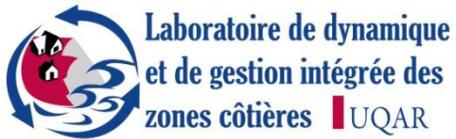


Analyse historique et récente de l'érosion du talus côtier, secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean

Présenté au ministère des Transports du Québec

Sous la direction de
Pascal Bernatchez, Ph.D.

Janvier 2013



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Direction et rédaction

Pascal Bernatchez, Ph.D. Géomorphologie côtière et télédétection
Responsable du projet
Professeur titulaire de la Chaire du Québec en géoscience côtière
Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières (LDGIZC)
Département de biologie, chimie et géographie
Université du Québec à Rimouski
Courriel : pascal_bernatchez@uqar.qc.ca

Recherche, analyse et rédaction

Geneviève B. Brossard, M.Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

Traitement des données Lidar

Stéphanie Van-Wiersts, M.Sc., professionnelle de recherche, LDGIZC, UQAR

REMERCIEMENTS

L'équipe de recherche tient à remercier Marie-Hélène Grenon de la direction régionale du ministère des Transports du Québec pour l'accès aux bases de données numériques.

RÉFÉRENCE COMPLÈTE

Boucher-Brossard, G. et Bernatchez, P. 2013. *Analyse historique et récente de l'érosion du talus côtier, secteur des Cayes, municipalité de Rivière-Saint-Jean, Côte-Nord*. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au ministère des Transports du Québec, Direction de la Côte-Nord, 37 p.

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE RÉALISATION	ii
RÉFÉRENCE COMPLÈTE	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES ABBRÉVIATIONS	vii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Mise en contexte du mandat et objectifs	1
1.2 Localisation de la zone d'étude	1
2. MÉTHODOLOGIE	4
2.1 Évolution historique du trait de côte par photo-interprétation	4
2.1.1 Intégration des photographies aériennes dans un système d'information géographique...4	
2.1.2 Numérisation des traits de côte	4
2.1.3 Calcul des taux de déplacement historiques	5
2.2 Évolution récente du trait de côte par technologie Lidar	6
2.2.1 Levé Lidar terrestre	6
2.2.2 Levé Lidar aéroporté	7
2.2.3 Numérisation des limites géomorphologiques et calcul des taux de déplacement	7
2.3 Évolution annuelle récente par les bornes de mesure	8
2.4 Caractérisation des faciès sédimentaires	8
2.5 Caractérisation de la dynamique littorale et identification des processus d'érosion	9
2.6 Scénario d'évolution	9
3. DESCRIPTION DU TERRITOIRE	11
3.1 Contexte physique.....	11
3.2 Conditions marines.....	12
3.3 Conditions climatiques.....	12
4. ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE	13
4.1 Taux de déplacement historiques	13
4.2 Taux de déplacement récents.....	16

5. CONDITIONS LITHO-STRATIGRAPHIQUES, PROCESSUS ET MODES DE REcul.....	19
5.1 Secteur 1.....	19
5.2 Secteur 2.....	21
5.3 Secteur 3.....	23
6. SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION CÔTIÈRE.....	27
7. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION	32
RÉFÉRENCES.....	33
ANNEXE I : Précision du levé Lidar terrestre	36
ANNEXE II : Données numériques	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Localisation de la zone d'étude	2
Figure 2.	Caractéristiques de la côte. A) Type de côte et B) État de la côte en 2005	3
Figure 3.	Méthodologie employée pour le calcul des taux de déplacement.....	6
Figure 4.	Station de suivi de l'érosion.....	8
Figure 5.	Évolution côtière historique du secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean	14
Figure 6.	Taux de recul moyen par intervalle d'évolution côtière, secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean.....	15
Figure 7.	Évolution côtière récente du trait de côte mesurée par les bornes d'érosion, secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean	17
Figure 8.	Évolution côtière récente (2008-2012) du secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean	18
Figure 9.	Planche graphique – Secteur 1	20
Figure 10.	Cicatrice de décrochement superficiel	21
Figure 11.	Ruissellement en nappe.....	21
Figure 12.	Planche graphique – Secteur 2	22
Figure 13.	Alternance de lits sableux et silto-sableux à argileux dans l'unité prodeltaïque.....	23
Figure 14.	Ruissellement concentré à l'intérieur de l'unité prodeltaïque	23
Figure 15.	Érosion des cônes de coulées de sable sec par les vagues.....	23
Figure 16.	Planche graphique – Secteur 3	24
Figure 17.	Suffosion et ruissellement concentré	25
Figure 18.	Décrochement superficiel.....	25
Figure 19.	Suffosion, coulée de sable sec et cône de déjection.....	26
Figure 20.	Zone de résurgences et d'écoulement souterrain intense	26
Figure 21.	Coulée boueuse.....	26
Figure 22.	Scénario 1 : prédiction de l'évolution côtière pour l'horizon 2100	28
Figure 23.	Scénario 2 : prédiction de l'évolution côtière pour l'horizon 2100	29
Figure 24.	Scénario 3 : prédiction de l'évolution côtière pour l'horizon 2100	30
Figure 25.	Scénario 4 : prédiction de l'évolution côtière pour l'horizon 2100	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Sources d'erreurs liées à la photo-interprétation historique	5
Tableau 2. Marges d'erreur maximales applicables aux taux d'érosion (photographies aériennes)	5
Tableau 3. Sources d'erreurs liées à la photo-interprétation sur les levés Lidar	7
Tableau 4. Caractéristiques des stations de suivi de l'érosion en 2012	8
Tableau 5. Scénarios d'évolution côtière pour l'horizon 2100.....	10

LISTE DES ABBRÉVIATIONS

Identification des bornes	
<i>MIN</i>	Mingan
Litho-stratigraphie et substrat	
<i>ag</i>	argile
<i>s</i>	sable
<i>si</i>	silt
<i>r</i>	roc
Processus géomorphologiques	
<i>vg</i>	vagues
<i>cry</i>	cryoclastie
<i>rc</i>	ruissellement concentré
<i>css</i>	coulée de sable sec
<i>dess</i>	dessiccation
<i>ds</i>	décrochement superficiel
<i>cb</i>	coulée boueuse
<i>su</i>	suffosion

1. INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte du mandat et objectifs

À la suite des travaux sur la problématique de l'érosion côtière qui ont révélé un rapprochement rapide du talus côtier de certaines infrastructures routières, la direction régionale de la Côte-Nord du ministère des Transports du Québec a décidé de procéder au déplacement de la route 138 aux endroits les plus problématiques. Elle souhaite savoir si le tracé retenu, dans la région de Rivière Saint-Jean, est sécuritaire pour un horizon de 75 ans à la lumière des nouvelles données sur l'évolution historique et récente de la falaise dans ce secteur. À cette fin, le mandat prévoit :

- a) une analyse de l'évolution historique à long terme de la falaise (1949-2009) à partir de photographies aériennes;
- b) une analyse de l'évolution récente de la falaise à l'aide de données Lidar (2009-2012) et de bornes de mesure (2000-2012);
- c) la réalisation de coupes stratigraphiques du talus côtier;
- d) l'identification des processus d'érosion et des modes de recul de la falaise;
- e) une projection et une cartographie de l'évolution côtière pour l'horizon 2100.

1.2 Localisation de la zone d'étude

Le secteur à l'étude est localisé dans la municipalité de Rivière Saint-Jean, sur la moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent, soit à environ 160 km à l'est de Sept-Iles et à 60 km à l'ouest de Havre-Saint-Pierre (Figure 1). Plus précisément, le tracé proposé pour le déplacement de la route 138 se trouve dans le secteur des Cayes (anciennement Magpie), à 1 km à l'est du pont de la rivière Magpie. Selon les données récentes (mai 2012), ce tracé se situe à environ 215 m de la position actuelle du trait de côte et il en suit assez fidèlement le contour, qui est semi-circulaire et dont la face exposée est orientée du sud-sud-est (extrémité ouest) au sud-sud-ouest (extrémité est). Le tronçon à déplacer est d'une longueur de 1600 mètres mais la longueur du trait de côte correspondant est légèrement supérieure, soit de 1825 mètres. Ce trait de côte est en grande partie composé d'une falaise meuble, mais deux courts segments à l'extrémité ouest sont des falaises meubles à base rocheuse et un autre petit secteur est une terrasse de plage étroite dont l'arrière côte est une falaise meuble (Figure 2A). Près de 52% de la côte était vive et active en 2005, c'est-à-dire dénuée de végétation et soumise à l'érosion. Ce pourcentage a augmenté à 66% en 2012 en raison de la réactivation d'une portion de la falaise depuis 2009. Environ 13% est actuellement semi-végétalisée (contre 27% en 2005) et connaît une érosion modérée par rapport à la première catégorie. Il s'agit d'une portion de la falaise meuble et de la terrasse de plage. Finalement, 20% de la côte est végétalisée et l'érosion n'y est pas apparente. Cette catégorie est surtout composée des falaises meubles à base rocheuse (Figure 2B).

