CARACTÉRISATIONS GÉOPHYSIQUE ET GÉOTECHNIQUE DE LA PARTIE PROFONDE DE LA PLAGE DE **S**TE-**L**UCE-SUR-**M**ER.

Par : Marc Richer-LaFlèche, geo, Ph.D. professeur INRS-ETE

en collaboration avec

Didier Perret, ing., Ph.D., chercheur Commission géologique du Canada CGC-Québec

Jean-Marc Ballard, professionnel de recherche INRS-ETE

INRS Centre Eau Terre et Environnement

Le 15 mars 2017

Rapport préparé pour le Ministère de la sécurité publique du Québec

Contrat : CPS 16-17-08

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2016. Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-890-9 (version électronique) Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2018 Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2018 Les personnes suivantes ont collaboré à l'analyse des données et/ou à la rédaction du rapport :

- Marc Richer-LaFlèche, geo, Ph.D., professeur INRS-Centre Eau Terre et Environnement
- Didier Perret, ing., Ph.D., chercheur en géotechnique à la Commission géologique du Canada (CGC-Québec). Traitement des données sismiques.
- -Jean-Marc Ballard, M.Sc., professionnel de recherche INRS-ETE. Opérateur de la foreuse géotechnique, traitement des données CPT, interprétation des données de forage.

Les personnes suivantes ont participé aux levés de terrain à Ste-Luce-sur-Mer :

- -Marc Richer-LaFlèche, professeur INRS-Centre Eau Terre et Environnement
- -Daniel Auclair, technicien et plongeur professionnel (géophysique)
- -Dany Boilard, technicien (géophysique)
- -François Pelletier, technicien (assistant pour les forages géotechniques)

RÉSUMÉ

Cette étude présente les résultats d'un projet de recherche réalisé par l'INRS et mandaté par le MSP du Québec portant sur l'utilisation de méthodes géophysique et géotechnique pour caractériser la partie non visible (profonde) de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les méthodes utilisées, pour caractériser la plage de l'Anse-aux-Coques, permettent de documenter la variabilité d'épaisseur de la plage actuelle et des sédiments quaternaires argilo-silteux sous-jacents. De plus, la profondeur au socle rocheux a été déterminée avec exactitude en de nombreux endroits. Les résultats montrent une grande variabilité de la profondeur au socle rocheux (de 2,4 à 16,7 m) et donc de l'épaisseur de sédiments marins quaternaires et récents le long du littoral de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. La quantité de sédiments est négligeable dans la partie ouest de l'Anse et ce plus particulièrement au sud du Quai de la Pointe-aux-Coques. L'épaisseur maximale de sédiments a été observée dans la partie centrale de la plage de l'Anse-aux-Coques (16,7m). Dans le périmètre des levés, les sédiments de plage (sables, graviers et galets) ont une épaisseur de 1,8 à 3,7m et l'unité argilo-silteuses marine sous-jacente une épaisseur très variable allant de 0 m à l'Ouest à 13 m dans la partie centrale (forage 4). Les résultats de l'étude montrent que l'imagerie tomographique géoélectrique est une méthode fiable et robuste pour caractériser le littoral. Les données sismigues, mesurées par la méthode des ratios spectraux H/V, montrent une forte anticorrélation entre l'épaisseur des sédiments et la fréquence de résonnance mesurée sur la plage. En plus de fournir des indications sur la variabilité d'épaisseur de sédiments, les données de résonnance sismique peuvent être utilisées pour planifier la construction de futures structures de protection contre la mer (normes parasismiques). L'approche géophysique permet une caractérisation d'une vaste superficie du littoral avec un minimum de validation par forage. Ce type de caractérisation est importante pour l'aménagement de la côte, le calcul de bilans sédimentaires, l'identification de zones à risques d'érosion et aussi pour l'élaboration de stratégies pour protéger la côte contre l'érosion et la submersion marine.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ХХ
TABLE DES MATIÈRES	ХХ
LISTE DES FIGURES	ХХ
1-INTRODUCTION	1
1.1 Localisation	1
1.2 Description du périmètre du levé géophysique et du littoral dans le secteur de l'Anse-aux-Coques	2
1.2.1 Plage de Ste-Luce-sur-Mer	3
2. MÉTHODOLOGIE	5
2.1 Données techniques	6
2.2 Forages géotechniques	8
2.2.1 Description du système de sondage par enfoncement et rotopercussion de l'INRS-ETE.	8
2.3 Méthodes géophysiques utilisées pour la caractérisation de la partie profonde de la plage de Ste-Luce-sur-Mer.	12
2.3.1 Études géophysiques à Ste-Luce-sur-Mer	12
2.3.1.1 Levés tomographiques géoélectriques (ABEM Terrameter-LS)	13
2.3.1.2 Mise en garde pour la réalisation de levés géoélectriques en milieu marin	17
2.3.1.3 Paramètres d'acquisition du levé de tomographie géoélectrique de Ste-Luce-sur-Mer	18
2.3.1.4 Méthode de résistivité électrique	20
2.3.1.5 Imagerie tomographique de la résistivité électrique	23
2.4. Levé sismique (méthode des ratios spectraux H/V)	28

2.4.1 Sources de vibrations naturelle et anthropique	29
2.4.2 Méthode de mesure sur le terrain	29
2.4.3. Interprétation des données rapports spectraux H/V	32
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	35
3.1 Forages géotechniques	35
3.1.1. Description sommaire des forages	36
3.1.2. Description de la section longitudinale de la plage de Ste-Luce-sur-Mer	45
3.2 Imagerie tomographique géoélectrique	47
3.2.1 Levés d'optimisation et de validation des protocoles d'acquisition de résistivité électrique (27 novembre 2016)	47
3.2.1.1 Imagerie tomographique géoélectrique des essais du 27 novembre 2016	50
3.2.1.2. Levé de décembre 2016	53
3.3 Mesures sismiques (méthodes des ratios spectraux H/V)	65
4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATYIONS	73
5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	75
ANNEXE 1	77

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation de la plage de l'Anse-aux-Coques de la municipalité de Ste-Luce. Source : carte topographique 1:20000, 22C09- 200-0101-Luceville, Direction générale de l'information géographique, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec.	2
Figure 2 . Photographies de la plage de Ste-Luce-sur-Mer (25 novembre 2016). A-vue longitudinale de la plage encombrée d'algues marines, B-érosion de la recharge de plage de 2014, C) rides de courant dans le bas de plage.	4
Figure 3 . Profil stratigraphique simplifié de la plage de l'Anse-aux-Coques à Ste-Luce-sur-Mer. Unités stratigraphiques observées: (A) dépôts sableux récents, (B) lag composé de galets et blocs rocheux dans une matrice sableuse moyenne à grossière et (C) dépôts argilo-silteux marins très compacts. Figure tirée de Fransen et al. (2016) et selon les données	
de Long et Xharde (2014).	5
Figure 4. Système de sondage intégré Geotech 605D	8
Figure 5 . Foreuse Geotech 605D sur chenille sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer (novembre 2016).	9
Figure 6. Caractéristiques du système de sondage Geotech 605D	10
Figure 7. La sonde CPT et les différents paramètres mesurés	11
Figure 8 . Dispositif de tomographie géoélectrique (ABEM Terrameter LS) utilisé pour le levé de décembre 2016 à Ste-Luce-sur-Mer. A) véhicule Polaris 6 roues et B) véhicule amphibie Argo sur chenilles utilisé comme station de base pour les mesures de la résistivité électrique	16
Figure 9. A) laboratoire mobile chauffé (rouge) et véhicules de l'équipe stationnés sur le quai de Ste-Luce-sur-Mer. B) Dispositif de câbles et électrodes déployé sur la neige et la glace recouvrant la plage et une partie de l'avant-plage à marée basse.	17
Figure 10. Caractéristiques géométriques du dispositif géoélectrique déployé lors des levés de résistivité électrique ABEM Terrameter-LS réalisés à Ste-Luce-sur-Mer.	18
Figure 11. Diagramme montrant la propagation d'un courant électrique dans un terrain hétérogène. A et B électrodes d'injection de courant et M et N électrodes de mesure de potentiel (voltage).	21
Figure 12 . Répartition des courants électriques dans un sol isotrope (homogène) (A) et dans un terrain anisotrope (hétérogène) (B) constitué d'un horizon supérieur argileux (conducteur, faiblement résistif) et d'un socle rocheux résistif à la base	22
	~~

Figure 13 . Résistivité et conductivité électrique des sols et roches	23
Figure 14 . Schéma montrant une imagerie tomographique géoélectrique réalisée sur un terrain forestier. Source : Naudet, 2004.	24
Figure 15. Exemple de lignes de courant et de surfaces équipotentielles associées à une configuration de type Wenner. Notez que les électrodes de mesure du potentiel sont situées d'une façon symétrique entre les électrodes d'injection de courant.	26
Figure 16 . Positionnement des électrodes de courant (C1, C2) et de potentiel (P1, P2) pour les configurations Wenner (A), dipôle-dipôle (B), Schlumberger (C) et gradient (D).	27
Figure 17 . Tromographe Tromino (Moho Science and Technoplogy) utilisé pour les mesures sismiques à Ste-Luce-sur-Mer.	30
Figure 18. Levé tromographique de novembre 2016 réalisé sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. A) surface de la plage enneigée avec cône orange indiquant la position du tromographe, B) tromographe en lecture dans un secteur recouvert d'algues, C) photo du sismomètre triaxial Tromino orienté vers le nord et nivelé parfaitement à l'horizontal.	31
Figure 19. A) Exemple de données sismiques mesurées par un sismomètre triaxial (X et Y horizontal et Z vertical) portées en fonction du temps (série temporelle) et B) Amplitudes des spectres de Fourier pour les données verticales et horizontales (X et Y).	32
Figure 20 . A) Amplitudes des spectres de Fourier de données d'un sismomètre triaxial pour les composantes verticale (Z) et horizontales (N=Nord et E=Est), B) Amplitudes des spectres de Fourier moyennées pour les composantes N et S donnant la valeur moyenne H et C) ratio spectral H/V calculé.	
Figure 21 . A) Amplitudes des spectres de Fourier pour les composantes verticale (Z) et horizontales (N=Nord et E=Est) d'une acquisition peu bruitée. B) Amplitudes des spectres de Fourier pour les composantes verticale (Z) et horizontales d'une mauvaise acquisition.	33
Figure 22. A et B) Ratios spectraux H/V d'une acquisition bruitée dans le domaine des basses fréquences. C et D) Ratios spectraux H/V calculés après filtrage et élimination des mauvaises données.	34
Figure 23. Plan de localisation des forages géotechniques réalisés sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer.	35
Figure 24. Stratigraphie du forage 1. Notez l'absence de l'unité argilo- silteuse. Les sédiments de la plage reposent directement sur le socle rocheux appalachien. Sondage par rotopercussion.	37

Figure 25 . Stratigraphie du forage 2. Notez la présence de l'unité argilo- silteuse sous les sédiments de plage et l'accroissement de la profondeur au socle rocheux. Notez l'épaississement de la couche de sédiments de plage par rapport au forage 1. Sondage par rotopercussion.	38
Figure 26. Stratigraphie du forage 3. Sondage par rotopercussion.	39
Figure 27. Stratigraphie du forage 4a. Sondage par rotopercussion.	40
Figure 28. Stratigraphie du forage 4b. Sondage par CPT.	42
Figure 29. Stratigraphie du forage 5. Sondage par CPT. Notez la variabilité des valeurs de résistivité électrique et de résistance de pointe	43
Figure 30. Stratigraphie du forage 6. Sondage par CPT.	44
Figure 31. Stratigraphie du forage 7. Sondage par CPT.	45
Figure 32. Section longitudinale de la plage de Ste-Luce-sur-Mer entre les sites des forages 1 et 7. L'échelle verticale est exagérée afin de pouvoir visualiser la variabilité d'épaisseur des unités sédimentaires et de la profondeur du socle rocheux. Notez la forte remontée du socle rocheux en direction de la Pointe-aux-Coques vers l'ouest.	46
Figure 33 . Section longitudinale de la plage de Ste-Luce-sur-Mer entre les sites des forages 1 et 7. L'échelle verticale varie de 1 à 4X.	46
Figure 34. Photographies montrant les matériaux du rechargement de plage de 2014 érodés et redistribués sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer (26 novembre 2016).	47
Figure 35 . Plan de localisation de la section longitudinale du 27 novembre 2016. Cette dernière recoupe les lignes transversales L2 et L3.	49
Figure 36 . Imageries tomographiques obtenues suite à l'inversion de données de résistivité électrique apparente mesurées à partir des protocoles Schlumberger (A), gradient (B), Wenner (C) et dipôle-dipôle (D). Section longitudinale de la plage.	52
Figure 37 . Voltages injetés et mesurés lors du levé de résistivité électrique du 27 novembre 2016. Notez la forte diminution du voltage mesuré en utilisant le protocole dipôle-dipôle.	53
Figure 38 . Carte de localisation des lignes du levé d'imagerie tomographique géoélectrique réalisé sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer (décembre 2016). Photographie aérienne du Ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSPQ).	54

Figure 39. A) Dispositif du levé de résistivité électrique (ABEM Terrameter-LS déployé manuellement sur la glace dans le secteur de la ligne L13, **B**) VTT sur le bas de plage et câbles multi-connecteurs surélevés en condition de marée très basse.

Figure 40. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 2 à 5 de la partie Ouest de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes audessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m. La trace du sondage géotechnique du forage 2 est indiquée sur la section de la ligne 4.

Figure 41. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 6 à 10 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes au-dessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m. Les traces des sondages géotechniques des forages 3,4 et 5 sont indiquées sur les sections des lignes 6, 8 et 10.

Figure 42. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 11 à 16 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes audessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m. Les traces des sondages géotechniques des forages 6 et 7 sont indiquées sur les sections des lignes 12 et 13.

Figure 43. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 16 à 21 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes au-dessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m.

Figure 44. Plan de localisation des stations du levé sismique (ratios spectraux H/V). Les stations For1 à For7 correspondent aux sites des forages géotechniques 1 à 7. Les stations Trom8 à Trom16 sont des stations de mesure sans forage.

