recul important du front de la recharge et une partie de ces sédiments érodés est venue s'accumuler sur le bas de plage et le bas estran. À la suite de ces deux tempêtes, des niveaux d'eau relativement importants ont aussi été enregistrés le 8 avril 2016 (2,6 m) et les 8 et 9 mai 2016 (2,7 m).

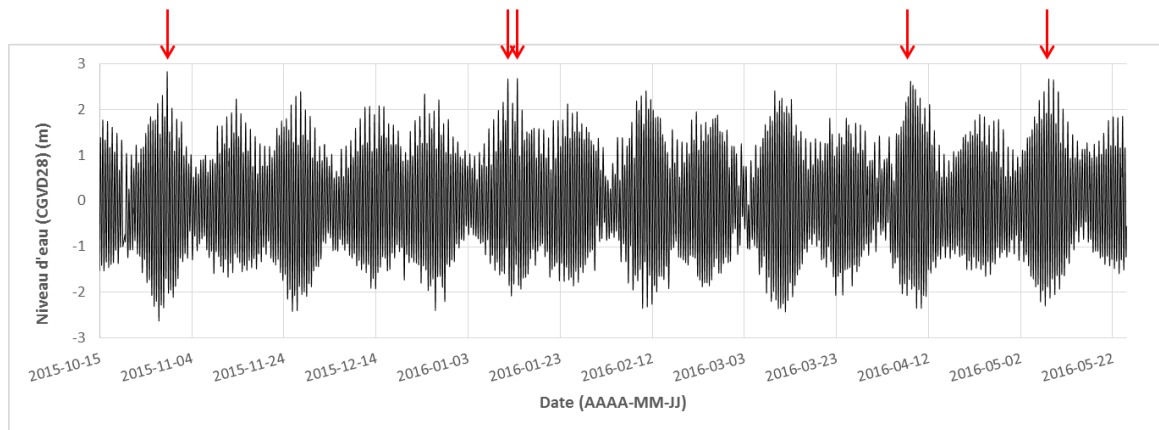


Figure 42. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016

Le bilan sédimentaire entre le 15 octobre 2015 et le 24 mai 2016, soit sur une période de 222 jours, de l'ensemble de l'anse aux Coques indique un déficit sédimentaire de la plage avec une légère accumulation sur le bas estran à l'est de la recharge sédimentaire. On peut effectivement voir à la figure 43 des bancs d'accumulation sur le bas estran ainsi qu'une accumulation sur le bas estran au niveau du delta du ruisseau. Ainsi, les sédiments qui s'étaient accumulés sur la plage vis-à-vis le ruisseau pour la période de juin 2015 à octobre 2015 semblent avoir été redistribués vers le bas estran. Les plus forts gains sédimentaires sur la plage se retrouvent dans le secteur des compartiments SL-43 à SL-46 ainsi qu'à l'ouest du ruisseau.

Au niveau de la recharge, les changements volumétriques sont plutôt faibles. On constate un faible déficit pour les compartiments SL-01 à SL-08 avec une valeur maximale atteignant $-0,39 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pour SL_05. On constate aussi que la zone déficitaire particulièrement importante au niveau de la flexure pour les compartiments SL_12 à SL-16 lors de la période de juin 2015 à octobre 2015 a été comblée entre octobre 2015 et le 24 mai 2016. On constate d'ailleurs un bilan légèrement positif pour le compartiment SL_09 à SL-12 avec un gain maximal de $0,16 \text{ m}^3/\text{m}^2$ pour le compartiment SL-10. On constate toutefois, au niveau de la partie supérieure

du haut estran, une bande linéaire déficitaire qui correspond au recul du front de la recharge sédimentaire.

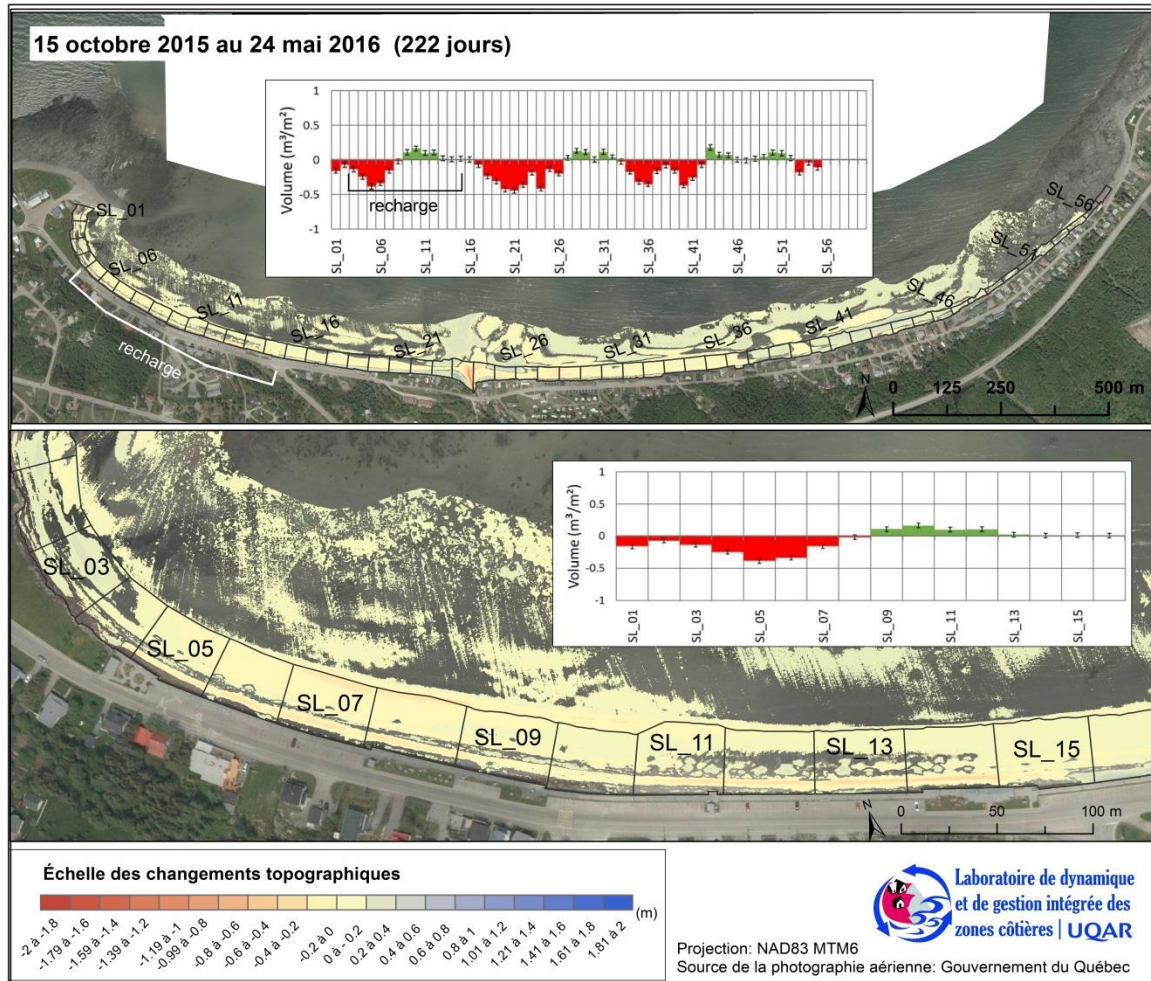


Figure 43. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 15 octobre 2015 au 24 mai 2016

5.3.9 Période du 24 mai 2016 au 14 juin 2016

La période du 24 mai 2016 au 14 juin 2016 est plutôt courte (21 jours), mais permet de voir l'influence des vagues de beaux temps sur le bilan sédimentaire de la plage. En effet, les niveaux d'eau ont été plutôt faibles et ont atteint une valeur maximale de 2,55 m le 7 juin 2016 lors de la période de marée de vive-eau (figure 44). On constate, sur l'ensemble de l'anse aux Coques, un bilan sédimentaire plutôt positif (figure 45). Les plus fortes accumulations s'observent à l'embouchure du ruisseau vis-à-vis les compartiments SL-25 et SL-26 ainsi qu'immédiatement à l'est de la recharge sédimentaire. Une barre sableuse est observable en bordure de la flexure sur une majeure partie de l'anse. On constate trois zones très localisées de déficit sédimentaire, soit sur la partie ouest de la recharge jusqu'au compartiment SL-01, le compartiment SL-23 immédiatement à l'ouest de l'embouchure du ruisseau et vis-à-vis les compartiments SL-48 et SL-49. Ce dernier secteur est d'ailleurs généralement déficitaire pour les différentes périodes d'analyse (figure 17).

Au niveau de la recharge sédimentaire, on constate un faible gain, sauf pour l'extrémité ouest qui est déficitaire. Un gain sédimentaire est observable au niveau de la flexure de la plage et du bas estran sur l'ensemble du secteur de la recharge (figure 45).

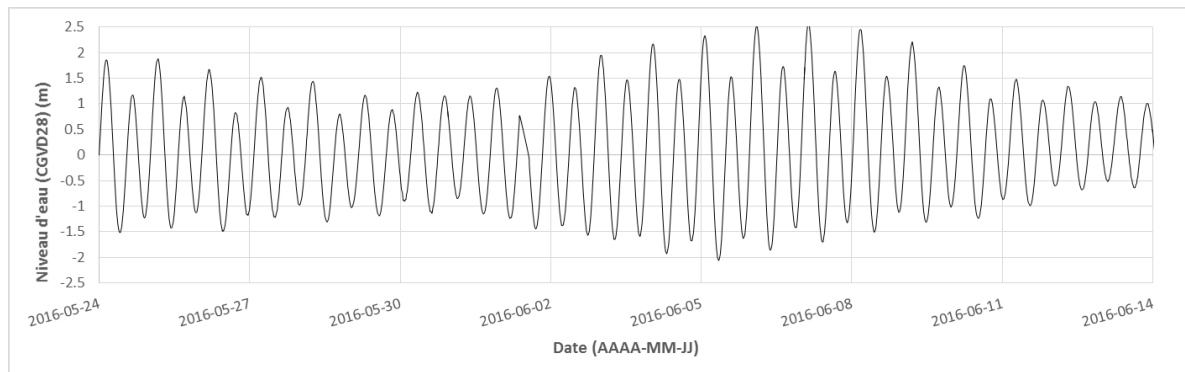


Figure 44. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 24 mai au 14 juin 2016

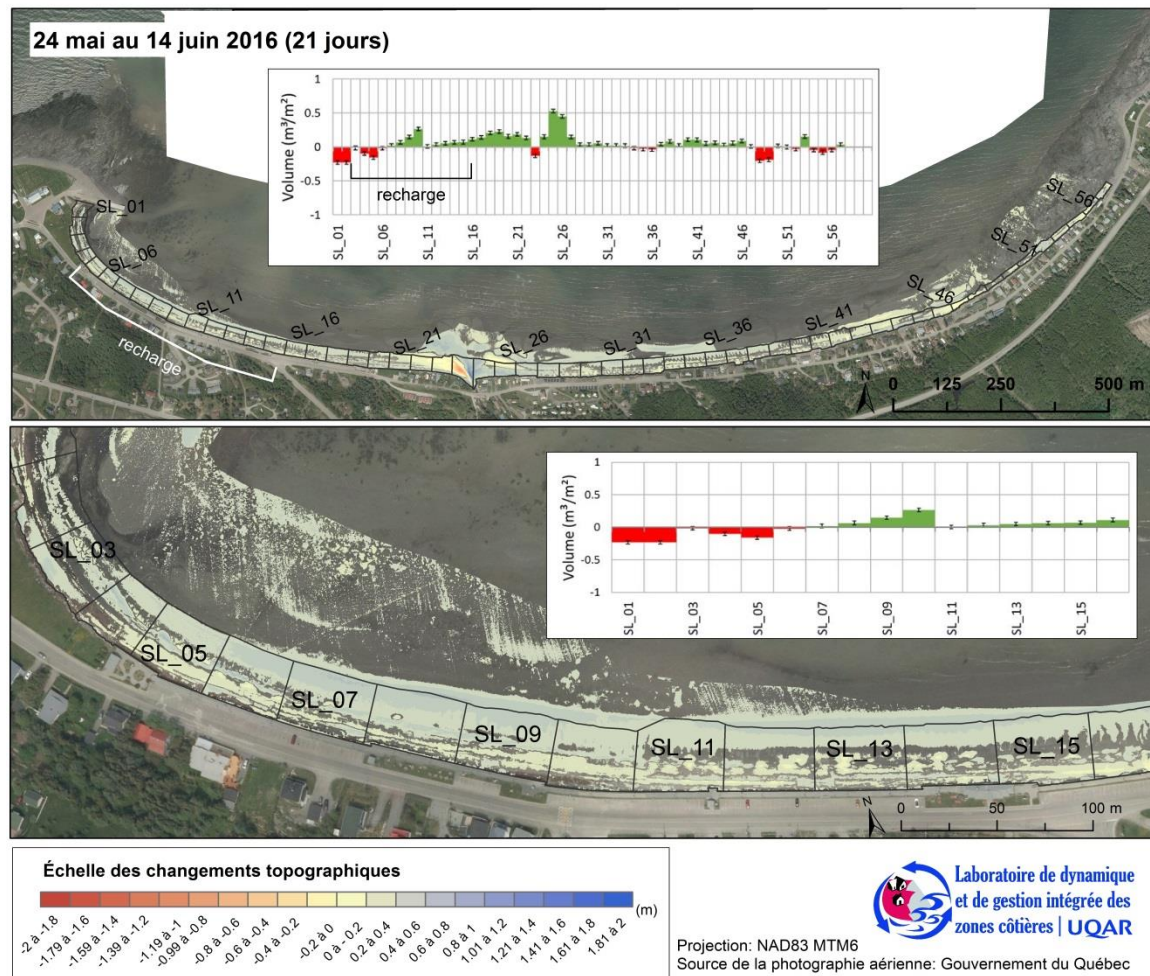


Figure 45. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 24 mai 2106 au 14 juin 2016

5.3.10 Période du 2 décembre 2015 au 17 novembre 2016

La période du 2 décembre 2015 au 14 juin 2016 a connu comme nous l'avons déjà indiqué 4 événements de tempête (figure 38). Quant à la période du 14 juin au 17 novembre 2016, un seul événement a dépassé le niveau d'eau de 2,5 m, soit le 16 novembre 2016 où il a atteint 2,72 m (figure 46). Les figures 47 (caméra ouest), 48 (caméra centre) et 49 (caméra est) présentent trois points de vue sur la plage et la recharge de Sainte-Luce avant, pendant et après la tempête du 16 novembre. Cette tempête a réellement généré un régime de collision avec le front de la recharge provoquant un recul important du front, en plus de submerger la recharge lorsque le niveau maximum du jet de rive a été atteint. On constate aussi où le jet de rive est venu frapper le mur que la réflexion des vagues a provoqué un abaissement de la surface de la recharge et de nombreuses encoches d'érosion. La section à l'extrémité est de la recharge où le contact entre le jet de rive et le mur a été fréquent lors de cet événement et par conséquent la réflexion des vagues a été fortement érodée (figure 49).

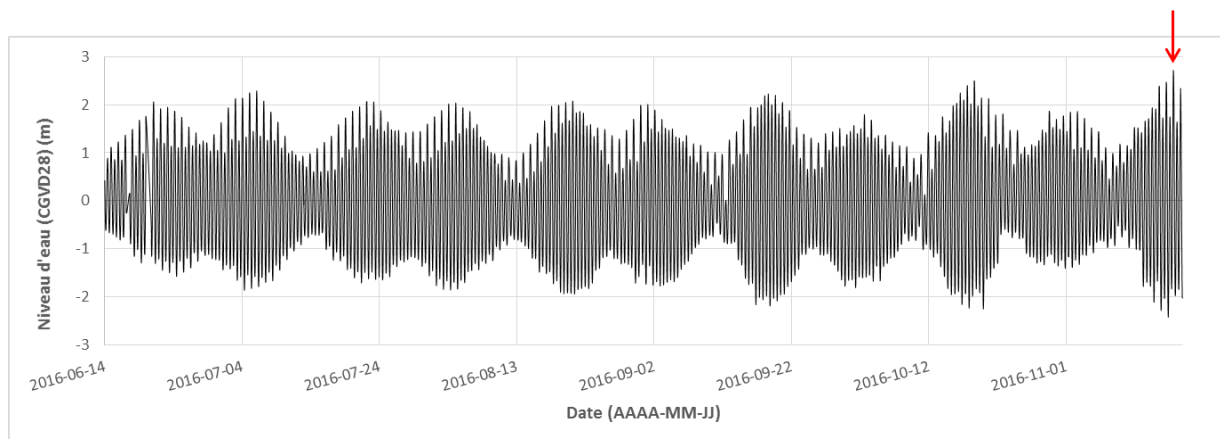


Figure 46. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 14 juin 2016 au 17 novembre 2016



Figure 47. Évolution du front de la recharge lors de la tempête du 16 novembre 2016 (caméra ouest)



Figure 48. Évolution du front de la recharge lors de la tempête du 16 novembre 2016 (caméra centre)



Figure 49. Évolution du front de la recharge lors de la tempête du 16 novembre 2016 (caméra est)

Les figures 50 et 51 permettent de visualiser l'évolution des profils de plage sur une année entre le 2 décembre 2015 et le 17 novembre 2016. On constate au profil 4 que le front de la recharge a non seulement fortement reculé, mais le niveau de la surface de la recharge s'est aussi fortement abaissé. Au profil 12, soit à l'extrémité est de la recharge, on remarque que cette dernière s'est même complètement érodée lors de la tempête du 16 novembre 2016. À partir du moment où la berme formée par la recharge sédimentaire est trop étroite, les vagues viennent frapper le mur de manière plus fréquente, favorisant leur réflexion, ce qui entraîne un déplacement des sédiments de la recharge vers la mer et un abaissement et une érosion plus rapide de la recharge.

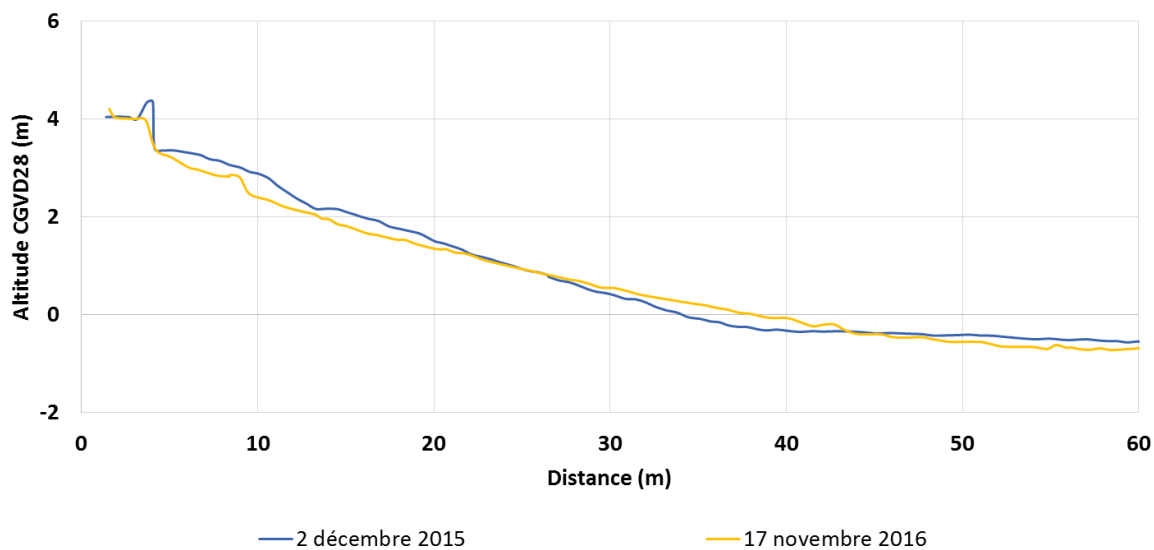


Figure 50. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 2 décembre 2015 et le 17 novembre 2016

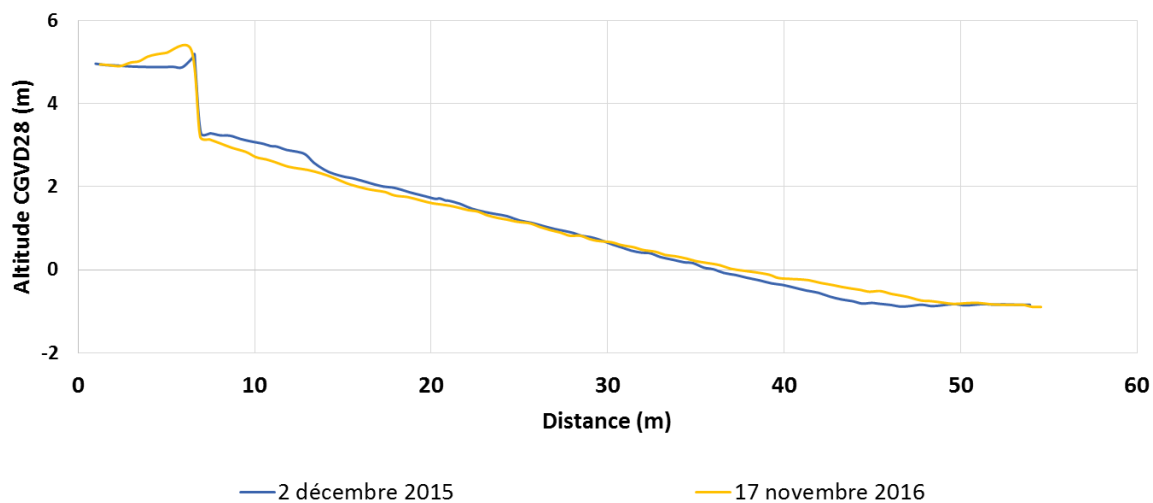


Figure 51. Évolution du profil D-GPS P-12 entre le 2 décembre 2015 et le 17 novembre 2016

5.4 Synthèse des changements morphologiques de l'anse aux Coques à la suite de la recharge sédimentaire (octobre 2014 à novembre 2017)

En 2013, l'estran de l'anse aux Coques était majoritairement sableux avec présence de gravier dans le haut de la plage (Genivar, 2012, cité dans Ropars, 2013). Selon Genivar 2012, le bas estran était principalement composé de sable fin et moyen alors que le haut estran était composé de sable moyen et grossier (et gravier) en 2013. Les résultats des analyses granulométriques réalisées en 2014, 2015 et 2016 et présentés dans la section 5.1 montrent une évolution marquée de la granulométrie du haut estran depuis 2014 (figure 52).

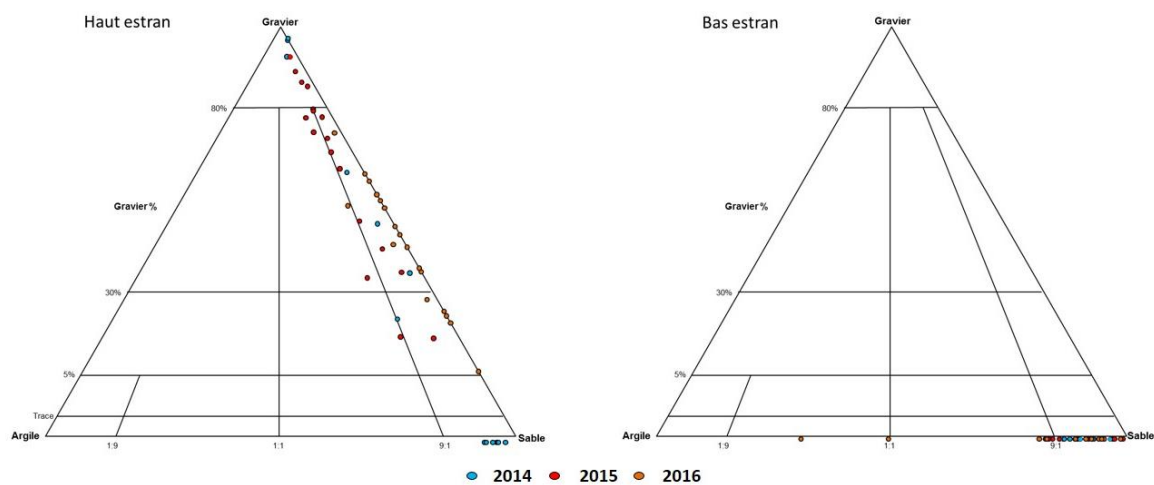


Figure 52. Diagrammes simplifiés présentant l'évolution sédimentologique du haut estran et du bas estran (2014 : bleu, 2015 : rouge, 2016 : orange)

La matrice des échantillons récoltés directement sur la recharge sédimentaire en 2014 était constituée entièrement de gravier. Avec le recul du front de la recharge, l'analyse des échantillons prélevés en 2015 et 2016 exactement au même endroit qu'en 2014 montre une matrice plutôt mixte, mélangeant sable et gravier.

Sur le haut estran, devant la recharge sédimentaire, les échantillons récoltés en 2014 étaient principalement composés de sable avec une présence de limon-argile et de gravier pour certains échantillons, ce qui correspond aux analyses réalisées par Genivar (2012). Par contre, en octobre 2015, ces échantillons étaient constitués principalement de graviers, dont une grande proportion de graviers fins et moyens (4 à 16 mm), et du sable. En 2016, la proportion de gravier a diminué au profit de la fraction de sable moyen et grossier. L'évolution du D50 du haut estran entre 2014 et 2016 est présentée à la figure 53. La présence d'un « R » au-dessus de la bande indique que l'échantillon a été récolté sur la recharge. Les rapports du

MDDELCC (2014) et de Ropars (2013) font état d'un diamètre prévu pour la recharge de 7 mm (médiane), ce qui correspond à du gravier fin selon l'échelle de Udden (1914) et Wentworth (1922). Les échantillons récoltés dans la recharge sédimentaire le 30 octobre 2014 montrent des diamètres équivalents à des graviers grossiers (16 mm à 32 mm) et des graviers fins et moyens (4 mm à 16 mm) avec des valeurs maximales de 23 mm et de 24 mm respectivement pour les échantillons P4-HE-1 et P9-HE-1. Malgré l'aspect grossier des sédiments de la recharge, à une exception près, l'ensemble des échantillons récoltés sur le haut estran en 2015 ne dépassent pas un diamètre médian de 5 mm, ce qui correspond à du gravier fin. En 2016, les D50 des échantillons sont inférieurs à 5 mm, sauf pour l'échantillon P3-HE-1 (20 mm) et P2-HE-1 (12 mm). Si nous faisons abstraction des échantillons prélevés directement sur la recharge en 2014, le D50 moyen est passé de 1,2 mm en 2014 à 3,2 mm en 2015 à 1,4 mm en 2016.

Entre 2014 et 2016, la granulométrie du bas estran a très peu changé et correspond à ce que Genivar (2012) avait observé, soit une composition de sable fin et moyen. Par contre, nos résultats de 2014 à 2016 montrent aussi la présence de limon-argile.

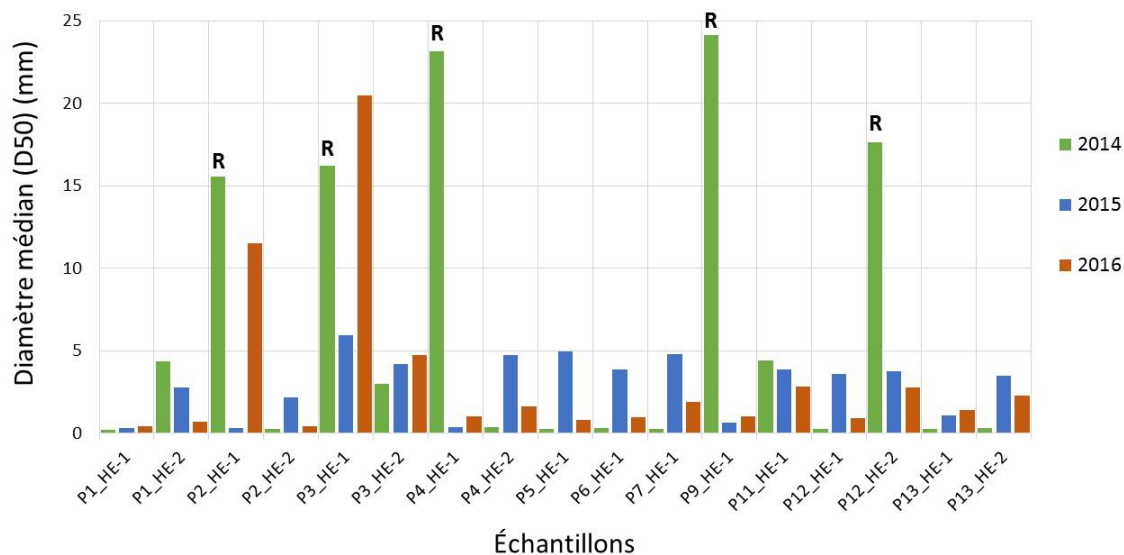


Figure 53. Évolution du D50 des échantillons de haut estran entre 2014 et 2016

Les changements de la taille des sédiments de la plage sont directement liés à l'érosion des matériaux de la recharge sédimentaire. Le recul moyen du front de la recharge a été de près de 8 m entre le 23 octobre 2014 et le 14 janvier 2016 avec une valeur minimale de 4,8 m et une valeur maximale de 12 m (figure 54). On constate sur les figures 54 et 55 que les fortes valeurs de recul du front de la recharge sont associées à des encoches d'érosion localisées

devant les émissaires pluviaux. L'altitude plus basse de la recharge au niveau des émissaires pluviaux semble avoir contribué à la formation de ces encoches d'érosion. En effet, les hauts niveaux d'eau constatés à l'automne 2015 et plus particulièrement en janvier 2016 ont atteint le mur vis-à-vis les segments plus bas de la recharge. La réflexion des vagues contre le mur a ainsi favorisé l'évidement de la recharge (figure 55 et 56). Les levés terrain lors de la tempête du 11 janvier 2016 ont permis de confirmer que les plus gros débordements au-dessus du mur ont eu lieu derrière ces encoches, où l'effet de protection de la recharge était moins efficient. Les débordements plus importants au niveau de ces encoches ainsi qu'à l'est de la recharge montrent que la présence de la recharge a un effet de protection et diminue considérablement le franchissement des vagues au-dessus du mur de la promenade. Par contre, dans un contexte où la recharge s'est érodée rapidement, notamment lors de tempêtes côtières du 11 et 13 janvier 2016 et du 30 décembre 2016, cet effet de protection a grandement diminué avec le temps. Actuellement, on peut considérer que le mur sera vulnérable lors de la prochaine tempête.



Figure 54. Recul du front de la recharge entre octobre 2014 et janvier 2016

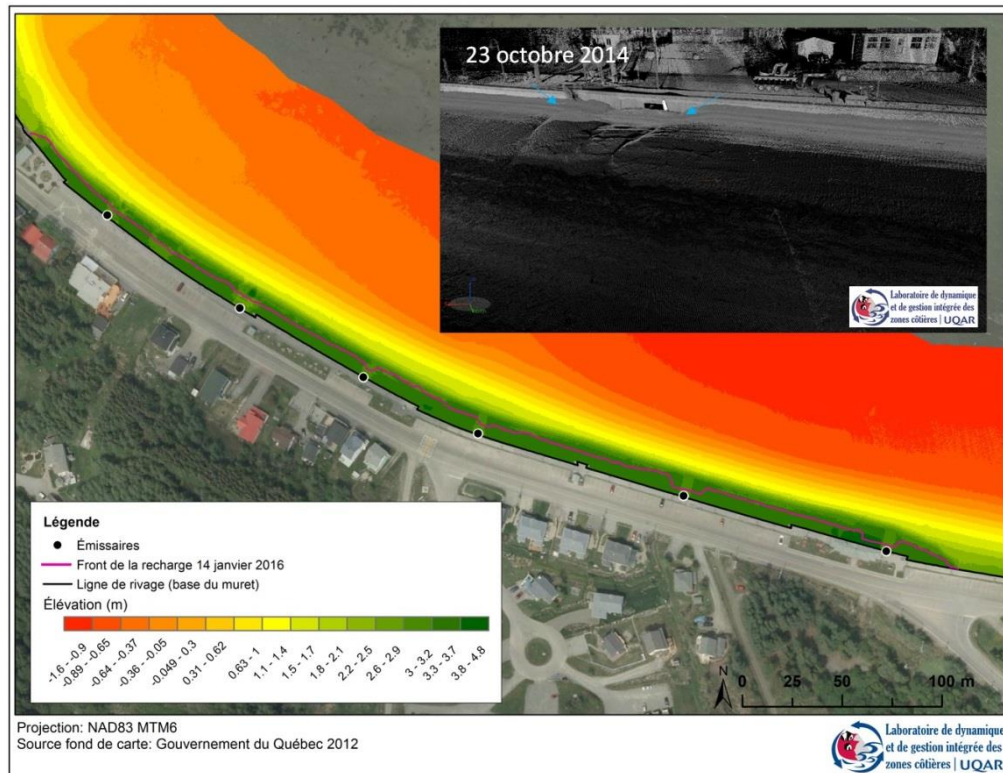


Figure 55. Élévation de l'estran en octobre 2014, position des émissaires pluviaux et limite du front de la recharge en janvier 2016

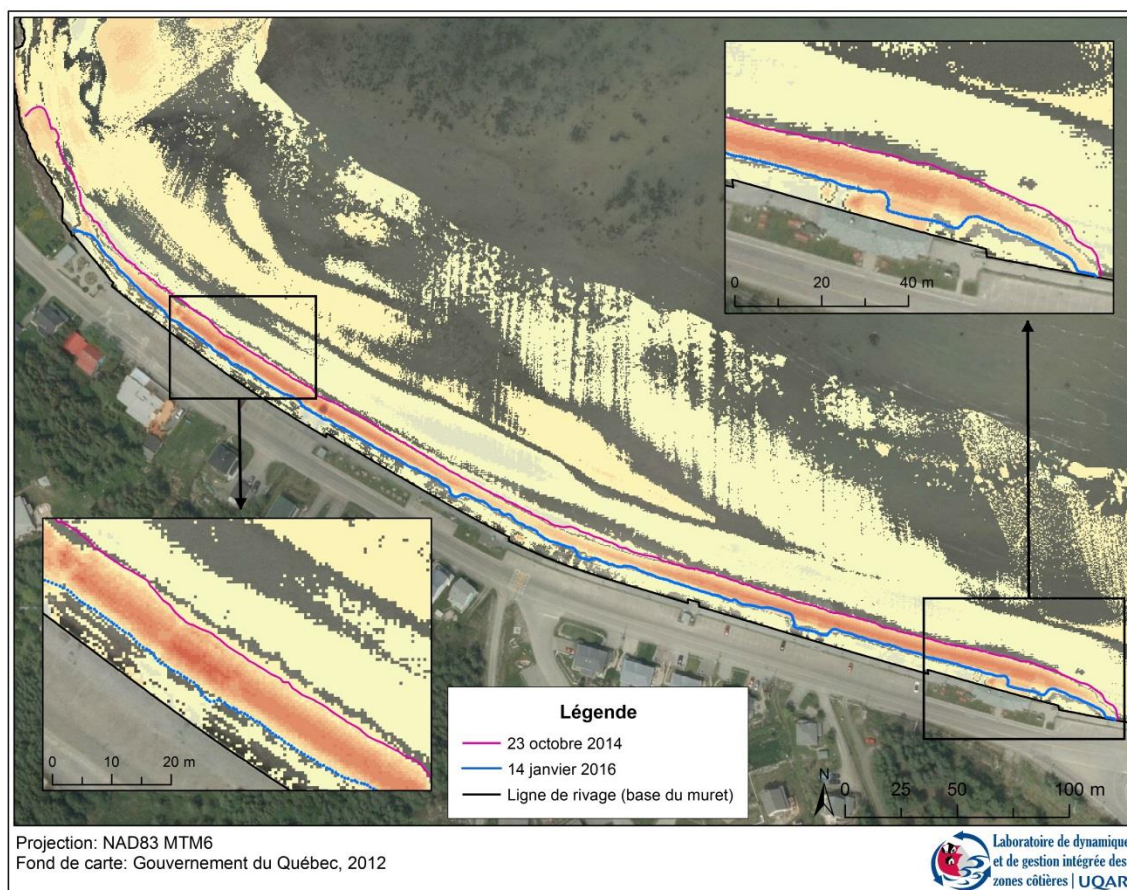


Figure 56. Déplacement du front de la recharge sédimentaire entre le 23 octobre 2014 et le 16 janvier 2016 et changements topographiques entre le 23 octobre 2014 et le 15 octobre 2015

L'analyse des différentes périodes a permis de cibler les différents facteurs qui ont contribué à modifier la topographie du secteur de la recharge de l'anse aux Coques à la suite de sa mise en place. Pour le différentiel topographique entre le 23 octobre 2014 et le 15 octobre 2015 (figure 57), soit à environ 1 an d'intervalle, à l'exception du secteur de la recharge, les principaux changements topographiques ont eu lieu autour du ruisseau. Le chenal et le haut estran autour du ruisseau (SL-23 à SL-25) présentent une forte accumulation, alors que le haut estran a subi une forte perte de sédiments sur 300 mètres vers l'est. Ces changements concordent avec les changements observés au sein des différentes périodes d'analyse, où les changements topographiques avaient principalement lieu au pourtour du ruisseau ainsi que dans le secteur de la recharge sédimentaire.

Le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a diminué de $0,39 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,058 \text{ m}$), passant de $3,48 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05 \text{ m}$) en octobre 2014 à $3,09 \text{ m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,029 \text{ m}$) en octobre 2015. Par contre, si l'on compare le volume entre le 11

août 2014 ($2,80 \text{ m}^3/\text{m}^2 \pm 0,064 \text{ m}$), soit quelques semaines avant la recharge sédimentaire, et le 15 octobre 2015, il réside un gain de volume sédimentaire de $0,29 \text{ m}^3/\text{m}^2 (\pm 0,067 \text{ m})$.

Le différentiel topographique de la figure 57 ainsi que l'évolution des profils topographiques de la figure 58 montrent les changements morphologiques ainsi que le déplacement du front de la recharge entre octobre 2014 et décembre 2015. Les résultats montrent une érosion marquée au front de la recharge entre les 2 levés et l'apparition d'une zone d'accumulation linéaire devant ce front est visible sur le haut estran. L'enveloppe et l'écart-type indiquent aussi un changement topographique important sur le haut estran. Les analyses granulométriques entre 2014 et 2015 ont montré que les graviers qui constituaient la recharge se sont dispersés sur le haut estran, ce qui cause une hausse de l'altitude du haut estran. Une deuxième zone d'accumulation, moins élevée, est aussi présente sur le bas estran.

Le recul et l'abaissement de la recharge se sont poursuivis jusqu'au 17 novembre 2016. En comparant les figures 58 et 59, on constate que l'abaissement maximal de près de 90 cm entre octobre 2014 et décembre 2015 pour les profils 4 et 10, grimpe en novembre 2016 à 1,15 m pour le profil 4 et 1,35 m pour le profil 10. On constate en général, entre octobre 2014 et novembre 2016, un abaissement de la surface du bas estran entre les profils 1 à 7 qui peut atteindre 25 cm, mais qui est davantage de l'ordre de 10 à 15 cm (voir les profils en annexe). Pour la même période, on note cependant un engraissement du bas estran pour les profils à l'est du profil 7 du même ordre de 10 à 15 cm. On constate aussi un engraissement de la partie inférieure du haut estran à partir du profil 3 en allant vers l'est et qui montre aussi que les sédiments érodés à la recharge viennent engraisser le bas de plage. Il se forme ainsi une pente plus douce tendant à se rapprocher davantage à une pente d'équilibre.

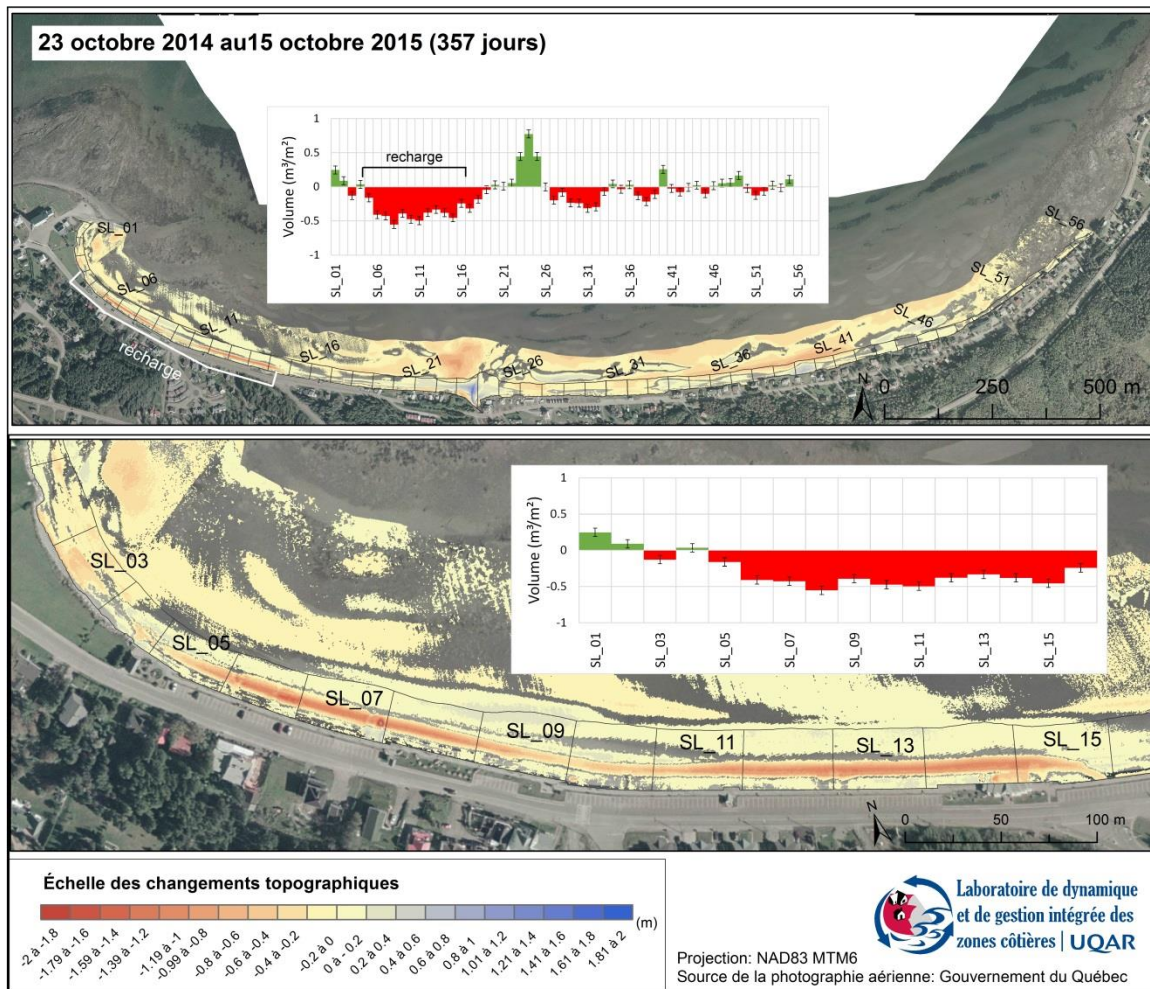


Figure 57. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 23 octobre 2014 au 15 octobre 2015

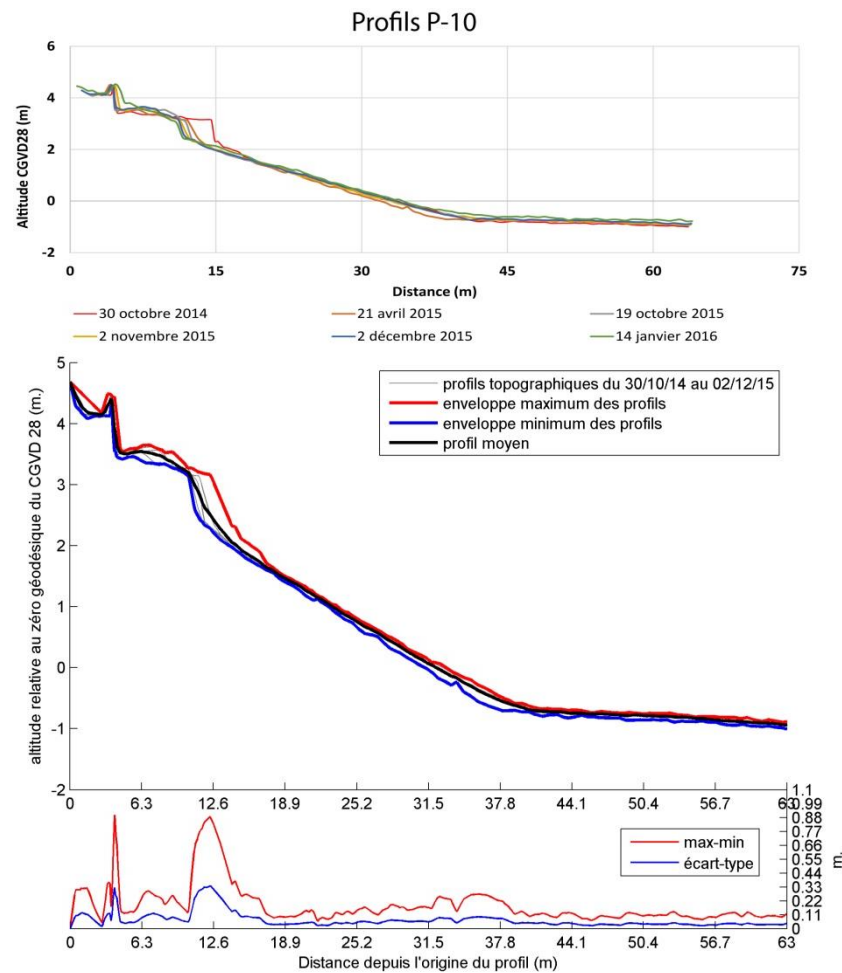
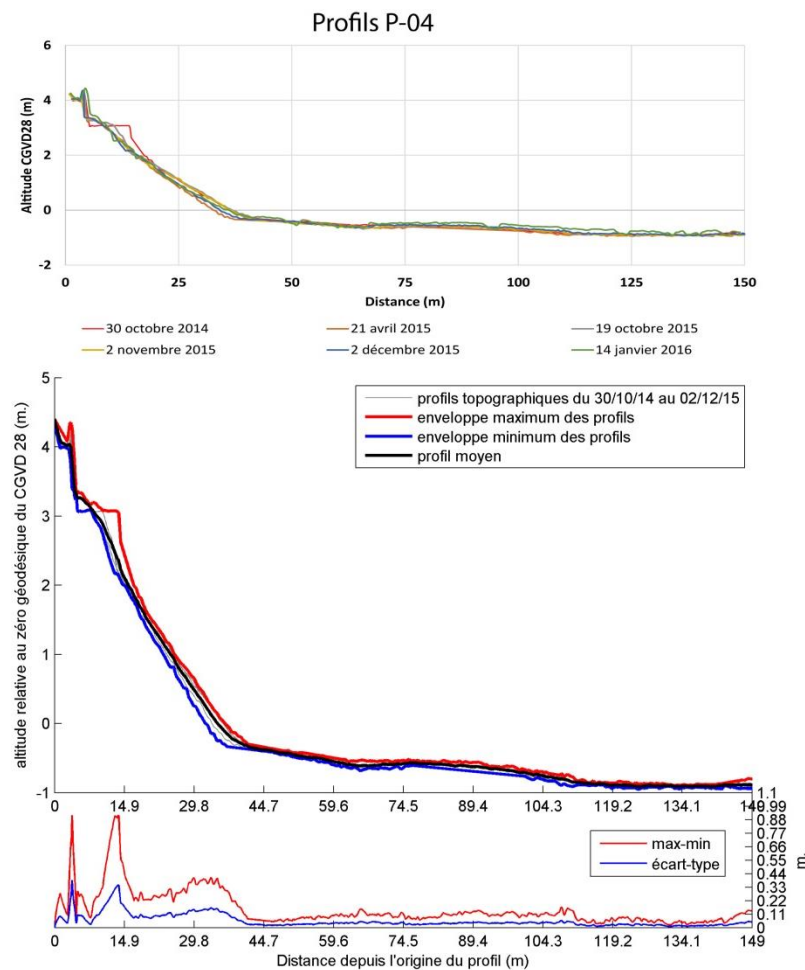


Figure 58. Évolution des profils topographiques D-GPS P-04 et P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 2 décembre 2015

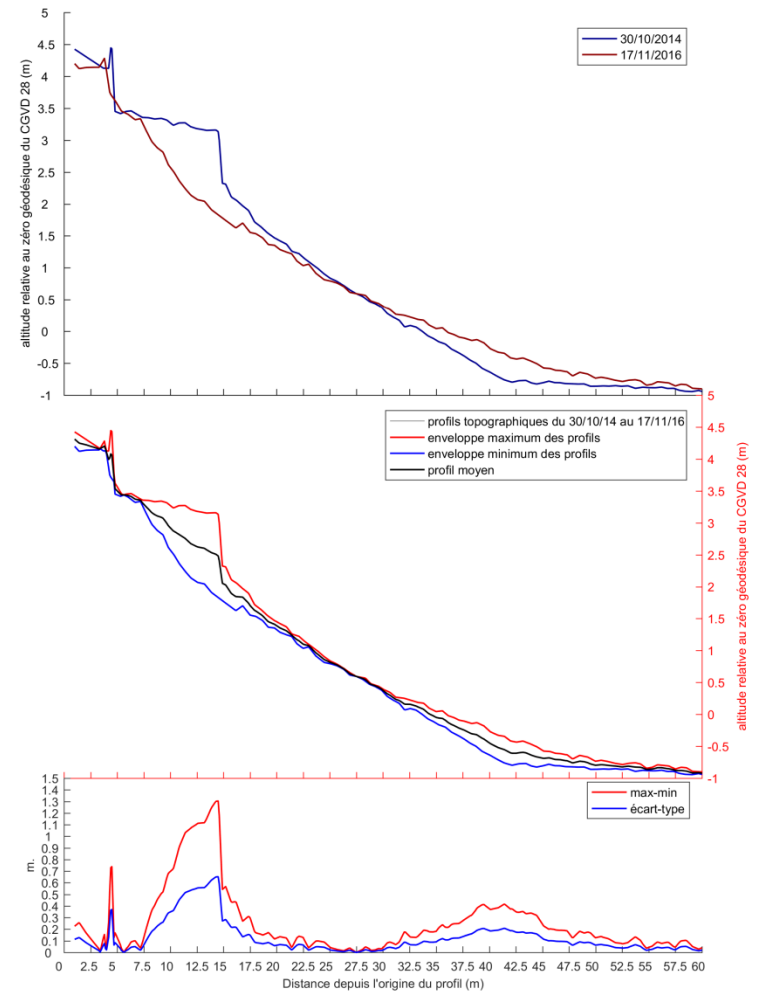
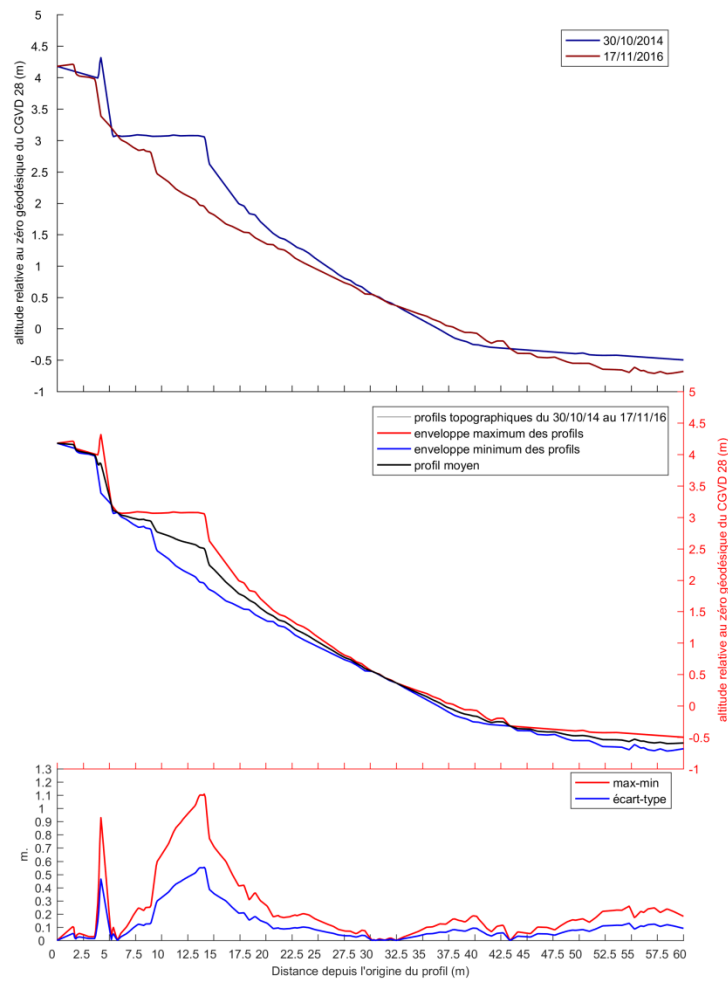


Figure 59. Évolution des profils topographiques D-GPS P-04 et P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 17 novembre 2016

Le bilan sédimentaire calculé entre les levés du 23 octobre 2014 et le 14 juin 2016 indique un déficit sédimentaire sur l'ensemble de la plage de l'anse aux Coques (figure 60). Deux secteurs font exception et montrent un bilan positif, soit en bordure du ruisseau et vis-à-vis les compartiments SL-43 à SL-47. On constate bien évidemment un fort déficit au niveau de la recharge sédimentaire, mais un engraissement sur la partie inférieure de la plage.

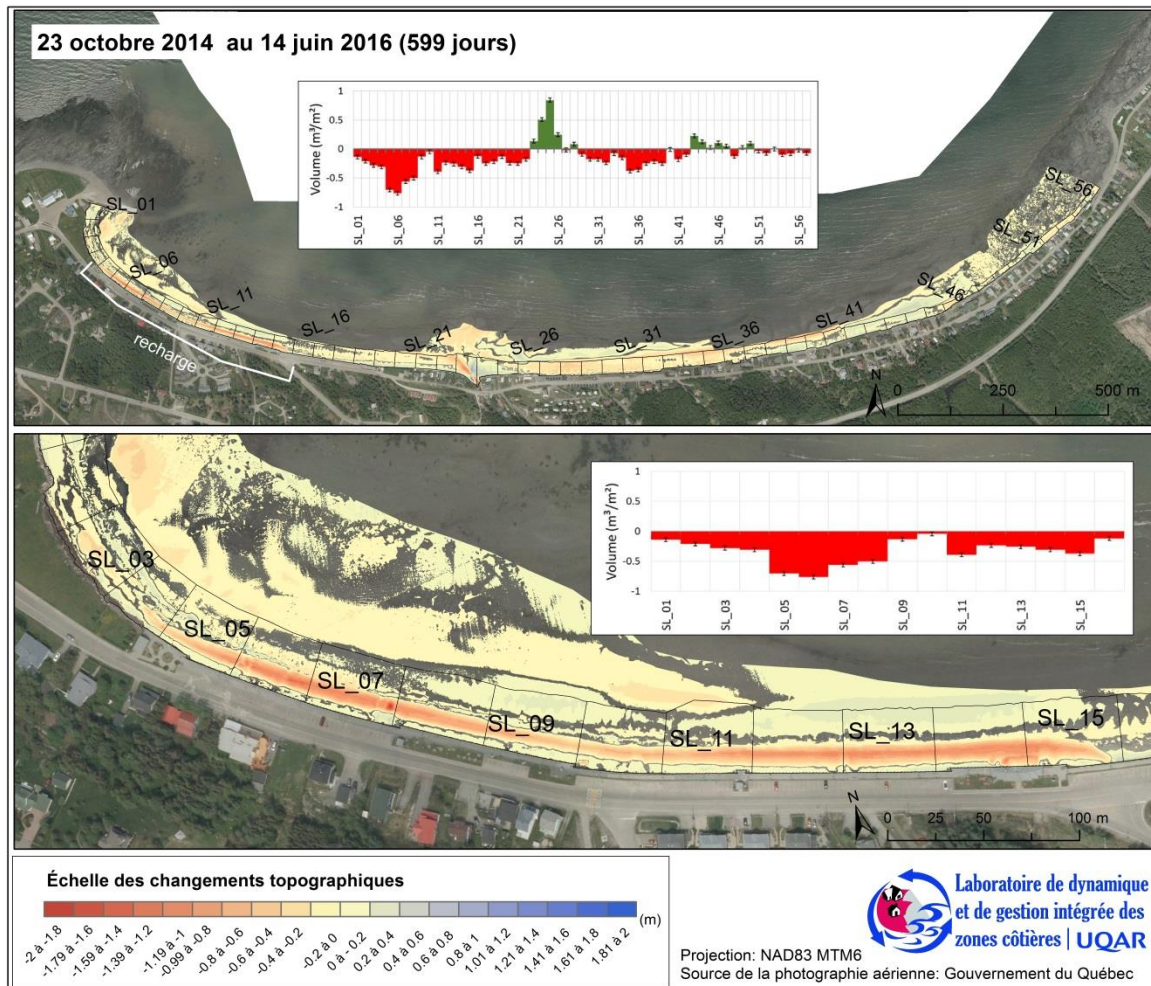


Figure 60. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques entre le 23 octobre 2014 et le 14 juin 2016

La figure 61 permet d'apprécier le recul du front de la recharge entre le 23 octobre 2014 et le 14 juin 2016. En moyenne, le recul a été de 8 m entre le 23 octobre 2014 et le 14 juin 2016. On constate que la section ouest de la recharge s'est complètement érodée avec une valeur maximale de 16,3 m de recul. La section ouest a aussi connu un recul important avec des valeurs variant entre 7 et 9 m de recul. On constate à nouveau que vis-à-vis les émissaires

pluviaux, les valeurs de reculs sont élevées. Lors de la tempête du 16 novembre 2016, ils ont constitué des points d'attaque par les vagues qui ont favorisé la formation d'encoches d'érosion (figures 47 à 49). Ensuite, les vagues peuvent s'engouffrer dans ces dépressions et s'opère alors une érosion latérale. À ce même titre, les extrémités de la recharge sont aussi exposées directement aux vagues, ce qui favorise aussi une érosion latérale le long du mur.



Figure 61. Recul du front de la recharge entre 23 octobre 2014 et 14 juin 2016

Enfin, même s'il n'y avait pas de suivi prévu après le 17 novembre 2016, il est important de souligner l'impact de la tempête du 30 décembre 2016. Le niveau d'eau maximal atteint lors de cet événement a été de 2,9 m (figure 62). Cet événement a non seulement provoqué un régime de collision faisant reculer le front de la recharge, mais il y a aussi eu du franchissement du mur de la promenade (figures 63 et 64).

Cet événement avait aussi été précédé par un haut niveau d'eau le 14 décembre 2016 (2,73 m) et suivi par un haut niveau d'eau le 11 janvier 2017 (2,6 m).

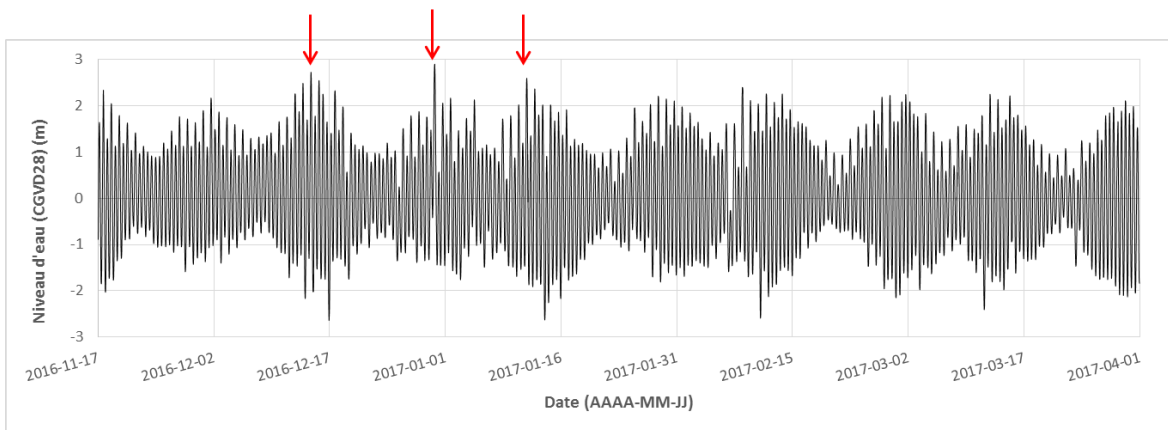


Figure 62. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 17 novembre 2016 au 31 mars 2017



Figure 63. Impact de la tempête du 30 décembre 2016 sur la recharge sédimentaire (caméra ouest)



Figure 64. Impact de la tempête du 30 décembre 2016 sur la recharge sédimentaire (caméra centre)

À la suggestion du MDDELCC, un levé LiDAR a été réalisé le 12 juin 2017 ainsi que des profils topographiques à l'aide du D-GPS le 13 juin 2017. On constate clairement sur ces nouveaux levés que la tendance à l'engraissement de la partie inférieure de la plage observé le 14 juin 2016 et le 17 novembre 2016 s'est poursuivis. La figure 65 permet aussi de voir que la recharge a continué de reculer et de s'abaisser entre juin 2016 et 2017. On observe toutefois que le niveau de la surface de plage est tout même nettement supérieur en juin 2017 comparativement au niveau pré-recharge en août 2014.

À la lumière des résultats du suivi 2014-2016, on peut considérer que la recharge a joué son rôle de protéger le mur et la promenade. Sans celle-ci et considérant le niveau de la plage pré-recharge par rapport au niveau actuel, les tempêtes des deux dernières années auraient sans aucun doute engendrées des dommages à la promenade. Il est clair aussi qu'actuellement la promenade de l'Anse-aux-Coques est vulnérable à une éventuelle tempête. La berme résiduelle constituée des sédiments de recharge est trop étroite pour soustraire complètement le mur à la réflexion des vagues ce qui peut favoriser l'affouillement et l'érosion de la partie supérieure de la plage (figure 65). D'ailleurs, la réflexion des vagues

lors des dernières tempêtes a provoqué l'érosion et l'abaissement de la surface de la berme résiduelle d'au moins 1 m à plusieurs endroits, de sorte que la promenade est à nouveau exposée à de potentiels événements de franchissement. Il serait plus qu'opportun d'effectuer des travaux de maintenance pour consolider la berme résiduelle avant que cette dernière ne s'érode davantage. La réflexion des vagues contre le mur est beaucoup plus dommageable pour la plage (Bernatchez et Fraser, 2012) que pourrait avoir l'ajout de sédiments supplémentaires pour consolider la berme.

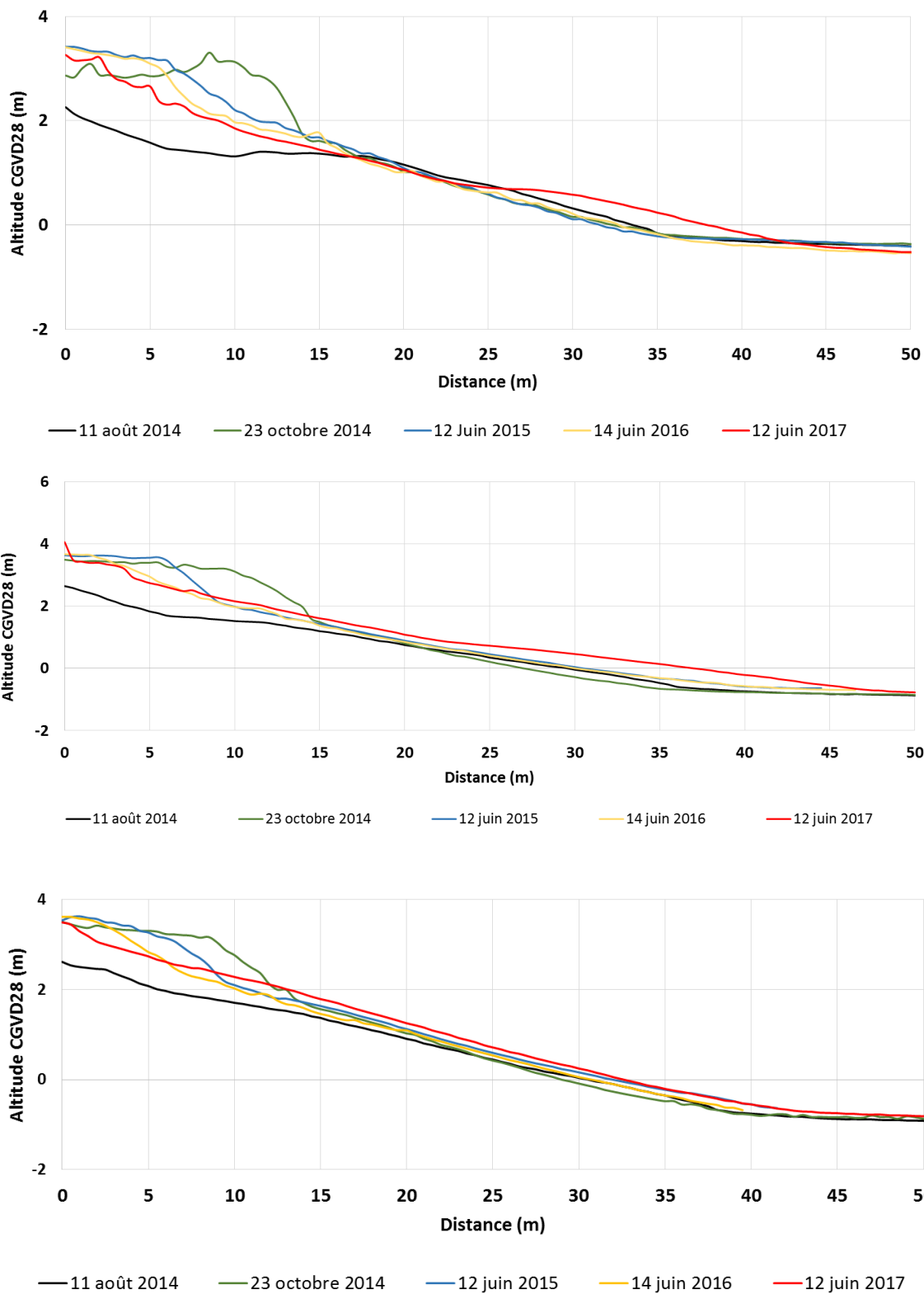


Figure 65. Évolution des profils de plage entre le 11 août 2014 et le 12 juin 2017

6. Données fournies

L'ensemble des données utilisées dans le cadre de ce projet sont fournies à la municipalité de Sainte-Luce. Les données fournies sont : données LiDAR et ses produits dérivés, données D-GPS, photographies des caméras de suivi et statistiques granulométriques. La figure 66 présente l'arborescence des dossiers des données LiDAR transmis à la municipalité. Les données sont d'abord séparées selon les dates d'acquisition des données sur le terrain. À l'intérieur de ces dossiers, les données sont classées selon le type de données et des produits dérivés. Les types de données et de produits sont ensuite sous-classés selon leur format numérique.

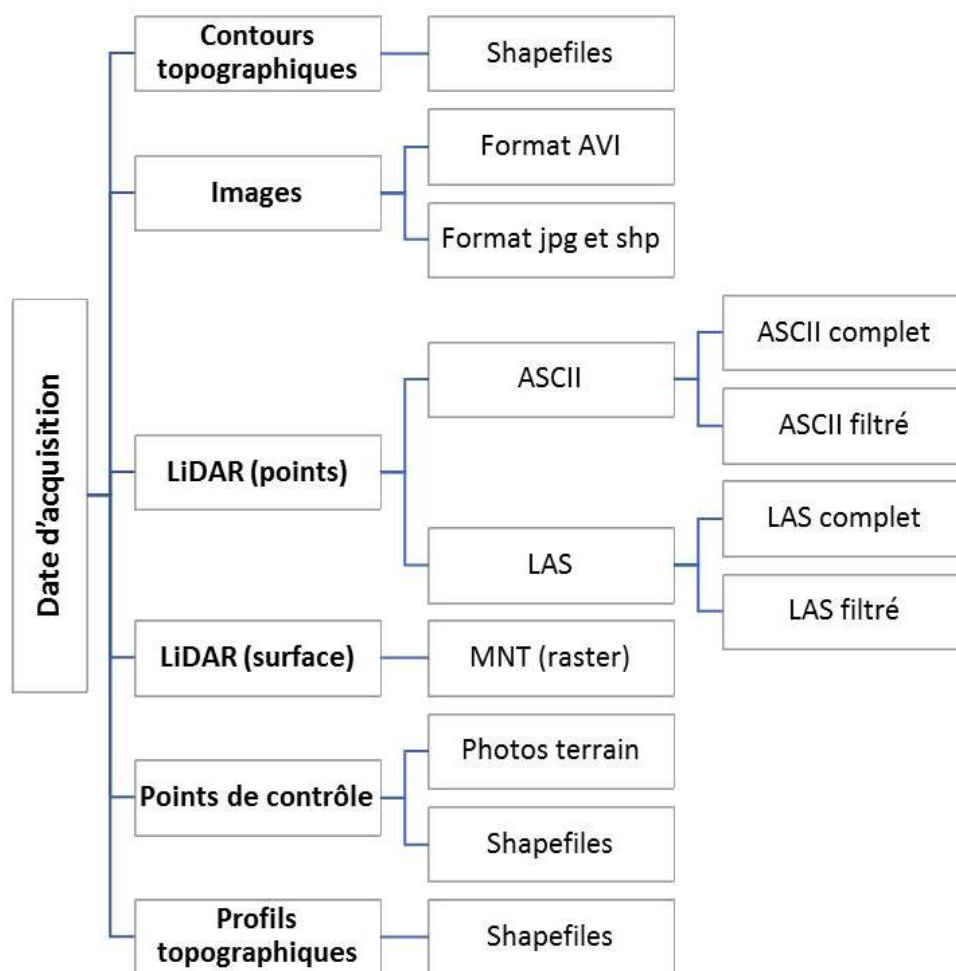


Figure 66. Arborescence des dossiers fournis à la municipalité de Sainte-Luce dans le cadre du projet de suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce

7. Conclusion

Les suivis topographiques ont montré que le front de la recharge a reculé en moyenne de 8 m depuis sa mise en place en octobre 2014, mais qu'une partie des sédiments est demeurée sur le haut estran. Somme toute, la recharge sédimentaire a clairement joué un rôle de protection de la promenade lors des tempêtes côtières qui ont été relativement nombreuses en 2015 et 2016. En janvier 2016, les photographies et les niveaux d'eau répertoriés sur le terrain lors des tempêtes indiquent qu'en bordure de la recharge des nappes d'eau ont atteint la promenade de l'Anse-aux-Coques de manière ponctuelle, alors qu'à l'extrémité de la promenade là où il n'y a pas de recharge sédimentaire, il y a eu une submersion quasi complète de la promenade sur environ 100 mètres linéaires. Le phénomène s'est aussi répété le 30 décembre 2016. Une attention particulière devrait être portée sur les émissaires pluviaux puisque d'importantes encoches d'érosion se sont formées à leur niveau. Ces zones plus basses de la recharge correspondent aussi aux segments où il y a eu du franchissement par le jet de rive lors des tempêtes.

Le suivi sédimentologique a montré un changement important de la granulométrie des sédiments du haut estran à la suite de la recharge. Composée principalement de sable fin à moyen en 2013 et 2014, la texture des sédiments de la plage avait une prédominance de gravier en 2015. La texture plus grossière des sédiments de la plage en 2015 est directement liée à l'érosion des matériaux de la recharge sédimentaire. On constate aussi qu'il y a un transport du matériel grossier vers l'est. En 2016, le haut estran était composé de sédiments de différentes tailles granulométriques surtout du sable moyen et grossier et des graviers, donc tout de même plus grossier qu'en 2014. La taille granulométrique des sédiments du bas estran est demeurée la même entre 2014 et 2016. Les matériaux grossiers provenant de la recharge semblent donc se déplacer seulement de manière longitudinale au niveau de la plage ou bien les sédiments grossiers sont incorporés à la matrice prédominante de sable fin sur le bas estran. Considérant les résultats, il serait pertinent de poursuivre le suivi de la texture des sédiments sur la plage pour voir s'il y aura une tendance au retour des conditions sédimentologiques initiales. Il est aussi recommandé de faire un suivi de la texture des sédiments dans les zones adjacentes à la recharge ainsi que sur le bas estran sur l'ensemble de l'anse aux Coques. L'échantillonnage devrait aussi se faire de manière saisonnière pour évaluer s'il y a une variabilité saisonnière dans la texture des sédiments (printemps, fin été, et automne).

Enfin, il est recommandé d'effectuer des ajouts de sédiments pour consolider et maintenir la berme résiduelle afin d'éviter la réflexion des vagues contre le mur et ainsi limiter l'affouillement et l'érosion de la plage tout en assurant une meilleure protection de la promenade contre les vagues de tempête. Il devrait y avoir au moins un levé LiDAR par année pour assurer un suivi de la recharge et de la morphosédimentologie de la plage.