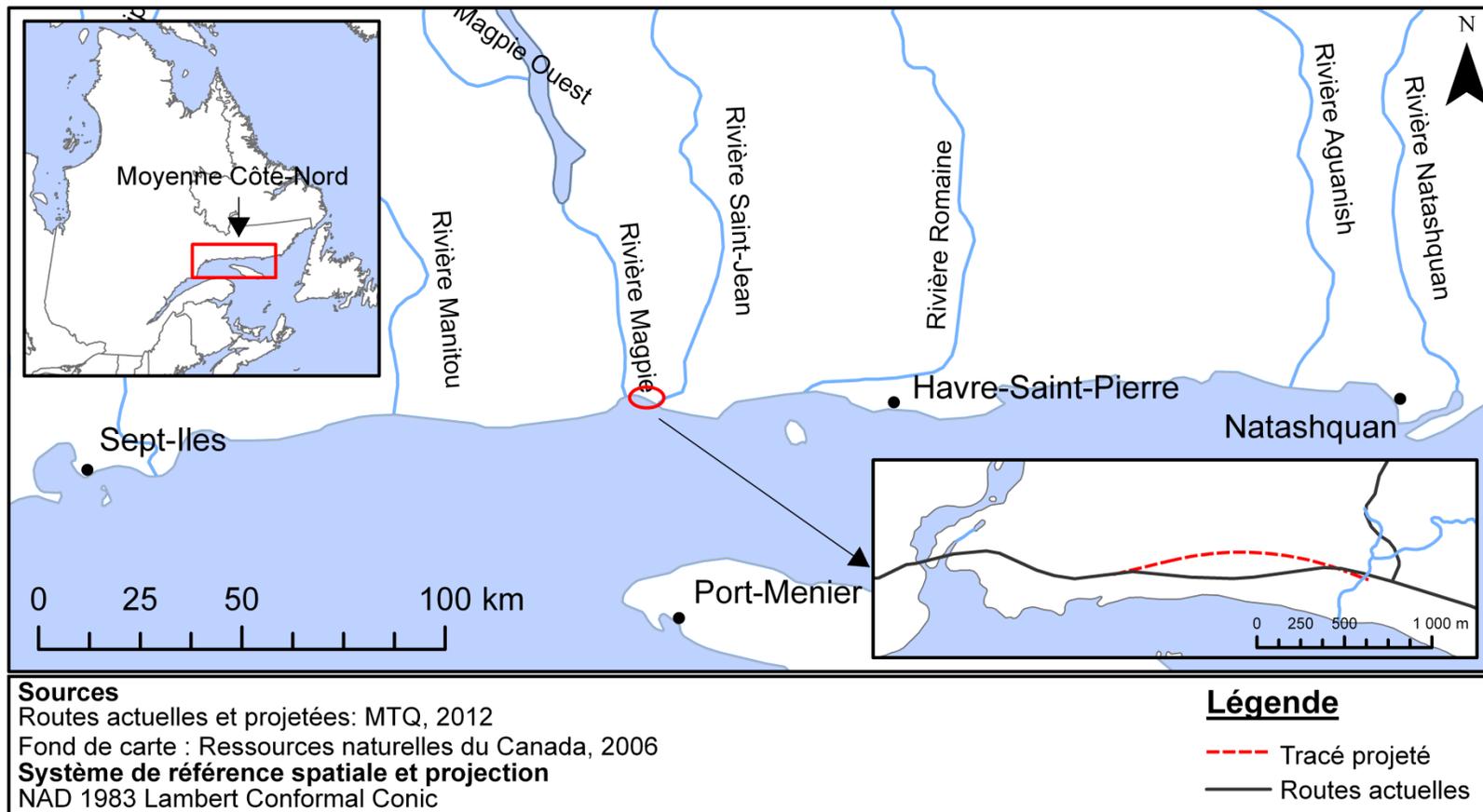


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

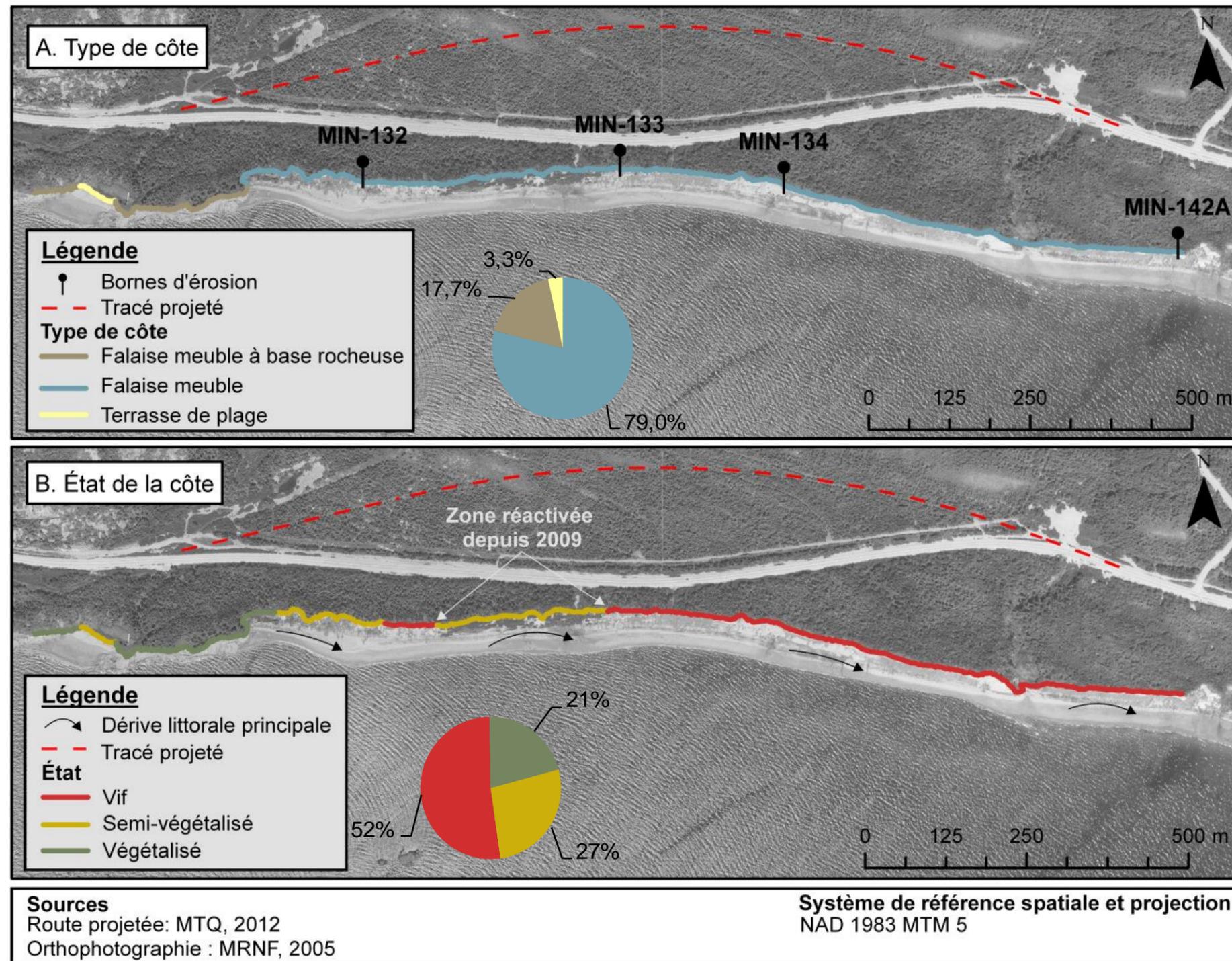


Figure 2. Caractéristiques de la côte. A) Type de côte et B) État de la côte en 2005

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Évolution historique du trait de côte par photo-interprétation

2.1.1 Intégration des photographies aériennes dans un système d'information géographique

L'évolution historique de la falaise a été réalisée à partir de quatre couvertures de photographies aériennes : 1949 (1 : 40 000), 1976 (1 : 15 000), 2005 (1 : 20 000) et 2009 (résolution de 0,10m au sol). Les photographies acquises en 2009 sont particulières car elles couvrent le corridor routier de la route 138 sur une bande de 125 m de large. Par conséquent, la falaise à l'étude n'est pas entièrement couverte mais les sections où la route est le plus à risque le sont.

Les photographies aériennes de 2005 ont été numérisées, géoréférencées et orthorectifiées par le ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRNF). La dimension du pixel au sol est équivalente à 0,28 mètre. Les photographies de 2009 sont également des orthophotographies qui nous ont été fournies par le ministère des Transports du Québec. Elles ont des pixels d'une résolution correspondant à 0,10 mètre au sol. Les photographies antérieures (1949 et 1976) ont été numérisées à une résolution de 600 dpi et ensuite géoréférencées dans le logiciel ArcGIS (version 9.3.1) à partir de la série de 2005. Pour cette opération, le maximum de points de contrôle communs aux deux photographies et situés à proximité du rivage ont été utilisés. Dans la mesure du possible, seule la partie centrale des photographies aériennes a été conservée afin de réduire au maximum la distorsion radiale.

2.1.2 Numérisation des traits de côte

Les traits de côte ont été tracés sur chaque série de photographies aériennes. Dans le cas des falaises littorales, il s'agit de la rupture de pente du haut de la falaise. Cette opération est sujette à plusieurs imprécisions et l'erreur associée à la position des traits de côte est généralement d'environ 10 mètres dans la plupart des études (Corwell *et al.*, 1991; Fletcher *et al.*, 2003; Thieler et Danforth, 1994). Cette marge d'erreur est souvent associée à la largeur du « trait de crayon » qui est fonction de l'échelle des photographies aériennes utilisées. Par ailleurs, l'utilisation des systèmes d'informations géographiques et d'un pointeur numérique d'une largeur de 0,001mm permet d'éliminer ce biais et de ramener l'erreur totale à moins de 5 mètres (Bernatchez, 2003; Dubois *et al.*, 2006; Pye et Blott, 2006). Une erreur plus importante serait alors principalement causée par la qualité et le traitement de l'image originale, ce qui est relativement fréquent avec les anciennes photographies aériennes (Jolicoeur et O'Carroll, 2007; Moore, 2000).

Afin d'améliorer la précision liée au positionnement des traits de côte, certaines techniques ont été adoptées. D'abord, la numérisation sur la partie centrale des photographies réduit l'erreur associée à la déformation de l'image. De plus, la grande résolution des orthophotographies de 2005 et 2009 ainsi que la numérisation à haute résolution des photographies aériennes de 1949 et 1976 a permis d'effectuer le traçage des traits de côte à l'échelle de 1 : 600. Finalement, le traçage à l'écran a été validé simultanément par stéréoscopie lorsque nous possédions les photographies sous format papier. Cela permettait de préciser la position de la rupture de pente au sommet de la falaise.

L'erreur maximale théorique se calcule en additionnant trois sources d'erreur (Tableau 1): a) une erreur reliée à la résolution des images, b) une erreur d'interprétation lors du traçage du trait de côte et c) une erreur de géoréférencement relative entre chaque série de photographies aériennes. Entre 2005 et 2009, cette dernière source d'erreur a été complètement éliminée en

corrigeant manuellement les taux à chaque point de mesure (voir section 2.1.3). Voici un exemple de calcul pour l'intervalle 1949-2009 :

Erreur maximale théorique = a) 1,93 + 0,10 + b) 2,00 + 0,15 + c) 1,88 = 6,06

Tableau 1. Sources d'erreurs liées à la photo-interprétation historique

Année	Sources d'erreurs (m)			
	Résolution image	Interprétation	Géoréférencement	
1949	1,93	2,00	1976:	1,88
			2005:	2,20
			2009:	1,88
1976	0,39	0,30	2005:	1,48
			2009:	1,24
2005	0,28	0,25	2009:	0,00
2009	0,10	0,15		

Pour déterminer l'erreur maximale qui peut s'appliquer directement aux taux de déplacement annuels, il faut utiliser l'erreur maximale théorique associée aux couvertures utilisées et la diviser par l'intervalle de temps entre ces couvertures (Tableau 2). Mentionnons qu'il s'agit de l'erreur maximale théorique et donc que l'erreur réelle mesurée est inférieure à cette valeur.