Figure 45. Amplitudes des spectres de Fourier pour les mesures de vibration dans le plan horizontal (Nord-Sud et Est-Ouest) et à la verticale (Z). Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure situées sur les sites des forages 1 à 7.

Figure 46. Ratios spectraux H/V pour les mesures de vibration mesurées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure situées sur les sites des forages 1 à 7. Le pic maximal sur ce type de diagramme correspond à la fréquence de résonnance du terrain.

54

58

60

62

64

25

65

66

68

Figure 47. Ratios spectraux H/V et amplitudes des spectres de Fourier pour les mesures de vibration mesurées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure des sites TROM8 à TROM12. Le pic maximal sur ce type de diagramme correspond à la fréquence de résonnance du terrain.

Figure 48. Ratios spectraux H/V et amplitudes des spectres de Fourier pour les mesures de vibration mesurées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure TROM13 à TROM16 situées à l'extrémité Est du périmètre du levé géophysique. Le pic maximal sur ce type de diagramme correspond à la fréquence de résonance du terrain. Notez l'augmentation progressive de la fréquence de résonnance en se dirigeant vers l'Est.

Figure 49. Variations de la fréquence de résonnance et de la profondeur au socle rocheux mesurées aux sites de forages 1 à 7 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer.

Figure 50. Variations de la fréquence de résonnance en fonction de la coordonnée utm-E (Nad 83). Notez la forte augmentation de la fréquence de résonance vers l'ouest de la plage en direction de la Pointe-aux-Coques. 69

70

71

71

ix

1-INTRODUCTION

La plage de Ste-Luce-sur-Mer est une zone touristique particulièrement fréquentée pendant la période estivale. Comme plusieurs secteurs de la péninsule gaspésienne et du Bas St-Laurent, cette plage est affectée par des processus d'érosion et, lors de grosses tempêtes hivernales, par de la submersion marine. Pour contrer ou minimiser ces problèmes, la municipalité de Ste-Luce-sur-Mer a mandaté une firme d'ingénierie pour réalimenter la plage (recharge). Cette procédure, réalisée à l'automne 2014, nécessite un suivi afin d'évaluer sa performance et sa durabilité. Ce projet de recherche vise le développement et l'optimisation de méthodologies appropriées pour la caractérisation du milieu littoral, permettant entre autres, d'assurer le suivi de différents types d'intervention visant la protection du littoral. Dans le domaine du génie côtier, l'approche méthodologique développée dans ce projet sera utile pour améliorer l'estimation des bilans sédimentaires, pour sélectionner et ou moduler les mesures de protection les mieux adaptées pour protéger le littoral. Compte tenu de la présence de deux zones séismiques dans la région (Charlevoix et Matane), la mise en place de structures rigides de protection contre la mer requiert une bonne connaissance des assises sédimentaires sur lesquels les ouvrages seront construits. La présence d'argiles marines sous les plages doit être considérée car elle peut amplifier l'amplitude et la durée de propagation des ondes sismiques et donc aggraver l'aléa sismique local. De plus, la construction d'ouvrages lourds sur un substrat argileux est une procédure qui nécessite des interventions adaptées.

Ce rapport présente les résultats d'une étude géophysique et géotechnique du littoral de l'Anse-aux-Coques dans le secteur de Ste-Luce-sur-Mer au Bas St-Laurent. Dans un premier temps, des forages géotechniques ont été implantés sur le haut de plage afin de fournir des données quantitatives sur la nature et les épaisseurs de sédiments présents au-dessus du socle rocheux. Ces données sont utilisées dans la caractérisation du site et pour valider l'approche d'imagerie tomographique géoélectrique. Cette étude se termine par quelques mesures sismiques (ondes S) enregistrées à des stations tromographiques fixes distribuées dans le haut de plage. Ce type de levé, rarement réalisé en domaine côtier marin, demande à être validé pour évaluer son utilité comme outil de caractérisation du littoral.

1.1 LOCALISATION

Le site d'étude est localisé au Bas St-Laurent dans la municipalité régionale de comté de la Mitis et plus spécifiquement dans la municipalité de Ste-Luce. Le périmètre des levés géophysiques et géotechnique couvre une partie de la plage de l'Anse-aux-Coques située entre la Pointe-aux-Coques et la Pointe-aux-Bouleaux (**Fig. 1**).



Figure 1. Carte de localisation de la plage de l'Anse-aux-Coques de la municipalité de Ste-Luce. Source : carte topographique 1:20000, 22C09-200-0101-Luceville, Direction générale de l'information géographique, Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles du Québec.

1.2 DESCRIPTION DU PÉRIMÈTRE DU LEVÉ GÉOPHYSIQUE ET DU LITTORAL DANS LE SECTEUR DE L'ANSE-AUX-COQUES

Le socle rocheux, observable en de nombreux endroits dans le secteur de la Pointe-aux-Coques, est constitué de roches sédimentaires appalachiennes datant du Cambrien supérieur à l'Ordovicien précoce. Ces roches sédimentaires silicoclastiques sont constituées de shales friables, de grès et d'une faible proportion de calcaire. Régionalement, la géologie quaternaire du secteur de Ste-Luce est caractérisée par la présence de terrasses bas-laurentiennes qui témoignent de l'affaissement du socle rocheux lors de la glaciation wisconsinienne et d'une remontée progressive de la masse continentale associée au rebond postglaciaire (ajustement isostatique) (Hétu, 1990). Ces unités postglaciaires sont constituées, au Bas St-Laurent, de trois anciennes terrasses marines (Locat, 1977). Dans le secteur de Ste-Luce, celle située plus en altitude, la terrasse de Micmac, est constituée d'argiles caillouteuses mises en place à l'Holocène inférieur (avant 9,5 ka). Un escarpement, d'une dizaine de mètre, sépare cette dernière de la terrasse de Mitis (située à une altitude d'environ 6m). Cette dernière, constituée de sable et gravier provenant d'anciennes plages, aurait été mise en place entre 1500 et 2500 ans (Dionne, **2009**). La terrasse de Mitis se termine près de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Le contact nord de cette unité est délimité par la présence d'un cordon littoral constitué de sable et gravier de 20 à 40 m de largeur et d'une épaisseur de moins d'un mètre (Dionne, 2009; Fransen et al., 2016).

1.2.1 Plage de Ste-Luce-sur-Mer

La plage Ste-Luce-sur-Mer est affectée par un régime macrotidal de type semidiurne avec un marnage moyen de 3,2 m et de 4,6 m en période de grandes marées (Fig. 2a). Elle est constituée d'une plate-forme rocheuse irrégulière, d'une batture argileuse avec blocs et d'une plage sableuse avec un peu de gravier, cailloux et galets. La pointe rocheuse de la Pointe-aux-Cogues et le guai protègent une partie de la baie des vents de l'ouest en favorisant une sédimentation de dépôts vaseux observables au sud du quai de la Pointe-aux-Coques. Selon Genivar, les sédiments au large auraient un D₅₀ de 0,2 mm tandis que ceux du haut de la plage auraient un D_{50} de 0,5 à 0,8 mm. Tel que mentionnée dans le rapport de Fransen et al. (2016), la plage de l'Anse-aux-Coques était, avant le rechargement de 2014, essentiellement constituée de sables moyen à grossier ($D_{50} \ge 300 \ \mu m$ et $\le 840 \ \mu m$). A cette époque, la pente de la plage variait de 1:15 à 1:20 et sa largeur moyenne était de l'ordre de 40-45 m (Genivar, 2012). Comme pour de nombreuses plages au Bas St-Laurent, la granulométrie de la plage de Ste-Luce-sur-Mer variait de grossière en haut de plage à fine dans le bas de plage. Le bas de plage est constitué d'un large estran argilo-silteux d'une largeur d'environ 300 m à marée basse (Fig. 2c). Cette unité est recouverte d'une série de barres d'avant-côtes constituées de sables fins.

Compte tenu des faibles valeurs de D_{50} et des fortes pentes observées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer, cette dernière ne serait pas dans un état d'équilibre morphologique (**Ropars, 2013**). Suite à plusieurs décennies de mises en place de protections rigides contre la mer (murs de bois, de béton, enrochements) et de l'érosion reliée aux tempêtes de mer, l'érosion de la plage de Ste-Luce s'est aggravée (**Fransen et al., 2016**). Pour contrer ou limiter l'érosion et les risques de submersion, les autorités municipale et gouvernementale ont mandaté, à l'automne 2014, un entrepreneur pour procéder à un rechargement de plage. Pour maximiser la durabilité et minimiser l'entretient de la recharge, l'entrepreneur a utilisé des matériaux au D₅₀ plus grossier. Ces derniers sont visibles sur la **figure 2b**.



Figure 2. Photographies de la plage de Ste-Luce-sur-Mer (25 novembre 2016). **A**) vue longitudinale de la plage encombrée d'algues marines, **B**) érosion de la recharge de plage de 2014, **C**) rides de courant dans le bas de plage.

La figure 3 présente une section stratigraphique de la plage de Ste-Luce-sur-Mer réalisée à partir de 4 petits sondages permettant d'évaluer la nature et les caractéristiques des sédiments présents sur le haut et le bas de plage (Long et Xhardé, 2014; Fransen et al., 2016). La première unité sédimentaire observée est une couche de sable de surface montrant une variation d'épaisseur de 50cm près du mur de protection de la promenade à 5cm sur le bas estran. Cette unité est composée de sables moyens avec un D₅₀ compris entre 275 et 350 *u*m. Cette unité repose sur une unité de sédiments plus grossiers constituée d'un lag de galets et de blocs de roches sédimentaires ayant des tailles comprises entre 10 et 30 cm pour ce qui est des plus gros blocs. La matrice, entre ces fragments grossiers, est constituée de sables moyens a grossiers (D_{50} de 280 à 570 um). L'unité aurait une épaisseur de l'ordre de 30 cm près du mur de protection et d'une dizaine de centimètre sur le bas estran. La troisième unité, intersectée par les sondages, est constituée de sédiments argilo-silteux cohésifs interprétés comme des argiles marines de la mer de Goldthwait. L'unité est dominée par la présence de limons (25-35%), de sables fins (30-50%) (Dm < 200 μ m) et d'une proportion moindre de graviers (10-25%) et argiles (5-10%). Cette unité a été observée à une profondeur de 80-90 cm au pied du mur de protection, à une profondeur de 60 cm sur le haut estran et à seulement 15 cm sur le bas estran (Long et Xhardé, 2014).

Figure 3. Profil stratigraphique simplifié de la plage de l'Anse-aux-Coques à Ste-Lucesur-Mer. Unités stratigraphiques observées: (**A**) dépôts sableux récents, (**B**) lag composé de galets et blocs rocheux dans une matrice sableuse moyenne à grossière et (**C**) dépôts argilo-silteux marins très compacts. Figure tirée de **Fransen et al. (2016)** et selon les données de **Long et Xharde (2014)**.

2. MÉTHODOLOGIE

Ce projet de recherche vise à caractériser la partie profonde et donc non-visible de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Des méthodes géophysiques électriques et sismiques ont été utilisées à cette fin. Dans le but de valider les interprétations géophysiques, nous avons implanté sept forages sur le haut de plage. Ces derniers ont permis de mesurer l'épaisseur réelle de la plage, des sédiments argilo-silteux sous-jacents et la profondeur au socle rocheux. La méthodologie des sondages géotechniques et des levés géophysiques est présentée dans cette section.

Phase I:

Dates de mobilisation :	23 novembre 2016		
Dates de démobilisation :	28 novembre 2016		
Date du début des forages :	24 novembre 2016		
Date de fin des forages :	25 novembre 2016		
Forages 1, 2 , 3 et 4 :	24 novembre 2016		
Forages 5,6 et 7 :	25 novembre 2016		
Date du début des sondages sismiques	: 25 novembre 2016		
Date de fin des sondages sismiques :	27 novembre 2016		

Sondage sismique Tromino1 :25 novembre 2016Sondages sismique s Tromino3,4,5,6,7,8,10,11,12 et 13: 26 novembre 2016Sondages sismique s Tromino14b, 15 et 16:27 novembre 2016

Phase II :

Dates de mobilisation :	10 décembre 2016	
Dates de démobilisation :	18 décembre 2016	
Date du début des levés ERT :	11 décembre 2016	6
Date de fin des levés ERT :	17 décembre 2016	6
Levé d'imagerie géoéle	ctrique lignes 2 et 3 :	11 décembre 2017
	atriance linear A.	40 déanabra 0047

	J		
Levé d'imagerie géoélectrique	ligne 4	4 :	12 décembre 2017
Levé d'imagerie géoélectrique	lignes	5, 6 et 7 :	13 décembre 2017
Levé d'imagerie géoélectrique	lignes	8, 9 et 10 :	14 décembre 2017
Levé d'imagerie géoélectrique	lignes	11, 12 et 13 :	15 décembre 2017
Levé d'imagerie géoélectrique	lignes	15 et 16 :	16 décembre 2017
Levé d'imagerie géoélectrique	lignes	17, 19, 20 et 21 :	17 décembre 2017

Personnel affecté à la réalisation des levés géophysiques

-Marc Richer-LaFlèche, geo, Ph.D. (professeur INRS-ETE) -Dany Boilard (technicien) -Daniel Auclair (technicien et plongeur professionnel)

Personnel affecté à la réalisation des sondages géotechniques (forages)

-Jean-Marc Boilard, M.Sc. (professionnel de recherche INRS) -François Pelletier (technicien, INRS) _

2.2 FORAGES GÉOTECHNIQUES

2.2.1 Description du système de sondage par enfoncement et rotopercussion de l'INRS-ETE.

Le système de sondage intégré de Geotech-Vertek du Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE) utilise des méthodes par enfoncement direct et par rotopercussion jumelées à un dispositif d'acquisition de données ce qui permet l'obtention en temps réel de données en continue. Le système de sondage intégré permet de mesurer, en continu, les propriétés mécaniques et électriques des sols et sédiments sondés.

Ces mesures, effectuées en cours de sondages, permettent de définir la stratigraphie et les conditions de l'aquifère *in situ*. Ce qui permet, sur le champ, d'améliorer la caractérisation du littoral.