Références

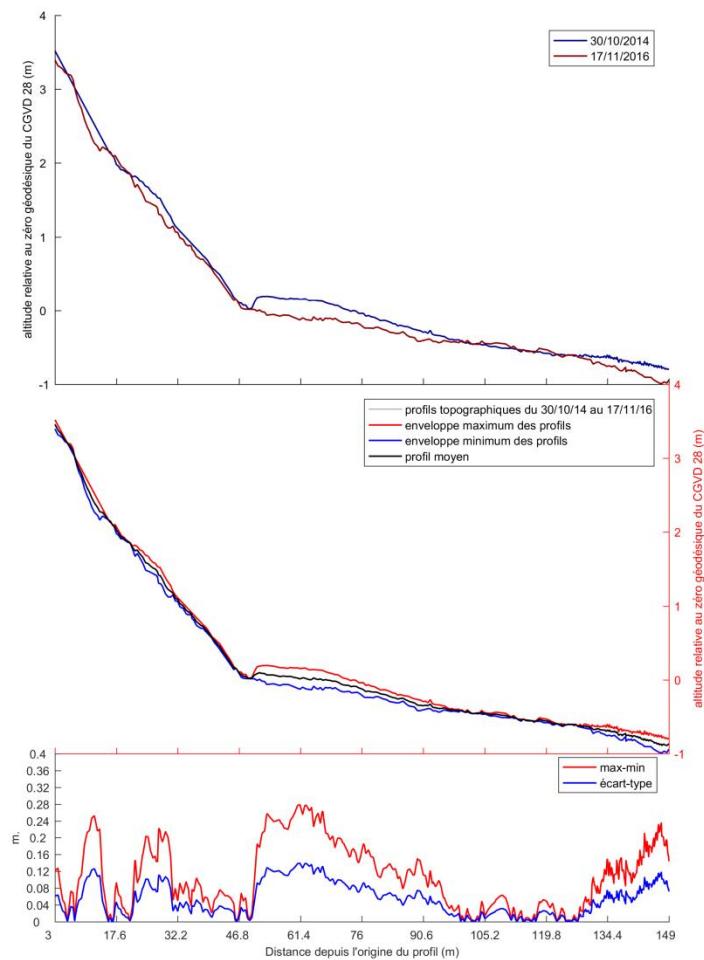
- Baptista, P., Bastos, L., Bernades, C., Cunha, T. et Dias, J., 2008. Monitoring sandy shore morphologies by DGPS—A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, 24, 6, 1516–1528
- Bernatchez, P., and Fraser, C., 2012. Evolution of coastal defence structures and consequences for beach width trends, Québec, Canada. *Journal of Coastal Research*, 28(6), 1550–1566.
- Brasington, J., Langham, J. et Rumsby, B. 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport, *Geomorphology*, 52, 299–316
- Dornbusch, U., 2010. Ground survey methods for mixed sand and gravel beaches in intertidal environments: a comparison. *Journal of Coastal Research*, vol. 26, no 3, 451–464
- Emery, K.O., 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography*, no 6, 90–93
- Haala, N., Peter, M., Cefalu, A. and Kremer, J. 2008. Mobile lidar mapping for urban data capture. Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Limassol, Cyprus. 20–25.
- MDDELCC. 2014. Rapport d'analyse environnementale de la demande de soustraction de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement du projet de recharge de plage de Sainte-Luce-sur-Mer sur le territoire de la municipalité de Sainte-Luce, Direction de l'évaluation environnementale des projets hydriques et industriels, Dossier 3216-02-048, 29p.
- Montreuil, A-L., Levoy, F., Bretel, P. et Anthony, E.J. 2014. Morphological diversity and complex sediment recirculation on the ebb delta of a microtidal inlet (Normady, France): A multiple LiDAR approach dataset, *Geomorphology*, 219, 114-125
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D.M., Simley, J. D., Arrowsmith, J.R., Bode, C.A., Crosby, C., DeLong, S. B., Glenn, N.F., Kelly, S.A., Lague, D., Sangireddy, H., Schaffrath, K., Tarboton, D.G., Wasklewicz, T. et Wheaton, J.M. 2015. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review, *Earth-Science Reviews*, 148, 174–193
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J. et Arias, P. 2014. Automatic detection of road tunnel luminaires using a mobile LiDAR system. *Measurement*, 47, 569–575
- Ropars. 2013. Protection de la berge Sainte-Luce, Qc, Rapport technique, dossier SLC-MSP12, pour le ministère de la Sécurité publique, 49p.

Udden, J.A. (1914) Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25, 655–744.

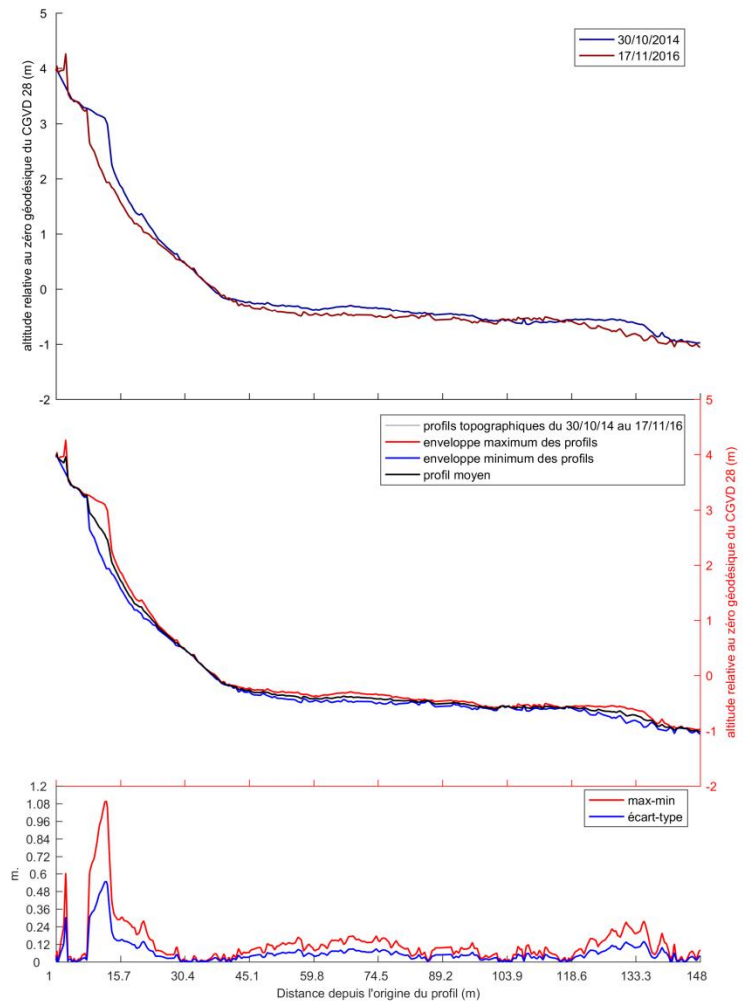
Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377–392.

Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E. and Sear, D.A. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budget, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136–156.

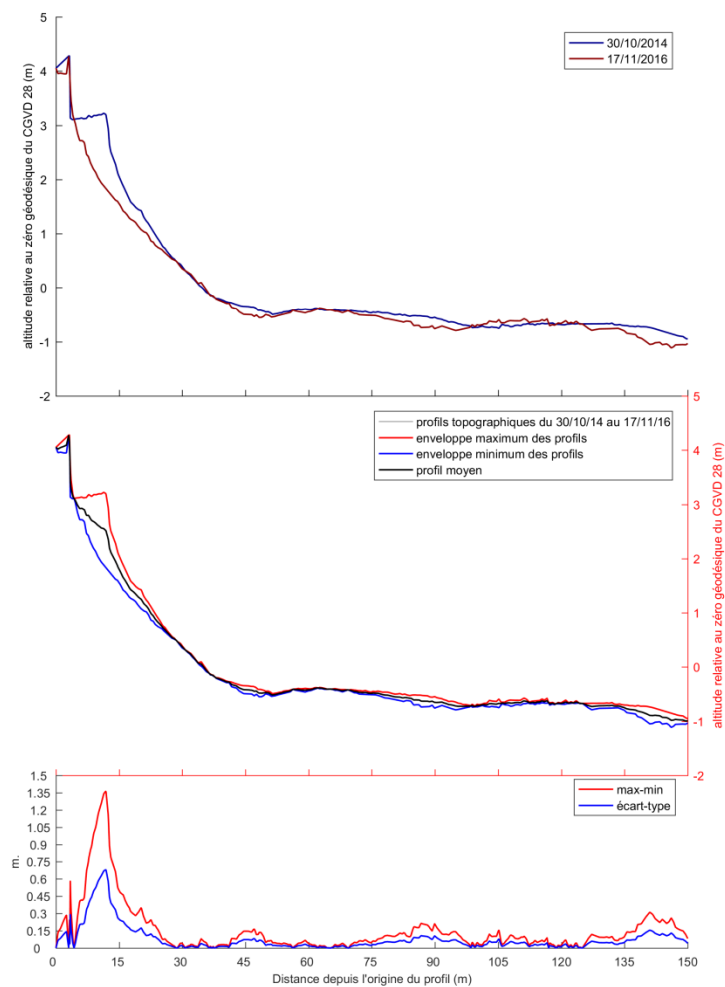
ANNEXE 1 :
Différence entre les profils topographiques du 30 octobre 2014 et le 17
novembre 2016



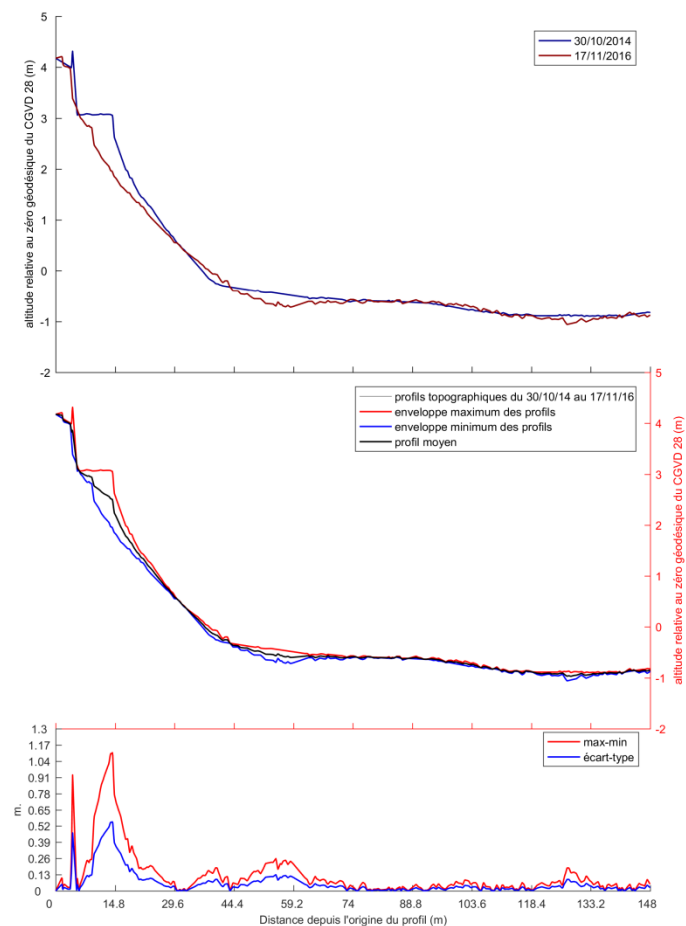
Profil SL-1



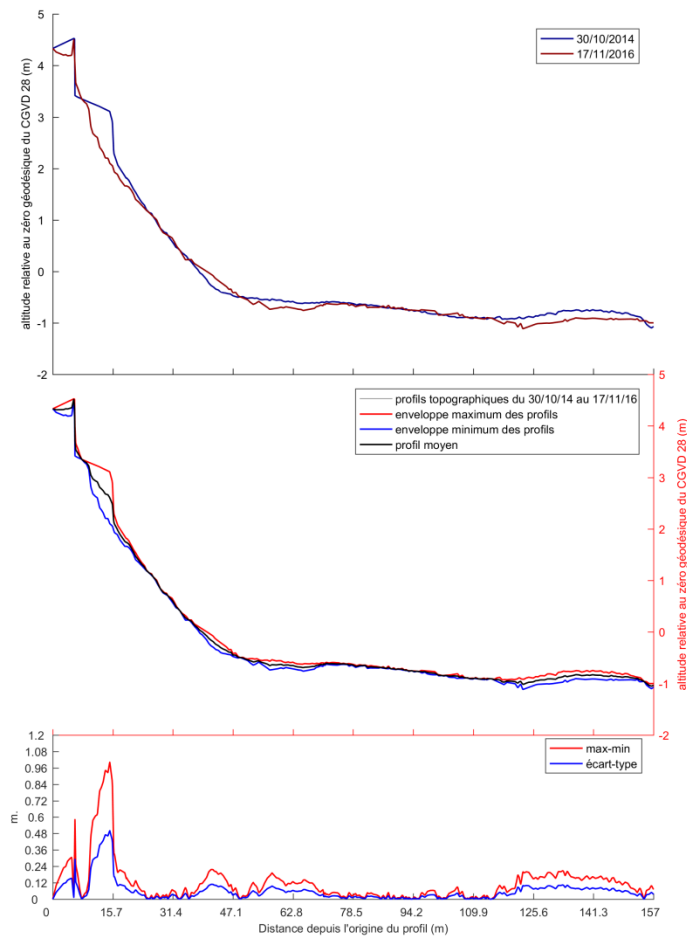
Profil SL-2



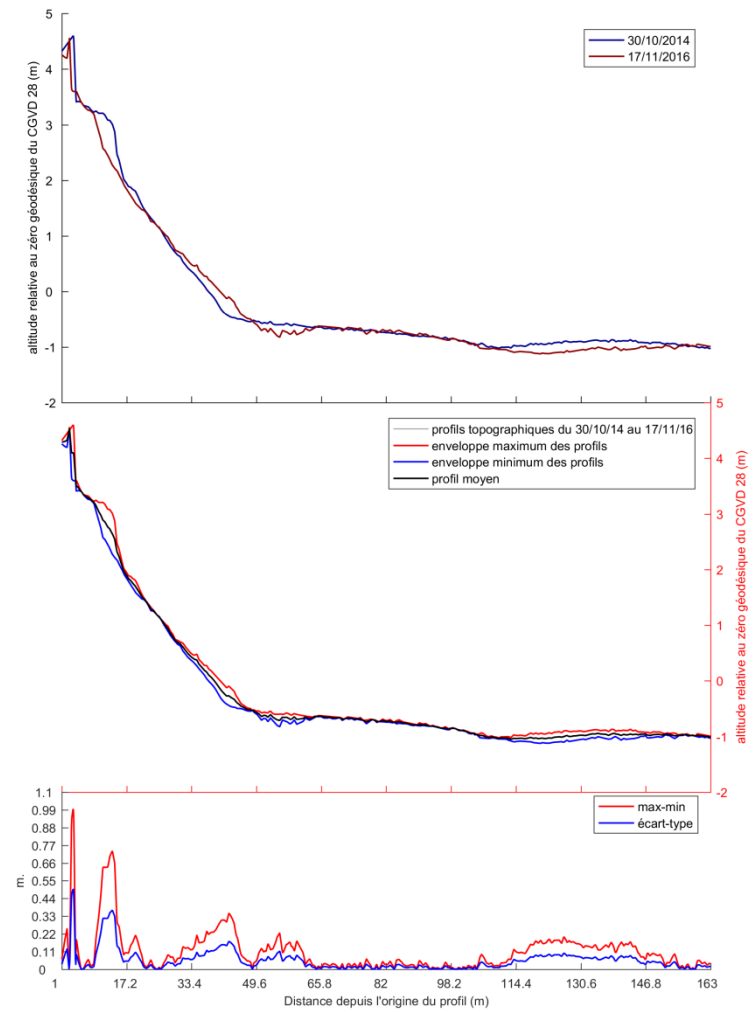
Profil SL-3



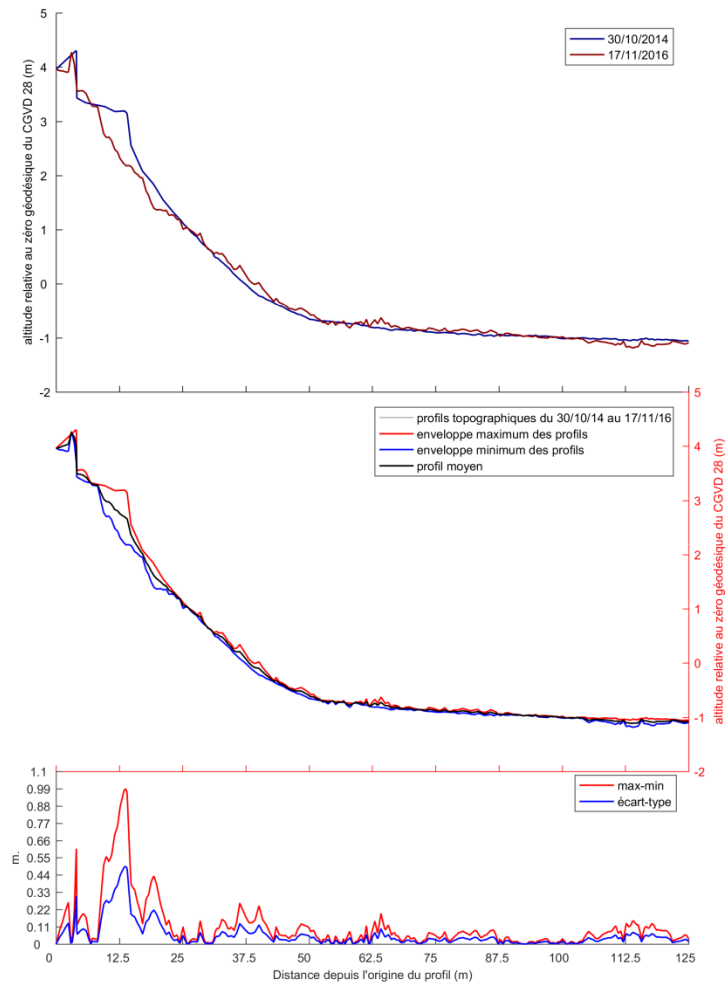
Profil SL-4



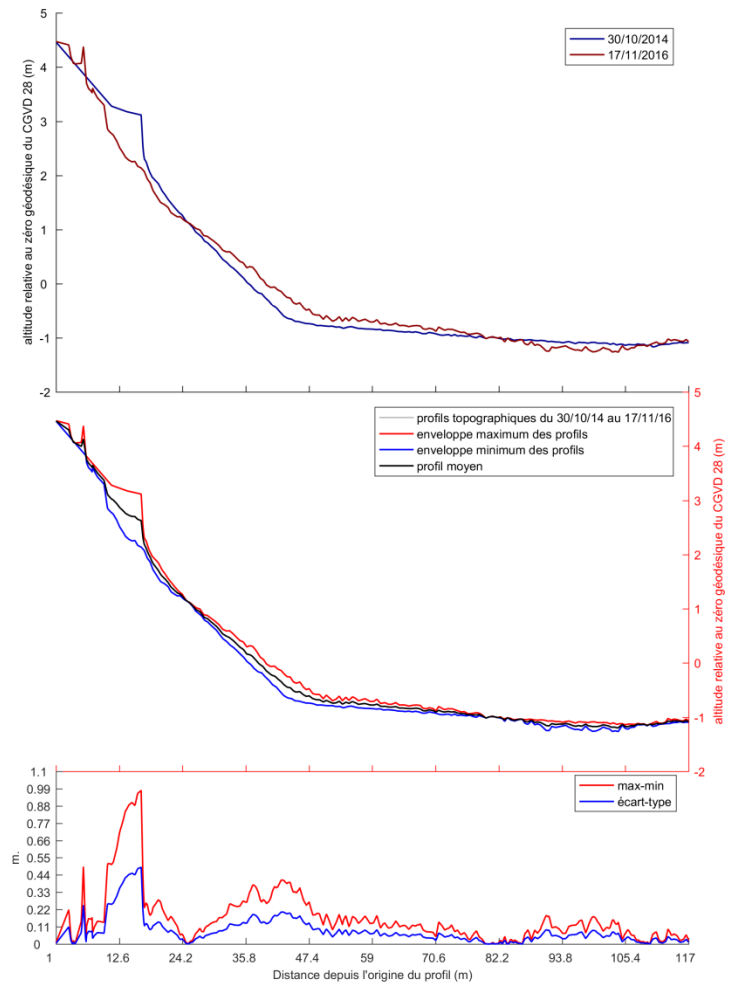
Profil SL-5



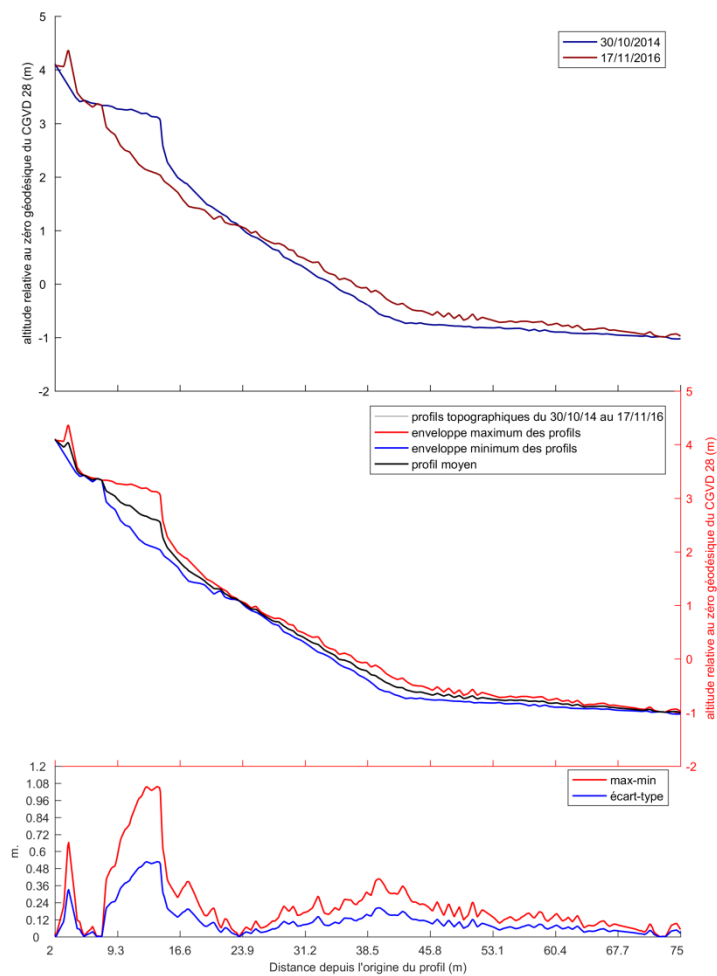
Profil SL-6



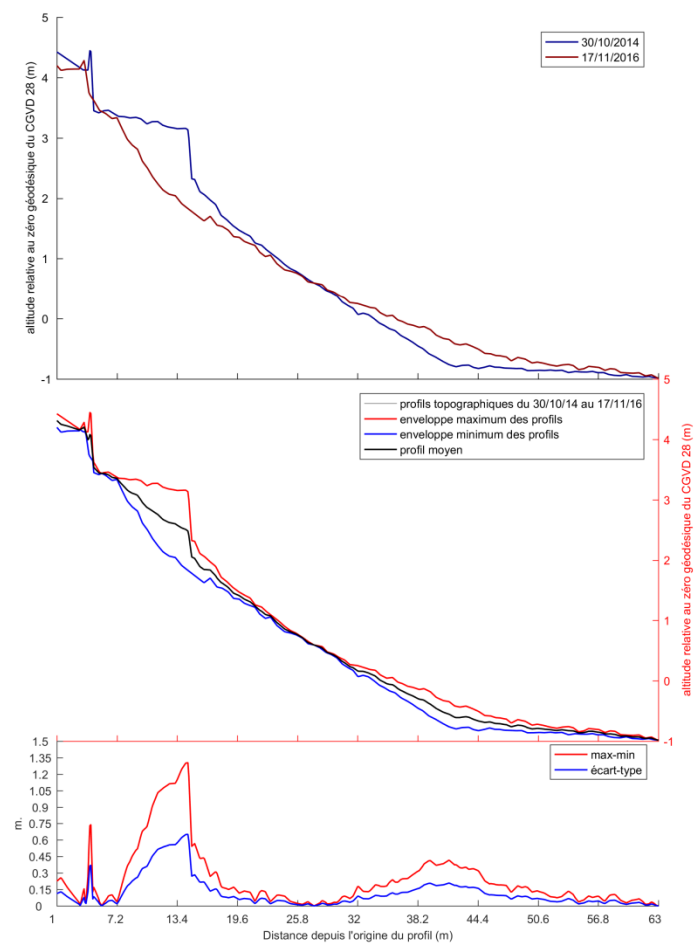
Profil SL-7



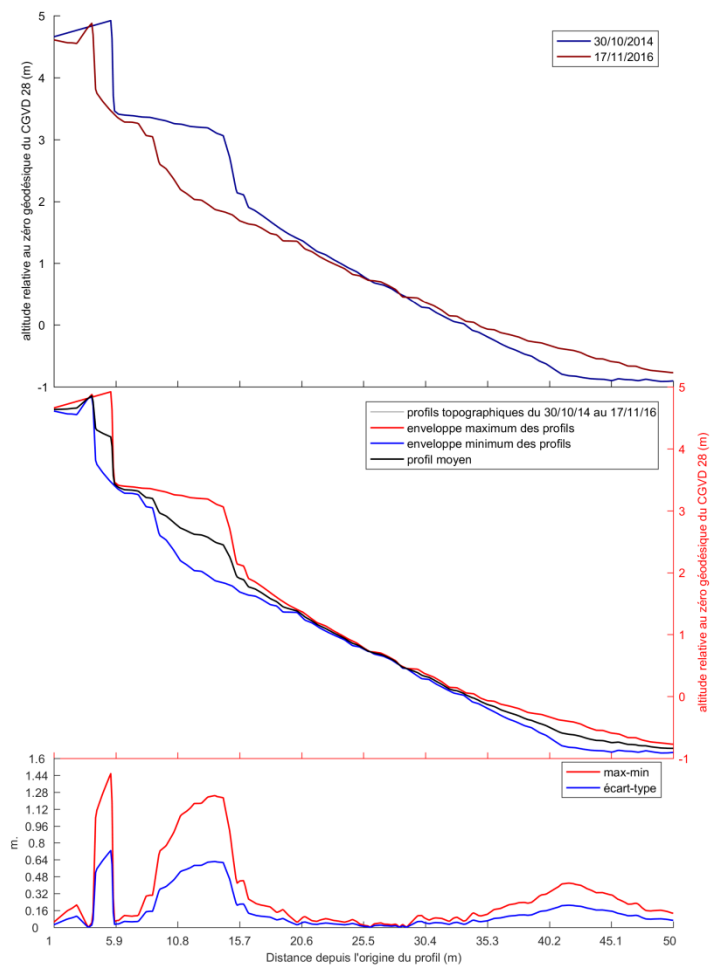
Profil SL-8



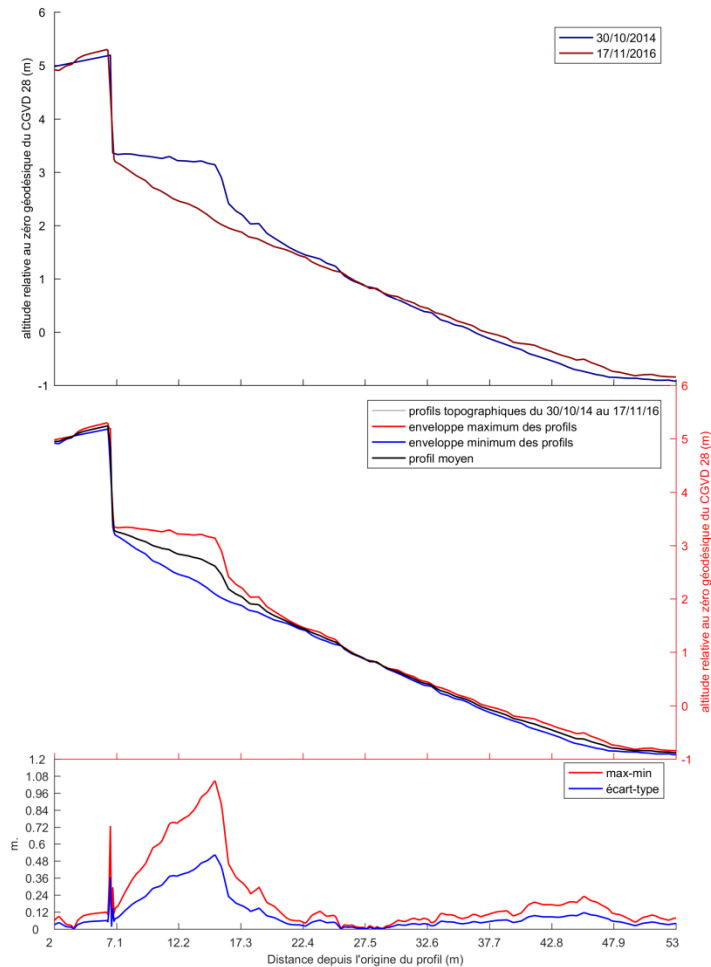
Profil SL-9



Profil SL-10

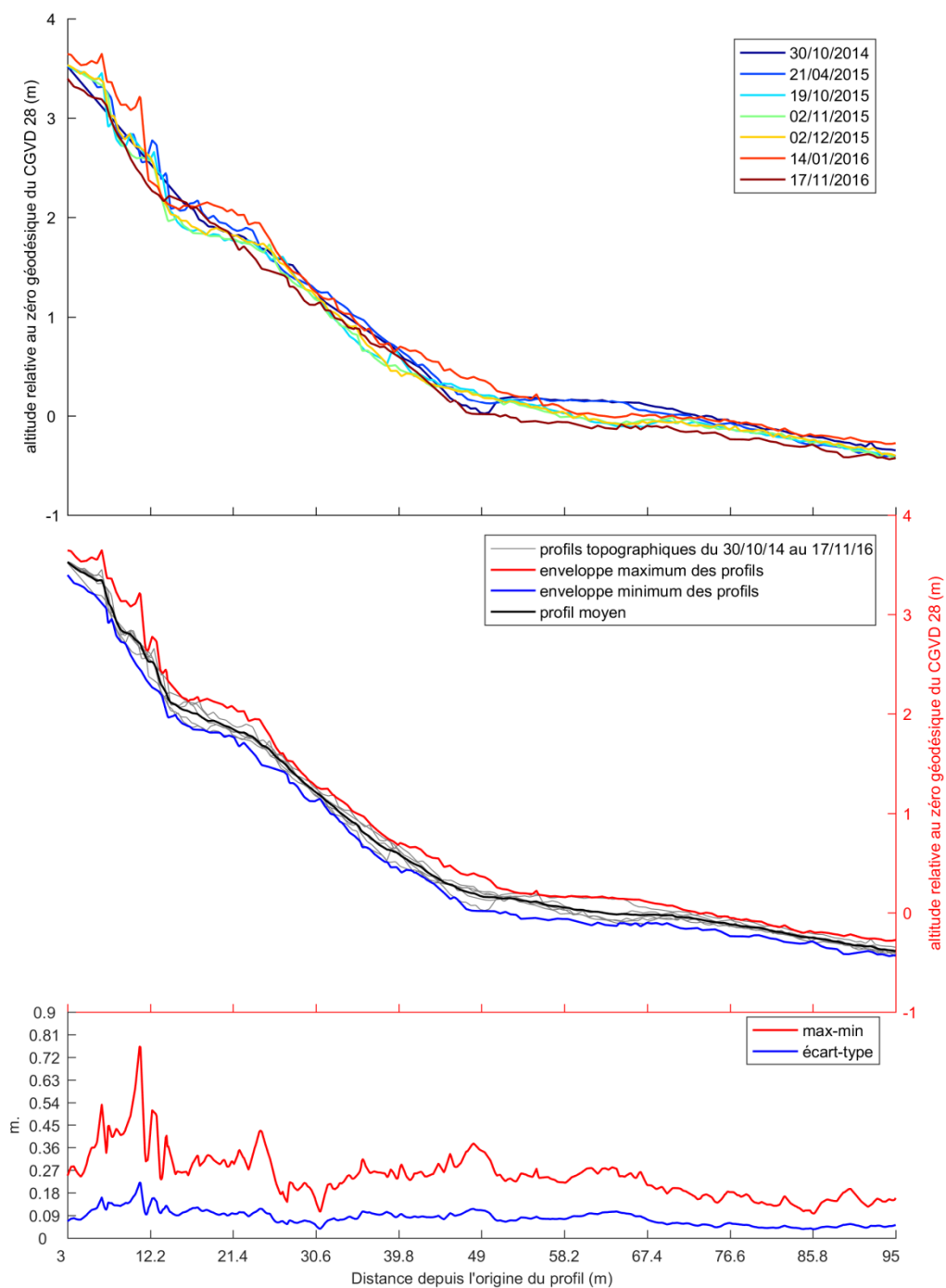


Profil SL-11

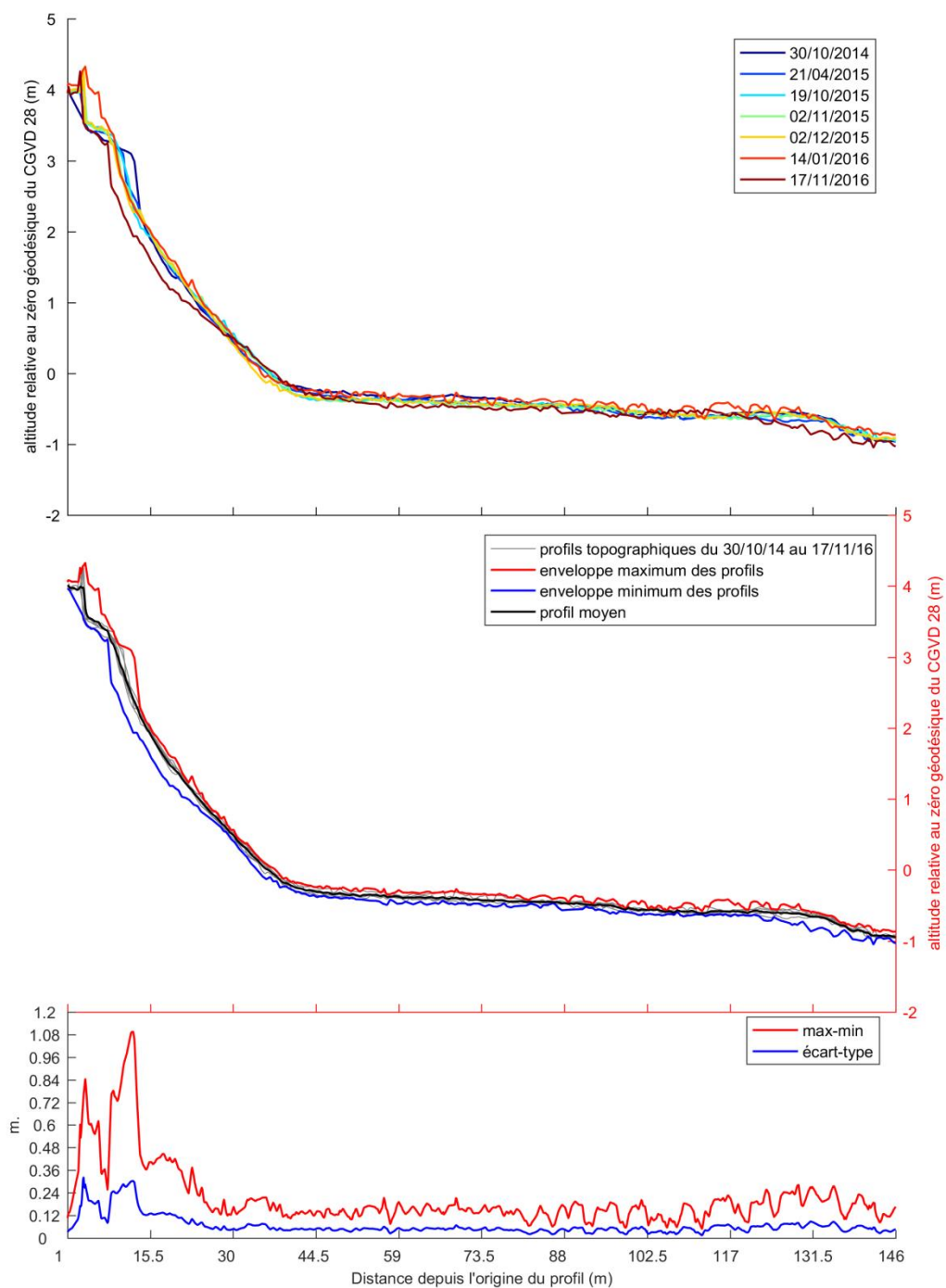


Profil SL-12

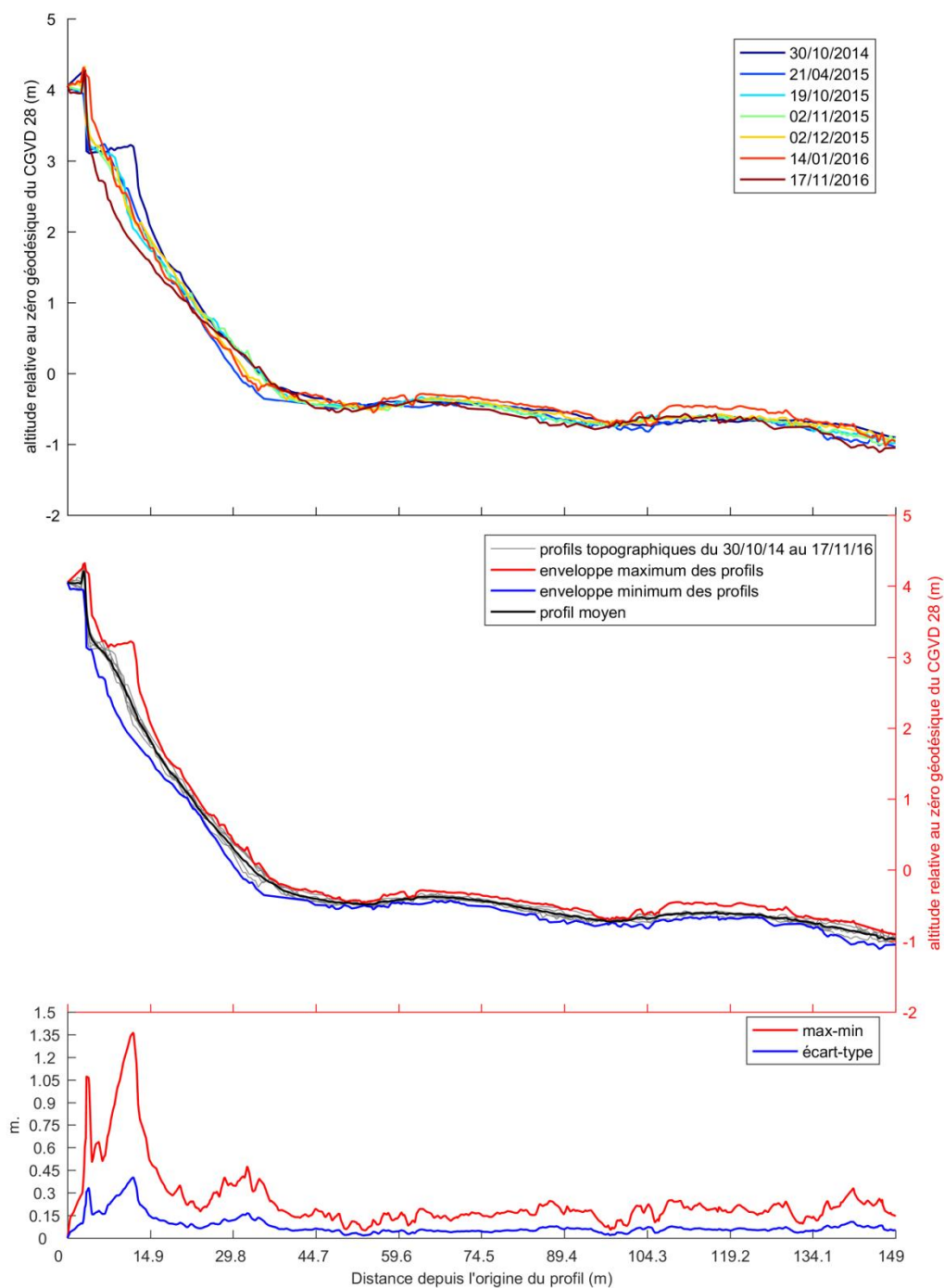
ANNEXE 2 :
Ensemble des profils topographiques réalisés du 30 octobre 2014 au 17
novembre 2017 (couverture totale incluant le bas estran)