Tableau 2. Marges d'erreur maximales applicables aux taux d'érosion (photographies aériennes)

Année	1949	1976	2005	2009
1949		0,24	0,12	0,10
1976			0,09	0,07
2005				0,20
2009				

2.1.3 Calcul des taux de déplacement historiques

Les taux de déplacement moyens annuels ont été obtenus à l'aide de l'extension DSAS 2.0 du logiciel ArcGIS (Thieler *et al.*, 2003). Ce module génère automatiquement des transects perpendiculaires aux traits de côte, à un intervalle régulier (de 25 mètres dans cette étude), ce qui permet de mesurer l'écart entre les années (Figure 3). Les taux d'érosion sont calculés à partir de la méthode « end point rate » (Dolan *et al.*, 1991). Il s'agit de prendre la distance totale du recul de la côte et de la diviser par le temps entre les mesures. Ces taux ont été calculés pour chaque série successive de photographies et entre la plus ancienne et la plus récente afin de déterminer un taux de déplacement historique moyen. Afin d'assurer une cohérence des taux obtenus et de pouvoir les comparer entre les années, la position des transects est restée inchangée entre les analyses. Par contre, tous les transects ont été préalablement validés et légèrement déplacés pour qu'ils soient toujours perpendiculaires au trait de côte. Ainsi, soixante-treize transects ont été générés pour quantifier le déplacement du trait de côte du secteur des Cayes, à Rivière Saint-Jean. Par contre, cinq transects ont été annulés, soit parce qu'il n'était pas possible de les positionner de manière perpendiculaire au trait de côte ou encore en raison de la

présence d'un ravin. De plus, puisque la couverture des photographies aériennes de 2009 était incomplète, seuls 44 transects ont été conservés pour l'analyse.

Les taux obtenus de manière automatisée ont ensuite été validés manuellement pour l'intervalle 2005-2009 afin de tenir compte d'éventuels décalages provoqués par le géoréférencement des photographies aériennes. Pour ce faire, des points de repère communs aux deux séries de photographies et localisés près de la côte ont été identifiés. Lorsqu'une erreur de déplacement était mesurée dans l'axe perpendiculaire au trait de côte, elle était directement appliquée aux taux d'érosion. Il n'a pas été possible d'utiliser cette technique pour les photographies plus anciennes car la résolution et la qualité générale des documents ne permettaient pas d'identifier un nombre suffisant de points de repère précis, à proximité de la côte et communs aux différentes années. Quelques repères étaient toutefois présents, ce qui a permis de déterminer une erreur de géoréférencement pour les autres combinaisons d'intervalles d'évolution côtière (voir Tableau 1).

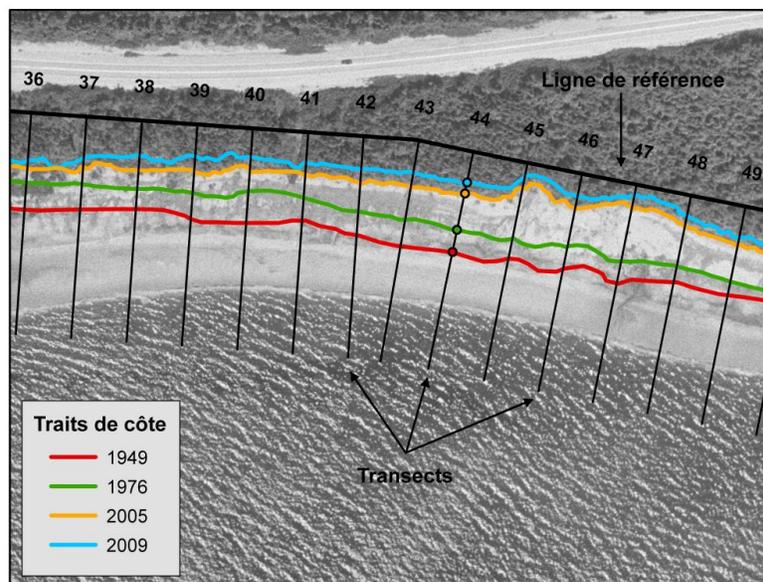


Figure 3. Méthodologie employée pour le calcul des taux de déplacement

2.2 Évolution récente du trait de côte par technologie Lidar

2.2.1 Levé Lidar terrestre

Un levé Lidar terrestre a été réalisé le 7 mai 2012 par l'équipe de la Chaire de recherche en géoscience côtière de l'UQAR dans la région concernée. Ce levé a été produit directement à partir de la plage pendant la marée basse lors de la période des marées de vives-eaux. Il couvre l'ensemble du haut estran, du haut de plage et de la falaise jusqu'au début de la falaise à base rocheuse à l'ouest du segment étudié. L'ensemble des méthodes d'acquisition et de traitement de données ont été décrites dans un rapport remis précédemment au ministère des Transports du Québec (Bernatchez *et al.*, 2012a).

La densité des nuages de points obtenus par le levé Lidar est d'un point à tous les 0,20 mètre. Afin de vérifier la précision du géoréférencement de ces nuages, des points de contrôle sont acquis simultanément au D-GPS. Un total de 16 points de contrôle ont été relevés en mai 2012.

Chacun des points de contrôle a été comparé verticalement (Z) et horizontalement (XY) avec les points correspondants sur le nuage de points Lidar. L'ensemble des résultats est présenté à l'Annexe I. Lorsqu'aucun point Lidar ne correspondait à un point de contrôle, l'abréviation *nd* est indiquée dans le tableau présenté à l'Annexe I. Selon ces résultats, l'erreur moyenne en Z est de 0,002m et le RMS de 0,01m. Pour la précision en XY, l'erreur moyenne est de 0,04m et le RMS est de 0,02 m.

2.2.2 Levé Lidar aéroporté

Le ministère des Transports du Québec a fourni une couverture Lidar aéroportée acquise en novembre 2008 dont la densité est d'un point à tous les mètres. Ce levé est d'une précision planimétrique de 25 centimètres et altimétrique de 30 centimètres. Une matrice d'élévation et une matrice d'ombrage ont été générées à partir de ces données pour faciliter l'interprétation. Une image de synthèse a également été produite, laquelle représente les textures « visibles » (apparence s'approchant d'une photographie noir et blanc) du paysage. L'estran, le haut de plage, la falaise et l'arrière-côte ont été couverts par ce levé.

2.2.3 Numérisation des limites géomorphologiques et calcul des taux de déplacement

Le trait de côte et la ligne de rivage ont été tracés sur chaque levé Lidar. Tel qu'expliqué au point 2.1.2, le trait de côte correspond à la rupture de pente dans le haut de la falaise. Dans le cas de la ligne de rivage, il s'agit plutôt de la base de la falaise. Deux techniques différentes ont été utilisées selon la méthode d'acquisition (terrestre ou aéroportée). Dans le cas des levés terrestres, les limites géomorphologiques ont été tracées à partir de la topographie 3-D et de la vidéographie dans le logiciel Trident 4.7 qui permet de créer des fichiers d'édition transformables en fichiers compatibles au logiciel ArcGIS (version 9.3.1). La numérisation du trait de côte et de la ligne de rivage du levé aéroporté a été réalisée dans le logiciel ArcGIS à partir des matrices d'élévation et d'ombrage ainsi qu'avec l'image de synthèse.

Les imprécisions liées à la position des traits de côte et des lignes de rivage sont les mêmes que pour la photo-interprétation, mais elles sont nettement inférieures en termes d'absolu. En effet, l'erreur de géoréférencement est grandement réduite par le recours à la technologie Lidar. L'erreur liée à la résolution est également minimale puisque les données sont très denses. Seule l'erreur d'interprétation est similaire à celle des photographies aériennes (Tableau 3). Par contre, puisqu'il n'y a pas beaucoup d'années entre les mesures, l'erreur maximale sur les taux obtenus reste grande. Ainsi, l'erreur maximale théorique pour le taux de recul entre 2008 et 2012 est de 0,47 m.

Tableau 3. Sources d'erreurs liées à la photo-interprétation sur les levés Lidar

Année	Sources d'erreurs (m)			Erreur totale maximale
	Résolution image	Géoréférencement	Interprétation	
2008	0,50	0,25	0,50	1,25
2012	0,10	0,04	0,50	0,64

Le calcul des taux de déplacement a été réalisé de la même manière qu'avec les photographies aériennes, conformément à ce qui est expliqué à la sous-section 2.1.3. Au total, soixante transects ont été générés et ils ont tous été utilisés pour l'analyse.

2.3 Évolution annuelle récente par les bornes de mesure

Le déplacement récent du trait de côte a également été mesuré directement sur le terrain à partir du réseau de stations de suivi de l'érosion du Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières de l'UQAR (LDGIZC). Le secteur à l'étude en contient quatre. Leur localisation est présentée à la Figure 2B. Il s'agit de piquets d'arpentage géoréférencés et positionnés au sommet des falaises. Ils ont été implantés à l'été 2000. La distance perpendiculaire entre ces bornes et le trait de côte a été mesurée annuellement depuis l'implantation par des membres de l'équipe du LDGIZC, sauf en 2003. Ces mesures ont été prises à l'aide d'un gallon d'arpentage millimétrique. Elles permettent de mesurer le recul du trait de côte avec une marge d'erreur maximale de 10 centimètres.



Figure 4. Station de suivi de l'érosion

La visite annuelle des stations de mesure permet finalement d'acquérir des informations additionnelles sur le milieu telles que l'état de la côte, sa hauteur, sa litho-stratigraphie, la largeur et la granulométrie de la plage, les processus géomorphologiques actifs ou toute autre information pertinente. Ces informations sont présentées au Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques des stations de suivi de l'érosion en 2012

Borne	Hauteur falaise (m)	Stratigraphie	État de la côte	Processus actifs	Haut de plage (m)	Haut estran (m)	Largeur de plage (m)	Substrat de la plage
MIN-132	17,00	s/si/r	semi-végétalisée	vg-su-ds	14,00 Non-végétalisé	22,00	36,00	s
MIN-133	20,00	s/si	vive	su-css-cry-vg	-	18,00	18,00	s
MIN-134	20,50	s/si	vive	css-su-cry-vg	-	23,00	23,00	s
MIN-142A	23,50	s/si	vive	cry-dess-su-cb-vg-rc	-	32,00	32,00	s

2.4 Caractérisation des faciès sédimentaires

La caractérisation des faciès, de la stratigraphie et des structures sédimentaires a été effectuée à partir de coupes naturelles le long de la falaise vive pour le secteur à l'est des écueils rocheux (donc pour l'ensemble de la falaise meuble, voir Figure 2A). Des coupes stratigraphiques types ont été réalisées afin d'identifier la séquence, le milieu et le mode de mise en place des sédiments au cours de l'Holocène. En laboratoire, les levés Lidar terrestres ont été utilisés pour

préciser la topographie et l'épaisseur des différents dépôts observés sur le terrain lors d'une campagne de terrain réalisée du 23 au 25 octobre 2012.

2.5 Caractérisation de la dynamique littorale et identification des processus d'érosion

Les campagnes de terrain réalisées dans cette région depuis 2000 ainsi que l'utilisation de photographies aériennes multidates ont permis de diagnostiquer la dynamique sédimentaire générale et les processus géomorphologiques responsables du recul de la falaise à travers les diverses formes observées. De plus, la caractérisation de la litho-stratigraphie donne une information supplémentaire quant à la possibilité des différents processus de s'opérer et quant aux modes de recul de la falaise.