Système de base

Le système de base est constitué d'une foreuse Geotech 605D et de sa plateforme sur chenille qui permet d'accéder à des terrains difficiles (**Fig. 4**). A Ste-Luce-sur-Mer, cette foreuse a été acheminée sur la plage en suivant l'arrière-plage à partir de la descente aménagée en bordure du quai de la Pointe-aux-Coques. Grâce aux chenilles, le déplacement de la foreuse sur la plage ne laissait aucuns sillons et son impact sur la structure et le drainage de la plage était négligeable (**Fig. 5**).

Figure 4. Système de sondage intégré Geotech 605D

Figure 5. Foreuse Geotech 605D sur chenille sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer (novembre 2016).

Système de sondage

Le système de sondage est muni de deux têtes de forage (Fig. 6) :

- La première permet de faire des sondages par enfoncement en serrant et poussant les trains de tige (pénétration au cône / CPTu);
- La seconde, munie d'un marteau pneumatique et d'une entrée pour l'air comprimé, permet de faire des sondages par rotopercussion (RPSS).

Le système de forage est constitué de trains de tige qui permettent de faire des sondages par rotopercussion jusqu'à 50 m. Dans le cas de dépôts meubles, des profondeurs 50 m peuvent aussi être atteintes par sondages en mode d'enfoncement et ce sans l'utilisation du marteau pneumatique. Toutefois, cette profondeur est limitée par la nature des matériaux rencontrée et de façon générale, l'enfoncement s'arrête en présence de bloc ou de matériaux compacts comme des tills.

Les essais de pénétration au cône (PC), réalisés par l'enfonçant de la sonde montrée à la **figure 6**, est la principale méthode de caractérisation des matériaux.

Les sondages par rotopercussion impliquent la rotation d'un train de tiges dont l'enfoncement se fait par poussée et par l'utilisation d'un marteau à percussion pneumatique. De l'air comprimé est injecté afin d'expulser les débris de forage. Les paramètres mesurés lors de ces sondages sont la force d'enfoncement, le torque, la vitesse de rotation, la pression hydraulique, la vitesse d'enfoncement, la pression et le débit de l'air comprimé. Ce type de sondage permet d'identifier qualitativement la nature des matériaux et de définir avec précision la profondeur au roc.

Figure 6 : Caractéristiques du système de sondage Geotech 605D

Mesure de la pression des pores à partir du CPT

La mesure de la pression des pores en milieu saturée permet d'obtenir, de façon rapide, des mesures approximatives de la conductivité hydraulique du milieu granulaire. Par exemple, durant l'enfoncement de la sonde qui est faite à une vitesse constante, on aura dans un milieu de matériaux fins argileux, une réponse relativement élevée au niveau de la pression des pores. Ce phénomène s'explique par le fait de la difficulté du milieu argileux à dissiper la pression créé par l'enfoncement de la sonde.

Mesures et enregistrement en continu

Durant l'enfoncement des sondes, les mesures et les paramètres de forage sont disponibles en temps réel et enregistrés numériquement.

Typiquement, les mesures pouvant être obtenues simultanément sont les suivantes (**Fig. 7**) :

- Stratigraphie (par l'interprétation de la pression sur la pointe et de la friction sur le manchon du CPT)
- Résistivité électrique globale des sédiments et sols
- Pression du fluide / conductivité hydraulique
- Porosité des matériaux
- Verticalité en deux axes de la sonde, ce qui permet de détecter la présence de cailloux ou de blocs.

Figure 7. La sonde CPT et les différents paramètres mesurés

2.3 MÉTHODE GÉOPHYSIQUES UTILISÉES POUR LA CARACTÉRISATION DE LA PARTIE PROFONDE DE LA PLAGE DE STE-LUCE-SUR-MER.

La géophysique est l'application des principes physiques à l'étude de la Terre. Traditionnellement, ce domaine scientifique abordait des problématiques d'exploration de ressources minières ou d'hydrocarbures ou d'études de physique du globe. Depuis quelques décennies, la géophysique s'intéresse de plus en plus à l'étude de la proche surface ce qui ouvre de vastes champs d'études dans les domaines de la géotechnique, de l'hydrogéologie, de l'agriculture, de l'archéologie et de la sédimentologie. Plus récemment, la géophysique a démontré sa pertinence pour l'étude du domaine côtier. Par exemple, les méthodes sismigues aquatiques ou terrestres sont entre autres utilisées pour cartographier les sédiments marins, les plages et les zones portuaires. De la même façon, l'imagerie tomographique géoélectrique peut être est utilisée pour cartographier les sédiments littoraux. Le principal but de la géophysique est de déduire les propriétés physiques du sol, des sédiments ou du socle rocheux (i.e. radiométrique, électrique, acoustique, magnétique, gravimétrique), à partir de phénomènes physiques associés, afin d'obtenir sa constitution interne. Les méthodes géophysiques sont non destructives et permettent d'imager des environnements fragiles et instables en minimisant les risques de dégradation du milieu. Ces technologies, peu invasives, sont entre autres bien adaptées à l'étude de dunes, de falaises instables et de milieu sédimentaire argilo-silteux ne permettant pas la circulation de lourdes foreuses géotechniques.

Dans le cadre de ce projet, deux techniques géophysiques ont été utilisées pour évaluer les caractéristiques des sédiments de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Même si le projet portait principalement sur l'utilisation de l'imagerie tomographique géoélectrique, des mesures sismiques ponctuelles ont été faites en plusieurs endroits afin de valider l'interprétation des données géoélectriques.

En plus des levés géophysiques, sept sondages ont été réalisés à l'aide d'une foreuse géotechnique (Geotech) fonctionnant en mode rotopercussion ou CPT *(Cone Penetration Test)* afin de préciser la stratigraphie des sédiments et de mesurer quantitativement la profondeur du socle rocheux présent sous la plage.

2.3.1 Études géophysiques à Ste-Luce-sur-Mer

La plage de Ste-Luce-sur-Mer a fait l'objet de nombreux levés Lidar terrestres et de plusieurs études microtopographiques dans le but de préciser les caractéristiques géomorphologiques du littorale et de monitorer l'évolution du trait de côte. Malgré toutes ces études, les informations sur la géologie, la variabilité d'épaisseur des sédiments de la plage actuelle et des sédiments quaternaires sous-jacents sont pratiquement inexistantes. Afin de permettre l'étude de la partie profonde et non-visible de la plage, nous avons adopté une méthodologie pluridisciplinaire basée sur l'utilisation de méthodes géophysiques et géotechniques. Les travaux géophysiques réalisés, en novembre et décembre 2016, à Ste-Luce-sur-Mer consistent en des levés d'imagerie tomographique géoélectrique et de mesures sismiques ponctuelles (ratios spectraux H/V). Ces levés ont été précédés, en novembre 2016, d'une campagne de forage à l'aide d'une foreuse géotechnique. Cette dernière a permis de compléter sept sondages sur le haut de plage de l'Anse-aux-Coques. Ces derniers débutent sur la plage et se terminent dans le socle rocheux appalachien.

2.3.1.1 Levés tomographiques géoélectriques (ABEM Terrameter-LS)

Les levés de résistivité électrique ont été réalisés en mode d'imagerie tomographique géoélectrique. Le système Terrameter-LS d'ABEM (Suède) est automatisé et permet l'acquisition de plusieurs milliers de mesures lors de la réalisation d'une section. Ce système peut être utilisé dans des conditions hivernales (-25°C) et même sous une très forte humidité.

Câbles et électrodes

L'INRS dispose de différents types de câbles multi-connecteurs permettant de réaliser des profils d'imagerie géoélectrique de 160, 400 et 1600m de longueur (mode normal). Pour des raisons de bathymétrie et de faible étendue de la plage à Ste-Luce-sur-Mer, il était impossible de déployer, perpendiculairement à la plage, des dispositifs de 400 et 1600m. De plus, l'espacement des électrodes du dispositif de 400m est de 5m et de 20m pour celui de 1600m. La résolution verticale des levés pour les câbles de 400 et 1600m, étant approximativement la moitié de la distance inter-électrode (donc 2,5 et 10m), cette dernière est insuffisante pour permettre une imagerie des sédiments de plage. Ainsi, pour la réalisation des sections transversales, se terminant dans l'eau de mer, deux câbles multi-connecteurs subaquatiques de 80 m de longueur chacun (totalisant 160 m) avec espacement des électrodes de 2,5 m ont été utilisés. Ces câbles, spécialement construits par ABEM France, sont totalement étanches à l'eau et peuvent être utilisés en milieu marin en mode d'immersion totale ou comme pour un levé sismique aquatique, tractée à la surface de l'eau à l'arrière d'un bateau. Ces câbles aquatiques ont été utilisés avec le système Terrameter-LS à 12 canaux d'ABEM (Suède). Des électrodes en acier inoxydable, de 50 à 125 cm de longueur, ont été utilisées pour le levé. Les électrodes installées au large ont été modifiées afin de maintenir une forte conductivité électrique à la base (partie enfoncée dans le sédiment) et rendre isolante l'essentiel de la surface exposée à l'eau de mer (fort conducteur). Pour isoler électriquement les électrodes, 3 couches de peinture époxy ont été appliquées et une gaine thermorétractible installée pour augmenter le degré d'isolation de la partie centrale de l'électrode.

Source d'énergie

Des batteries nautiques de haute capacité (12V) ont été utilisées comme principale source d'énergie. Compte tenu de l'injection de hauts voltages, une mise à la terre était utilisée en permanence pour sécuriser le dispositif particulièrement vulnérable à la présence d'eau de mer pouvant produire des court-circuits et même l'électrocution des opérateurs.

Déplacement des câbles et électrodes, protection des opérateurs de terrain et des équipements

Pour le déplacement rapide du matériel sur la plage et dans l'eau de mer et pour sécuriser l'équipement électronique nous avons utilisé un véhicule amphibie sur chenille de l'INRS (Argo) et un véhicule Polaris 6 roues avec cabine fermée. Compte tenu de la largeur des chenilles, et du faible poids du véhicule, l'utilisation de ce type de véhicule perturbe très peu l'environnement naturel de la plage (Fig. 8b.). Afin de maximiser le nombre de levés par jour, l'équipe devait préparer le matériel et débuter l'installation des électrodes et câbles pendant le cycle de marée descendante (tableau 1). La première acquisition débutait normalement à la marée basse. Les périodes d'acquisitions se sont terminées à la marée montante et une partie du dispositif (situé vers le large) était recouvert de plus de 50 cm d'eau de mer. Les températures très froides de décembre 2016, de l'ordre de -15 à -20°C certaines journées, et des vents de tempêtes atteignant certaines journées plus de 85 Km/h rendaient la récupération des électrodes et câbles difficile (vagues déferlantes). Pour sécuriser les opérations, l'utilisation d'habits de plongée (dry suits) et de cuissarde de pêche en néoprène ont été nécessaires. Compte tenu des heures des grandes marées de décembre 2016, les levés ont été majoritairement réalisés dans des conditions d'obscurité presque totales et nécessitant l'utilisation de lampes frontales et ou d'autres sources comme les phares de nos camions, stationnés en bordure de mer, et ceux des véhicules tout terrain. Un laboratoire mobile de l'INRS (roulotte rouge) isolé et chauffé au gaz propane a été nécessaire pour permettre la réalisation des travaux dans des conditions hivernales (Fig. 9.). Pendant la nuit, les câbles multi-connecteurs et les câbles de jonction avec les électrodes devaient sécher pour éliminer l'accumulation de glace de mer. Cette roulotte était aussi utilisée pour mettre les habits de plongée et autres protections contre l'hypothermie.

Tableau 1 : Table des marées basses observées au site de Pointe-aux-Pères pour les périodes du 24 au 27 novembre 2016 et du 11 au 17 décembre 2016.

Table des marées basses à Pointe-aux-Pères					
Pêches et Océans Canada					
Date	Année	Marée basse			
24-nov	2016	04h41			
		17h14			
25-nov	2016	05h27			
		18h04			
26-nov	2016	06h07			
		18h47			
27-nov	2016	06h42			
		19h26			
11-déc	2016	05h21			
		18h10			
12-déc	2016	06h12			
		19h26			
13-déc	2016	07h01			
		19h53			
14-déc	2016	07h48			
		20h41			
15-déc	2016	08h36			
		21h30			
16-déc	2016	9h23			
		22h18			
17-déc	c 2016 10h11				
		23h07			

Figure 8. Dispositif de tomographie géoélectrique (ABEM Terrameter LS) utilisé pour le levé de décembre 2016 à Ste-Luce-sur-Mer. A) véhicule Polaris 6 roues et B) véhicule amphibie Argo sur chenilles utilisé comme station de base pour les mesures de la résistivité électrique.

Figure 9. A) laboratoire mobile chauffé (rouge) et véhicules de l'équipe stationnés sur le quai de Ste-Luce-sur-Mer. B) Dispositif de câbles et électrodes déployé sur la neige et la glace recouvrant la plage et une partie de l'avant-plage à marée basse.

2.3.1.2 Mise en garde pour la réalisation de levés géoélectriques en milieu marin

Ce type de levé requiert des compétences et aptitudes pour le travail en milieu hostile. Il nécessite une surveillance constante et un travail d'équipe bien synchronisé. Notez que l'injection de courants électriques en contact avec l'eau de mer est une activité souvent déconseillée par la majorité des électriciens. Toutefois, comme le démontre cette étude, il est possible de réaliser ce type d'intervention sans accidents. Pour la réalisation de travaux similaires, les contracteurs en géophysique doivent impérativement modifier leurs protocoles d'intervention car ces derniers sont normalement optimisés pour des travaux réalisés en milieu terrestre.

2.3.13 *Paramètres d'acquisition du levé de tomographie géoélectrique de Ste-Luce-sur-Mer*

Paramètres généraux

• géométrie du dispositif source:

Dispositif « gradient » (multiple potential gradient method)

• Dispositif de câbles :

Deux câbles multi-connecteurs aquatiques ABEM-France de 32 sorties étanches en acier inoxydable (**Fig. 10**)

- géométrie du dispositif récepteur : linéaire (câbles multi-connecteurs)
- espacement entre les électrodes : 2,5 m
- caractéristiques de la source d'énergie utilisée :

Source électrique (3 batteries nautiques 12 V et une génératrice Honda de 3000W).