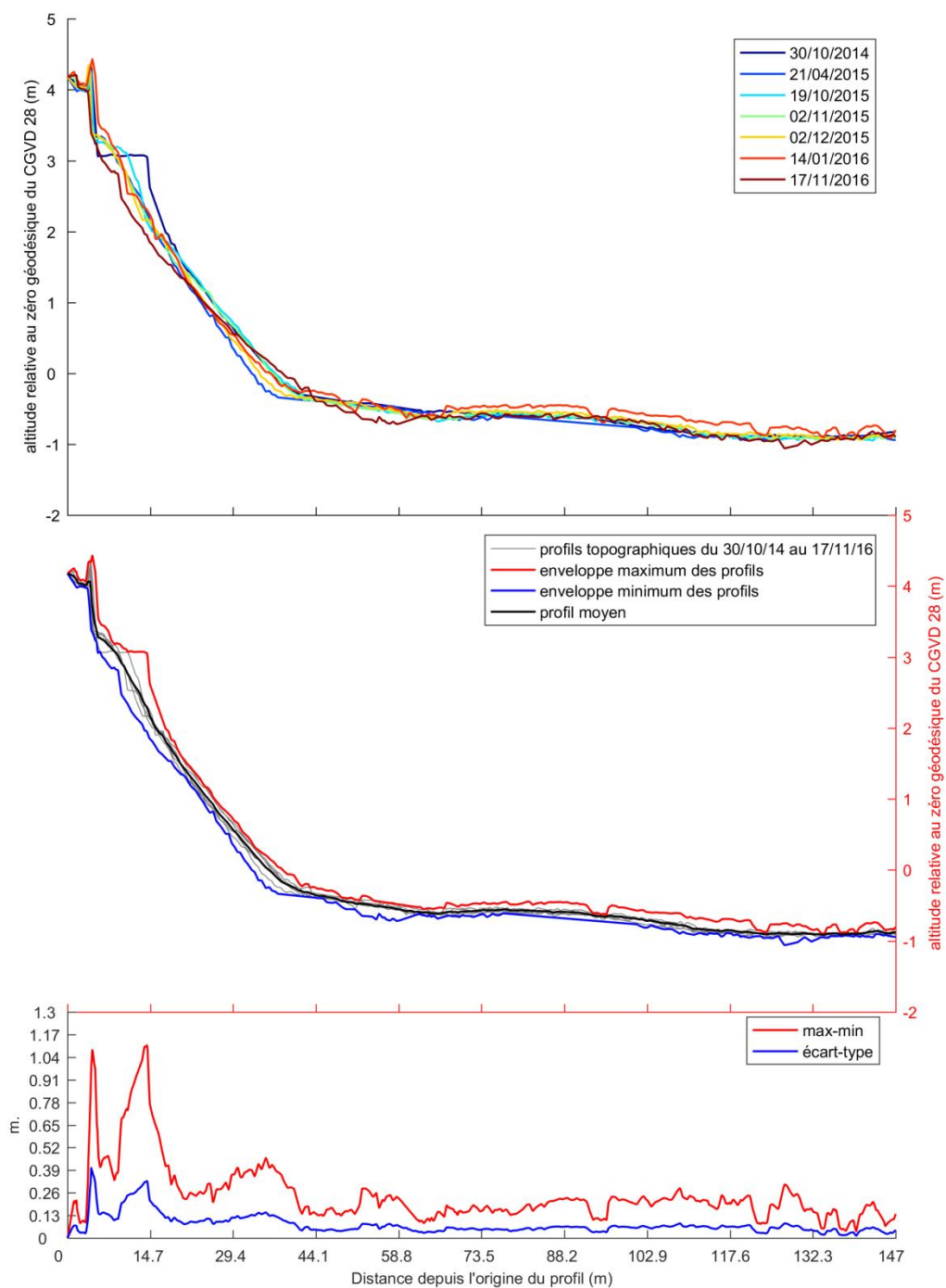
Profil 1



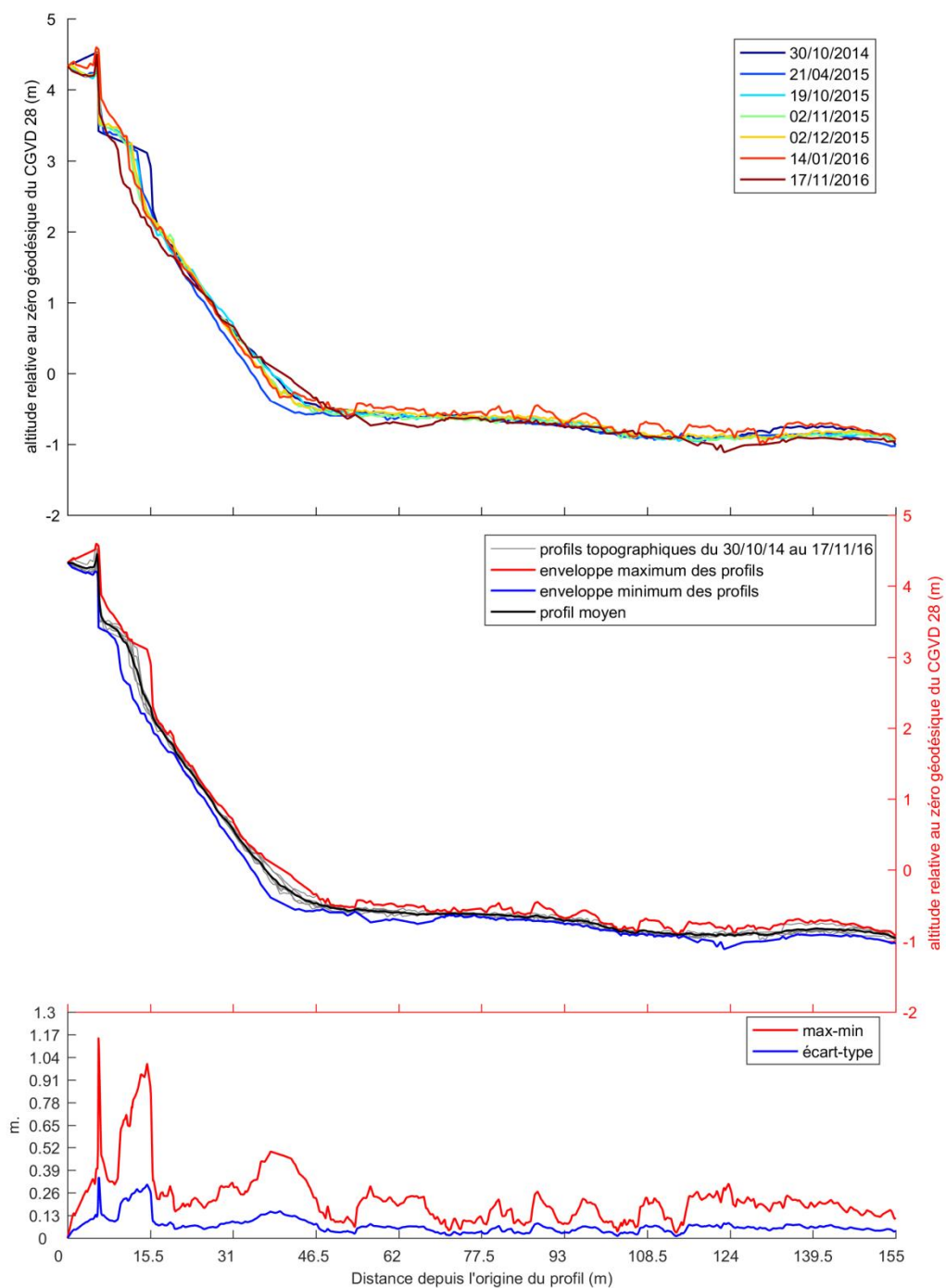
Profils 2



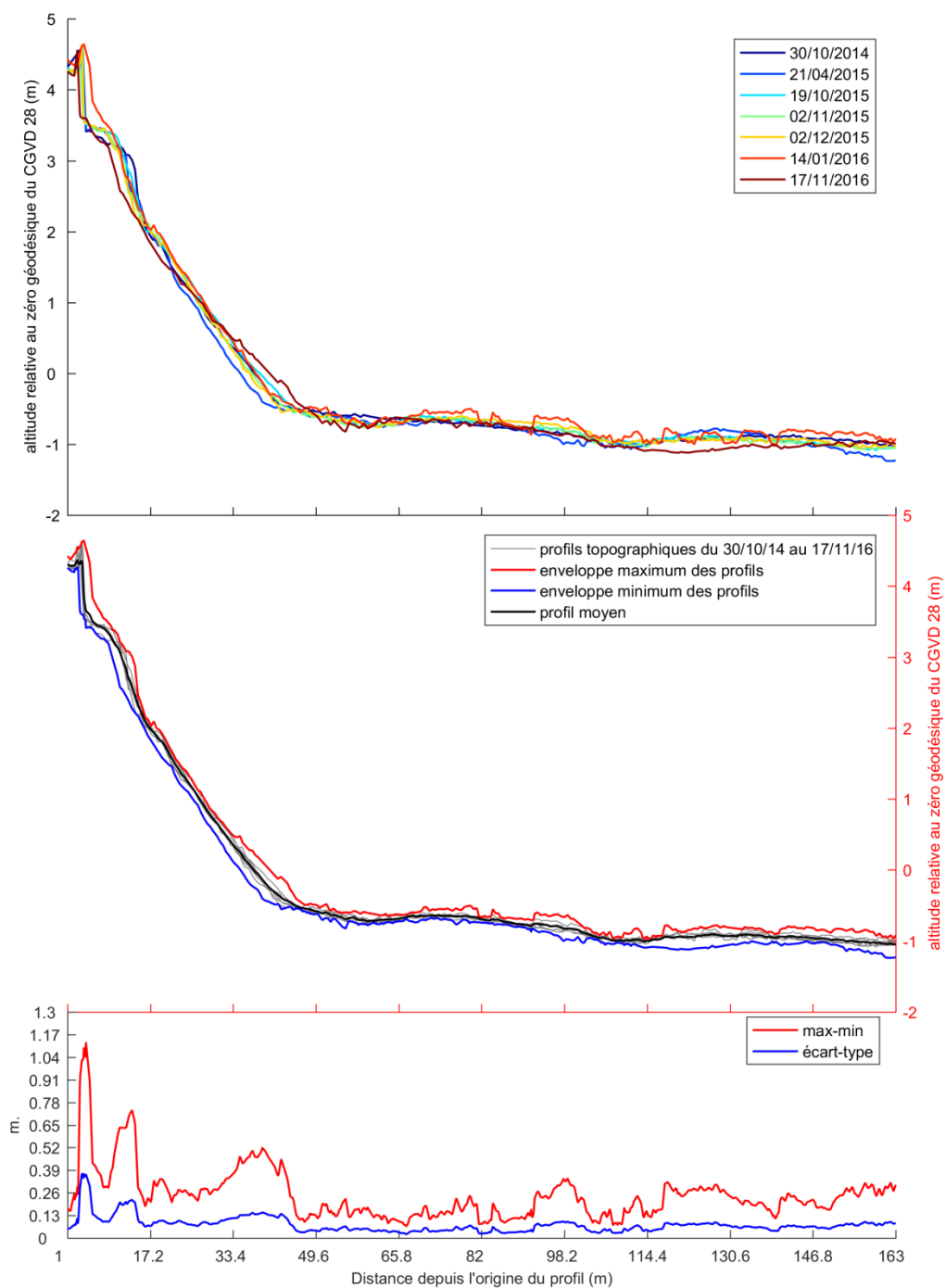
Profil 3



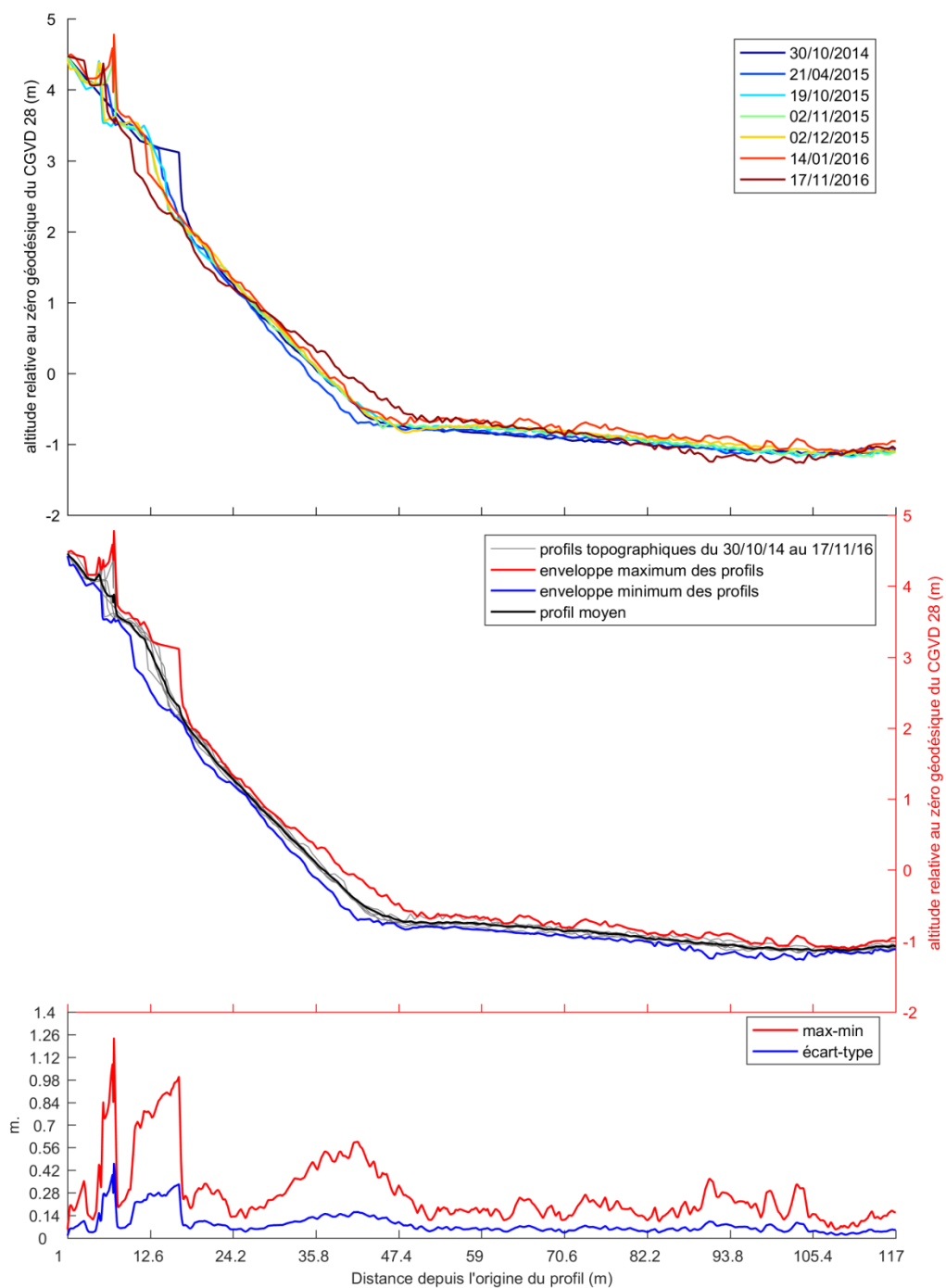
Profil 4



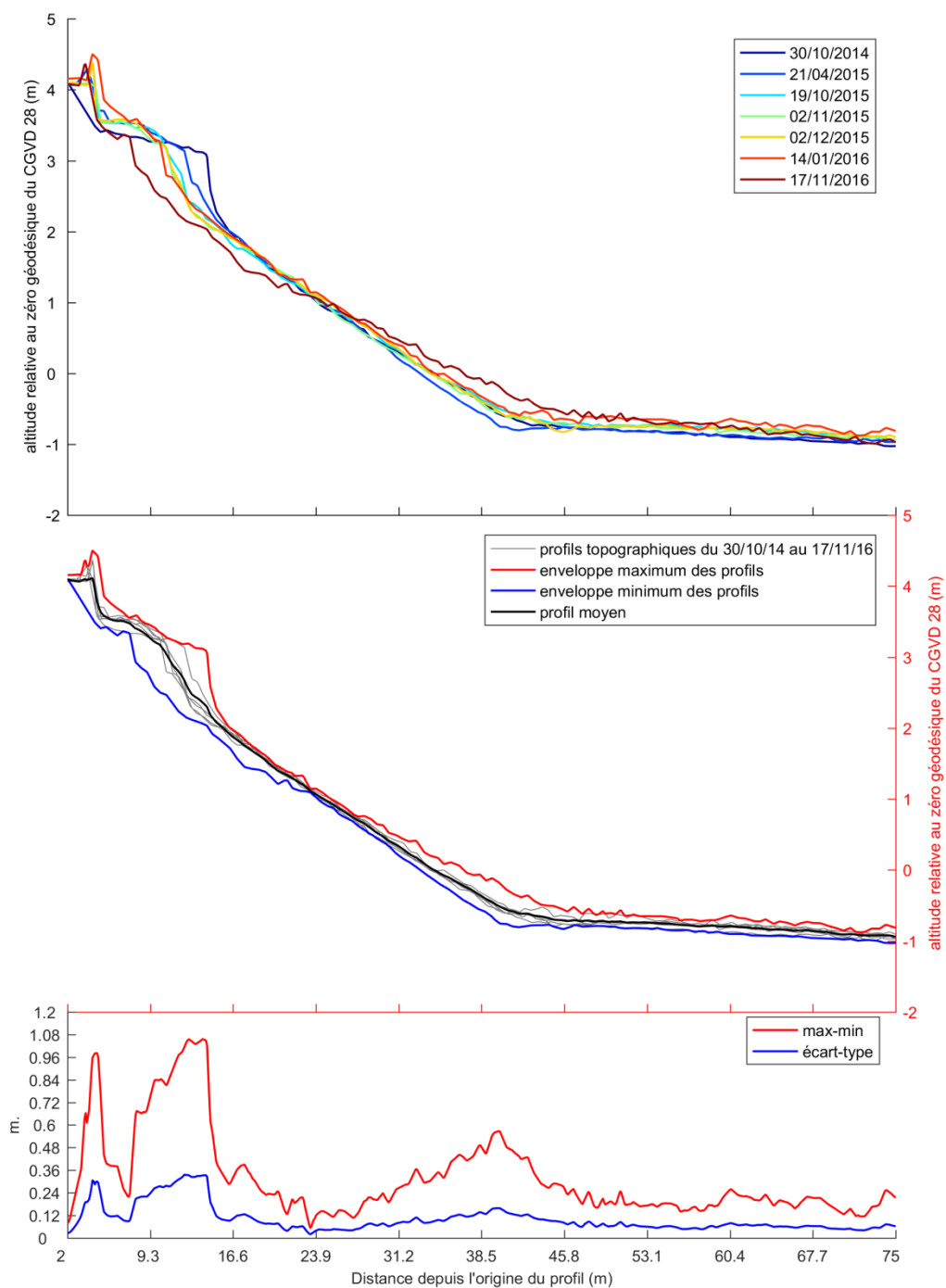
Profil 5



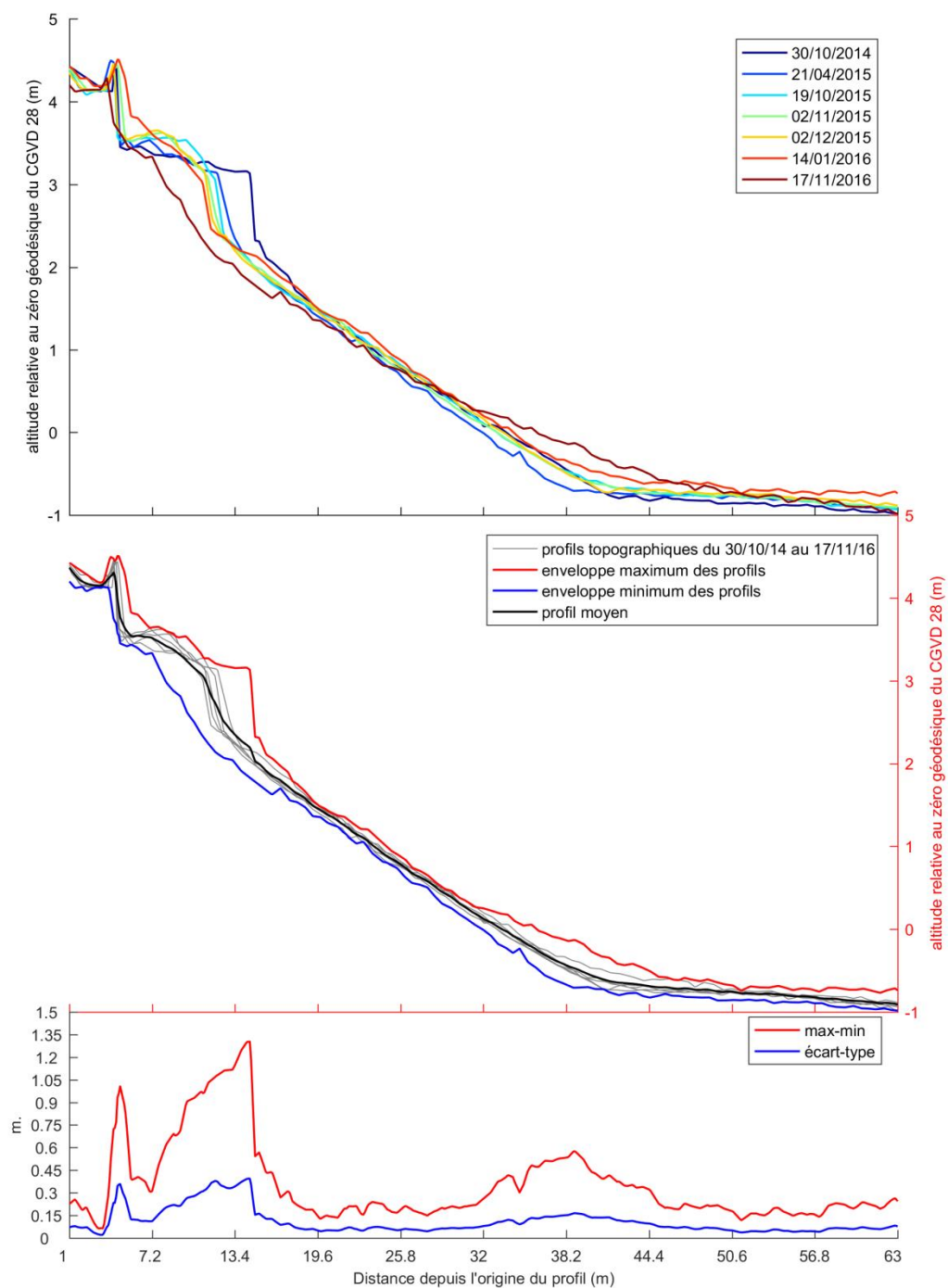
Profil 7



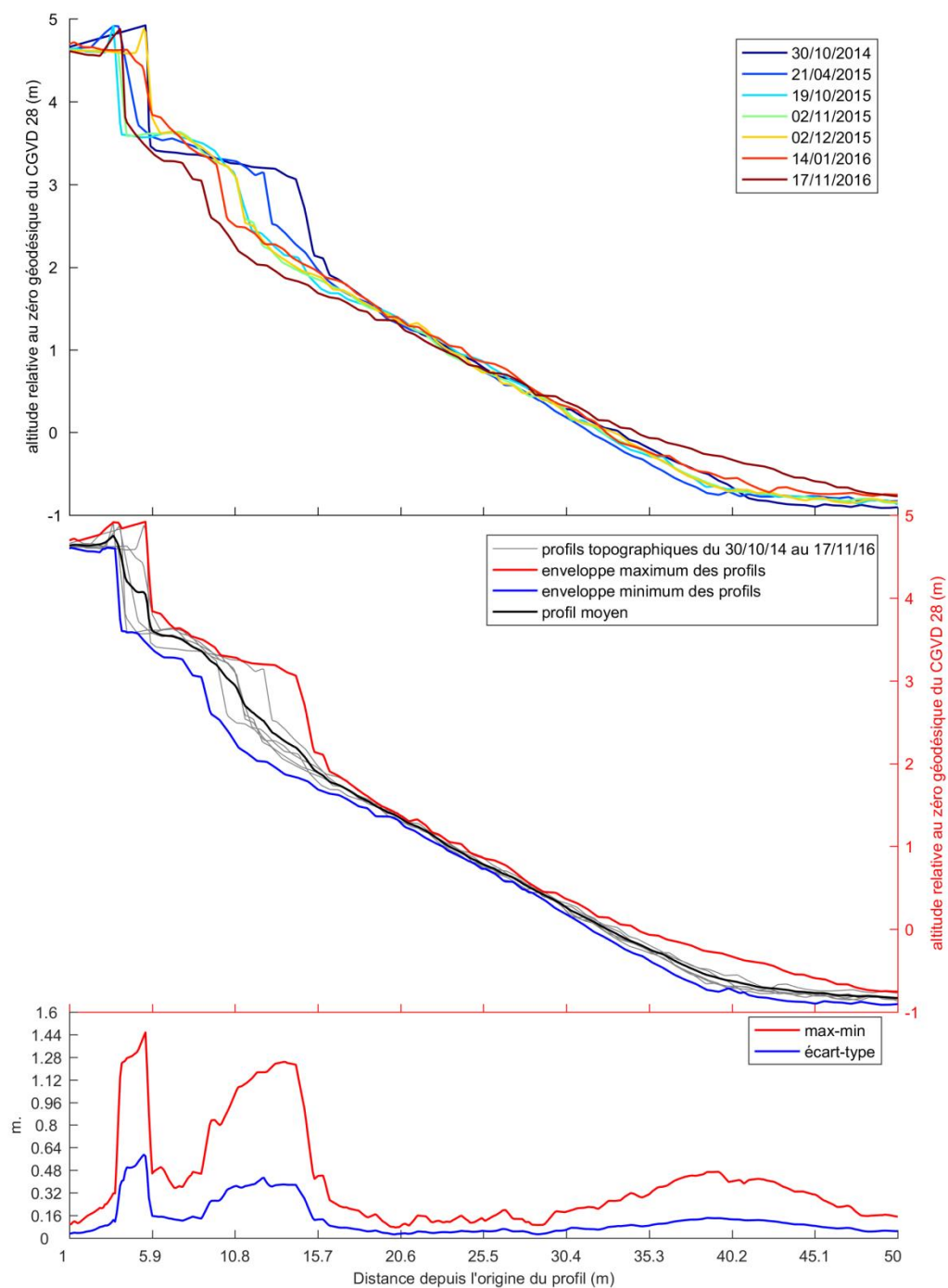
Profil 8



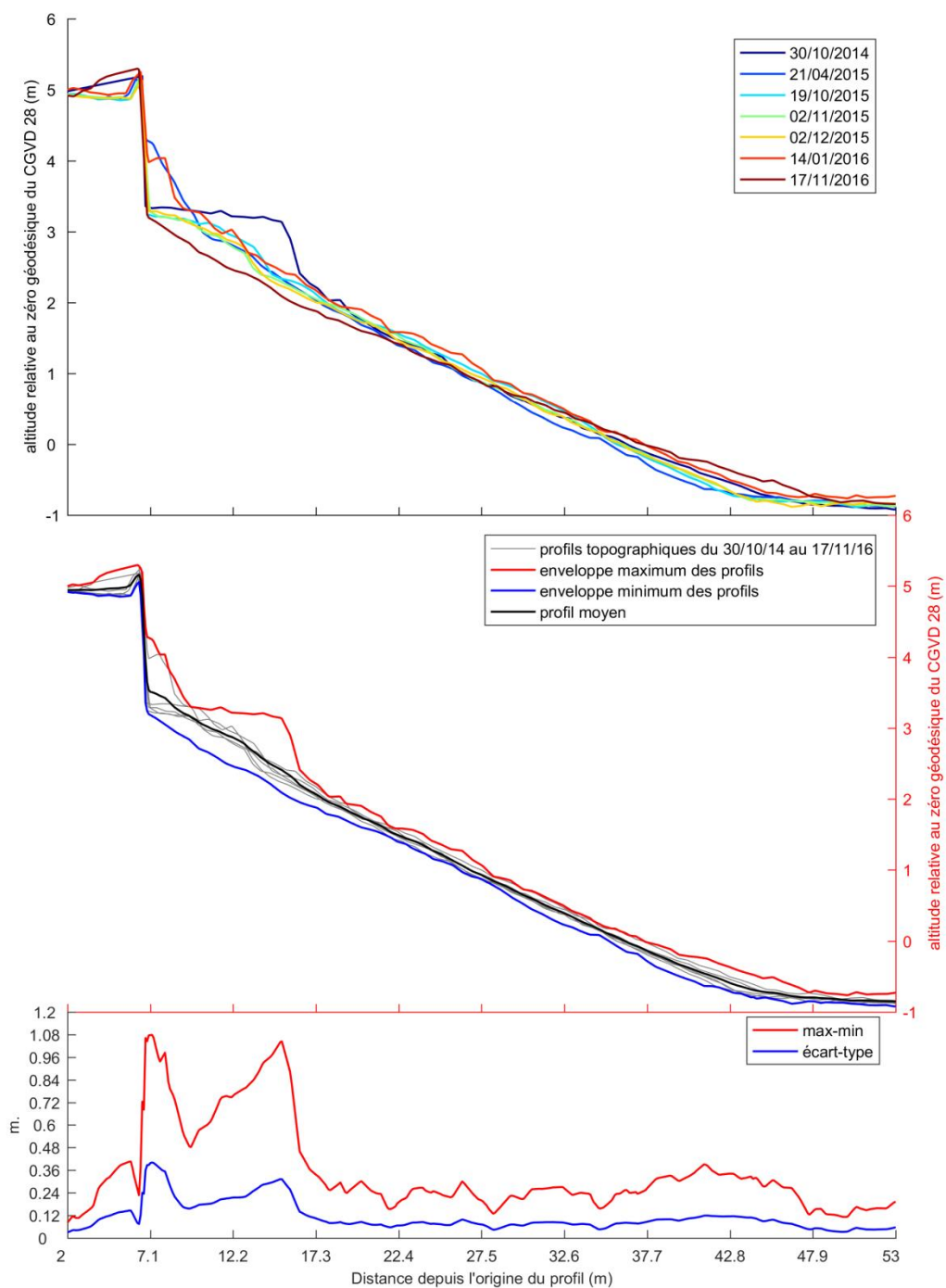
Profil 9



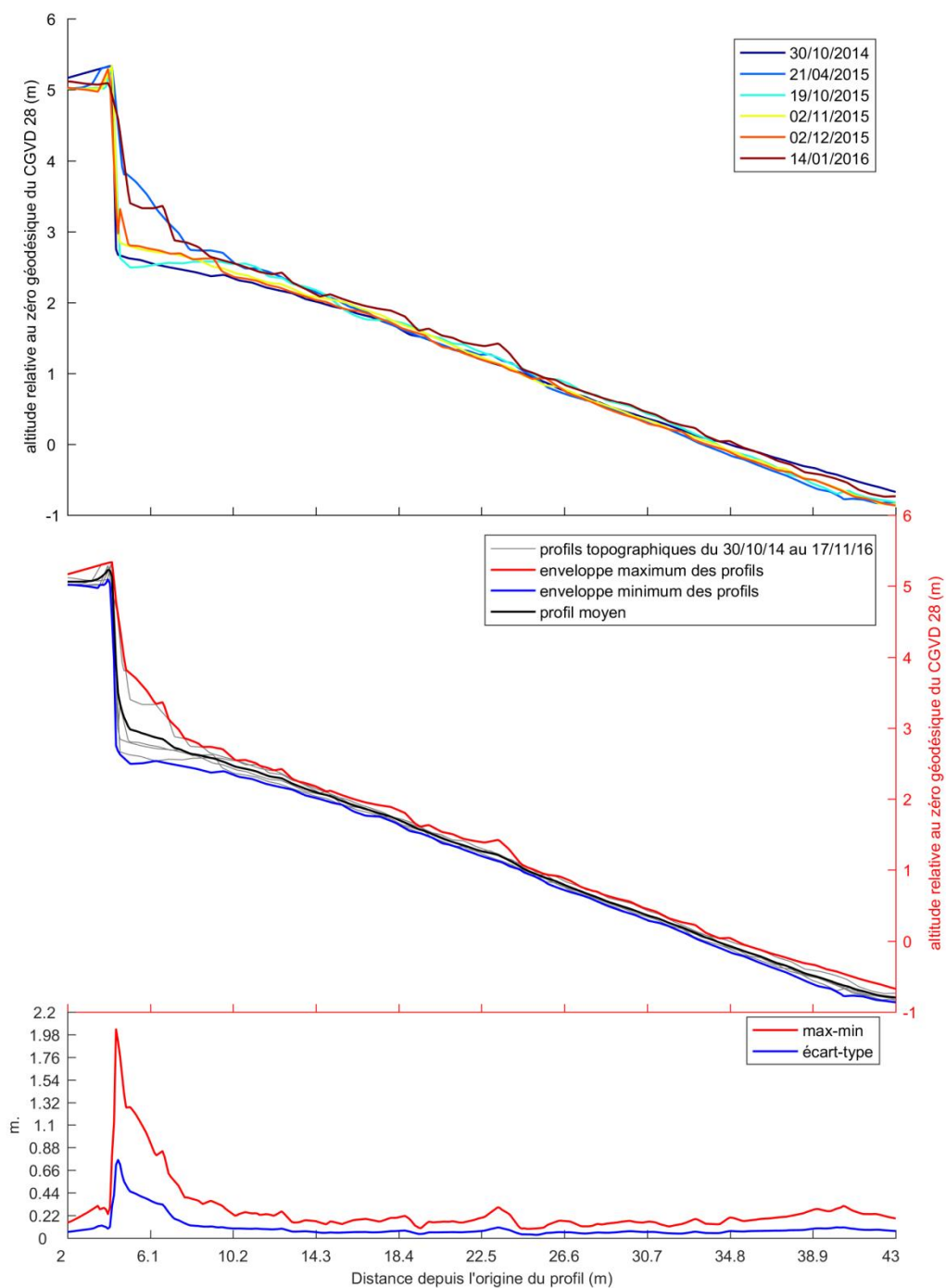
Profil 10



Profil 11

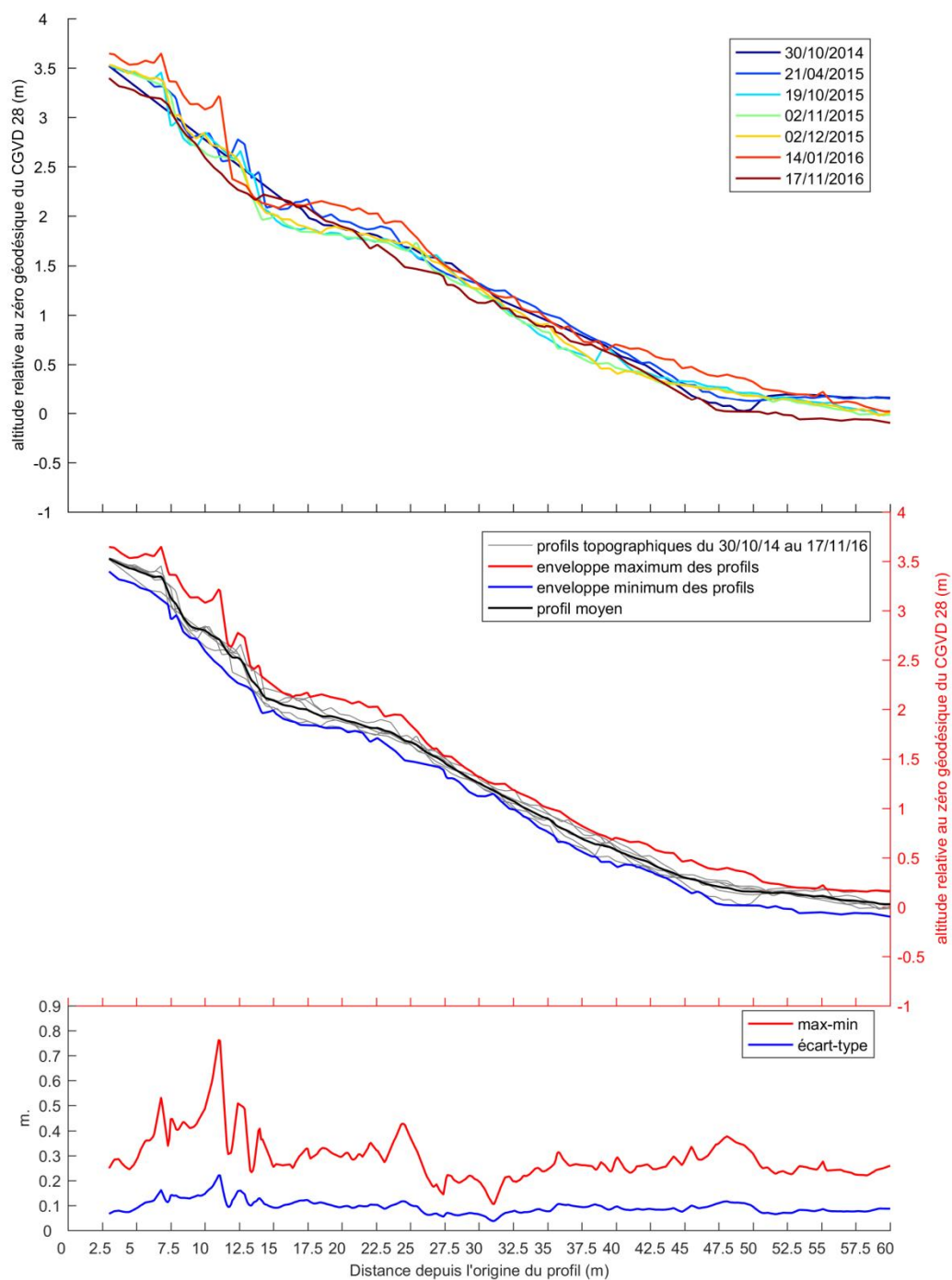


Profil 12

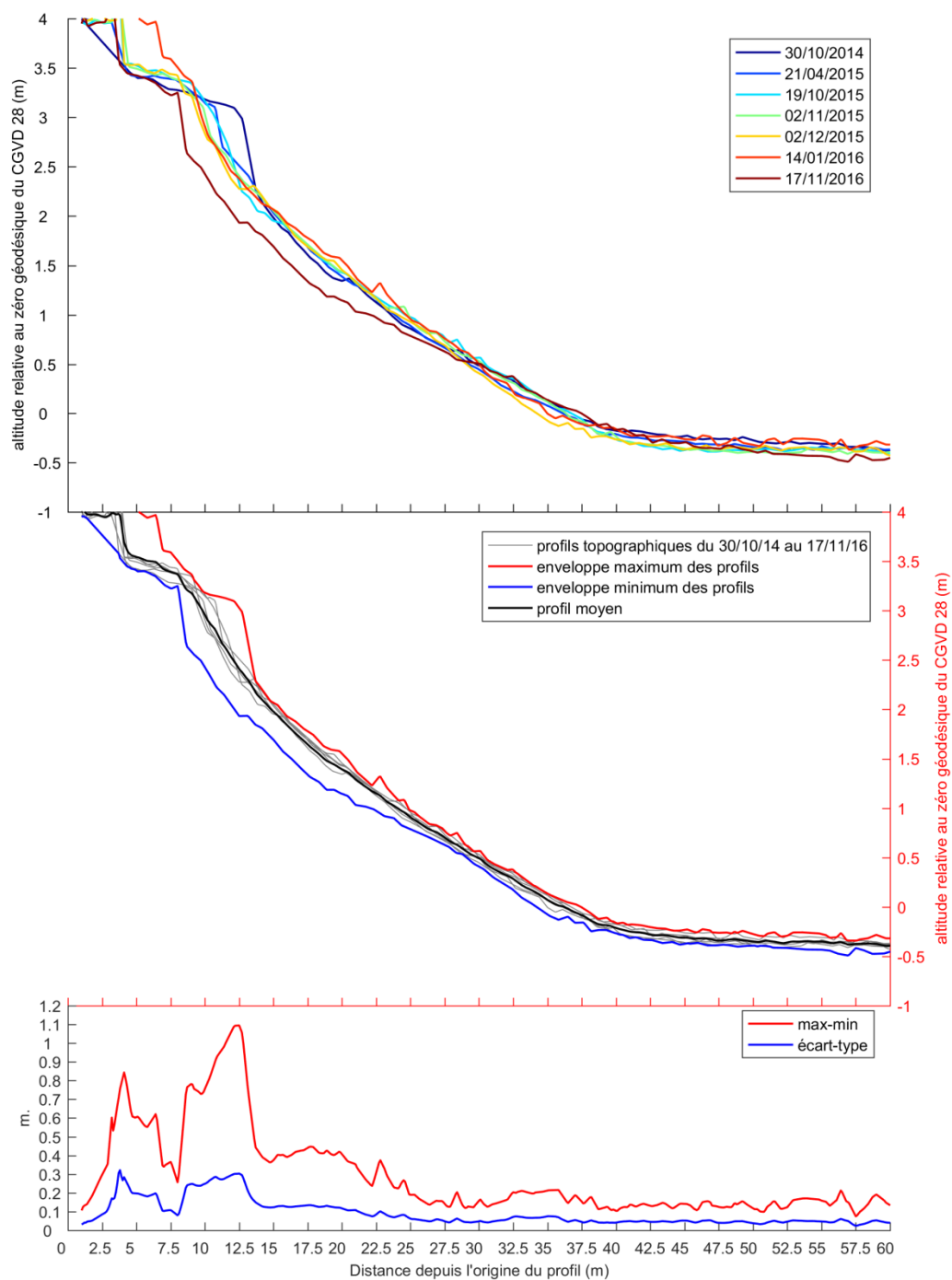


Profil 13

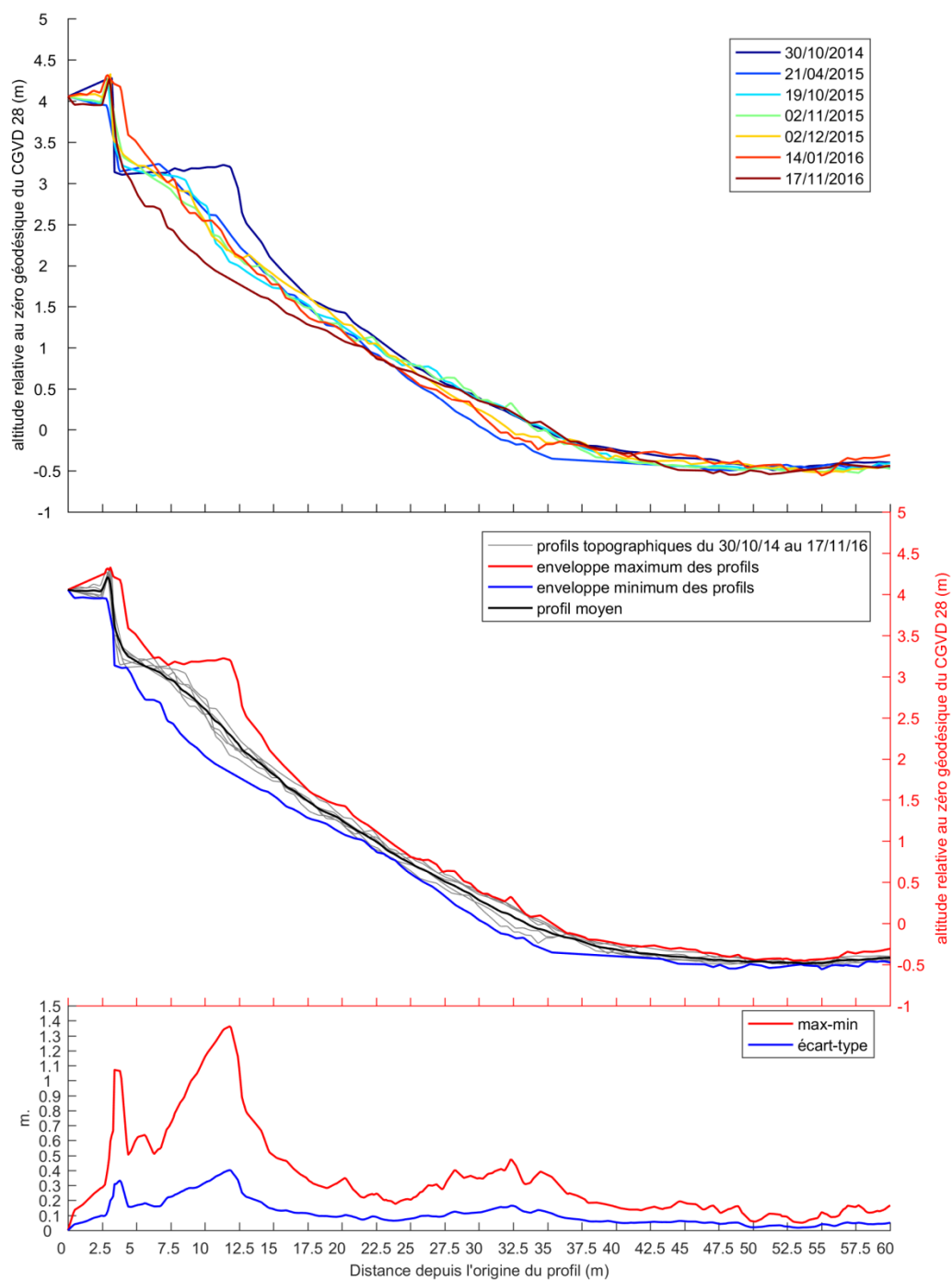
ANNEXE 3 :
Ensemble des profils topographiques de la plage (haut estran) réalisés du
30 octobre 2014 au 17 novembre 2017



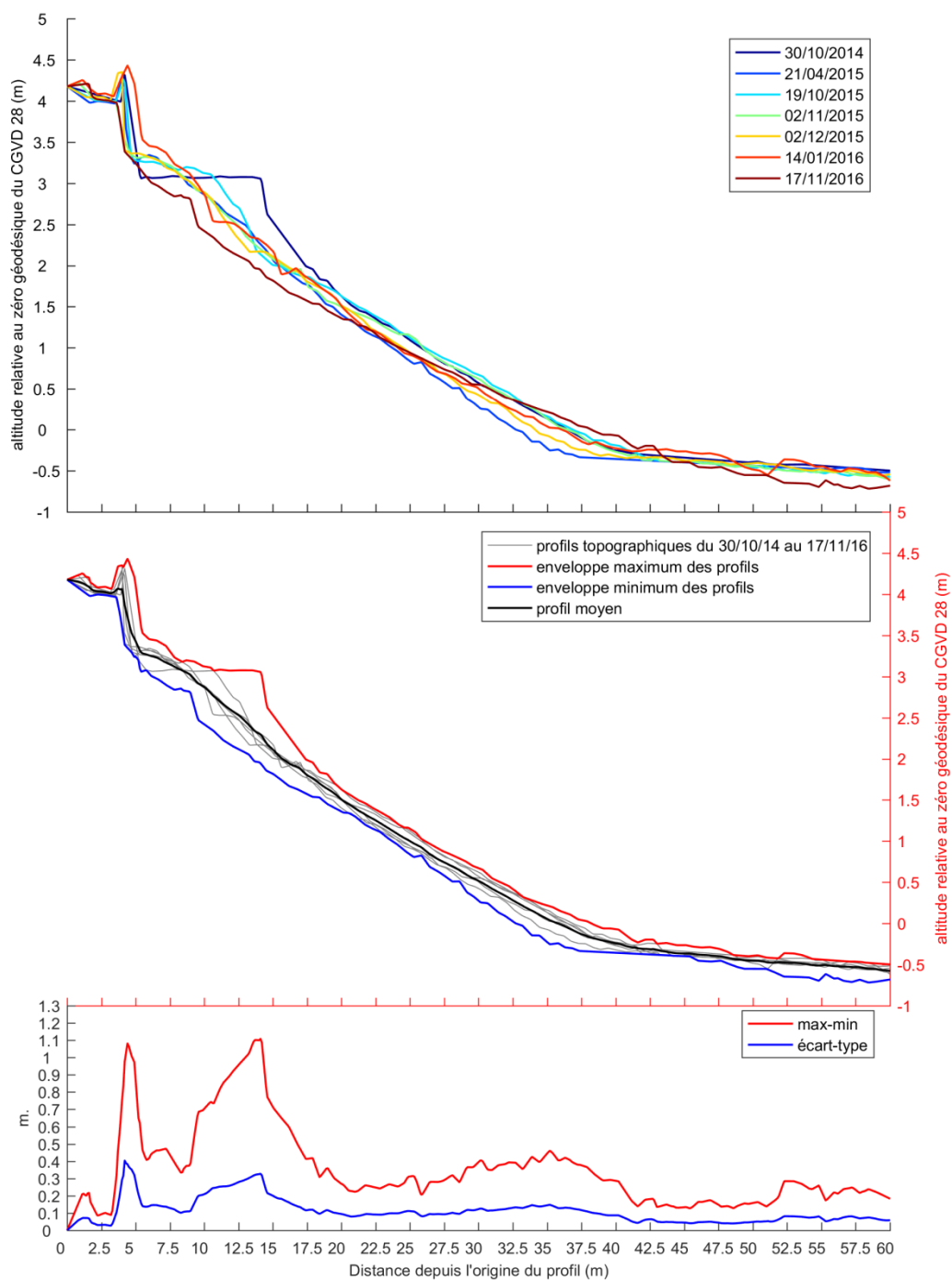
Profil 1



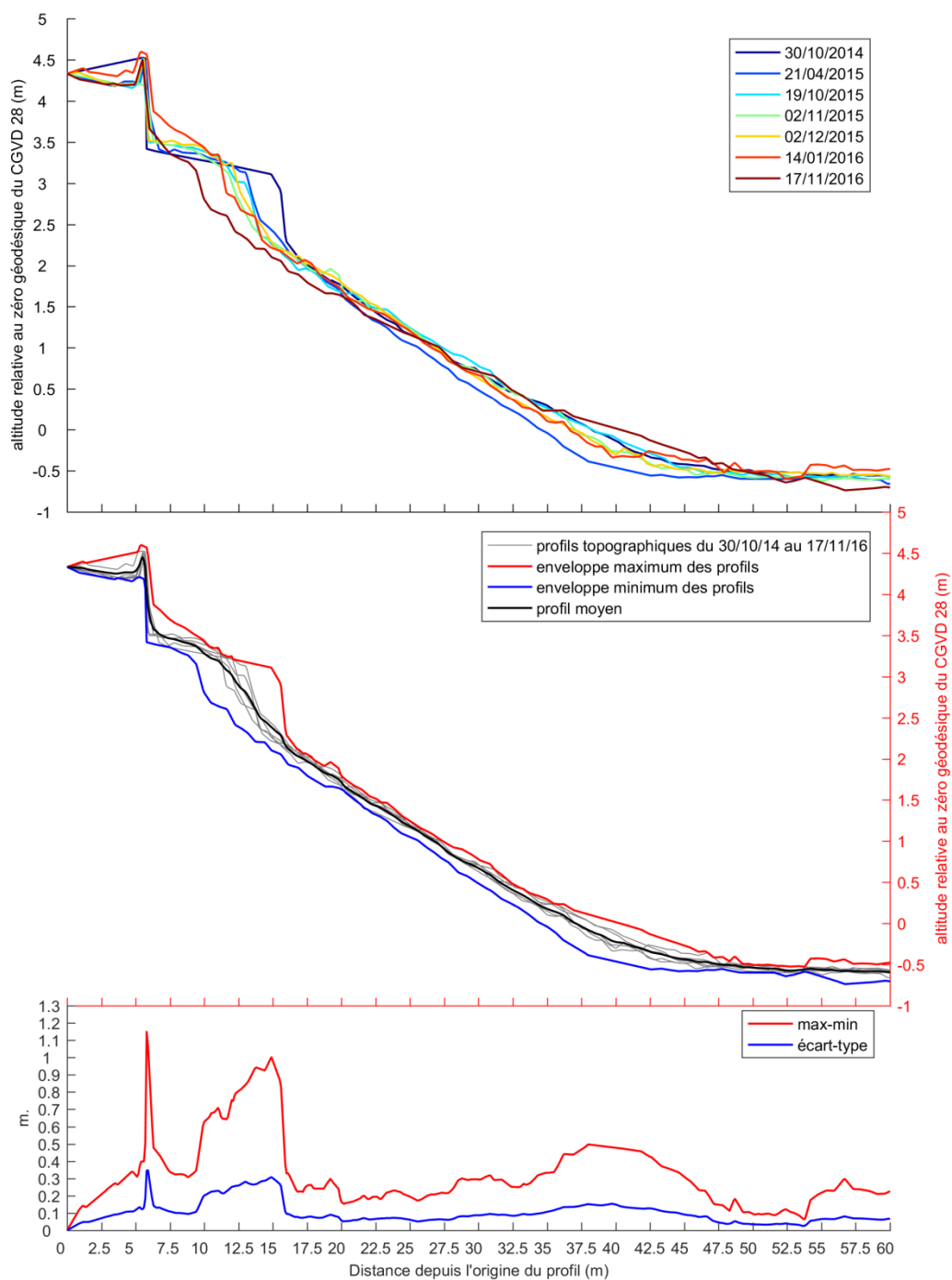
Profil 2



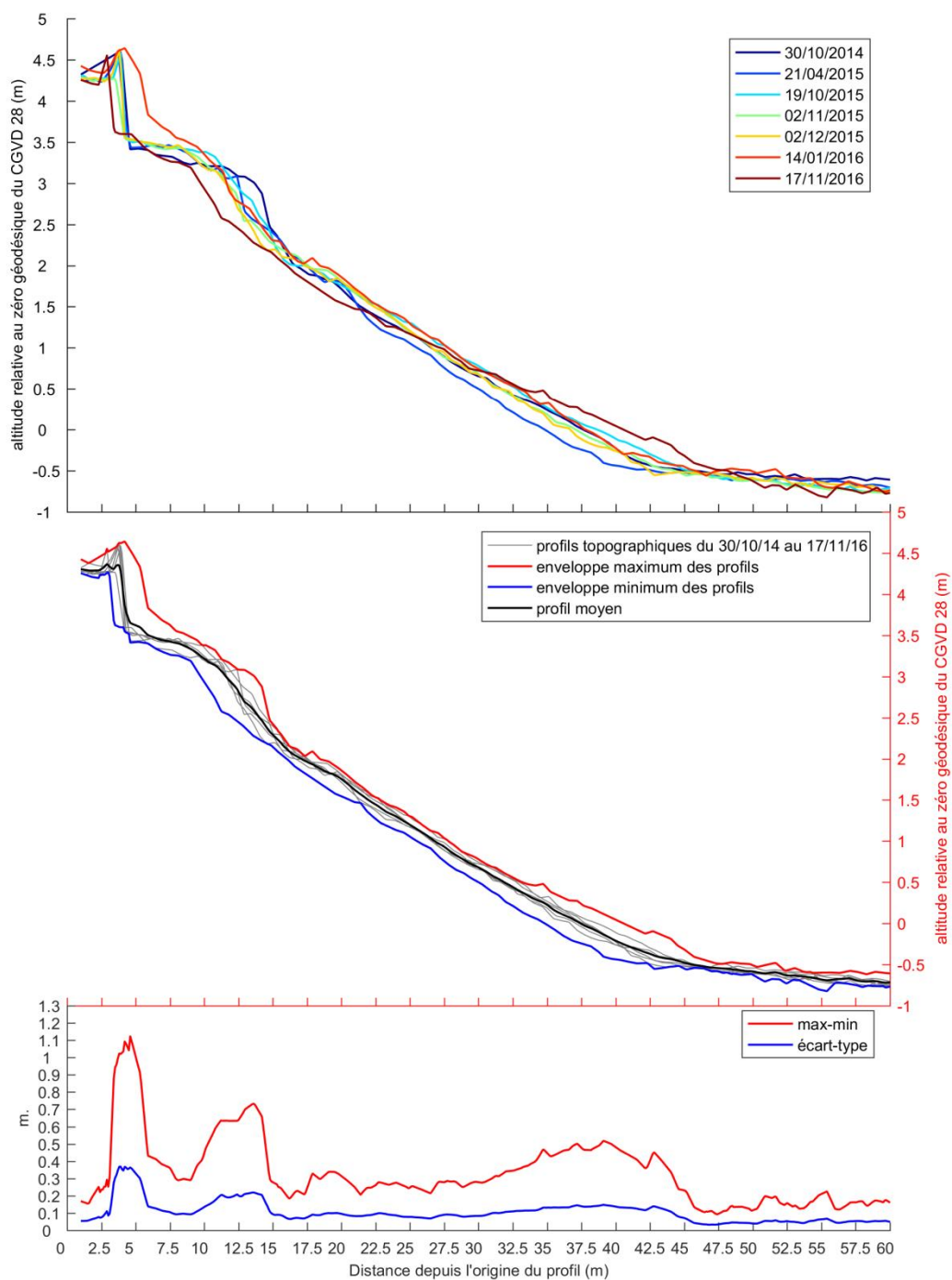
Profil 3



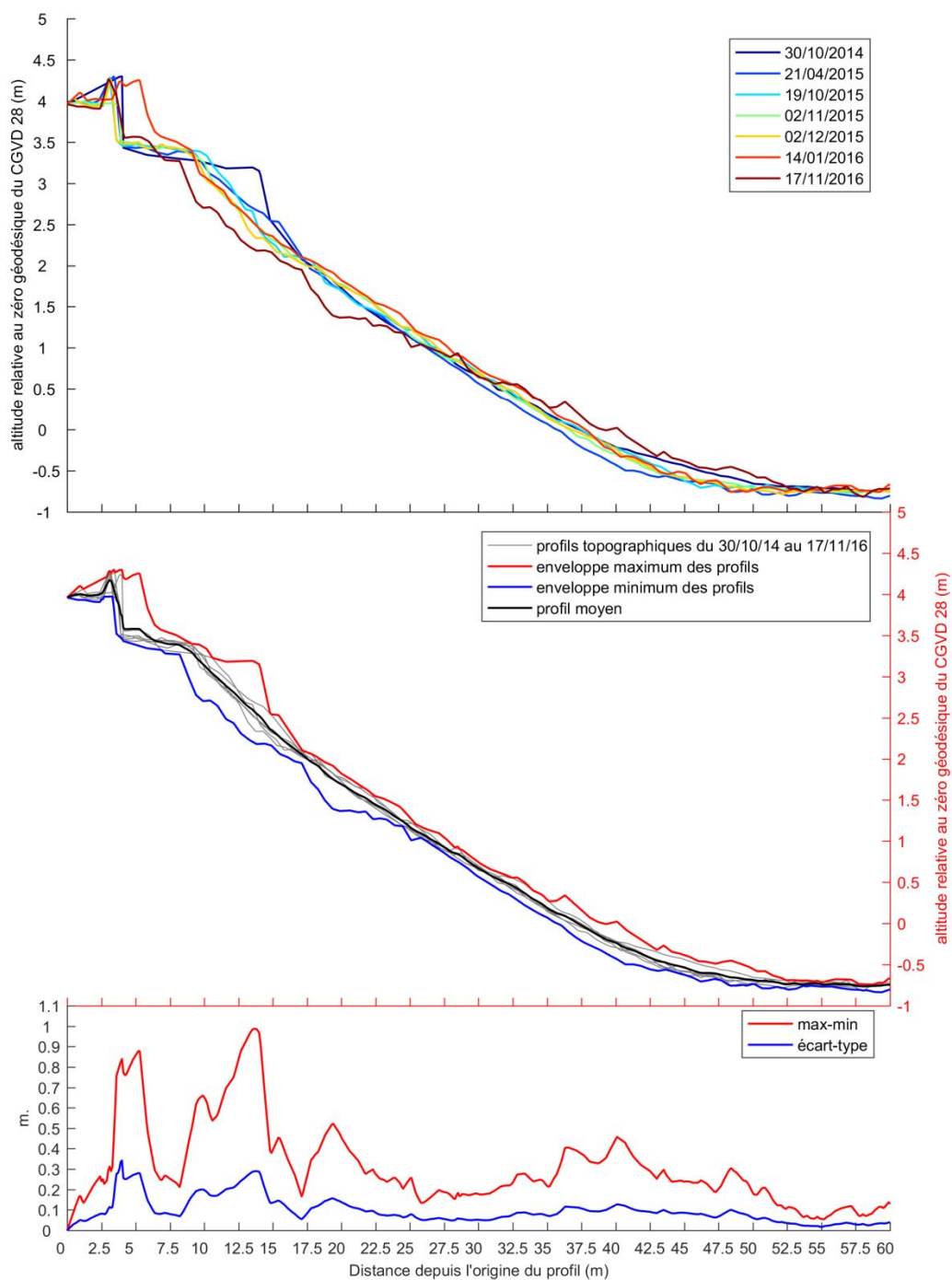
Profil 4



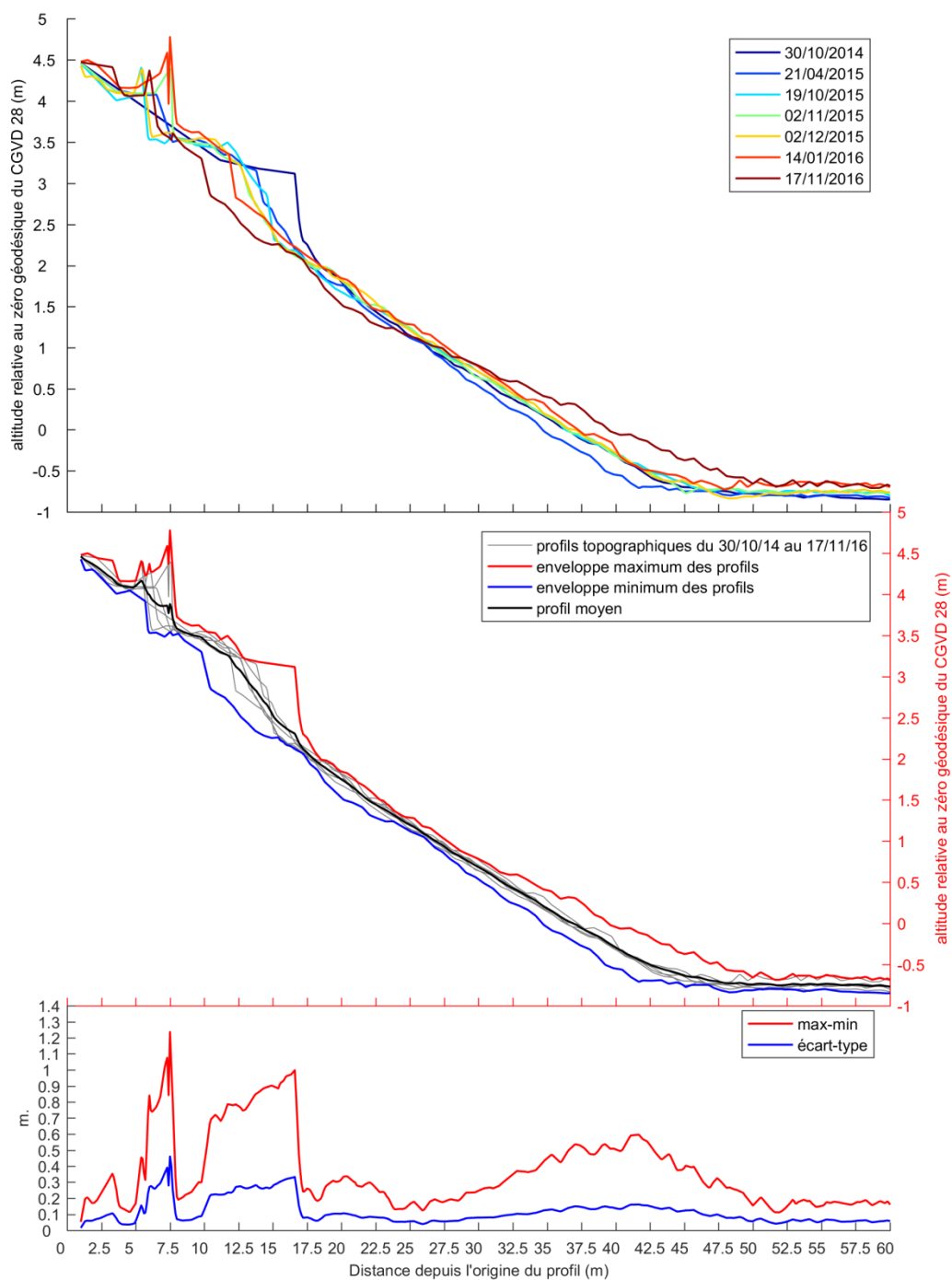
Profil 5



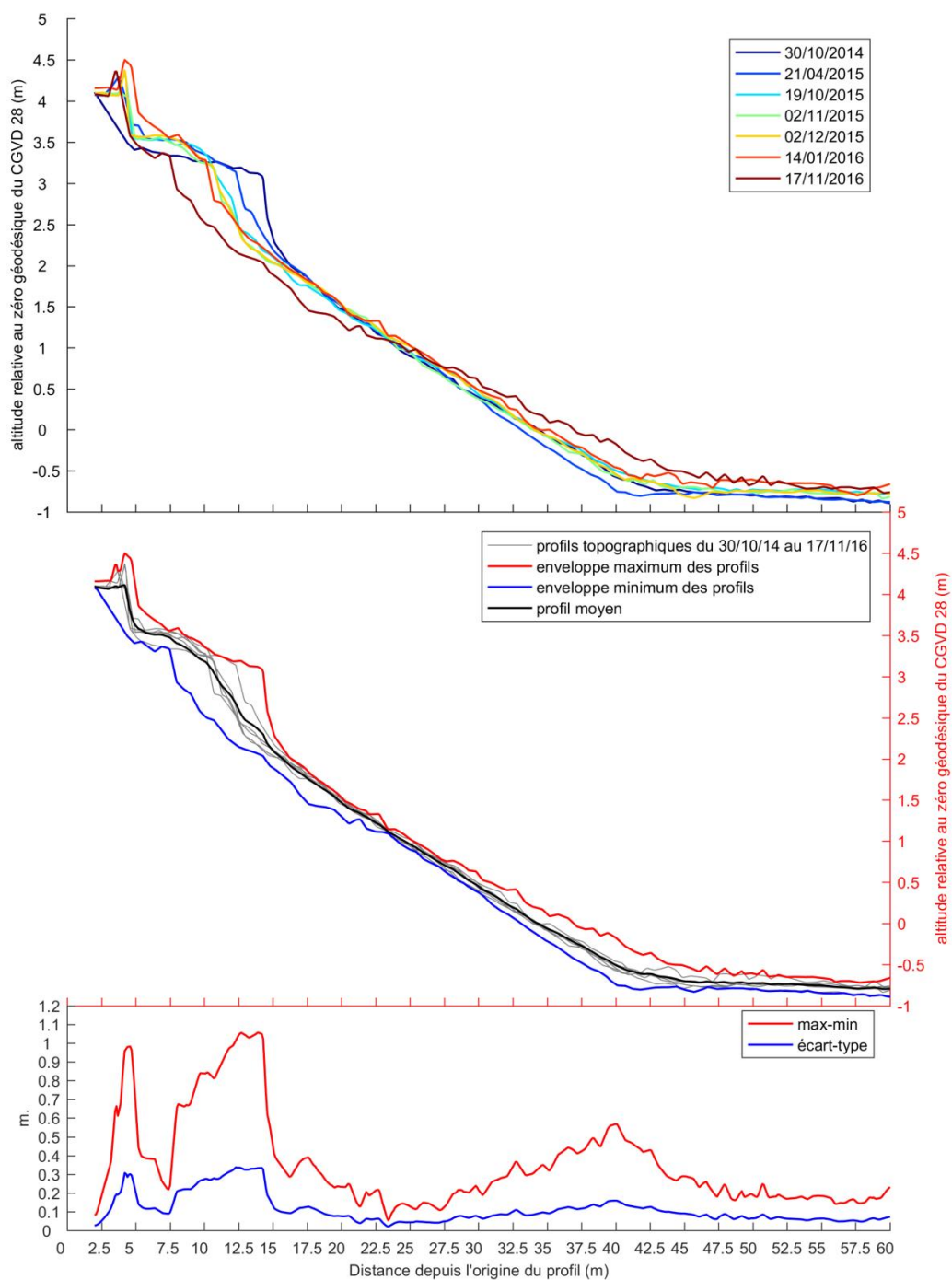
Profil 6



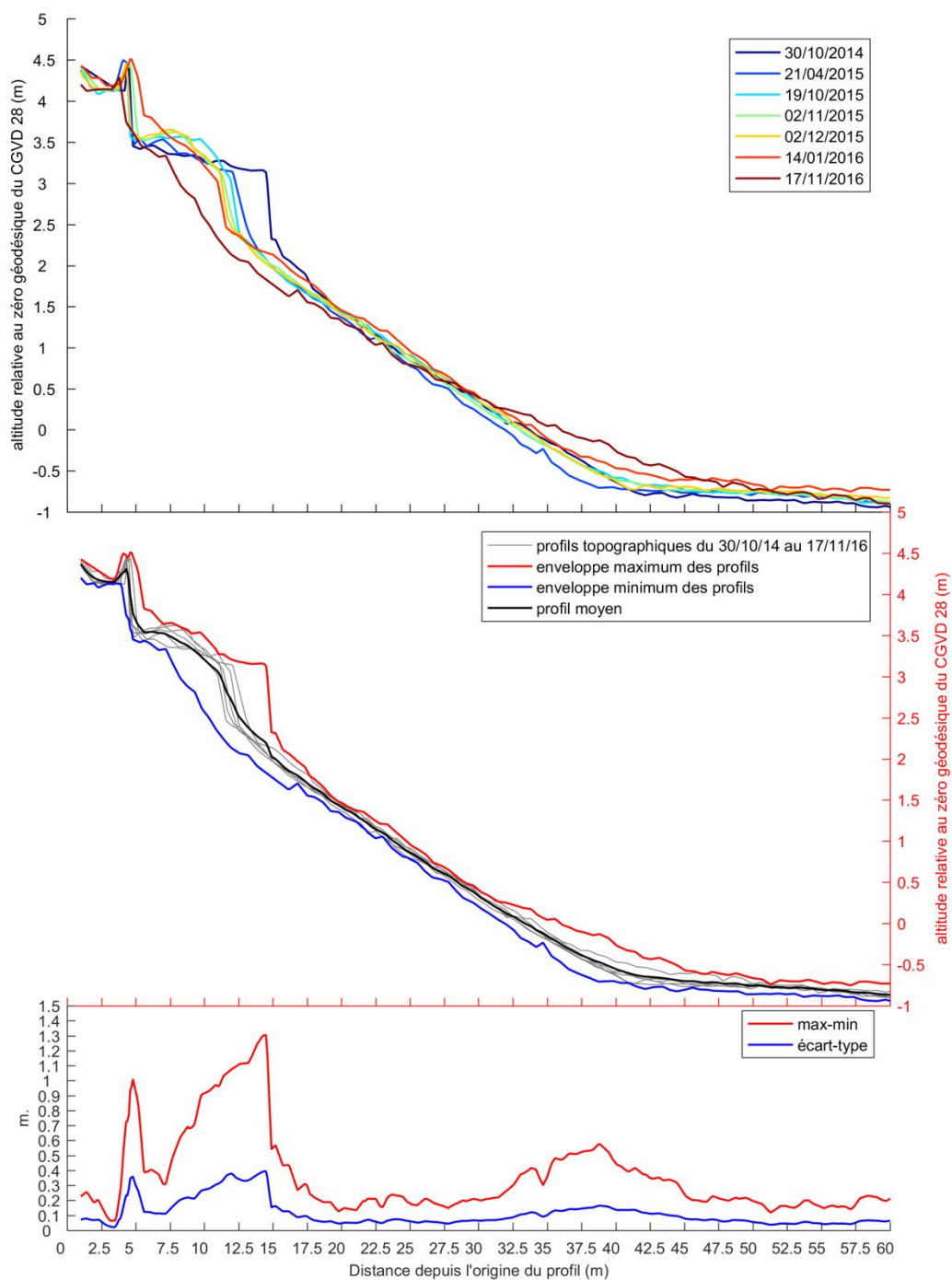
Profil 7



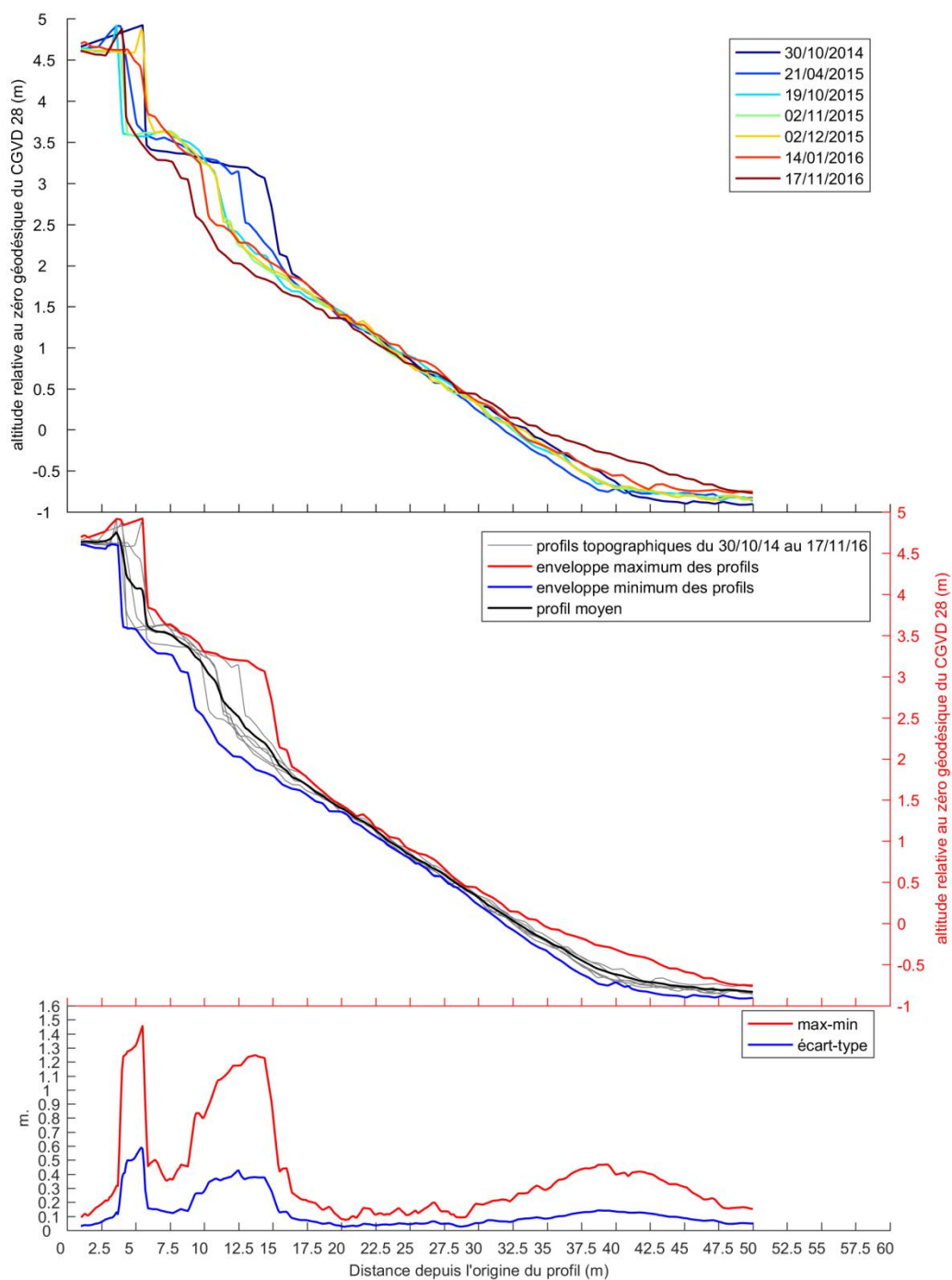
Profil 8



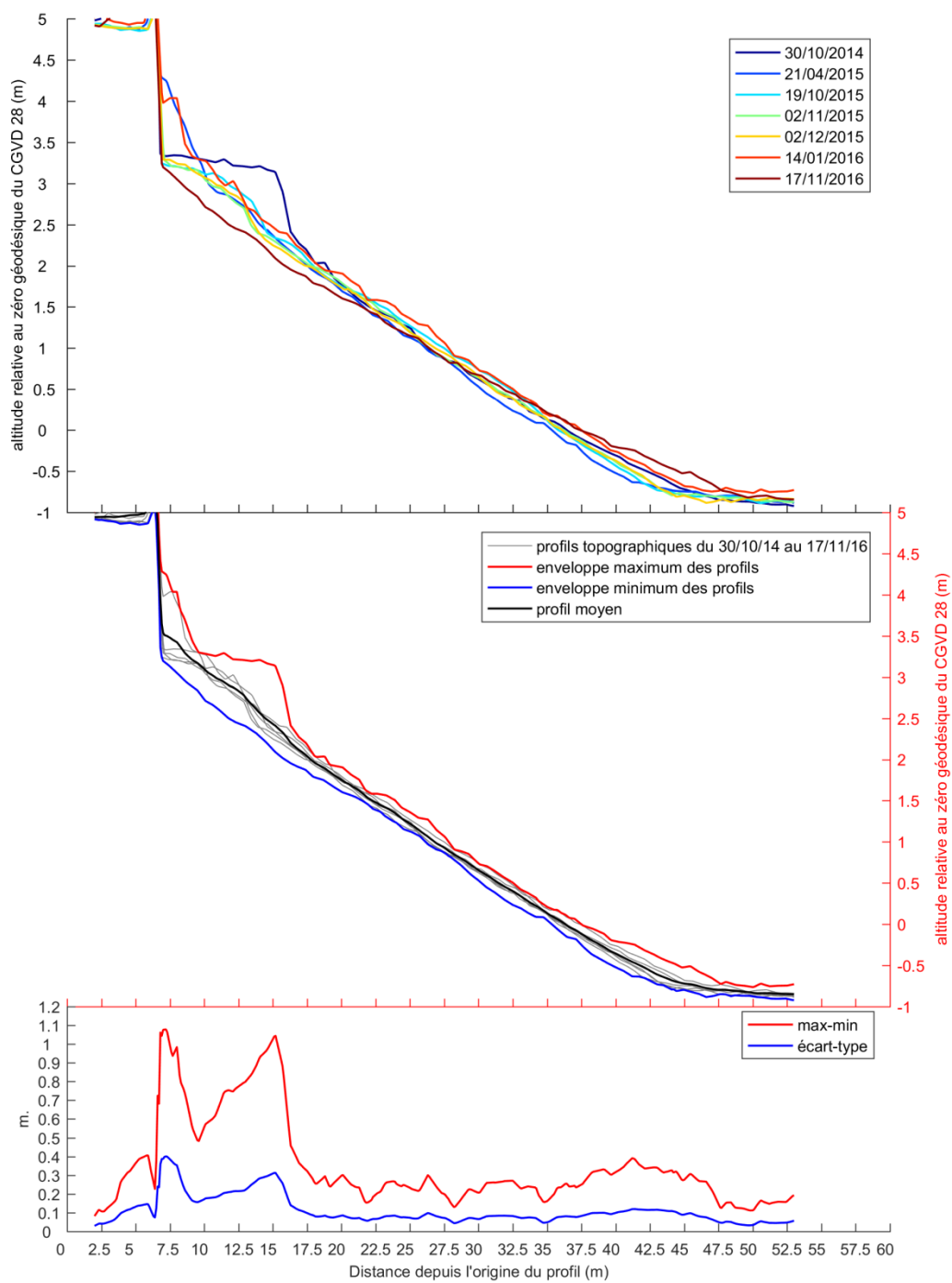
Profil 9



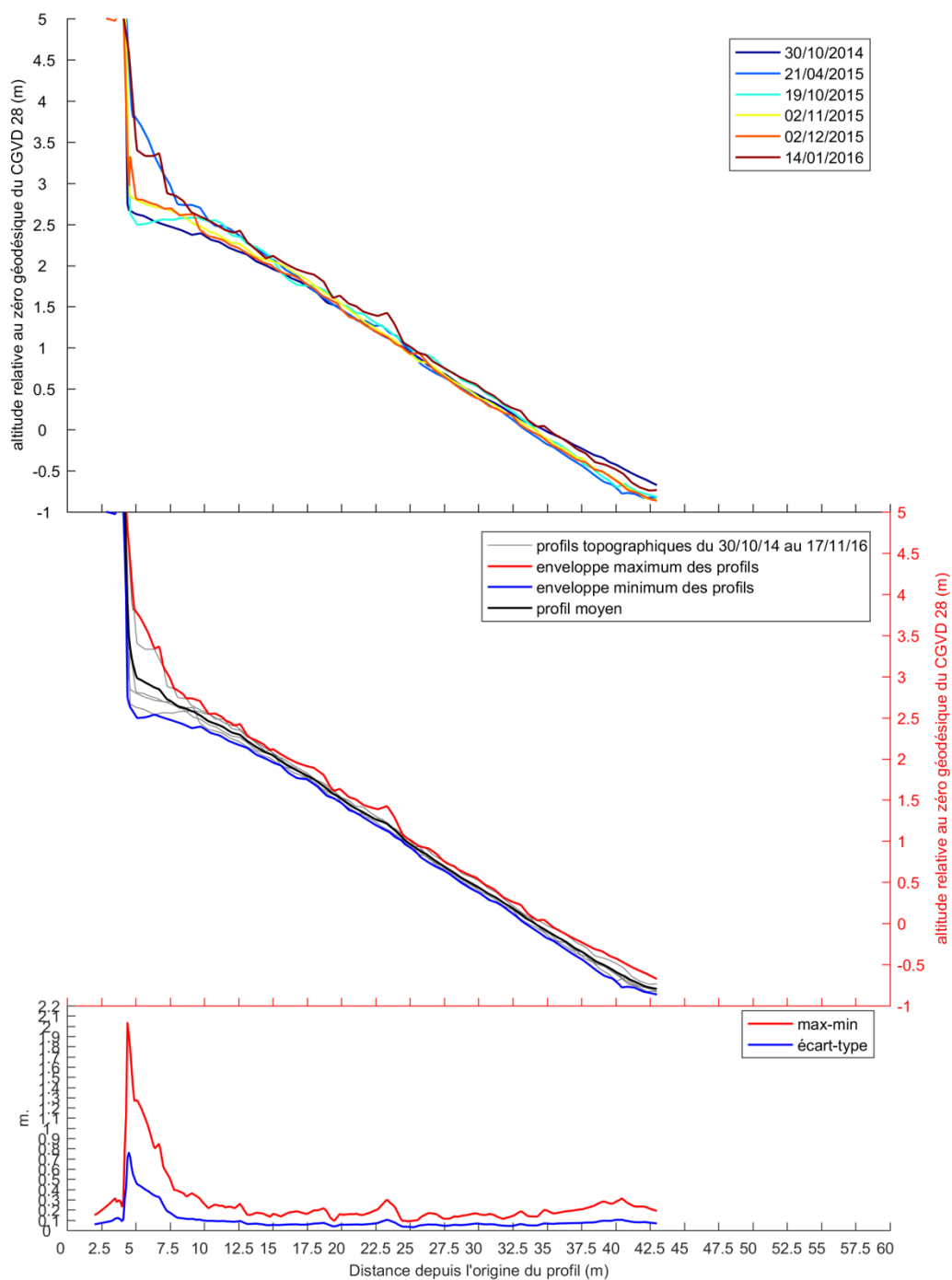
Profil 10



Profil 11



Profil 12



Profil 13

ANNEXE 4 :
Volume des différents compartiments pour chaque levé LiDAR

Compartiment	Septembre 2012				Août 2014			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	2321.71	15.65	2.82	0.19	1157.51	22.71	3.26	0.06
SL_02	2161.67	13.82	2.97	0.19	1894.41	36.83	3.29	0.06
SL_03	2306.97	14.72	2.98	0.19	2630.68	50.55	3.33	0.06
SL_04	1988.69	13.09	2.89	0.19	2154.36	43.64	3.16	0.06
SL_05	3114.81	22.44	2.64	0.19	3319.47	73.85	2.88	0.06
SL_06	3243.94	24.68	2.50	0.19	3250.85	74.38	2.80	0.06
SL_07	4102.80	32.22	2.42	0.19	3859.30	87.44	2.82	0.06
SL_08	4341.62	34.06	2.42	0.19	3998.09	90.53	2.83	0.06
SL_09	4928.08	36.97	2.53	0.19	4505.14	100.36	2.87	0.06
SL_10	4715.53	33.55	2.67	0.19	4725.58	107.83	2.80	0.06
SL_11	4538.22	32.92	2.62	0.19	4639.68	112.18	2.65	0.06
SL_12	4276.92	31.86	2.55	0.19	4147.47	99.87	2.66	0.06
SL_13	4124.79	29.66	2.64	0.19	3982.58	95.25	2.68	0.06
SL_14	4047.55	28.32	2.72	0.19	3859.64	91.62	2.70	0.06
SL_15	4673.08	31.25	2.84	0.19	4620.97	106.44	2.78	0.06
SL_16	4485.91	29.73	2.87	0.19	4521.52	102.74	2.82	0.06
SL_17	4471.46	29.40	2.89	0.19	4378.51	97.05	2.89	0.06
SL_18	4766.11	32.75	2.77	0.19	4882.84	104.78	2.98	0.06
SL_19	4772.94	31.92	2.84	0.19	4836.80	98.76	3.13	0.06
SL_20	4887.99	30.46	3.05	0.19	4702.05	91.32	3.30	0.06
SL_21	4909.56	30.68	3.04	0.19	4388.22	82.93	3.39	0.06
SL_22	4526.93	28.85	2.98	0.19	4572.41	85.74	3.41	0.06
SL_23	4477.94	25.74	3.31	0.19	5070.64	100.85	3.22	0.06
SL_24	6171.53	36.91	3.18	0.19	8030.21	197.65	2.60	0.06
SL_25	5837.40	32.85	3.38	0.19	6912.78	153.76	2.88	0.06
SL_26	5129.69	30.83	3.16	0.19	5067.54	100.98	3.21	0.06
SL_27	4883.35	31.01	2.99	0.19	4472.73	88.39	3.24	0.06
SL_28	5203.37	32.91	3.00	0.19	5363.02	110.75	3.10	0.06
SL_29	5015.44	31.29	3.05	0.19	5292.68	106.62	3.18	0.06
SL_30	4918.31	29.31	3.19	0.19	5319.08	105.82	3.22	0.06
SL_31	4697.19	27.46	3.25	0.19	5050.69	101.23	3.19	0.06
SL_32	4955.54	28.14	3.35	0.19	5304.92	103.88	3.27	0.06
SL_33	4678.63	26.91	3.30	0.19	5065.79	103.75	3.13	0.06
SL_34	3593.09	21.76	3.14	0.19	4161.97	94.76	2.81	0.06
SL_35	3803.06	23.08	3.13	0.19	4691.28	110.48	2.72	0.06
SL_36	3619.17	22.57	3.05	0.19	4345.31	99.47	2.80	0.06
SL_37	4249.64	26.34	3.07	0.19	4490.50	99.47	2.89	0.06
SL_38	3488.15	23.39	2.83	0.19	3528.14	83.56	2.70	0.06
SL_39	3642.01	24.48	2.83	0.19	3355.66	75.96	2.83	0.06
SL_40	4142.65	26.88	2.93	0.19	4100.37	90.04	2.91	0.06
SL_41	3841.23	24.70	2.96	0.19	4159.45	86.09	3.09	0.06
SL_42	3867.06	24.36	3.02	0.19	4343.87	95.89	2.90	0.06
SL_43	3051.88	21.35	2.72	0.19	3548.54	82.78	2.74	0.06
SL_44	2781.38	19.73	2.68	0.19	3240.39	78.13	2.65	0.06
SL_45	2635.95	18.78	2.67	0.19	2935.60	71.06	2.64	0.06
SL_46	2184.16	15.94	2.60	0.19	2693.22	63.47	2.72	0.06
SL_47	1785.80	12.78	2.66	0.19	2630.52	58.59	2.87	0.06
SL_48	927.11	6.96	2.53	0.19	1421.28	34.55	2.63	0.06
SL_49	646.60	5.56	2.21	0.19	741.12	20.32	2.33	0.06
SL_50	1025.72	7.74	2.52	0.19	1188.20	29.45	2.58	0.06
SL_51	1299.93	8.98	2.75	0.19	1316.67	29.73	2.83	0.06
SL_52	1587.03	10.74	2.81	0.19	1436.50	32.78	2.81	0.06
SL_53	2128.06	12.88	3.14	0.19	2193.11	43.98	3.19	0.06
SL_54	1860.44	11.19	3.16	0.19	2190.48	42.70	3.28	0.06
SL_55	1397.22	9.08	2.92	0.19	1739.70	36.55	3.05	0.06
SL_56	1244.47	8.12	2.91	0.19	1085.54	23.46	2.96	0.06
SL_57	1621.18	9.48	3.25	0.19	1772.03	34.84	3.26	0.06
SL_58	1512.26	8.84	3.25	0.19	1414.15	27.79	3.26	0.06
SL_59	793.09	4.84	3.12	0.19	774.94	15.66	3.17	0.06
SL_60	994.63	5.95	3.18	0.19	579.42	11.50	3.22	0.06

Compartiment	Octobre 2014				Novembre 2014			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	2294.08	38.67	2.97	0.05	2107.25	42.26	2.99	0.06
SL_02	2864.19	47.00	3.05	0.05	1631.12	30.42	3.22	0.06
SL_03	3009.37	45.72	3.29	0.05	2031.40	35.32	3.45	0.06
SL_04	2383.13	35.66	3.34	0.05	2524.09	43.40	3.49	0.06
SL_05	3313.54	44.41	3.73	0.05	3560.40	60.11	3.55	0.06
SL_06	3485.59	46.02	3.79	0.05	3629.74	61.20	3.56	0.06
SL_07	4542.90	61.31	3.70	0.05	4635.20	79.46	3.50	0.06
SL_08	4552.75	61.57	3.70	0.05	4724.87	81.30	3.49	0.06
SL_09	5151.71	73.80	3.49	0.05	5187.18	90.73	3.43	0.06
SL_10	5174.34	72.53	3.57	0.05	5191.53	88.07	3.54	0.06
SL_11	4928.45	71.22	3.46	0.05	4859.94	83.57	3.49	0.06
SL_12	4867.08	73.24	3.32	0.05	4681.19	81.76	3.44	0.06
SL_13	4894.83	73.97	3.31	0.05	4864.56	87.59	3.33	0.06
SL_14	4838.34	72.62	3.33	0.05	4816.19	89.15	3.24	0.06
SL_15	4971.32	74.02	3.36	0.05	5205.25	100.95	3.09	0.06
SL_16	4355.61	73.64	2.96	0.05	4447.20	93.52	2.85	0.06
SL_17	4131.16	69.09	2.99	0.05	4227.72	88.58	2.86	0.06
SL_18	4678.49	75.43	3.10	0.05	4673.10	92.28	3.04	0.06
SL_19	5036.69	79.62	3.16	0.05	5082.22	97.10	3.14	0.06
SL_20	5130.33	78.73	3.26	0.05	5168.30	97.36	3.19	0.06
SL_21	4862.55	74.84	3.25	0.05	4713.87	90.92	3.11	0.06
SL_22	4626.30	71.97	3.21	0.05	4393.19	83.24	3.17	0.06
SL_23	5961.56	102.20	2.92	0.05	5547.30	103.31	3.22	0.06
SL_24	11590.41	245.76	2.36	0.05	9267.35	197.82	2.81	0.06
SL_25	8921.15	172.06	2.59	0.05	8550.29	175.25	2.93	0.06
SL_26	5282.93	81.60	3.24	0.05	5397.61	98.64	3.28	0.06
SL_27	4727.02	76.38	3.09	0.05	4718.79	88.58	3.20	0.06
SL_28	5331.21	88.15	3.02	0.05	5107.50	94.84	3.23	0.06
SL_29	5338.25	84.97	3.14	0.05	5206.43	93.97	3.32	0.06
SL_30	5265.24	82.30	3.20	0.05	4990.34	92.52	3.24	0.06
SL_31	5094.08	81.55	3.12	0.05	4753.36	90.73	3.14	0.06
SL_32	5371.98	85.53	3.14	0.05	4703.96	87.56	3.22	0.06
SL_33	5139.44	84.60	3.04	0.05	4430.20	86.53	3.07	0.06
SL_34	4098.71	71.90	2.85	0.05	3866.41	77.38	3.00	0.06
SL_35	4179.45	70.05	2.98	0.05	4085.40	82.46	2.97	0.06
SL_36	4062.55	70.18	2.89	0.05	3889.76	80.63	2.89	0.06
SL_37	4215.96	71.90	2.93	0.05	4140.13	85.87	2.89	0.06
SL_38	3332.12	61.23	2.72	0.05	3251.71	72.77	2.68	0.06
SL_39	3361.13	60.53	2.78	0.05	3343.00	75.19	2.67	0.06
SL_40	4051.45	70.97	2.85	0.05	4128.78	84.53	2.93	0.06
SL_41	4292.88	69.51	3.09	0.05	4211.12	80.57	3.14	0.06
SL_42	4088.18	68.53	2.98	0.05	4138.10	81.72	3.04	0.06
SL_43	3249.29	60.40	2.69	0.05	3265.26	68.11	2.88	0.06
SL_44	2918.71	53.89	2.71	0.05	3037.30	64.09	2.84	0.06
SL_45	2632.15	48.39	2.72	0.05	2784.62	61.76	2.71	0.06
SL_46	2410.38	44.36	2.72	0.05	2681.02	59.44	2.71	0.06
SL_47	2578.00	45.08	2.86	0.05	2895.99	61.97	2.80	0.06
SL_48	1585.68	29.56	2.68	0.05	1487.11	36.29	2.46	0.06
SL_49	1243.02	27.86	2.23	0.05	876.40	22.78	2.31	0.06
SL_50	1467.82	30.01	2.45	0.05	1072.09	25.24	2.55	0.06
SL_51	1390.96	24.99	2.78	0.05	1360.87	28.53	2.86	0.06
SL_52	1474.05	26.84	2.75	0.05	1196.40	26.14	2.75	0.06
SL_53	2084.17	34.44	3.03	0.05	2295.21	43.98	3.13	0.06
SL_54	2451.93	38.00	3.23	0.05	2443.11	45.30	3.24	0.06
SL_55	1949.23	32.16	3.03	0.05	1926.12	38.00	3.04	0.06
SL_56	1508.49	25.81	2.92	0.05	1170.60	24.14	2.91	0.06
SL_57	1914.97	29.67	3.23	0.05	1882.85	35.14	3.21	0.06
SL_58	1704.76	26.44	3.22	0.05	1593.08	29.84	3.20	0.06
SL_59	696.11	10.95	3.18	0.05	780.91	15.29	3.07	0.06
SL_60	600.16	9.29	3.23	0.05	563.21	10.57	3.20	0.06

Compartiment	12 juin 2015				Compartiment	Octobre 2015			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)		Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	2099.07	22.40	3.09	0.03	SL_01	2033.46	18.35	3.21	0.03
SL_02	1538.50	15.96	3.18	0.03	SL_02	2397.46	22.16	3.14	0.03
SL_03	1973.92	19.17	3.40	0.03	SL_03	2501.56	22.94	3.16	0.03
SL_04	2500.95	23.25	3.55	0.03	SL_04	2290.29	19.67	3.38	0.03
SL_05	4028.64	40.49	3.28	0.03	SL_05	3537.76	28.74	3.57	0.03
SL_06	4147.49	44.23	3.09	0.03	SL_06	3583.09	30.76	3.38	0.03
SL_07	4838.12	48.28	3.31	0.03	SL_07	4809.38	42.55	3.28	0.03
SL_08	4666.46	44.58	3.45	0.03	SL_08	5186.10	47.82	3.14	0.03
SL_09	4926.74	44.24	3.68	0.03	SL_09	5821.61	54.47	3.10	0.03
SL_10	4923.74	43.12	3.77	0.03	SL_10	5770.79	54.10	3.09	0.03
SL_11	4868.07	46.98	3.42	0.03	SL_11	5421.52	53.05	2.96	0.03
SL_12	4849.41	50.67	3.16	0.03	SL_12	5023.58	49.47	2.94	0.03
SL_13	4939.10	51.38	3.17	0.03	SL_13	4962.25	48.34	2.98	0.03
SL_14	4877.59	50.95	3.16	0.03	SL_14	4856.20	47.72	2.95	0.03
SL_15	5298.25	56.13	3.11	0.03	SL_15	5402.04	53.98	2.90	0.03
SL_16	4593.72	51.30	2.95	0.03	SL_16	4768.64	50.93	2.72	0.03
SL_17	4245.76	47.45	2.95	0.03	SL_17	4464.07	48.43	2.67	0.03
SL_18	4712.04	51.94	2.99	0.03	SL_18	4823.82	47.91	2.92	0.03
SL_19	5057.41	54.11	3.08	0.03	SL_19	5073.29	47.16	3.12	0.03
SL_20	5295.69	53.65	3.26	0.03	SL_20	5249.52	46.31	3.29	0.03
SL_21	5200.56	53.71	3.20	0.03	SL_21	5120.40	45.59	3.26	0.03
SL_22	5368.56	54.66	3.24	0.03	SL_22	4956.69	43.97	3.27	0.03
SL_23	6388.25	64.89	3.25	0.03	SL_23	5338.46	46.07	3.36	0.03
SL_24	9003.41	107.39	2.77	0.03	SL_24	8092.88	74.91	3.13	0.03
SL_25	7379.82	83.20	2.93	0.03	SL_25	8334.89	79.53	3.04	0.03
SL_26	5212.32	54.24	3.17	0.03	SL_26	5036.98	45.14	3.24	0.03
SL_27	4402.87	49.47	2.94	0.03	SL_27	4375.90	43.77	2.90	0.03
SL_28	5119.32	55.28	3.06	0.03	SL_28	4206.79	41.46	2.94	0.03
SL_29	5281.82	56.62	3.08	0.03	SL_29	4043.11	40.34	2.91	0.03
SL_30	5323.59	58.28	3.01	0.03	SL_30	4738.68	46.43	2.96	0.03
SL_31	5136.66	58.47	2.90	0.03	SL_31	4858.46	50.16	2.81	0.03
SL_32	5034.23	56.48	2.94	0.03	SL_32	4752.19	48.42	2.85	0.03
SL_33	5144.47	56.43	3.01	0.03	SL_33	5179.20	50.56	2.97	0.03
SL_34	4114.33	45.24	3.00	0.03	SL_34	4282.52	42.92	2.89	0.03
SL_35	4095.05	44.51	3.04	0.03	SL_35	4123.87	40.56	2.95	0.03
SL_36	3974.24	42.83	3.06	0.03	SL_36	3918.82	38.86	2.92	0.03
SL_37	4228.04	46.63	2.99	0.03	SL_37	4311.56	44.64	2.80	0.03
SL_38	3260.87	39.97	2.69	0.03	SL_38	3357.84	38.87	2.51	0.03
SL_39	3380.59	38.85	2.87	0.03	SL_39	3234.75	35.22	2.66	0.03
SL_40	4339.28	46.60	3.07	0.03	SL_40	4448.95	41.47	3.11	0.03
SL_41	4072.41	45.75	2.94	0.03	SL_41	3943.94	37.34	3.06	0.03
SL_42	3837.79	44.59	2.84	0.03	SL_42	3925.37	39.17	2.91	0.03
SL_43	3295.31	40.04	2.72	0.03	SL_43	3354.73	36.28	2.68	0.03
SL_44	3063.05	35.51	2.85	0.03	SL_44	3249.23	34.49	2.73	0.03
SL_45	2769.84	33.15	2.76	0.03	SL_45	2822.94	31.26	2.62	0.03
SL_46	2666.38	30.67	2.87	0.03	SL_46	2655.23	28.18	2.73	0.03
SL_47	2891.00	32.52	2.93	0.03	SL_47	2924.33	29.12	2.91	0.03
SL_48	1412.59	17.41	2.68	0.03	SL_48	1515.64	16.01	2.74	0.03
SL_49	830.90	11.73	2.34	0.03	SL_49	913.55	11.05	2.40	0.03
SL_50	1260.14	16.58	2.51	0.03	SL_50	1183.47	14.17	2.42	0.03
SL_51	1400.98	16.26	2.84	0.03	SL_51	1248.40	13.62	2.66	0.03
SL_52	1521.37	18.07	2.78	0.03	SL_52	1548.69	16.76	2.68	0.03
SL_53	2409.64	25.63	3.10	0.03	SL_53	2055.29	19.54	3.05	0.03
SL_54	2317.74	23.51	3.25	0.03	SL_54	2370.94	21.40	3.21	0.03
SL_55	1849.42	20.10	3.04	0.03	SL_55	1744.92	16.12	3.14	0.03
SL_56	1325.77	14.77	2.96	0.03	SL_56				
SL_57	1931.05	19.66	3.24	0.03	SL_57				
SL_58	1504.31	15.76	3.15	0.03	SL_58				
SL_59					SL_59				
SL_60					SL_60				

Compartmentement	Mai 2016				Compartmentement	juin 2016			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)		Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	3054,65	nd	3,06	0,02	SL_01	3671,2267	nd	2,828524	0,03
SL_02	3038,82	nd	3,07	0,02	SL_02	3770,6620	nd	2,838008	0,03
SL_03	3658,20	nd	3,03	0,02	SL_03	3985,1043	nd	3,011171	0,03
SL_04	2960,27	nd	3,13	0,02	SL_04	3143,6607	nd	3,034421	0,03
SL_05	3775,95	nd	3,19	0,02	SL_05	4050,4740	nd	3,026152	0,03
SL_06	3578,78	nd	3,04	0,02	SL_06	3812,4551	nd	3,022184	0,03
SL_07	4354,26	nd	3,12	0,02	SL_07	4673,9862	nd	3,143126	0,03
SL_08	4610,87	nd	3,12	0,02	SL_08	4880,9575	nd	3,192150	0,03
SL_09	5278,18	nd	3,21	0,02	SL_09	5366,9143	nd	3,355349	0,03
SL_10	5295,83	nd	3,26	0,02	SL_10	5118,3723	nd	3,522793	0,03
SL_11	5035,81	nd	3,06	0,02	SL_11	5129,6436	nd	3,068189	0,03
SL_12	4707,43	nd	3,05	0,02	SL_12	4774,8611	nd	3,084336	0,03
SL_13	4710,72	nd	3,00	0,02	SL_13	4776,3513	nd	3,049838	0,03
SL_14	4563,62	nd	2,96	0,02	SL_14	4636,0561	nd	3,024902	0,03
SL_15	5095,28	nd	2,92	0,02	SL_15	5130,7347	nd	2,985850	0,03
SL_16	4656,32	nd	2,72	0,02	SL_16	4613,0544	nd	2,834547	0,03
SL_17	4429,20	nd	2,60	0,02	SL_17	4376,6099	nd	2,737948	0,03
SL_18	4967,57	nd	2,68	0,02	SL_18	4912,2550	nd	2,883042	0,03
SL_19	5392,39	nd	2,81	0,02	SL_19	5259,3914	nd	3,030585	0,03
SL_20	5666,54	nd	2,86	0,02	SL_20	5516,2109	nd	3,017538	0,03
SL_21	5614,32	nd	2,81	0,02	SL_21	5330,0792	nd	2,999662	0,03
SL_22	5740,99	nd	2,91	0,02	SL_22	5011,0947	nd	3,036880	0,03
SL_23	6213,77	nd	3,18	0,02	SL_23	5243,5849	nd	3,050884	0,03
SL_24	9036,17	nd	2,72	0,02	SL_24	7601,2921	nd	2,866281	0,03
SL_25	8231,02	nd	2,91	0,02	SL_25	7576,0182	nd	3,434590	0,03
SL_26	6051,86	nd	3,04	0,02	SL_26	5209,6931	nd	3,485234	0,03
SL_27	4344,63	nd	2,93	0,02	SL_27	4581,8188	nd	3,075893	0,03
SL_28	4733,81	nd	3,07	0,02	SL_28	5104,8986	nd	3,107059	0,03
SL_29	4722,63	nd	3,02	0,02	SL_29	4808,5882	nd	3,048079	0,03
SL_30	4718,33	nd	2,97	0,02	SL_30	4866,5606	nd	3,018958	0,03
SL_31	4798,92	nd	2,92	0,02	SL_31	5030,3230	nd	2,942983	0,03
SL_32	4824,63	nd	2,88	0,02	SL_32	4968,6792	nd	2,903996	0,03
SL_33	5053,85	nd	2,94	0,02	SL_33	5112,1257	nd	2,960822	0,03
SL_34	4053,58	nd	2,72	0,02	SL_34	3989,8471	nd	2,701501	0,03
SL_35	4053,58	nd	2,63	0,02	SL_35	4105,3014	nd	2,602014	0,03
SL_36	3723,48	nd	2,57	0,02	SL_36	3841,0899	nd	2,532219	0,03
SL_37	4298,97	nd	2,64	0,02	SL_37	4379,7886	nd	2,679618	0,03
SL_38	3679,47	nd	2,43	0,02	SL_38	3748,0061	nd	2,503043	0,03
SL_39	3911,86	nd	2,51	0,02	SL_39	3934,8538	nd	2,526356	0,03
SL_40	4722,18	nd	2,74	0,02	SL_40	4543,2287	nd	2,844333	0,03
SL_41	4630,58	nd	2,80	0,02	SL_41	4435,3641	nd	2,906930	0,03
SL_42	4687,85	nd	2,83	0,02	SL_42	4461,2411	nd	2,883131	0,03
SL_43	3902,39	nd	2,86	0,02	SL_43	3747,1613	nd	2,918509	0,03
SL_44	3591,67	nd	2,81	0,02	SL_44	3475,1562	nd	2,831915	0,03
SL_45	3051,90	nd	2,69	0,02	SL_45	3267,1466	nd	2,742643	0,03
SL_46	2918,52	nd	2,74	0,02	SL_46	3074,9214	nd	2,819787	0,03
SL_47	3213,56	nd	2,90	0,02	SL_47	2752,4124	nd	2,910173	0,03
SL_48	2155,36	nd	2,76	0,02	SL_48	1244,3705	nd	2,558959	0,03
SL_49	1299,14	nd	2,44	0,02	SL_49	1226,2273	nd	2,254219	0,03
SL_50	1361,71	nd	2,53	0,02	SL_50	1304,0419	nd	2,540061	0,03
SL_51	1501,36	nd	2,75	0,02	SL_51	1405,4944	nd	2,749671	0,03
SL_52	1486,08	nd	2,71	0,02	SL_52	1582,1010	nd	2,672107	0,03
SL_53	2616,11	nd	2,87	0,02	SL_53	2678,9887	nd	3,021609	0,03
SL_54	2383,57	nd	3,17	0,02	SL_54	2237,8434	nd	3,127445	0,03
SL_55	2142,81	nd	3,03	0,02	SL_55	1796,7882	nd	2,947971	0,03
SL_56	1734,43	nd	2,95	0,02	SL_56	1345,6590	nd	2,904007	0,03
SL_57	2068,17	nd	3,13	0,02	SL_57	2057,7289	nd	3,156171	0,03
SL_58					SL_58				

État de référence topographique de la plage de Sainte-Luce dans le cadre d'un projet de recharge en sédiments grossiers

**Rapport technique remis
à la municipalité de Sainte-Luce**

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.

Février 2015



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



Direction et rédaction

Pascal Bernatchez, Ph.D.

Université du Québec à Rimouski

Département de biologie, chimie et géographie

Titulaire Chaire de recherche en géoscience côtière

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

300, allée des Ursulines, case postale 3300

Rimouski (Québec) G5L 3A1

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

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

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

Équipe de recherche

Stéfanie Van-Wierts, M. Sc., candidate au doctorat en sciences de l'environnement, LDGIZC, UQAR

Levé LiDAR, traitement et rédaction

Louis Cormier, B.Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR

Levé LiDAR

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

Assistant de terrain

Susan Drejza, M. Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Assistante de terrain

Steeve Dugas, B.Sc., professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR

Assistant de terrain

Mathilde Lapointe Saint-Pierre, étudiante au baccalauréat en biologie, UQAR

Assistante de terrain

Gabriel Ladouceur, étudiant au baccalauréat en géographie, UQAR

Assistant de terrain

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Bernatchez, P., Van-Wierts, S. (2015) État de référence topographique de la plage de Sainte-Luce dans le cadre d'un projet de recharge en sédiments grossiers. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis à la municipalité de Sainte-Luce, février 2015, 26 p + annexes.