2.6 Scénario d'évolution

Une projection et une cartographie de l'évolution côtière ont été réalisées pour l'horizon 2100 à partir de 4 scénarios envisageables avec les données recueillies ainsi qu'en fonction de la compréhension de la dynamique côtière et des scénarios climatiques projetés (Bernatchez *et al.*, 2008; Bernatchez *et al.*, 2012b). Ces scénarios sont résumés au Tableau 5. Le premier scénario est optimiste, c'est-à-dire qu'il assume que l'évolution future se fera au même rythme que l'évolution historique (1949-2009 ou 1949-2005). Le deuxième scénario implique une accélération des taux d'érosion conforme à la tendance historique mesurée entre 1949 et 2009 (+0,003m/an, voir section 4.1), ce qui correspond à une érosion moyenne de 0,52m/an entre 2009 et 2100. Ce scénario tient compte de la variabilité historique, tout en intégrant la recrudescence de l'érosion associée au réchauffement récent des températures (Bernatchez *et al.*, 2012b). Le troisième scénario envisage des températures plus chaudes et des précipitations plus abondantes, incluant des épisodes de pluies et de redoux hivernaux, similaires à ce qui a été observé durant la décennie 2000-2010 (Bernatchez, 2012c). Enfin, pour le quatrième scénario, la moyenne des taux mesurés annuellement entre 2000 et 2012 sur l'ensemble des bornes implantées sur la falaise haute à l'est de la rivière Magpie par le LDGIZC (9 bornes) a été utilisée. Cela permet de tenir compte des vitesses de recul plus rapides mesurées à l'est du secteur d'étude où les conditions océanographiques sont similaires. Cependant, même si la séquence stratigraphique est la même à l'est du secteur d'étude, l'épaisseur de l'unité sableuse est généralement plus importante et les processus hydrogéologiques y sont nettement plus intenses.

À chacun de ces scénarios s'ajoute une marge de sécurité calculée en fonction du recul maximum mesuré par le LDGIZC en un seul événement (nommé recul événementiel) pour une falaise localisée dans l'unité hydrosédimentaire de Mingan. La valeur enregistrée pour le type de côte « falaise meuble » a été utilisée puisque la majeure partie du secteur étudié est représentée par ce type de côte et que les courtes zones qui ne le sont pas au niveau de la ligne de rivage ont tout de même une arrière côte constituée d'une falaise meuble, inactive pour le moment, mais qui sera vraisemblablement réactivée avec une poursuite de l'érosion.

Les taux de recul probables associés aux différents scénarios ont été ajustés localement pour tenir compte à la fois de la nature et de l'état du trait de côte ainsi que du rythme actuel et passé d'évolution côtière qui varient le long de la côte. La différence en pourcentage du taux mesuré à chaque transect par rapport à la moyenne de l'ensemble des transects lors de l'évolution historique a donc servi à conserver les variations spatiales des taux d'érosion. Par contre, étant donné le caractère parfois épisodique de l'érosion lié aux processus géomorphologiques (par ex. les mouvements de terrain) qui peuvent engendrer une grande variabilité spatiale à petite échelle (en l'espace de quelques dizaines de mètres), les taux obtenus ont été régularisés avec un

lissage par moyenne mobile et ils ont ensuite été arrondis aux 5 mètres. Le lissage a été effectué en utilisant les taux mesurés de part et d'autre de chaque transect sur une longueur de 50 m, ce qui équivaut à deux transects de chaque côté plus le transect lui-même. Cette méthode a permis de combler les valeurs manquantes lorsque des transects ont été annulés. Finalement, le lissage a été réalisé uniquement avec les transects dont le type de côte était le même puisque cette variable a une influence trop grande sur les valeurs de recul pour que nous n'en tenions pas compte. À proximité des zones de transition, moins de 5 transects ont donc été utilisés. En résumé, voici la formule utilisée pour calculer les projections d'évolution côtière pour chaque transect :

Formule 1 :

Taux moyen du scénario * nombre d'année * [moyenne historique du transect/taux moyen historique du secteur] + recul événementiel

Tableau 5. Scénarios d'évolution côtière pour l'horizon 2100

Scénario	Description	Taux moyen (m/an)	Marge de sécurité (m)	Recul total Horizon 2100 (m)
1	Taux moyen historique du secteur (1949-2009)	0,27	15	20-60
2	Taux selon la tendance historique projetée jusqu'en 2100	0,52	15	25-105
3	Taux récent du secteur (2000-2012)	0,56	15	25-110
4	Taux récent des hautes falaises de Magpie (2000-2012)	0,87	15	35-165

3. DESCRIPTION DU TERRITOIRE

3.1 Contexte physique

Le secteur à l'étude est situé sur le complexe deltaïque exondé formé par la coalescence des deltas des rivières Magpie et Saint-Jean (Dubois, 1979). Ce complexe forme une plaine côtière large d'une dizaine de kilomètres en moyenne mais qui est plus étroite (4 à 6 kilomètres) à proximité de la rivière Magpie, soit dans la zone d'intérêt (Archambault, 2002). Elle est découpée par plusieurs terrasses d'origine marine ou fluviale se terminant par une falaise morte d'une hauteur comprise généralement entre 15 et 75m (Dubois, 1979; Dubois et Saint-Pierre, 1986). Le socle rocheux affleure aussi sporadiquement sur cette plaine, particulièrement de part et d'autre de l'estuaire de la rivière Magpie. La géologie de la région fait partie de la province géologique de Grenville et le substratum rocheux est surtout composé de mangérite (Sharma et Franconi, 1975).

La plaine côtière se termine abruptement dans le golfe du Saint-Laurent par une falaise de dépôts meubles d'une vingtaine de mètres. Une description détaillée de la litho-stratigraphie de la falaise sera présentée plus loin dans ce rapport, mais quelques travaux de description et de cartographie de la région ont déjà précisé la nature et la sensibilité des dépôts (Dubois, 1977; 1979; 1980; Dubois et St-Pierre, 1986). La base de la falaise est composée de silts sableux à argileux caractérisés comme hautement sensibles par Dubois (1977), alors que la partie sommitale est surtout composée de sable mais peut aussi contenir des lits de graviers et de galets. La cimentation de la partie supérieure de l'unité sableuse a permis le développement d'un ortstein (Dubois, 1979).

La sensibilité des silts-argileux a été documentée dans la région par plusieurs auteurs qui ont cartographié et analysé de nombreux glissements de terrain et coulées argileuses, qui sont considérés comme des événements catastrophiques et dans certains cas comme un mode de recul des falaises (Allard, 1980; Bachand, 2010; Brossard, 2012; Dubois, 1977; 1979). Le ravinement rapide des sables lorsque la carapace ferrugineuse (ortstein) est défoncée au rebord d'un talus est aussi constaté par Dubois (1977). Une étude récente dans la région a également permis de démontrer que les sables sont aussi sensibles à l'érosion par le biais de la suffosion, du moins sur la frange littorale où ce processus peut être responsable de la réactivation de la falaise. Il peut également permettre un recul continu du trait de côte et empêcher l'atteinte d'une pente à l'équilibre (Brossard, 2012).

L'impact du sapement basal par les vagues est peu documenté dans le secteur, mais Dubois (1980) considère que le recul de la falaise entre les rivières Magpie et Saint-Jean est une source sédimentaire importante qui vient alimenter la dérive littorale. Cela implique que les sédiments érodés de la falaise sont remaniés assez rapidement par les vagues. D'ailleurs, les sédiments du haut de plage et de l'estran sont légèrement graveleux et proviennent de la formation sommitale du delta qui affleure dans la falaise (Dubois, 1980), ce qui témoigne de ce transit sédimentaire. De plus, même si la plage est plutôt large par endroit (voir Tableau 4), la présence à la base de la falaise d'une unité silteuse compacte et réfléchive fait en sorte qu'elle est peu engraisée verticalement. Les vagues atteignent donc le pied de la falaise quotidiennement et le profil de cette dernière reste instable.

3.2 Conditions marines

Les données marégraphiques pour la région de Rivière Saint-Jean proviennent de la station de Mingan (#2470), localisée à environ 30 km à l'est du secteur étudié (Service Hydrographique du Canada, 2012). La région est soumise à des marées semi-diurnes dont le marnage moyen est de 1,7 mètre et de 2,5 mètres lors des marées de vives-eaux. Le niveau moyen de l'eau s'établit à 1,1 mètre et le niveau atteint lors des pleines mers supérieures de grande marée est de 2,6 mètres. La vitesse maximale des courants est de 4 nœuds pendant le flot et de 3 nœuds lors du jusant (Service Hydrographique du Canada, 2012). La dérive littorale est principalement vers l'est et le secteur d'intérêt est au sein d'une unité hydrosédimentaire délimitée à l'ouest par la pointe de Magpie et à l'est par l'embouchure de la rivière Mingan (Bernatchez *et al.*, 2012c). La zone est soumise aux houles de l'ouest-sud-ouest (fetch de 230 km) et du sud-ouest (fetch de 120 km) qui ont des périodes comprise entre 6 et 8 secondes (Hudier, 1986; Ross et Long, 1989). La hauteur des vagues est de 2 mètres en moyenne et ne dépassent généralement pas 4 à 5 mètres lors des tempêtes (Long et Champlain, 1985).

3.3 Conditions climatiques

Le climat de la Moyenne-Côte-Nord est tempéré et humide avec un été relativement court (Peel *et al.*, 2007). La température moyenne annuelle est de 1,1°C mais il y a une grande variabilité saisonnière. Ainsi, la température moyenne hivernale (décembre-janvier-février) est de -12,1°C. Il y a des précipitations toute l'année dont 23% tombent sous forme neigeuse. Ces données sont basées sur les normales climatiques (1971-2000) de la station de Rivière-au-Tonnerre, localisée à environ 20 km à l'ouest du secteur à l'étude. Cette station ne mesure cependant pas la vitesse des vents (Environnement Canada, 2012). L'autre station météorologique située à proximité du village de Rivière Saint-Jean est celle de Longue-Pointe-de-Mingan dont la normale n'est pas encore établie puisqu'elle a été mise en fonction en 1994. La moyenne de la vitesse des vents depuis son implantation est assez faible, 8,9 km/h. Ils sont légèrement plus forts en mars et en avril (10,1 km/h). Leurs directions principales sont de l'ouest (21,6%), de l'est (19,8%) et du nord (15,9%) et les plus forts proviennent surtout de l'est.

4. ÉVOLUTION DU TRAIT DE CÔTE

4.1 Taux de déplacement historiques

La falaise du secteur des Cayes, à Rivière Saint-Jean, s'est érodée de 0,26 m/an en moyenne entre 1949 et 2005 (0,27m/an entre 1949-2009 en remplaçant les zones non couvertes par les taux de 1949-2005), ce qui correspond à un déplacement total du trait de côte de près de 15 mètres. Il y a cependant de grandes variabilités spatiales puisque le recul a surtout été inférieur à cette moyenne pour les 875 mètres à l'ouest de la zone d'étude (transects 1 à 35). Au contraire, la vitesse de l'érosion a été supérieure à la moyenne pour les derniers 950m à l'est (transects 36 à 73), avec une érosion maximale enregistrée au 46^e transect (0,62m/an, soit un total de 35 mètres) (Figure 5).