• réglage des filtres d'enregistrement :

Filtre 60 Hz activé, car lignes électriques présentes en bordure de la rue bordant la plage de Ste-Luce-sur-Mer

• Coordonnées GPS:

Les données instrumentales sont mesurées avec des données GPS exprimées en coordonnées NAD83 utm zone 19.

Figure 10. Caractéristiques géométriques du dispositif géoélectrique déployé lors des levés de résistivité électrique ABEM Terrameter-LS réalisés à Ste-Luce-sur-Mer.

En raison des risques reliés à l'opération du système en milieu marin (haute conductivité de l'eau de mer) le voltage maximum d'émission a été fixé à 400 volts. La précision du système de réception du signal mesuré par les électrodes de potentiel est de 0,1% et la reproductibilité de l'ordre de 0,2%. La résolution du récepteur est de 3 nV pour une intégration d'une seconde. La précision de l'émetteur de courant est de 0,1% et sa reproductibilité de 0,2%.

Pour ce levé, le mode d'acquisition gradient (protocole « multiple potential gradient method »d'ABEM) a été utilisé afin d'obtenir une bonne résolution spatiale et un rapport pic / bruit de fond élevé. Ce dispositif permet la réalisation d'un levé relativement rapide en prenant avantage des nombreux canaux d'acquisition du Terrameter-LS (version 12 canaux). Notez que la méthode dipôle-dipôle n'a pas été retenue en raison du bruit de fond électrique localement élevé. Tel que mentionné dans ce rapport, les méthodes Schlumberger et Wenner n'ont pas été retenues en raison de la durée excessive des mesures qui ne permettait pas de terminer une acquisition en période de marée basse. Notez que pour faire des levés de tomographie géoélectrique perpendiculaires à la côte, et ce en conditions de marée basse, il est impératif d'utiliser un système de résistivité électrique à 12 canaux. Ce type de résistivimètre peut mesurer plusieurs dipôles de potentiels pendant l'injection de courant entre deux électrodes. Ceci permet de terminer l'acquisition des données avant l'inondation de la plage lors de la marée montante. De plus, il est important de souligner que pour des raisons de configuration d'électrodes et de principe de mesure, certaines méthodes, comme celle de Wenner, ne peuvent être réalisées en mode multicanaux. Ces protocoles ne sont pas adaptés à l'étude du domaine côtier.

Le logiciel ZondRes2D a été utilisé pour le traitement des données acquises et l'inversion des données de résistivité électrique apparente. Ce logiciel permet d'évaluer la qualité des données et ce avant de procéder à l'inversion des données. Il est de plus compatible avec d'autres logiciels d'inversion comme le programme RS2DINV. Son coût d'acquisition est également abordable.

2.3.1.4 *Méthode de résistivité électrique*

Les méthodes de prospection électrique regroupent des méthodes actives, basées sur l'injection d'un courant dans le sous-sol (e.g. résistivité électrique et polarisation provoquée), et des méthodes passives mesurant le champ électrique résultant de courants électriques naturels présents dans le sous-sol (potentiel spontané). Dans ce rapport, nous avons utilisé la méthode de résistivité électrique. Cette dernière est nettement plus performante pour obtenir une imagerie géoélectrique utile pour la caractérisation du littoral.

Quelques généralités sur la méthode de résistivité électrique

Les méthodes de prospection électrique consistent à déterminer les propriétés des sols par la mesure de leur résistivité électrique. L'unité de mesure est l'Ohm mètre (Ω .m). La résistivité d'un matériau est l'inverse de la conductivité: plus un matériau est conducteur (respectivement résistant), moins il est résistant (respectivement conducteur). La résistivité électrique d'un sol est sa capacité à limiter le passage d'un courant électrique. Cette méthode galvanique consiste à injecter un courant électrique et à mesurer la différence de potentiel électrique générée par le passage du courant dans les formations investiguées. Cette différence de potentiel est fonction de la résistivité des structures traversées par les lignes de courant et varie également en fonction du dispositif de mesure. La distribution de la résistivité électrique peut ainsi être déterminée, donnant notamment de l'information sur la nature et la géométrie des formations géologiques investiguées. De plus, notez que le volume de matériaux caractérisé par la mesure dépend de l'écartement entre les électrodes: plus l'écartement est grand, plus le volume prospecté est grand.

La mesure de la résistivité du sol nécessite quatre électrodes. Deux de ces électrodes, dites de courant (A, B), font circuler dans le sol un courant d'intensité fixée. La différence de potentiel induite dans le sol par la circulation de ce courant est mesurée aux deux autres électrodes, dites de potentiel (M, N) (Fig 11). L'injection du courant et l'acquisition des différences de potentiel sont contrôlées par un résistivimètre de précision.

Figure 11. Diagramme montrant la propagation d'un courant électrique dans un terrain hétérogène. A et B électrodes d'injection de courant et M et N électrodes de mesure de potentiel (voltage).

Les mesures de résistivité électrique, mesurées par le résistivimètre de terrain, sont essentiellement apparentes car les terrains sont généralement anisotropes et hétérogènes. Le plus souvent, des unités superficielles sédimentaires reposent au-dessus d'un socle rocheux plus résistif. La figure suivante montre la complexité des lignes de courant lorsque l'on passe d'un contexte isotrope (Fig. 12a) à anisotrope ((Fig. 12b). Dans un contexte stratifié et hétérogène. comme celui d'une plage, les données de résistivité électrique apparente doivent être inversées afin de produire un modèle de résistivité électrique réaliste du terrain. Le principe de l'inversion consiste à déterminer des modèles de sols (résistivité réelle) dont la réponse électrique reproduit les résistivités apparentes mesurées sur le terrain (pseudo-section). L'objectif de l'inversion est de déterminer la distribution de la résistivité p dont la réponse ajuste les mesures observées et qui minimise l'écart entre la pseudo-section calculée pour un modèle de sol et la pseudo-section mesurée lors du levé de terrain. Cet écart est généralement quantifié par le critère de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square, RMS).

Figure 12. Répartition des courants électriques dans un sol isotrope (homogène) (**A**) et dans un terrain anisotrope (hétérogène) (**B**) constitué d'un horizon supérieur argileux (conducteur, faiblement résistif) et d'un socle rocheux résistif à la base.

La résistivité électrique des matériaux dépend essentiellement des phénomènes de conduction électrolytique (sédiments) et d'une manière moindre de conduction électronique (minéraux à lustre métallique). Les valeurs de résistivité dépendent de la nature du matériau et couvrent un large domaine (**Fig. 13**). Ces valeurs dépendent aussi de la teneur en eau, de la porosité et de la perméabilité du milieu. La **figure 13** montre un écart considérable de valeurs de résistivité électrique entre des graviers et sables (plus résistifs) et des argiles électriquement conductrices. L'écart est aussi très important entre de la glace, de l'eau douce et de l'eau salée.

Figure 13 . Résistivité et conductivité électrique des sols et roches

2.3.1.5 Imagerie tomographique de la résistivité électrique

La loi d'Ohm permet de calculer la résistivité électrique dite apparente. Cette valeur résulte de la contribution de toutes les portions du milieu qui sont traversées par le courant émis en surface. Ainsi, la mesure représente une valeur qui intègre les résistivités sur un certain volume du sous-sol. La technique d'acquisition consiste à réaliser des profils en augmentant régulièrement l'espace entre les électrodes. Les mesures de terrain permettent ainsi d'obtenir une pseudo-section de la résistivité électrique apparente du sous-sol. Ces données sont par la suite inversées afin d'obtenir une section de la variabilité spatiale des valeurs de résistivité électrique vraie.

La tomographie électrique est une méthode moderne d'imagerie géophysique non destructive qui permet de définir un milieu en termes de résistivité électrique à partir de mesures du potentiel. Cette méthode vise à reconstruire la distribution de la résistivité électrique des sédiments, sols et unités rocheuses selon une section verticale (pour un modèle 2D) ou dans pour un volume de géomatériaux (pour un modèle 3D) à partir des mesures faites avec des configurations d'électrodes de dimensions et de géométries variables. La première étape de cette méthode géoélectrique consiste à réaliser une série de mesures de différences de potentielles électriques (voltages) grâce à des électrodes en acier inoxydable enfoncées dans le sol ou dans des sédiments pour ce qui est d'un environnement de plage. Ces dispositifs d'électrodes et de câbles sont généralement implantés le long d'un profil (2D) (Fig. 14).

Figure 14. Schéma montrant une imagerie tomographique géoélectrique réalisée sur un terrain forestier. Source : Naudet, 2004.

L'espacement minimum a entre deux électrodes adjacentes ainsi que la distance maximum entre dipôle émetteur - dipôle récepteur pour une acquisition donnée déterminent la longueur du profil, la profondeur de pénétration ainsi que la résolution spatiale désirée. Les mesures de résistivité électrique sont réalisées en mode automatisé et selon une séquence d'acquisition prédéfinie en fonction du type de terrain devant être étudié. Les valeurs de résistivité apparente obtenues pour chacun des quadripôles de mesure sont reportées à l'aplomb du dispositif à une profondeur proportionnelle à la valeur de l'espacement a. On parle alors de niveaux d'acquisition. Ainsi, lorsque l'espacement entre les électrodes profondeur d'investigation augmente. la augmente proportionnellement. On peut alors représenter les valeurs de résistivité électrique apparente mesurées sous la forme d'une pseudo-section qui reflète qualitativement la variation spatiale et verticale de la résistivité électrique apparente. Cette pseudo-section est importante car elle permet de vérifier rapidement les caractéristiques du terrain ainsi que la qualité des données. Des systèmes comme le Terrameter-LS (ABEM) ont un écran couleur permettant de visualiser la pseudo-section en temps réel et ce directement sur le terrain.

Afin d'obtenir la résistivité réelle du sol au droit des profils, les valeurs de résistivité apparente doivent être inversées afin d'obtenir une image 2D de la résistivité électrique du sous-sol. Cette méthode, facile à mettre en place, permet d'obtenir une image du sous-sol de bonne qualité grâce à des logiciels commerciaux (RES2DINV, ZONDRES2D etc..) ou universitaires (ex. DCIP2D, DCIP3D, DC2DInvRes). L'imagerie tomographique de la résistivité électrique est utilisée dans de nombreux contextes d'études de terrain. Par exemple, elle est utilisée pour la prospection minière dans les différents camps miniers de l'Abitibi, pour la délimitation d'aquifères en présence d'eau douce et d'eau salée (ex. îles-de-la-Madeleine), pour des études géotechniques (pergélisol, glissement de terrain, pour la détection de milieux karstiques, gestion du risque) et pour différentes applications environnementales (fuites d'hydrocarbures, drainage minier acide etc...).

Profondeur d'investigation

Pour une configuration d'électrodes ABMN (A et B étant les électrodes d'injection de courant et M et N les électrodes de mesure du potentiel) donnée, l'épaisseur de terrain qui influe sur la mesure est d'autant plus grande que les électrodes sont espacées entre elles. Il dépend également de la configuration utilisée (ex : dipôle-dipôle, gradient, Shlumberger, Wenner) car la forme des lignes de courant et des surfaces équipotentielles sont influencées par le type de configuration géométrique utilisé lors d'un levé. La **figure 15** montre les lignes de courant et les surfaces équipotentielles (voltage) lors d'une mesure simple réalisée à l'aide d'une configuration Wenner.


Figure 15. Exemple de lignes de courant et de surfaces équipotentielles associées à une configuration de type Wenner. Notez que les électrodes de mesure du potentiel sont situées d'une façon symétrique entre les électrodes d'injection de courant.

Dans tous les cas, la profondeur d'investigation se voit limitée par la puissance du courant pouvant être injecté et par la sensibilité de la mesure de potentiel qui, pour de faibles valeurs, peut fortement être contaminée par des courants de sources telluriques ou anthropiques locales (ex. lignes électriques, clôtures électrifiées). Pour atteindre de grandes profondeurs à l'aide de longs dispositifs linéaires (kilométriques) l'utilisation de génératrice Diesel triphasée d'une puissance de plus de 40 000 W est nécessaire. Dans le cas d'études de plage et de sédiments littoraux, la puissance d'injection nécessaire est beaucoup plus modeste car les profondeurs d'investigation sont faibles.

Aussi, la profondeur d'investigation dépend aussi de la distribution des valeurs de résistivité électrique dans le terrain. Par exemple, si une couche conductrice argileuse est située en surface alors le courant se concentre préférentiellement dans cette conductrice, ce qui réduit la profondeur d'investigation. Inversement, si le terrain présente une couche résistive en surface puis une couche conductrice, la profondeur d'investigation peut être plus grande.

Configurations d'électrodes

Dans le cadre du projet de caractérisation de la plage de Ste-Luce-sur-Mer, nous avons évalué quatre configurations d'électrodes basées sur les méthodes Wenner, dipôle-dipôle, Schlumberger et gradient. Ces méthodes sont fréquemment utilisées pour l'étude de la proche surface.

L'arrangement des électrodes, lors de la réalisation d'une étude d'imagerie électrique, est une des caractéristiques les plus importantes d'un levé de tomographie géoélectrique. Certaines configurations sont plus pénétratives et donnent une imagerie plus profonde du terrain (ex. dipôle-dipôle) et d'autres permettent l'acquisition de données moins bruitées en milieu urbanisé (ex. Wenner). Les résolutions verticale ou horizontale varient également en fonction des configurations d'électrodes. La méthode Wenner est bien adaptée à la mesure de strates sub-horizontales tandis que la méthode dipôle-dipôle performe bien en présence de structures plus verticalisées. Les méthodes Schlumberger et gradient permettent d'obtenir une imagerie géoélectrique utile de par leurs bonnes résolutions horizontale et verticale. Le positionnement des électrodes de courant (C1, C2) et de potentiel (P1, P2), pour les quatre configurations est indiqué sur la **figure 16**.