Photographie et image de la page de couverture : LDGIZC UQAR

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux	v
1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.2 Présentation du rapport	1
2. Description du site d'étude	2
3. Instrumentation.....	2
3.1 Système mobile de laser terrestre	2
3.2 GPS-différentiel.....	5
4. Acquisition des données	5
4.1 Périodes de levé	5
4.2 Équipe de terrain.....	6
4.3 Contrôle de la qualité des données LiDAR	6
5. Traitement des données	8
5.1 Calibration du SMLT.....	9
5.2 Correction des traces GPS.....	9
5.3 Extraction des images.....	9
5.4 Classification des points LiDAR	10
5.5 Modèles numériques d'élévation.....	11
5.6 Contours topographiques	11
6. Changements topographiques de l'estran.....	11
6.1 Volume sédimentaire de l'estran.....	12
6.1.1 Volume sédimentaire pour chaque levé selon les secteurs	13
6.1.2 Changements topographiques sur l'estran à 3 dates différentes	14
6.2 Profils topographiques générés à partir des surfaces LiDAR.....	22

7. Données fournies à la municipalité.....	24
8. Conclusion	25
Références	26
Annexe 1	27
Annexe 2	31
Annexe 3	35

Liste des figures

Figure 1. Localisation du site d'étude de l'anse aux Coques.....	2
Figure 2. Capteurs et instruments du SMLT	3
Figure 3. Récepteur Trimble R8 (A. récepteur de base; B. radio UHF).....	5
Figure 4. Période d'acquisition et niveau d'eau prédit pour le marégraphe de Pointe-au-Père.....	6
Figure 5. Points de validation (A. infrastructures permanentes et semi-permanentes; B. PVC).....	7
Figure 6. Synthèse méthodologique du traitement de données LiDAR.....	8
Figure 7. Filtre manuel par classification des objets sur la plage.....	10
Figure 8. Exemple de changements topographiques devant un émissaire pluvial avant la recharge le 11 août 2014 et après la recharge le 23 octobre 2014	12
Figure 9. Aperçu du volume calculé entre la surface LiDAR et le niveau de référence pour une tranche 2D de l'estran	13
Figure 10. Volume de sédiments sur l'estran calculé sur les surfaces LiDAR.....	14
Figure 11. Variabilité du volume sédimentaire selon les périodes d'acquisition et les secteurs	14
Figure 12. Changements topographiques de l'estran pour les 3 levés d'acquisition	15
Figure 13. Changements topographiques du secteur A entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014	17
Figure 14. Changements topographiques du secteur A entre le 21 septembre 2012 et le 23 octobre 2014	19
Figure 15. Changements topographiques du secteur A entre le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014	21
Figure 16. Localisation des profils topographiques générés sur les surfaces LiDAR.....	22
Figure 17. Exemple de l'évolution d'un profil devant la recharge en sédiments (profil SL-22)	23
Figure 18. Exemple de l'évolution d'un profil du côté est de l'anse (profil SL-45)	23
Figure 19. Arborescence des dossiers fournis à la municipalité de Sainte- Luce.....	234

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres techniques du capteur laser Riegl VQ-250.....	4
Tableau 2. Erreur de positionnement en mètre des points LiDAR pour chacun des levés.....	7
Tableau 3. Volume de sédiments sur l'estran calculé sur les surfaces LiDAR.....	13

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Dans le cadre d'un projet de recharge en sédiments grossiers de la plage de l'anse aux Coques à Sainte-Luce-sur-Mer, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques exige de la municipalité de procéder à un suivi environnemental permettant d'effectuer des mesures précises et récurrentes de la topographie de la plage pour évaluer les impacts potentiels de l'intervention et son efficacité à contrer l'érosion.

La municipalité de Sainte-Luce et le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski ont développé un partenariat de recherche pour réaliser un suivi géomorphologique de la plage à haute résolution spatiale sur l'ensemble du site de l'anse aux Coques à Sainte-Luce. La première phase du projet visait à établir l'état de référence topographique à l'aide d'un LiDAR terrestre avant et après les travaux de recharge de la plage. Un levé a été réalisé le 11 août 2014, soit quelques semaines avant la recharge, et un autre le 23 octobre 2014, soit la journée suivant les travaux. Le LDGIZC avait aussi réalisé un levé le 21 septembre 2012 qui sera intégré à l'analyse.

1.2 Présentation du rapport

Ce premier rapport technique vise à présenter les relevés effectués pour établir l'état de référence topographique et les produits dérivés qui seront transférés à la municipalité de Sainte-Luce. Après avoir présenté le système et les instruments utilisés pour établir la topographie à haute résolution spatiale de la plage, la méthode d'acquisition des données et les mesures mises en place pour contrôler la qualité des données sont détaillées. Ensuite, une description des méthodes de traitement des données et des produits dérivés est effectuée. Enfin, une brève description des changements morphologiques entre les trois relevés est présentée. Il est à noter qu'un rapport de recherche présentant une analyse des changements morphologiques est prévu en mars 2016 après la première année de suivi.

2. Description du site d'étude

Le site d'étude se situe sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, dans la municipalité de Sainte-Luce dans la région du Bas-Saint-Laurent. Le secteur à l'étude est l'anse aux Coques, entre le quai et la pointe est de l'anse sur une distance d'environ 3 km linéaire (figure 1). La zone littorale de l'anse est caractérisée par une plage de sable et gravier formant le haut estran. La surface du bas estran est composée de sable plutôt fin avec quelques blocs et galets épars. Le bas estran est caractérisé par des cordons sableux généralement parallèles au rivage. À la limite des basses mers, on retrouve aussi de nombreux cailloux, héritage de l'érosion des argiles de la Mer de Goldthwait, ce qui est typique des bas estrans de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Dionne, 2007). Sur la pointe aux Coques, la plage est plutôt étroite et le substrat meuble est quasi absent alors qu'une plate-forme rocheuse forme le bas estran. Un affleurement rocheux est aussi visible à l'extrémité est de l'anse sur le bas estran.

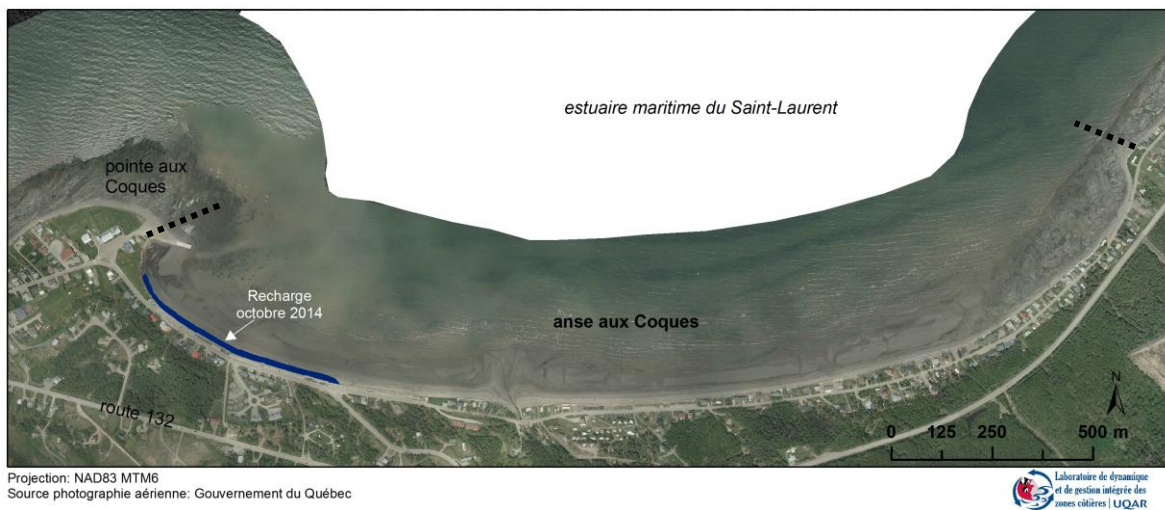


Figure 1. Localisation du site d'étude de l'anse aux Coques

3. Instrumentation

3.1 Système mobile de laser terrestre

Les relevés topographiques ont été réalisés avec un système mobile de laser terrestre (SMLT). Ce système a été développé au Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR. Le SMLT est constitué de trois composantes principales : un balayeur laser, un système de navigation inertiel GPS-INS (composé d'un IMU et d'un récepteur GPS) et une caméra (figure 2). Le balayeur laser est un Riegl VQ-250. Pour que le système inertiel

mesure les mouvements des autres capteurs (laser et caméra), les instruments sont fixés sur une structure en aluminium dans la boîte arrière du véhicule (figure 2). Les capteurs sont branchés à un ordinateur-serveur ainsi qu'à un multiplexeur Trimble M119 où converge l'information des différents instruments vers la plate-forme d'acquisition. Les logiciels d'enregistrement utilisés sont T3D CAM Capture et T3D Laser Capture. Le logiciel d'acquisition GPS-INS est le LV POS View d'Applanix.



Figure 2. Capteurs et instruments du SMLT

Le capteur laser Riegl VQ-250 à miroir rotatif est installé à l'extrémité arrière du véhicule sur une plate-forme fixe en aluminium. Ces paramètres techniques sont présentés au tableau 1. La fréquence de balayage utilisé est de 100 hertz permettant l'acquisition de 300 000 points par seconde à une vitesse du véhicule variant entre 10 et 40 km/h. Le capteur est positionné avec un angle de tangage de $17,58^\circ$, un angle de lacet de $157,28^\circ$ et un angle de roulis quasi nul de $-0,31^\circ$ afin de maximiser l'angle de balayage qui est de 360° . La hauteur d'acquisition correspond à la hauteur approximative du balayeur par rapport au sol, soit environ 2 m. Une caméra est utilisée en complément au capteur laser afin d'aider à l'interprétation du nuage de

points. La caméra couleur vidéographique PointGrey Grasshopper GRAS-50S5C-C à capteur CCD est d'une résolution de 2448 par 2048. Elle est installée à un angle de 90,8° en lacet et de -2,8° en roulis du côté arrière droit du véhicule. Sa vitesse est programmée pour acquérir une trame à tous les trois mètres.

Tableau 1. Paramètres techniques du capteur laser Riegl VQ-250

Paramètres techniques	
Longueur d'onde	0.9 μm
Angle de balayage	360 °
Hauteur d'acquisition	2 m
Exactitude	10 mm
Vitesse d'acquisition	100 scan/sec
Acquisition	300 000 pts/sec

Pour enregistrer les mouvements et la position du véhicule, le système de navigation inertiel GPS-INS installé sur le véhicule est le POS-LV 220 du manufacturier Applanix. Ce système est composé du récepteur GPS, de deux antennes GPS Trimble Zephyr model 2, d'une centrale inertielle (IMU) et d'un instrument de mesure de distance (DMI). Les données GPS brutes sont enregistrées dans un petit ordinateur appelé *POS System Computer* (PSC). Pour corriger la trajectoire du système de navigation mobile par post-traitement des données GPS-INS, un récepteur de base statique Trimble R8 est positionné sur un point géodésique connu. Le point géodésique utilisé pour le levé à Sainte-Luce est le 99K0104. L'utilisation de cette base sur un point connu contribue à l'amélioration de la précision du système (figure 3 A). Deux antennes (une primaire et une secondaire) sont installées sur le véhicule à deux mètres de distance. La distance entre les deux antennes est utilisée par le système GAMS (*GNSS Azimuth Measurement Subsystem*) afin d'augmenter la précision des données associées à la direction horizontale (azimut). La position exacte de l'antenne primaire par rapport au centre de phase de l'IMU est connue ainsi que la distance entre l'antenne primaire et la secondaire. La présence de la deuxième antenne permet de corriger les données GPS même si le véhicule est arrêté ou qu'il avance lentement. La centrale inertielle permet de corriger les angles de tangage, de roulis et de lacet. Un DMI génère un certain nombre de pulsations à chaque rotation de la roue qu'il multiplie par un facteur d'échelle pour convertir les pulsations en distance parcourue en mètre. Le DMI est utilisé pour augmenter la précision du système ainsi qu'assurer la correction des données lors d'une courte perte de signal GPS.

3.2 GPS-différentiel

Le GPS-différentiel utilisé est le récepteur Trimble R8 GNSS Modèle 3 incluant un émetteur/récepteur radio UHF interne de 430-450 MHz (figure 3A). Une radio Trimble HPB 430-450 MHz est utilisée en mode répéitrice, permettant de s'éloigner de 8 à 12 km de la base, selon les conditions météorologiques et les particularités topographiques du secteur (figure 3B). Pour le levé à Sainte-Luce, la radio a été placée sur le quai, à environ 750 m de la station de base positionnée sur le point géodésique 99K0104. Le récepteur permet la poursuite des constellations GPS L2C et L5, GLONASS L1 et L2 ainsi que GALILEO (satellites expérimentaux GIOVE-A et GIOVE-B) autant pour le récepteur de base que pour le mobile. Le carnet d'acquisition utilisé est le TSC3. Lors des relevés, le GPS-différentiel est utilisé en deux modes distincts, *RTK* et *enregistrement*. Le mode *RTK* est utilisé pour les points de contrôle et permet la correction en temps réel. Le temps d'acquisition de chaque point est de 5 secondes. Les fichiers sont ensuite téléchargés directement en fichiers de forme (*shapefiles*) compatibles au logiciel ArcGIS. Le mode *enregistrement* est utilisé pour créer le fichier d'observation de la base du SMLT. Le fichier sortant est de type T02 et est transformé en format RINEX pour être utilisé dans le logiciel de post-traitement POSPAC MMS 7.0.

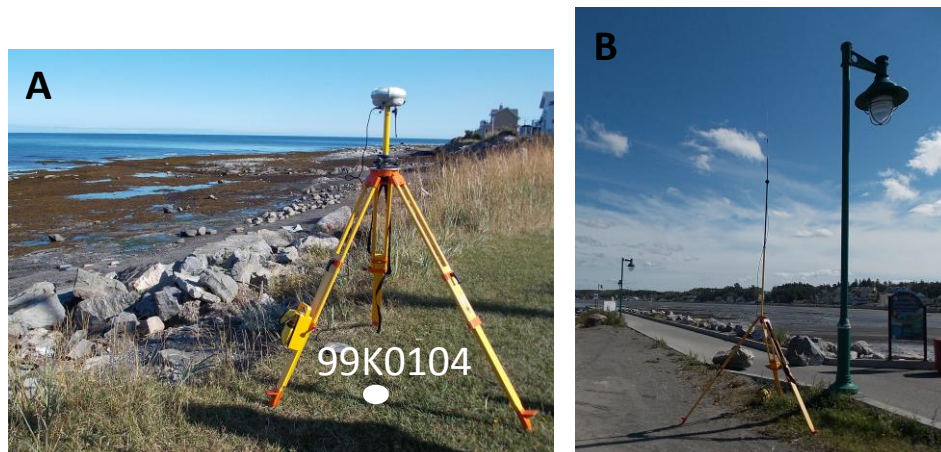
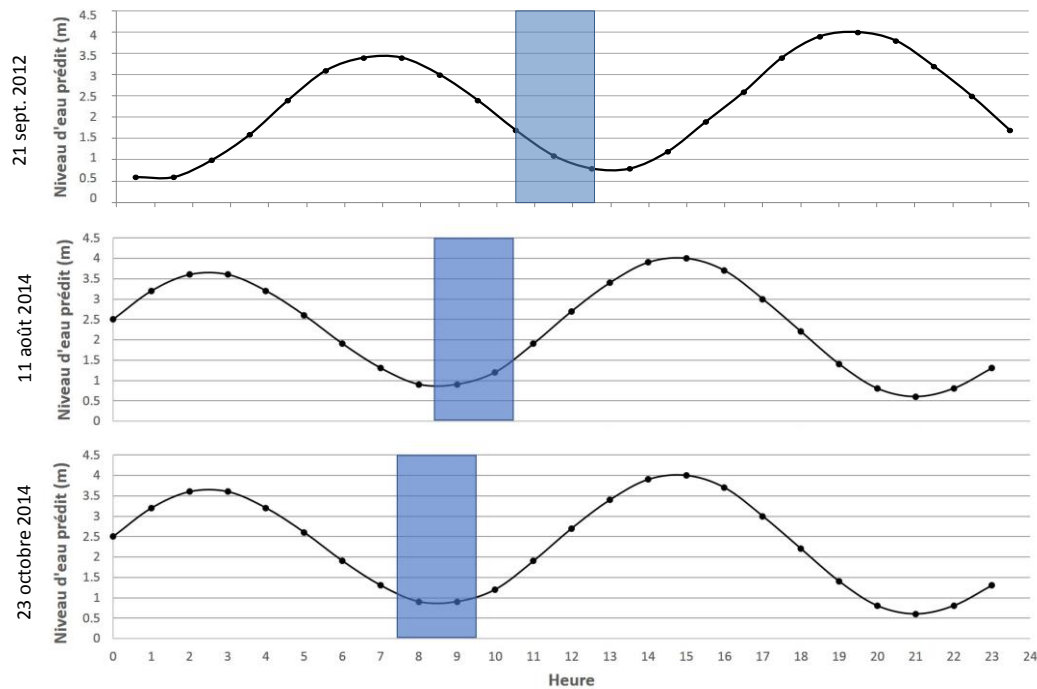


Figure 3. Récepteur Trimble R8 (A. récepteur de base; B. radio UHF)

4. Acquisition des données

4.1 Périodes de levé

Pour chaque levé, la prise de données s'est étendue sur une période de 2 heures, lors de la marée basse. La figure 4 montre la période de levé (rectangle bleu) et le niveau d'eau prédit pour le marégraphe de Pointe-au-Père pour les journées du 21 septembre 2012, le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014. Autant que possible, les levés sont effectués lors des marées de vives-eaux. Les fiches de métadonnées des 3 levés sont présentées en annexe 1.



Source des données : MPO (2015)

Figure 4. Période d’acquisition et niveau d’eau prédit pour le marégraphe de Pointe-au-Père

4.2 Équipe de terrain

Le levé sur le terrain nécessite une équipe de quatre personnes. Deux personnes sont en charge du levé LiDAR à bord du SMLT. Une personne s’occupe de la conduite du véhicule et une autre du fonctionnement des instruments. Les deux autres personnes sont en charge du D-GPS et de la prise des points de contrôle sur les cibles et les infrastructures existantes.

4.3 Contrôle de la qualité des données LiDAR

Le contrôle de qualité des données LiDAR est effectué en calculant l’erreur de positionnement du nuage de points LiDAR. Pour cela, une multitude de points de contrôle sont pris à l’aide d’un D-GPS RTK R8 de Trimble. Deux catégories de points sont acquises, sur des infrastructures déjà existantes permanentes ou semi-permanentes (figure 5 A) et sur des cibles carrées fabriquées en PVC installées par l’équipe de l’UQAR (figure 5 B). Sur les infrastructures, le point est pris sur un coin ayant un droit qu’il sera facile de repérer ensuite sur le nuage de points LiDAR en 3D, notamment des coins de ponceau, des coins de marche d’escalier, des coins de murs de protection, etc. Pour chaque cible, huit points sont pris, deux sur les coins supérieurs du PVC, deux sur le sol à l’intérieur du carré et quatre sur le sol à l’extérieur du carré. Les points acquis au DGPS sont ensuite comparés aux points LiDAR afin de valider la calibration effectuée précédemment. Le nombre de points varie selon les levés. Le

21 septembre 2012, 129 points de contrôle ont été pris sur l'ensemble du site d'étude. En 2014, une quantité moindre de points a été prise, soit 23 points le 11 août 2014 et 38 points le 23 octobre 2014, ce qui est tout à fait suffisant pour effectuer un excellent contrôle de qualité des levés LiDAR sur un site d'étude de 3 km linéaires.

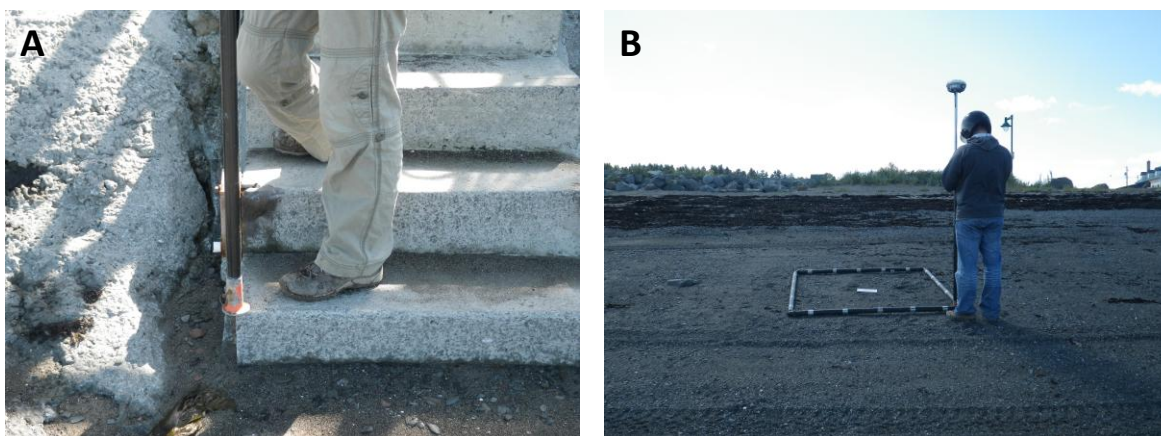


Figure 5. Points de validation (A. infrastructures permanentes et semi-permanentes; B. PVC)

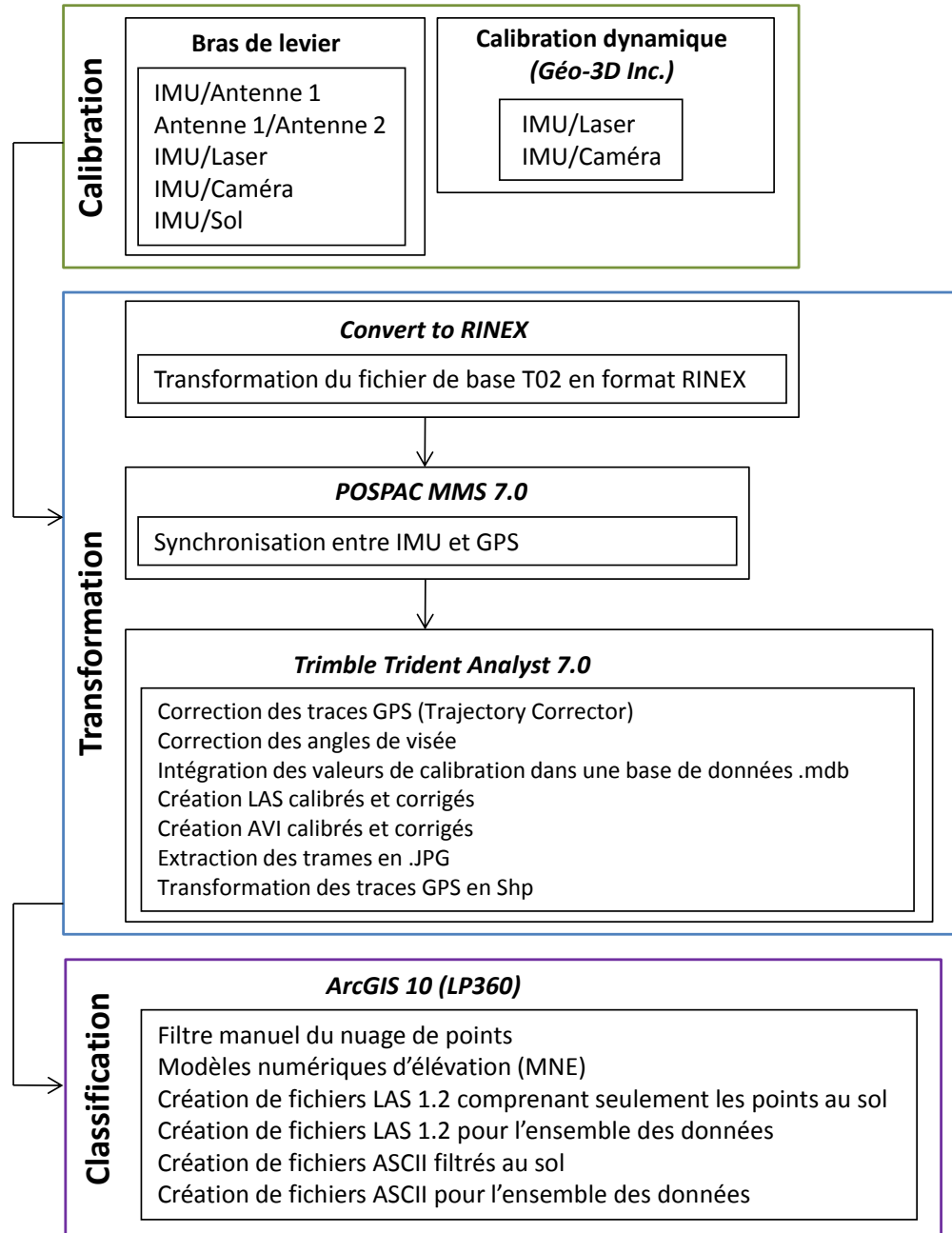
Le contrôle de qualité des données LiDAR est essentiel puisque l'ensemble des résultats topographiques est généré à partir de ces données. Chacun des points de contrôle acquis au D-GPS a été comparé verticalement (Z) et horizontalement (XY) avec les points correspondants sur le nuage de points LiDAR. Le tableau 2 montre l'erreur en Z et en XY associé à chacun des levés. Pour chacun, la moyenne et l'écart-type sont présentés. En somme, l'erreur est assez semblable pour l'ensemble des levés, la variabilité peut être associée à la calibration et à la réception GPS. L'erreur moyenne entre les relevés est de 4 à 5 cm en XY et de 1 à 4 cm en Z ce qui est excellent. En annexe 2, des figures présentent les résultats pour chacun des points de contrôle utilisés pour calculer l'erreur.

Tableau 2. Erreur de positionnement en mètre des points LiDAR pour chacun des levés

	Nb points	XY		Z	
		Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Septembre 2012	129	0,04	0,02	0,01	0,02
Août 2014	23	0,05	0,02	0,04	0,03
Octobre 2014	38	0,05	0,03	0,02	0,03

5. Traitement des données

Le traitement des données du SMLT est effectué en trois grandes étapes; la calibration, la transformation et la classification. Le schéma de la figure 6 est une synthèse de la méthodologie utilisée lors du traitement et chacune des grandes étapes est expliquée ensuite.



Source : Modifié de Van-Wierts (2012)

Figure 6. Synthèse méthodologique du traitement de données LiDAR

5.1 Calibration du SMLT

La calibration du système a été effectuée en juillet 2011 par la firme Géo-3D Inc (Trimble Canada). La première étape est de mesurer précisément les bras de levier (distance entre chaque capteur) et intégrer les valeurs dans le logiciel d'acquisition LV POS View ainsi que dans la base de données mdb de CAM Capture. La calibration dynamique est la méthode utilisée pour le capteur laser ainsi que pour la caméra. Cette méthode consiste à effectuer un levé dans un lieu où des sphères réfléchissantes sont installées au sol et où un site de calibration avec des points de contrôle qui ont été parfaitement géopositionnés à l'avance. Des clips d'acquisition sont récoltés dans toutes les directions au travers du réseau de sphères. Les données du GPS sont ensuite corrigées par la station de référence GPS permanente de Montréal du ministère sur l'Énergie et les ressources naturelles du Québec. Le post-traitement de la calibration s'effectue dans l'extension *Laser Calibration* du logiciel Trident 4.6 de Géo-3D Inc (Trimble Canada). Tout d'abord, les sphères sont détectées à partir de la réflectivité. Ensuite, l'application trouve les angles idéaux en roulis, tangage et lacet pour reformer les sphères le plus parfaitement possible. Les nuages de points de 2 levés en sens inverse sont aussi utilisés pour vérifier les angles d'acquisition. Une fois ce calibrage relatif terminé, les angles trouvés sont appliqués à un clip qui a traversé le site de calibration et la précision obtenue est validée en absolu à partir des points de contrôle. Les angles obtenus par cette calibration sont ensuite réutilisés pour l'ensemble des levés du SMLT. Avant chaque levé, une calibration dynamique de vérification est réalisée sur des points de contrôle à l'UQAR afin d'assurer une bonne qualité des données. Chacun des angles de visée est vérifié afin de compenser pour les variations du véhicule (changements mécaniques, pression des pneus, etc.) et pour le déplacement des instruments s'il y a lieu.

5.2 Correction des traces GPS

Au début de l'étape de transformation des données, le fichier de la base du DGPS Trimble R8 doit être transformé en format RINEX. Dans le logiciel POSPAC MMS 7.0, le fichier de base et les fichiers du POS LV220 sont intégrés afin de les synchroniser et de corriger les données mobiles avec la base par post-traitement pour en sortir une solution corrigée. Le décalage UTC (*UTC offset*) de 16 secondes est intégré à la solution de traitement. La solution de correction est ensuite appliquée sur les fichiers LiDAR dans le logiciel Trident 7.0 par l'outil *Trajectory Corrector*. Pour transformer l'altitude ellipsoïdale en altitude orthométrique, le modèle de géoïde HT2.0 est ensuite appliqué. La projection définie aux fichiers LiDAR est NAD83 MTM6.

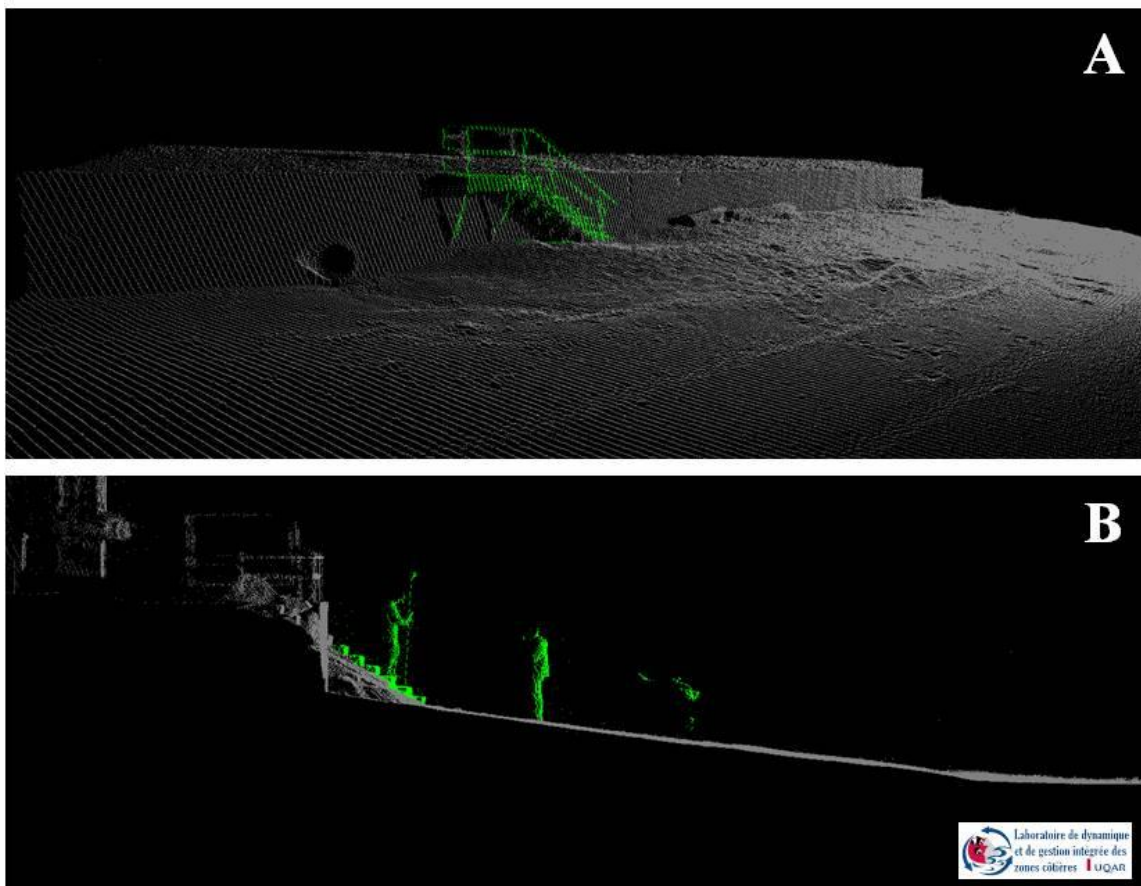
5.3 Extraction des images

Lors du levé LiDAR, une vidéographie géoréférencée est acquise. Pour ce projet, chacune des trames de la vidéo est extraite en format d'image jpg pour chaque clip d'acquisition. Associé à chaque clip, un shapefile de points de la ligne GPS correspondante a été créé, où chaque point correspond à une trame. Pour chaque point, la table d'attributs contient l'information

nécessaire pour trouver l'image correspondante dans le dossier attribué. L'information est : le nom de la trame, sa position XYZ, le temps GPS correspondant. Pour chaque clip, le nom des images jpg recommence à 0. Les fichiers sont disponibles avec les données fournies avec ce rapport dans le dossier « Images ».

5.4 Classification des points LiDAR

Une classification manuelle des points est réalisée afin d'exclure les éléments qui ne sont pas au sol. Cette étape s'effectue dans l'extension LP360 de QCoherent utilisée dans le logiciel ArcGIS. La figure 7 montre un exemple où des êtres humains et différentes structures anthropiques telles que des escaliers ont été classifiés. Lorsque tous les objets ne faisant pas partie de l'estran ont été classifiés, un nuage de points contenant seulement les points au sol est exporté. La limite inférieure ne correspond pas à la limite de l'estran, mais plutôt à la limite de la présence de points LiDAR.



Source : Van-Wierts et Bernatchez, 2012

Figure 7. Filtre manuel par classification des objets sur la plage

5.5 Modèles numériques d'élévation

Pour chacun des levés LiDAR effectués, un modèle numérique d'élévation (MNE) est généré à une résolution spatiale de 0,20m. Ces modèles numériques sont des surfaces topographiques qui facilitent l'utilisation des données LiDAR pour extraire des résultats, notamment pour le calcul du volume sédimentaire. L'extension *LP360* de QCoherent utilisée dans le logiciel ArcGIS permet d'exporter les fichiers de points LAS 1.2 en surfaces topographiques. La classification effectuée à l'étape précédente (section 5.4) est appliquée afin que seulement les données au sol soient utilisées pour constituer la surface topographique. Les modèles numériques d'élévation sont disponibles avec les données fournies avec ce rapport dans le dossier LiDAR (surface).

5.6 Contours topographiques

Pour chacun des levés LiDAR effectués, des contours topographiques à une résolution de 0,20 m ont été générés à partir des modèles numériques d'élévation. Les contours ont été générés à partir de l'outil *Contour – Raster Surface* de l'extension *3D Analyst* de ArcGIS. Les shapefiles des contours sont disponibles avec les données fournies avec ce rapport dans le dossier « Contours topographiques ».

6. Changements topographiques de l'estran

Cette section présente la méthodologie pour quantifier les changements topographiques de l'estran et brièvement les résultats préliminaires issus des principales données fournies dans le cadre de ce rapport. La variabilité topographique de l'estran est quantifiée à partir de deux principaux jeux de données, soit les modèles numériques de terrain (MNE) générés à partir des données LiDAR ainsi que les profils topographiques générés sur les MNE. La figure 8 est un exemple de visualisation 3D du changement topographique devant un émissaire pluvial avant la recharge en sédiments le 11 août 2014 et après la recharge le 23 octobre 2014. Deux autres exemples 3D sont présentés à l'annexe 3.



Figure 8. Exemple de changements topographiques devant un émissaire pluvial avant la recharge le 11 août 2014 et après la recharge le 23 octobre 2014

6.1 Volume sédimentaire de l'estran

La figure 9 montre le volume qui est calculé entre la surface LiDAR et un niveau de référence pour une coupe transversale de l'estran. Le niveau de référence utilisé pour le calcul du volume est -1,58 m, ce qui équivaut au niveau des basses mers moyennes (BMM) à la station marégraphique de Pointe-au-Père (#2980). Le volume est calculé à l'aide de l'extension *3D Analyst* de ArcGIS. Deux types de résultats de volume sont présentés, d'abord le volume total pour chacun des secteurs et ensuite le volume par m^2 qui correspond au volume total du secteur divisé par la superficie de sa surface. Pour le calcul du volume sédimentaire, le site d'étude a été divisé en trois secteurs définis d'environ 1 km linéaire afin que le volume soit comparé sur des surfaces équivalentes. Cette séparation permet aussi de mieux évaluer l'impact de la recharge en sédiments grossiers sur la variabilité de l'estran à proximité de

celle-ci. Les secteurs sont identifiés sur la carte de la figure 10. Le volume a été calculé à partir des modèles numériques d'élévation générés avec les données LiDAR à une résolution spatiale de 0,20 m (section 5.5).

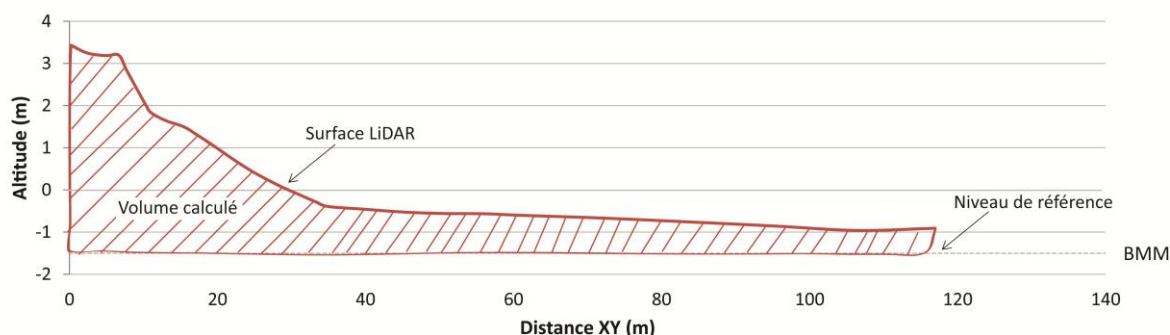


Figure 9. Aperçu du volume calculé entre la surface LiDAR et le niveau de référence pour une tranche 2D de l'estran

6.1.1 Volume sédimentaire pour chaque levé selon les secteurs

Le tableau 3 présente le volume sédimentaire calculé pour chaque secteur de l'anse aux Coques selon la date d'acquisition.

Tableau 3. Volume de sédiments sur l'estran calculé sur les surfaces LiDAR

	Secteur A			Secteur B			Secteur C		
	Sept. 2012	Août 2014	Octobre 2014	Sept. 2012	Août 2014	Octobre 2014	Sept. 2012	Août 2014	Octobre 2014
Volume total	154466	154832	169334	163103	165090	169698	162575	165086	170535
Volume/m ²	1.40	1.40	1.53	1.56	1.58	1.59	1.74	1.77	1.83

La carte de la figure 10 illustre les volumes sédimentaires présentés au tableau 3. L'encadré de gauche montre le volume total calculé par secteur et l'encadré de droite montre le volume calculé en fonction de la superficie des secteurs. Pour les trois secteurs, les graphiques montrent une légère accumulation entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014 ainsi que pendant la courte période entre le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014. Le 23 octobre 2014, le volume de sédiments a considérablement augmenté dans le secteur A en raison de la recharge en sédiments grossiers effectuée dans ce secteur.

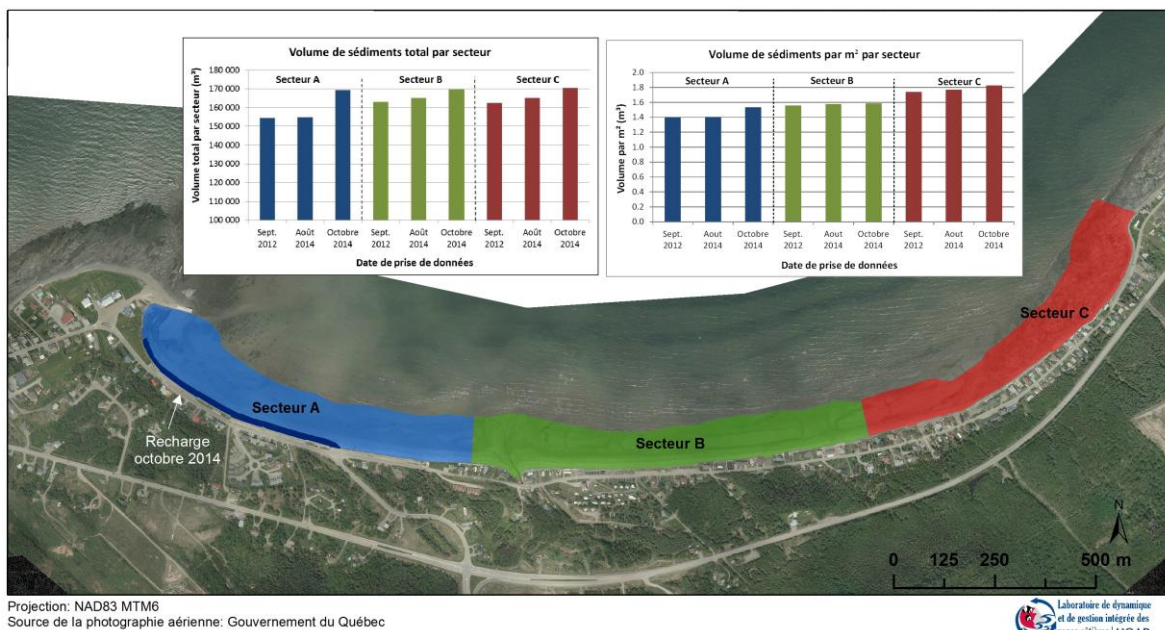


Figure 10. Volume de sédiments sur l'estran calculé sur les surfaces LiDAR

6.1.2 Changements topographiques sur l'estran à 3 dates différentes

Pour les trois périodes, l'ensemble du site d'étude présente un bilan sédimentaire positif (figure 11). Pour la période entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014, l'accumulation est estimée à $4\,865\,m^3$ pour l'ensemble de l'anse couverte par les données Lidar. Dans la courte période de temps entre le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014, soit la période où a eu lieu la recharge dans le secteur A, l'anse présente un bilan positif avec une augmentation de volume de $24\,558\,m^3$. Enfin, entre le premier levé effectué le 21 septembre 2012 et le dernier levé effectué le 23 octobre 2014, la différence du volume est d'une augmentation de $29\,423\,m^3$.

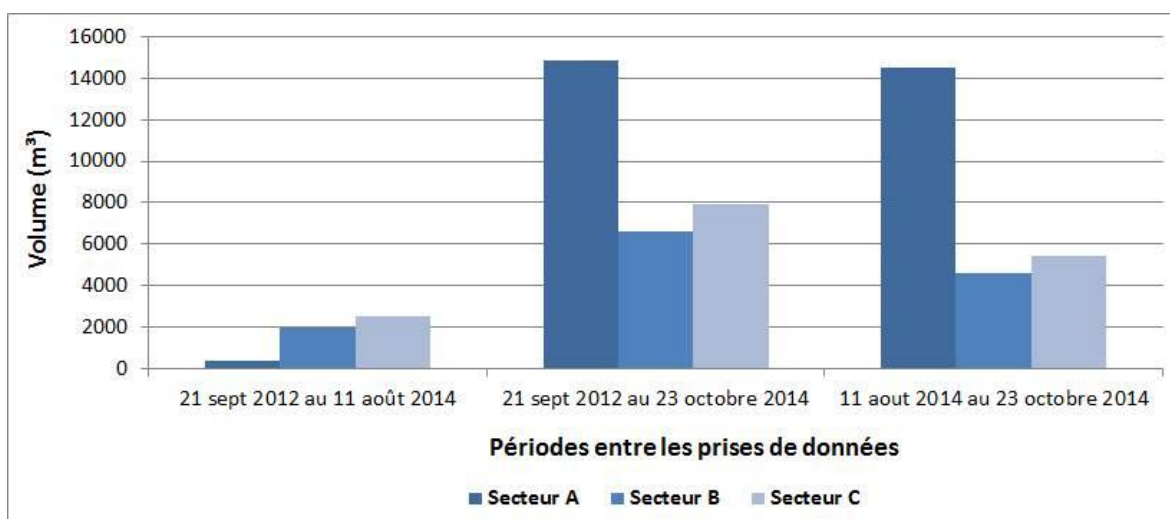


Figure 11. Variabilité du volume sédimentaire selon les périodes d'acquisition et les secteurs

Les changements topographiques de l'estran ont été calculés par une soustraction entre deux modèles d'élévation numérique. L'outil *Minus* de l'extension *Spatial Analyst* de ArcGIS a été utilisé pour effectuer le traitement. Les changements topographiques de l'estran sont présentés à la figure 12 pour les 3 périodes de comparaison. Les surfaces en bleu présentent des zones d'accumulation alors que les surfaces en rouge présentent des zones d'érosion.

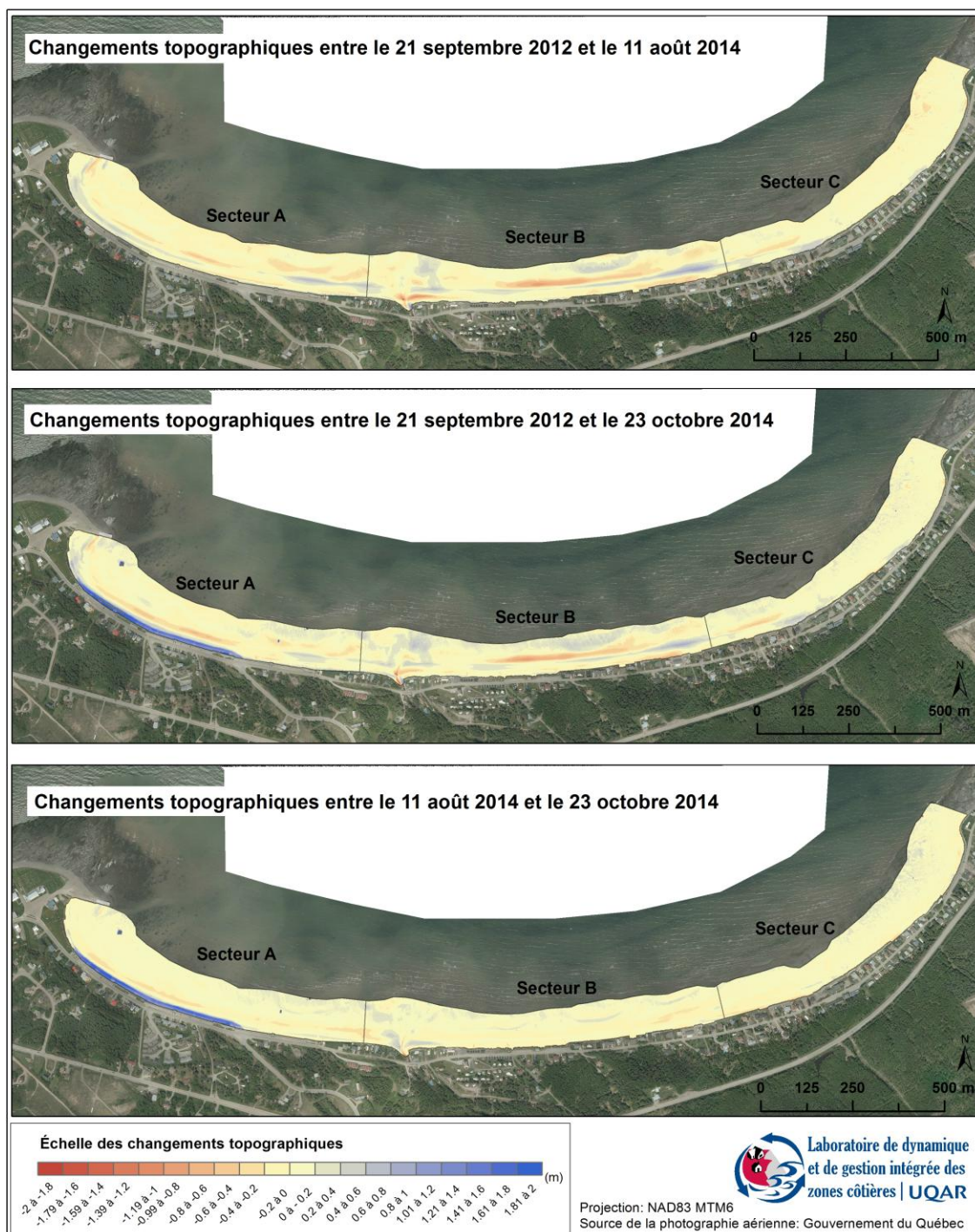


Figure 12. Changements topographiques de l'estran pour les 3 levés d'acquisition

6.1.2.1 Période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014

Pour la période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014, les changements topographiques du secteur A montrent une zone d'accumulation sur le haut estran devant le muret, à l'emplacement où il y a eu une recharge en sédiments grossiers en octobre 2014 (figure 13). Par contre, devant cette zone, une zone d'érosion linéaire est visible sur le bas estran, près de la limite de la flexure de la plage. Une zone d'accumulation est aussi visible à l'extrémité est du secteur sur l'ensemble du haut estran. Il est aussi possible d'observer quelques zones d'érosion, notamment sur le bas estran où des cordons sableux semblent avoir migré entre les deux levés. De manière générale, il semble y avoir eu un transfert de sédiments du bas estran vers le haut estran entre les deux périodes. Dans l'ensemble du secteur A, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à 366 m³.

Le secteur B présente les plus grands changements morphologiques de la zone d'étude pour la période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014. Il est possible d'observer deux principales zones d'érosion. L'une est localisée au niveau de l'exutoire d'un ruisseau qui en migrant latéralement provoque l'érosion du haut de plage. L'autre s'étend sur une zone d'environ 500 mètres linéaires sur le bas estran immédiatement au bas de la flexure de la plage. Cette dernière zone d'érosion est bordée par une accumulation sur la partie inférieure de la plage. On constate aussi la formation d'un banc d'accumulation sur le bas estran. En aval de l'exutoire du ruisseau, une zone d'accumulation sur le bas estran et une zone de faible érosion se partagent l'espace en fonction de la dynamique du ruisseau. Dans l'ensemble du secteur B, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à 1 988 m³.

Le secteur C présente peu de variations morphologiques. Une mince couche de sédiments s'est accumulée entre les deux levés sur pratiquement l'ensemble du secteur. La section la plus à l'ouest est plus variable, une zone d'érosion est visible à la limite entre le haut et le bas estran et le haut estran est caractérisé par une accumulation plus importante. Quelques petites zones d'érosion sont aussi visibles sur le bas estran à l'extrémité est du secteur. Dans l'ensemble du secteur C, le bilan sédimentaire pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à 2 511 m³.

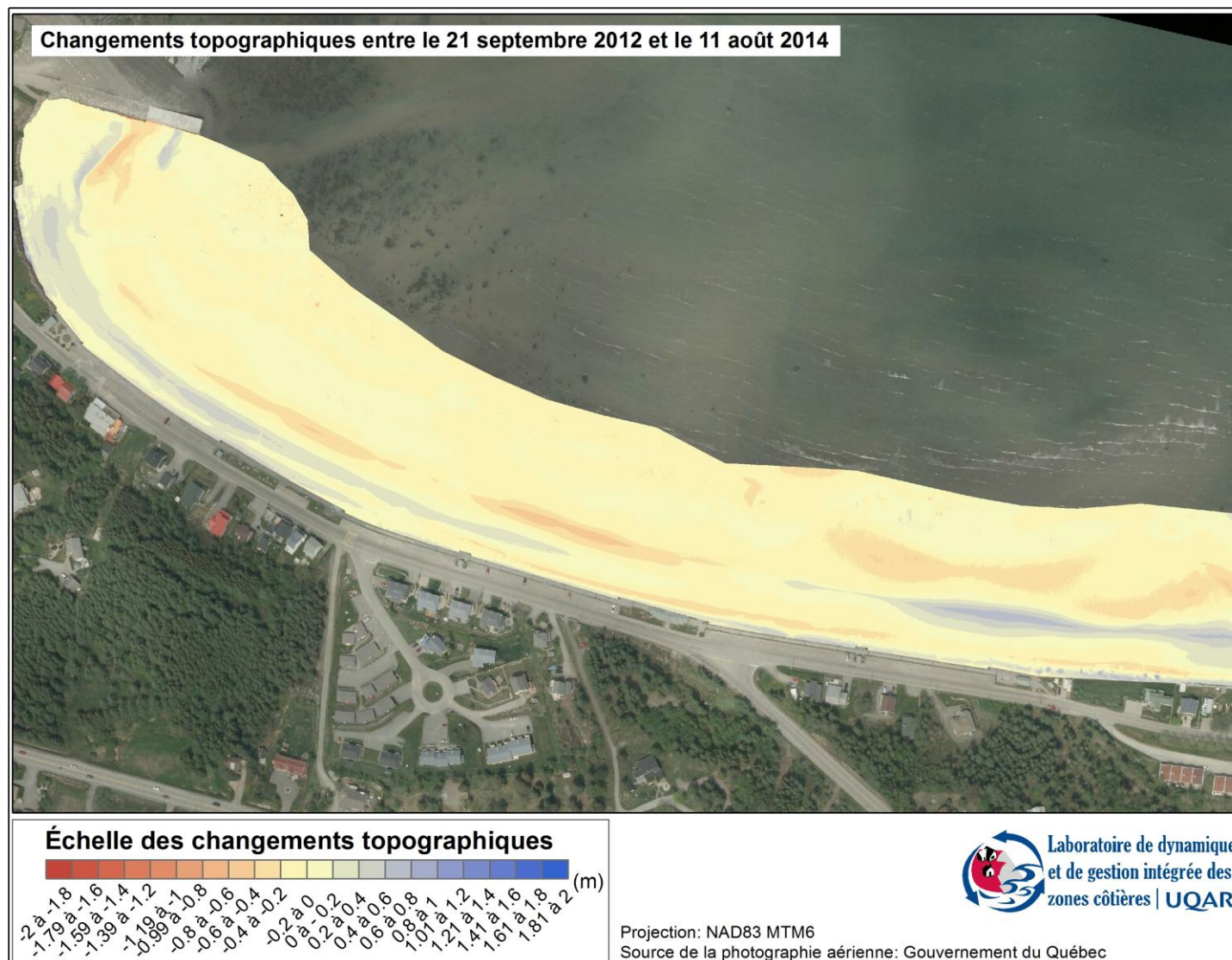


Figure 13. Changements topographiques du secteur A entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014

6.1.2.2 Période du 21 septembre 2012 au 23 octobre 2014

Pour la période du 21 septembre 2012 au 23 octobre 2014, les changements topographiques du secteur A intègrent les sédiments grossiers ajoutés lors des travaux de recharge de la plage. Ce changement volumétrique de sédiments sur la partie supérieure de la plage est bien visible sur les cartes de changements topographiques (figures 12 et 14). La zone d'érosion linéaire devant la recharge et à la limite de la flexure de la plage qui était déjà présente à la période précédente s'est légèrement accentuée. Bien qu'un peu moins prononcée que pour la période entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014, la zone d'érosion sur le bas estran à l'extrémité est de la zone est toujours visible. Par contre, une accrétion semble tout de même se mettre en place sur cette zone. Les zones d'accumulation et d'érosion près du quai sont toujours visibles sensiblement au même endroit que la période précédente. Dans l'ensemble du secteur A, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à $14\,868\text{ m}^3$, incluant le volume de la recharge en sédiments grossiers.

La variabilité topographique du secteur B est visuellement semblable à la période précédente. Par contre, il est possible d'observer de plus grandes zones d'accumulation, notamment sur le bas estran devant l'embouchure du ruisseau. Une accumulation a aussi lieu sur une grande partie du bas estran et le banc d'accumulation s'est engraisé depuis la dernière période. Malgré l'accumulation quasi généralisée, les deux zones d'érosion observée à la période précédente sont toujours visibles, soit sur le haut estran à l'embouchure du ruisseau et sur une zone d'environ 500 m linéaires sur le bas estran. Dans l'ensemble du secteur B, le bilan général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à $6\,595\text{ m}^3$.

Le secteur C présente peu de changements topographiques par rapport à la période précédente. La petite zone d'érosion à l'ouest du secteur est toujours visible. Le reste du secteur montre une accumulation généralisée et les petites zones d'érosion sur le bas estran qui étaient présentes dans la partie est du secteur C à la période précédente ont été remplacées par des zones d'accumulation. Dans l'ensemble du secteur C, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à $7\,961\text{ m}^3$.

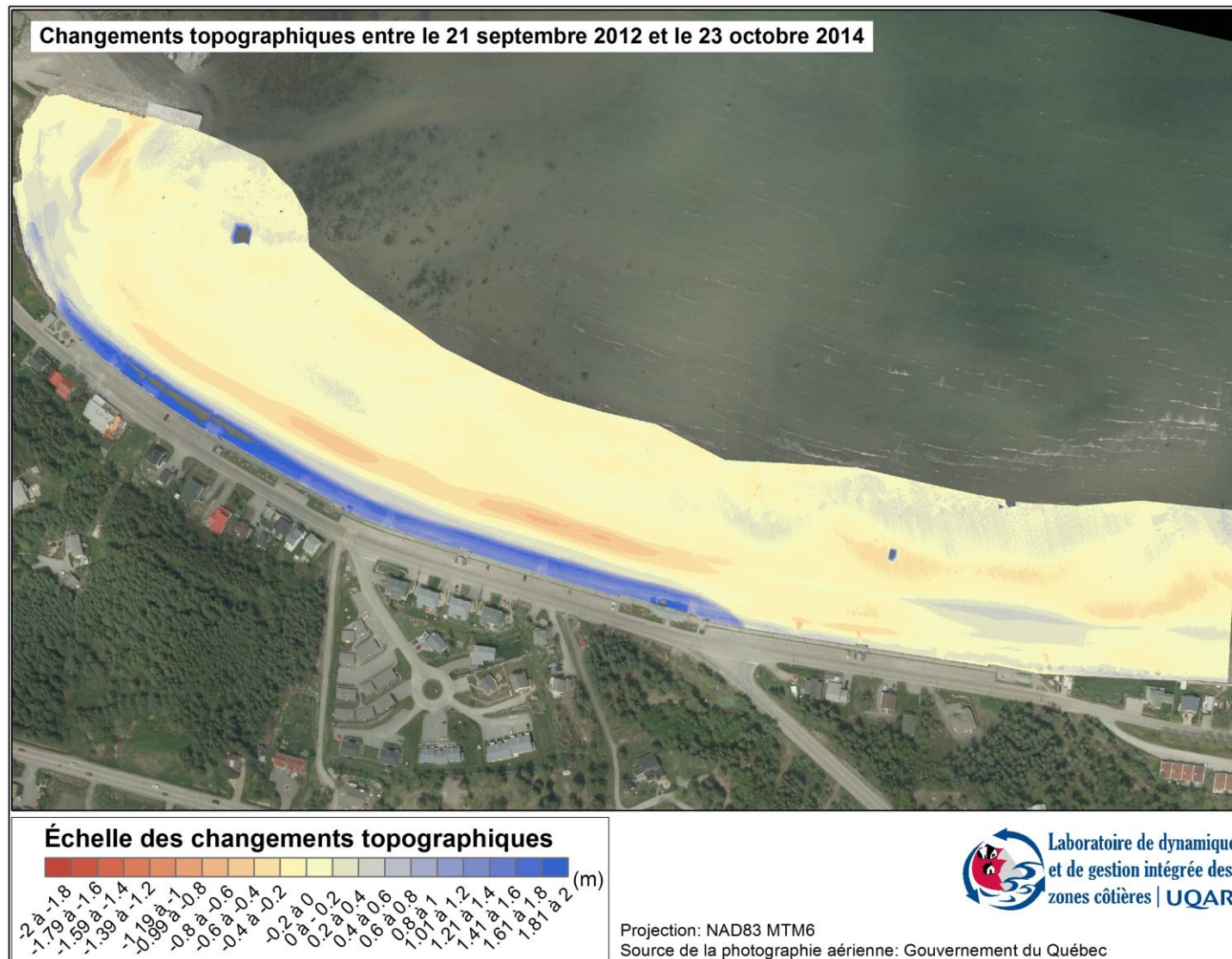


Figure 14. Changements topographiques du secteur A entre le 21 septembre 2012 et le 23 octobre 2014

6.1.2.3 Période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014

La période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014 est la plus courte et correspond à la période pré et post-recharge du secteur A. Ce secteur présente donc une forte accumulation en raison de l'ajout d'un important volume de sédiments grossiers (figure 15). La zone d'érosion linéaire devant la recharge qui était visible lors des deux autres périodes est toujours visible, mais a eu tendance à se combler. Une faible zone d'érosion est aussi observable à la limite est du secteur, mais encore une fois elle est moins prononcée que les périodes précédentes. L'ensemble du bas estran présente une faible accumulation. Dans l'ensemble du secteur A, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à 14 502 m³, incluant le volume de la recharge en sédiments grossiers.

Le secteur B montre une accumulation généralisée. La longue zone d'érosion linéaire observable lors des deux autres périodes a complètement été comblée. L'apparition de petites zones d'accumulation ayant la forme de cordons de bas estran sont visibles à trois endroits sur le bas estran. Il semble y avoir eu une migration vers la plage des bancs d'accumulation. Au droit de l'exutoire du ruisseau, l'érosion se manifeste seulement au niveau du chenal alors qu'il y a eu accumulation en bordure et en aval du ruisseau. Dans l'ensemble du secteur B, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à 4 607 m³.

Le secteur C montre une faible accumulation généralisée. La seule zone d'érosion significative qui était observable dans la partie ouest du secteur C lors des deux périodes précédentes a été complètement comblée. La zone de faible accumulation éparse sur le bas estran de la partie est du secteur s'est maintenue. Dans l'ensemble du secteur C, le bilan sédimentaire général pour cette période est positif avec une accumulation de sédiments estimée à 5 449 m³.

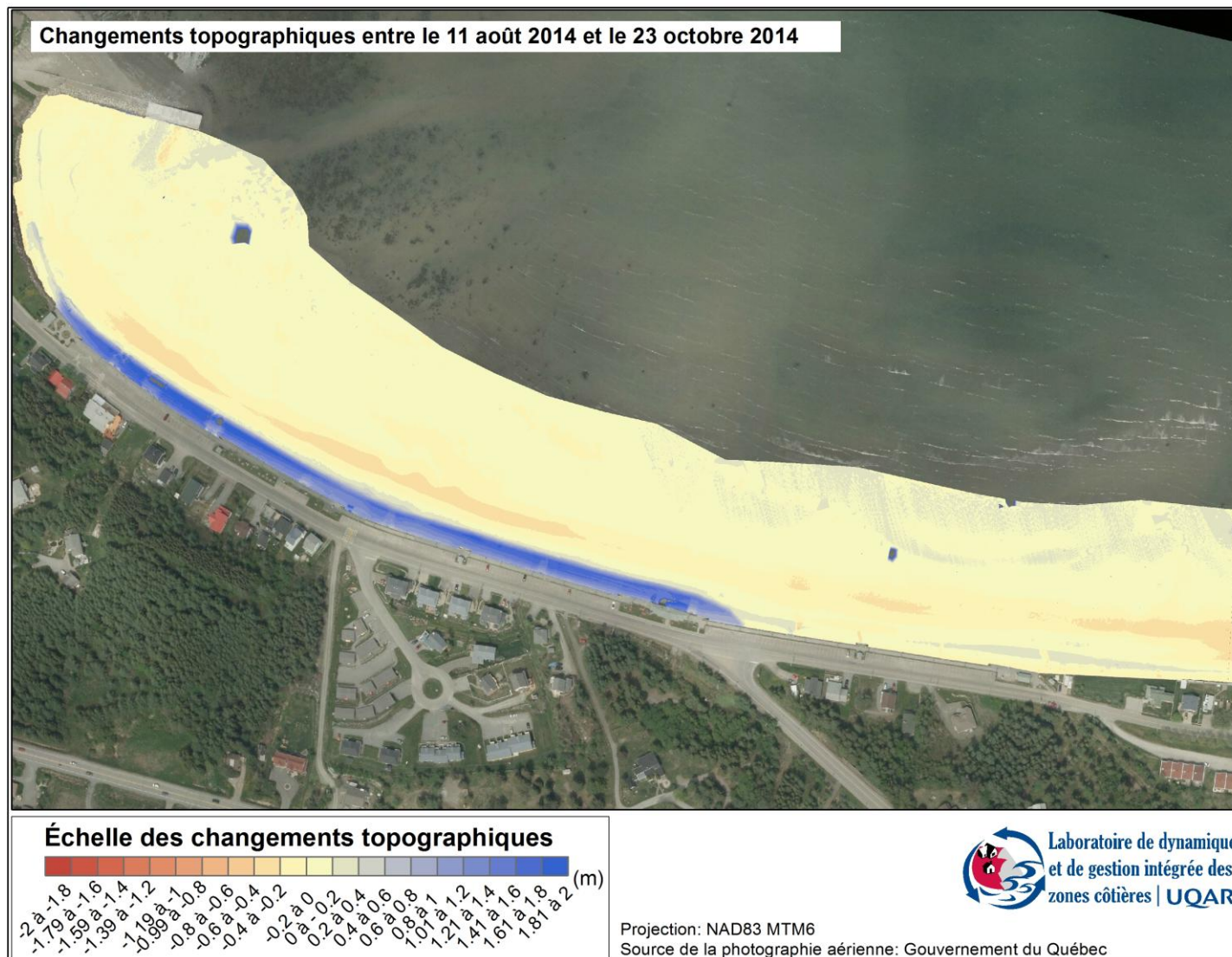


Figure 15. Changements topographiques du secteur A entre le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014

6.2 Profils topographiques générés à partir des surfaces LiDAR

Sur l'ensemble du site d'étude de l'anse aux Coques, un total de 63 profils topographiques a été généré à partir de l'extension *Digital Shoreline Analysis System* (DSAS) développée par la Commission géologique des États-Unis (USGS) (Thieler *et al.*, 2009). Cette extension permet de générer automatiquement des profils perpendiculaires à la côte à un intervalle régulier. Les profils sous forme de ligne ont ensuite été transformés en profils sous forme de points à intervalle régulier de 0,50 m. Pour chaque profil, l'altitude a été extraite à partir des surfaces LiDAR. Pour les trois levés, un shapefile des profils est disponible ayant comme attributs le nom du profil, les coordonnées X et Y ainsi que l'altitude extraite du LiDAR. Les mêmes points ont été utilisés pour extraire l'altitude de chaque levé afin de permettre une comparaison et une évolution temporelle de chaque point. L'emplacement des profils est présenté sur la figure 16. Pour le secteur de la recharge en sédiments grossiers, jusqu'au quai à l'ouest et sur une longueur de 100 m à l'est, 42 profils ont été générés à un intervalle de 20 m (profils SL-01 à SL-42). Pour le reste de l'anse aux Coques, 20 profils ont été générés à un intervalle de 100 m (profils SL-43 à SL-63).

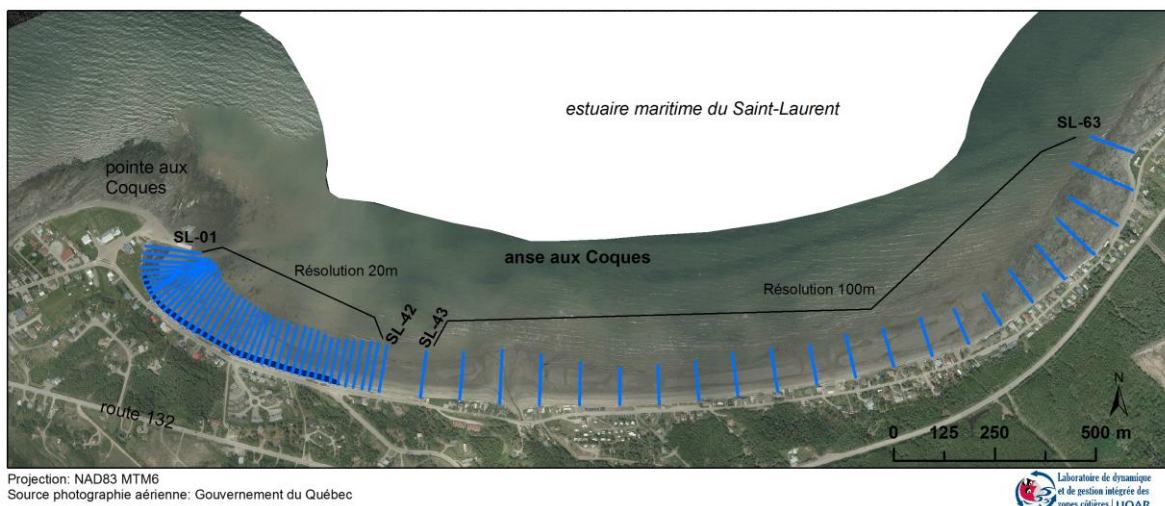


Figure 16. Localisation des profils topographiques générés sur les surfaces LiDAR

Les figures 17 et 18 sont deux exemples de l'évolution de deux profils topographiques de l'anse aux Coques. La figure 17 présente l'évolution du profil 22 qui est situé dans le secteur où a eu lieu la recharge en sédiments grossiers en octobre 2014. Entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014, un changement dans la forme du profil est visible sur le haut estran (environ jusqu'à 40 m) alors que la topographie du bas estran (entre 40 et 130 m) est assez uniforme. On constate tout de même une légère accumulation entre le 21 septembre 2012 et le 23 octobre 2014 entre la distance 50 et 85 m. Ensuite, le profil extrait de la surface LiDAR du 23 octobre 2014 montre bien l'apparition d'une grande charge sédimentaire due à la recharge en sédiments grossiers.

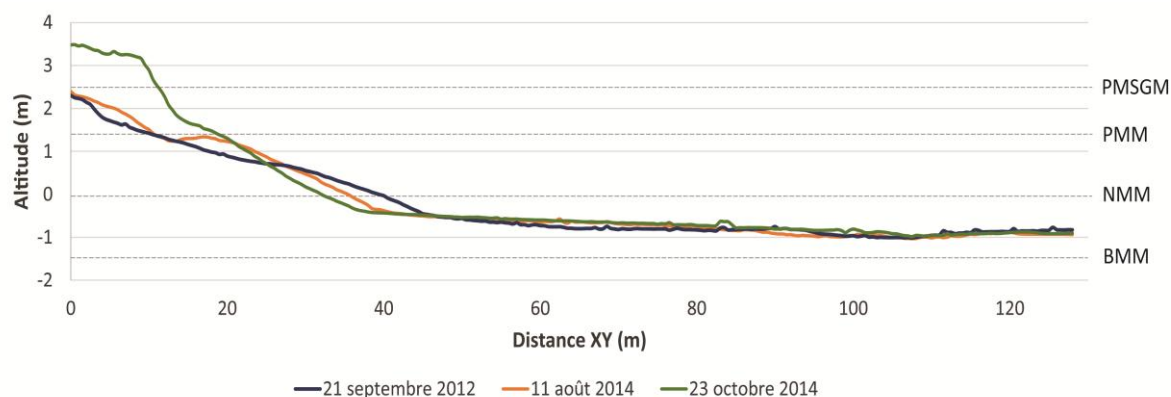


Figure 17. Exemple de l'évolution d'un profil devant la recharge en sédiments (profil SL-22)

La figure 18 présente l'évolution du profil 45 qui est situé environ 400 m à l'est de la zone de recharge en sédiments grossiers, près de l'exutoire d'un ruisseau. La forme du profil du haut estran (0 à 40 m) varie entre les levés alors que le bas estran varie peu à l'exception d'une légère accumulation en octobre 2014 sur la partie supérieure (entre 60 et 100 m). De manière générale, on constate que le profil du 23 octobre 2014 présente un bilan sédimentaire positif par rapport aux autres périodes. Ces variations topographiques étaient bien visibles sur les cartes surfaciques de changements topographiques de la figure 12.

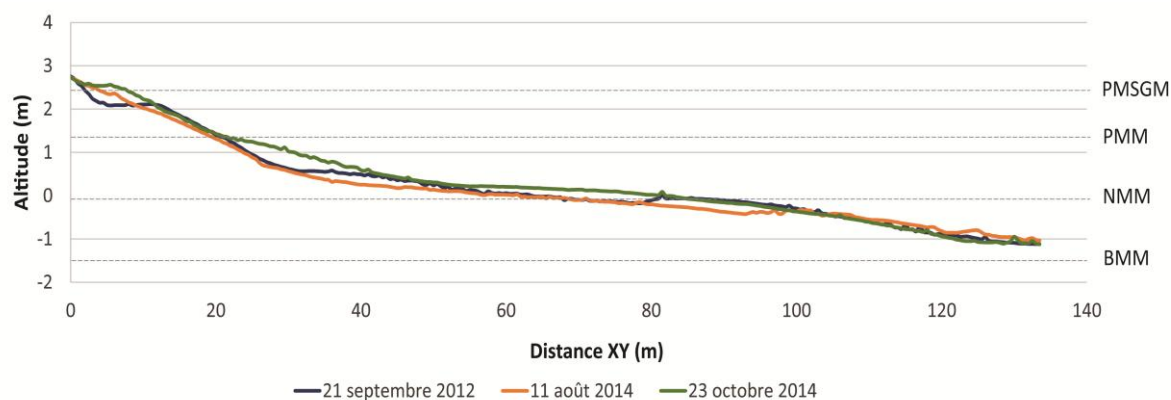


Figure 18. Exemple de l'évolution d'un profil du côté est de l'anse (profil SL-45)

7. Données fournies à la municipalité

L'ensemble des données utilisées dans le cadre de ce projet est fourni à la municipalité de Sainte-Luce. La figure 19 présente l'arborescence des dossiers fournis. Les données sont d'abord séparées en trois dossiers principaux selon les dates d'acquisition des levés LiDAR : septembre 2012, août 2014 et octobre 2014. À l'intérieur de ces dossiers, les données sont classées selon le type de données et des produits dérivés. Les types de données et de produits sont ensuite sous-classés selon leur format.