Le recours à plusieurs séries de photographies aériennes a également permis de dégager une tendance générale à l'accélération du rythme de recul de la falaise au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle et au début du XXI^e siècle. Le taux de recul moyen a effectivement augmenté de 10 centimètres par année entre 1976 et 2005 par rapport aux 27 années précédentes (1949-1976) et d'un autre 10 centimètres entre 2005 et 2009 (Figure 6). Le recul mesuré entre 2005 et 2009 était donc deux fois plus rapide qu'entre 1949 et 1976. En ajustant une droite de régression linéaire sur ces données, on obtient une hausse de 0,003m/an entre 1949 et 2009.

Localement, entre les transects 27 à 38, l'érosion a été moins rapide, voire presque nulle entre 1976 et 2005 par rapport à la période précédente. Ces transects coïncident avec une zone qui s'est partiellement végétalisée entre 1949 (où elle était vive) et 2005. Cette zone s'est cependant réactivée entre 2005 et 2009 et on constate que les taux de recul ont augmenté de nouveau. D'autres transects (ex. : 18; 35 à 37; 47 à 50) ont enregistré un ralentissement de la vitesse d'érosion entre 2005 et 2009. Certains de ces transects se trouvent dans la zone semi-végétalisée alors que d'autres se situent dans la falaise meuble et vive dans la partie est du secteur étudié. Ces variabilités spatio-temporelles peuvent suggérer que les zones les plus actives se déplacent dans le temps, ce qui induirait un certain cycle dans les taux d'érosion. Elles pourraient aussi s'expliquer en fonction du mode de recul, qui favorise une succession de reculs « brusques » du trait de côte au fil des années. L'intervalle de temps (4 ans) pour la période récente était donc trop court pour que plusieurs événements de recul rapide se produisent à tous les transects.

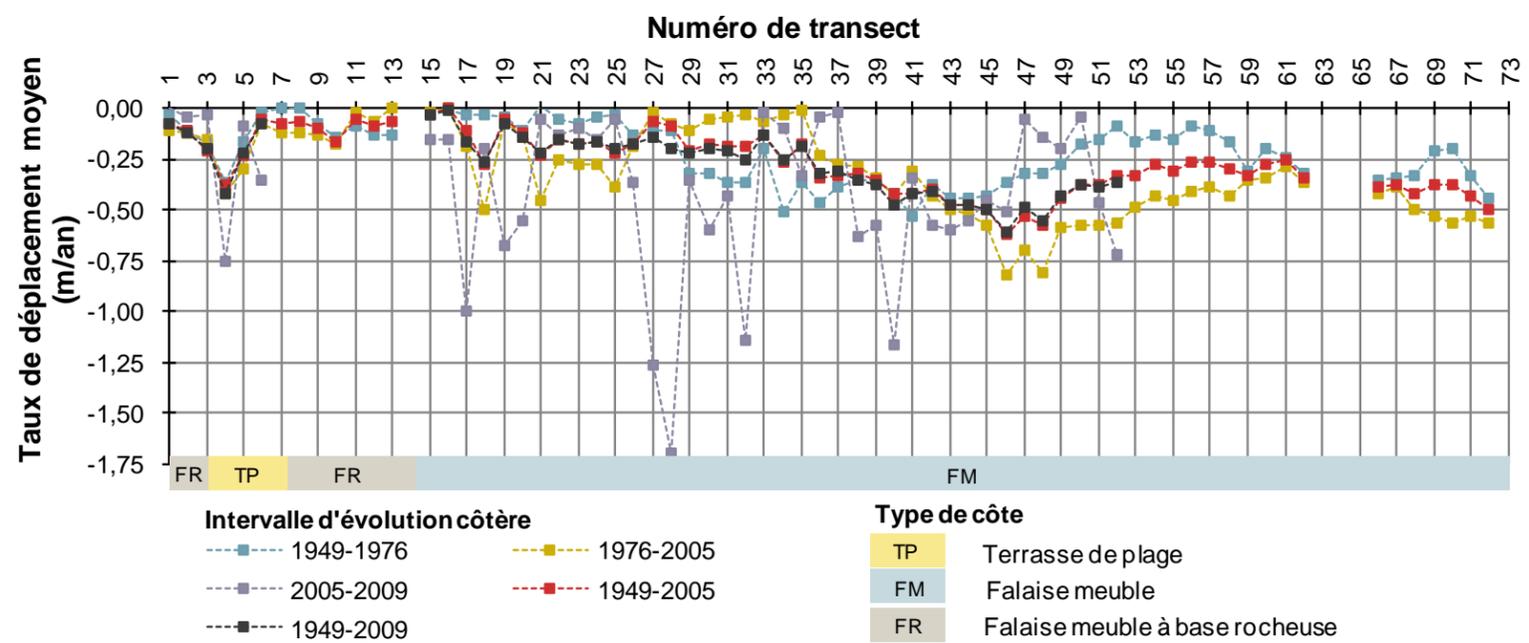
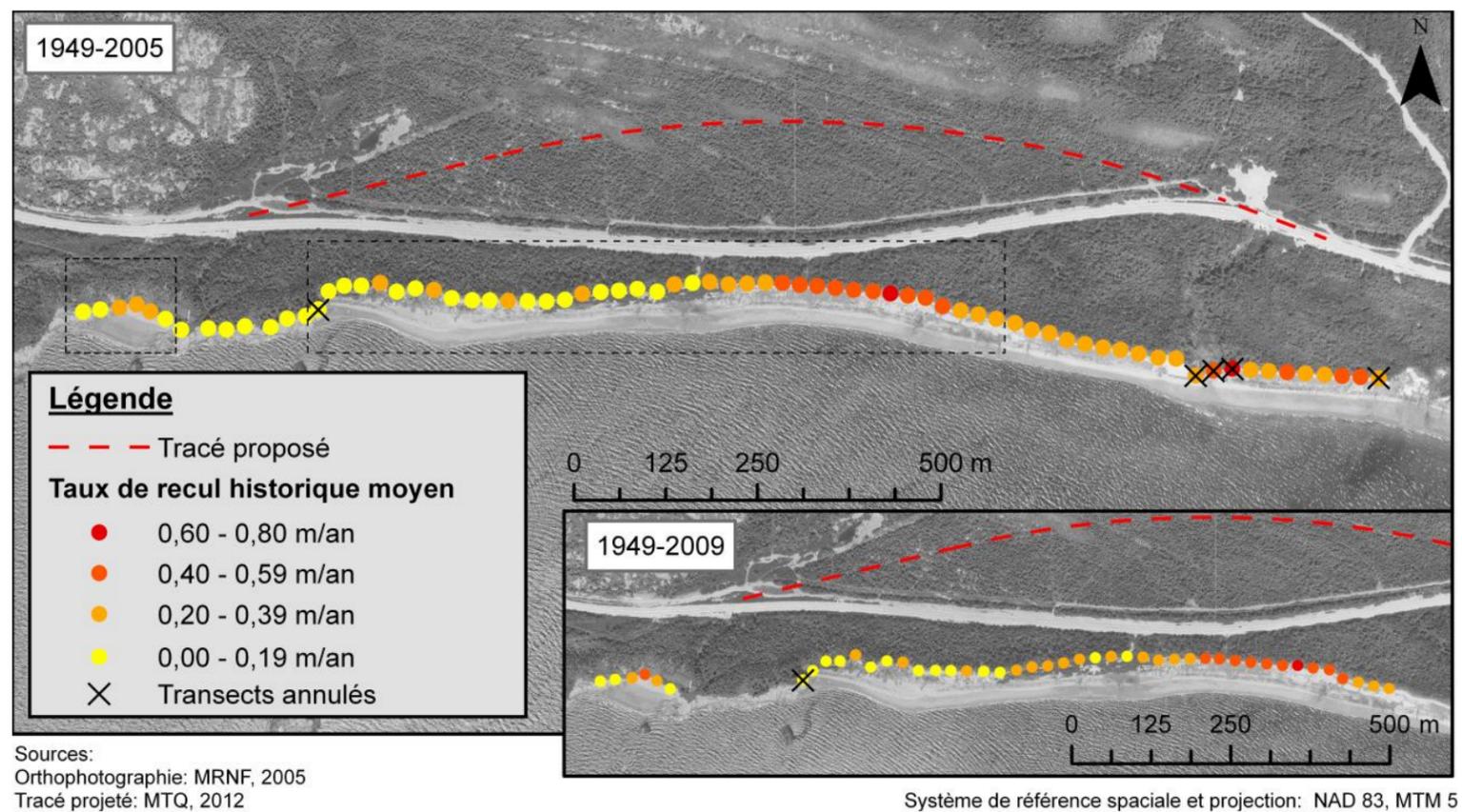


Figure 5. Évolution côtière historique du secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean

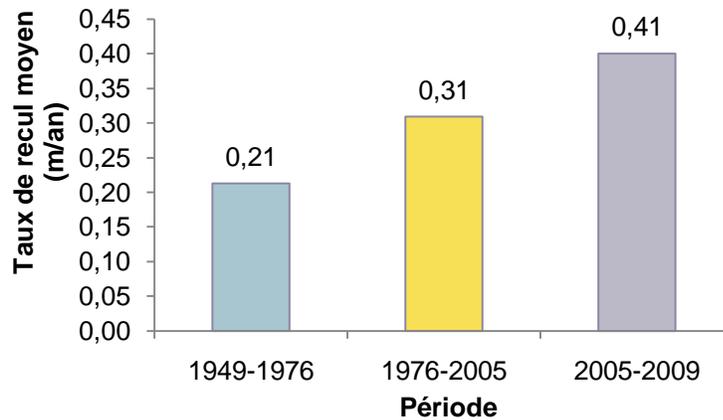


Figure 6. Taux de recul moyen par intervalle d'évolution côtière, secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean

Plusieurs facteurs peuvent expliquer l'accélération générale de l'érosion entre 1949 et 2009. D'une part, des auteurs ont rapporté une tendance au réchauffement des températures dans la région depuis 1945 (Bernatchez *et al.*, 2012c). Ce réchauffement a été particulièrement important en période hivernale pour la période récente (depuis 1996 mais surtout entre 2006 et 2010) et il était accompagné d'une réduction du nombre de degré-jour de gel. Cela s'est traduit entre autre par une réduction du couvert de glace dans le golfe du Saint-Laurent, ce qui a exposé davantage la côte aux tempêtes hivernales. De plus, l'augmentation des températures hivernales est souvent liée à une augmentation conséquente du nombre de cycles de gel-dégel et de redoux hivernaux, lesquels favorisent les processus cryogéniques tels que les coulées boueuses et la cryoclastie (Bernatchez, *et al.*, 2011). Sur la même zone de falaise mais à environ 5 kilomètres à l'est du secteur étudié, Brossard (2012) avait d'ailleurs observé que le recul se produisait principalement à l'automne et à l'hiver.