Figure 16. Positionnement des électrodes de courant (C1, C2) et de potentiel (P1, P2) pour les configurations Wenner (A), dipôle-dipôle (B), Schlumberger (C) et gradient (D).

2.4. LEVÉ SISMIQUE (MÉTHODE RATIOS SPECTRAUX H/V)

La méthode sismique « H/V bruit de fond » consiste à calculer les ratios spectraux des composantes horizontales et verticale à partir d'enregistrements de bruit de fond sismique ambient (Nakamura, 1989; Bard, 1999). Cette méthode est particulièrement bien expliquée dans les travaux de Kudo (1995) et de Bard (2008). La méthode des ratios spectraux à l'avantage de ne pas nécessiter de station de référence et permettent d'évaluer les fréquences de résonance d'un site. Le bruit de fond sismique mesuré par cette méthode est constitué de bruits aléatoires et périodiques dus aux activités humaines et naturelles. Les niveaux d'accélération en jeu sont très faibles (de l'ordre de 10⁻⁵ à 10⁻³ m/s²) par rapport aux séismes pouvant générer des vibrations de l'ordre de 1 à 4,5 m/s². Cette méthode a été communément utilisée pour la caractérisation de la sub-surface pour ce qui est d'études de micro-zonage sismigue (D'Amico et al., 2008) et pour l'exploration de terrains à des profondeurs crustales (Larose et al. 2006). L'objectif premier de la mesure de la vibration ambiante à une station donnée est de détecter la présence de contrastes d'impédance sismique et donc de résonance sismique de sub-surface (Kramer, 1996). Selon le groupe d'expert SESAME, la détermination de la fréquence fondamentale de résonance des sédiments non-consolidés est d'une importance majeure pour expliquer l'aléa sismique local (SESAME, 2004).

La méthode est d'application simple dans le cas d'un environnement de type 1D (résonnance 1D) caractérisé par la présence d'une unité superficielle (ex. sédiments de plage) d'une faible épaisseur par rapport à l'étendu de la formation. La fréquence de vibration du sol (F_0) pour le premier mode fondamental de vibration est calculable à partir de l'équation suivante :

$$F_0 = V_S / 4H$$

ou V_S : vitesse des ondes de cisaillement H : épaisseur de la couche superficielle

La méthode des ratios spectraux H/V est normalement utilisée avec d'autres méthodes d'observations géologiques ou par forage. Par exemple, lorsque l'épaisseur d'une formation superficielle est connue par forage, il est possible d'estimer la vitesse de propagation des ondes de cisaillement (V_s).

La vitesse des ondes de cisaillement est calculée à partir de l'équation

$$V_s = 4^* H^* F_o$$

ou V_S : vitesse des ondes de cisaillement

H: épaisseur de la couche superficielle

F₀ : fréquence de vibration du sol

Sachant cette vitesse, il est possible d'appliquer cette valeur à une zone d'étude géographiquement limitée et de modéliser la variation d'épaisseur de l'unité superficielle grâce aux mesures H/V obtenues à d'autres stations de mesure.

Pour de gros bassins sédimentaires (vallées encaissées) ou des environnements montagneux avec de forts reliefs, le contexte 2D ou 3D du terrain complique l'interprétation des données de ratios spectraux H/V car des phénomènes de réflexion des ondes de cisaillement sur les bords du bassin peuvent augmenter l'accélération du sol et la durée du signal sismique observé.

2.4.1 Sources de vibrations naturelle et anthropique

Les vibrations d'origine naturelles sont produites par certains phénomènes telluriques et par d'importantes variations océaniques ou atmosphériques (tempêtes). Ces vibrations ont un maximum d'énergie dans des gammes de fréquence relativement basses (<0.5 Hz). Le vent et la pluie ont un maximum d'énergie dans des fréquences autour de 1Hz. Les vibrations d'origine anthropique sont produites par le trafic routier, travaux lourds, excavations, chemin de fer passage de gros navires en bordure de mer). Les fréquences reliées aux sources anthropiques sont généralement plus élevées et situées audessus de 1Hz. Évidemment, dans une zone sismique (ex. Charlevoix), les vibrations transitoires reliées aux séismes et glissements de terrain peuvent contribuer au bruit de fond sismique local. En général en milieu urbain éloigné de la mer, les vibrations à haute fréquence sont dominantes tandis qu'en bordure de mer, il est fréquent d'observer des vibrations à de plus basses fréquences.

2.4.2 Méthode de mesure sur le terrain

Dans le cadre de ce projet, les données de fréquence fondamentale de résonance des sédiments et du roc de Ste-Luce-sur-Mer ont été mesurées à l'aide de deux sismomètres triaxiaux Tromino (Moho Science and Technology). L'appareil de mesure utilisé est un tromographe digital doté d'un système d'acquisition à haute résolution équipé de trois canaux vélocimétriques et de trois canaux accélérométriques (X, Y et Z). Les instruments utilisés ont été prêtés par Didier Perret de la Commission géologique du Canada (CGC-Québec).



Figure 17. Tromographe Tromino (*Moho Science and Technoplogy*) utilisé pour les mesures sismiques à Ste-Luce-sur-Mer.

Lors de son implantation sur le terrain, le tomographe doit être installé dans un endroit sécuritaire, éloigné des véhicules en mouvement et des passants. Le tromographe doit être enfoncé délicatement dans le sol à l'aide de son trépied en acier spécialement adapté pour les sols. L'axe long du tromographe doit être orienté vers le nord et le niveau doit être ajusté pour maintenir une position horizontale pour l'ensemble de la durée des mesures. Un cône orange, de signalisation routière, doit être installé au-dessus du tromographe pour diminuer l'impact du vent et pour protéger l'instrument pendant la période de mesure, qui pour la plage de Ste-Luce-sur-Mer, était de 45 minutes par station (**Fig. 18**). Pour d'autres types d'applications en géotechnique, il est recommandé de consulter le rapport synthèse du groupe de recherche SESAME (**Sesame, 2004**).



Figure 18. Levé tromographique de novembre 2016 réalisé sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. A) surface de la plage enneigée avec cône orange indiquant la position du tromographe, B) tromographe en lecture dans un secteur recouvert d'algues, C) photo du sismomètre triaxial Tromino orienté vers le nord et nivelé parfaitement à l'horizontal.

2.4.3. Interprétation des données rapports spectraux H/V

Les données du tomographe sont enregistrées pour une période de 40 minutes. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 128Hz (valeur recommandée pour des applications stratigraphiques). La dimension de la fenêtre de temps a été fixée à 30 secondes. Le logiciel Grilla, de la compagnie *Moho Science and Technology*, a été utilisé pour transférer les données et calculer les amplitudes des spectres de Fourier pour les vibrations N-S, E-O et verticales. Les amplitudes des spectres de Fourier pour les composantes N-S et E-O ont été moyennées par le logiciel. Le spectre horizontal moyenné a par la suite et divisé par le spectre de la composante verticale afin d'obtenir le rapport spectral H/V. Ce rapport est utilisé pour les calculs et interprétations ultérieurs. La **figure 19a** montre la transformation des données brutes (série temporelle) en amplitudes de spectres de Fourier pour les composantes (X, Y ou N-S et E-O) et verticale (Z).





Comme le montre la **figure 20b**, les amplitudes des spectres de Fourier sont moyennées pour ce qui est des composantes N (N-S) et E (E-O) et enfin le rapport spectral H/V calculé (**Fig. 20c**).



Figure 20. **A)** Amplitudes des spectres de Fourier de données d'un sismomètre triaxial pour les composantes verticale (Z) et horizontales (N=Nord et E=Est), **B**) Amplitudes des spectres de Fourier moyennées pour les composantes N et S donnant la valeur moyenne H et **C**) ratio spectral H/V calculé.

Les données mesurées par un tromographe peuvent parfois être mauvaises en raison d'un mauvais nivellement ou d'un déplacement du tromographe durant une acquisition. La **figure 21a** montre l'allure d'amplitudes de spectres de Fourier pour une bonne acquisition. Notez la cohérence des courbes. A l'opposé, la **figure 21b** montre des données de très mauvaises qualités ne pouvant faire l'objet d'une interprétation quantitative.



Figure 21. **A**) Amplitudes des spectres de Fourier pour les composantes verticale (Z) et horizontales (N=Nord et E=Est) d'une acquisition peu bruitée. **B**) Amplitudes des spectres de Fourier pour les composantes verticale (Z) et horizontales d'une mauvaise acquisition.

Dans certains cas, les données mesurées par un tromographe peuvent être bruitées et ce malgré un excellent nivellement de l'appareil. Ceci est montré sur les **figures 22a et b**. Cette dernière montre une grande variabilité dans le domaine des basses fréquences. Les logiciels de traitement des données sismiques comme *Grilla*, ou le logiciel *GeoSpy* de type *Open Source*, peuvent être utilisés pour filtrer et éliminer plusieurs de ces mauvaises données. L'effet du filtrage des données est mis en évidence sur les **figures 22c et d**.



Figure 22. **A et B**) Ratios spectraux H/V d'une acquisition bruitée dans le domaine des basses fréquences. **C et D**) Ratios spectraux H/V calculés après filtrage et élimination des mauvaises données.

3. RÉSULTATS

3.1 FORAGES GÉOTECHNIQUES

Les forages réalisés en novembre 2016 ont été implantés sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer entre la Pointe-aux-Coques et le ruisseau recoupant la plage. Ces forages sont numérotés de For1 à For7 en s'éloignant vers l'Est de la plage (**Fig. 23**). Les forages For1, For2, For3 et For4a ont été réalisés en mode de rotopercussion en raison de la présence de gros blocs empêchant les mesures par CTP (*Cone Penetration Test*). Afin de maximiser la quantité de données et paramètres pouvant être générés par la foreuse géotechnique, nous avons par la suite déplacé la foreuse un peu plus bas sur la plage afin d'éviter de forer dans de gros blocs. A partir du forages For4b, et ce jusqu'au forage For7, nous avons utilisé la tête de foreuse avec CPT.



Localisation des sondages géotechniques

Figure 23. Plan de localisation des forages géotechniques réalisés sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer.

L'objectif premier, de la campagne de forage, était de fournir des données précises sur l'épaisseur totale de sédiments présents sur la plage de Ste-Lucesur-Mer afin de pouvoir valider les méthodes géophysiques utilisées pour caractériser la partie profonde de la plage. Compte tenu de l'hétérogénéité prévisible de l'épaisseur de sédiments sur plusieurs centaines de mètre le long du littoral, nous avons sélectionné les sites de forage afin de pouvoir documenter cette variabilité. La détermination de l'épaisseur de sédiment est un paramètre important en génie côtier car ces derniers constituent un des principaux éléments de défense contre la mer. En l'absence de ces derniers, le socle rocheux est extrêmement réflectif et ne permet pas d'absorber significativement l'énergie des vagues. Ce contexte accroit le risque de submersion marine en cas de grosses tempêtes comme celle ayant affectée la plage de Ste-Luce-sur-Mer en décembre 2010.

3.1.1. Description sommaire des forages

Une description sommaire des forages est présentée dans cette partie du rapport. Les informations techniques détaillées, reliées aux différents forages, sont présentées dans l'annexe 1.

Forage 1 :

Le forage 1, situé le plus à l'ouest sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer, est caractérisé par la présence d'un socle rocheux peu profond situé à seulement 2,4 m de profondeur et par l'absence de l'unité argilo-silteuse marine qui normalement repose sous les sédiments de plage (**Fig. 24**). L'essentiel des matériaux meubles, observés dans le forage 1, consiste en sédiments sableux, graveleux avec ou sans blocs et galets caractéristiques de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. La présence de nombreux blocs, lors du forage, a empêchée l'utilisation de la sonde CPT. Ce forage a été fait en mode de rotopercussion. Les données techniques du forage sont présentées à l'annexe 1.



Rotopercusion

Figure 24. Stratigraphie du forage 1. Notez l'absence de l'unité argilo-silteuse. Les sédiments de la plage reposent directement sur le socle rocheux appalachien. Sondage par rotopercussion.

Forage 2 :

Comparativement au forage 1, le forage 2 montre un épaississement des sédiments car le socle rocheux est présent à une profondeur de 5,8 m (**Fig. 25**). De plus, les données du forage 2 indiquent la présence de l'unité argilo-silteuse marine (2,7m d'épaisseur) qui était absente dans le forage 1. Les matériaux de la plage font 3,1m d'épaisseur et sont également constitués de sédiments sableux, graveleux avec ou sans blocs et galets. La présence de nombreux blocs, lors du forage, a également empêchée l'utilisation de la sonde CPT. Ce forage a donc été fait en mode de rotopercussion. Les données techniques complètes du forage 2 sont présentées dans l'annexe 1.



Rotopercusion

Figure 25. Stratigraphie du forage 2. Notez la présence de l'unité argilo-silteuse sous les sédiments de plage et l'accroissement de la profondeur au socle rocheux. Notez l'épaississement de la couche de sédiments de plage par rapport au forage 1. Sondage par rotopercussion.

Forage 3 :

Le forage 3 montre la présence du socle rocheux à une profondeur encore plus grande que pour les forages 1 et 2. Dans le forage 3, le socle a été intersecté à 12,8 m de profondeur. L'unité argilo-silteuse marine s'épaissit considérablement pour atteindre une épaisseur de 9,3 m (**Fig. 26**). Comme pour le forage 2, les sédiments de la de la plage font 3,1m d'épaisseur et sont également constitués de sédiments sableux, graveleux avec ou sans blocs et galets. La présence de nombreux blocs, lors du forage, a également empêchée l'utilisation de la sonde CPT. Comme pour les forages 1 et 2, le forage 3 a été fait en mode de rotopercussion. Les données techniques complètes du forage sont présentées dans l'annexe 1.



Rotopercusion

Figure 26. Stratigraphie du forage 3. Sondage par rotopercussion.

Forage 4a :

Le forage 4a est marqué par une profondeur encore plus grande au socle rocheux (15,7 m) (**Fig. 27**). L'unité argilo-silteuse marine atteint une épaisseur de 12 m. L'épaisseur de sédiments sableux, sablo-gravelleux et de galets est de 3,7 m. La présence de blocs, lors du forage, a également empêchée l'utilisation de la sonde CPT. Ce forage a donc été réalisé en mode de rotopercussion. Les données techniques complètes du forage 4a sont présentées dans l'annexe 1.