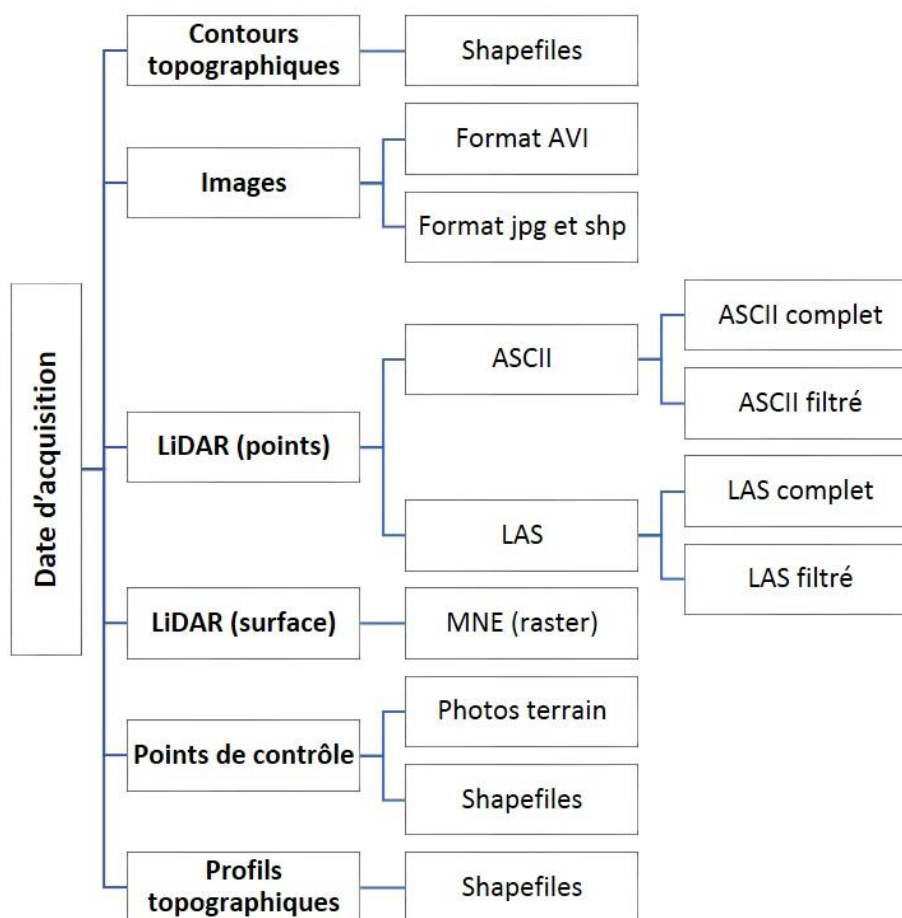


Figure 19. Arborescence des dossiers fournis à la municipalité de Sainte-Luce

8. Conclusion

Ce rapport technique a permis de présenter la méthodologie utilisée pour effectuer le suivi topographique de la plage à Sainte-Luce. Cette première phase du suivi avait pour but d'établir l'état de référence topographique avant et immédiatement après les travaux de recharge en sédiments grossiers de la plage. Les résultats de trois relevés sont présentés, soit celui du 21 septembre 2012, du 11 août 2014 et du 23 octobre 2014. Le contrôle de qualité des données LiDAR a permis d'établir une erreur horizontale moyenne de 4 à 5 cm et verticale de 1 à 4 cm selon les dates d'acquisition. En marge de ce rapport, plusieurs types de données sont fournis à la municipalité de Sainte-Luce en plusieurs formats : contours topographiques, images, points LiDAR, surfaces LiDAR, modèle numérique d'élévation (MNE), points de contrôle et profils topographiques.

Une analyse préliminaire des changements topographiques entre les périodes de levés permet de constater un bilan sédimentaire positif de la zone couverte par le LiDAR de l'anse aux Coques entre le 21 septembre 2012 et le 11 août 2014. Le levé du 23 octobre 2014 montre une augmentation marquée du volume sédimentaire dans le secteur A en raison de la recharge en sédiments grossiers. Toujours pour cette même période, on constate aussi que le bilan sédimentaire a été positif pour les secteurs B et C et que les zones déficitaires observées lors des périodes précédentes ont eu tendance à se combler de sédiments.

Des levés LiDAR et des profils DGPS sont prévus en 2015 pour suivre les changements morphologiques de la plage, incluant la surface rechargée par les sédiments, afin d'établir un bilan sédimentaire biannuel et annuel de la plage de l'anse aux Coques. Une caractérisation visuelle de la texture des sédiments sera aussi effectuée. À la suite d'une première année de suivi, l'analyse des conditions météo-marines permettra de comprendre les changements morphologiques observés et l'influence de la recharge sur la dynamique morphosédimentaire de la plage. Un rapport de recherche pour présenter ces résultats est prévu en mars 2016.

Références

DIONNE, J.-C. (2007) La batture de l'anse au Sable à Rimouski : un estran typique de la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 61, no 2-3 : 195-210.

MINISTÈRE PÊCHES ET OCÉANS CANADA (MPO) (2015) Prédiction des marées à Pointe-au-Père, station #2980, <http://www.waterlevels.gc.ca/fra/station?sid=2980>

THIELER, E. R., HIMMELSTOSS, E. A., ZICHICHI, J. L. et ERGUL, A. (2009) Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278

VAN-WIERTS, S. (2012) Développement et application d'un système mobile de laser terrestre pour quantifier le bilan sédimentaire des plages, Mémoire de maîtrise, janvier 2012, Université du Québec à Rimouski, 93 p.

VAN-WIERTS, S. et BERNATCHEZ, P. (2012) Relevé LiDAR terrestre à Sainte-Luce dans le secteur de l'Anse aux Coques dans le cadre d'une étude de recharge de plage en zone d'affouillement : Rapport technique. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, septembre 2012, 29 p.

VAN-WIERTS, S. et BERNATCHEZ, P. (2011) Système mobile de laser terrestre appliqué à l'étude de la géomorphologie côtière. Bulletin de l'association québécoise de télédétection, 27 : p. 3.

Annexe 1

MÉTADONNÉES PROJET LEVÉ LIDAR TERRESTRE

Nom du projet : ***Relevé lidar terrestre à Sainte-Luce dans le secteur de l'anse aux Coques dans le cadre d'une étude de recharge de plage en zone d'affouillement***

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Date des relevés : 21 septembre 2012

Résolution spatiale : Entre 1 et 5 cm

Précision altimétrique : RMS : 0.02 m

Précision planimétrique : RMS : 0.02 m

Type d'équipement : LiDAR Riegl VQ-250

Angle de balayage : 360 degrés

Fréquence de balayage : 100 Hz

Pourcentage de recouvrement des lignes d'acquisition : Environ 50 %

Type de véhicule : Véhicule terrestre : Polaris Ranger

Autre type de capteur : Caméra: PointGrey Grasshopper GRAS-50S5C-C

Système inertiel : Applanix POS-LV 220

Système de référence de données : Horizontal : NAD83(SCR5) MTM fuseau 6

Vertical : Niveau moyen des mers

(Modèle de géoïde HT2.0)

Provenance des contrôles terrain : UQAR

Autre produits associés disponibles :

- ☐ Fichiers LAS 1.3 complet
- ☐ Fichiers LAS 1.3 filtrés au sol (plage)
- ☐ Imagerie numérique géoréférencée
- ☐ Modèle numérique d'élévation

DATE : Septembre 2012

Acquisition : Stéfanie Van-Wierds (UQAR)



MÉTADONNÉES PROJET LEVÉ LIDAR TERRESTRE

Nom du projet : ***Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers***

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Date du relevé : 11 août 2014

Résolution spatiale : Entre 1 et 5 cm

Précision altimétrique : RMS : 0.03

Précision planimétrique : RMS : 0.02

Type d'équipement : LiDAR Riegl VQ-250

Angle de balayage : 360 degrés

Fréquence de balayage : 100 Hz

Pourcentage de recouvrement des lignes d'acquisition : une seule ligne

Type de véhicule : Véhicule terrestre : Polaris Ranger

Autre type de capteur : Caméra: PointGrey Grasshopper GRAS-50S5C-C

Système inertiel : Applanix POS-LV 220

Système de référence de données : Horizontal : NAD83(SCRS) MTM fuseau 6

Vertical : Niveau moyen des mers
(Modèle de géoïde HT2.0)

Provenance des contrôles terrain : UQAR

Produit disponible :

- ☐ Fichiers LAS 1.2 complet
- ☐ Fichiers LAS 1.2 filtrés au sol (plage)
- ☐ Fichiers ASCII complet
- ☐ Fichiers ASCII filtrés au sol (plage)
- ☐ Modèles numériques d'élévation

DATE : Février 2015

Acquisition et traitement : Louis Cormier et Stéfanie Van-Wierts (UQAR)

MÉTADONNÉES PROJET LEVÉ LiDAR TERRESTRE

Nom du projet : ***Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers***

INFORMATIONS GÉNÉRALES

Date du relevé : 23 octobre 2014

Résolution spatiale : Entre 1 et 5 cm

Précision altimétrique : RMS : 0.03

Précision planimétrique : RMS : 0.03

Type d'équipement : LiDAR Riegl VQ-250

Angle de balayage : 360 degrés

Fréquence de balayage : 100 Hz

Pourcentage de recouvrement des lignes d'acquisition : une seule ligne

Type de véhicule : Véhicule terrestre : Polaris Ranger

Autre type de capteur : Caméra: PointGrey Grasshopper GRAS-50S5C-C

Système inertiel : Applanix POS-LV 220

Système de référence de données : Horizontal : NAD83(SCR5) MTM fuseau 6

Vertical : Niveau moyen des mers

(Modèle de géoïde HT2.0)

Provenance des contrôles terrain : UQAR

Produit disponible :

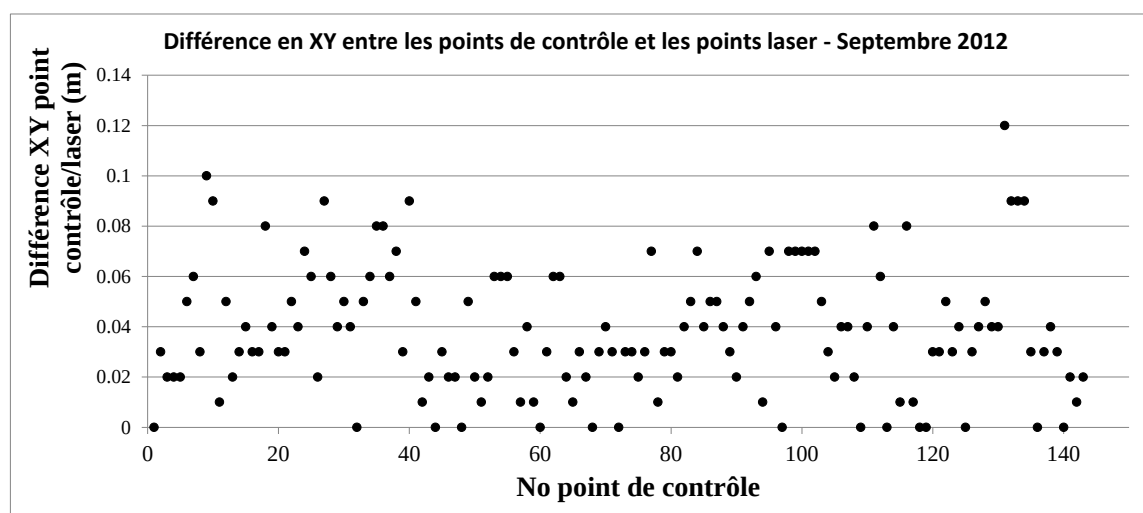
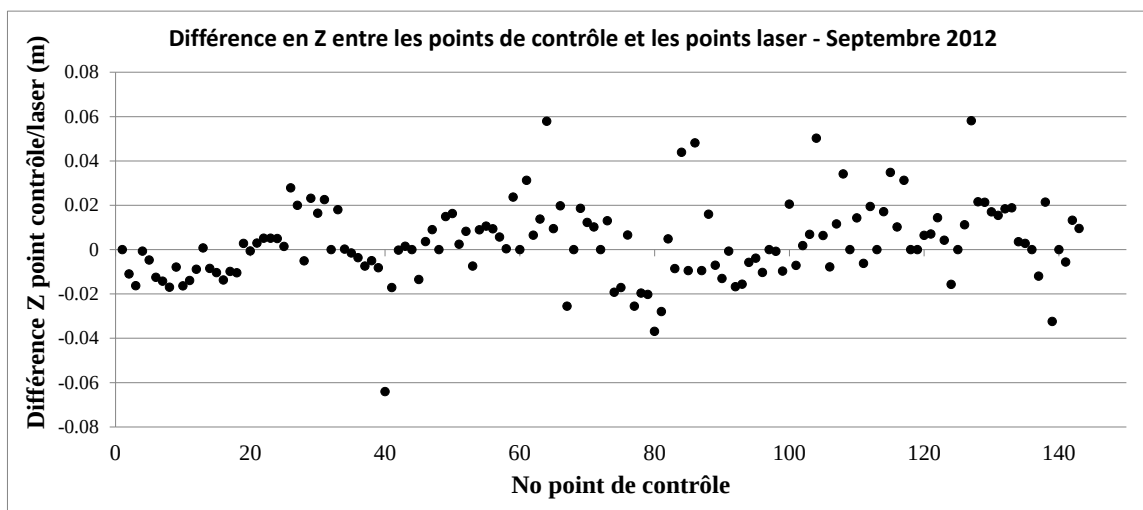
- ☐ Fichiers LAS 1.2 complet
- ☐ Fichiers LAS 1.2 filtrés au sol (plage)
- ☐ Fichiers ASCII complet
- ☐ Fichiers ASCII filtrés au sol (plage)
- ☐ Modèles numériques d'élévation

DATE : Février 2015

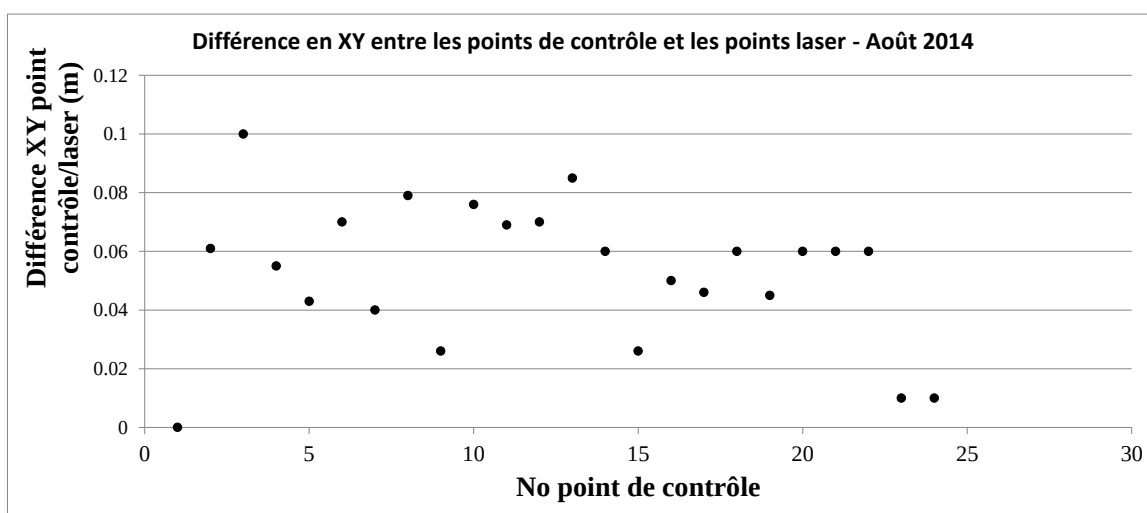
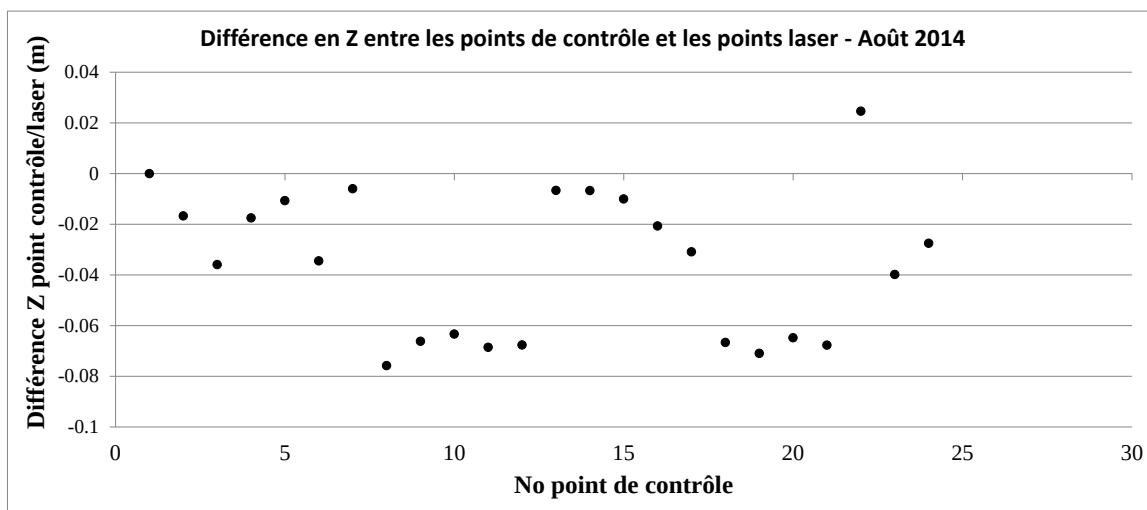
Acquisition et traitement : Louis Cormier et Stéfanie Van-Wierts (UQAR)

Annexe 2

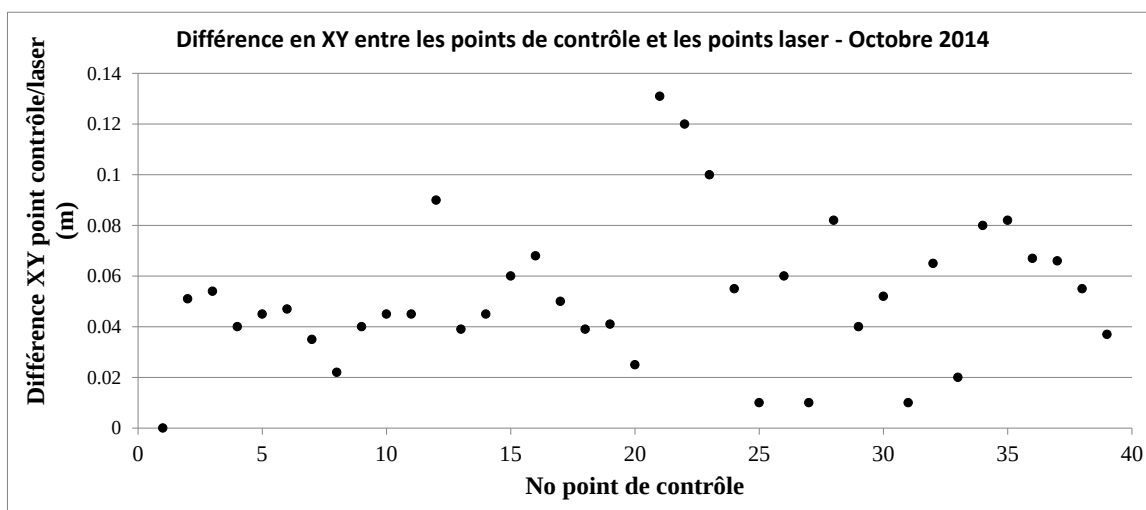
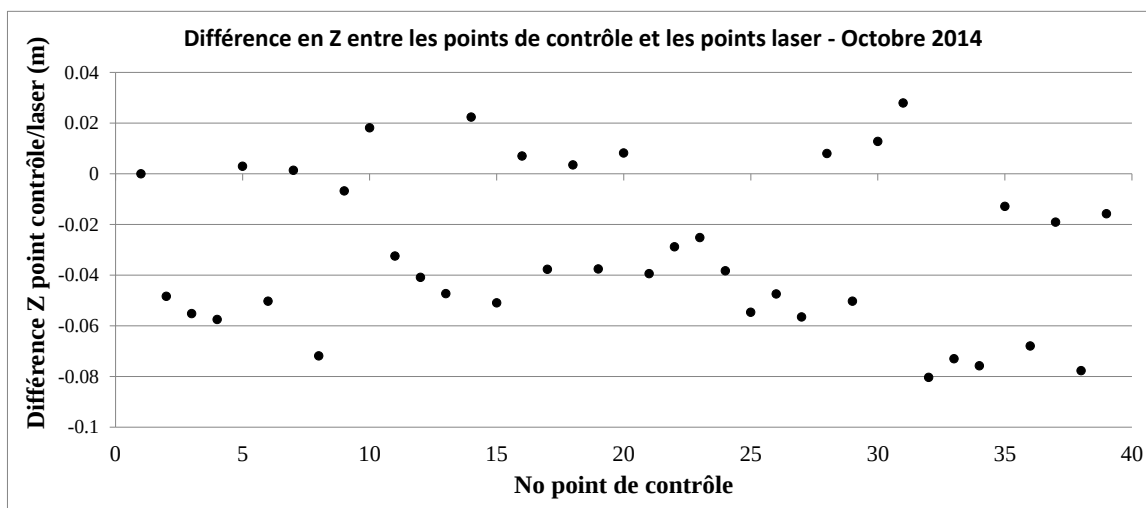
21 septembre 2012: Différence entre les points de contrôle et les points LiDAR



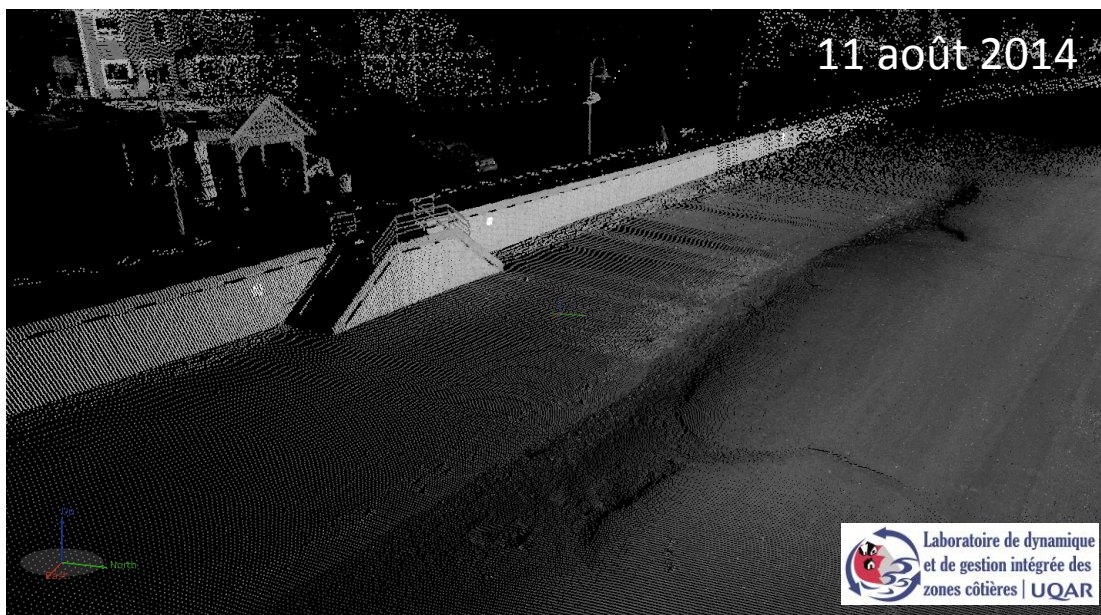
11 août 2014: Différence entre les points de contrôle et les points LiDAR



23 octobre 2014: Différence entre les points de contrôle et les points LiDAR



Annexe 3





Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers

Rapport de suivi 2014-2015

Rapport remis
à la municipalité de Sainte-Luce

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.



Direction et rédaction

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 1206 (laboratoire)

Télécopieur : (418) 724-1847

Courriel : pascal_bernatchez@uqar.ca

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

Équipe de recherche

Stéfanie Van-Wierts, M. Sc., candidate au doctorat en sciences de l'environnement, LDGIZC, UQAR

Levés terrain LiDAR et D-GPS, traitement des données et rédaction

Adrien Lambert, Ph.D. Professionnel de recherche, LDGIZC, UQAR

Traitement des données de profils D-GPS

Louis Cormier, B.Sc., Auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR

Levés terrain LiDAR et caméras de suivi

Simon Claveau, B.Sc., Auxiliaire de recherche, LDGIZC, UQAR

Analyses sédimentologiques en laboratoire et assistant de terrain

Assistants de terrain : David Didier, Susan Drejza, Denys Dubuc, Steeve Dugas, Jean-David Dupuis, Myriane Houde-Poirier, Gabriel Ladouceur, Patrice Lapointe et Mathilde Lapointe Saint-Pierre

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

VAN-WIERTS, S. et BERNATCHEZ, P. 2016. *Suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce à la suite d'une recharge en sédiments grossiers : rapport de suivi 2014-2015*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport technique remis à la municipalité de Sainte-Luce, mars 2016, 67 pages.

Photographie et image de la page de couverture : LDGIZC UQAR

Table des matières

1. Introduction	1
1.1 Mise en contexte	1
1.2 Objectifs du rapport	1
2. Description du site d'étude	2
3. Travaux de terrain.....	4
3.1 Données topographiques	4
3.1.1 Profils topographiques de la zone intertidale.....	5
3.1.2 Levé LiDAR terrestre	6
3.2 Granulométrie	9
3.3 Suivi photographique en continu.....	9
4. Traitement et analyse des données.....	11
4.1 Profils topographiques	11
4.2 Traitement des levés surfaciques de l'estran par le système mobile de laser terrestre	11
4.2.1 Processus du traitement des données.....	11
4.2.2 Calcul d'erreur du SMLT.....	13
4.2.3 Changements morphologiques.....	14
4.3 Granulométrie	16
5. Résultats et analyse	18
5.1 Suivi de la sédimentologie des sédiments de l'estran	18
5.2 Volume sédimentaire du haut estran	24
5.3 Évolution de la topographie et du volume sédimentaire de l'estran de l'anse aux Coques	26
5.3.1 Période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014	26
5.3.2 Période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014	28
5.3.3 Période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014	30
5.3.4 Période du 30 octobre 2014 au 12 juin 2015.....	31
5.3.5 Période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015.....	36
5.3.6 Période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015	38
5.3.7 Période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016.....	41
5.4 Synthèse des changements morphologiques de l'anse aux Coques à la suite de la recharge sédimentaire (octobre 2014 à janvier 2016)	45
6. Données fournies	52
7. Conclusion.....	53
Références	54
ANNEXE 1.....	56
ANNEXE 2.....	64

Liste des figures

Figure 1. Localisation du site d'étude de l'anse aux Coques	2
Figure 2. Localisation des profils topographiques réalisés au D-GPS entre le 30 octobre 2014 et le 14 janvier 2016	5
Figure 3. GPS-différentiel utilisé lors du projet à Longue-Pointe-de-Mingan. A. Récepteur de base R8; B. Radio (Trimble HPB 430-450 MHz)	6
Figure 4. Système mobile de laser terrestre (A.) Installation des instruments sur une plate-forme fixée derrière le véhicule (DMI, antennes GPS, Caméra, LiDAR, Génératrice); (B.) Compartiment fermé à l'arrière contient l'ordinateur, le multiplex, le PSC et un power supply ; (C.) Le poste de contrôle est situé à l'avant du véhicule du côté passager et comprend un écran d'ordinateur et un clavier. 8	
Figure 5. Localisation et vue des caméras de suivi installées à l'anse aux Coques	10
Figure 6. Workflow de l'acquisition et du traitement des données du SMLT	11
Figure 7. Propagation de l'erreur estimée XY et Z (σ) par le modèle de propagation Trimble (2013) en fonction de la distance (m) entre le véhicule et la cible	13
Figure 8. Aperçu du volume calculé entre la surface LiDAR et le niveau de référence pour une tranche 2D de l'estran	15
Figure 9. Échelle granulométrique utilisée par le logiciel Gradistat (modifiée de Udden (1914) et Wentworth (1922))	17
Figure 10. Évolution sédimentologique du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2015. (Les diagrammes contenant un R indique qu'ils ont été récoltés sur la recharge sédimentaire).....	22
Figure 11. Évolution sédimentologique du bas estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2015	23
Figure 12. Volume sédimentaire du haut estran (m^3/m^2) pour le secteur de la recharge sédimentaire (compartiments SL-03 à SL-15).	24
Figure 13. Volume sédimentaire (m^3/m) du haut estran calculé pour les 60 compartiments des 6 levés LiDAR	25
Figure 14. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014	27
Figure 15. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014	28
Figure 16. Évolution des travaux de recharge sédimentaire entre le 15 et le 23 octobre 2014 à l'anse aux Coques	28
Figure 17. Différentiels topographique et volumétrique de l'Anse-aux-Coques de la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2013	29
Figure 18. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014	30
Figure 19. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014	31
Figure 20. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015	32
Figure 21. Formation d'une encoche d'érosion sur le front de la recharge sédimentaire lors des hauts niveaux d'eau (2,45m) du 24 novembre 2014.....	32
Figure 22. Photographies des caméras de suivi lors de haut niveaux d'eau mesurés durant l'hiver 2014-2015	33

Figure 23. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015	34
Figure 24. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015	35
Figure 25. Évolution du profil D-GPS P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015	35
Figure 26. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015	36
Figure 27. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015	37
Figure 28. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015	38
Figure 29. Niveau d'eau atteint lors de la tempête du 29 octobre 2015 à l'anse aux Coques	39
Figure 30. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015	40
Figure 31. Évolution du profil D-GPS P-12 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015	40
Figure 32. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016	41
Figure 33. Localisation de points ponctuels de franchissement des vagues répertoriés au GPS lors de la tempête du 11 janvier 2016 à l'anse aux Coques.....	42
Figure 34. Présence de galets sur la promenade de l'Anse-aux-Coques projetés lors de la tempête du 11 janvier 2016 (photographie prise le 12 janvier 2016).....	43
Figure 35. Nappe de jet de rive sur la promenade de l'Anse-aux-Coques lors de la tempête du 13 janvier 2016	43
Figure 36. Évolution du profil P-11 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015	44
Figure 37. Formation d'une encoche d'érosion sur la recharge sédimentaire entre le 2 novembre 2015 et le 16 janvier 2016	45
Figure 38. Diagrammes simplifiés présentant l'évolution sédimentologique du haut estran et du bas estran (2014 : bleu et 2015: rouge).....	46
Figure 39. Évolution du D50 des échantillons de haut estran entre 2014 et 2015.....	47
Figure 40. Recul du front de la recharge entre octobre 2014 et janvier 2016	48
Figure 41. Élévation de l'estran en octobre 2014, position des émissaires pluviaux et limite du front de la recharge en janvier 2016	48
Figure 42. Déplacement du front de la recharge sédimentaire entre le 23 octobre 2014 et le 16 janvier 2016 et changements topographiques entre le 23 octobre 2014 et le 15 octobre 2015	49
Figure 43. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 23 octobre 2014 au 15 octobre 2015	50
Figure 44. Évolution des profils topographiques D-GPS P-04 et P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 2 décembre 2015	51
Figure 45. Arborescence des dossiers fournis à la municipalité de Sainte-Luce dans le cadre du projet de suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce	52

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres des niveaux d'eau marégraphiques et géodésiques de la station de Rimouski	3
Tableau 2. Temps de retour des niveaux d'eau extrême selon la distribution de Gumbel	3
Tableau 3. Dates d'acquisition des données topographiques (LiDAR et D-GPS).....	4
Tableau 4. Performance du scanneur et des mesures du LiDAR Riegl VQ-250	7
Tableau 5. Couverture de suivi des caméras de l'Anse-aux-Coques.....	9
Tableau 6. Erreur calculée pour chacun des levés LiDAR effectué entre 2012 et 2015 à l'anse aux Coques	14
Tableau 7. Erreur propagée pour les 8 surfaces de différentiels utilisées	16

1. Introduction

1.1 Mise en contexte

Dans l'optique de protection de la promenade en bordure de la plage située dans le secteur ouest de l'anse aux Coques, une recharge en sédiments grossiers a été effectuée en octobre 2014 sur une distance d'environ 500 mètres (figure 1). Dans le cadre de ce projet de recharge de la plage à Sainte-Luce-sur-Mer, le ministère du développement durable, de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques exige de la municipalité de procéder à un suivi environnemental permettant d'effectuer des mesures précises et récurrentes de la topographie de la plage pour évaluer les impacts potentiels de l'intervention et son efficacité à contrer l'érosion. Dans le cadre de ce projet, le Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC) de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) a été mandaté pour réaliser un suivi géomorphologique à haute résolution spatiale sur l'ensemble du site d'étude de l'anse aux Coques.

1.2 Objectifs du rapport

Le premier objectif de ce rapport est de présenter les résultats obtenus à la suite du suivi réalisé en 2014 et 2015 de la plage de l'anse aux Coques. Ce suivi a été principalement effectué à l'aide d'un système mobile de laser terrestre (SMLT), d'un D-GPS, d'échantillons granulométriques et de photographies issues de caméras de suivi de la côte.

Ce projet vise les objectifs spécifiques suivants :

- 1) effectuer des levés topographiques surfaciques à haute résolution spatiale de la plage à l'aide de levés LiDAR terrestre;
- 2) établir un bilan sédimentaire biannuel et annuel de la surface suivie;
- 3) réaliser une analyse des conditions météo-marines responsables des changements morphologiques de la plage et de la recharge.

2. Description du site d'étude

Le site d'étude se situe sur la rive sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, dans la municipalité de Sainte-Luce dans la région du Bas-Saint-Laurent. Le secteur à l'étude est l'anse aux Coques, entre le quai et la pointe est de l'anse sur une distance d'environ 3km linéaire (figure 1). La zone littorale de l'anse est principalement composée d'une plage à prédominance de sable et gravier qui repose sur des argiles glacio-marines de la Mer de Goldthwait. Des bancs sableux caractérisent le bas estran. Sur la pointe aux Coques, la plage à substrat meuble est quasi-absente et la plate-forme rocheuse affleure sur l'ensemble de ce petit secteur. Un affleurement rocheux est aussi visible sur l'extrémité est de l'anse sur le bas estran. Environ au milieu de l'anse, un ruisseau s'écoule sur l'estran créant un petit delta sub-aquatique et une forte dynamique sédimentaire à cet endroit.

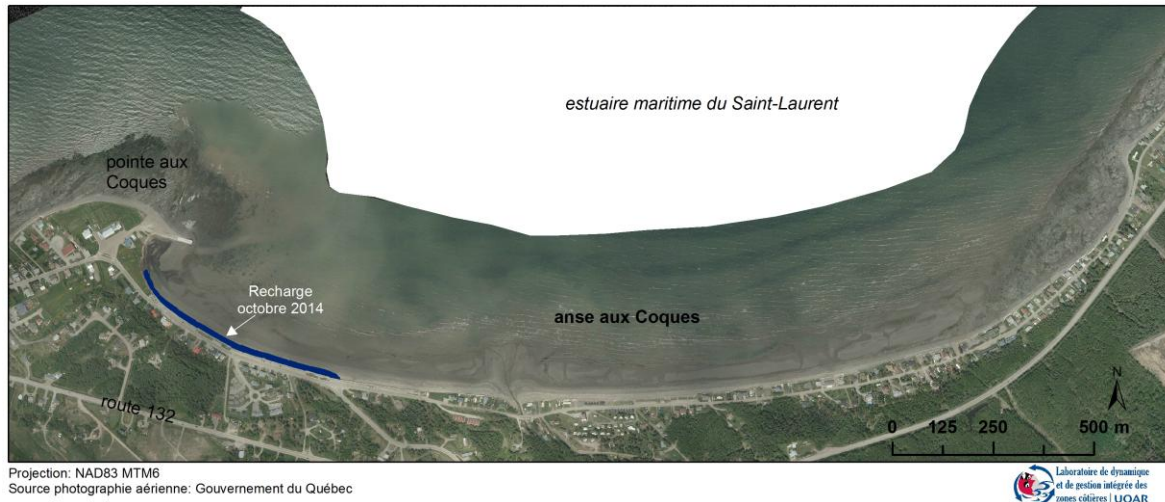


Figure 1. Localisation du site d'étude de l'anse aux Coques

Les données marégraphiques utilisées dans le cadre de ce projet proviennent de la station de Rimouski du Service Hydrographique du Canada (SHC) (station #2985) qui est située à environ 15 kilomètres à l'ouest du site d'étude.

Tableau 1. Paramètres des niveaux d'eau marégraphiques et géodésiques de la station de Rimouski

Marée	Niveau marégraphique* (m)	Niveau géodésique (CGVD28) (m)
Pleines mers supérieures de grandes marées (PMSGM)	5,47	3,19
Pleines mers supérieures de marées moyennes (PMSMM)	4,8	2,52
Niveau moyen des mers (NMM)	2,3	0,02
Basses mers inférieures de marées moyennes (BMIMM)	0,7	-1,58
Basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM)	0,15	-2,13

*le niveau marégraphique correspond au zéro des cartes

Le temps de retour des niveaux d'eau extrêmes a été calculé à partir des données enregistrées à la station de Rimouski-Pointe-au-Père. La distribution de Gumbel a été utilisée pour le calcul.

Tableau 2. Temps de retour des niveaux d'eau extrême selon la distribution de Gumbel

Période de retour (années)	100	50	20	10	5	2	1.01
Niveau marégraphique (m)	5.4	5.4	5.3	5.2	5.1	5.0	4.8
Niveau géodésique (m)	3.15	3.08	2.97	2.90	2.81	2.69	2.49

3. Travaux de terrain

Les travaux de terrain se sont étendus d'août 2014 à janvier 2016. Toutefois, des levés LiDAR ont été réalisés en septembre 2012 et les résultats ont été intégrés à l'analyse. Les principales données acquises lors de ces levés terrain sont des données topographiques lors de levés LiDAR sur l'ensemble de l'anse aux Coques et de levés au D-GPS sur le site de la recharge sédimentaire. Des échantillons de sédiments ont été récoltés aux mêmes endroits sur l'estran en 2014 et 2015 afin de quantifier l'évolution sédimentologique à la suite de la mise en place de la recharge sédimentaire. Pour connaître les conditions météo-marines et les changements sur l'estran, des caméras de suivi ont été installées à l'automne 2014.

3.1 Données topographiques

Les levés topographiques ont été réalisés entre le 11 août 2014 et le janvier 2016, avec un levé supplémentaire le 21 septembre 2012. Deux types de données topographiques ont été acquis, pour un total de 12 levés terrain (tableau 3). Les six levés LiDAR permettent de suivre la variabilité morphologique de l'ensemble de la surface de l'anse aux Coques et quantifier le bilan sédimentaire. Ensuite, six levés de profils topographiques permettent de suivre les changements sur le site de la recharge sédimentaire entre octobre 2014 et janvier 2016.

Tableau 3. Dates d'acquisition des données topographiques (LiDAR et D-GPS)

Date de levé	Type de levé	Couverture
21 septembre 2012	LiDAR	Anse-auxCoques
11 août 2014	LiDAR	Anse-auxCoques
23 octobre 2014	LiDAR	Anse-auxCoques
30 octobre 2014	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
4 novembre 2014	LiDAR	Anse-auxCoques
21 avril 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
12 juin 2015	LiDAR	Anse-auxCoques
15 octobre 2015	LiDAR	Anse-auxCoques
19 octobre 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
2 novembre 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
2 décembre 2015	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)
14 janvier 2016	Profils D-GPS	Recharge (13 profils)

3.1.1 Profils topographiques de la zone intertidale

Sur le site de la recharge sédimentaire, 13 profils de plage ont été réalisés au D-GPS à une fréquence de points de 0,5 m entre la ligne de rivage et la limite des basses mers inférieures de grandes marées (BMIGM (figure 2). Onze profils sont situés directement sur la recharge et 2 sont situés aux extrémités est et ouest. Un total de 91 profils de plage a été réalisé entre octobre 2014 et janvier 2016. La méthode des profils de plage est simple, mais elle est encore la plus utilisée dans la littérature pour connaître les changements morphologiques sur une plage (Baptista *et al.*, 2008; Dornbusch, 2010 ; Emery, 1961). Les principales limites morphologiques telles la ligne de rivage, la flexure séparant le haut et le bas estran et la base de la recharge sédimentaire sont notées afin d'assurer un suivi de ces limites. En complément aux levés topographiques LiDAR, les levés topographiques au D-GPS permettront de quantifier les changements morphologiques de la plage ainsi que d'identifier le déplacement des cordons de bas estran.



Figure 2. Localisation des profils topographiques réalisés au D-GPS entre le 30 octobre 2014 et le 14 janvier 2016

3.1.1.1 GPS-différentiel (D-GPS)

Le GPS-différentiel (D-GPS) utilisé est le Trimble R8 GNSS Modèle 3 incluant un émetteur/récepteur radio UHF interne de 430-450 MHz (figure 3A). Une radio Trimble HPB 430-450 MHz est utilisée en mode répéitrice, permettant de s'éloigner de 8 à 12 km de la base. La distance d'éloignement varie selon les conditions météo et les particularités topographiques du secteur. Le récepteur permet la poursuite des constellations GPS L2C et L5, GLONASS L1 et L2 ainsi que GALILEO (satellites expérimentaux GIOVE-A et GIOVE-B)

autant pour le récepteur de base que pour le mobile. Le carnet d'acquisition utilisé est le TSC3. Lors des relevés, le GPS-différentiel est utilisé en deux modes distincts, *RTK* et *enregistrement*. Le mode *RTK* est utilisé pour les points de contrôle et permet la correction en temps réel. Le temps d'acquisition de chaque point est de 5 secondes. Les fichiers sont ensuite téléchargés directement en fichiers de forme (*shapefiles*) compatibles au logiciel ArcGIS. Le mode *enregistrement* est utilisé pour créer le fichier d'observation de la base du Système mobile de LiDAR terrestre (SMLT). Les profils de plage sont réalisés en mode *topo continu* qui permet d'acquérir un point automatique à tous les 0,50m lors du déplacement avec le récepteur mobile. Ce mode permet d'installer le jalon du récepteur mobile sur une roue et améliorer considérablement la rapidité du temps d'acquisition. Dans le cadre de ce projet, l'ensemble des données acquises au D-GPS sont référencées sur le système de projection planimétrique NAD83 MTM6 et le système altimétrique CGVD28 avec le modèle de géoïde HT2.0.

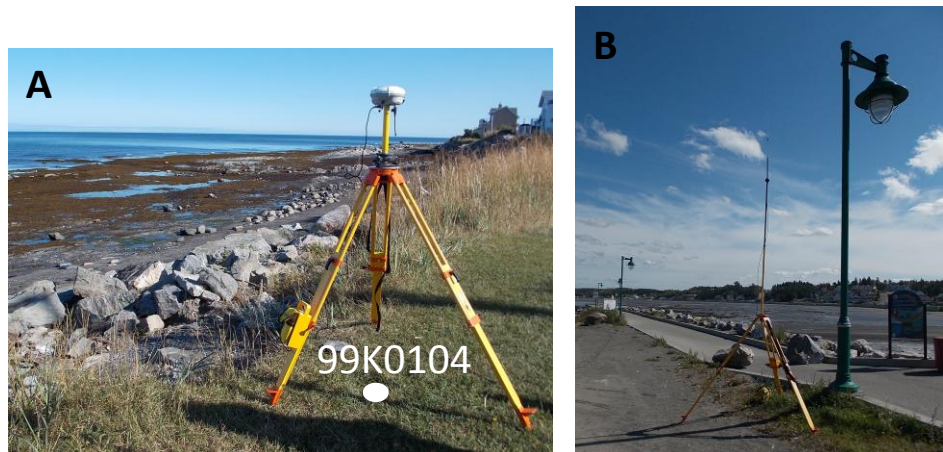


Figure 3. GPS-différentiel utilisé lors du projet à Longue-Pointe-de-Mingan. A. Récepteur de base R8; B. Radio (Trimble HPB 430-450 MHz)

3.1.2 Levé LiDAR terrestre

3.1.2.1 Instrumentation du SMLT

Le système mobile de laser terrestre (SMLT) est constitué de trois principales composantes montées dans la boîte arrière d'une véhicule tout-terrain: un scanneur laser, une caméra et un système de navigation inertiel GPS-INS (figure 4A). Le balayeur laser est un Riegl VQ-250 qui a une couverture de 360°. Ses caractéristiques techniques sont présentées au tableau 4 (Riegl, 2012). La portée minimale est de 1,5m et la portée maximale est de 130 m pour une surface réfléchive à 10% et de 380m pour une surface réfléchive à 80% (Riegl, 2012). Une caméra est utilisée en complément au capteur laser afin d'aider à l'interprétation du nuage de points. La caméra à capteur CCD est la PointGrey Grasshopper GRAS-50S5C-C à résolution de 2448 par 2048 pixels. Pour enregistrer les mouvements et la position du véhicule, un système de navigation inertiel GPS-INS est utilisé. Le système est composé d'un

IMU-17 Applanix et du POS LV 220 Applanix. La précision de navigation en post-traitement évaluée par le manufacturier est de 0.02m pour le positionnement horizontal (X, Y), 0.05m pour le positionnement vertical (Z), de 0.02° de roulis et tangage et de 0.025° pour l'angle d'azimut (Applanix, 2013). Ce système de navigation est composé de deux antennes GPS Trimble Zephyr model 2, d'une centrale inertielle (IMU) et d'un instrument de mesure de distance (DMI) (Figure 4A). Les données GNSS brutes sont enregistrées dans un petit ordinateur appelé POS System Computer (PSC) (Figure 4B). Deux antennes (primaire et secondaire) installées sur le véhicule à deux mètres de distance sont utilisées par le système GAMS (GNSS Azimuth Measurement Subsystem) afin d'augmenter la précision des données associées à la direction horizontale (azimut). Les constellations GPS et GLONASS sont utilisées. La centrale inertielle permet de corriger les angles de tangage, de roulis et de lacet. Pour corriger la trajectoire du système de navigation mobile par post-traitement des données GPS-INS, un récepteur de base statique Trimble R8 est positionné sur un point géodésique connu à moins de 15 km du site d'étude. Un DMI génère un certain nombre de pulsations à chaque rotation de la roue qu'il multiplie par un facteur d'échelle pour convertir les pulsations en distance parcourue en mètre. Le DMI est utilisé pour augmenter la précision du système ainsi qu'assurer la correction des données lors d'une courte perte de signal GPS ou GLONASS.

Tableau 4. Performance du scanneur et des mesures du LiDAR Riegl VQ-250

Performance du Laser Riegl VQ-250 (Riegl, 2012)	
Mécanisme	Miroir rotatif
Longueur d'onde	Proche infrarouge
Portée minimum	1.5m
Vitesse de scan	100 scans/sec
Fréquence maximum	300 000 mesures/sec
Résolution d'angle	0.001°
Exactitude	10mm
Précision	5mm
Résolution spatiale	7mm à l'ouverture 18mm à 50m 36mm à 100m
Température d'opération	-10°C à 40°C

Pour que le système inertiel mesure les mouvements des autres capteurs (laser et caméra), les instruments sont installés sur une seule structure en aluminium fixée par des joints anti-vibration dans la boîte arrière du véhicule tout-terrain (figure 4A). Les capteurs sont branchés à un ordinateur ainsi qu'à un multiplexeur Trimble M119 où converge l'information des différents instruments vers la plate-forme d'acquisition (Figure 4B). Un poste de contrôle permet d'effectuer l'acquisition des données à partir des logiciels Trimble T3D CAM Capture, Trimble T3D Laser Capture et Applanix LV POS View (Figure 4C). Le courant (power) provient d'une génératrice Honda 2000.

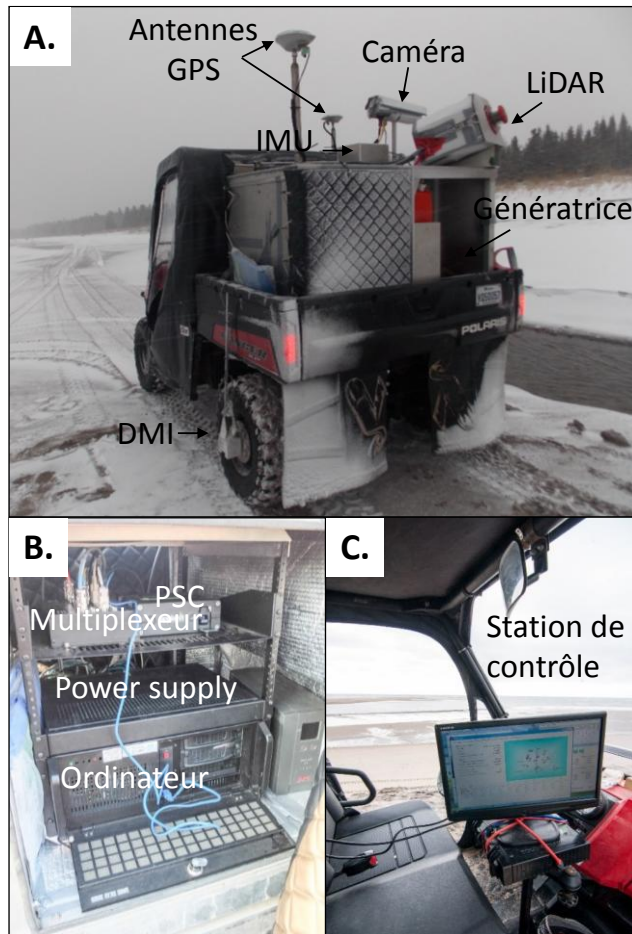


Figure 4. Système mobile de laser terrestre (A.) Installation des instruments sur une plate-forme fixée derrière le véhicule (DMI, antennes GPS, Caméra, LiDAR, Génératrice); (B.) Compartiment fermé à l'arrière contient l'ordinateur, le multiplex, le PSC et un power supply; (C.) Le poste de contrôle est situé à l'avant du véhicule du côté passager et comprend un écran d'ordinateur et un clavier.

3.1.2.2 Description du levé

Les levés terrain sont effectués au maximum de la période de marée basse afin de couvrir le plus de superficie de plage possible. Le levé est donc effectué environ 1h30 avant et 1h30 après la marée basse pour totaliser une période d'acquisition d'environ 3h. 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 30km couvert sur la durée d'une période de marée basse (3h). Afin de diminuer les zones d'occlusion sur le jeu de données, entre 1 et 3 passages sont effectuées de manière parallèle à la plage, selon les caractéristiques morphologiques de la plage. Afin de faciliter le traitement des données en diminuant le poids des fichiers LiDAR et d'imagerie, nous effectuons des lignes d'acquisition de 3 à 4 km. L'arrêt à tous les quelques kilomètres permet à l'opérateur de s'assurer de la bonne précision du système de navigation.

Même si nous connaissons l'erreur théorique du système, une validation des nuages de points est réalisé lors de tous les levés afin d'assurer un contrôle de qualité. Le contrôle de qualité des données LiDAR est effectué en calculant l'erreur de positionnement du nuage de points LiDAR par rapport à des points de contrôle acquis au D-GPS RTK Trimble R8 sur l'ensemble des sites d'étude à chaque levé. Pour assurer la qualité de comparaison entre les points de contrôle et les données LiDAR, la même base statique Trimble R8 est utilisée en simultanée pour les deux systèmes (SMLT et D-GPS mobile). L'acquisition de ces points de contrôle est réalisée par une équipe terrain complémentaire à l'équipe d'opérateurs du SMLT. Cette équipe doit couvrir le secteur d'étude avant le passage du SMLT afin d'assurer que l'ensemble du territoire balayé par le SMLT soit couvert de cibles. Chacun des points de contrôle acquis au D-GPS sont comparé verticalement (Z) avec les points correspondants sur le nuage de points LiDAR. Afin d'assurer une réelle concordance entre les points de contrôle et les points LiDAR, seulement les points de contrôle au sol sont utilisés.

3.2 Granulométrie

Des échantillons ont été prélevés le 30 octobre 2014 et le 2 novembre 2015. L'emplacement des échantillons a été positionné au D-GPS en 2014 afin d'assurer qu'ils soient récoltés exactement aux mêmes endroits en 2015. La localisation précise des échantillons est présentée dans les figures de résultats (figures 10 et 11). 17 échantillons ont été récoltés sur le haut estran et 11 échantillons sur le bas estran, ce qui totalise 56 échantillons pour les 2 années de suivi. L'ensemble des échantillons ont été récoltés sur les transects des profils topographiques réalisés entre le 30 octobre 2014 et le 14 janvier 2016.

3.3 Suivi photographique en continu

Un suivi photographique en continu permet une analyse qualitative des événements morphologiques et météo-marins sur la côte. Une caméra a été installée du 15 au 30 octobre 2014, pendant les travaux de la recharge sédimentaire. Trois caméras ont été installées le 18 novembre 2014 sur des poteaux existants sur la promenade de l'Anse-aux-Coques. Les caméras sont configurées pour prendre des photos à intervalle de 10 minutes du lever au coucher du soleil. En les combinant avec les données météorologiques et hydrodynamiques, les photographies permettent principalement de cibler les événements de tempêtes qui ont un impact sur la morphologie de la plage.

Tableau 5. Couverture de suivi des caméras de l'Anse-aux-Coques

Caméra	Couverture
Caméra 1 (clocher de l'Église)	15 au 30 octobre 2014
Caméra 2 (ouest)	18 novembre 2014 à présentement
Caméra 3 (centre)	18 novembre 2014 à présentement
Caméra 4 (est)	18 novembre 2014 à présentement



Figure 5. Localisation et vue des caméras de suivi installées à l'anse aux Coques

4. Traitement et analyse des données

4.1 Profils topographiques

Les profils topographiques permettent de connaître l'évolution de la morphologie de l'estran et de déterminer s'il y a des échanges sédimentaires entre le haut et le bas de l'estran. L'évolution en 2 dimensions des profils topographiques a été réalisée à partir de l'extension ArcGIS 3D Analyst et Excel. L'enveloppe minimale et maximale a été calculée à partir de MATLAB.

4.2 Traitement des levés surfaciques de l'estran par le système mobile de laser terrestre

Préalablement au levé de terrain LiDAR, une calibration dynamique des instruments a été réalisée. D'abord, tous les capteurs (antennes GNSS, laser, camera) sont référencés au IMU puisqu'il est le centre de référence de la navigation. Les bras de levier sont mesurés et sont intégrés dans le logiciel d'acquisition LV POS View. Les angles de visée (roulis, tangage, lacet) sont calculés à partir d'une méthode manuelle utilisant des points de contrôle au D-GPS ou une méthode automatique avec des surfaces planes de différents angles.

4.2.1 Processus du traitement des données

Ensuite, le workflow des données LiDAR est constitué de trois grandes étapes : le levé terrain (voir section 3.1.2), le post-traitement et le traitement (figure 6).

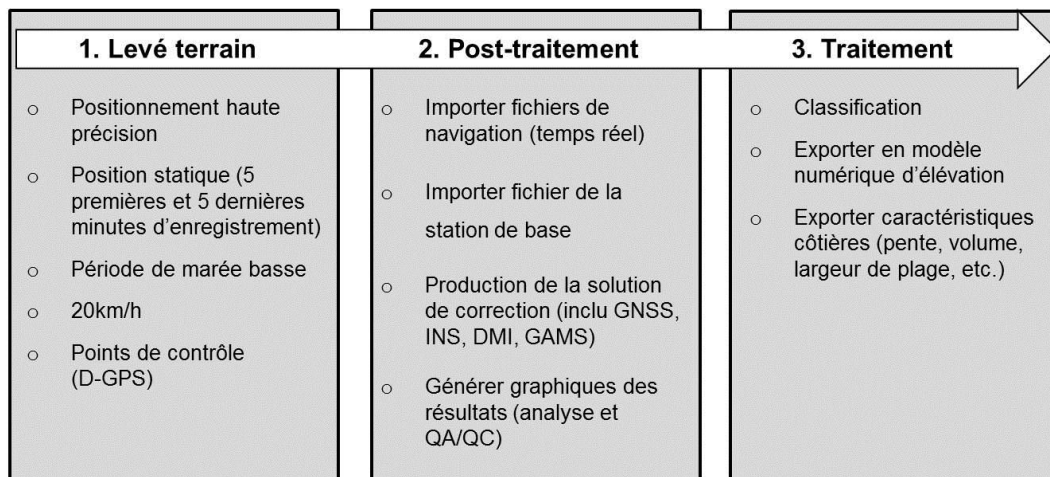


Figure 6. Workflow de l'acquisition et du traitement des données du SMLT

La synchronisation des données GNSS-INS et la correction de la trajectoire sont effectuées par le logiciel PosPAC MMS. Ce logiciel permet d'obtenir un maximum de précision sur le géoréférencement des capteurs utilisant des données GNSS-INS. PosPAC MMS permet de :

- Importer des données de navigation et des capteurs acquises en temps réel,
- Importer les données de la station de base
- Produire une solution de correction incluant les données GNSS, INS, DMI et GAMS et les traiter dans les deux directions
- Générer des graphiques des résultats de précision de positionnement et navigation

Le logiciel permet donc de connaître les erreurs de positionnement (X, Y, Z) et de navigation (caractéristiques GNSS) en fonction du temps GPS lors du levé. La solution de post-traitement GNSS-INS est ensuite appliquée à la trajectoire accompagnant les nuages de points LiDAR et les séquences d'images grâce à une fonction disponible dans le logiciel Trimble Trident Analyst. Les trajectoires corrigées sont importées dans le système de coordonnées désiré soit le NAD83(SCRS), dans la projection MTM (Modify Transverse Mercator) en planimétrie et dans le modèle de géoïde HT2.0 en altimétrie.

Une classification est effectuée afin d'extraire les points non voulus tel que les débris ligneux, les structures anthropiques présents sur la plage et garder seulement les points au sol. La classification est réalisée dans un premier temps dans le logiciel Trident à partir des valeurs de l'intensité de retour. Afin de faciliter l'extraction de caractéristiques côtières telles que la pente, la largeur de l'estran et le volume de sédiments, les nuages de points LiDAR sont généralement transformés en modèle numérique de terrain (MNT). La résolution spatiale élevée des nuages de points permet de créer des MNT à une résolution spatiale élevée et ainsi conserver la variabilité micro-topographique. Pour chacun des levés LiDAR effectué, un modèle numérique de terrain (MNT) est généré à une résolution spatiale de 0,50 m. La haute résolution spatiale des nuages de points LiDAR permet d'utiliser une méthode d'interpolation simple de réseau de triangle irrégulier (TIN) pour générer les surfaces. Ces modèles numériques sont des surfaces topographiques qui facilitent l'utilisation des données LiDAR pour extraire des résultats, notamment pour le calcul du volume sédimentaire. L'extension *LP360* de QCoherent utilisée dans le logiciel ArcGIS permet d'exporter les fichiers de points LAS 1.2 en surfaces topographiques. La classification est appliquée afin que seulement les données au sol soient utilisées pour constituer la surface topographique. Les modèles numériques de terrain sont disponibles avec les données fournies avec ce rapport dans le dossier LiDAR (surface). La marge d'erreur utilisée est présentée à la section suivante (4.2.1.2).

4.2.2 Calcul d'erreur du SMLT

4.2.2.1 Erreur théorique

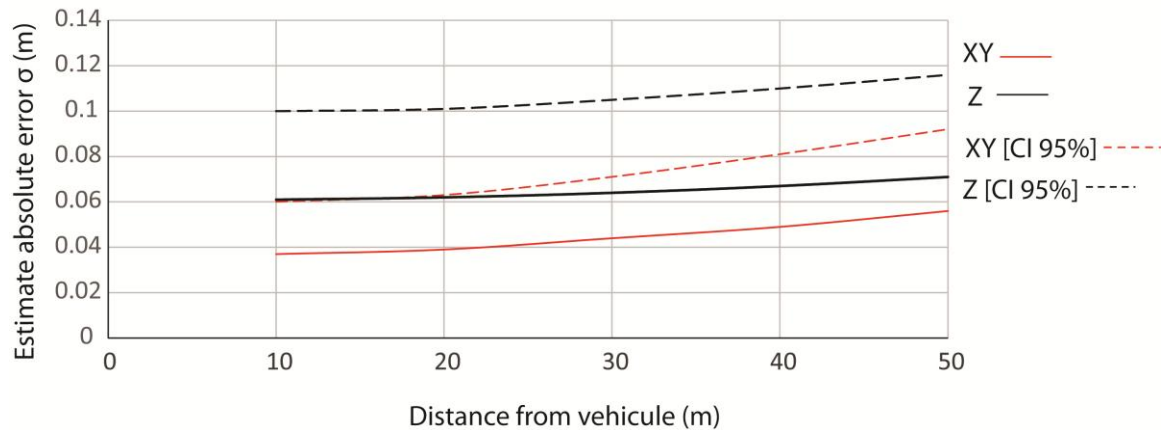
L'erreur utilisée est constante pour l'ensemble des levés puisqu'elle est théorique et prend en considération l'erreur intrinsèque associée aux instruments principaux, soit le LiDAR et le système de navigation inertielle ainsi que l'erreur de navigation fourni par le fabricant. Cette erreur est estimée à partir du modèle de propagation de Trimble qui utilise les caractéristiques des instruments de navigation POS-LV 220 et le LiDAR Riegl VQ-250 (Trimble, 2013). Ce modèle prend en compte 5 éléments en fonction de la distance entre le véhicule et la cible : 1) erreur de positionnement estimée en X et Y ; 2) erreur de positionnement estimée en Z ; 3) erreur de positionnement estimée en roulis, tangage et lacet ; 4) erreur estimée dans la mesure des bras de levier (décalage entre les capteurs et le IMU) ; 5) portée estimée du laser et les erreurs d'angle (Trimble, 2013).

Le modèle de propagation se traduit par la formule suivante (Trimble, 2013)

(1)

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + R_b^m(H_I, R_I, P_I) \cdot \begin{bmatrix} R_l^b(B_{XL}, B_{YL}, B_{ZL}) \cdot \begin{bmatrix} r_L \cdot \cos(\theta_L) \cdot \cos(\varphi_L) \\ r_L \cdot \sin(\theta_L) \cdot \cos(\varphi_L) \\ r_L \cdot \sin(\varphi_L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

La figure 7 montre les résultats du modèle de propagation de l'erreur estimée en fonction de la distance entre le véhicule et la cible.



Source : selon Trimble (2013)

Figure 7. Propagation de l'erreur estimée XY et Z (σ) par le modèle de propagation Trimble (2013) en fonction de la distance (m) entre le véhicule et la cible

Dans le cadre des levés côtiers, cette erreur est généralement assez faible en raison de l'environnement ouvert de la zone côtière qui permet une excellente qualité de la réception GNSS, ce qui évite une perte de signal lors du levé et assure un bon PDOP. En effet, à l'exception de sites d'étude qui bordent des falaises côtières, le signal GPS n'est pas dégradé par de hauts éléments tels que des bâtiments ou des arbres comme certains auteurs observent en milieu urbain (Haala *et al.*, 2008). Pour tous les levés présentés, presque l'ensemble du temps de navigation présente un PDOP de moins de 2.5, ce qui est considérée comme une valeur idéale d'après Puente *et al.* (2013).

4.2.1.2 Erreur calculée

L'erreur calculée est la différence entre les points de contrôle et les points LiDAR (voir section 4.2.1.1). Pour chacun des levés l'erreur (RMS delta) est présentée au tableau 6. Le RMS des 6 levés réalisés à l'anse aux Coques varie entre 0,019m et 0,064m et le RMS calculé sur l'ensemble des points de contrôle, indépendamment des levés, est de 0,039m. L'erreur calculée a été utilisé dans le traitement de données, notamment pour calculer la marge d'erreur des volumes sédimentaires de l'estran.

Tableau 6. Erreur calculée pour chacun des levés LiDAR effectué entre 2012 et 2015 à l'anse aux Coques

Date de levé	Nombre de points	RMS delta Z (m)	Étendue delta Z (m)
21 septembre 2012	48	0.019	-0.063 à 0.029
11 août 2014	6	0.064	-0.081 à -0.051
23 octobre 2014	23	0.05	-0.083 à -0.035
4 novembre 2014	14	0.06	-0.094 à -0.001
12 juin 2015	17	0.033	-0.58 à 0.002
15 octobre 2015	16	0.029	-0.065 à 0.009
Total	124	0.039	-0.094 à 0.029

4.2.3 Changements morphologiques

4.2.3.1 Volume sédimentaire

D'abord, le volume sédimentaire du haut estran a été calculé pour 60 compartiments de 50 mètres de largeur linéaire côtière pour chaque levé d'acquisition LiDAR. Les calculs ont été effectués dans l'extension *3D Analyst* du logiciel *ArcGIS 10.2*. Le niveau de base de référence utilisé pour le calcul du volume est -1,58 m, ce qui équivaut au niveau des basses mers moyennes (BMM) à la station marégraphique de Rimouski (#2985) (figure 8). Puisque les zones n'ont pas la même superficie, le volume a été normalisé par la surface, c'est-à-dire que le volume est exprimé en m³ pour chaque m² (m³/m²) sur l'estran. Cette méthode

permet de comparer ensuite les zones entre elles, et de comparer l'évolution d'une même zone dans le temps. Un tableau contenant l'ensemble des données de volume bruts et de volume surfacique ainsi que les marges d'erreur associées à chaque valeur est présenté en annexe. La marge d'erreur utilisée est l'erreur absolue calculée en altitude sur les données LiDAR (Z) (voir section 4.2.2.2). Par exemple, pour un volume de $2,97\text{m}^3$, la marge d'erreur pourrait être de $0,05\text{m}$ et serait exprimée de la façon suivante : $2,97\text{m}^3/\text{m}^2 (\pm 0,05\text{m})$ et qui correspondrait à un volume brut de $2294,08\text{m}^3 (\pm 38,67\text{m}^3)$.

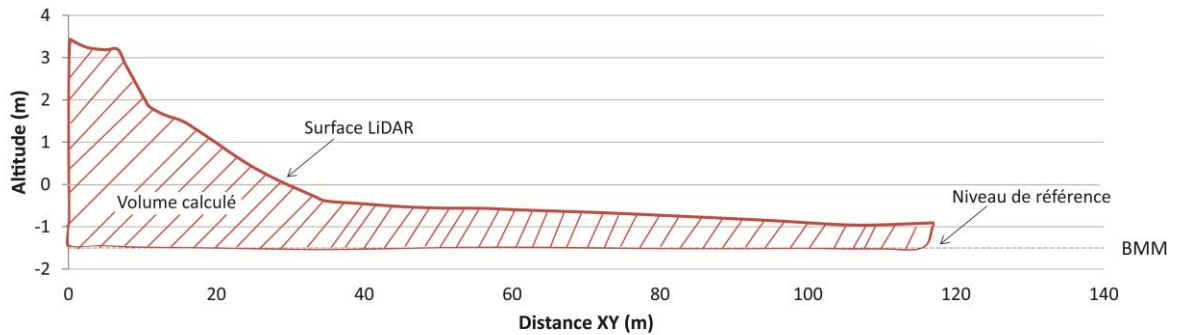


Figure 8. Aperçu du volume calculé entre la surface LiDAR et le niveau de référence pour une tranche 2D de l'estran

4.2.3.1 Différentiel topographique

Afin d'observer les zones d'érosion et d'accumulation, la différence topographique a été calculée en soustrayant deux surfaces d'élévation, soit une récente à une plus ancienne. L'incertitude des deux levés LiDAR utilisés doit être prise en compte pour connaître la marge d'erreur associée à la surface différentielle. Pour calculer la propagation de l'erreur entre les levés, plusieurs auteurs (Brasighnton *et al.*, 2003 ; Montreuil *et al.*, 2014 ; Wheaton *et al.*, 2010) utilisent la formule suivante :

(2)

$$\delta_{\text{différentiel}} = \sqrt{(\delta z_{\text{récent}})^2 + (\delta z_{\text{ancien}})^2}$$

Où $\delta_{\text{différentiel}}$ est l'erreur propagée sur la surface différentielle, $\delta z_{\text{récent}}$ est l'erreur LiDAR levé le plus récent et δz_{ancien} l'erreur du levé le plus ancien utilisé.

L'erreur utilisée pour chaque levé est le RMS présenté au tableau 6. Pour chacune des surfaces différentielles, le résultat de l'erreur propagée est comme marge d'erreur et les différences à l'intérieur de la marge d'erreur n'apparaissent pas sur les figures afin d'éviter d'interpréter les changements non significatifs comme des changements morphologiques. Le tableau 7 présente la marge d'erreur pour chacun des différentiels topographiques

utilisés dans le cadre de ce rapport. Cette marge d'erreur est aussi représentée par des barres d'erreur sur les digrammes de changements volumétriques.

Tableau 7. Erreur propagée pour les 8 surfaces de différentiels utilisées

Différentiel	Date surface ancienne	Erreur ancien (m)	Date surface récente	Erreur récente (m)	Erreur du différentiel (m)
1	21 septembre 2012	0.019	11 août 2014	0.06	0.062
2	11 août 2014	0.06	23 octobre 2014	0.05	0.078
3	23 octobre 2014	0.05	4 novembre 2014	0.06	0.078
4	4 novembre 2014	0.06	12 juin 2015	0.033	0.068
5	12 juin 2015	0.033	15 octobre 2015	0.029	0.043
6	21 septembre 2012	0.019	15 octobre 2015	0.029	0.035
7	11 août 2014	0.06	15 octobre 2015	0.029	0.067
8	23 octobre 2014	0.05	15 octobre 2015	0.029	0.058

4.3 Granulométrie

L'ensemble des échantillons a été analysé en laboratoire afin de déterminer le pourcentage de représentativité de chacune des tailles granulométriques à l'intérieur des échantillons récoltés. La fraction grossière (>2mm) et la fraction fine (<2mm) ont d'abord été séparées à l'aide d'un tamis de 2mm. La matière organique et les coquilles ont été enlevées à la main pour les échantillons ne contenant pas de limons et d'argile. Pour ces derniers, un traitement à l'acide chlorhydrique, au peroxyde d'hydrogène et à l'ammoniac a permis la destruction de la matière organique. L'analyse de la fraction grossière a été réalisée par la méthode de tamisage à sec avec 10 tamis de tailles différentes (2mm ; 2,36mm ; 2,8mm ; 3,35mm ; 4mm ; 4,75mm ; 6,3mm ; 8mm ; 9,5mm et 11,2 mm). Chaque tamis a ensuite été pesé et le pourcentage de représentation de chacune des tailles granulométriques des échantillons a été pris en note. L'analyse de la fraction fine a été réalisée à l'Institut des Sciences de la Mer de Rimouski (ISMER). D'abord, les sous-échantillons ont été mélangés à de l'eau et du calgon afin de disperser les particules et ont ensuite été culbutés dans un agitateur rotatif pendant 3 heures. Une deuxième phase de dispersion a eu lieu dans le séparateur de particule *LS 13320 Beckman-Coulter Particle Size Analyser*. Le pourcentage de représentation de chacune des tailles granulométriques à l'intérieur du sous-échantillon est alors connu. Le logiciel Gradistat (Plott, 2000) a été utilisé pour calculer les statistiques granulométriques des échantillons. L'échelle granulométrique utilisée pour différencier les classes granulométriques par Gradistat est modifiée de Edden (1914) et Wentworth (1922) (figure 9).

Taille des grains		Description	
phi	mm		
-10	1024	Très large	Bloc
-9	512	Large	
-8	256	Moyen	
-7	128	Petit	
-6	64	Très petit	
-5	32	Très grossier	Gravier
-4	16	Grossier	
-3	8	Moyen	
-2	4	Fin	
-1	2	Très fin	
0	1	Très grossier	Sable
1	500	Grossier	
2	250	Moyen	
3	125	Fin	
4	63	Très fin	
5	31	Très grossier	Limon
6	16	Grossier	
7	8	Moyen	
8	4	Fin	
9	2	Très fin	
		Argile	

Figure 9. Échelle granulométrique utilisée par le logiciel Gradistat (modifiée de Udden (1914) et Wentworth (1922))

5. Résultats et analyse

5.1 Suivi de la sédimentologie des sédiments de l'estran

Le suivi sédimentologique permet l'analyse de l'évolution de la taille granulométrique de la plage à la suite de la mise en place de la recharge sédimentaire. Les cartes des figures 10 et 11 spatialisent l'évolution sédimentologique de l'estran entre 2014 et 2015. Les diagrammes montrent le pourcentage représenté pour les grandes classes sédimentologiques pour chaque échantillon (voir charte de la figure 8). En 2014, des échantillons ont été prélevés directement dans les matériaux de la recharge et les résultats de ceux-ci sont indiqués dans les diagrammes avec un «R» dans la partie supérieure droite (photographie 1).



Photographie 1. Échantillon prélevé directement dans la recharge en 2014.

La figure 10 montre la texture des sédiments de 17 échantillons récoltés sur le haut estran le 30 octobre 2014, quelques jours suivant la recharge sédimentaire et le 2 novembre 2015, un an après la recharge. Tout d'abord, regardons les échantillons prélevés aux extrémités de la recharge (profils 1 et 13). Lors de la mise en place de la recharge sédimentaire, le profil 1 était situé à la limite de l'infrastructure devant une section qui servait de passage pour les camions sur un remblai temporaire. Ce remblai a été démantelé à la fin des travaux. La plage était composée principalement de sable fin et moyen en 2014 (P1-HE-1) alors qu'en 2015 au même emplacement, la plage est dominée par la fraction de gravier grossier et de sable fin à grossier. Toujours pour le profil 1, la partie inférieure de la plage près de la flexure entre le haut et le bas estran (P1-HE-2), était composée en 2014 principalement de gravier grossier tandis qu'en 2015 cette dernière fraction domine toujours mais en association avec du sable grossier. Le profil 13 est situé à environ 50 m de l'extrémité est de la recharge. On constate qu'en 2014 l'ensemble de la plage était constitué principalement de sable moyen à fin (P13_HE-1 et 2). En 2015, la fraction de gravier grossier est dominante. L'échantillon récolté sur la partie inférieure de la plage possède toujours une fraction un peu plus grossière où la fraction de gravier grossier atteint 75 % de l'échantillon en 2015 (P13_HE-2) alors que cette fraction était absente en 2014. Les caractéristiques sédimentologiques du profil 13 en 2015 sont ainsi similaires à la composition sédimentologique des échantillons situés devant la recharge. On constate donc un déplacement vers l'est des matériaux qui sont érodés de la recharge. Ceci n'est pas surprenant puisqu'il existe une dérive littorale convergente dans l'anse aux Coques, c'est-à-dire que selon les conditions de vagues, la dérive principale des sédiments peut être aussi bien vers l'est que vers l'ouest.