Bernatchez *et al.* (2012c) rapportent aussi que les précipitations annuelles, sous forme de pluie, sont à la hausse et que les événements de pluies diluviennes de plus de 30 mm ont été plus fréquents entre 2006 et 2010. Compte tenu que les processus hydrogéologiques jouent aussi un rôle non négligeable dans l'évolution de la falaise de Magpie, l'augmentation des précipitations liquides et des événements de pluies diluviennes a certainement eu un impact sur la vitesse de recul de la falaise.

La tendance à l'augmentation de la vitesse de recul des falaises deltaïques depuis les années 1950 semble assez généralisée sur la Côte-Nord (Bernatchez et Dubois, 2004; Brossard, 2012). Outre des facteurs d'ordre climatique, le déficit sédimentaire des plages est de plus en plus évoqué (Bernatchez *et al.*, 2008). Celui-ci serait associé à deux phénomènes principaux : la réduction du couvert de glace (ainsi que le départ répété des glaces pendant la saison glacielle) et l'artificialisation du littoral. Ce dernier élément est cependant à exclure puisque la falaise étudiée est en amont de sa cellule hydro-sédimentaire (dérive principale vers l'est) et que le secteur est entièrement naturel. Bien que l'érosion de la falaise soit à priori considérée comme une source de sédiments au sein de la cellule hydro-sédimentaire (Dubois, 1980), l'accélération de l'érosion et le rétrécissement de la largeur de la plage constaté par photo-interprétation suggèrent que le déficit est réel.

Notons finalement que les tempêtes jouent un rôle direct relativement secondaire dans l'évolution historique des falaises deltaïques à l'exception de celles caractérisées par une unité sableuse à

la base du talus côtier (Bernatchez, 2003; Brossard, 2012), ce qui n'est pas le cas à Magpie. Pour le secteur à l'étude, les vagues de tempête ont surtout un effet sur le remaniement et l'évacuation des sédiments provenant du recul de la falaise. Si on considère tout de même des critères liés à la vitesse des vents (\geq à 50, 60 ou 70 km/h), les épisodes de tempêtes ont été de deux à trois fois plus fréquents entre 1951 et 1970 que pour les décennies ultérieures alors que selon des critères liés aux niveaux d'eau (surcotes et niveaux d'eau extrêmes), les tempêtes ont été plus fréquentes entre 1981 et 2000 qu'entre 2001 et 2010 (Bernatchez *et al.*, 2012b). Par contre, sur le court terme, ces épisodes, parfois jumelés à de fortes pluies, peuvent causer des dommages et des reculs considérables du trait de côte (Dubois et Lessard, 1986; Brossard, 2012).

4.2 Taux de déplacement récents

La vitesse de recul de la falaise s'est accélérée durant la dernière décennie. D'une part, les bornes d'érosion ont permis de mesurer un recul moyen de 56 centimètres entre 2000 et 2012, soit 30 centimètres de plus que le taux moyen historique. Elles ont également permis de constater que certaines années ont été plus érosives que d'autres, notamment entre les étés 2002 et 2004, 2006 et 2007 et 2010 et 2011, où un recul moyen supérieur à 0,65 mètre a été mesuré. Au contraire, les périodes de 2000-2001, 2007-2008 et 2011-2012 ont été marquées par un ralentissement de l'érosion et un taux moyen s'approchant de la moyenne historique (Figure 7).

Les relevés de bornes permettent aussi de constater le caractère ponctuel et épisodique de l'érosion de la falaise de Magpie, puisque toutes les bornes ont au moins une année où le trait de côte ne s'est pas déplacé et une autre où il s'est déplacé de plus d'un mètre. Ces années ne sont cependant pas synchrones entre les bornes. La proximité d'une zone de ravinement et d'écoulements souterrains intenses semble avoir influencé les taux de recul mesurés à la borne MIN-142A, qui ont été supérieurs à 2 mètres par année entre 2002 et 2005 et entre 2006 et 2007. Au contraire, l'état semi-végétalisé de la falaise en bordure de la borne MIN-132 témoigne d'un rythme plus modéré du recul à cet endroit (moins de 0,34 m/an en moyenne). Le recul moyen a également été faible à la borne MIN-133, dont la falaise est pourtant vive et sur laquelle plusieurs processus géomorphologiques s'opèrent (voir Tableau 4). Les trois dernières années ont toutefois été plus érosives, notamment entre 2010 et 2011, où le trait de côte a reculé de 1,85 mètre.

Au total, le trait de côte s'est déplacé vers l'intérieur des terres de 2,40 à 13,78 mètres entre 2000 et 2012. De la même manière que pour les taux de recul historiques, les reculs les plus importants ont été mesurés sur le segment le plus à l'est du secteur.

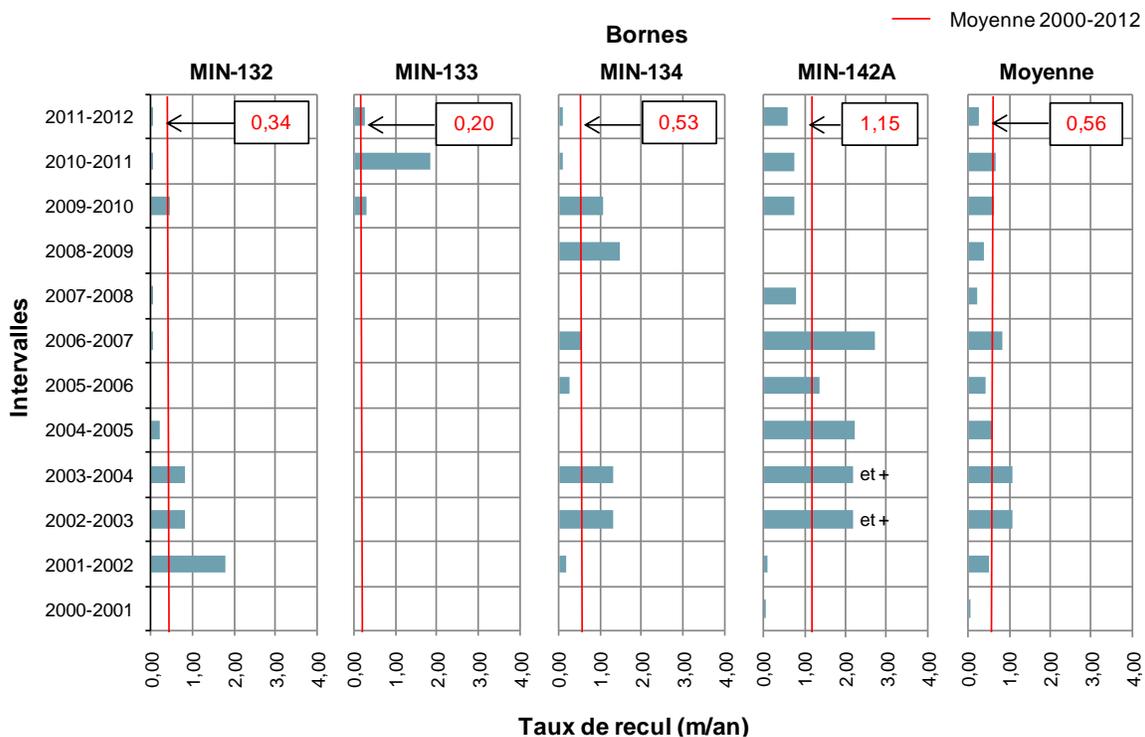
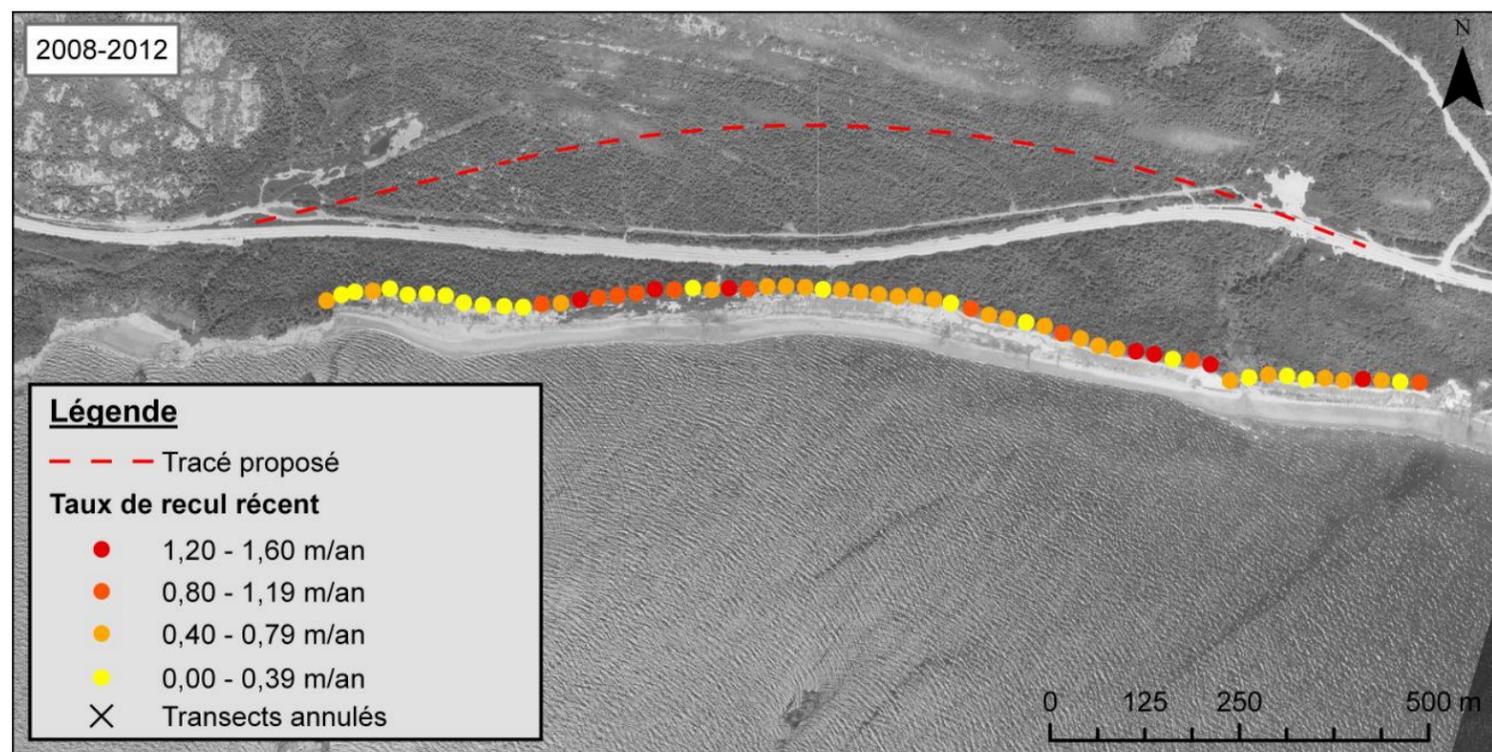


Figure 7. Evolution ctiere récente du trait de côte mesurée par les bornes d'érosion, secteur des Cayes, Riviere Saint-Jean

La rapidité de l'érosion mesurée récemment avec les bornes se confirme avec les levés Lidar puisque le taux moyen mesurée entre 2008 et 2012 avec cette méthode est de 64 centimètres par année. La numérisation continue de la position des traits de côte sur les levés Lidar permet de constater une érosion généralisée de la falaise puisque les traits de côte de 2008 et 2012 ne se superposent que très rarement. L'érosion a pratiquement été deux fois plus rapide entre 2008 et 2012 qu'entre 1949 et 2009. Il y a également eu un changement de la répartition spatiale des vitesses d'érosion le long de la côte au cours des dernières années. D'une part, le patron spatial est moins bien défini que pour l'évolution historique car il y a une plus grande variabilité des taux d'érosion d'un transect à l'autre. Certains transects adjacents (par exemple les 46^e et 47^e) ont des vitesses de recul qui diffrent de plus de 80 cm/an. D'autre part, une transition dans les zones les plus érodées s'est amorcée. L'érosion la plus rapide (>0,80 m/an) s'est principalement produite entre les transects 13 et 24, soit dans la zone anciennement semi-végétalisée qui avait connu un recul plutôt modéré (souvent inférieur à 20 cm/an) entre 1949 et 2009 (correspond aux transects 27 à 38 sur la Figure 5).