Rotopercusion

Figure 27. Stratigraphie du forage 4a. Sondage par rotopercussion.

Forage 4b :

Le site du forage 4b est situé un peu plus bas sur la plage par rapport au forage 4a. Ce second forage a été implanté afin de vérifier la possibilité d'utiliser la sonde CPT en évitant, le plus que possible, les zones riches en blocs et galets. La **figure 28** présente les résultats pour le sondage CPT réalisé. Ce site contient la plus grande accumulation de sédiments argilo-silteux et de plage (sable, graviers, galets) de la zone d'étude (16,7m au total). L'épaisseur des sédiments de plage est de 3,7m.

Le log des valeurs de résistivité électrique montre des valeurs plus résistives dans la première partie des sédiments de plage (sédiments non saturés) par la suite ces valeurs chutent à 40 Ohm-m. Dans la partie inférieure de l'unité de sédiments de plage, l'on note une chute drastique des valeurs de résistivité électrique (10 Ohm-m) suggérant la présence d'eau de mer dans une strate poreuse et perméable. Par la suite, le log de résistivité électrique montre une valeur constante d'environ 75 Ohm-m pour l'ensemble de l'unité argilo-silteuse. Tel que démontré dans l'étude de Long et Xharde (2014), cette unité est constituée de matériaux compacts datant de l'ancienne mer de Goldthwait. Elle est par définition relativement imperméable. En fin de sondage, la résistivité électrique augmente drastiquement pour atteindre 600 Ohm-m dans le socle rocheux. Notez que la sonde de la foreuse géotechnique mesure la résistivité électrique selon un axe vertical et pour un très faible volume de matériaux contrairement à la méthode de tomographie géoélectrique de terrain qui mesure ce paramètre horizontalement et pour un grand volume de sols, sédiments et roc. Les valeurs relatives de ces deux méthodes peuvent toutefois être utilisées pour mettre en évidence des contrastes entre différentes unités.

Le log stratigraphique CPT indique la présence de fines bandes de silt sableux dans l'unité argilo-silteuse. Ces sédiments, légèrement plus grossiers, sont surtout présents dans la partie inférieure de l'unité argilo-silteuse. Les données techniques complètes du forage 4a sont présentées dans l'annexe 1.



Sondage au piézocône



Forage 5 :

Le site du forage 5 est situé à l'est des forages 4a et 4b. La **figure 29** présente les résultats pour ce sondage réalisé en mode CPT. L'accumulation de sédiments argilo-silteux et de plage (sable, graviers, galets) atteint 13,7 m. Les sédiments de plage ne font que 1,80 m d'épaisseur. L'épaisseur observée est compatible avec les données d'épaisseur de sédiments de plage estimée par **Long et Xharde (2014)** pour la période antérieure à la mise en place du rechargement de plage de l'automne 2014. Notez que les plus fortes épaisseurs de sédiments de plage, observées dans les forages1 à 4b, sont probablement explicables par le processus de recharge de plage et de redistribution des matériaux sur la plage naturelle suite à l'action des tempêtes et marées. Le log des valeurs de résistivité électrique montre exactement les mêmes tendances que pour le forage 4b. Comme pour le forage 4b, Le log stratigraphique CPT du forage 5 indique la présence de fines bandes de silt sableux dans la partie inférieure de l'unité argilo-silteuse. Les données techniques complètes du forage 5 sont présentées dans l'annexe 1.



Sondage au piézocône

Figure 29. Stratigraphie du forage 5. Sondage par CPT. Notez la variabilité des valeurs de résistivité électrique et de résistance de pointe.

Forage 6 :

La **figure 30** présente les résultats pour le forage 6 réalisé en mode CPT. L'accumulation de sédiments argilo-silteux et de plage (sable, graviers, galets) atteint 14,65 m à cet endroit. Les sédiments de plage ont une épaisseur de 2,10 m. Le log des valeurs de résistivité électrique montre les mêmes tendances que pour les forages 4b et 5, soit la présence d'une zone perméable à l'eau de mer dans les sédiments de plage (zone très peu résistive), des sédiments argilosilteux montrant des valeurs de résistivité électrique homogènes et finalement le socle rocheux très résistif. Notez que contrairement au forage 5, la zone de très faibles valeurs de résistivité électrique est plus épaisse dans les sédiments de plage du forage 6 (zone de plus haute perméabilité à l'eau de mer). Les données techniques complètes du forage 6 sont présentées dans l'annexe 1.



Figure 30. Stratigraphie du forage 6. Sondage par CPT.

Forage 7 :

La **figure 31** présente les résultats pour le forage 7 réalisé en mode CPT. Ce forage est le dernier implanté sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Il est situé le plus à l'Est et à seulement 150m du ruisseau qui recoupe la plage. L'accumulation de sédiments argilo-silteux et de plage (sable, graviers, galets) atteint 12 m à cet endroit. Les sédiments de plage ont une épaisseur de 2,20 m. Le log des valeurs de résistivité électrique montre les mêmes tendances que pour les forages 4b, 5 et 6. Comme pour le forage 6, la zone de très faibles valeurs de résistivité électrique est plus épaisse dans le les sédiments de plage du forage 7. Le log stratigraphique CPT du forage 7 indique la présence de fines bandes de silt sableux dans la partie inférieure de l'unité argilo-silteuse. Les données techniques complètes du forage 7 sont présentées dans l'annexe 1.



Sondage au piézocône

Figure 31. Stratigraphie du forage 7. Sondage par CPT.

3.1.2. Description de la section longitudinale de la plage de Ste-Luce-sur-Mer

La section suivante montre l'évolution des épaisseurs des sédiments de plage, des sédiments argilo-silteux quaternaires et de la profondeur du socle rocheux selon une section parallèle à la plage et orientée Est-Ouest. Cette dernière montre une grande variabilité de l'épaisseur de la colonne sédimentaire, de l'unité argilo-silteuse marine et de la profondeur au socle rocheux. Notez la remontée du socle en direction de la Pointe-aux-Coques (vers l'ouest) et la disparition de l'unité argilo-silteuse marine (**Fig. 32 et 33**). L'épaisseur de sables, graviers et galets de l'unité de sédiments de plage est systématiquement plus importante dans les premiers 500m de la section (forages 1 à 4). Dans cette partie de la plage, son épaisseur varie de 3,1 à 3,7 m tandis que plus à l'est, à partir du forage 5, son épaisseur chute à moins de 2 m. Ce contraste, d'épaisseur de sédiments de plage au-dessus de la plage naturelle (**Fig.34**).



Figure 32. Section longitudinale de la plage de Ste-Luce-sur-Mer entre les sites des forages 1 et 7. L'échelle verticale est exagérée afin de pouvoir visualiser la variabilité d'épaisseur des unités sédimentaires et de la profondeur du socle rocheux. Notez la forte remontée du socle rocheux en direction de la Pointe-aux-Coques vers l'ouest.

La **figure 33** présente la même section longitudinale que pour la **figure 32**. Les échelles sont toutefois modifiées de 1 à 4x afin de juger de l'exagération de l'échelle verticale.



Figure 33. Section longitudinale de la plage de Ste-Luce-sur-Mer entre les sites des forages 1 et 7. L'échelle verticale varie de 1 à 4X.



Figure 34. Photographies montrant les matériaux du rechargement de plage de 2014 érodés et redistribués sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer (26 novembre 2016).

3.2 IMAGERIE TOMOGRAPHIQUE GÉOÉLECTRIQUE

Le levé de résistivité électrique, réalisé sur le site de Ste-Luce-sur-Mer, constitue la partie la plus importante de ce rapport. Cette méthode a été sélectionnée afin d'offrir aux différents intervenants une méthode robuste, relativement peu couteuse et sans impacts sur le milieu permettant une caractérisation détaillée des parties superficielles et profondes des plages. Les forages géotechniques ont été utilisés afin de valider l'imagerie géoélectrique.

3.2.1 Levés d'optimisation et de validation des protocoles d'acquisition de résistivité électrique (27 novembre 2016)

Une section longitudinale, positionnée dans la partie ouest de la plage de l'Anseaux-Coques, recoupant le début des lignes transversales L2 et L3, a été réalisée afin d'évaluer la performance de différents protocoles d'acquisition pouvant être utilisés en mode d'imagerie tomographique de la résistivité électrique en milieu côtier (**Fig. 35**). Pour ce faire, nous avons sélectionné quatre des méthodes les plus communément utilisées en géophysique de la proche surface : Wenner, Schlumberger, dipôle-dipôle et gradient. La méthode <u>dipôle-dipôle</u> est fréquemment utilisée dans le domaine de prospection minérale et permet une plus forte pénétration verticale du terrain. En milieux urbain ou rural, cette méthode se voit souvent limitée par des problèmes d'interférences par des sources électriques anthropiques car les voltages mesurés par le résistivimètre sont généralement faibles par rapport aux valeurs mesurées pour les autres méthodes.

La méthode <u>Wenner</u> permet la mesure de données relativement peu bruitées car le signal du voltage mesuré / voltage du bruit de fond est fort. Cette méthode permet de faire une imagerie adéquate de couches sédimentaires subhorizontales. Toutefois, cette méthode est relativement peu pénétrative et offre une faible résolution pour détecter des structures verticales ou inclinées (ex. chenaux sédimentaires, failles).

La méthode <u>Schlumberger</u> permet d'obtenir une imagerie plus complète car offrant de bonnes capacités pour documenter des structures horizontales ou inclinées. Un facteur limitant des méthodes Wenner et Schlumberger est la durée des acquisitions. Pour ces méthodes, la mesure de la résistivité électrique ce fait avec seulement 4 électrodes à la fois (2 électrodes d'injection de courant et deux électrodes de potentiel) ce qui ne permet pas la mesure simultanée de plusieurs dipôles de potentiel comme peut le faire des technologies récentes comme le Terrameter-LS, utilisé dans le cadre de ce projet, pouvant mesurer 12 canaux à la fois. Dans le cadre de levés d'imagerie tomographique de sédiments de haut et de bas de plage, il est important de sélectionner des méthodes rapides permettant de terminer les acquisitions dans des conditions de basses marées. Ces méthodes doivent aussi permettre la mesure de données de voltage peut bruitées car les plages sont souvent bordées de routes, lignes électriques et maisons pouvant perturber les mesures.

La <u>méthode gradient</u> pourrait être une des méthodes performantes pour des études géophysiques du littoral. Cette méthode a normalement une bonne pénétration verticale et sa résolution pour l'imagerie de structures horizontales ou inclinées est bonne. De par la configuration propre à ce type de levé, il est possible de faire une acquisition en utilisant 100% de la capacité du Terrameter LS soit 12 canaux au lieu de 4 canaux pour la méthode classique de Wenner.

Indépendamment de la méthode retenue, la méthode qui sera utilisée pour le projet se Ste-Luce-sur-Mer devra pouvoir fournir une imagerie géoélectrique réaliste et cohérente avec les observations géologiques et géotechniques du site de Ste-Luce-sur-Mer. Les données des levés d'optimisation et de sélection des méthodes de tomographie géoélectrique sont présentées dans cette partie du rapport.

Localisation de la section longitudinale

La figure suivante montre le plan de localisation de la section longitudinale réalisée dans le but d'évaluer la performance des différents protocoles d'acquisition des données de résistivité électrique. La section débute à la l'électrode 1, localisée sur une surface gazonnée située sur un plateau surélevé de 2m par rapport à la plage, et se termine vers le sud-est à l'électrode 64 (**Fig. 35**). La section longitudinale intersecte les lignes transversales L2 et L3 aux électrodes 28 et 61. Le forage 1 est situé au voisinage de l'électrode 44.



Figure 35. Plan de localisation de la section longitudinale du 27 novembre 2016. Cette dernière recoupe les lignes transversales L2 et L3.

3.2.1.1 Imagerie tomographique géoélectrique des essais du 27 novembre 2016

Les modèles d'inversion des données de résistivité électrique pour les protocoles d'acquisition Schlumberger, Gradient, Wenner et dipôle-dipôle sont présentés à la **figure 36**. Ces modèles permettent d'évaluer la qualité de l'imagerie et de sélectionner le protocole d'acquisition le mieux adapté pour réaliser un levé de haute résolution sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer.

Méthode Schlumberger :

Le levé réalisé avec le protocole Schlumberger (**Fig. 36a**) donne de bons résultats. L'imagerie permet de préciser la géométrie des dépôts sédimentaires (I et II) reposant au-dessus du socle rocheux (III et IV). Le socle rocheux montre une forte variabilité sous la zone d'accumulation de sédiments. La partie immédiatement sous les sédiments est plus résistive comme démontré par les sondages CPT réalisés à l'aide de la foreuse Geotech de l'INRS. La partie plus profonde montre des valeurs de résistivité électrique compatibles avec la présence probable de shales appalachiens. Cette méthode donne une imagerie réaliste du littoral de Ste-Luce –sur-Mer. Toutefois, la durée de l'acquisition était de 50 minutes en raison de l'utilisation d'un nombre restreint de canaux durant l'acquisition. La durée d'acquisition avec le protocole Schlumberger est donc trop longue pour des levés devant être réalisés perpendiculairement à la plage et ce dans des conditions de basses marées.

Méthode gradient:

Le levé réalisé avec le protocole gradient (**Fig. 36b**) donne également de très bons résultats. L'imagerie permet de préciser la géométrie des dépôts sédimentaires (I et II) reposant au-dessus du socle rocheux (III et IV). Tout comme pour le protocole Schlumberger, le protocole gradient montre un socle rocheux hétérogène. Ce protocole donne une imagerie très réaliste du littoral de Ste-Luce–sur-Mer. La durée de l'acquisition était de seulement 16 minutes en raison de l'utilisation d'un grand nombre de canaux durant l'acquisition (n=12). La durée d'acquisition avec le protocole gradient est donc idéale pour réaliser des levés rapides de la plage et ce dans des conditions de basses marées.