Les échantillons récoltés directement sur la recharge sédimentaire en 2014 étaient principalement constitués de gravier, à environ 50% de gravier fin et moyen (8 à 16mm) et à environ 50% de gravier grossier (16 à 45mm). Durant l'année suivant la mise en place de la recharge, le front de l'infrastructure a reculé de plusieurs mètres. En 2015, les échantillons ont été récoltés aux mêmes endroits, mais suite au recul du front de l'infrastructure, ces échantillons étaient alors situés sur le haut estran, devant la recharge sédimentaire. Ces échantillons contiennent toujours une grande proportion de gravier en 2015, mais les fractions granulométriques sont plutôt mixtes, contenant plus de 50% de sable pour trois échantillons sur 5 (à l'exception de P3_HE-1 et P12_HE1).

Les échantillons récoltés sur le haut estran devant la recharge sédimentaire en 2014 était principalement composés de sable fin et moyen (voir photographie 2), à l'exception de l'échantillon P11_HE-1 où la fraction de gravier grossier était dominante. En 2015, le portrait a complètement changé puisque les échantillons étaient composés presque exclusivement de gravier, dont une grande proportion de gravier grossier (>16mm).



Photographie 2. Texture des sédiments sur le haut estran en 2014.

Le bas estran est principalement composé de sable fin avec une petite proportion de sable moyen et de limon-argile (figure 11). La lithologie du bas estran est homogène, il ne semble pas avoir de gradient est-ouest ou bas-haut (photographies 3 et 4). Dans l'ensemble, la taille granulométrique des sédiments du bas estran a très peu évolué entre 2014 et 2015. La recharge en matériaux grossiers du haut estran ne semble pas avoir eu d'influence sur la taille granulométrique des sédiments du bas estran.



Photographie 3. Vue d'ensemble du bas estran devant la recharge sédimentaire en 2014.



Photographie 4. Texture des sédiments typique du bas estran de l'anse aux Coques en 2014

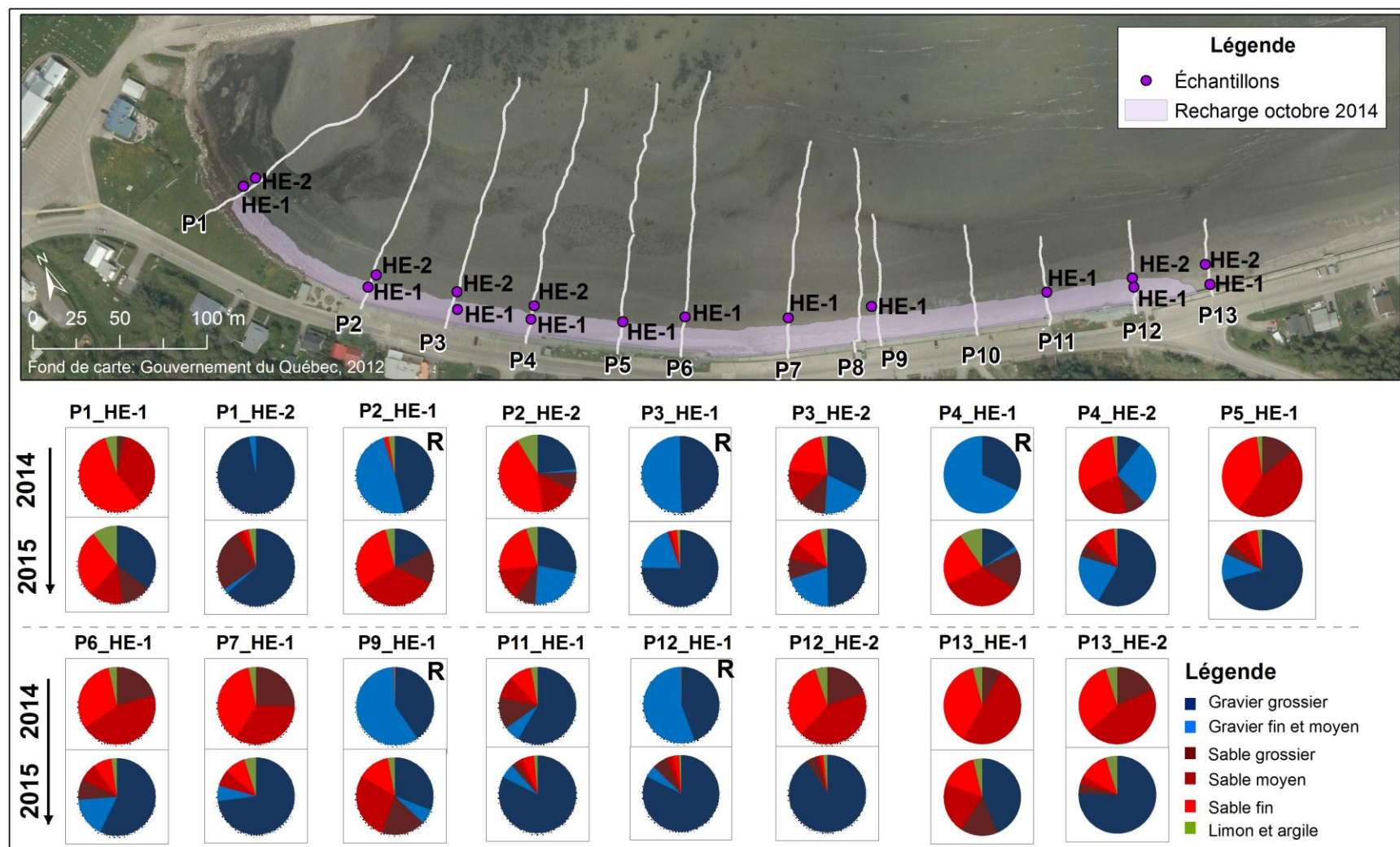


Figure 10. Évolution sédimentologique du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2015. (Les diagrammes contenant un R indique qu'ils ont été récoltés sur la recharge sédimentaire)

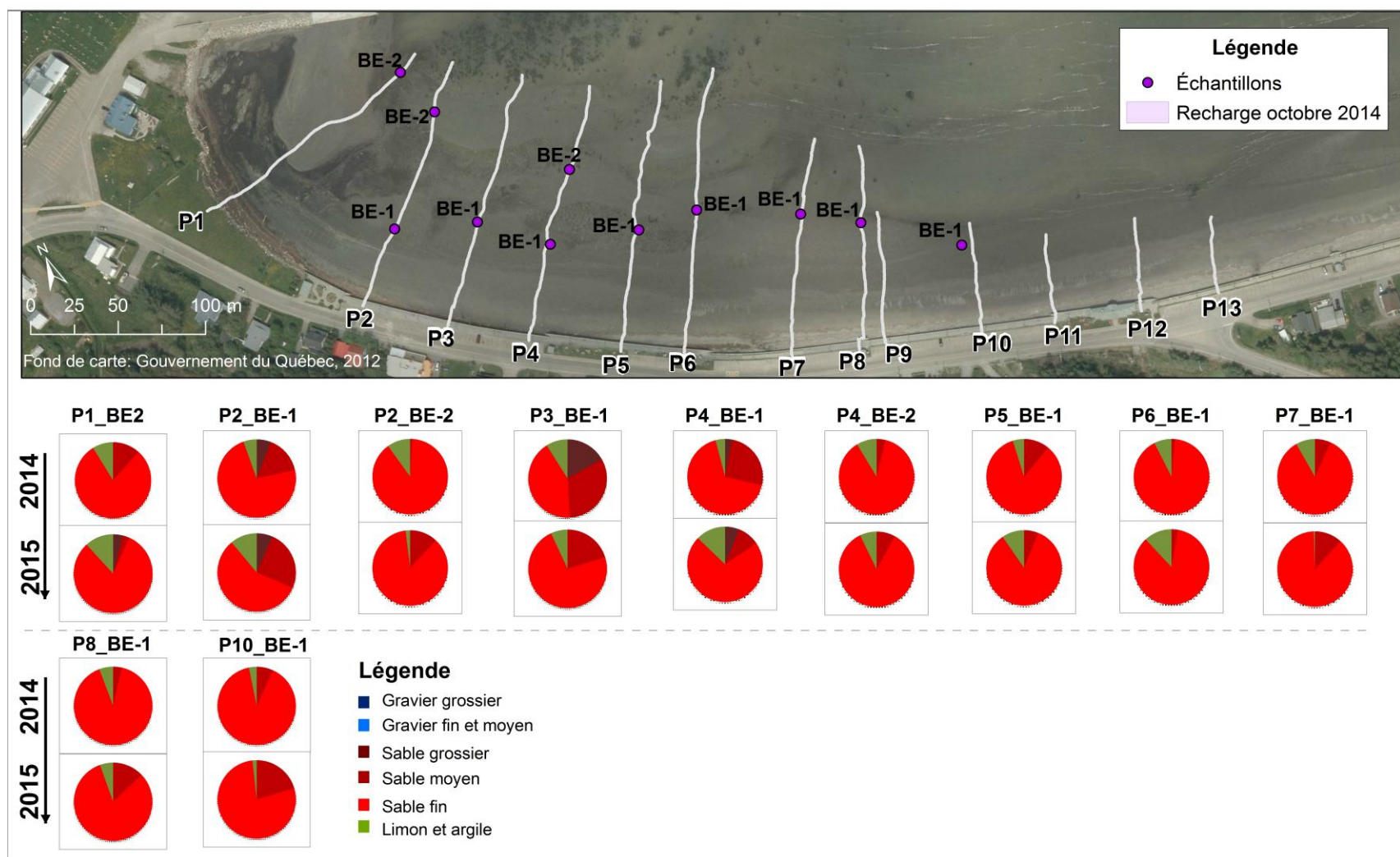


Figure 11. Évolution sédimentologique du bas estran de la zone de la recharge sédimentaire entre 2014 et 2015

5.2 Volume sédimentaire du haut estran

Les résultats du volume sédimentaire calculé sur le haut estran pour les 6 levés LiDAR entre 2012 et 2014 sont présentés à la figure 13. Les résultats sont exprimés en volume normalisé par la surface, soit en m^3/m^2 .

Les résultats montrent l'important gain sédimentaire du haut estran suite à la mise en place de la recharge sédimentaire en octobre 2014. De plus, on constate sur les résultats des levés du 21 septembre 2012 et du 11 août 2014, que le secteur de la recharge sédimentaire présentait une disponibilité sédimentaire faible comparativement aux autres secteurs de l'anse aux Coques. Il y a une variabilité importante autour du compartiment SL-25, qui correspond à la présence d'un ruisseau qui s'écoule sur l'estran. Pour l'ensemble des levés, il y a une faible disponibilité sédimentaire du haut estran aux compartiments 49 et 50. Le volume sédimentaire de la portion est de l'anse aux Coques semble assez stable sur l'ensemble des levés.

Pour les levés du 23 octobre 2014 au 15 octobre 2015, le volume de la recharge sédimentaire est incluse dans le volume calculé pour les compartiments 3 à 15. Un volume complet a été calculé pour cette zone sur chacun des levés (figure 12). Durant cette période, il y a une érosion constante du volume de sédiments de la zone de la recharge sédimentaire, passant de $3,48\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05\text{m}$) à $3,09\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,029\text{m}$). Le volume de la zone de la recharge du 15 octobre 2015 ($3,09\text{m}^3/\text{m}^2 \pm 0,029\text{m}$) correspond à environ la moitié du volume qui sépare l'avant et l'après mise en place de l'infrastructure entre le 11 août 2014 ($2,80\text{m}^3/\text{m}^2 \pm 0,064\text{m}$) et le 23 octobre 2014 ($3,48\text{m}^3/\text{m}^2 \pm 0,05\text{m}$).

L'évolution volumétrique est présentée dans la section 5.3 en fonction des périodes entre les levés topographiques réalisés au LiDAR.

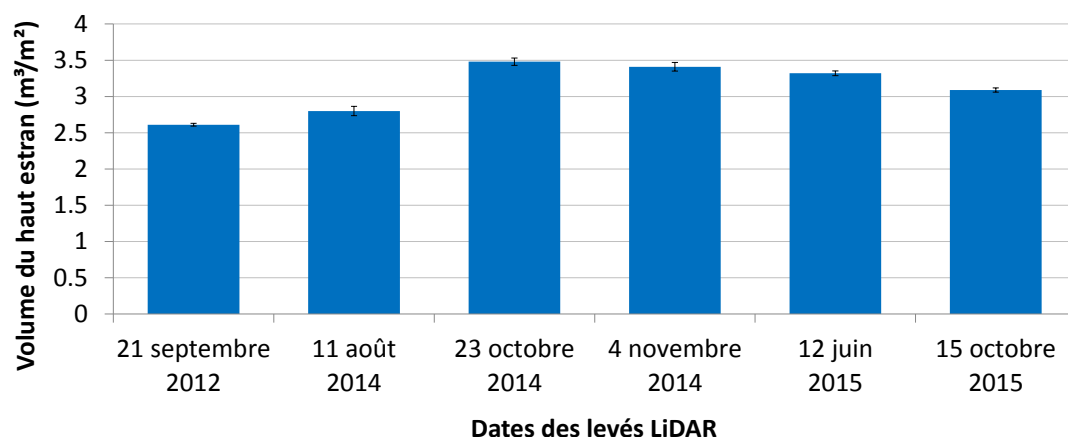


Figure 12. Volume sédimentaire du haut estran (m^3/m^2) pour le secteur de la recharge sédimentaire (compartiments SL-03 à SL-15).

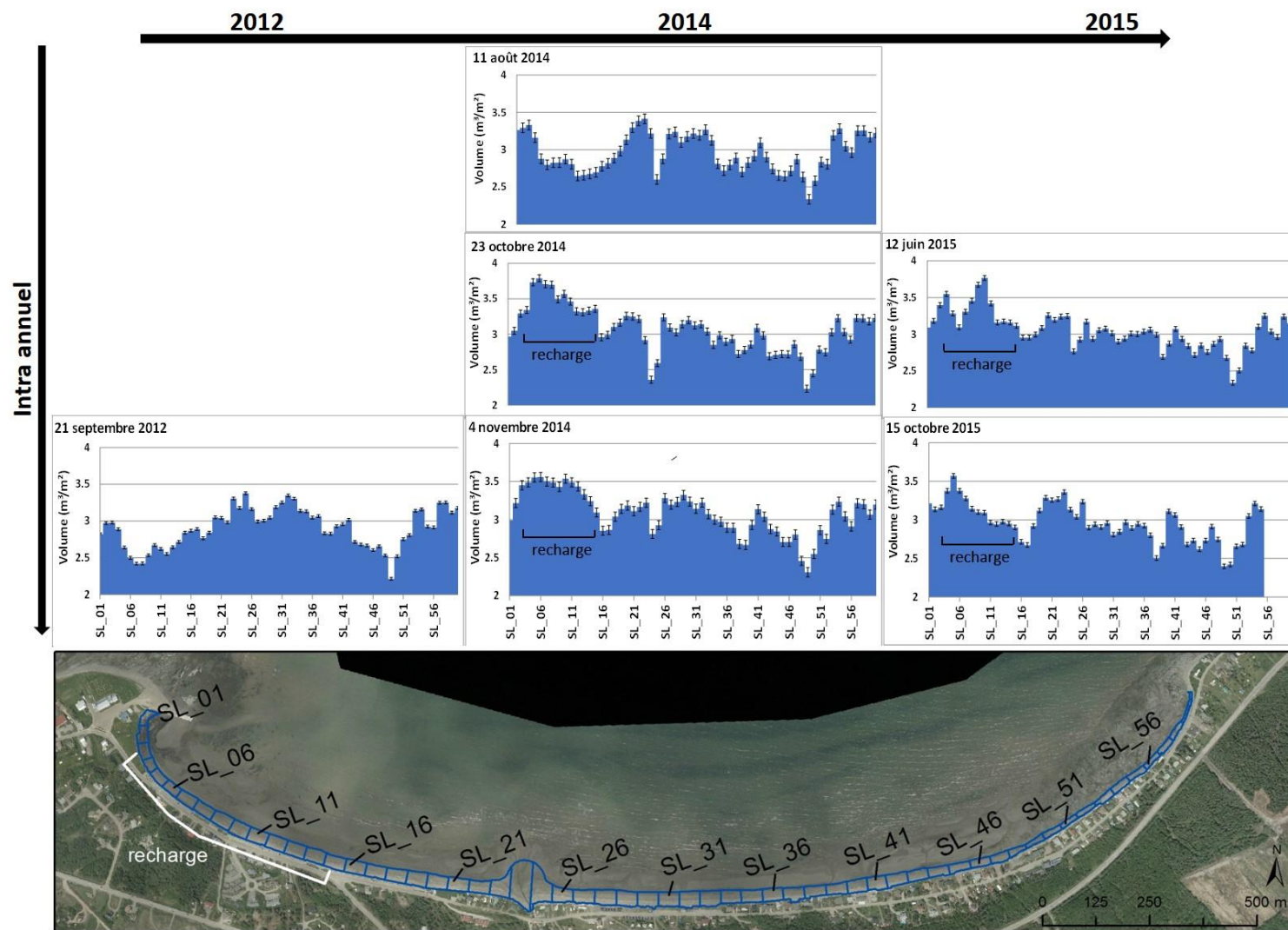


Figure 13. Volume sédimentaire (m³/m) du haut estran calculé pour les 60 compartiments des 6 levés LiDAR

5.3 Évolution de la topographie et du volume sédimentaire de l'estran de l'anse aux Coques

Afin de comprendre la dynamique sédimentaire de l'anse aux Coques à la suite de la recharge en sédiments grossiers, sept périodes d'analyses sont présentées. Ces périodes permettent de quantifier l'évolution topographique et volumétrique de l'estran ainsi que d'identifier les conditions météo-marines qui ont contribué à la dynamique sédimentaire. Seulement quelques profils topographiques sont présentés dans l'analyse, mais l'ensemble des profils sont présentés en annexe 1 du document.

5.3.1 Période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014

La période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014 est la période la plus longue entre deux levés s'étalant sur près de 2 ans (689 jours). Cette période permet d'avoir un aperçu de la dynamique sédimentaire avant la mise en place de la recharge sédimentaire en octobre 2014. Les changements topographiques montrent une grande zone d'accumulation sur le haut estran devant le muret dans la partie ouest de l'anse (figure 14). La zone d'accumulation s'étant du quai jusqu'au compartiment SL-13, atteignant près de $0,5\text{m}^3/\text{m}^2$ d'accumulation pour plusieurs compartiments. Devant cette zone, une zone d'érosion linéaire est visible sur le bas estran, près de la limite de la flexure de la plage. Le ruisseau a entraîné une érosion de la plage durant cette période (SL-24 et SL-25). En aval de l'exutoire du ruisseau, une zone d'accumulation sur le bas estran et une zone de faible érosion se partagent l'espace en fonction de la dynamique du ruisseau. Il est aussi possible d'observer quelques zones d'érosion, notamment sur le bas estran où des cordons sableux semblent avoir migré entre les deux levés. De manière générale, il semble y avoir eu un transfert de sédiments du bas estran vers le haut estran entre les deux périodes.

À l'est du ruisseau, une zone d'érosion d'environ 500 mètres est visible sur le bas estran, immédiatement au bas de la flexure de la plage. Les volumes sédimentaires montrent une érosion marquée du haut estran entre les compartiments SL-31 à SL-39 atteignant une érosion maximale de $0,5\text{m}^3/\text{m}^2$. Le secteur le plus à l'est (SL-46 à SL-60) semble être le moins dynamique et montre une faible accumulation sédimentaire sur le haut estran. Par contre, les volumes accumulés sont en partie à l'intérieur de la marge d'erreur. Cette stabilité peut s'expliquer par la présence d'un bas estran qui devient rocheux en allant vers l'est ce qui contribue à diminuer les échanges sédimentaires possibles entre les haut et bas estrans, contrairement au reste de l'anse où le bas estran est sableux.

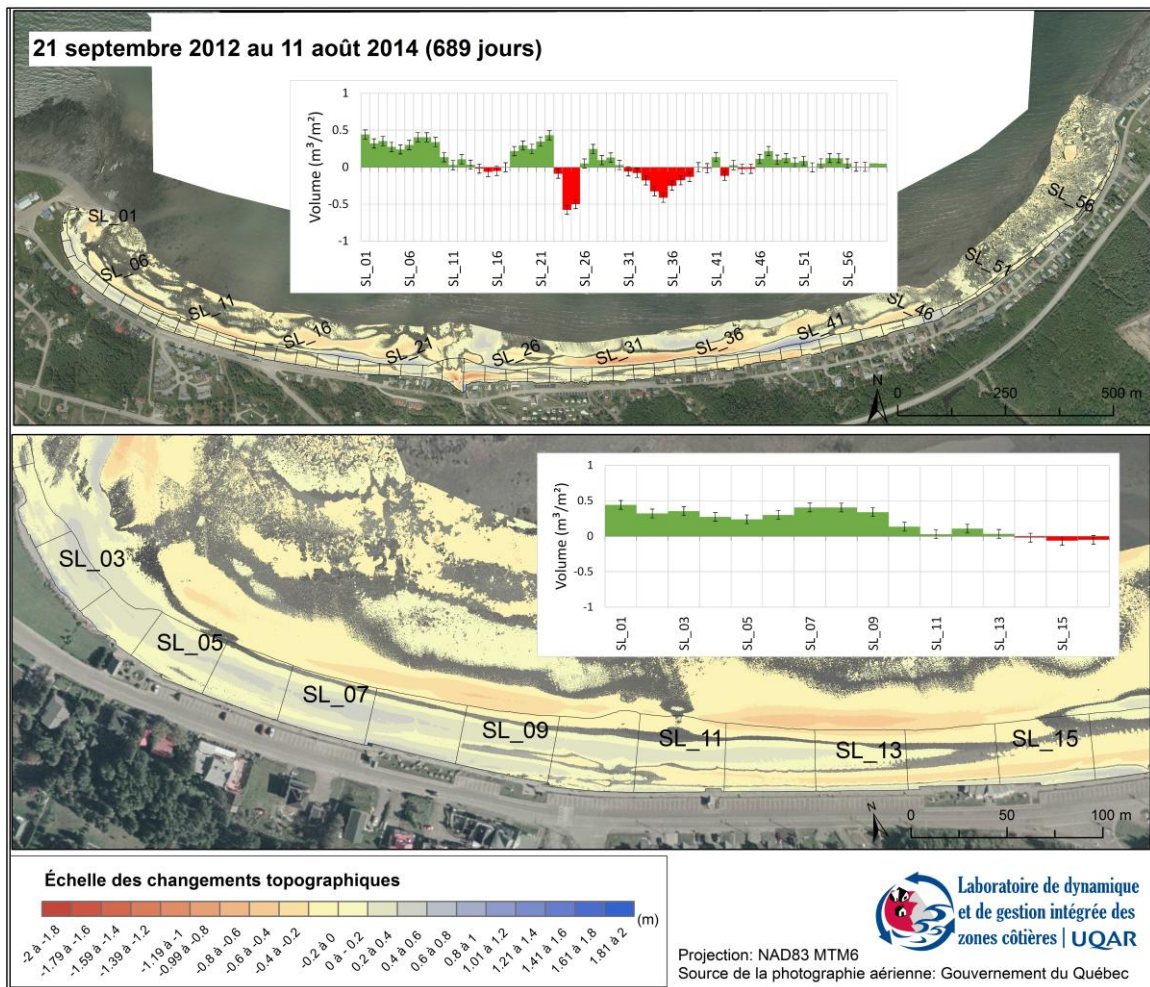


Figure 14. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 21 septembre 2012 au 11 août 2014

5.3.2 Période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014

La période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014 correspond à la période pré et post-recharge sédimentaire. Les travaux de recharge sédimentaire ont eu lieu du 15 au 23 octobre 2014. Durant cette période, il y a eu trois périodes de marées de vives eaux, mais aucun niveau d'eau exceptionnel n'a été mesuré (figure 15). Les photographies de la figure 16 montrent l'évolution des travaux entre le 15 octobre 2014 et le 23 octobre 2014.

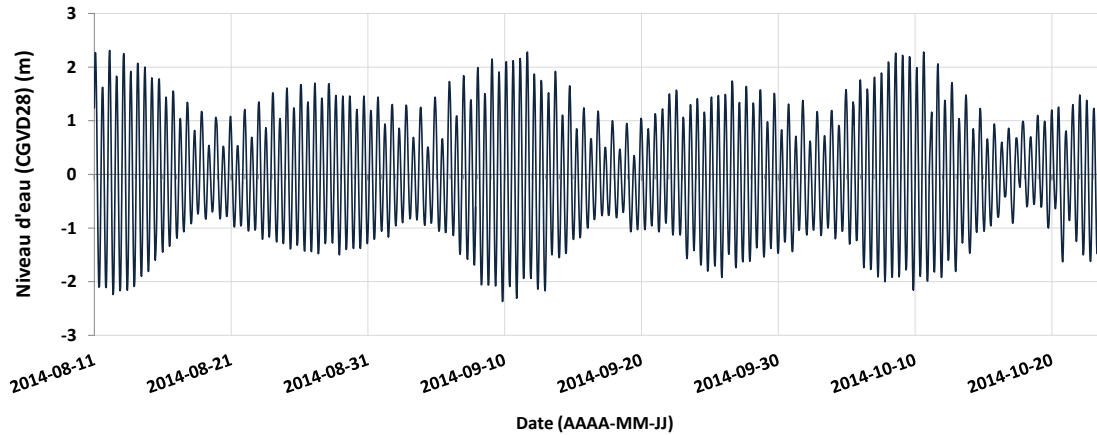


Figure 15. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2014



Figure 16. Évolution des travaux de recharge sédimentaire entre le 15 et le 23 octobre 2014 à l'anse aux Coques

Le bas estran de l'ensemble de l'anse aux Coques a subi une faible accumulation, principalement à l'aval de l'embouchure du ruisseau. Entre le 11 août 2014 et le 23 octobre 2014, le secteur entre les compartiments SL-03 et SL-15 présente une forte accumulation sur le haut estran en raison de l'ajout d'un important volume de sédiments grossiers (figure 17). Le volume net de sédiments entre août 2014 et octobre 2014 correspond à un gain de 8837m^3 , ce qui correspond environ au volume d'ajout prévu lors de la recharge sédimentaire (MDDELCC, 2014). L'accumulation de sédiments atteint $1\text{m}^3/\text{m}^2$ à certains endroits, principalement dans la section ouest de la recharge sédimentaire. Le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a augmenté de $0,68\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,078\text{m}$), passant de $2,8\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,064\text{m}$) à $3,48\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05\text{m}$) entre août et octobre 2014. La zone d'érosion linéaire devant la recharge qui était visible lors de la période précédant la recharge sédimentaire est toujours présente. Par contre, cette zone d'érosion semble s'être déplacée sur le haut estran, contrairement à la période précédente.

où elle était près de la flexure, mais sur le bas estran. Malgré cela, la recharge sédimentaire crée une forte accumulation sur le haut estran.

À l'extrémité est de la recharge, le haut estran a subi une perte sédimentaire s'accroissant jusqu'au ruisseau (SL-25). Le secteur à l'est du ruisseau montre peu de changements au cours de cette période. À l'exception d'une petite zone d'accumulation ponctuelle au compartiment SL-35, la majorité des changements volumétriques sont à l'intérieur ou très près de la marge d'erreur. La faible variabilité sédimentaire observée est expliquée notamment par la courte période d'observation et que durant cette période, les conditions météo-marines sont calmes, ce qui contribue à minimiser les changements morphologiques de l'estran. L'apparition de petites zones d'accumulation ayant la forme de cordons de bas estran sont tout de même visibles à trois endroits sur le bas estran. Il semble y avoir eu une migration vers la plage des bancs d'accumulation. Au droit de l'exutoire du ruisseau, l'érosion se manifeste seulement au niveau du chenal alors qu'il y a eu accumulation en bordure et en aval du ruisseau.

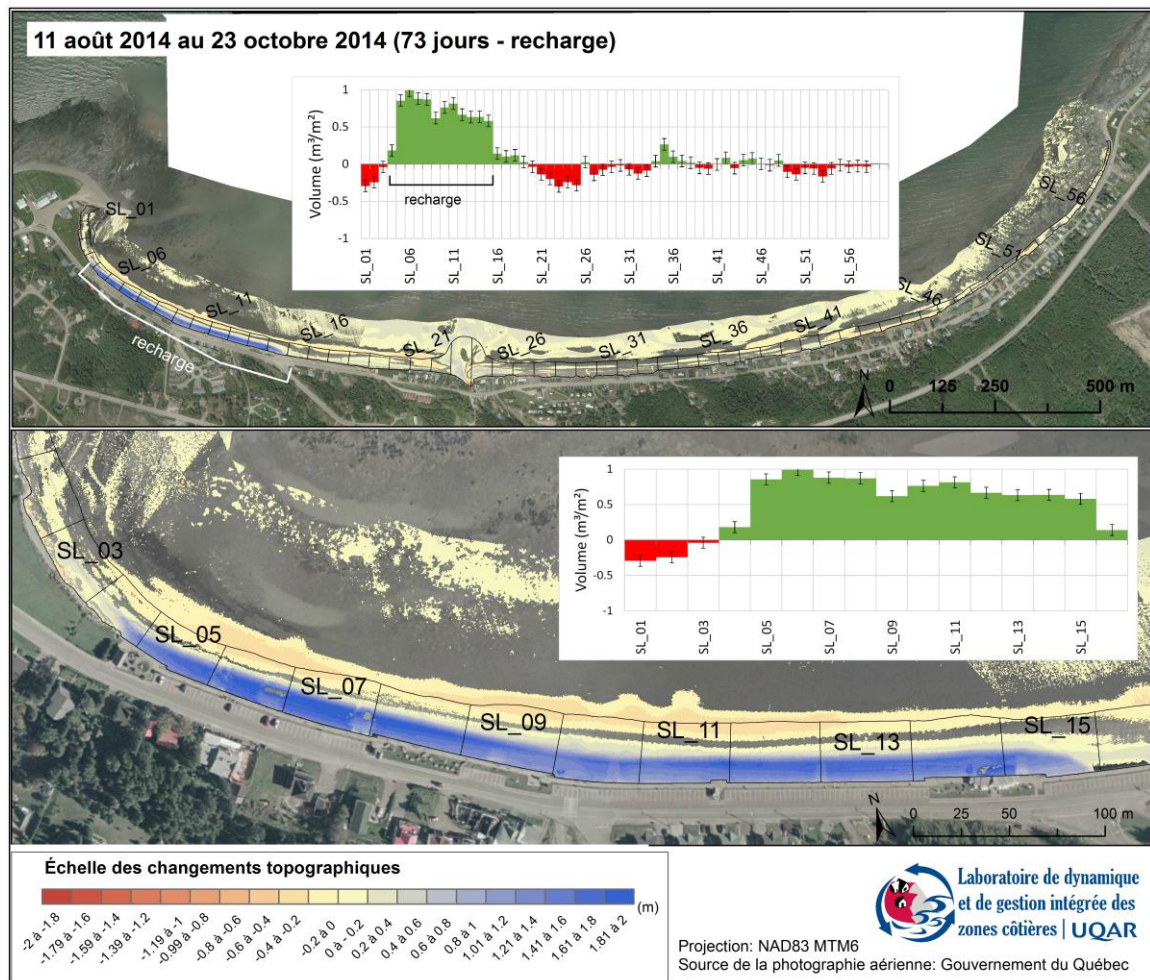


Figure 17. Différentiels topographique et volumétrique de l'Anse-aux-Coques de la période du 11 août 2014 au 23 octobre 2013

5.3.3 Période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014

La période entre le 23 octobre 2014 et le 4 novembre 2014 est très courte, mais elle permet de comprendre la dynamique sédimentaire à court terme à la suite de la recharge en sédiments grossiers. Durant cette période, aucun niveau d'eau exceptionnel n'a été mesuré à la station de Rimouski (figure 18).

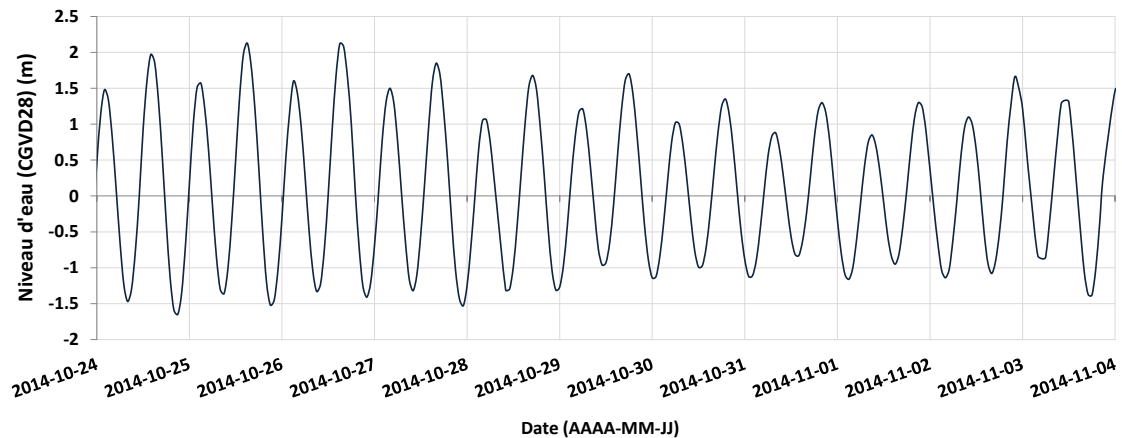


Figure 18. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014

Entre le 23 octobre et le 4 novembre 2014, il y a eu un recul rapide du front de la recharge sédimentaire, principalement pour les compartiments SL-05 à SL-09 ainsi que SL-14 à SL-16 (figure 19). La figure 19 illustre très bien l'érosion linéaire de la recharge sur le différentiel topographique. Devant la recharge sédimentaire, il y a une vaste zone d'accumulation entre les compartiments SL-08 à SL-15 et qui s'étend vers l'est au pourtour de la flexure, dans la partie inférieure du haut estran et la partie supérieure du bas estran. Ce changement montre que les sédiments accumulés en peu de temps proviennent fort probablement de l'érosion de la recharge. À l'exception de cette zone d'accumulation, il y a eu très peu de changements significatifs sur le bas estran durant cette courte période. Durant les quelques jours qui ont immédiatement suivi les travaux de recharge sédimentaire, le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) est resté assez stable avec une diminution de $0,07\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,078\text{m}$), passant de $3,48\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,06\text{m}$) à $3,41\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05\text{m}$). Cette stabilité est expliquée par l'étalement sur l'estran des sédiments érodés de la recharge. Somme toute, il y a donc très peu de changement dans la disponibilité de sédiments sur l'estran durant cette période.

À l'est du ruisseau, (SL-26 à SL-60), il y a eu très peu de changements malgré une alternance entre des zones d'érosion et d'accumulation. Par contre, la plupart des changements volumétriques calculés sont à l'intérieur ou très près de la marge d'erreur associée aux données LiDAR utilisées pour le calcul des volumes (tableau 6).

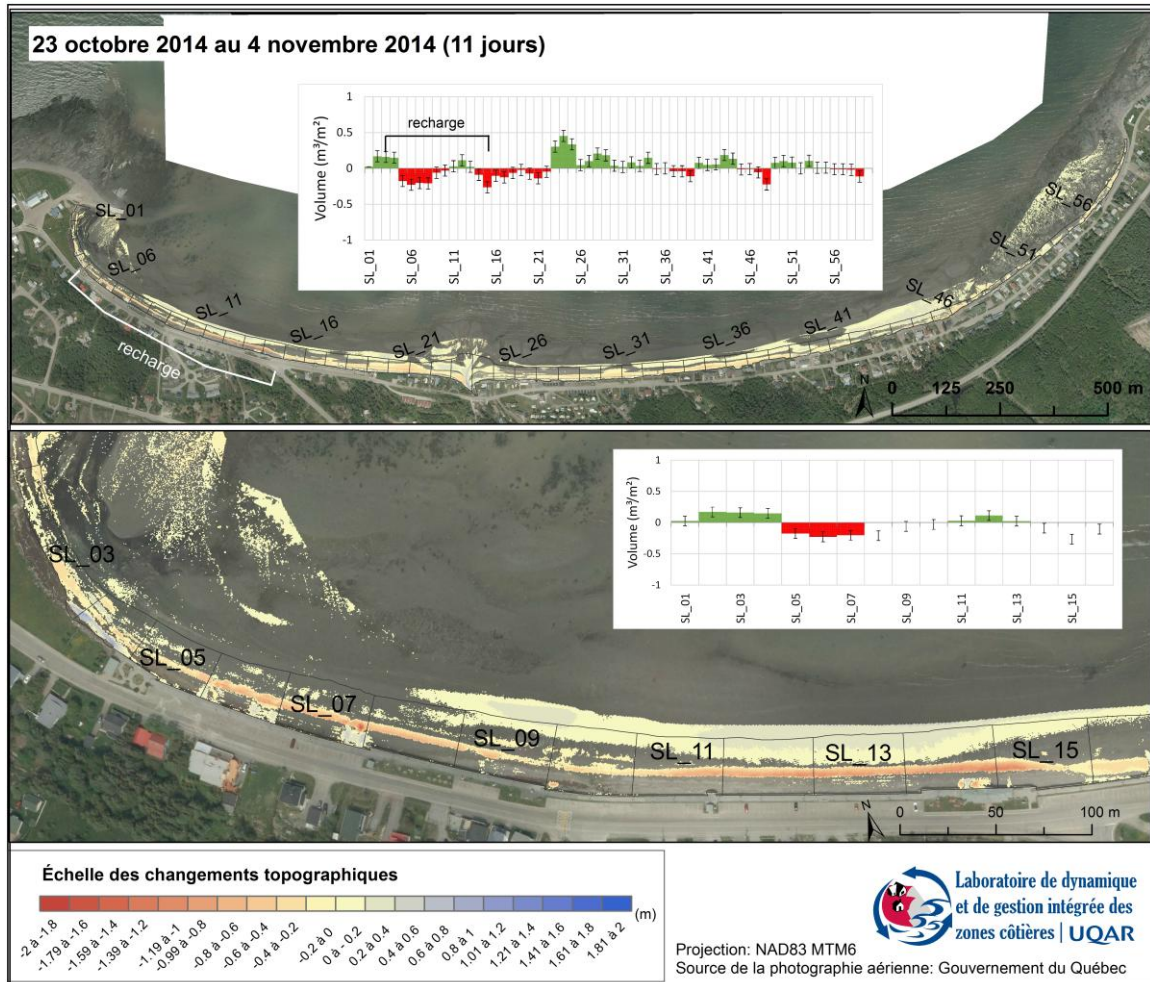


Figure 19. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques de la période du 23 octobre 2014 au 4 novembre 2014

5.3.4 Période du 30 octobre 2014 au 12 juin 2015

Durant la période du 30 octobre 2014 au 12 juin 2015, des niveaux d'eau supérieurs à 2,5m ont été observés à 5 occasions (flèches rouges de la figure 20). D'abord, le 9 novembre 2014, puis le 24 novembre 2014.

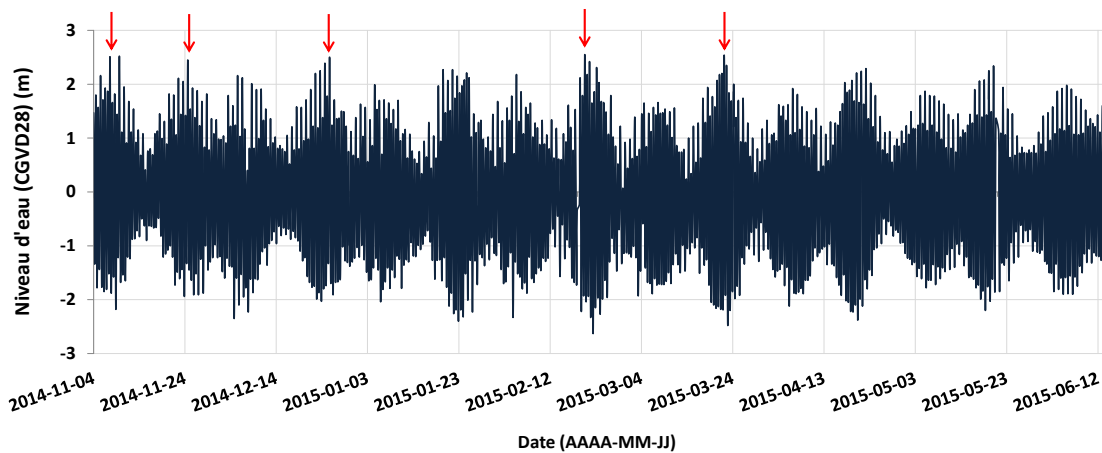


Figure 20. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015

Le 24 novembre 2014, les hauts niveaux d'eau ont frappé le front de la recharge. Les photographies des caméras de suivi montrent la formation d'une encoche d'érosion sur le front de la recharge (figure 21).



Figure 21. Formation d'une encoche d'érosion sur le front de la recharge sédimentaire lors des hauts niveaux d'eau (2,45m) du 24 novembre 2014

Les trois autres dates où les niveaux d'eau enregistrés étaient très hauts sont: 25 décembre 2014, 19 février 2015 et 22 mars 2015. Dans les trois cas, la présence d'un pied de glace a empêché les hauts niveaux d'eau d'atteindre la recharge (figure 22). Les photographies des caméras de suivi montrent que déjà le 5 décembre 2014 une petite crête de glace était formée devant la recharge sédimentaire et le 14 décembre 2014, un pied de glace de haut estran était formé. La présence de glace tôt en saison pourrait avoir grandement contribué à la protection et au maintien de la structure sédimentaire durant la fin de l'automne et la période hivernale.



Figure 22. Photographies des caméras de suivi lors de haut niveaux d'eau mesurés durant l'hiver 2014-2015

Les différentiels topographiques entre le 4 novembre 2014 et le 12 juin 2015 montrent une alternance entre des zones d'érosion et d'accumulation sur le haut estran de l'anse aux Coques (figure 23). Durant cette période, le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a faiblement diminué de $0,09\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,068\text{m}$), passant de $3,41\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05\text{m}$) à $3,32\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,033\text{m}$). Plusieurs encoches d'érosion se sont formées au front de la recharge durant cette période, notamment dans les compartiments SL-06, SL-09, SL-12 et SL-14/SL-15. L'encoche située à la limite entre les compartiments SL-14 et SL-15 semble être celle qui s'est formée lors des hauts niveaux d'eau du 24 novembre 2014 (figure 21). La forte érosion du compartiment SL-06 ($-0,46\text{m}^3/\text{m}^2 \pm 0,068\text{m}$) est expliquée par la présence de deux encoches formées au cours de la période. L'accumulation observée dans les compartiments SL-09 et SL-10 est la zone d'accumulation créée au pied de la recharge par les sédiments érodés sur le front de l'infrastructure. Par contre, devant cette dernière, il y a une zone de faible érosion sur le bas estran.

À l'extrémité de la recharge sédimentaire, une accumulation est visible sur 100m sur le haut estran. Cette accumulation se traduit par un petit gain sédimentaire de $0,09\text{m}^3/\text{m}^2$ et $0,10\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,68\text{m}$) pour les compartiments SL-16 et SL-17. Le haut estran à l'ouest du ruisseau est caractérisé par une zone d'accumulation. Le chenal du ruisseau ainsi que le delta en aval sont en érosion ainsi qu'une zone d'environ 300 m vers l'est sur le haut estran (SL-26 à SL-33). La portion est de l'anse est principalement caractérisée par une accumulation dans la partie supérieure du haut estran ainsi qu'en bordure de la flexure, dans la partie inférieure du haut estran et supérieure du bas estran. Par contre, pour les compartiments SL-49 à SL-58, les changements volumétriques ne sont pas significatifs. Il y a aussi une quasi-absence de changements sur le bas estran dans cette zone.

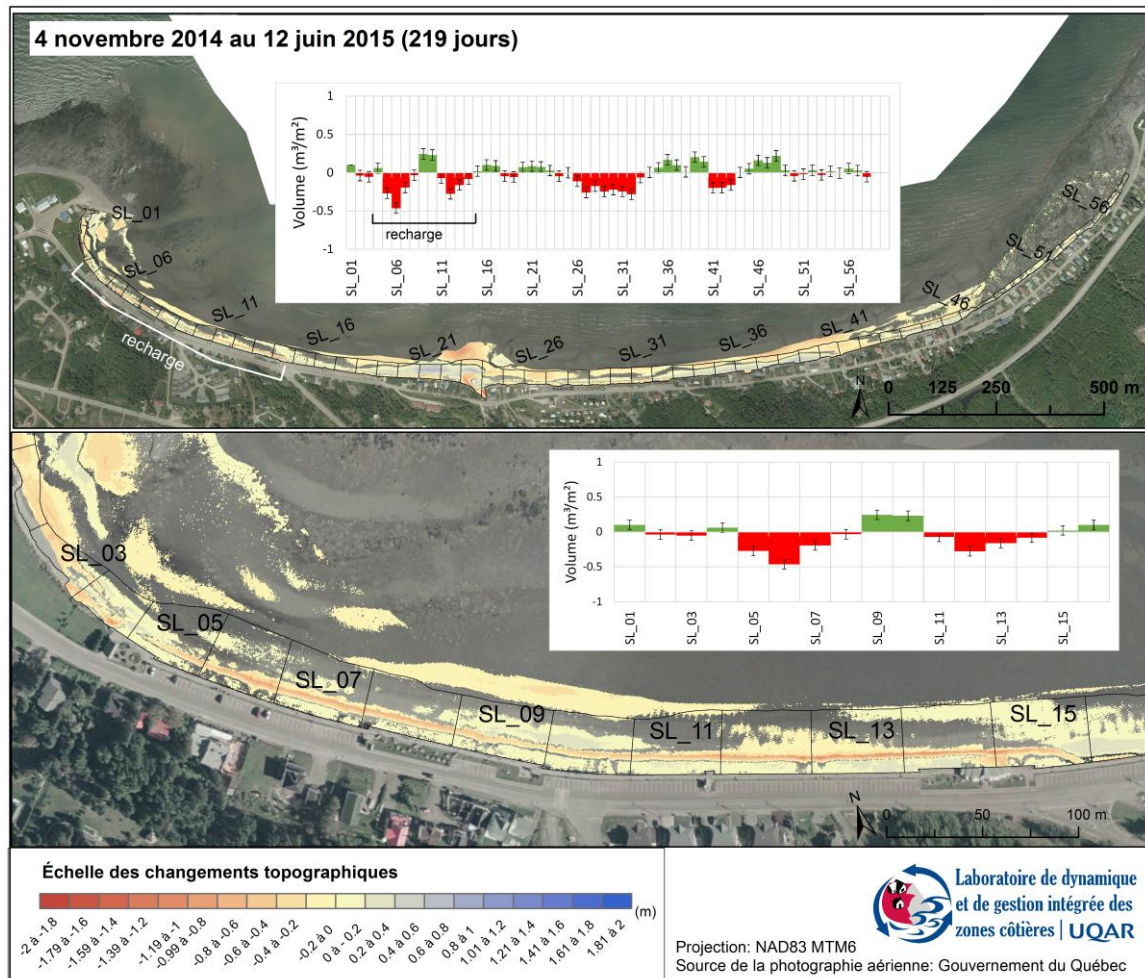


Figure 23. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 4 novembre 2014 au 12 juin 2015

Les profils P-4 et P-10 effectués à l'aide du D-GPS permettent d'illustrer l'évolution de la recharge sédimentaire entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015 (figures 24 et 25). Le front de la recharge a reculé d'un peu plus de 2 mètres. Ce retrait du front concorde avec les résultats du différentiel topographique entre le 4 novembre 2014 et le 12 juin 2015 (figure 23). La petite accumulation visible au-dessus de la recharge en avril 2015 correspond à la présence de glace résiduelle lors du levé topographique. Le profil du haut estran s'est abaissé dans son ensemble alors qu'il y a très peu de changements topographiques sur le bas estran. La flexure s'est déplacée vers la partie supérieure du haut estran, ce qui cause une diminution de la largeur du haut estran.

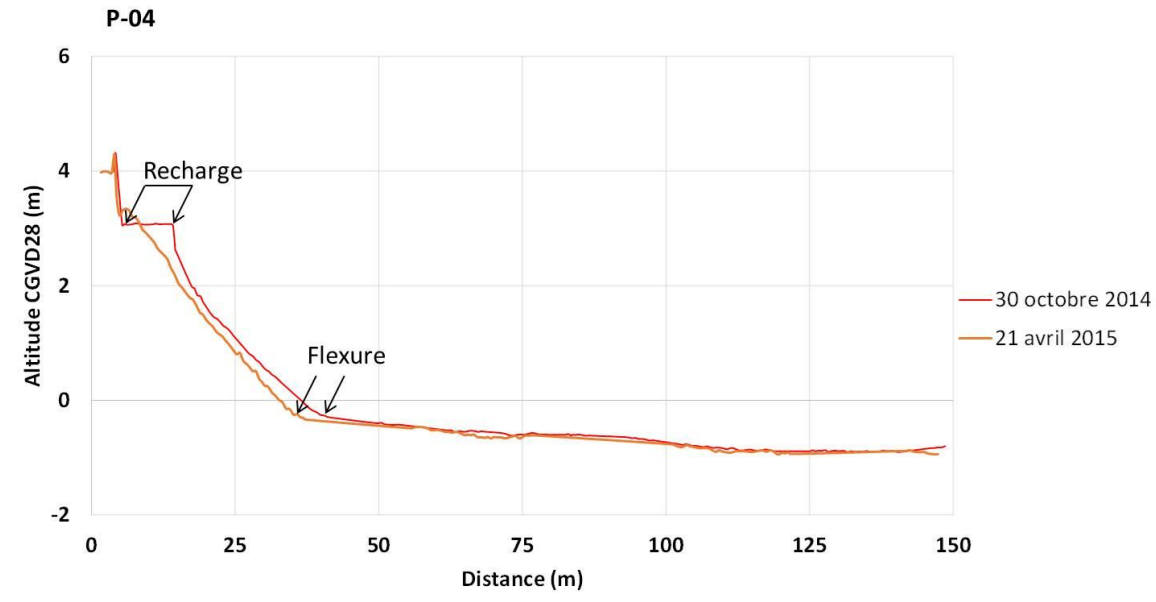


Figure 24. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015

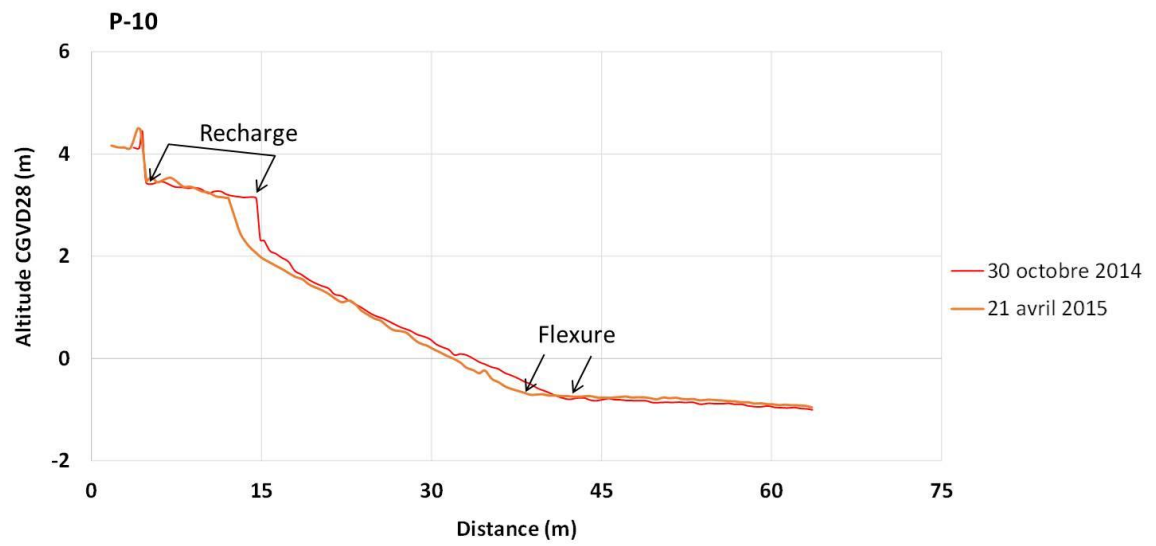


Figure 25. Évolution du profil D-GPS P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 21 avril 2015

5.3.5 Période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015

Durant la période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015, aucun niveau d'eau exceptionnel n'a été enregistré (figure 26).

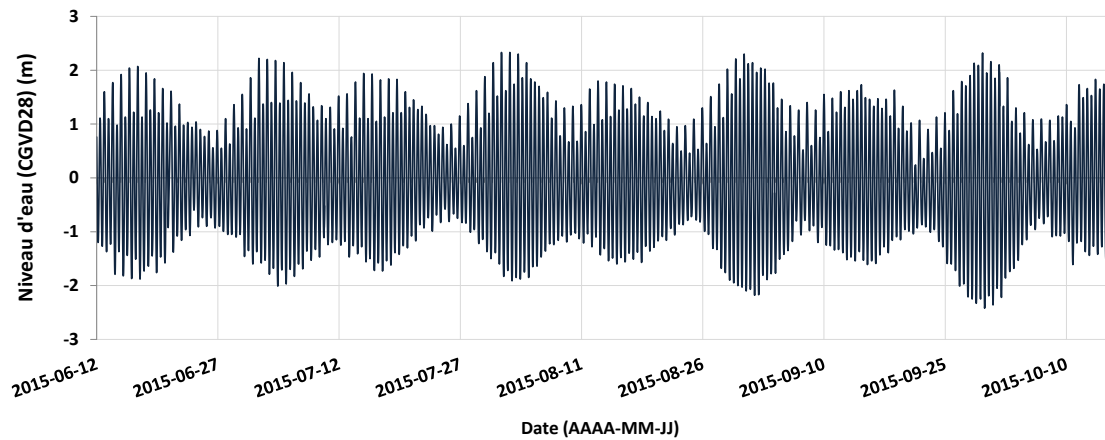


Figure 26. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015

La période du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015 est celle où il y a eu le plus de perte sédimentaire sur le haut estran au niveau de la recharge. Durant cette période, le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a diminué de $0,23\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,043\text{m}$), passant de $3,32\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,033\text{m}$) à $3,09\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,029\text{m}$). Cette perte sédimentaire correspond à la période d'érosion la plus importante du suivi. Bien qu'il y ait une forte érosion de l'infrastructure, l'accumulation des sédiments sur le haut estran permet un bilan positif pour les compartiments SL-05 et SL-06.

La section ouest du bas estran, devant la recharge sédimentaire, montre peu de changements. Puisque le haut estran a subi une forte perte de sédiments, il est possible d'émettre l'hypothèse qu'une partie de ces sédiments s'est étalée sur le bas estran devant, notamment en raison de l'absence d'érosion dans cette section en comparaison à la section est.

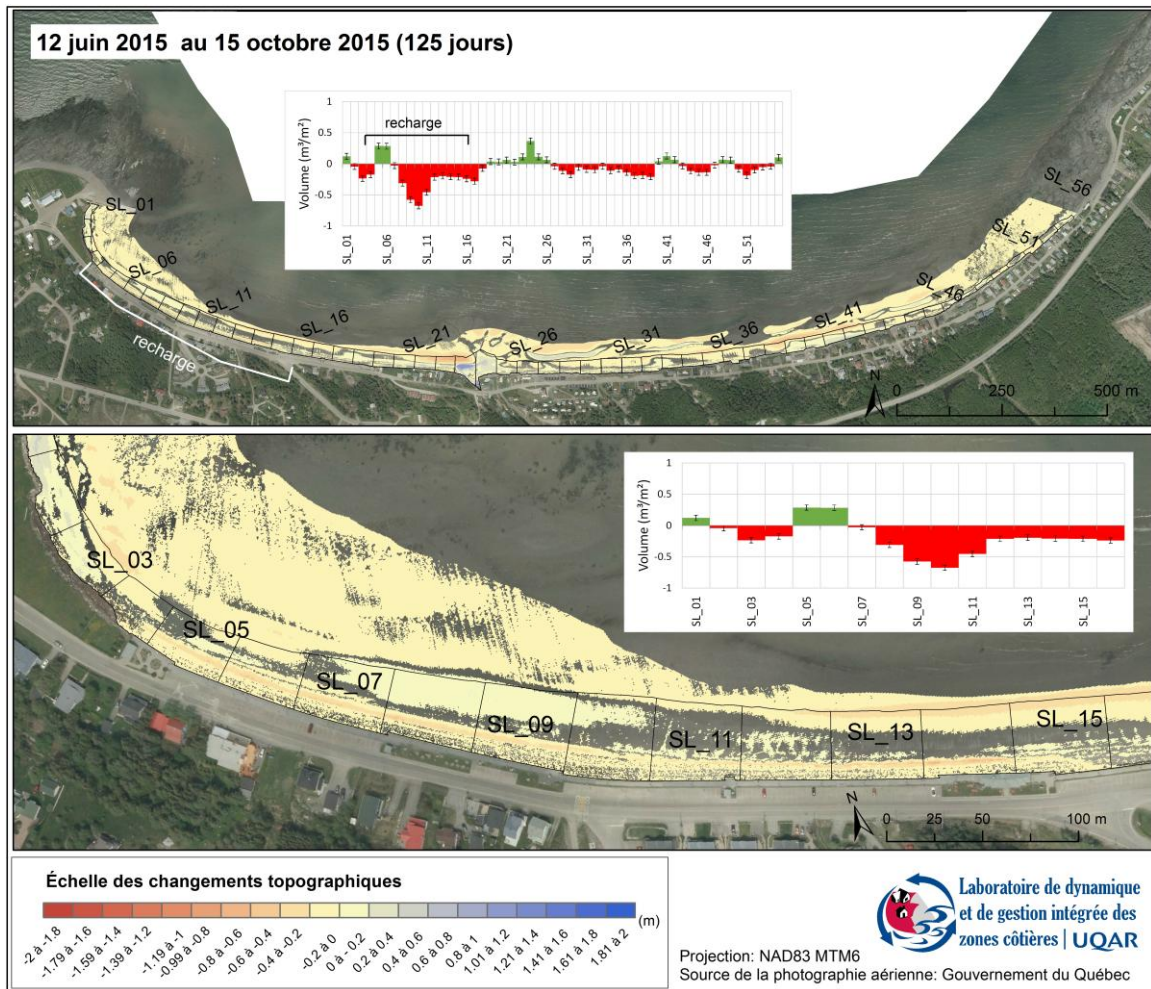


Figure 27. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 12 juin 2015 au 15 octobre 2015

5.3.6 Période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015

La période du 15 octobre au 2 décembre 2015 a connu une tempête côtière. Le 29 octobre 2015, le niveau d'eau a été enregistré à Rimouski à 2,82 m alors qu'il était prédit à 2,02m, ce qui représente une surcote de 0,80 m (figure 28). Ce niveau d'eau équivaut à un niveau d'eau avec un temps de retour de 5 ans (tableau 2).

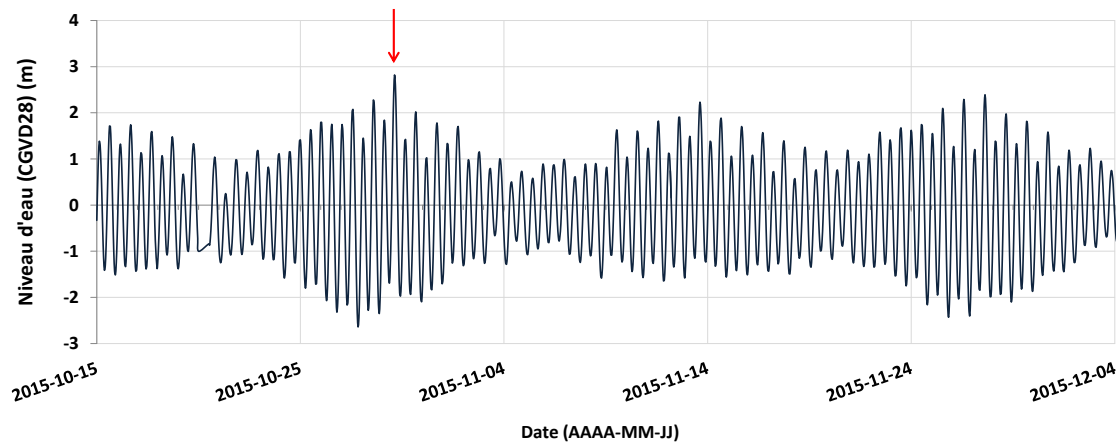


Figure 28. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 15 octobre 2015 au 2 décembre 2015

Lors de cette tempête, les vagues se brisaient sur le front de la recharge et seulement le jet de rive a submergé le dessus de la recharge (photo 1, figure 29). Les images captées par les caméras de suivi permettent de constater que le niveau d'eau était haut mais que la mer était calme et qu'il y avait de faibles vagues. À l'extrémité est, là où il n'y a pas de recharge, les vagues se brisaient directement contre le mur de la promenade (photo 2, figure 29). La photo 3 de la figure 29 montre les laisses de jet de rive qui bordent le bas du mur de la promenade de l'Anse-aux-Coques.



Figure 29. Niveau d'eau atteint lors de la tempête du 29 octobre 2015 à l'anse aux Coques

Entre le 19 octobre 2015 et le 2 novembre 2015, les profils topographiques du secteur ouest P-04) montrent un léger recul du front de la recharge sédimentaire ainsi qu'une faible érosion du haut estran dans les 10 mètres devant la recharge (figure 30). Entre le 2 novembre 2015 et le 2 décembre 2015, une encoche à la base de la recharge semble s'être formée. Le haut estran s'est abaissé et la flexure s'est déplacée de quelques mètres vers le haut, ce qui en résulte une diminution de la largeur du haut estran. À l'exception d'une mince accumulation entre le 2 novembre et le 2 décembre 2015 sur le front (côté terre) de la barre de bas estran, il n'y a pas de changements topographiques visibles sur le bas estran.

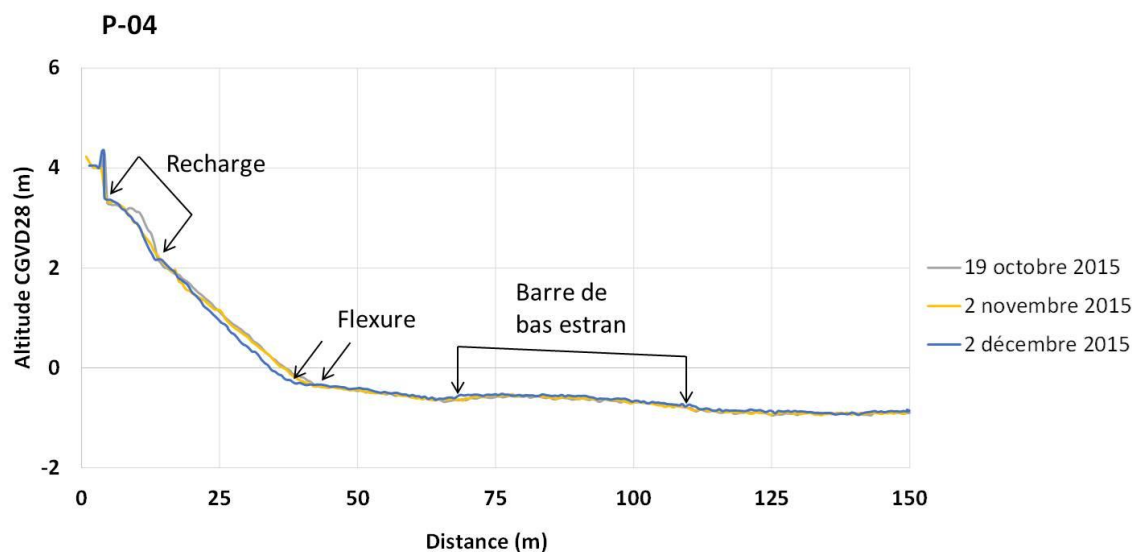


Figure 30. Évolution du profil D-GPS P-04 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015

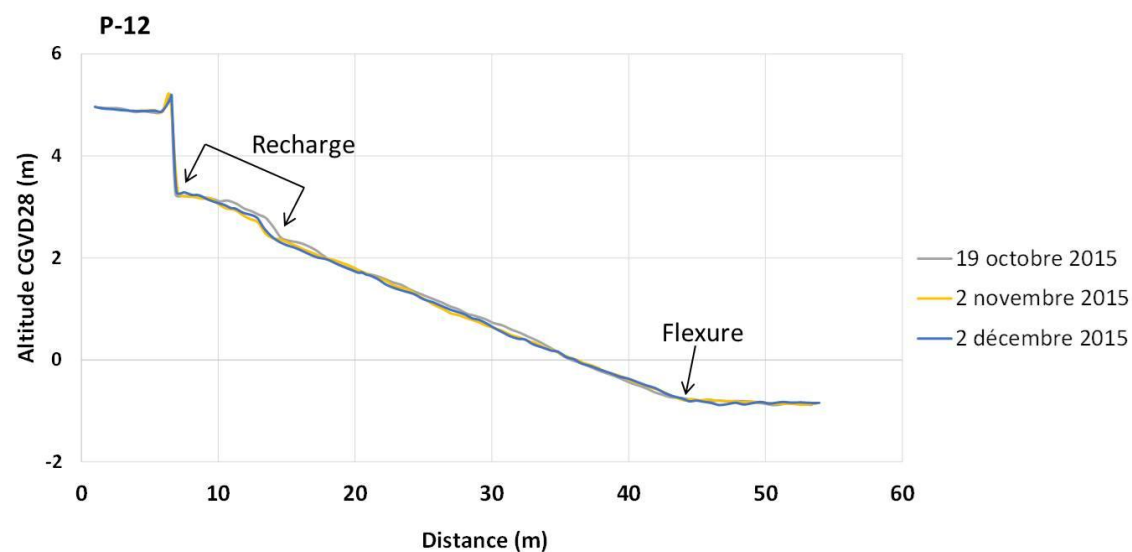


Figure 31. Évolution du profil D-GPS P-12 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015

5.3.7 Période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016

Les 11 et 13 janvier 2016, le littoral du Bas-Saint-Laurent a été affecté par deux tempêtes côtières consécutives (figure 32). Le niveau d'eau enregistré à la station de Rimouski le 11 janvier 2016 était de 2,66 m alors que la marée haute était prédite à 2,24 m. Le haut niveau d'eau du 11 janvier 2016 était jumelé à de fortes vagues, contrairement au 29 octobre 2014 où il y avait une quasi-absence de vagues. En effet, même si les niveaux d'eau étaient 15 cm plus élevés le 29 octobre 2015, il y a eu plus de débordements côtiers le 11 janvier 2016 en raison de la combinaison du haut niveau d'eau à de fortes vagues.

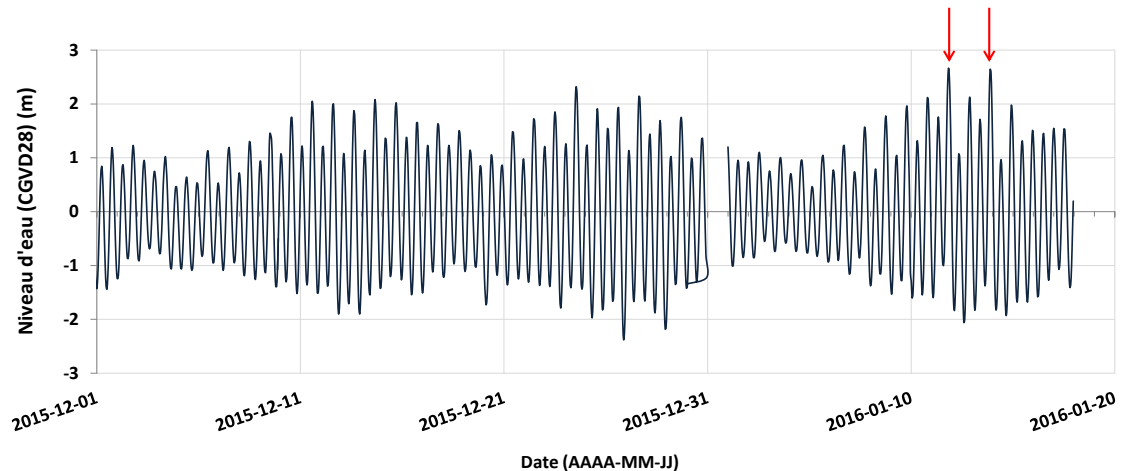


Figure 32. Niveau d'eau mesuré à la station de Rimouski pour la période du 2 décembre 2015 au 14 janvier 2016

Bien que les niveaux d'eau enregistrés correspondent à une récurrence de seulement 2 ans (tableau 2), la combinaison des hauts niveaux d'eau et des vagues a créé des débordements ponctuels au-dessus du mur de la promenade de l'Anse-aux-Coques. Durant cette tempête, les vagues atteignaient le mur de la promenade, ce qui a causé de la submersion au-dessus du mur par des nappes d'eau en raison du franchissement des vagues. La ligne bleue de la figure 33 montre le front de la recharge le 14 janvier 2016, soit quelques jours après la tempête. Quelques encoches d'érosion ont été observées sur la recharge, notamment là où plusieurs points ponctuels de franchissement des vagues ont été répertoriés. La photo 2 de la figure 33 montre une nappe de jet de rive ayant franchi le mur de la promenade à cet endroit. Par ailleurs, quelques mètres à l'est de la recharge sédimentaire, la promenade a été presque entièrement submergée par des nappes d'eau sur environ 100 mètres (photo 3, figure 33).



Figure 33. Localisation de points ponctuels de franchissement des vagues répertoriés au GPS lors de la tempête du 11 janvier 2016 à l'anse aux Coques

Durant cette tempête, des galets ont été projetés sur la promenade de l'Anse-aux-Coques. La photographie de la figure 34 prise le lendemain, soit le 12 janvier 2016, montre la présence de plusieurs galets sur la promenade. Les galets sont aussi visibles à travers la nappe d'eau de la photo 2 de la figure 33.



Figure 34. Présence de galets sur la promenade de l'Anse-aux-Coques projetés lors de la tempête du 11 janvier 2016 (photographie prise le 12 janvier 2016)

Une deuxième tempête a eu lieu le 13 janvier 2016. Le niveau d'eau maximum enregistré à la station de Rimouski était de 2,64 m alors que la marée haute était prédite à 2,04 m. De façon similaire à la dynamique observée 2 jours précédemment, des nappes d'eau ont submergé la promenade de l'Anse-aux-Coques de façon ponctuelle (photographie de la figure 35). Par contre, les températures de l'air très froides du 13 janvier 2016 ont permis la formation de frasil, ce qui a considérablement diminué la force des vagues à la côte et sans doute contribué à diminuer les débordements côtiers.



Figure 35. Nappe de jet de rive sur la promenade de l'Anse-aux-Coques lors de la tempête du 13 janvier 2016

La figure 36 montre l'évolution d'un profil topographique entre le 2 décembre 2015 et le 14 janvier 2016. La petite accumulation à la base du mur correspond à la présence de glace lors de la prise de données. Durant cette période, le front de la recharge a reculé de près de 2 mètres. Les photographies des caméras de suivi montrent qu'en décembre 2015 jusqu'au 11 janvier 2016, de la glace couvrait le haut estran, ce qui avait un effet de protection de la plage face aux conditions météo-marines. Lors de la tempête du 11 janvier 2016, la glace a été complètement brisée et évacuée par les fortes vagues et les niveaux d'eau. Les fortes vagues et les hauts niveaux d'eau des tempêtes des 11 et 13 janvier 2016 ainsi que l'absence de glace ont fortement contribué au recul de 2 mètres du front de la recharge lors de cette courte période. Les profils montrent aussi une légère accumulation sur le haut estran et dans la partie supérieure du bas estran, sédiments qui proviennent sans doute de l'érosion du front de la recharge.

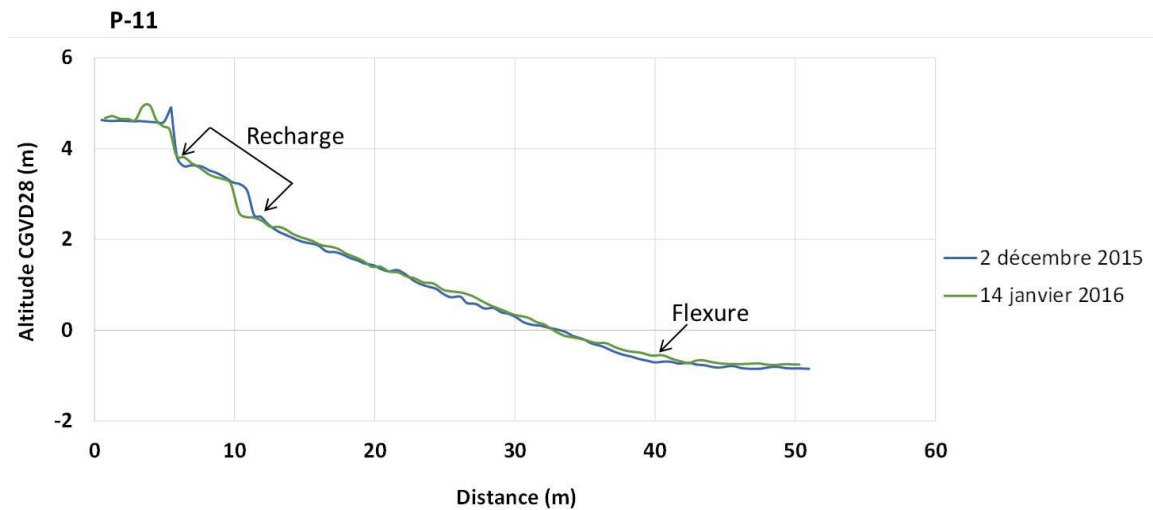


Figure 36. Évolution du profil P-11 entre le 19 octobre 2015 et le 2 décembre 2015

Près du profil P-12, une grande encoche s'est formée lors des tempêtes des 11 et 13 janvier 2016. Cette encoche semble être au même endroit ou très près de celle qui s'était formée lors de la tempête du 24 novembre 2014, tout juste devant le bâtiment sanitaire de la promenade de l'Anse-aux-Coques (figure 37). Les limites du front de la recharge ont été tracées sur les photographies issues des caméras de suivi. La photographie prise le 12 janvier 2016 montre l'encoche ouest, où la recharge a été érodée quasi-complètement.