Sources:
 Orthophotographie: MRNF, 2005
 Tracé projeté: MTQ, 2012

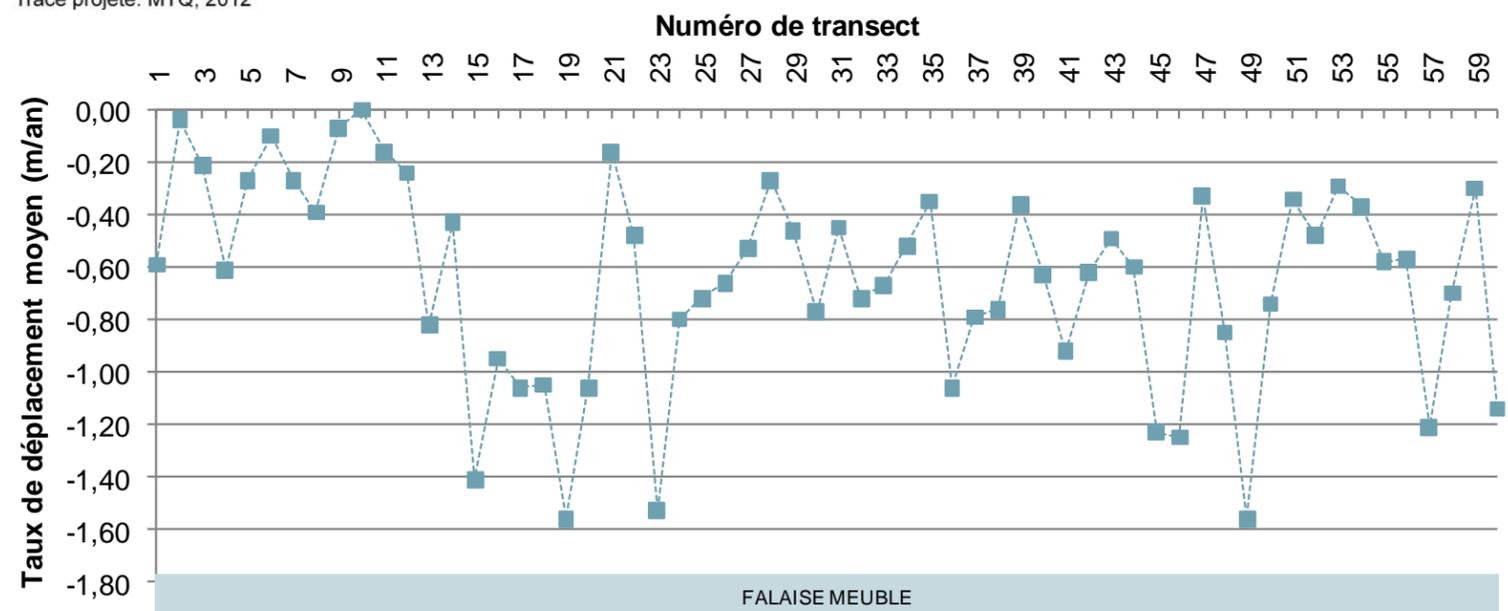


Figure 8. Évolution côtière récente (2008-2012) du secteur des Cayes, Rivière Saint-Jean

5. CONDITIONS LITHO-STRATIGRAPHIQUES, PROCESSUS ET MODES DE REcul

La litho-stratigraphie de la falaise meuble du secteur des Cayes est caractéristique des deltas post-glaciaires. La même séquence sédimentaire se retrouve sur l'ensemble du site :

- 1) une unité prodeltaïque essentiellement composée de silts sableux à argileux mais comportant aussi des lits de sables fins;
- 2) une unité sableuse d'origine fluviale et/ou littorale (parfois superposées) qui contient souvent des lits de graviers et/ou de galets;
- 3) un horizon de sable induré (ortstein);
- 4) un sol forestier;

À l'extrémité ouest du secteur, le roc affleure à la base de la falaise et l'unité prodeltaïque repose directement dessus.

Malgré un contexte litho-stratigraphique similaire pour toute la falaise, l'épaisseur des dépôts et les structures à l'intérieur de ceux-ci sont variables, ce qui nous a permis d'identifier 4 types de profils représentatifs du secteur à l'étude et de délimiter 3 secteurs aux caractéristiques homogènes. Ils sont décrits dans les sous-sections suivantes et les liens avec les processus géomorphologiques et les modes de recul qui les caractérisent sont aussi établis pour chaque type de profil.

5.1 Secteur 1

Ce secteur correspond à l'extrémité ouest de la zone d'étude et est aussi le plus court (330m). Il se distingue des autres par la présence d'un affleurement rocheux à la base de la falaise qui devient sporadique vers l'est du secteur 1. Le substratum rocheux est strié et poli, typique des surfaces d'érosion glaciaire de la Côte-Nord (Dubois, 1979; Bernatchez, 2003). Les dépôts prodeltaïques reposent directement sur le roc. Le roc occupe environ 2 à 5% de la hauteur de la falaise et les affleurements dans la portion est du secteur ne dépassent guère 80 centimètres (Figure 9).

La majeure partie de la falaise (12,70 m sur 17,40 m) est composée d'une unité prodeltaïque surtout constituée de silt-argileux et de silt-sableux compact et finement laminé. Il y a cependant la présence de lits de sables fins laminés (1-2 mm) à l'intérieur de cette unité. Au dessus ce trouve une unité sableuse d'origine littorale relativement mince (entre 2 et 4 mètres, 3,30 mètres sur le profil type de la Figure 9). Ce sable est grossier et beige et contient des lits minces de gravillons et de minéraux lourds (Figure 9). Des alluvions sableux gris-beige sont aussi présents à plusieurs endroits en dessous des sables littoraux. Ils sont aussi assez minces (1-2 mètres). Ces alluvions contiennent des lits de sables grossiers, de graviers et de galets arrondis et parfois des galets d'argile près du contact avec l'unité prodeltaïque. La partie supérieure de l'unité sableuse s'est cimentée et un ortstein de 55 centimètres d'épaisseur s'est ainsi développé sous le sol forestier (Figure 9).

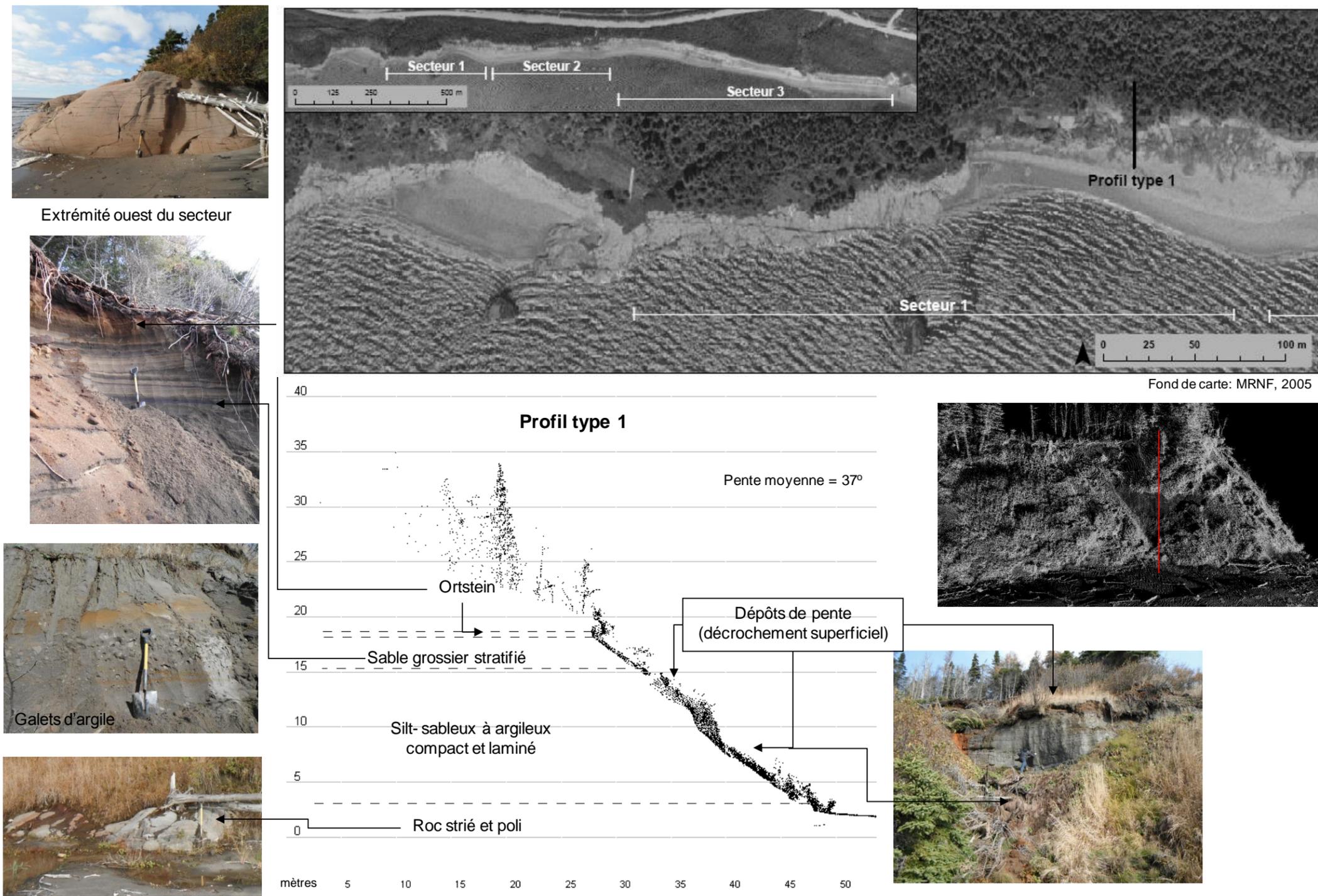


Figure 9. Planche graphique – Secteur 1

Le secteur 1 se caractérise aussi par son état végétalisé à semi-végétalisé qui persiste depuis au moins 1949. Les processus géomorphologiques sont donc moins nombreux et intenses dans ce secteur, sans toutefois être inactifs puisqu'un déplacement moyen du trait de côte de près de 12 centimètres par année a été mesuré entre 1949 et 2005. Cette zone évolue principalement par une succession de décrochements superficiels affectant l'unité prodeltaïque et qui provoquent ensuite par gravité le recul de l'unité sableuse et l'effondrement de l'ortstein et des débords organiques sus-jacents (Figure 9 et 10). La surface de rupture est généralement associée aux lits de sables fins qui sont affectés par des processus hydrogéologiques. On constate aussi la présence d'une nappe d'eau au contact entre les sables littoraux ou fluviaux et l'unité prodeltaïque qui provoque un ruissellement en nappe et entraîne vers le bas du talus les sédiments sableux par suffosion (Figure 11).