Méthode Wenner:

Le levé réalisé avec le protocole Wenner (**Fig. 36c**) donne également des résultats significatifs pour ce qui est des sédiments présents au-dessus du socle rocheux. L'imagerie permet de préciser la géométrie des dépôts sédimentaires reposant au-dessus du socle rocheux. Contrairement aux protocoles Schlumberger et gradient, le protocole Wenner donne une imagerie du socle rocheux géologiquement irréaliste pour Ste-Luce-sur-Mer. De plus, la durée de l'acquisition était d'environ 2 heures en raison de l'utilisation d'une configuration

ne pouvant utiliser plus que quatre canaux durant l'acquisition (n=4). La durée d'acquisition, avec le protocole Wenner, est donc beaucoup trop longue pour réaliser des levés rapides en bordure de mer. De plus, sa résolution est mauvaise pour produire une imagerie réaliste de structures verticales ou inclinées.

Méthode dipôle-dipôle:

Le levé réalisé avec le protocole dipôle-dipôle (**Fig. 36d**) donne également de bons résultats. L'imagerie permet de préciser la géométrie des dépôts sédimentaires (I et II) reposant au-dessus du socle rocheux (III et IV). Tout comme pour les protocoles Schlumberger et gradient, le protocole dipôle-dipôle montre la présence d'un socle rocheux hétérogène. Ce protocole donne une imagerie réaliste du littoral de Ste-Luce–sur-Mer. La durée de l'acquisition était toutefois très longue (1h17) en raison du bruit de fond élevé et des faibles voltages mesurés (**Fig. 37**) nécessitant la mesure de plusieurs réplicas pour diminuer l'écart-type des mesures. Malgré ces performances, la durée d'acquisition avec le protocole dipôle-dipôle est trop longue pour réaliser des levés rapides sur des plages.

Selon les essais réalisés sur la section longitudinale de la plage, le protocole gradient est le plus performant. Il donne une excellente imagerie et son temps d'acquisition est rapide pour permettre des levés dans des conditions de basses marées.



Figure 36. Imageries tomographiques obtenues suite à l'inversion de données de résistivité électrique apparente mesurées à partir des protocoles Schlumberger (A), gradient (B), Wenner (C) et dipôle-dipôle (D). Section longitudinale de la plage.





Figure 37. Voltages injectés et mesurés lors du levé de résistivité électrique du 27 novembre 2016. Notez la forte diminution du voltage mesuré en utilisant le protocole dipôle-dipôle.

3.2.1.2. *Levé de décembre 2016*

Le tracé des différentes lignes d'acquisition du levé d'imagerie tomographique géoélectrique de décembre 2016 est indiqué sur la **figure 38**. Au total, 18 sections transversales à la plage ont été réalisées du 11 au 17 décembre 2016. La période du levé correspondait à celle des grandes marées de décembre 2016. Dans ces conditions, les marées basses permettaient de dégager le bas de plage pour permettre l'installation des électrodes et câbles (**Fig. 39**).

Les lignes d'acquisition ont été numérotées de L2 à L21 (de l'ouest vers l'est) en fonction de la position des piquets d'arpentage, positionnés à la base du mur de protection, bordant la promenade de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Sur les différentes figures, présentées dans ce rapport, les sections d'imagerie tomographique géoélectrique débutent au sud (0m) près du mur de protection et se terminent vers 160 m en direction du nord (large).



Figure 38. Carte de localisation des lignes du levé d'imagerie tomographique géoélectrique réalisé sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer (décembre 2016). Photographie aérienne du Ministère de la Sécurité Publique du Québec (MSPQ).



Figure 39. A) Dispositif du levé de résistivité électrique (ABEM Terrameter LS déployé manuellement sur la glace dans le secteur de la ligne L13, **B**) VTT sur le bas de plage et câbles multi-connecteurs surélevés en condition de marée très basse.

Unités géoélectriques observées et résolution spatiale du levé d'imagerie tomographique géoélectrique de décembre 2016.

Les sections réalisées en décembre 2016, montrent dans l'ensemble, de quatre à cinq unités géoélectriques (I, II, III, IV et V). Certaines ont été forées sur le haut de plage ce qui permet une validation de la méthode. Lorsqu'un sondage géotechnique était situé près d'une ligne, nous l'avons rapporté sur les sections tomographiques correspondantes en respectant l'échelle verticale. Par exemple, la figure 40 montre la trace du forage 2 sur la section de la ligne 4. Malgré l'absence de données de sondage au large, il est possible d'établir des corrélations entre les données géotechniques et l'imagerie tomographique géoélectrique. Dans l'état actuel d'avancement des travaux du littoral de l'Anseaux-Coques, nous proposons la subdivision suivante :

- I) Socle rocheux constitué de roches appalachiennes cambroordoviciennes relativement peu altérées. Ces roches contiennent une proportion plus élevée de grès et siltstones que de shales et dans l'ensemble l'unité est plus résistive que les sédiments argilosilteux quaternaires qui recouvrent le socle rocheux.
- II) Roches appalachiennes situées près de la surface. Ces dernières sont variablement fracturées et altérées (intempérismes mécanique et chimique- *weathering*)
- III) Unité probablement sableuse présente surtout vers l'est et sous la basse-plage. Ancienne barre de plage reposant sur le socle rocheux ?.
- IV) Unité argilo-silteuse marine de la mer de Goldthwait. En se dirigeant vers l'est de l'Anse, l'unité s'épaissit et semble se subdiviser en deux membres (IVa et IVb). L'unité sommitale IVa est à dominance argileuse et l'unité IVb montre une alternance de lits de sables fins et silts et d'argiles silteuses tel que démontré dans les sondages géotechniques CPT (forages 4b, 5, 6 et 7).
- V) Unité de sables, graviers et galets constituant la plage actuelle de l'Anse-aux-Coques.

Sur l'ensemble des sections, les sédiments de plage (unité V) sont plus résistifs. Tel qu'observé sur le terrain et en début des sections (haut topographique situé entre les positions 0 et 20 m), l'unité repose sur les sédiments argileux de la mer de Goldthwait. L'imagerie tomographique permet de suivre les sédiments de plage sur une vingtaine de mètres car au-delà de cette distance, l'unité devient trop mince pour être détectable par le type de levé réalisé. Tel que démontré dans l'étude de Long et Xharde (2014), l'épaisseur de l'unité de sédiments de plage est de l'ordre de 30 cm à une distance de 30 m du mur de protection qui marque le début de la plage et aussi celui des sections tomographiques réalisées dans le cadre de ce projet. Notez que pour atteindre le socle rocheux et déterminer l'épaisseur totale de la colonne sédimentaire présente au-dessus du socle, il fallait utiliser un espacement inter-électrode de 2,5m pour obtenir un dispositif linéaire totalisant 160 m (2,5 m* 64 électrodes). Considérant que pour des levés de résistivité électrique, la résolution spatiale est de l'ordre de 50% de la distance inter-électrode, la résolution du levé géoélectrique réalisé à Ste-Lucesur-Mer est de 1,25 m (2,5 m / 2= 1.25 m). Pour détecter des couches sédimentaires avec une résolution permettant visualiser une couche de 30 cm il faudrait idéalement déployer un dispositif d'électrodes avec un espacement interélectrode de 30cm (résolution de 15 cm). Avec un tel dispositif, qui totaliserait une longueur horizontale de 19,2 m (30cm * 64 = 19,2 m), la profondeur maximale d'investigation serait d'environ 4m. Ce dispositif serait idéal pour étudier les sédiments de la plage actuelle mais ne pourrait pénétrer suffisamment pour caractériser le socle rocheux et les sédiments argilo-silteux quaternaires présents sous les sables et graviers de la plage actuelle.

Secteur Ouest de la plage (lignes 2 à 5)

Tel que démontré par les sondages géotechniques, la partie ouest de la plage de Ste-Luce-sur-Mer est marquée par la présence d'un socle rocheux de moins en moins profond en se dirigeant vers l'ouest et plus spécifiquement en direction de la Pointe-aux-Coques qui est essentiellement constituée de roches appalachiennes. Ceci est également démontré par la présence d'affleurements de grès et shales visibles à marée basse dans le secteur situé au sud du quai de la Pointe-aux-Coques. Cette tendance est aussi soulignée sur les sections d'imagerie tomographique géoélectrique présentées à la **figure 40**. Les sections des lignes 2 et 3 sont nettement dominées par la signature du socle rocheux résistif présent très près de la surface. Dans cette partie de l'anse, l'épaisseur de sédiment est donc très limitée. Il est hautement probable que les sédiments argilo-silteux de la mer de Goldthwait soient absents dans ce secteur.

La trace du sondage géotechnique du forage 2 est indiquée sur la section de la ligne 4. Le sondage recoupe des domaines de résistivité électrique compatibles

avec la nature des sédiments et du roc observé dans le forage. Par exemple, l'unité II, constituée de roc altéré a été observée dans le forage. Aussi, ce dernier a intersecté une mince bande de sédiments argilo-silteux sous les sédiments sableux de la plage. L'examen attentif de la ligne 5 montre que lorsque l'unité argilo-silteuse devient plus épaisse, la partie inférieure est plus résistive que la partie supérieure (Fig. 40). Ceci reflète probablement la nature plus argileuse de la partie supérieure de l'unité argilo-silteuse tel que démontrée par les diagraphies CPT qui indiquent la présence de nombreux lits de sables fins et de silts dans la partie inférieure de l'unité argilo-silteuse marine.



Figure 40. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 2 à 5 de la partie Ouest de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes au-dessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m. La trace du sondage géotechnique du forage 2 est indiquée sur la section de la ligne 4.

Secteur des lignes 6 à 10

Ce secteur, du littoral de l'Anse, est caractérisé par un épaississement considérable de la colone sédimentaire et conséquemment par une profondeur accrue du socle rocheux. Des sondages géotechniques ont été réalisés à proximité des lignes 6, 8 et 10 ce qui permet une bonne validation pour cette partie de la plage de Ste-Luce-sur-Mer (Fig. 41). Le forage 3, recoupant la ligne 6, montre bien la correspondance entre les données géotechniques et les valeurs de résistivité électrique observées. Les sédiments de plage (V) sont plus résistifs et l'unité argilo-silteuse marine (moins résistive) est dominante sur plus de 110m de longueur (IV). À partir de la section de la ligne 6, il semble y avoir une accumualtion de sédiments plus grossiers (III) sous l'unité argilo-silteuse (IV). Cette unité (III) semble présente sur les sections 6, 7 8, 9 et 10 de la figure 41. Le forage 4 a également interseté le socle rocheux (II) et l'unité argilosilteuse marine (IVa et IVb). La partie inférieure du sondage correspond à une zone un peu plus résistive ce qui serait compatible avec la présence de nombreux lits de sables fins et de silts observés dans la partie inférieure de l'unité argilo-silteuse. Cette observation pourrait suggérer un passage progressif de l'unité III à IVa. Pour confirmer cette interprétation, il faudrait implanter un forage dans le bas de plage.



Figure 41. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 6 à 10 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes audessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m. Les traces des sondages géotechniques des forages 3,4 et 5 sont indiquées sur les sections des lignes 6, 8 et 10.

Secteur des lignes 11 à 16

Les lignes 11 à 16 sont localisées dans la partie centrale de l'Anse-aux-Coques et plus spécifiquement de part et autres du ruisseau Isaac-St-Laurent qui recoupe la plage entre les lignes 13 et 15 (**Fig. 38**).

L'imagerie tomographique géoélectrique, observée pour les lignes 11 à 16 (**Fig. 42**), est très semblable à celle des sections des lignes 6 à 10 (**Fig. 41**). Le domaine résistif (**V**), relié aux sédiments de plage, devient plus évident et résistif du côté Est du ruisseau comme en témoigne les valeurs de résistivité électrique plus élevées observées entre 0 et 25m sur les sections des lignes 15 et 16 (**Fig. 42**). Ceci pourrait réfleter un épaississement de l'unité de sédiments de plage dans cette partie du littoral qui est affectée par une dynamique sédimentaire plus complexe en raison de l'apport de sédiments en provenance du ruisseau, qui au printemps, ressemble plus à une rivière.

Les forages 6 et 7 ont interceptés l'unité de sédiments de plage à la profondeur indiquée par la position du contact de l'unité **V** sur les sections des lignes 12 et 13 (**Fig. 42**). L'unité argilo-silteuse a aussi été interceptée par les forages 6 et 7 à une profondeur correspondante à celle suggérée par la position de l'unité géoélectrique **IV** sur les sections correspondantes. Dans ces deux forages, le socle rocheux a été intersecté dans une zone de transition entre les unités **II** et **III**.


Figure 42. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 11 à 16 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes audessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m. Les traces des sondages géotechniques des forages 6 et 7 sont indiquées sur les sections des lignes 12 et 13.

Secteur des lignes 16 à 21

Les lignes 16 à 21 sont localisées dans la partie Est de la plage de l'Anse-aux-Coques et se terminent au début de la zone de transition menant vers la Pointeaux-Bouleaux. La **figure 43** montre une remontée du socle rocheux à partir de la ligne 21. Dans l'ensemble, les sections des lignes 16 à 21 ressemblent beaucoup à celles des lignes 11 à 16 (**Fig. 42**). La subdivision de l'unité **IV** (sédiments argilo-silteux marins) en sous-unités **IVa** et **IVb** semble plus sytématique sur ces sections de la partie Est de la plage.



Figure 43. Imagerie tomographique géoélectrique des lignes 16 à 21 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Inversion des données de résistivité électrique apparente à partir du logiciel Zondres2d. Notez que pour améliorer la discrimination des unités sédimentaires présentes au-dessus du socle rocheux l'échelle des valeurs de résistivité électrique est limitée à 100 Ohm-m.

3.3 Mesures sismiques (méthode des ratios spectraux H/V)

Lors des travaux de géophysique, réalisés à Ste-Luce-sur-Mer à la fin de 2016, les conditions de mer et la violence des vents de tempête ne permettaient pas la réalisation de levés classiques de sismique réfraction car le bruit sismique occasionné par les vaques déferlantes était beaucoup trop fort. Conséquemment, l'équipe de terrain, en concertation avec la Commission géologique du Canada, a optée pour la réalisation d'un levé sismigue utilisant le bruit naturel ambiant. L'utilisation de la méthode des ratios spectraux H/V était une possibilité qui méritait d'être vérifiée sur le terrain et plus spécifiquement en bordure de mer ou le bruit est omniprésent.