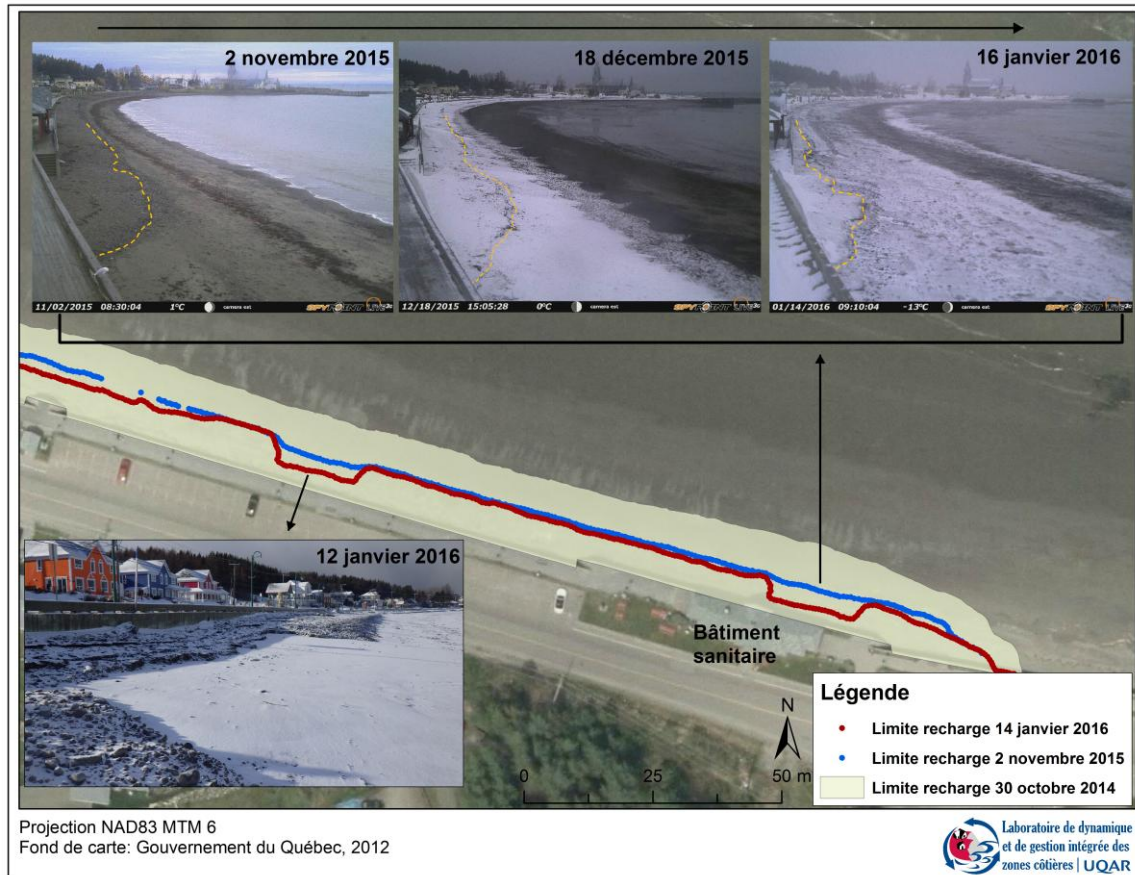


Figure 37. Formation d'une encoche d'érosion sur la recharge sédimentaire entre le 2 novembre 2015 et le 16 janvier 2016

5.4 Synthèse des changements morphologiques de l'anse aux Coques à la suite de la recharge sédimentaire (octobre 2014 à janvier 2016)

En 2013, l'estran de l'anse aux Coques était majoritairement sableux avec présence de gravier dans le haut de la plage (Genviar, 2012, cité dans Ropars, 2013). Selon Genivar 2012, le bas estran était principalement composé de sable fin et moyen alors que le haut estran était composé de sable moyen et grossier (et gravier) en 2013. Les résultats des analyses granulométriques réalisées en 2014 et 2015 et présentés dans la section 5.1 montrent une évolution marquée de la granulométrie du haut estran entre les deux relevés (figure 38).

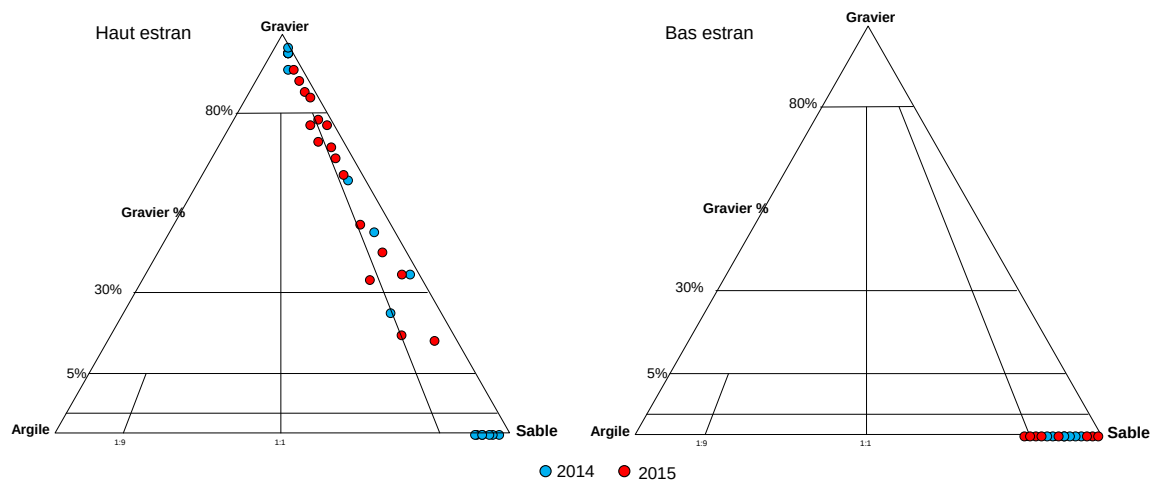


Figure 38. Diagrammes simplifiés présentant l'évolution sédimentologique du haut estran et du bas estran (2014 : bleu et 2015: rouge)

La matrice des échantillons récoltés directement sur la recharge sédimentaire en 2014 était constituée entièrement de gravier. Avec le recul du front de la recharge, l'analyse des échantillons prélevés en 2015 exactement au même endroit qu'en 2014 montre une matrice plutôt mixte, mélangeant sable et gravier.

Sur le haut estran, devant la recharge sédimentaire, les échantillons récoltés en 2014 étaient principalement composés de sable avec une présence de limon-argile et de gravier pour certains échantillons, ce qui correspond aux analyses réalisées par Genivar (2012). Par contre, en octobre 2015, ces échantillons étaient constitués principalement de graviers, dont une grande proportion de graviers grossiers (16 à 45mm), et du sable. L'évolution du D50 du haut estran entre 2014 et 2015 est présentée à la figure 39. La présence d'un «R» au-dessus de la bande indique que l'échantillon a été récolté sur la recharge. Les rapports du MDDELCC (2014) et de Ropars (2013) font état d'un diamètre prévu pour la recharge de 7mm (médiane), ce qui correspond à du gravier fin selon l'échelle de Udden (1914) et Wentworth (1922). Les échantillons récoltés dans la recharge sédimentaire le 30 octobre 2014 montrent des diamètres équivalents à des graviers grossiers de plus de 16mm. Malgré l'aspect grossier des sédiments de la recharge, à une exception près, l'ensemble des échantillons récoltés sur le haut estran en 2015 ne dépassent pas un diamètre médian de 5mm, ce qui correspond à du gravier fin. Par ailleurs, le diamètre médian des échantillons pris sur le haut estran devant la recharge a augmenté passant pour la plupart de <0,3 mm à 1 jusqu'à 4,8 mm.

Entre 2014 et 2015, la granulométrie du bas estran a très peu changée et correspond à ce que Genivar (2012) avait observé, soit une composition de sable fin et moyen. Par contre, les résultats de 2014 et 2015 montrent aussi la présence de limon-argile.

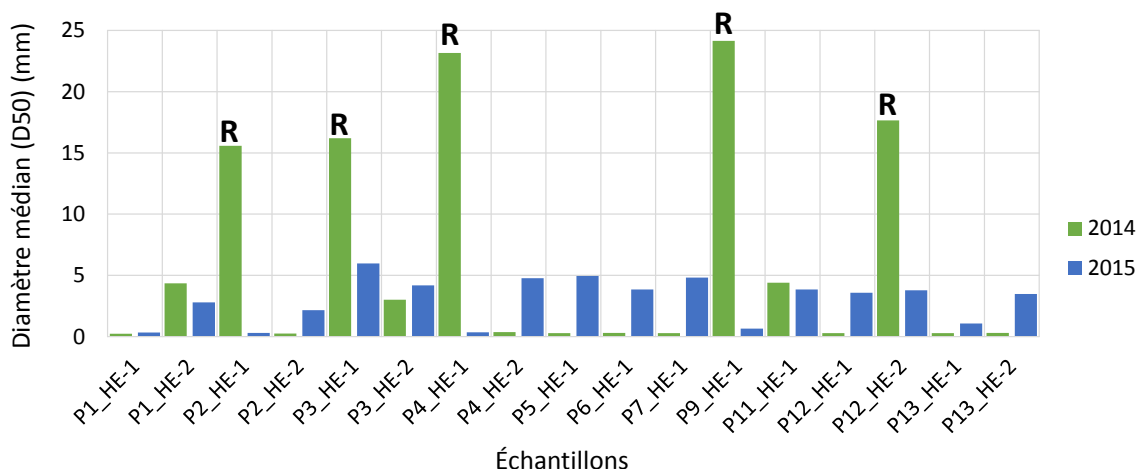


Figure 39. Évolution du D50 des échantillons de haut estran entre 2014 et 2015

Les changements de la taille des sédiments de la plage est directement en lien avec l'érosion des matériaux de la recharge sédimentaire. Le recul moyen du front de la recharge a été de près de 8 m entre le 23 octobre 2014 et le 14 janvier 2016 avec une valeur minimale de 4,8 m et une valeur maximale de 12 m (figure 40). On constate sur les figures 40 et 41, que les fortes valeurs de recul du front de la recharge sont associées à des encoches d'érosion localisées devant les émissaires pluviaux. L'altitude plus basse de la recharge au niveau des émissaires pluviaux semble avoir contribué à la formation de ces encoches d'érosion. En effet, les hauts niveaux d'eau constatés à l'automne 2015 et plus particulièrement en janvier 2006 ont atteint le mur vis-à-vis les segments plus bas de la recharge. La réflexion des vagues contre le mur a ainsi favorisé l'évidement de la recharge (figure 37). Les levés terrain lors de la tempête du 11 janvier 2016 ont permis de confirmer que les plus gros débordements au-dessus du mur ont eu lieu derrière ces encoches, où l'effet de protection de la recharge était moins efficient. Les débordements plus importants au niveau de ces encoches ainsi qu'à l'est de la recharge montrent que la présence de la recharge a un effet de protection et diminue considérablement le franchissement des vagues au-dessus du mur de la promenade. Par contre, dans un contexte où la recharge semble s'éroder rapidement, notamment lors de tempêtes côtières, cet effet de protection diminuera avec le temps.



Figure 40. Recul du front de la recharge entre octobre 2014 et janvier 2016

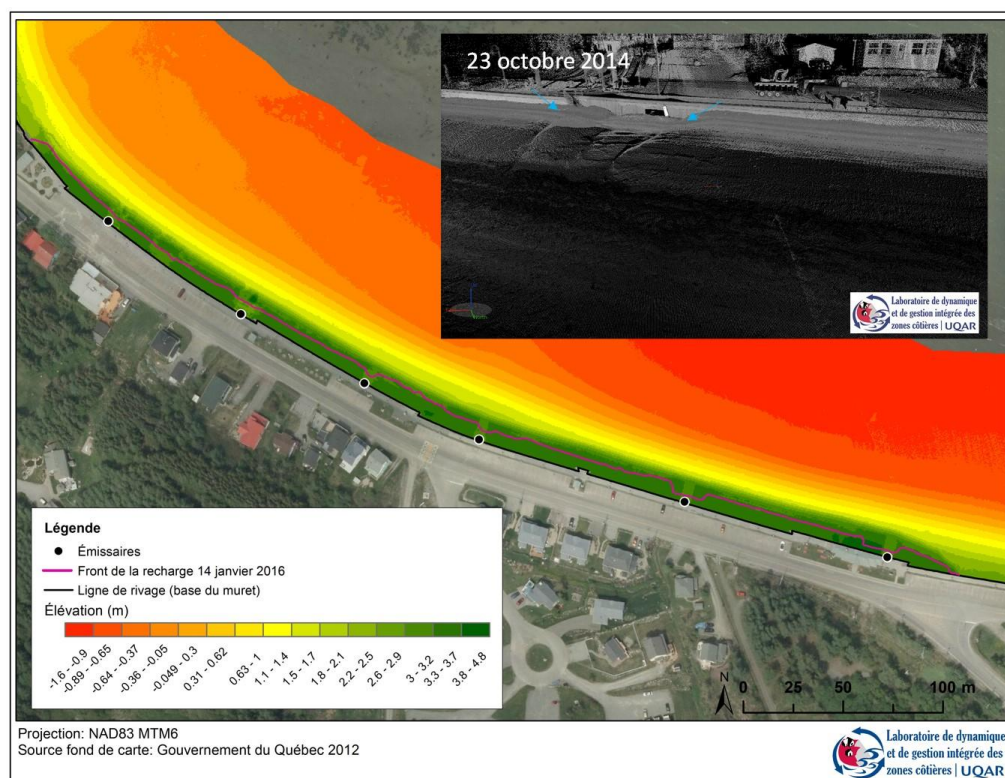


Figure 41. Élévation de l'estran en octobre 2014, position des émissaires pluviaux et limite du front de la recharge en janvier 2016

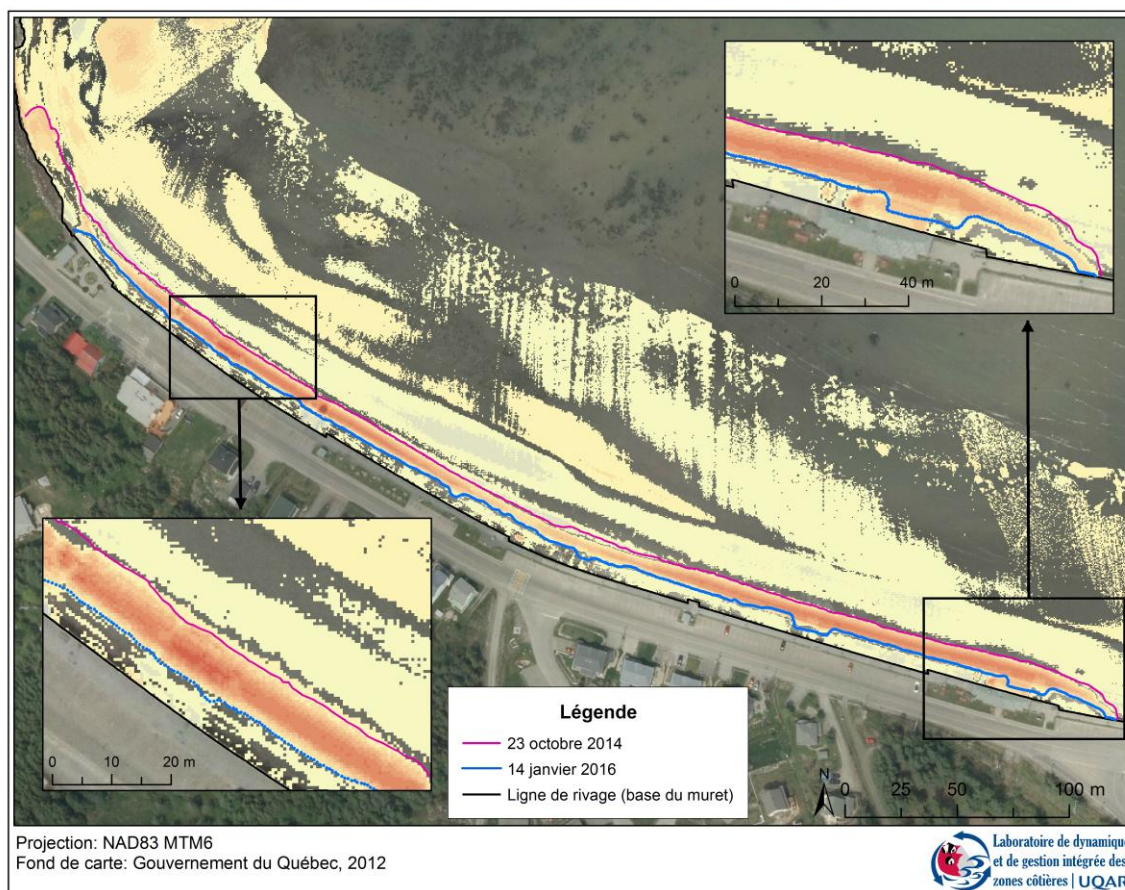


Figure 42. Déplacement du front de la recharge sédimentaire entre le 23 octobre 2014 et le 16 janvier 2016 et changements topographiques entre le 23 octobre 2014 et le 15 octobre 2015

L'analyse des différentes périodes a permis de cibler les différents facteurs qui ont contribué à modifier la topographie du secteur de la recharge de l'anse aux Coques suite à sa mise en place. Pour le différentiel topographique entre le 23 octobre 2014 et le 15 octobre 2015 (figure 43), soit à environ 1 an d'intervalle, à l'exception du secteur de la recharge, les principaux changements topographiques ont eu lieu autour du ruisseau. Le chenal et le haut estran autour du ruisseau (SL-23 à SL-25) présentent une forte accumulation, alors que le haut estran a subi une forte perte de sédiments sur 300 mètres vers l'est. Ces changements concordent avec les changements observés au sein des différentes périodes d'analyse, où les changements topographiques avaient principalement lieu au pourtour du ruisseau ainsi que dans le secteur de la recharge sédimentaire.

Le volume total du haut estran de la zone de la recharge sédimentaire (SL-03 à SL-15) a diminué de $0,39\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,058\text{m}$), passant de $3,48\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,05\text{m}$) en octobre 2014 à $3,09\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,029\text{m}$) en octobre 2015. Par contre, si l'on compare le volume entre le 11 août 2014 ($2,80\text{m}^3/\text{m}^2 \pm 0,064\text{m}$), soit quelques semaines avant la recharge sédimentaire, et le 15 octobre 2015, il réside un gain de volume sédimentaire de $0,29\text{m}^3/\text{m}^2$ ($\pm 0,067\text{m}$).

Le différentiel topographique de la figure 43 ainsi que l'évolution des profils topographiques de la figure 44 montrent les changements morphologiques ainsi que le déplacement du front de la recharge entre octobre 2014 et décembre 2015. Les résultats montrent une érosion marquée au front de la recharge entre les 2 levés et l'apparition d'une zone d'accumulation linéaire devant ce front est visible sur le haut estran. L'enveloppe et l'écart-type présente aussi un changement topographique important sur le haut estran. Les analyses granulométriques entre 2014 et 2015 ont montré que les graviers qui constituaient la recharge se sont dispersés sur le haut estran, ce qui cause une hausse de l'altitude du haut estran. Une deuxième zone d'accumulation, moins élevée, est aussi présente sur le bas estran.

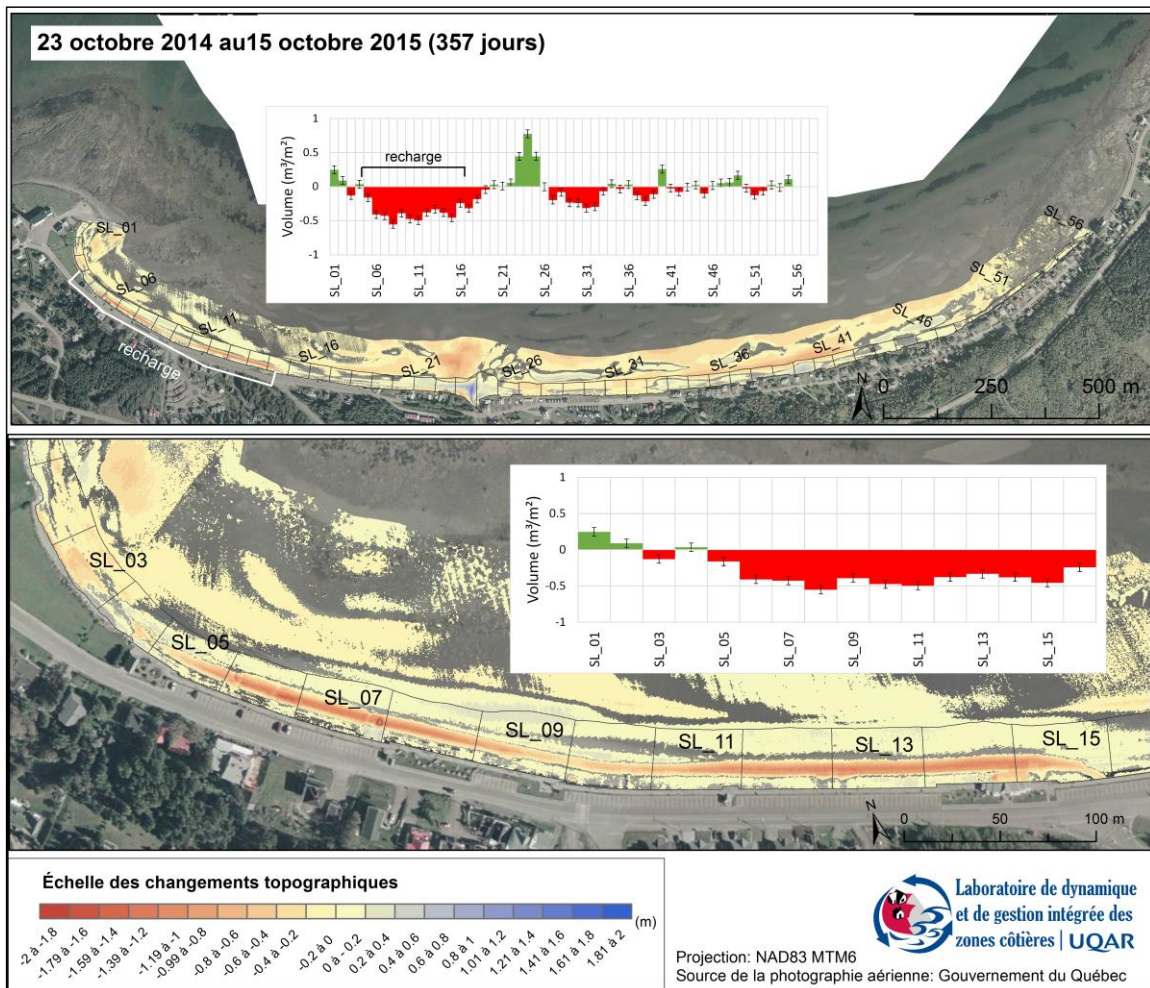


Figure 43. Différentiels topographique et volumétrique de l'anse aux Coques du 23 octobre 2014 au 15 octobre 2015

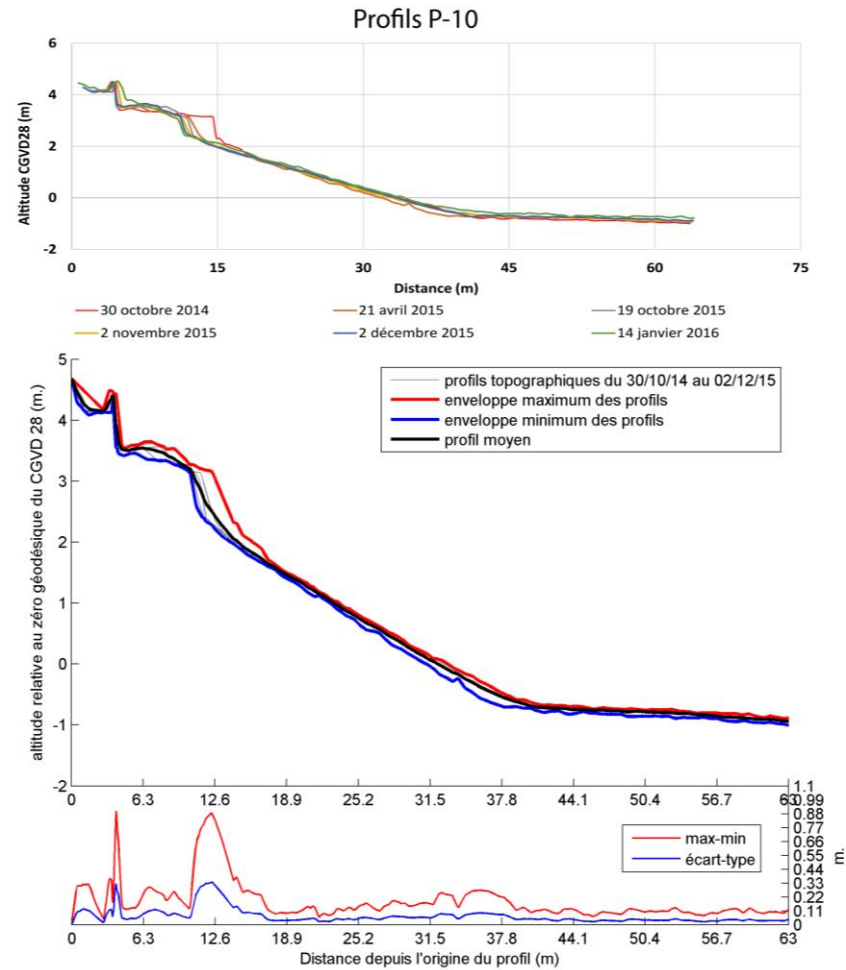
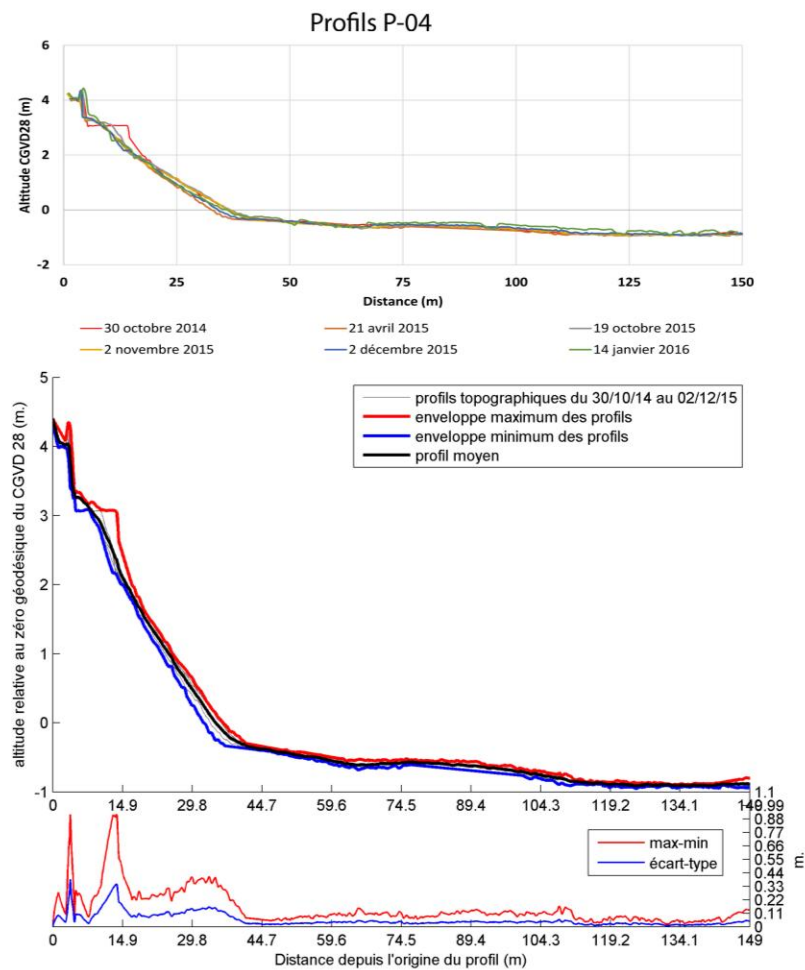


Figure 44. Évolution des profils topographiques D-GPS P-04 et P-10 entre le 30 octobre 2014 et le 2 décembre 2015

6. Données fournies

L'ensemble des données utilisées dans le cadre de ce projet sont fournies à la municipalité de Sainte-Luce. Les données fournies sont : données LiDAR et ses produits dérivés, données D-GPS, photographies des caméras de suivi et statistiques granulométriques. La figure 45 présente l'arborescence des dossiers des données LiDAR transmis à la municipalité. Les données sont d'abord séparées selon les dates d'acquisition des données sur le terrain. À l'intérieur de ces dossiers, les données sont classées selon le type de données et des produits dérivés. Les types de données et de produits sont ensuite sous-classés selon leur format numérique.

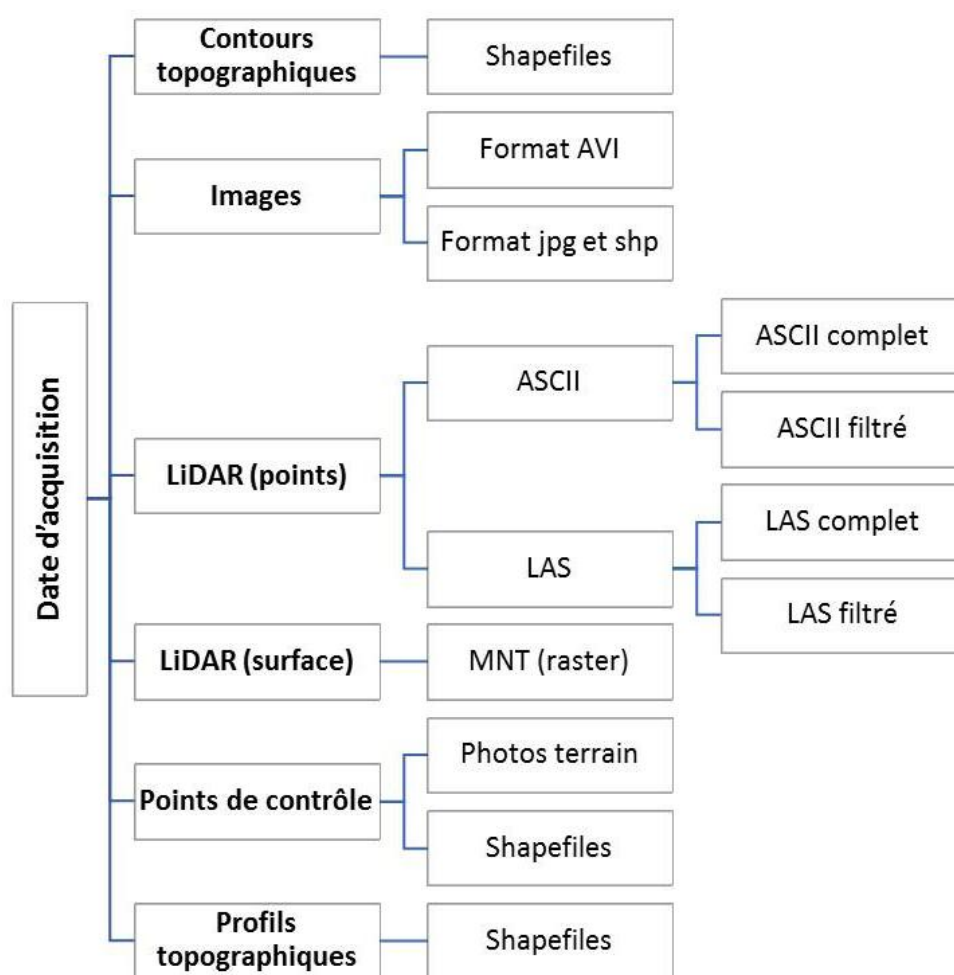


Figure 45. Arborescence des dossiers fournis à la municipalité de Sainte-Luce dans le cadre du projet de suivi géomorphologique de la plage de Sainte-Luce

7. Conclusion

Les suivis topographiques ont montré que le front de la recharge a reculé en moyenne de 8 m depuis sa mise en place en octobre 2014, mais qu'une partie des sédiments est demeuré sur le haut estran. Somme toute, la recharge sédimentaire a joué un rôle de protection de la promenade lors des tempêtes côtières. En janvier 2016, les photographies et les niveaux d'eau répertoriés sur le terrain lors des tempêtes, indiquent qu'en bordure de la recharge des nappes d'eau ont atteint la promenade de l'Anse-aux-Coques de manière ponctuelle, alors qu'à l'extrémité de la promenade là où il n'y a pas de recharge sédimentaire, il y a eu une submersion quasi-complète de la promenade sur environ 100 mètres linéaires. Une attention particulière devrait être portée sur les émissaires pluviaux puisque d'importantes encoches d'érosion se sont formées à leur niveau. Ces zones plus basses de la recharge correspondent aussi aux segments où il y a eu du franchissement par le jet de rive lors des tempêtes.

Le suivi sédimentologique a montré un changement important de la granulométrie des sédiments du haut estran à la suite de la recharge. Composée principalement de sable fin à moyen en 2013 et 2014, la texture des sédiments de la plage avait une prédominance de gravier en 2015. La texture plus grossière des sédiments de la plage en 2015 est directement liée à l'érosion des matériaux de la recharge sédimentaire. On constate aussi qu'il y a un transport du matériel grossier vers l'est. La taille granulométrique des sédiments du bas estran est demeurée la même entre 2014 et 2015. Les matériaux grossiers provenant de la recharge semblent donc se déplacer seulement de manière longitudinale au niveau de la plage. Considérant les résultats, il est recommandé de faire un suivi de la texture des sédiments de manière plus exhaustive en 2016 en augmentant le nombre de sites d'échantillonnage dans les zones adjacentes à la recharge ainsi que sur le bas estran sur l'ensemble de l'anse aux Coques. L'échantillonnage devrait aussi se faire de manière saisonnière pour évaluer s'il y a une variabilité saisonnière dans la texture des sédiments (printemps, fin été, et automne).

Références

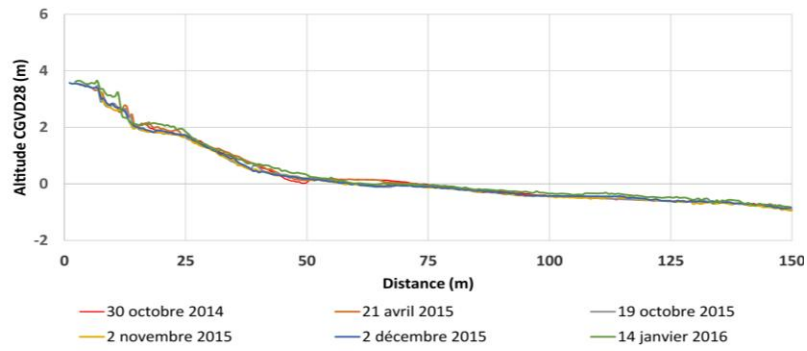
- Baptista, P., Bastos, L., Bernades, C., Cunha, T. et Dias, J., 2008. Monitoring sandy shore morphologies by DGPS – A Practical Tool to Generate Digital Elevation Models. *Journal of Coastal Research*, 24, 6, 1516-1528
- Brasington, J., Langham, J. et Rumsby, B. 2003. Methodological sensitivity of morphometric estimates of coarse fluvial sediment transport, *Geomorphology*, 52, 299-316
- Dornbusch, U., 2010. Ground survey methods for mixed sand and gravel beaches in intertidal environments: a comparison. *Journal of Coastal Research*, vol. 26, no 3, 451-464
- Emery, K.O., 1961. A simple method of measuring beach profiles. *Limnology and oceanography*, no 6, 90-93
- Haala, N., Peter, M., Cefalu, A. and Kremer, J. 2008. Mobile lidar mapping for urban data capture. Proceedings of the 14th International Conference on Virtual Systems and Multimedia, Limassol, Cyprus. 20-25.
- MDDELCC. 2014. Rapport d'analyse environnementale de la demande de soustraction de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement du projet de recharge de plage de Sainte-Luce-sur-Mer sur le territoire de la municipalité de Sainte-Luce, Direction de l'évaluation environnementale des projets hydriques et industriels, Dossier 3216-02-048, 29p.
- Montreuil, A-L., Levoy, F., Bretel, P. et Anthony, E.J. 2014. Morphological diversity and complex sediment recirculation on the ebb delta of a microtidal inlet (Normady, France): A multiple LiDAR approach dataset, *Geomorphology*, 219, 114-125
- Passalacqua, P., Belmont, P., Staley, D.M., Simley, J.D., Arrowsmith, J.R., Bode, C.A., Crosby, C., DeLong, S.B., Glenn, N.F., Kelly, S.A., Lague, D., Sangireddy, H., Schaffrath, K., Tarboton, D.G., Wasklewicz, T. et Wheaton, J.M. 2015. Analyzing high resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review, *Earth-Science Reviews*, 148, 174-193
- Puente, I., González-Jorge, H., Martínez-Sánchez, J. et Arias, P. 2014. Automatic detection of road tunnel luminaires using a mobile LiDAR system. *Measurement*, 47, 569-575
- Ropars. 2013. Protection de la berge Sainte-Luce, Qc, Rapport technique, dossier SLC-MSP12, pour le Ministère de la Sécurité Publique, 49p.
- Udden, J.A. (1914) Mechanical composition of clastic sediments. *Bulletin of the Geological Society of America*, 25, 655-744.

Wentworth, C.K. (1922) A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, 30, 377-392.

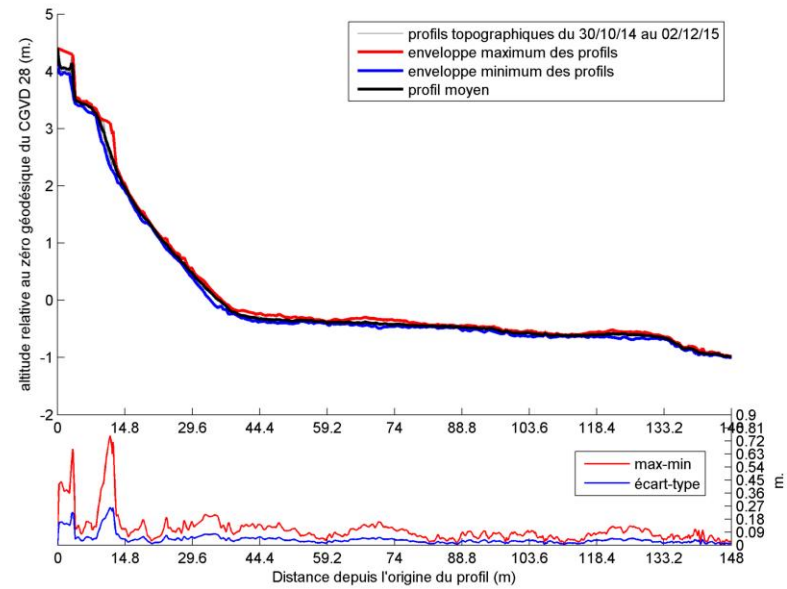
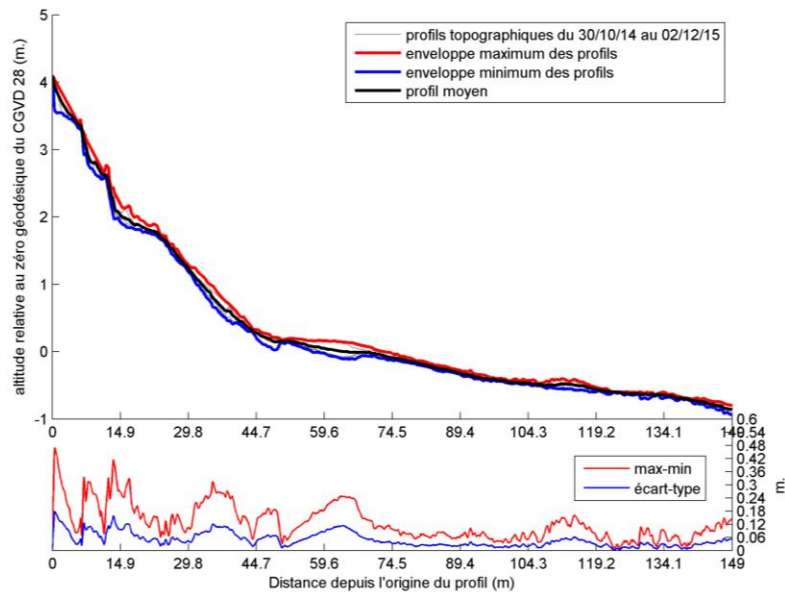
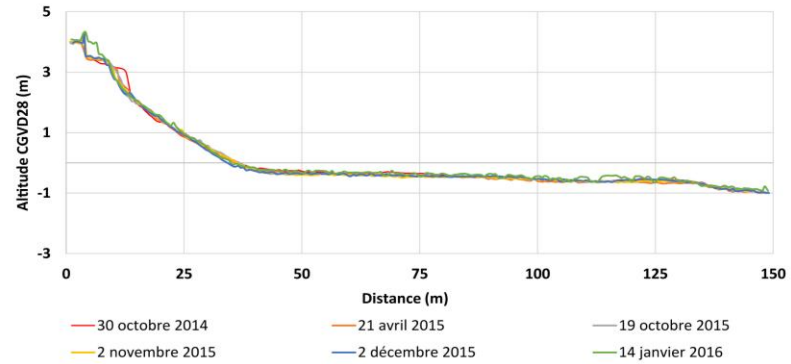
Wheaton, J.M., Brasington, J., Darby, S.E. and Sear, D.A. 2010. Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budget, *Earth Surface Processes and Landforms*, 35, 136-156

ANNEXE 1

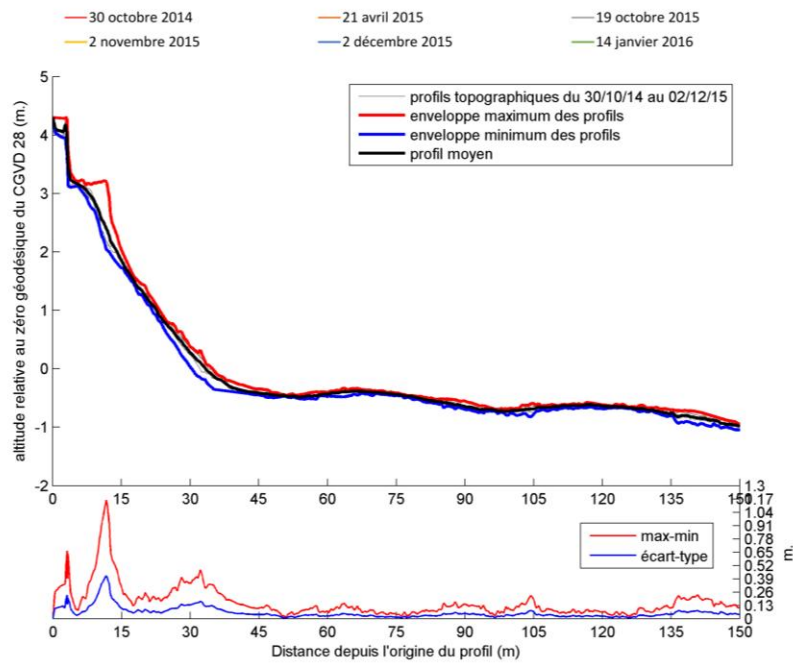
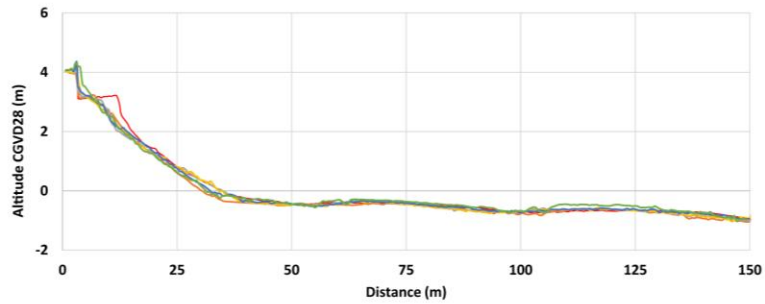
Profils P-01



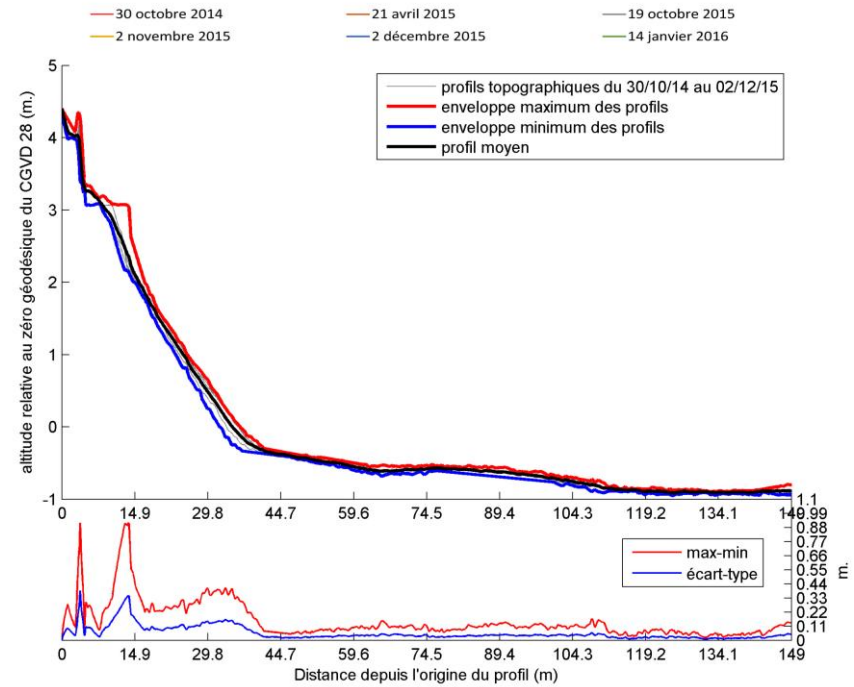
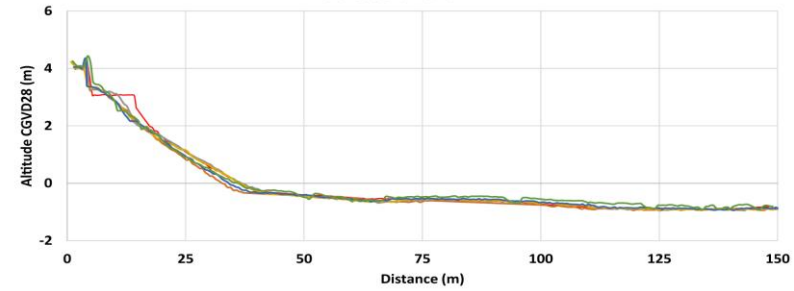
Profils P-02

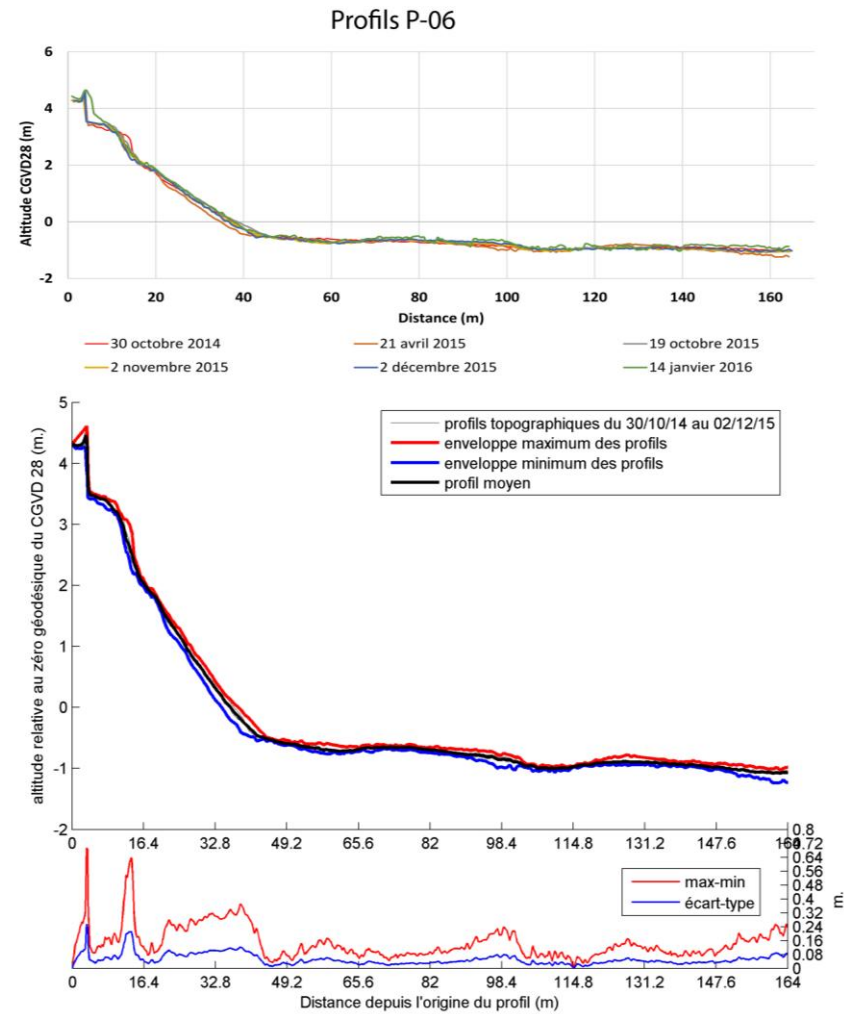
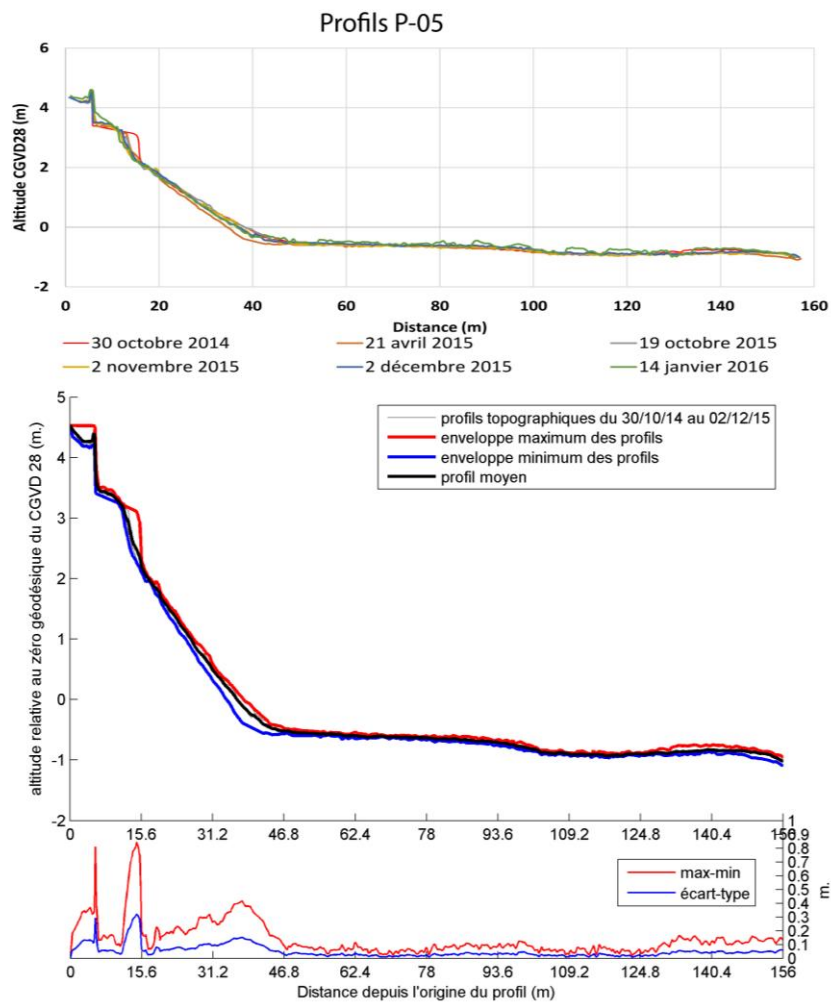


Profils P-03

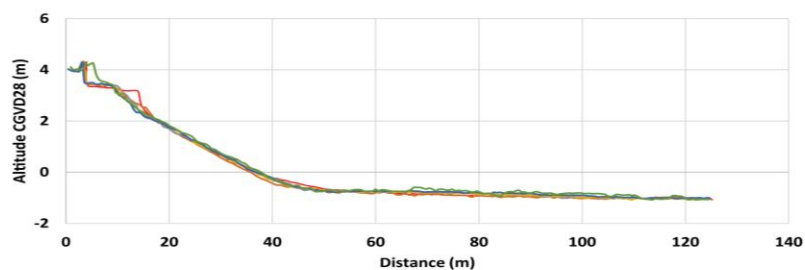


Profils P-04

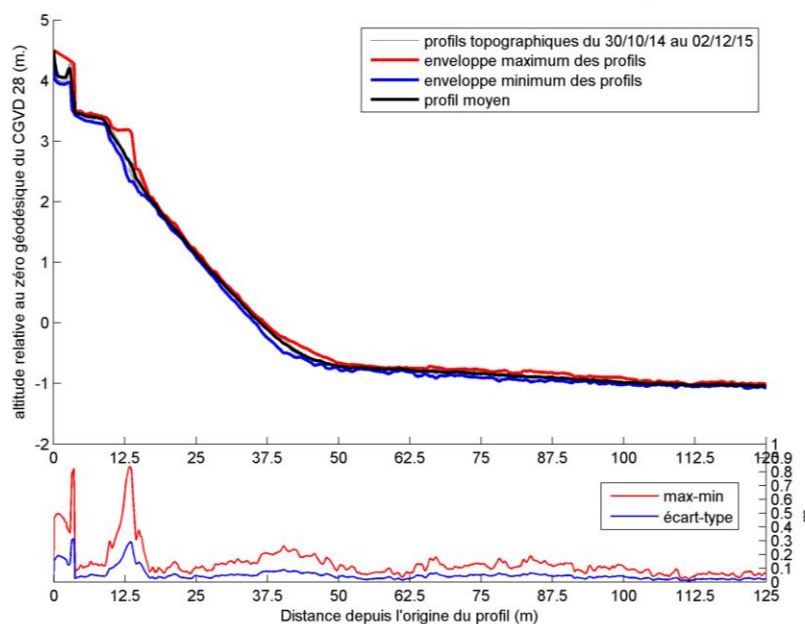




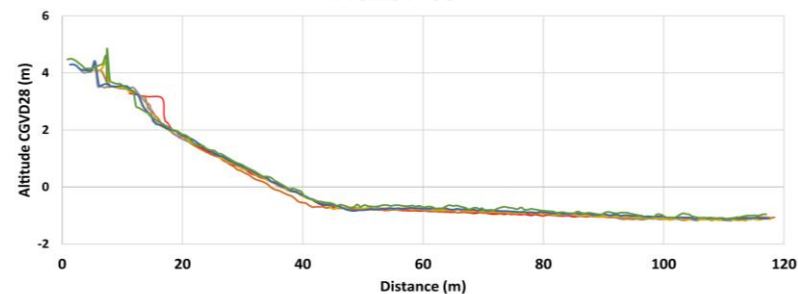
Profils P-07



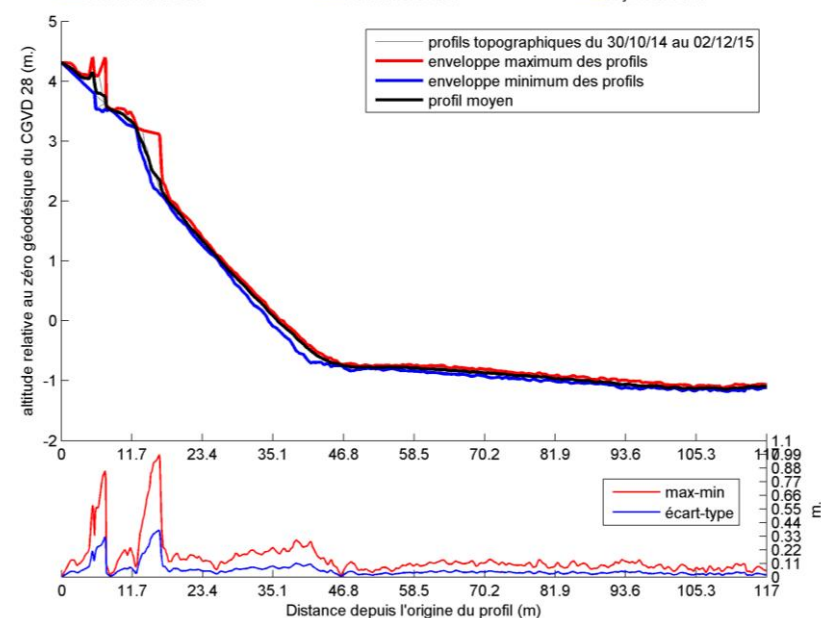
30 octobre 2014 21 avril 2015 19 octobre 2015
2 novembre 2015 2 décembre 2015 14 janvier 2016

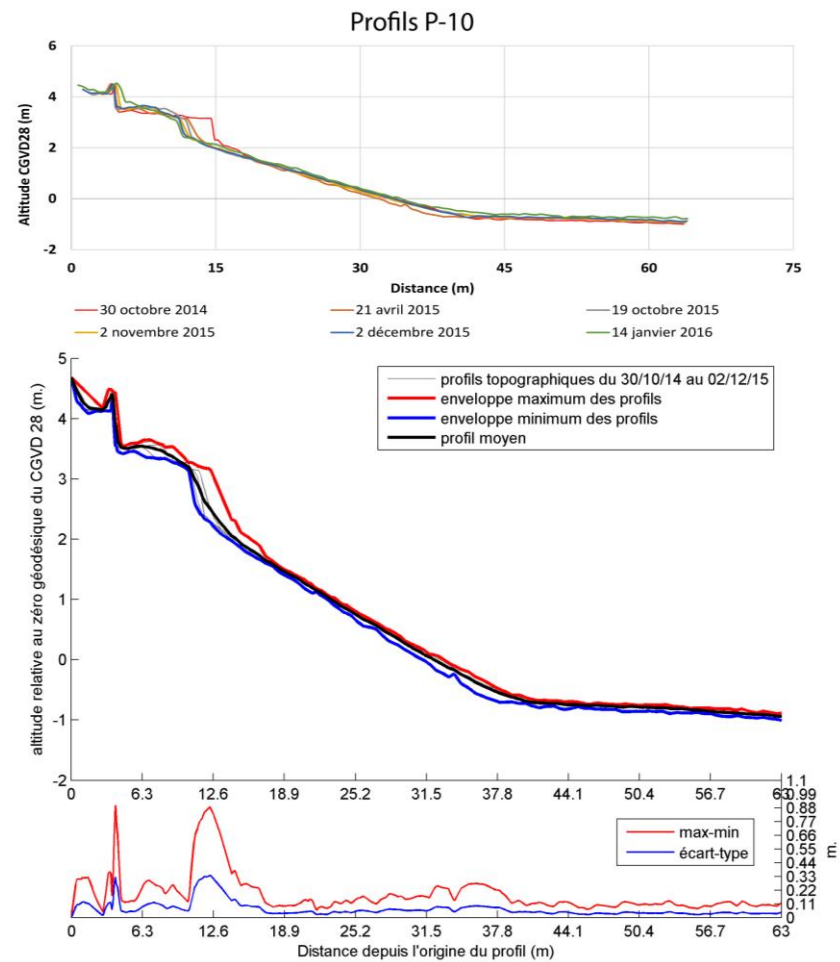
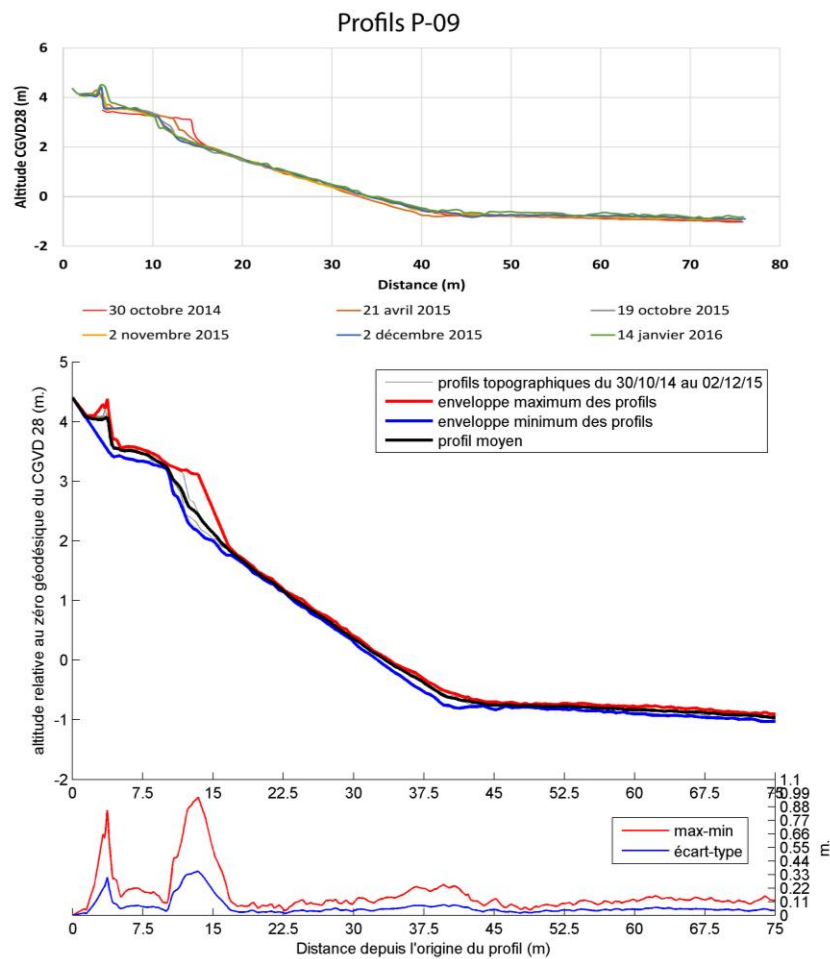


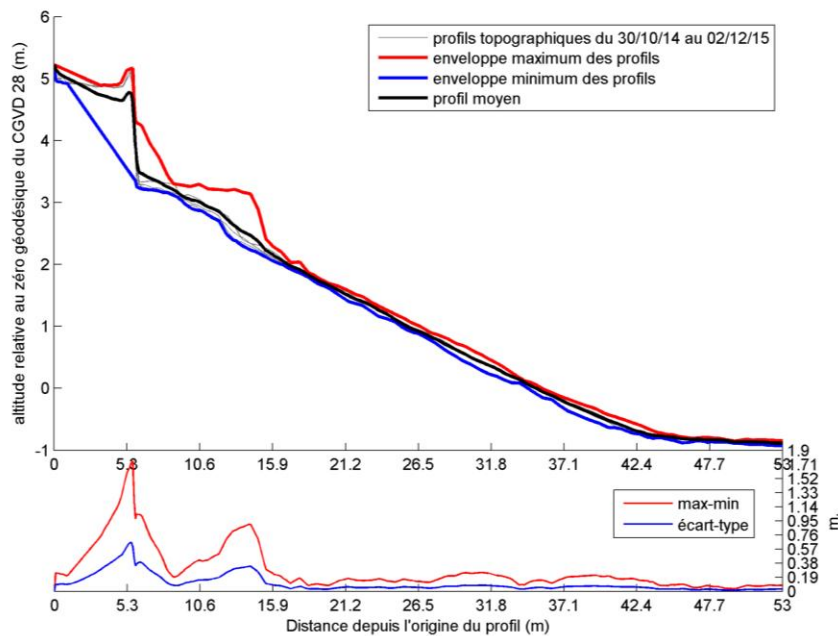
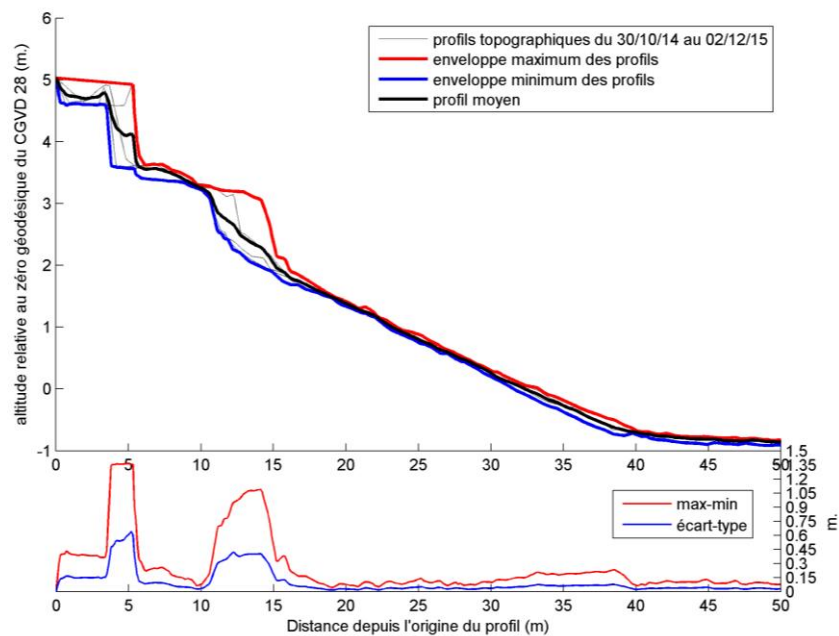
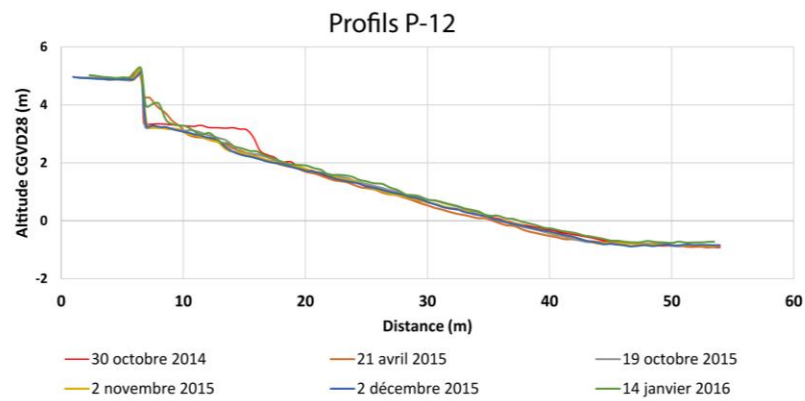
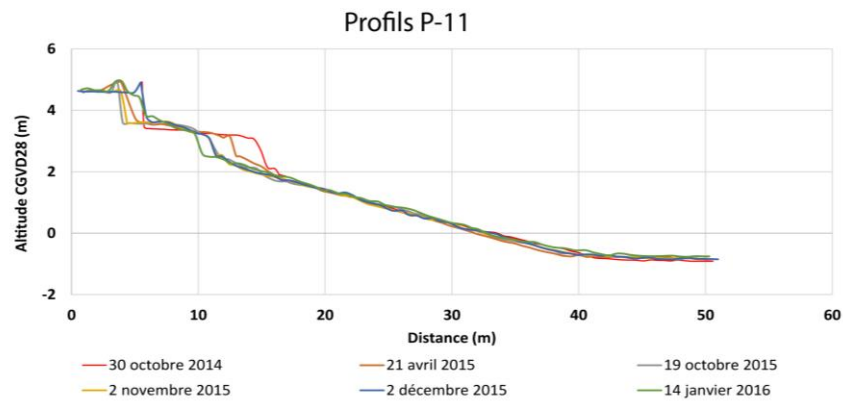
Profils P-08

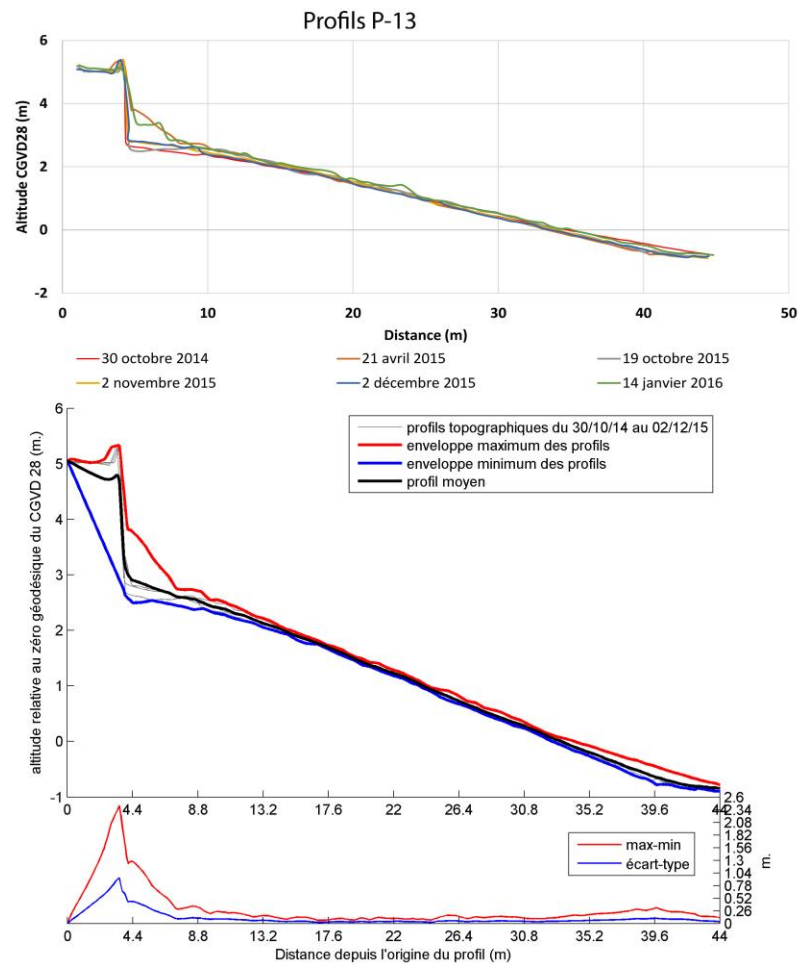


30 octobre 2014 21 avril 2015 19 octobre 2015
2 novembre 2015 2 décembre 2015 14 janvier 2016









ANNEXE 2

Compartiment	Septembre 2012				Août 2014			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	2321.71	15.65	2.82	0.19	1157.51	22.71	3.26	0.06
SL_02	2161.67	13.82	2.97	0.19	1894.41	36.83	3.29	0.06
SL_03	2306.97	14.72	2.98	0.19	2630.68	50.55	3.33	0.06
SL_04	1988.69	13.09	2.89	0.19	2154.36	43.64	3.16	0.06
SL_05	3114.81	22.44	2.64	0.19	3319.47	73.85	2.88	0.06
SL_06	3243.94	24.68	2.50	0.19	3250.85	74.38	2.80	0.06
SL_07	4102.80	32.22	2.42	0.19	3859.30	87.44	2.82	0.06
SL_08	4341.62	34.06	2.42	0.19	3998.09	90.53	2.83	0.06
SL_09	4928.08	36.97	2.53	0.19	4505.14	100.36	2.87	0.06
SL_10	4715.53	33.55	2.67	0.19	4725.58	107.83	2.80	0.06
SL_11	4538.22	32.92	2.62	0.19	4639.68	112.18	2.65	0.06
SL_12	4276.92	31.86	2.55	0.19	4147.47	99.87	2.66	0.06
SL_13	4124.79	29.66	2.64	0.19	3982.58	95.25	2.68	0.06
SL_14	4047.55	28.32	2.72	0.19	3859.64	91.62	2.70	0.06
SL_15	4673.08	31.25	2.84	0.19	4620.97	106.44	2.78	0.06
SL_16	4485.91	29.73	2.87	0.19	4521.52	102.74	2.82	0.06
SL_17	4471.46	29.40	2.89	0.19	4378.51	97.05	2.89	0.06
SL_18	4766.11	32.75	2.77	0.19	4882.84	104.78	2.98	0.06
SL_19	4772.94	31.92	2.84	0.19	4836.80	98.76	3.13	0.06
SL_20	4887.99	30.46	3.05	0.19	4702.05	91.32	3.30	0.06
SL_21	4909.56	30.68	3.04	0.19	4388.22	82.93	3.39	0.06
SL_22	4526.93	28.85	2.98	0.19	4572.41	85.74	3.41	0.06
SL_23	4477.94	25.74	3.31	0.19	5070.64	100.85	3.22	0.06
SL_24	6171.53	36.91	3.18	0.19	8030.21	197.65	2.60	0.06
SL_25	5837.40	32.85	3.38	0.19	6912.78	153.76	2.88	0.06
SL_26	5129.69	30.83	3.16	0.19	5067.54	100.98	3.21	0.06
SL_27	4883.35	31.01	2.99	0.19	4472.73	88.39	3.24	0.06
SL_28	5203.37	32.91	3.00	0.19	5363.02	110.75	3.10	0.06
SL_29	5015.44	31.29	3.05	0.19	5292.68	106.62	3.18	0.06
SL_30	4918.31	29.31	3.19	0.19	5319.08	105.82	3.22	0.06
SL_31	4697.19	27.46	3.25	0.19	5050.69	101.23	3.19	0.06
SL_32	4955.54	28.14	3.35	0.19	5304.92	103.88	3.27	0.06
SL_33	4678.63	26.91	3.30	0.19	5065.79	103.75	3.13	0.06
SL_34	3593.09	21.76	3.14	0.19	4161.97	94.76	2.81	0.06
SL_35	3803.06	23.08	3.13	0.19	4691.28	110.48	2.72	0.06
SL_36	3619.17	22.57	3.05	0.19	4345.31	99.47	2.80	0.06
SL_37	4249.64	26.34	3.07	0.19	4490.50	99.47	2.89	0.06
SL_38	3488.15	23.39	2.83	0.19	3528.14	83.56	2.70	0.06
SL_39	3642.01	24.48	2.83	0.19	3355.66	75.96	2.83	0.06
SL_40	4142.65	26.88	2.93	0.19	4100.37	90.04	2.91	0.06
SL_41	3841.23	24.70	2.96	0.19	4159.45	86.09	3.09	0.06
SL_42	3867.06	24.36	3.02	0.19	4343.87	95.89	2.90	0.06
SL_43	3051.88	21.35	2.72	0.19	3548.54	82.78	2.74	0.06
SL_44	2781.38	19.73	2.68	0.19	3240.39	78.13	2.65	0.06
SL_45	2635.95	18.78	2.67	0.19	2935.60	71.06	2.64	0.06
SL_46	2184.16	15.94	2.60	0.19	2693.22	63.47	2.72	0.06
SL_47	1785.80	12.78	2.66	0.19	2630.52	58.59	2.87	0.06
SL_48	927.11	6.96	2.53	0.19	1421.28	34.55	2.63	0.06
SL_49	646.60	5.56	2.21	0.19	741.12	20.32	2.33	0.06
SL_50	1025.72	7.74	2.52	0.19	1188.20	29.45	2.58	0.06
SL_51	1299.93	8.98	2.75	0.19	1316.67	29.73	2.83	0.06
SL_52	1587.03	10.74	2.81	0.19	1436.50	32.78	2.81	0.06
SL_53	2128.06	12.88	3.14	0.19	2193.11	43.98	3.19	0.06
SL_54	1860.44	11.19	3.16	0.19	2190.48	42.70	3.28	0.06
SL_55	1397.22	9.08	2.92	0.19	1739.70	36.55	3.05	0.06
SL_56	1244.47	8.12	2.91	0.19	1085.54	23.46	2.96	0.06
SL_57	1621.18	9.48	3.25	0.19	1772.03	34.84	3.26	0.06
SL_58	1512.26	8.84	3.25	0.19	1414.15	27.79	3.26	0.06
SL_59	793.09	4.84	3.12	0.19	774.94	15.66	3.17	0.06
SL_60	994.63	5.95	3.18	0.19	579.42	11.50	3.22	0.06