La localisation des stations de mesure des ratios spectraux H/V, mesurées à l'aide de tromographes Tromino, est indiquée sur la **figure 44**. Ces stations sont numérotées de For1 à For7 pour ce qui est des mesures provenant de sites de forages (Forages 1 à 7). Les stations Trom8 à Trom16, situées plus à l'Est, ne sont pas associées à des sites de forage.



Figure 44. Plan de localisation des stations du levé sismique (ratios spectraux H/V). Les stations For1 à For7 correspondent aux sites des forages géotechniques 1 à 7. Les stations Trom8 à Trom16 sont des stations de mesure sans forage.

Avant d'interpréter les données acquises par les sismomètres triaxiaux, il est nécessaire de visualiser les données des amplitudes des spectres de Fourier pour les trois orientations mesurées (deux horizontales (Nord-Sud et Est-Ouest et une verticale (Z)). L'examen des courbes, des stations de mesure sur les sites des forages 1 à 7, montre un excellent couplage entre les courbes des amplitudes des spectres de Fourier pour les orientations nord-sud et est-ouest (**Fig. 45**). Ceci démontre une cohérence dans les données de vibration du terrain dans le plan horizontal ainsi qu'un bon nivellement du tromographe pendant les différentes périodes de mesure sur la plage. Le minimum observé sur la courbe de vibration de l'axe vertical (valeurs inférieures à celles des composantes N-S et E-O) est relié à la présence d'un contact stratigraphique et probablement au contact entre le socle rocheux et les sédiments argilo-silteux marins. Notez que les maximums des courbes de vibration N-S, E-O et verticale sont situés vers de hautes fréquences pour le site du forage 1. Ceci reflète la très faible épaisseur de sédiments à cet endroit (2,4 m).



Figure 45. Amplitudes des spectres de Fourier pour les mesures de vibration dans le plan horizontal (Nord-Sud et Est-Ouest) et à la verticale (Z). Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure situées sur les sites des forages 1 à 7.

Les données des ratios spectraux H/V, calculés pour les stations de mesure correspondantes aux sites des forages 1 à 7, sont présentées à la **figure 46** et celles pour les stations Trom8 à Trom16 aux **figures 47** et **48**. Les courbes de distribution indiquent des données de qualité car l'étalement des données par rapport à la moyenne est faible. De plus, la fréquence de résonnance du terrain augmente rapidement avec la diminution de l'épaisseur de sédiments au-dessus du socle rocheux. Par exemple, la fréquence de résonnance de la plage est 22,03 Hz au site de forage 1. Sur ce site, l'épaisseur de sédiments n'est que de 2,4 m. A l' opposé, pour le forage 4a, ou l'épaisseur de sédiments atteint 15,7 m, la fréquence de résonnance n'est que de 3,91 Hz. À priori, cette observation s'explique par la simple relation :

$$F_0 = V_S / 4H$$

ou V_S : vitesse des ondes de cisaillement H : épaisseur de la couche superficielle



Figure 46. Ratios spectraux H/V pour les mesures de vibration mesurées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure situées sur les sites des forages 1 à 7. Le pic maximal sur ce type de diagramme correspond à la fréquence de résonnance du terrain.



Figure 47. Ratios spectraux H/V et amplitudes des spectres de Fourier pour les mesures de vibration mesurées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure des sites TROM8 à TROM12. Le pic maximal sur ce type de diagramme correspond à la fréquence de résonnance du terrain.



Figure 48. Ratios spectraux H/V et amplitudes des spectres de Fourier pour les mesures de vibration mesurées sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Les courbes ont été calculées pour les stations de mesure TROM13 à TROM16 situées à l'extrémité Est du périmètre du levé géophysique. Le pic maximal sur ce type de diagramme correspond à la fréquence de résonnance du terrain. Notez l'augmentation progressive de la fréquence de résonnance en se dirigeant vers l'Est.

A partir de relation profondeur (indiquée par forage) vs fréquence de vibration (mesurée au tromographe), il est possible d'inférer l'épaisseur de dépôts meubles au-dessus du roc à partir des données de rapports spectraux H/V. Ceci est évident pour un cas simple ou une unité homogène repose sur un socle rocheux. Même si la stratigraphie de la plage de Ste-Luce-sur-Mer est plus complexe, la relation entre fréquence de résonnance et épaisseur de dépôts meubles est évidente. La **figure 49** montre bien une anticorrélation entre la fréquence de résonnance mesurée sur la plage et l'épaisseur des sédiments mesurée par les forages géotechniques sur les sites For1 à For7. La **figure 50** montre les données de résonnance mesurées sur la plage en fonction de la position des stations selon un axe E-O indiqué par la position utm-E (Nad 83

zone 19) des stations de mesure sur la plage. Cette figure montre bien l'augmentation des fréquences de résonance vers l'Ouest lorsque la plage disparait progressivement et à l'opposé, de faibles valeurs de fréquence de résonnance dans les parties centrale et Est de la plage, en fonction d'une épaisseur considérable de sédiments présents au-dessus du socle rocheux. Les dernières stations situées du côté Est de la plage indiquent une augmentation progressive des fréquences de résonnance en raison d'une remontée progressive du socle rocheux en direction de la Pointe-aux-Bouleaux (**Fig. 50**).



Figure 49. Variations de la fréquence de résonnance et de la profondeur au socle rocheux mesurées aux sites de forages 1 à 7 de la plage de Ste-Luce-sur-Mer.



Figure 50. Variations de la fréquence de résonnance en fonction de la coordonnée utm-E (Nad 83). Notez la forte augmentation de la fréquence de résonnance vers l'ouest de la plage en direction de la Pointe-aux-Coques.

Les résultats de l'étude de Ste-Luce-sur-Mer démontrent que le milieu est de type multi-couche stratifié avec en dessous des sédiments argilo-silteux et audessus un mince couche de sédiments de plage constituée de sables, graviers et galets. Dans ce cas, la relation profondeur au socle rocheux vs fréquence de résonnance demeure valide mais peut se voire compliquée par la présence de deux unités stratigraphiques avec des valeurs propres d'impédance acoustique. En plus de ce paramètre, qui est fonction de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement S et de la densité des matériaux, l'épaisseur des unités sédimentaires varie le long de la plage de Ste-Luce-sur-Mer. En l'absence de données de vitesse de propagation des ondes S à Ste-Luce-sur-Mer, il n'est pas possible de produire un modèle d'inversion réaliste permettant d'évaluer l'épaisseur des différentes unités sédimentaires présentes au-dessus du roc. Malgré ce constat, il est intéressant de souligner que la méthode des rapports spectraux H/V peut être utilisée pour cartographier rapidement les plages en identifiant les zones à haute fréquence de résonnance comme étant constituées d'une faible épaisseur de sédiments et celles montrant de basses fréquences de résonnance comme étant constituées de fortes épaisseurs de sédiments. Les relations observées sur le site de Ste-Luce-sur-Mer sont robustes et convaincantes. La mesure ou l'estimation de la vélocité de propagation des ondes S sur cette plage permettrait d'inverser les données afin d'obtenir des modèles de variation d'épaisseur des unités sédimentaires (sédiments argilosilteux marins et sédiments de plage).

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce rapport montre le fort potentiel des méthodes géoélectriques, réalisées en mode d'imagerie tomographique de haute résolution, pour l'étude des milieux côtiers marins au Bas St-Laurent. Ce constat a été rendu possible grâce à une validation rigoureuse à l'aide de forages géotechniques réalisés sur la plage de Ste-Luce-sur-Mer. L'étude confirme la présence d'une unité argilo-silteuse présente sous la plage de Ste-Luce-sur-Mer. Cette unité varie en épaisseur de 0 à 13 m et son épaisseur maximale a été observée dans la partie centrale du périmètre du levé (forage 4b). L'épaisseur de sédiments de plage (sables, graviers et galets) est plus importante dans la partie ouest (3,1 à 3,7m : forages 2, 3 et 4) de la plage que dans la partie centrale (1.8 à 2.2 m : forages 5, 6 et 7). Ceci résulte probablement du transfert de matériaux de rechargement de plage au-dessus de la plage naturelle. L'imagerie tomographique géoélectrique a permis de produire 18 sections 2D de 160 m de longueur. Ces sections, orientées perpendiculairement à la côte, montrent la présence de cinq unités géolectriques associées au socle rocheux sain, à des roches variablement altérées en contact avec des sédiments argilo-silteux de la mer de Goldthwait et finalement à des sédiments de la plage actuelle de Ste-Luce-sur-Mer. Les mesures sismiques, réalisées en mode station fixe à l'aide de tromographes (sismomètre triaxiaux), sont de très bonnes qualités et ce malgré les conditions de forts vents et vagues lors des mesures sur la plage. Les fréquences de résonnance mesurées sont fortement anticorrélées à l'épaisseur de sédiments présents au-dessus du socle rocheux. Nos travaux démontrent que la méthode sismique, des ratios spectraux H/V, est une alternative intéressante pour évaluer la variation d'épaisseur de sédiments marins au-dessus du socle rocheux. De plus, les données de résonnance mesurées sont pertinentes pour l'élaboration de directives en matière de construction aux normes antisismiques. Les ingénieurs, responsables de construction de structures de protection lourdes contre la mer, devraient porter une attention particulière à ce type de données car le secteur de Ste-Luce-sur-Mer est situé entre deux zones séismiques (Charlevoix-Kamouraska et Matane). Afin d'éviter le phénomène d'amplification sismique, les structures de protection lourdes devraient avoir des fréquences de résonnance différentes de celles mesurées sur le littoral. Ce constat s'applique également pour les autres constructions et infrastructures présentes en bordure de mer.

Dans un contexte d'études et éventuellement d'interventions en génie côtier en Gaspésie et sur la Côte Nord du Québec, nous croyons que les interventions de terrain devraient inclure un volet de géologie, géophysique et géotechnique côtière. L'érosion implique des processus nécessairement volumiques et une approche surfacique ne peut permettre d'établir un portrait juste du volume sédimentaire disponible en un lieu donné. En l'absence d'informations bi et tridimensionnelles (ex. profondeur), il devient difficile d'élaborer des modèles prédictifs d'évolution du littoral sur le long terme. En plus des processus d'érosion, relié à l'effet des vaques et des courants marins, la côte est affectée par des processus géologiques et géomorphologiques terrestres créant des

instabilités comme des glissements de terrain (argiles sensibles), des affaissements de terrain (reliés à la présence de milieux karstiques) ou des ruptures de falaises rocheuses. Ces instabilités potentielles peuvent être aggravées par des secousses séismiques. La compréhension et l'évaluation de ces processus géologiques, affectant le milieu côtier, nécessitent une approche géologique, géophysique et géotechnique appropriée.

Marc Richer-LaFlèche, Ph.D., geo Professeur-chercheur

INRS Centre Eau Terre et Environnement 490 rue de la Couronne Ville de Québec Cell. 418-473-2046 marc.richer-lafleche@ete.inrs.ca

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bard P.-Y., 1999, Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?: The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, eds. K. Irikura, K. Kudo, H. Okada and T. Sasatani (Balkema, Rotterdam), pp. 1251–1279.

Bard, P.-Y., 2008. The H/V technique: capabilities and limitations based on the results of the sesame project. Bulletin of Earthquake Engineering, 6(1):1–2, doi:10.1007/s10518-008-9059-4.

Brûlé, S. et Javelaud, E., 2013. Méthode H/V en géotechnique. Application à un modèle bi-couche. Revue française de géotechnique, No 142, pp 1-13.

D'Amico V.; Picozzi M.; Baliva F. and Albarello D., 2008. Ambient Noise Measurements for Preliminary Site-Effects Characterization in the Urban Area of Florence: Bull.Seism.Soc.Am., v98; n3, 1373–1388.

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 géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, Bulletin de recherche no 185, ISSN 1713-7667, 47 pages.

Graizer, V., 2009. Low-velocity zone and topography as a source of site amplification effect on Tarzana hill, California. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 29, no. 2, pp. 324-332.

Locat, J., 1977. L'émersion des terres dans la région de Baie-des-Sables/Trois-Pistoles, Québec. Géogr. Phys. Quat., vol. XXXI, Nos 3-4, 297-306.

Long, B., & Xhardé, R., 2014. Rapport des visites de plage en août et septembre 2013. Rapport d'étape pour le Ministère de la Sécurité Publique, 39 pp. + annexes.

Genivar, 2012. Analyse de solutions en érosion côtière à l'anse aux Coques, Sainte-Luce. Rapport de GENIVAR inc. à la municipalité de Sainte-Luce. 131 p. et annexes.

Hétu, B., 1990. « Le Quaternaire du Bas-Saint-Laurent. » L'est du Québec : études géographiques. Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Module de géographie, 1990. p. 21-35.

Kudo, K., 1995. Practical estimates of sites response. State-of-art report. In 5th International Conference on Seismic Zonation, volume III, pages 1875–1907, Nice, France, October 17-19, 1995.

Kramer S.L., 1996. Geotechnical Earthquake Engineering: Prentice Hall, New York, 653 pp.

Naudet, V., 2004. Les méthodes de résistivité électrique et de potentiel spontané appliquées aux sites contaminés. Géophysique. Thèse de doctorat, Université de droit, d'économie et des sciences - Aix-Marseille III, 203 pages.

Ropars, Y. (2013). Protection de la berge - Sainte-Luce, Québec. Québec, Canada: rapport technique, Consultants Ropars Inc., 49 pages.

Savage, W. Z., 2004. An Exact Solution for Effects of Topography on Free Rayleigh Waves. Bulletin of the Seismological Society of America, 94, 1706–1727.

SESAME, 2004, Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: SESAME, European project, WP12, Deliverable D23.12, [http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/Papers/HV_User_Guidelines.pdf]

Annexe 1

Journaux des sondages 1 à 7