Compartiment	Octobre 2014				Novembre 2014			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	2294.08	38.67	2.97	0.05	2107.25	42.26	2.99	0.06
SL_02	2864.19	47.00	3.05	0.05	1631.12	30.42	3.22	0.06
SL_03	3009.37	45.72	3.29	0.05	2031.40	35.32	3.45	0.06
SL_04	2383.13	35.66	3.34	0.05	2524.09	43.40	3.49	0.06
SL_05	3313.54	44.41	3.73	0.05	3560.40	60.11	3.55	0.06
SL_06	3485.59	46.02	3.79	0.05	3629.74	61.20	3.56	0.06
SL_07	4542.90	61.31	3.70	0.05	4635.20	79.46	3.50	0.06
SL_08	4552.75	61.57	3.70	0.05	4724.87	81.30	3.49	0.06
SL_09	5151.71	73.80	3.49	0.05	5187.18	90.73	3.43	0.06
SL_10	5174.34	72.53	3.57	0.05	5191.53	88.07	3.54	0.06
SL_11	4928.45	71.22	3.46	0.05	4859.94	83.57	3.49	0.06
SL_12	4867.08	73.24	3.32	0.05	4681.19	81.76	3.44	0.06
SL_13	4894.83	73.97	3.31	0.05	4864.56	87.59	3.33	0.06
SL_14	4838.34	72.62	3.33	0.05	4816.19	89.15	3.24	0.06
SL_15	4971.32	74.02	3.36	0.05	5205.25	100.95	3.09	0.06
SL_16	4355.61	73.64	2.96	0.05	4447.20	93.52	2.85	0.06
SL_17	4131.16	69.09	2.99	0.05	4227.72	88.58	2.86	0.06
SL_18	4678.49	75.43	3.10	0.05	4673.10	92.28	3.04	0.06
SL_19	5036.69	79.62	3.16	0.05	5082.22	97.10	3.14	0.06
SL_20	5130.33	78.73	3.26	0.05	5168.30	97.36	3.19	0.06
SL_21	4862.55	74.84	3.25	0.05	4713.87	90.92	3.11	0.06
SL_22	4626.30	71.97	3.21	0.05	4393.19	83.24	3.17	0.06
SL_23	5961.56	102.20	2.92	0.05	5547.30	103.31	3.22	0.06
SL_24	11590.41	245.76	2.36	0.05	9267.35	197.82	2.81	0.06
SL_25	8921.15	172.06	2.59	0.05	8550.29	175.25	2.93	0.06
SL_26	5282.93	81.60	3.24	0.05	5397.61	98.64	3.28	0.06
SL_27	4727.02	76.38	3.09	0.05	4718.79	88.58	3.20	0.06
SL_28	5331.21	88.15	3.02	0.05	5107.50	94.84	3.23	0.06
SL_29	5338.25	84.97	3.14	0.05	5206.43	93.97	3.32	0.06
SL_30	5265.24	82.30	3.20	0.05	4990.34	92.52	3.24	0.06
SL_31	5094.08	81.55	3.12	0.05	4753.36	90.73	3.14	0.06
SL_32	5371.98	85.53	3.14	0.05	4703.96	87.56	3.22	0.06
SL_33	5139.44	84.60	3.04	0.05	4430.20	86.53	3.07	0.06
SL_34	4098.71	71.90	2.85	0.05	3866.41	77.38	3.00	0.06
SL_35	4179.45	70.05	2.98	0.05	4085.40	82.46	2.97	0.06
SL_36	4062.55	70.18	2.89	0.05	3889.76	80.63	2.89	0.06
SL_37	4215.96	71.90	2.93	0.05	4140.13	85.87	2.89	0.06
SL_38	3332.12	61.23	2.72	0.05	3251.71	72.77	2.68	0.06
SL_39	3361.13	60.53	2.78	0.05	3343.00	75.19	2.67	0.06
SL_40	4051.45	70.97	2.85	0.05	4128.78	84.53	2.93	0.06
SL_41	4292.88	69.51	3.09	0.05	4211.12	80.57	3.14	0.06
SL_42	4088.18	68.53	2.98	0.05	4138.10	81.72	3.04	0.06
SL_43	3249.29	60.40	2.69	0.05	3265.26	68.11	2.88	0.06
SL_44	2918.71	53.89	2.71	0.05	3037.30	64.09	2.84	0.06
SL_45	2632.15	48.39	2.72	0.05	2784.62	61.76	2.71	0.06
SL_46	2410.38	44.36	2.72	0.05	2681.02	59.44	2.71	0.06
SL_47	2578.00	45.08	2.86	0.05	2895.99	61.97	2.80	0.06
SL_48	1585.68	29.56	2.68	0.05	1487.11	36.29	2.46	0.06
SL_49	1243.02	27.86	2.23	0.05	876.40	22.78	2.31	0.06
SL_50	1467.82	30.01	2.45	0.05	1072.09	25.24	2.55	0.06
SL_51	1390.96	24.99	2.78	0.05	1360.87	28.53	2.86	0.06
SL_52	1474.05	26.84	2.75	0.05	1196.40	26.14	2.75	0.06
SL_53	2084.17	34.44	3.03	0.05	2295.21	43.98	3.13	0.06
SL_54	2451.93	38.00	3.23	0.05	2443.11	45.30	3.24	0.06
SL_55	1949.23	32.16	3.03	0.05	1926.12	38.00	3.04	0.06
SL_56	1508.49	25.81	2.92	0.05	1170.60	24.14	2.91	0.06
SL_57	1914.97	29.67	3.23	0.05	1882.85	35.14	3.21	0.06
SL_58	1704.76	26.44	3.22	0.05	1593.08	29.84	3.20	0.06
SL_59	696.11	10.95	3.18	0.05	780.91	15.29	3.07	0.06
SL_60	600.16	9.29	3.23	0.05	563.21	10.57	3.20	0.06

Compartiment	12 juin 2015				Compartiment	Octobre 2015			
	Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)		Volume (m³)	Marge erreur (± m³)	Volume surfacique (m³/m²)	Marge erreur (± m³/m²)
SL_01	2099.07	22.40	3.09	0.03	SL_01	2033.46	18.35	3.21	0.03
SL_02	1538.50	15.96	3.18	0.03	SL_02	2397.46	22.16	3.14	0.03
SL_03	1973.92	19.17	3.40	0.03	SL_03	2501.56	22.94	3.16	0.03
SL_04	2500.95	23.25	3.55	0.03	SL_04	2290.29	19.67	3.38	0.03
SL_05	4028.64	40.49	3.28	0.03	SL_05	3537.76	28.74	3.57	0.03
SL_06	4147.49	44.23	3.09	0.03	SL_06	3583.09	30.76	3.38	0.03
SL_07	4838.12	48.28	3.31	0.03	SL_07	4809.38	42.55	3.28	0.03
SL_08	4666.46	44.58	3.45	0.03	SL_08	5186.10	47.82	3.14	0.03
SL_09	4926.74	44.24	3.68	0.03	SL_09	5821.61	54.47	3.10	0.03
SL_10	4923.74	43.12	3.77	0.03	SL_10	5770.79	54.10	3.09	0.03
SL_11	4868.07	46.98	3.42	0.03	SL_11	5421.52	53.05	2.96	0.03
SL_12	4849.41	50.67	3.16	0.03	SL_12	5023.58	49.47	2.94	0.03
SL_13	4939.10	51.38	3.17	0.03	SL_13	4962.25	48.34	2.98	0.03
SL_14	4877.59	50.95	3.16	0.03	SL_14	4856.20	47.72	2.95	0.03
SL_15	5298.25	56.13	3.11	0.03	SL_15	5402.04	53.98	2.90	0.03
SL_16	4593.72	51.30	2.95	0.03	SL_16	4768.64	50.93	2.72	0.03
SL_17	4245.76	47.45	2.95	0.03	SL_17	4464.07	48.43	2.67	0.03
SL_18	4712.04	51.94	2.99	0.03	SL_18	4823.82	47.91	2.92	0.03
SL_19	5057.41	54.11	3.08	0.03	SL_19	5073.29	47.16	3.12	0.03
SL_20	5295.69	53.65	3.26	0.03	SL_20	5249.52	46.31	3.29	0.03
SL_21	5200.56	53.71	3.20	0.03	SL_21	5120.40	45.59	3.26	0.03
SL_22	5368.56	54.66	3.24	0.03	SL_22	4956.69	43.97	3.27	0.03
SL_23	6388.25	64.89	3.25	0.03	SL_23	5338.46	46.07	3.36	0.03
SL_24	9003.41	107.39	2.77	0.03	SL_24	8092.88	74.91	3.13	0.03
SL_25	7379.82	83.20	2.93	0.03	SL_25	8334.89	79.53	3.04	0.03
SL_26	5212.32	54.24	3.17	0.03	SL_26	5036.98	45.14	3.24	0.03
SL_27	4402.87	49.47	2.94	0.03	SL_27	4375.90	43.77	2.90	0.03
SL_28	5119.32	55.28	3.06	0.03	SL_28	4206.79	41.46	2.94	0.03
SL_29	5281.82	56.62	3.08	0.03	SL_29	4043.11	40.34	2.91	0.03
SL_30	5323.59	58.28	3.01	0.03	SL_30	4738.68	46.43	2.96	0.03
SL_31	5136.66	58.47	2.90	0.03	SL_31	4858.46	50.16	2.81	0.03
SL_32	5034.23	56.48	2.94	0.03	SL_32	4752.19	48.42	2.85	0.03
SL_33	5144.47	56.43	3.01	0.03	SL_33	5179.20	50.56	2.97	0.03
SL_34	4114.33	45.24	3.00	0.03	SL_34	4282.52	42.92	2.89	0.03
SL_35	4095.05	44.51	3.04	0.03	SL_35	4123.87	40.56	2.95	0.03
SL_36	3974.24	42.83	3.06	0.03	SL_36	3918.82	38.86	2.92	0.03
SL_37	4228.04	46.63	2.99	0.03	SL_37	4311.56	44.64	2.80	0.03
SL_38	3260.87	39.97	2.69	0.03	SL_38	3357.84	38.87	2.51	0.03
SL_39	3380.59	38.85	2.87	0.03	SL_39	3234.75	35.22	2.66	0.03
SL_40	4339.28	46.60	3.07	0.03	SL_40	4448.95	41.47	3.11	0.03
SL_41	4072.41	45.75	2.94	0.03	SL_41	3943.94	37.34	3.06	0.03
SL_42	3837.79	44.59	2.84	0.03	SL_42	3925.37	39.17	2.91	0.03
SL_43	3295.31	40.04	2.72	0.03	SL_43	3354.73	36.28	2.68	0.03
SL_44	3063.05	35.51	2.85	0.03	SL_44	3249.23	34.49	2.73	0.03
SL_45	2769.84	33.15	2.76	0.03	SL_45	2822.94	31.26	2.62	0.03
SL_46	2666.38	30.67	2.87	0.03	SL_46	2655.23	28.18	2.73	0.03
SL_47	2891.00	32.52	2.93	0.03	SL_47	2924.33	29.12	2.91	0.03
SL_48	1412.59	17.41	2.68	0.03	SL_48	1515.64	16.01	2.74	0.03
SL_49	830.90	11.73	2.34	0.03	SL_49	913.55	11.05	2.40	0.03
SL_50	1260.14	16.58	2.51	0.03	SL_50	1183.47	14.17	2.42	0.03
SL_51	1400.98	16.26	2.84	0.03	SL_51	1248.40	13.62	2.66	0.03
SL_52	1521.37	18.07	2.78	0.03	SL_52	1548.69	16.76	2.68	0.03
SL_53	2409.64	25.63	3.10	0.03	SL_53	2055.29	19.54	3.05	0.03
SL_54	2317.74	23.51	3.25	0.03	SL_54	2370.94	21.40	3.21	0.03
SL_55	1849.42	20.10	3.04	0.03	SL_55	1744.92	16.12	3.14	0.03
SL_56	1325.77	14.77	2.96	0.03	SL_56				
SL_57	1931.05	19.66	3.24	0.03	SL_57				
SL_58	1504.31	15.76	3.15	0.03	SL_58				
SL_59					SL_59				
SL_60					SL_60				

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-LUCE

PROJET DE RECHARGE DE LA PLAGE DE L'ANSE AUX COQUES

Suivi de la recolonisation de la faune benthique
An 2 – 2016

PESCA Environnement
26 juillet 2016



- ☐ MUNICIPALITÉ DE SAINTE-LUCE
PROJET DE RECHARGE DE LA PLAGE DE L'ANSE AUX COQUES
SUIVI DE LA RECOLONISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE
AN 2 – 2016

Document réalisé pour

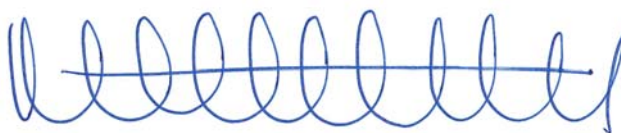
Municipalité de Sainte-Luce

N/Réf.

MSLSLU00-745

- ☐ ÉQUIPE DE RÉALISATION

PESCA Environnement



Directrice de projet

Marjolaine Castonguay, biologiste, M. Sc.

☐ TABLE DES MATIÈRES

1	MISE EN CONTEXTE	1
2	PROTOCOLE DE SUIVI BIOLOGIQUE.....	1
2.1	Réalisation du protocole – 2 ^e année suivant la recharge de la plage	2
3	RÉSULTATS.....	2

☐ LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractérisation visuelle du substrat et abondance des colonies benthiques, plage de l'Anse aux Coques, 8 juillet 2016	3
-----------	---	---

☐ LISTE DES FIGURES

Figure 1	Plan de localisation des sites d'échantillonnage	5
----------	--	---

☐ LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Photographies des sites d'échantillonnage – 8 juillet 2016	
----------	--	--

1 Mise en contexte

À la suite de plusieurs événements de tempêtes au début des années 2000, dont les grandes marées de 2010, le mur de la promenade de la plage de l'Anse aux Coques a été endommagé. D'importants travaux, proposés par le ministère de la Sécurité publique et visant la restauration et le renforcement du mur ainsi que la stabilisation de la plage, ont été réalisés à l'automne 2014. Les travaux de rechargement en matériaux grossiers ont été effectués sur une longueur de 530 m.

Dans le contexte de sa demande d'autorisation auprès des autorités gouvernementales préalablement aux travaux, la municipalité de Sainte-Luce s'est engagée à effectuer un suivi biologique qualitatif de la présence d'espèces d'invertébrés et à s'assurer d'une recolonisation de la faune benthique dans le secteur des travaux.

PESCA Environnement a été mandatée par la municipalité de Sainte-Luce afin d'effectuer le suivi de la faune benthique selon les exigences de Pêches et Océans Canada (MPO), soit :

- la réalisation de trois suivis sur une période de six ans, soit la deuxième, la quatrième et la sixième année suivant la recharge de la plage;
- l'évaluation de la présence d'un substrat favorable à la colonisation du milieu par la mye commune (*Mya arenaria*);
- l'évaluation de la présence de la mye commune ou de la macome baltique (*Macoma balthica*).

Ce rapport présente les résultats du premier suivi, soit celui de la deuxième année suivant les travaux de rechargement. Le *Protocole de suivi de la recolonisation de la faune benthique sur la plage de l'Anse-aux-Coques dans la municipalité de Sainte-Luce au Bas-Saint-Laurent* (ci-après « le protocole »), produit par la municipalité de Sainte-Luce et déposé au MPO¹, a été utilisé.

2 Protocole de suivi biologique

Comme il est mentionné dans le protocole de la municipalité de Sainte-Luce, l'évaluation de la recolonisation des espèces benthiques a été effectuée à partir des informations recueillies par le MPO sur le terrain et contenues dans l'état de référence du 30 avril 2014. Le suivi sur le terrain par PESCA Environnement a été réalisé le 8 juillet 2016.

¹ Municipalité de Sainte-Luce. 2014. *Protocole de suivi de la recolonisation de la faune benthique sur la plage de l'Anse-aux-Coques dans la municipalité de Sainte-Luce au Bas-Saint-Laurent – Dans le cadre du projet de recharge de la plage de l'Anse aux Coques en matériaux grossiers dans la municipalité de Sainte-Luce au Bas-Saint-Laurent*. Déposé au ministère des Pêches et des Océans du Canada.

2.1 Réalisation du protocole – 2^e année suivant la recharge de la plage

Trois transects, séparés par une distance de 250 m, ont été positionnés perpendiculairement au mur de la promenade à l'intérieur du site de la recharge, puis ont été géoréférencés (figure 1). Cinq échantillons ont été prélevés à chacun des transects, à 5, 15, 25, 35 et 50 m du mur.

La grosseur des sédiments constituant le substrat des 15 sites d'échantillonnage a été évaluée visuellement. Chaque site d'échantillonnage a été photographié avant le creusage (annexe A). Les sites d'échantillonnage ont été creusés à l'aide d'une pelle sur une surface de 1 m par 1 m et une profondeur de 0,3 m. Le substrat retiré a été tamisé avec un grillage de maille de 5 mm dans le but de dégager les espèces benthiques présentes. Les espèces observées ont été identifiées (tableau 1).

Aucune espèce de poissons n'a été observée.

3 Résultats

Le transect 1, le plus à l'ouest de la zone d'étude, est composé d'une granulométrie plus grossière et plus compacte à proximité du mur comparativement à celle évaluée à 35 m et à 50 m du mur. La granulométrie devient plus fine en s'éloignant de ce dernier. Les myes (244) ont été trouvées dans ce substrat fin, à 50 m du mur.

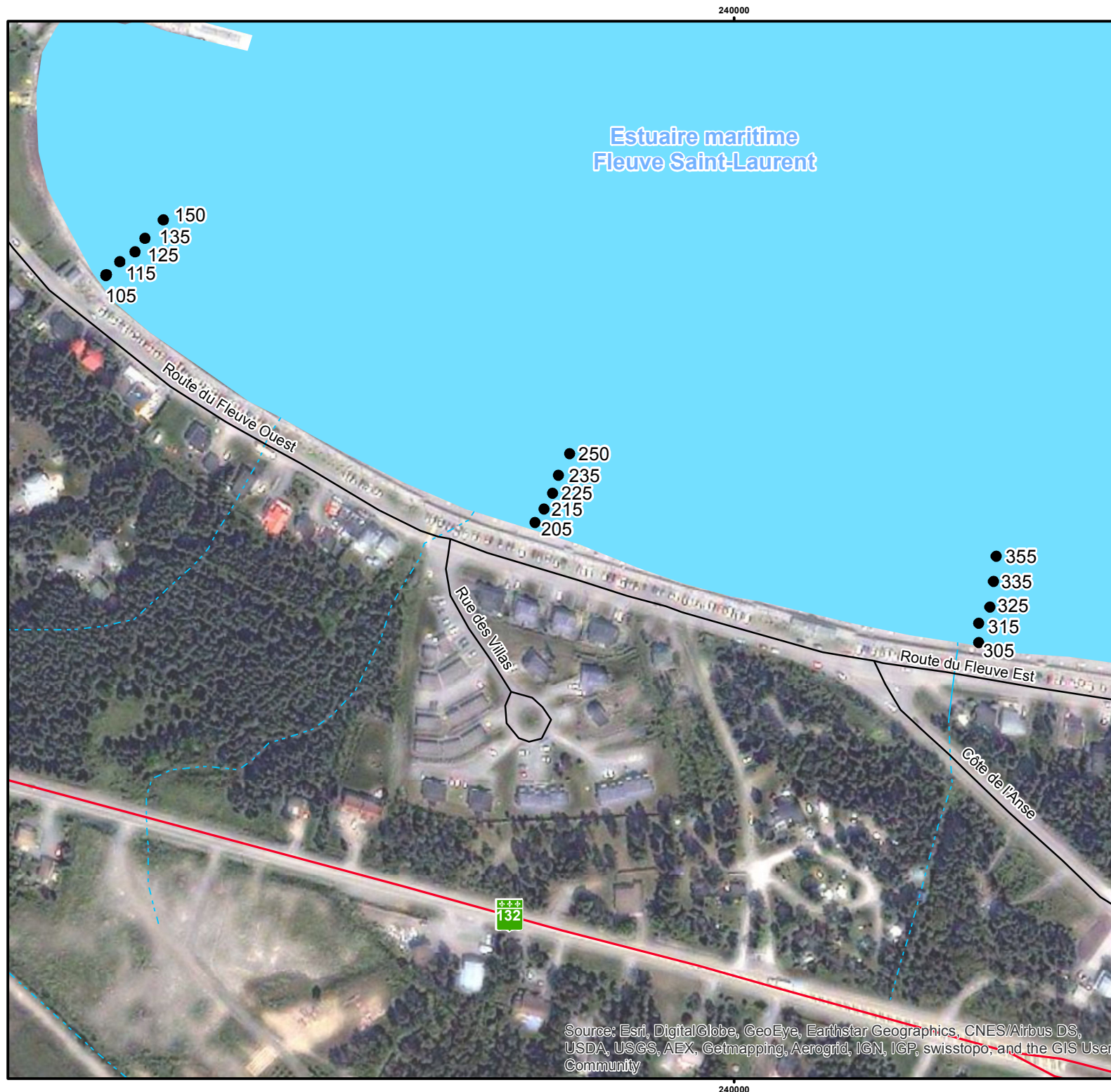
Le transect 2, au centre de la zone d'étude, est composé d'une granulométrie plus grossière à plus de 25 m du mur. La granulométrie devient plus fine à 50 m du mur, et c'est à ce site d'échantillonnage que les myes sont les plus abondantes (497).

Le transect 3, le plus à l'est de la zone d'étude, est composé d'une granulométrie variant du gravier au sable. La granulométrie est plus fine à 35 m et à 55 m du mur. Quatre-vingt-sept myes ont été trouvées dans ce substrat fin à 35 m du mur, et 116 myes ont été trouvées à 55 m du mur. C'est à cet endroit que les myes de plus petite taille ont été trouvées.

Tableau 1 Caractérisation visuelle du substrat et abondance des colonies benthiques, plage de l'Anse aux Coques, 8 juillet 2016

N° échantillon	Substrat (%)						Colonies benthiques (nombre d'individus)						
	Bloc (250-500 mm)	Galet (25-80 mm)	Caillou (40-80 mm)	Gravier (5-40 mm)	Sable (0,125-5 mm)	Limon (0,125 mm)	Matière organique	Mye (5-10 mm)	Mye (10 mm et plus)	Macome	Moule bleue	Ver	Gamare
105		5	20	5	65	1	4	0	0	0	0	0	0
115			15	10	70	1	4	1	0	0	0	0	0
125				40	55	1	4	2	0	0	2	0	0
135				5	80	5	5	0	0	0	0	0	0
150				5	90	5		42	202	0	0	93	0
205				20	79	1		0	0	0	0	0	0
215				1	98	1		0	0	0	0	0	0
225		5	10	30	55		1	0	0	0	0	0	0
235			5	70	20	5		53	0	0	10	0	0
250					95	5		77	420	0	3		Présence
305				40	60			0	0	0	0	0	0
315			2	20	78			0	0	0	0	0	0
325				50	48	2		0	0	0	0	0	0
335				10	85	5		51	36	0	8	0	0
355			5		90	5		82	34	0	0	10	Présence

Note : Le numéro de l'échantillon correspond à la position du transect (1 : ouest, 2 : centre, 3 : est) et 5, 15, 25, 35, 50 et 55 correspondent à la distance en mètres par rapport au mur en haut de plage.



Suivi de la recolonisation
de la faune benthique – An 2

Plan de localisation des sites d'échantillonnage

● Site d'échantillonnage

Réseau routier

— Route nationale

— Route locale

Hydrographie

— Cours d'eau permanent

— Cours d'eau intermittent

Plan d'eau



1/3 000
0 15 30 60 mètres



Projection : NAD 1983 MTM 6

Sources :
© Gouvernement du Québec, tous droits réservés, 2016
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, ministère des
Ressources naturelles. Tous droits réservés 2016

14 juillet 2016

N/Ref. : MSLSLU_745_001A

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS,
USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User
Community

Annexe A Photographies des sites d'échantillonnage – 8 juillet 2016



Photo 1. Site d'échantillonnage 105 – Avant creusage



Photo 2. Site d'échantillonnage 115 – Avant creusage



Photo 3. Site d'échantillonnage 115 – Après creusage



Photo 4. Site d'échantillonnage 125 – Avant creusage



Photo 5. Site d'échantillonnage 135 – Après creusage



Photo 6. Site d'échantillonnage 150 – Avant creusage



Photo 7. Site d'échantillonnage 150



Photo 8. Site d'échantillonnage 215 – Avant creusage



Photo 9. Site d'échantillonnage 225 – Après creusage



Photo 10. Site d'échantillonnage 235 – Avant creusage



Photo 11. Site d'échantillonnage 250 – Avant creusage



Photo 12. Site d'échantillonnage 250



Photo 13. Site d'échantillonnage 305 – Après creusage



Photo 14. Site d'échantillonnage 315 – Avant creusage



Photo 15. Site d'échantillonnage 325 – Avant creusage



Photo 16. Site d'échantillonnage 335 – Avant creusage



Photo 17. Site d'échantillonnage 335



Photo 18. Site d'échantillonnage 355 – Après creusage

Carleton-sur-Mer

895, boulevard Perron
Carleton-sur-Mer (Québec) G0C 1J0
418 364-3139

Montréal

Québec

Rimouski

1 888 364-3139
pescaenvironnement.com

A photograph of a coastal town with several buildings, including a prominent church with a steeple, situated along a shoreline. In the foreground, there is a dark, pebbly beach with some seaweed. The water is a deep blue, and the sky is clear.

SUIVI DE LA RECOLONISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE

AN 4 – 2018

À LA DEMANDE DE :
**MUNICIPALITÉ DE
SAINTE-LUCE
PROJET DE
RECHARGE DE LA
PLAGE DE L'ANSE
AUX COQUES**

8 AOÛT 2018

M – Expertise Marine

Réalisation: Lyne Morissette, Ph.D.

lyne@m-expertisemarine.com





Lyne Morissette, Ph.D.
Biologiste marine
PDG et chargée de projets

M – Expertise Marine
10, rue Luce-Drapeau
Sainte-Luce, QC
G0K1P0

lyne@m-expertisemarine.com
www.m-expertisemarine.com

SUIVI DE LA RECOLONISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE

AN 4 - 2018

DOSSIER NUMÉRO EX2018004

À LA DEMANDE DE :

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-LUCE

PROJET DE RECHARGE DE LA
PLAGE DE L'ANSE AUX COQUES



8 AOÛT 2018

TABLE DES MATIÈRES

MISE EN CONTEXTE	9
MANDAT.....	10
BIOLOGIE DE LA MYE COMMUNE (<i>MYA ARENARIA</i>).....	11
DESCRIPTION DES TRAVAUX.....	13
PROTOCOLE DE SUIVI BIOLOGIQUE.....	13
RÉSULTATS.....	16
ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE ET SUBSTRAT FAVORABLE.....	16
DIVERSITÉ BENTHIQUE DANS L'ANSE AUX COQUES À L'AN 4 (2018).....	28
PRÉSENCE DE MYE COMMUNE (<i>MYA ARENARIA</i>) ET DE MACOME BALTIQUE (<i>MACOMA BALTHICA</i>).....	28
COMPARAISONS 2016-2018.....	32
RECOMMANDATIONS.....	34
PROTOCOLE EN LIEN AVEC LES OBJECTIFS VISÉS	34
IMPACT DU PROJET DE RECHARGE DE PLAGE	34
ÉVALUATION DU GISEMENT DE MYES COMMUNES POUR UNE POTENTIELLE REPRISE DE LA CUEILLETTE	35
RÉFÉRENCES.....	36

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1. CARTE DES ZONES DE CUEILLETTE DANS L'ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT. LES ZONES EN VERT SONT OUVERTES POUR LA CUEILLETTE DE MYES. SOURCE : SYSTÈME IRMELL (INFORMATION, RÉCOLTE MOLLUSQUES, ÉTENDUES, LATITUDE, LONGITUDE) DU MPO.	12
FIGURE 2. PLAN DE LOCALISATION DES TRANSECTS ET POINTS D'ÉCHANTILLONNAGE DANS L'ANSE AUX COQUES.	14
FIGURE 3. IMAGERIE PAR DRONE À 500 M MONTRANT LA ZONE INTERTIDALE (ZONE DE MARÉES) DE L'ANSE AUX COQUES À MARÉE BASSE.	16
FIGURE 4. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS SUR LE TRANSECT 1	18
FIGURE 5. SÉDIMENT ANOXIQUE - ÉCHANTILLON 135	19
FIGURE 6. IMAGERIE PAR DRONE DU TRANSECT 1 À 100 MÈTRES. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS 105, 115, 125, 135 ET 150. LA ZONE IDENTIFIÉ EN GRIS FONCÉ EST COMPOSÉE DE SÉDIMENTS ANOXIQUES.	20
FIGURE 7. IMAGERIE PAR DRONE DU TRANSECT 1 À 60 MÈTRES. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS 105, 115, 125, 135 ET 150.	21
FIGURE 8. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS SUR LE TRANSECT 2	22
FIGURE 9. IMAGERIE PAR DRONE DU TRANSECT 2 À 100 MÈTRES. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS 205, 215, 225, 235 ET 250.	23
FIGURE 10. IMAGERIE PAR DRONE DU TRANSECT 2 À 60 MÈTRES. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS 205, 215, 225, 235 ET 250.	24
FIGURE 11. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS SUR LE TRANSECT 3	25
FIGURE 12. IMAGERIE PAR DRONE DU TRANSECT 3 À 100 MÈTRES. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS 305, 315, 325, 335 ET 355.	26
FIGURE 13. IMAGERIE PAR DRONE DU TRANSECT 3 À 60 MÈTRES. DISPOSITION DES ÉCHANTILLONS 305, 315, 325, 335 ET 355.	27
FIGURE 14. RÉCOLTE - ÉCHANTILLON 150.	28
FIGURE 15. RÉCOLTE - ÉCHANTILLON 135.	29
FIGURE 16. RÉCOLTE - ÉCHANTILLON 125.	29
FIGURE 17. RÉCOLTE - ÉCHANTILLON 250.	30
FIGURE 18. ÉCHANTILLON 235 - BIVALVES MORTS	30
FIGURE 19. RÉCOLTE - ÉCHANTILLON 355.	31
FIGURE 20. RÉCOLTE - ÉCHANTILLON 335.	31

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. CARACTÉRISATION VISUELLE DU SUBSTRAT SUR TROIS TRASECTS DE LA PLAGE DE L'ANSE AUX COQUES, LE 8 AOÛT 2018. LE SUBSTRAT FAVORABLE À LA CROISSANCE DE DE LA MYE COMMUNE (<i>MYA ARENARIA</i>) EST IDENTIFIÉ EN BLEU.	17
TABLEAU 2. ABONDANCE ET INDICE DE DIVERSITÉ DE SHANNON POUR LES COLONIES BENTHIQUES DE LA PLAGE DE L'ANSE AUX COQUES, LE 8 AOÛT 2018. LES ESPÈCES CIBLÉES PAR LE PRÉSENT MANDAT (MYE COMMUNE ET MACOME BALTIQUE) SONT IDENTIFIÉES EN BLEU.	33

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1. RÉOLUTION DU CONSEIL MUNICIPAL À M – EXPERTISE MARINE LE CONTRAT POUR LR SUIVI DE RELOCALISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE.	38
ANNEXE 2. GUIDE D'IDENTIFICATION DES MOLLUSQUES BIVALVES DU SAINT-LAURENT.	39
ANNEXE 3. PHOTOS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TRANSECT 1	40
ANNEXE 4. PHOTOS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TRANSECT 2	41
ANNEXE 5. PHOTOS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TRANSECT 3	42

À la suite de plusieurs événements de tempêtes au début des années 2000, dont l'onde de tempête de décembre 2010, qui a particulièrement affecté la côte partout dans la région, le mur de la promenade de la plage de l'Anse aux Coques a été endommagé à de nombreuses reprises. L'abaissement du niveau de la plage suite aux nombreuses tempêtes représentaient un risque pour que les vagues à pleine hauteur puisse affecter le mur de la promenade par la submersion et l'érosion.

D'importants travaux, proposés par le Ministère de la Sécurité Publique et visant la restauration et le renforcement du mur ainsi que la stabilisation de la plage, ont été réalisés à l'automne 2014. Les travaux de rechargement en matériaux grossiers ont été effectués sur une longueur de 530 mètres. La technique et les matériaux utilisés (ayant fait leurs preuves ailleurs dans le monde), devrait permettre à la plage de se stabiliser davantage et de retrouver un certain équilibre à long terme.

Initialement, la plage de l'Anse aux Coques était principalement composée d'un substrat sableux. Ce type d'habitat est favorable à la présence d'oiseaux limicoles et constituent aussi des sites de fraie pour le capelan qui constitue un maillon important de la chaîne alimentaire du milieu marin. Le substrat dans la zone intertidale constitue un habitat de qualité pour des organismes comme les vers marins, la mye commune (*Mya arenaria*), le macome balthique (*Macoma baltica*), le buccin commun (*Buccinum undatum*), les patelles (*Patella* sp.), les oursins et les crabes et autres espèces d'invertébrés benthiques.

Une visite de site a été effectuée le 30 avril 2014 (avant le début des travaux) afin de déterminer la présence d'espèces d'importance pour les pêcheries commerciales, récréatives ou autochtones (CRA) et la valeur de l'habitat au site des travaux. Cette visite a permis de déterminer grossièrement la composition granulométrique des sédiments en place.

Dans le contexte de sa demande d'autorisation auprès des autorités gouvernementales préalablement aux travaux, la municipalité de Sainte-Luce s'est engagée à effectuer un suivi biologique qualitatif de la présence d'espèces d'invertébrés et à s'assurer d'une recolonisation de la faune benthique dans le secteur des travaux.

Le suivi de la faune benthique doit être fait 2 ans, 4 ans et 6 ans après les travaux de rechargement, et selon les exigences du Ministère des Pêches et des Océans du Canada (MPO) (voir « Mandat »). Le premier suivi a été produit par PESCA Environnement en 2016.

M – Expertise Marine a été mandatée par la municipalité de Sainte-Luce pour effectuer le suivi en 2018 (Annexe 1). Ce rapport présente les résultats du second suivi, soit celui de la quatrième année suivant les travaux de rechargement. Le protocole de suivi de la recolonisation de la faune benthique sur la plage de l'Anse aux Coques dans la municipalité de Sainte-Luce au Bas-Saint-Laurent (ci-après « le Protocole »), produit par la municipalité de Sainte-Luce et déposé au MPO, a été utilisé.

MANDAT

Tel que convenu avec le ministère de Pêches et Océans Canada (MPO), la municipalité de Sainte-Luce, dans le cadre de sa démarche de demande d'autorisation d'urgence, doit effectuer un suivi biologique qualitatif de la présence d'espèces d'invertébrés. Elle doit aussi s'assurer d'une recolonisation par la faune benthique, telle que la mye commune (*Mya arenaria*) et de la macome baltique (*Macoma balthica*) dans le secteur suite à la réalisation des travaux de rechargement en galet. Au fil des années, le type de substrat retrouvé devrait être favorable à cette recolonisation. Le suivi s'échelonne sur six ans et l'année 2018 constitue la quatrième année d'échantillonnage (An 4).

Concrètement, voici les exigences du MPO :

1. La municipalité de Sainte-Luce entreprendra un programme de suivi afin de **vérifier la recolonisation par la faune benthique** au site de la recharge de plage, sous le niveau de la pleine mer supérieure de grande marée (PMSGM);
2. La municipalité de Sainte-Luce évaluera les paramètres suivants, à trois reprises sur une période de six années soit la deuxième, la troisième et la sixième année suivant la recharge de plage :
 - a. La présence d'un **substrat favorable** à la colonisation du milieu par la mye commune;
 - b. La présence de **myes communes** ou de **macomes baltiques**.

L'évaluation de la recolonisation des espèces benthique en suivi se fera à partir des informations recueillies sur le terrain et contenues dans l'état de référence du 30 avril 2014 réalisé par les biologistes du MPO.

La mye commune (*Mya arenaria*), mieux connue sous les noms de Coque ou de Clam, est l'un des bivalves les plus abondants des eaux côtières nord-américaines et européennes. Dans l'Atlantique Nord-Ouest, on en retrouve du Labrador vers le sud jusqu'au cap Hatteras, avec une abondance plus faible vers le sud jusqu'en Floride (Christian *et al.* 2010). Dans le Saint-Laurent, on la retrouve dans les baies sablonneuses de l'estuaire et du Golfe.

Bien qu'elle puisse vivre dans plusieurs types de substrats, c'est dans le sable vaseux qu'elle atteint les plus grandes densités, à partir du médiolittoral jusqu'à une dizaine de mètres de profondeur. Les adultes ont une distribution agrégée et sont normalement limités aux zones intertidales et aux zones subtidales peu profondes dans les zones estuariennes à fond mou; cependant, ils se sont produits à des profondeurs pouvant atteindre 200 m (Newell et Hidu, 1986). Plusieurs auteurs signalent que les plus fortes densités sont souvent associées aux sédiments sableux (Jacques 1983, Desrosiers et Brêthes 1984).

Dans le Saint-Laurent, la reproduction de la Mye commune débute au printemps. Les mâles et les femelles libèrent leurs gamètes dans le milieu marin et la fécondation se produit dans l'eau. Des larves microscopiques sortent des oeufs et dérivent dans les eaux de surface durant 2 à 6 semaines. Au terme de son développement, la larve planctonique possède des glandes à byssus qui lui permettent de se fixer sur le sédiment où a lieu sa métamorphose vers la forme adulte. Arrivée sur le fond, elle explore l'environnement en se laissant porter par les courants. Elle se fixe sur le substrat et s'en détache successivement à la recherche d'un microhabitat où la force des courants et la nature du fond sont adéquats. Cette étape de courte durée est critique, car elle détermine en bonne partie l'habitat du futur adulte. La Mye juvénile demeure fixée sur le fond à l'aide de byssus, car elle ne peut s'enfouir avant d'atteindre une longueur d'environ 10 mm. La Mye adulte habite dans le même terrier toute sa vie, ne faisant que s'y enfoncer plus profondément à mesure qu'elle grandit (Chabot et Rossignol, 2003).

La croissance des myes et sa colonisation de certains secteurs dépend grandement du temps d'immersion (le plus long possible) dans la zone intertidale (Jacques 1983, Bourassa 1991, Tremblay 1992). Les études sur cette espèce parlent également d'un effet négatif d'une forte quantité de particules (substrat vaseux) en suspension dans l'eau (Jacques 1983), qui ralentissent la croissance en limitant l'efficacité de filtration. Les substrats présentant des particules plus grosses comme le gravier peuvent quant à eux constituer un refuge face aux prédateurs (Seitz *et al.* 2001).

La mye commune est récoltée à des fins commerciales sur la rive nord de l'estuaire maritime et au sud du golfe principalement. La cueillette à plus petite échelle est documentée pour plusieurs secteurs du sud de l'estuaire, mais les seuls gisements autorisés en ce moment sont les secteurs de l'Isle Verte et du Cap à l'Original au Bic (Figure 1). De plus, la cueillette des mollusques à moins de 125 mètres d'un quai est interdite en tout temps en raison des risques de contamination.

DESCRIPTION DES TRAVAUX

Tel que mentionné dans le mandat de la municipalité de Sainte-Luce commandé par le MPO, l'évaluation de la relocalisation des espèces benthiques a été effectuée à partir des informations recueillies par le MPO sur le terrain et contenues dans l'état de référence du 30 avril 2014. Le suivi sur le terrain par M – Expertise Marine a été réalisé le 8 août 2018.

PROTOCOLE DE SUIVI BIOLOGIQUE

Le protocole développé par le MPO stipule les étapes suivantes :

1. Trois transects positionnés perpendiculairement au mur existant et séparés par une distance de 250 m, ont établis à l'intérieur du site de la recharge puis géoréférencés (Figure 2). Sur chacun des transects, cinq échantillons ont été prélevés, ces derniers étant positionnés à 5, 15, 25, 35 et 50 m du mur de l'Anse aux Coques.
2. Pour chaque point d'échantillonnage, quinze (15) au total, une caractérisation qualitative du type de substrat (sable, galet ou mixte) et une identification des espèces retrouvées a effectuées.

Pour ce faire, à l'aide d'une pelle, un trou a été creusé et la matière retirée qualifiée (type de substrat) puis tamisée à l'aide d'un « Vexar » de maille approximative de 5 mm afin de dégager les espèces benthiques qui s'y retrouvent.

Les transects 1, 2 et 3 correspondent à la zone ouest, centre et est de la baie de l'Anse aux Coques, respectivement.



Figure 2. Plan de localisation des transects et points d'échantillonnage dans l'Anse aux Coques

La méthode d'analyse granulométrique utilisée pour traiter ces échantillons est basée sur celle de Giguère *et al.* (2008), basée sur Walton (1980). Les teneurs en argile et limon (particules de moins de 63 µm), en sable (de 63 µm à 2 mm), en gravier (de 2 mm à 5 cm), en galet (de 5 à 20 cm) et en roche (plus de 20 cm), soit le poids sec de chaque catégorie par rapport au poids sec de l'échantillon total, sont évaluées visuellement et présentées en pourcentage.

Les classes de sédiments utilisées pour l'évaluation visuelle et l'analyse granulométrique sont : vase, vase sableuse, sable vaseux, sable, sable graveleux et sédiment mixte (Giguère *et al.* 2008).

L'habitat préférentiel (substrat favorable) à la croissance et la recolonisation de la mye commune (*Mya arenaria*) doit être composé de sable.

Newell et Hidu (1982); Christian *et al.* (2010)

Chaque site d'échantillonnage a été photographié avant le creusage (Annexe A). Les sites d'échantillonnages ont été creusés à l'aide d'une pelle sur une surface de 1 m par 1 m et une profondeur de 0,3 m. Le substrat retiré a été tamisé avec un tamis de maille de 5 mm et les espèces observées ont été identifiées et décomptées suivant l'ouvrage de Chabot et Rossignol (2003) et u guide d'identification terrain de Grant et Nozères (2008) (Annexe 2).

La présence de macomes baltiques et de myes communes a été spécifiquement caractérisée. Afin de faciliter les comparaisons avec le protocole précédent (An 2; PESCA 2016), les myes communes ont été classifiées en classes de taille soit < 10 mm ou > 10 mm. Il ne s'agit pas de classes correspondant au cycle de vie puisque la taille à maturité sexuelle varie entre 29 mm et 46 mm pour cette espèce (Brulotte et Giguère, 2010). À ces deux catégories a été ajoutée la classe de « taille légale », (> 51mm), qui correspond à la taille minimale légale de capture pour cette espèce.

La taille à maturité sexuelle varie entre 29 mm et 46 mm. La taille minimale légale de capture pour la mye commune (*Mya arenaria*) est de 51mm.

Brulotte et Giguère (2010)

L'indice de diversité de Shannon a été calculé pour chaque échantillon. Cet indice renseigne sur la diversité des espèces d'un milieu étudié. Lorsque tous les individus appartiennent à la même espèce, l'indice de diversité est égal à 0. Plus il y a d'espèces différentes et en proportions relativement égales (pas de dominance), plus la diversité sera élevée.

MATÉRIEL UTILISÉ

- Pelle
- Tamis (Vexar de maille approximative de 5 mm)
- Ruban à mesurer
- GPS (UTM)

RÉSULTATS

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE ET SUBSTRAT FAVORABLE

En 2018, la plage de l'Anse aux Coques est principalement composée d'un substrat mixte à dominance de gravier en bordure de rivage, qui s'échelonne graduellement vers un substrat sableux dans la zone intertidale.

La zone intertidale peut aller jusqu'à 300 mètres (Figure 3). Dans le secteur étudié, la hauteur des marées de vives-eaux varie entre 4 et 4,8 m, celle de mortes-eaux, de 2,5 à 3,7 m. Le niveau moyen de la mer est de 2,3 mètres (Dionne 2009). Le jour de l'échantillonnage, l'amplitude de marée était de 0,99 m (marée basse) à 3,98 m (marée haute).

Dans la section Ouest de l'Anse aux Coques, on retrouve une zone anoxique de quelques dizaines de mètres carrés. Le reste de la baie est caractérisé par un sédiment exogène de type gravier couvrant 530 mètres de plage à partir de l'extrémité ouest, sur une largeur d'environ 12 mètres.

La granulométrie de chaque échantillon est décrite dans le Tableau 1. Le substrat favorable à la recolonisation par la mye commune varie de 30 à 94%.



Figure 3. Imagerie par drone à 500 m montrant la zone intertidale (zone de marées) de l'Anse aux Coques à marée basse.

Tableau 1. Caractérisation visuelle du substrat sur trois trasects de la plage de l'Anse aux Coques, le 8 août 2018. Le substrat favorable à la croissance de de la mye commune (*Mya arenaria*) est identifié en bleu.

No Échantillon	Position GPS	Substrat (%)					Matière organique
		Roche (> 200 mm)	Galet (50-200 mm)	Gravier (2-50 mm)	Sable (63µm-2mm)	Limon (<63 µm)	
105*	48°32'54.12"N 68°22'57.12"W			60	30	10	
115	48°32'54.36"N 68°22'56.70"W		5	50	40	5	
125	48°32'54.54"N 68°22'56.34"W			30	50	10	10
135†	48°32'54.78"N 68°22'56.04"W				75	15	10
150	48°32'55.08"N 68°22'55.50"W		5	20	60	10	5
205*	48°32'49.50"N 68°22'43.98"W		2	60	28	10	
215	48°32'49.79"N 68°22'43.89"W		1	10	89		
225	48°32'50.10"N 68°22'43.74"W		2	38	60		
235‡	48°32'50.44"N 68°22'43.62"W		5	60	35		
250	48°32'50.88"N 68°22'43.38"W		5		88	5	2
305	48°32'47.15"N 68°22'26.06"W			3	92		5
315	48°32'47.46"N 68°22'25.98"W		2	25	65		8
325	48°32'47.82"N 68°22'25.92"W		1	10	89		
335	48°32'48.24"N 68°22'25.86"W		5	40	54	1	
355	48°32'48.90"N 68°22'25.68"W			3	94	3	1

* gravier de recharge

† sédiment noir - hypoxie

‡ beaucoup de coquilles de bivalves morts (<10 mm)

Note : Le premier chiffre du numéro de l'échantillon correspond à la position du transect (1 : ouest; 2 : centre; 3 : est) et les suivants (05, 15, 25, 35, 50 et 55) correspondent à la distance en mètres du mur de la promenade, en haut de la plage.

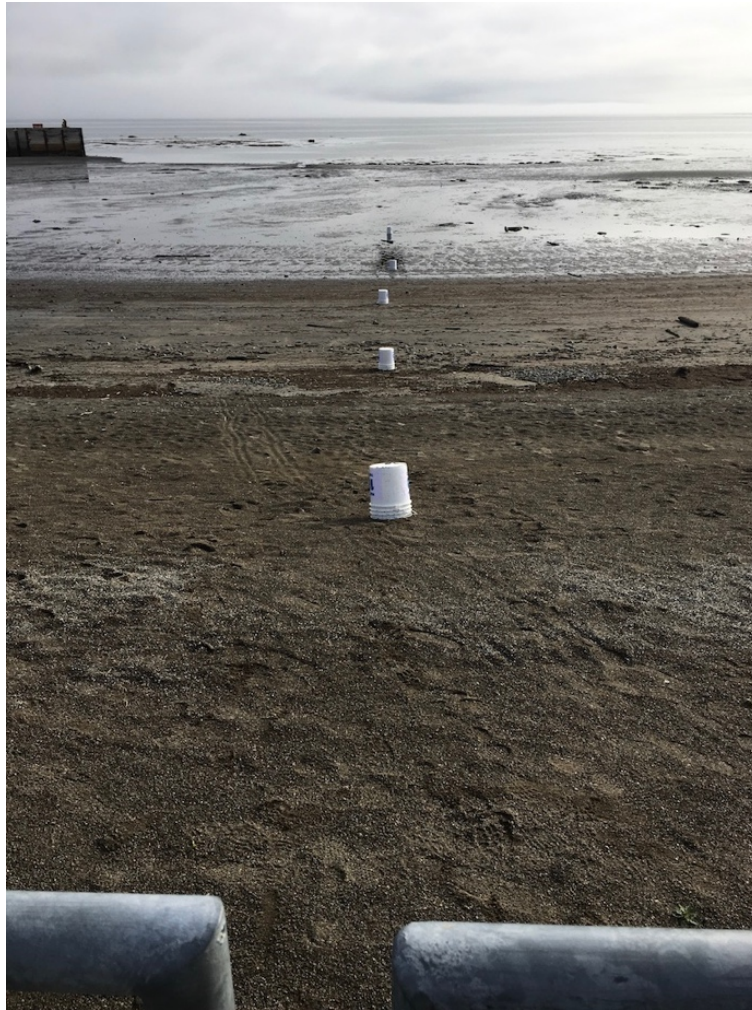


Figure 4. Disposition des échantillons sur le transect 1

Le **transect 1** (dans la section ouest de la zone d'étude) est caractérisé par une granulométrie dominée par les sédiments mixtes en haut de plage (échantillons 105, 115 et 125), qui passe graduellement à un sédiment de sable et de vase sableuse en fin de transect, au niveau de la zone intertidale (échantillons 135 et 150; Figure 6 et Figure 7). Le gravier de remblai, non indigène au secteur, et composé de gravier et de fines particules de vase, couvre les 12 premiers mètres du transect à partir du mur (Figure 4).

Une zone de sédiments noirs et odorants est présente sur le secteur ouest de l'Anse aux Coques (Figure 6) et reconnaissable dans les échantillons (Figure 5). Ce type de sédiment est caractéristique des zones anoxiques (manque d'oxygène). Un tel substrat n'est pas favorable à la croissance de bivalves, incluant la mye commune.



Figure 5. Sédiment anoxique - Échantillon 135

Les stations 125, 135 et 150 représentent un substrat potentiellement favorable à la croissance et la recolonisation de la mye commune (*Mya arenaria*) avec une dominance de sable (Tableau 1).

Cependant, le fort taux de limon (vase et argile) dans l'échantillon 150 peut présenter un risque de colmatage pour ces organismes filtreurs, alors que l'anoxie présente dans l'échantillon 135 suggère de piètres conditions d'oxygène, un élément essentiel à la croissance de cette espèce.



Figure 6. Imagerie par drone du transect 1 à 100 mètres. Disposition des échantillons 105, 115, 125, 135 et 150. La zone identifiée en gris foncé est composée de sédiments anoxiques.



Figure 7. Imagerie par drone du transect 1 à 60 mètres. Disposition des échantillons 105, 115, 125, 135 et 150.



Figure 8. Disposition des échantillons sur le transect 2

Le **transect 2** (section centrale de la zone d'étude) est caractérisé par une granulométrie de sédiments mixtes dominée par le sable en haut de plage (échantillons 205 et 215) à des sédiments mixtes plus grossiers (225), et qui passe graduellement à un sédiment de sable en fin de transect, au niveau de la zone intertidale (échantillons 235 et 250) (Figure 9, Figure 10). Le gravier de remblai, non indigène au secteur, et composé de gravier et de fines particules de vase, couvre les 10 premiers mètres du transect à partir du mur (Figure 8).

Les stations 225 et 250 représentent un substrat potentiellement favorable à la croissance et la recolonisation de la mye commune avec une dominance de sable (Tableau 1). La station 215 présente aussi une dominance de sable mais n'est pas assez avancée dans la zone intertidale pour permettre la colonisation par les bivalves (la station 225, pour les mêmes raisons, est limite).



Figure 9. Imagerie par drone du transect 2 à 100 mètres. Disposition des échantillons 205, 215, 225, 235 et 250.



Figure 10. Imagerie par drone du transect 2 à 60 mètres. Disposition des échantillons 205, 215, 225, 235 et 250.



Figure 11. Disposition des échantillons sur le transect 3

Le **transect 3** (section la plus à l'est de la zone d'étude) est caractérisé par une granulométrie de sédiments mixtes de petite taille en haut de plage (échantillons 305, 315 et 325) à des sédiments mixtes plus grossiers (335), et finalement un sédiment sableux en fin de transect (échantillon 350) (Figure 12, Figure 13). Le gravier de remblai n'est pas présent sur cette section de la baie (Figure 11).

Les stations 325, 335 et 355 représentent un substrat potentiellement favorable à la croissance et la recolonisation de la mye commune avec une dominance de sable (Tableau 1). Les autres stations (305 et 315) présentent aussi une dominance de sable mais ne sont pas assez avancée dans la zone intertidale pour permettre la colonisation par les bivalves (la station 325, pour les mêmes raisons, est limite).



Figure 12. Imagerie par drone du transect 3 à 100 mètres. Disposition des échantillons 305, 315, 325, 335 et 355.



Figure 13. Imagerie par drone du transect 3 à 60 mètres. Disposition des échantillons 305, 315, 325, 335 et 355.

DIVERSITÉ BENTHIQUE DANS L'ANSE AUX COQUES À L'AN 4 (2018)

La diversité des populations benthiques de l'Anse aux Coques en 2018 varie de 0,307 à 0,801 pour les stations où des organismes ont été observés (Tableau 2). Ces valeurs sont comparables aux autres études effectuées dans l'estuaire du Saint-Laurent sur des communautés benthiques.

Les plus grandes diversités d'espèces sont observées sur les échantillons plus profonds de la zone intertidale (150 et 250) à l'exception du transect 3 où l'échantillon 335 présente une biodiversité plus élevée que l'échantillon plus profond (355), qui est présente quant à lui une prédominance de myes communes (ce qui réduit l'indice de biodiversité malgré la plus grande variété d'espèces rencontrées).

Les échantillons les plus diversifiés sont aussi ceux qui présentent une dominance de substrat sableux.

PRÉSENCE DE MYE COMMUNE (*MYA ARENARIA*) ET DE MACOME BALTIQUE (*MACOMA BALTHICA*)

Le mandat du MPO demande d'évaluer la présence de mye commune et de macome baltique sur les sites d'échantillonnage. Les deux espèces ont été identifiées comme étant présentes dans la zone d'étude, et ce sur les trois transects échantillonnés (Tableau 2).

Le **transect 1** est celui qui présente la plus grande abondance de bivalves (myes communes surtout mais aussi macomes baltiques), et ce dans la zone la plus profonde (échantillon 150, Figure 14). Ces bivalves se retrouvent dans le substrat fin et sableux. C'est dans ce transect que les myes sont les plus abondantes (477 au total), et il y a une prédominance de juvéniles de petite taille (71% d'individus de la classe 5-10 mm). Seulement un et six individus vivants ont été retrouvés dans l'échantillon 125 et 135, respectivement (Figure 15, Figure 16), qui comportaient aussi beaucoup de coquillages vides et d'individus morts.



Figure 14. Récolte - Échantillon 150



Figure 15. Récolte - Échantillon 135



Figure 16. Récolte - Échantillon 125

Il n'y a qu'un seul échantillon du **transect 2** qui présente une présence de myes communes et de macomes baltiques (avec encore une fois une prédominance de myes), et c'est celui qui est le plus avancé dans la zone intertidale, à 50 mètres du mur de la plage. On y retrouve une dominance de myes communes (92 myes *vs* 7 macomes) de plus grande taille (10-50 mm) qui se retrouvent aussi dans le substrat le plus sableux de tout le transect (Figure 17). C'est dans cet échantillon que nous avons retrouvé les plus grosses myes de toute la baie, certaines pouvant atteindre 10 cm. Dans l'échantillon 235, qui comportant un substrat favorable, nous avons retrouvé une très grande quantité de coquillages de bivalves morts (Figure 18).



Figure 17. Récolte - Échantillon 250



Figure 18. Échantillon 235 - Bivalves morts

Dans le **transect 3**, les myes et les macomes sont observés dans l'échantillon le plus au large (355; Figure 19) et seulement des myes, en plus petit nombre, dans l'échantillon 335 (Figure 20). La présence de ces bivalves est encore une fois reliée à un substrat de sable. C'est dans cet échantillon, qui est aussi celui ayant le substrat le plus sableux de toute la zone d'étude (94% de sable) qu'on retrouve la plus grande proportion de juvéniles de petite taille (92% d'individus de la classe 5-10 mm) pour les myes communes.



Figure 19. Récolte - Échantillon 355



Figure 20. Récolte - Échantillon 335

Les échantillons où ces espèces sont présentes sont ceux qui sont les plus profonds dans la zone intertidale (à partir de 35 mètres du mur). Il n'y a pas de mye commune et de macome baltique dans les échantillons situés à 5, ou 15 mètres du mur de la plage, qui représente une zone immergée uniquement durant les grandes marées.

Les échantillons présentant les meilleures conditions de substrat pour la recolonisation de myes (250 et 355) ne sont pas nécessairement ceux où nous avons observé les plus grandes abondances.

COMPARAISONS 2016-2018

En raison du faible nombre d'échantillons et d'années couvertes, il est impossible d'effectuer des statistiques robustes. Par contre, des comparaisons qualitatives peuvent être effectuées :

- Le type de sédiment similaire sur toute la zone d'une année à l'autre, cependant le gravier est de plus en plus présent, en proportion, dans les échantillons. La proportion de sable (le substrat le plus favorable à la recolonisation des myes communes) a baissé entre 2016 et 2018 pour les échantillons où l'on retrouve des myes.
- Des myes communes ont été observées dans 7 échantillons en 2016 alors qu'en 2018 on n'en observait que dans 6 échantillons sur les 15 faisant partie du protocole. À l'an 2 de cette étude, on retrouvait plus de myes dans les stations près du mur, jusqu'à 15 mètres pour le transect 1. À l'an 4, cette espèce n'est présente qu'à partir de 35 mètres du mur de la plage.
- Plus de myes ont été dénombrées dans le secteur en 2016 qu'en 2018.
- De manière générale, le pourcentage de substrat favorable semble plus élevé en 2016 qu'en 2018, même si cette différence n'est pas statistiquement significative. Ces résultats deviennent significatifs si l'on considère uniquement les échantillons situés à 25 mètres ou plus du mur. Cela suggère qu'il y a de moins en moins de substrat favorable dans les zones assez profondes pour permettre la recolonisation des myes communes dans l'Anse aux Coques.
- Bien que ces indices n'aient pas été calculés pour 2016, la diversité d'espèces est relativement différente entre 2016 et 2018. Il n'y a pas de macomes observées en 2016 alors qu'en 2018, plusieurs espèces additionnelles comme les litorines et les patelles sont observées. Ces différences peuvent être dues au changement de personne ayant effectué l'échantillonnage et à des erreurs d'identification taxonomique.

Tableau 2. Abondance et indice de diversité de Shannon pour les colonies benthiques de la plage de l'Anse aux Coques, le 8 août 2018. Les espèces ciblées par le présent mandat (mye commune et macome baltique) sont identifiées en bleu.

No Échantillon	Position GPS	Colonies benthiques (nombre d'individus)										Indice de diversité de Shannon
		<i>Mya arenaria</i> (>51mm)	<i>Mya arenaria</i> (10-50 mm)	<i>Mya arenaria</i> (5-10 mm)	<i>Macoma</i> <i>balthica</i>	<i>Mytilus</i> <i>edulis</i>	<i>Litorina</i> sp.	Patelle	<i>Polychaete</i> sp. (vers)	<i>Gammarus</i> sp.	<i>Ulva</i> <i>lactuca</i>	
105*	48°32'54.12"N 68°22'57.12"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
115	48°32'54.36"N 68°22'56.70"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
125	48°32'54.54"N 68°22'56.34"W	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
135†	48°32'54.78"N 68°22'56.04"W	0	1	5	0	0	3	0	0	0	0	0.366
150	48°32'55.08"N 68°22'55.50"W	12	147	318	28	0	3	0	35	0	0	0.472
205*	48°32'49.50"N 68°22'43.98"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
215	48°32'49.79"N 68°22'43.89"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
225	48°32'50.10"N 68°22'43.74"W	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0.000
235‡	48°32'50.44"N 68°22'43.62"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.000
250	48°32'50.88"N 68°22'43.38"W	5	53	34	7	1	10	1	3	0	0	0.737
305	48°32'47.15"N 68°22'26.06"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
315	48°32'47.46"N 68°22'25.98"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
325	48°32'47.82"N 68°22'25.92"W	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
335	48°32'48.24"N 68°22'25.86"W	0	3	6	0	0	1	0	0	3	3	0.801
355	48°32'48.90"N 68°22'25.68"W	0	20	219	12	0	0	0	9	6	9	0.307

* gravier de recharge

† sédiment noir - hypoxie

‡ beaucoup de coquilles de bivalves morts (<10 mm)

Note : Le premier chiffre du numéro de l'échantillon correspond à la position du transect (1 : ouest; 2 : centre; 3 : est) et les suivants (05, 15, 25, 35, 50 et 55) correspondent à la distance en mètres du mur de la promenade, en haut de la plage.

RECOMMANDATIONS

PROTOCOLE EN LIEN AVEC LES OBJECTIFS VISÉS

- La majorité des études sur les bivalves suivent des plans d'échantillonnage avec des transects plus rapprochés (100 à 150 mètres). Il pourrait être envisagé de faire 5 transects au lieu de 3, à 150 mètres de distance, pour avoir une meilleure couverture de la zone.
- Les transects devraient couvrir une plus grande partie de la zone intertidale, jusqu'à 100 mètres du mur, là où se retrouve la majorité du sédiment propice à la croissance des myes communes (sable). L'échantillonnage pourrait s'effectuer à des périodes de grandes marées afin de maximiser la superficie pouvant être échantillonnée à sec (ou moins de 10 cm d'eau) avec une pelle (Giguère et al. 2007);
- Afin d'effectuer un réel suivi de l'impact de la recharge de plage sur la communauté benthique, il serait pertinent d'avoir un transect « témoin », non impacté par la recharge, à 250-300 mètres à l'est du transect 3;
- La densité moyenne de myes (en individus par m²), ainsi que la proportion de myes de taille légale devraient être calculées à tous les points d'échantillonnage;
- Le suivi des populations benthiques devrait comporter plus de classes de tailles pour la mye commune (*Mya arenaria*) afin d'évaluer les classes d'âge, la dynamique de cette population, et la possibilité d'une reprise de la cueillette/pêcherie sur cette espèce. Les études classifient généralement cette espèce en classes de juvéniles (1-5 mm, 5-10 mm et 10-35 mm) et adultes (>35 mm) (LeBlanc et Miron 2006). La taille légale pour la récolte de mye commune est de 51mm (Brulotte et al. 2006);

IMPACT DU PROJET DE RECHARGE DE PLAGE

- Une revue de la littérature devrait être effectuée afin de documenter les impacts potentiels d'un changement dans le sédiment sur la croissance et l'abondance des myes communes;
- Pour connaître le réel impact du gravier déchargés à la plage de l'Anse aux Coques sur l'état de santé et l'abondance des populations de myes, il serait pertinent d'effectuer des analyses en laboratoire sur les organes internes des myes adultes et de taille commerciale. La mye étant un bivalve filtreur, les dérangements dans le sédiment, l'augmentation de turbidité et le changement de substrat peuvent constituer des facteurs majeurs au ralentissement de la croissance de l'espèce (Emerson 2011; Grant et Thorpe 2011);
- Le projet proposé par le Ministère de la Sécurité Publique était « une première au Canada [...] qui a fait ses preuves ailleurs dans le monde et qui s'inspire des plages de gravier existantes ». Or, la plage de l'Anse aux Coques n'est pas, à la base une plage de gravier. La dynamique des courant fait en sorte que ce gravier se draine d'année en année et des recharges supplémentaires doivent être faites sporadiquement. L'impact potentiel d'un changement de substrat (le gravier déchargé dans les 15 premiers mètres de plage qui se répand ensuite beaucoup plus loin) devrait être évalué sur :
 - Les populations benthiques de la l'Anse aux Coques, et
 - La dynamique océanographique côtière des régions avoisinantes (où s'est déversé le gravier)
- Le fait que la plage de l'Anse aux Coques ne soit pas à l'origine une plage de gravier pourrait expliquer la présence de bivalves (particulièrement la mye commune). Le gravier utilisé pour le projet de recharge constitue non seulement un substrat différent, mais est également composé

de fines particules (vase ou limon) qui représente un frein à la croissance des organismes filtreurs. Cet impact devrait être évalué de manière quantitative dans une étude plus poussée.

ÉVALUATION DU GISEMENT DE MYES COMMUNES POUR UNE POTENTIELLE REPRISE
DE LA CUEILLETTE

- Recolonisation : une analyse par classe de taille et une caractérisation de la taille réelle des individus devrait être effectuée sur les individus récoltés afin d'assurer un suivi de la croissance de la population et de la proportion d'individus de taille commerciale dans le temps;

RÉFÉRENCES

- Abraham, B.J. and Dillon, P.L., 1986. Species Profiles: life histories and environmental requirements of coastal fisheries and invertebrates (mid- Atlantic)--softshell clam. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Report 82, 1-18.
- Beal, B.F., 2006. Biotic and abiotic factors influencing growth and survival of wild and cultured individuals of the softshell clam (*Mya arenaria* L.) in eastern Maine. *Journal of Shellfish Research* 25, 461-474.
- Bourassa, L. 1991. Variations de mesures physiologiques chez *Mya arenaria* (Bivalvia: Mollusca) en zone intertidale, dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Thèse (M.Sc.) Université du Québec, Rimouski, x + 85 p.
- Brulotte, S. et M. Giguère. 2007. Reproduction et taille à la maturité sexuelle de la mye commune (*Mya arenaria*) au Québec. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2698 : viii + 40 p.
- Brulotte, S., M. Giguère, S. Brillon et F. Bourque. 2006. Évaluation de cinq gisements de mye commune (*Mya arenaria*) aux Îles-de-la-Madeleine, Québec, de 2000 à 2003. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2640 : xii + 92 p.
- Chabot, R. et A. Rossignol. 2003. Algues et faune du littoral du Saint-Laurent maritime : Guide d'identification. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Rimouski; Pêches et Océans Canada (Institut Maurice-Lamontagne), Mont-Joli. 113 p.
- Christian, J.R., Grant, C.G.J., Meade, J.D. et L.D. Noble. Habitat Requirements and Life History Characteristics of Selected Marine Invertebrate Species Occurring in the Newfoundland and Labrador Region. Canadian Manuscript Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2925: vi + 207 p.
- Desrosiers, G. et J.-C. Brêthes. 1984. Étude bionomique de la communauté à *Macoma balthica* de la batture de Rimouski. *Sciences et techniques de l'eau*, 17 : 25-30.
- Dionne, J.-C. 2009. Aspects géomorphologiques de la batture à blocs entre Sainte-Luce-sur-Mer et Sainte-Flavie, côte sud de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Département de géographie appliquée, Université de Sherbrooke. Bulletin de recherche no 185. 47 p.
- Emerson, C.W. 2011. Influence of sediment disturbance and water flow on the growth of the softshell clam, *Mya arenaria* L. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 47(9): 1655-1663.
- Giguère, M., Brulotte, S. et F. Hartog. 2007. Évaluation de quelques gisements de mye commune (*Mya arenaria*) de la rive sud de l'estuaire du Saint-Laurent en 2005 et 2006. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2738 : xi + 107 p.
- Giguère, M., Brulotte, S., Boudreau, M. et M.-F. Dréan. 2008. Évaluation de huit gisements de mye commune (*Mya arenaria*) de la rive nord de l'estuaire du Saint-Laurent de 2002 à 2008. Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques 2821 : x + 91 p.
- Grant, J. et B. Thorpe. 2011. Effects of Suspended Sediment on Growth, Respiration, and Excretion of the Soft-Shell Clam (*Mya arenaria*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 48(7): 1285-1292.
- Jacques, A. 1983. Étude de la dynamique de la population de myes (*Mya arenaria*) de la batture de Rimouski. Thèse (M.Sc.), Université du Québec à Rimouski, Québec, 181 p.
- LeBlanc, S. et G. Miron. 2006. Benthic-pelagic distribution of early stages of softshell clams (*Mya arenaria*) in tidally contrasted regimes. *Canadian Journal of Zoology* 84: 459-472.
- Newell, C.R. et H. Hidu. 1982. The effects of sediment type on growth rate and shell allometry in the soft shelled clam *Mya arenaria* L. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 65: 285-295.
- Newell, C.R. et H. Hidu. 1986. Species profiles: life histories and environmental requirements of coastal fishes and invertebrates (North Atlantic): Softshell clam. Fish and Wildlife Service, Biological Report 82 (11.53). U.S. Army Corps of Eng., TR EL-82-4. 17 p.

- Seitz, R.D., Lipcius, R.N., Hines, A.H. and Eggleston, D.B., 2001. Density-dependent predation, habitat variation, and the persistence of marine bivalve prey. *Ecology* 82, 2435-2451.
- Skilleter, G.A., 1994. Refuges from predation and the persistence of estuarine clam populations. *Marine Ecology-Progress Series* 109, 29-42.
- Sponaugle, S. and Lawton, P., 1990. Portunid crab predation on juvenile hard clams - effects of substrate type and prey density. *Marine Ecology-Progress Series* 67, 43-53.
- Swan, E.F., 1952. The growth of the clam *Mya arenaria* as affected by the substratum. *Ecology* 33, 530-534.
- Walton, A. 1980. Méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sédiments marins et des matières draguées. Immersion de déchets en mer, rapport no. 1 MPO, D.S.O.A., Ottawa, 77 p.

**ANNEXE 1. RÉSOLUTION DU CONSEIL MUNICIPAL À M – EXPERTISE MARINE LE
CONTRAT POUR LE SUIVI DE RELOCALISATION DE LA FAUNE BENTHIQUE**



*Sainte-Luce, une communauté unie et épanouie,
fière de ses multiples richesses
où la mer et la terre se marient en offrant
une qualité de vie exceptionnelle.*

COPIE DE RÉSOLUTION

Séance ordinaire des membres du conseil tenue au lieu ordinaire des séances, le lundi 9 juillet 2018 à 20 h, à laquelle sont présents et forment quorum sous la présidence de la maire, madame Maïté Blanchette Vézina, les conseillers Gaston Rioux, Roch Vézina, Stéphanie Gaudreault, Karine Ayotte, Micheline Barriault, Rémi-Jocelyn Côté. Le directeur général et secrétaire-trésorier, monsieur Jean Robidoux est également présent.

Certifiée copie conforme de la résolution 2018-07-194

Suivi de la faune benthique sur la plage de l'Anse-aux-Coques

Il est proposé par monsieur Rémi-Jocelyn Côté et unanimement résolu d'accepter la proposition de la firme M-Expertise Marine pour le suivi de relocalisation de la faune benthique suite au projet de recharge de la plage de l'Anse-aux-Coques. Les honoraires proposés sont de 5 834,98 \$ taxes incluses.

Jean Robidoux
Directeur général et secrétaire-trésorier
11 juillet 2018

ANNEXE 2. GUIDE D'IDENTIFICATION DES MOLLUSQUES BIVALVES DU SAINT-LAURENT



ANNEXE 3. PHOTOS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TRANSECT 1



Échantillon 105



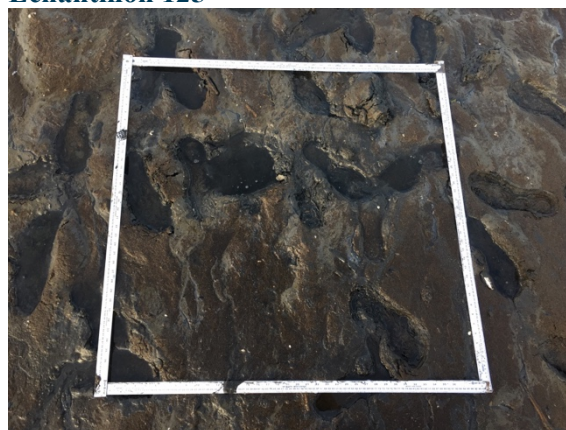
Échantillon 125



Échantillon 150



Échantillon 115



Échantillon 135

ANNEXE 4. PHOTOS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TRANSECT 2



Échantillon 205



Échantillon 225



Échantillon 250



Échantillon 215



Échantillon 235

ANNEXE 5. PHOTOS DES SITES D'ÉCHANTILLONNAGE DU TRANSECT 3



Échantillon 305



Échantillon 325



Échantillon 355



Échantillon 315



Échantillon 335