Figure 10. Cicatrice de décrochement superficiel

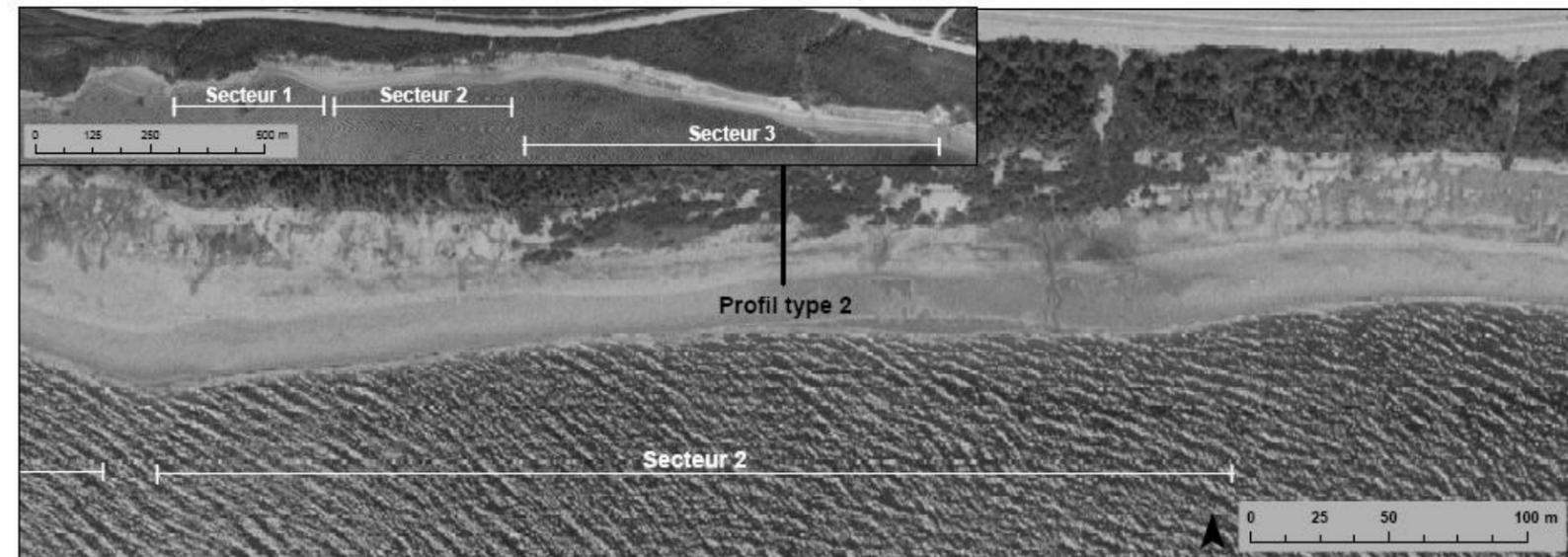


Figure 11. Ruissellement en nappe

5.2 Secteur 2

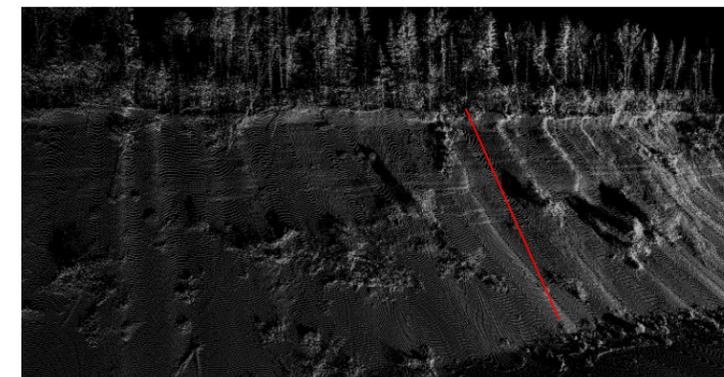
Le deuxième secteur est situé au centre de la zone d'étude et débute lorsque le roc cesse d'affleurer dans le bas de la falaise. Cela coïncide aussi avec une densification des résurgences d'eau sur la plage, un léger épaissement de l'unité sableuse (4,80m sur le profil type de la Figure 12, jusqu'à 5m dans le secteur 2) et une augmentation de la hauteur totale de la falaise d'environ 1 mètre pour atteindre 18,70 mètres. Des différences s'observent aussi au niveau de l'unité prodeltaïque, qui est moins homogène et généralement moins compacte dans ce secteur. En effet, des déformations ont été observées à plusieurs endroits à l'intérieur de cette unité de même que plusieurs poches de sables fins à moyens gris contenant des structures de charge. Ces éléments s'observent surtout dans la partie sommitale de l'unité prodeltaïque, mais ils peuvent parfois se retrouver au centre de l'unité et être recouverts d'une couche de silts sableux à argileux compacts, laminés (1 à 2mm, parfois avec des sables fins silteux), contenant des rides de courant et à l'occasion quelques galets à l'intérieur. Ces caractéristiques sédimentaires sont assez typiques des dépôts prodeltaïques de la Côte-Nord (Dubois, 1979; Bernatchez, 2003). Un ortstein plus épais qu'à la section 1 couvre l'unité sableuse car il mesure environ 1,05 mètre.

Profil du secteur vers l'ouest

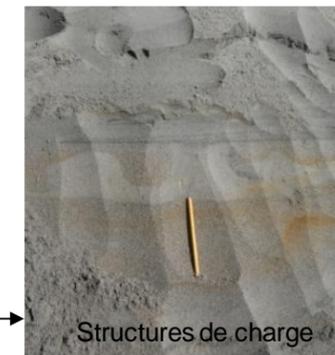
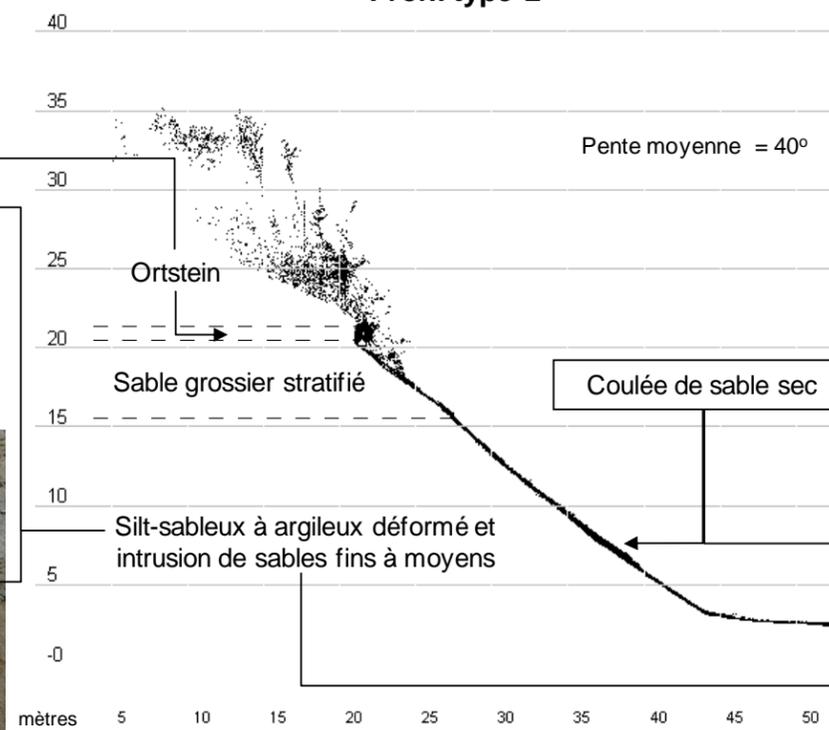


Fond de carte: MRNF, 2005

Vue oblique du profil sur levé Lidar



Profil type 2



Photographies: G.Brossard, 2012

Figure 12. Planche graphique – Secteur 2

La surface de la falaise est complètement vive et les processus géomorphologiques sont plus nombreux qu'à la section 1. La litho-stratigraphie (alternance de sables et de silts-sableux à argileux, Figure 13) est favorable aux écoulements hydrogéologiques qui provoquent de la suffosion, un processus omniprésent dans ce secteur. Plusieurs trous de suffosion ont été observés au contact entre l'unité de sables littoraux/fluviaux et à l'intérieur des poches de sables contenus dans l'unité prodeltaïque (Figure 14). Les résurgences d'eau dans la falaise et le ruissellement concentré en surface entaille l'unité prodeltaïque. Le plus fort contenu en sable favorise également les coulées de sable sec qui affectent l'ensemble du secteur (Figure 12). Ces coulées peuvent en partie couvrir l'unité prodeltaïque et le bas de la falaise. Elles sont cependant soumises aux vagues à presque toutes les marées hautes, ce qui empêche l'atteinte d'une pente d'équilibre (Figure 15). L'action combinée de ces processus a provoqué un recul moyen de 19 centimètres entre 1949 et 2005 sur l'ensemble du secteur 2, qui fait environ 400 mètres en longueur.



Figure 13. Alternance de lits sableux et silto-sableux à argileux dans l'unité prodeltaïque



Figure 14. Ruissellement concentré à l'intérieur de l'unité prodeltaïque



Figure 15. Érosion des cônes de coulées de sable sec par les vagues

5.3 Secteur 3

Le troisième secteur est le plus long (900m) et le plus actif puisque le recul moyen a été de 39 centimètres par année entre 1949 et 2005. Il couvre toute la portion est du site et est complètement dénué de végétation (Figure 16). Ce secteur est particulier car il contient deux profils types qui s'observent en alternance le long du littoral. Le profil type principal (3A) présente un faciès prodeltaïque régulier caractérisé par la superposition de couches horizontales ou subhorizontales. Il est entrecoupé par trois paléochenaux qui entaillent les sédiments prodeltaïques (profil 3B).

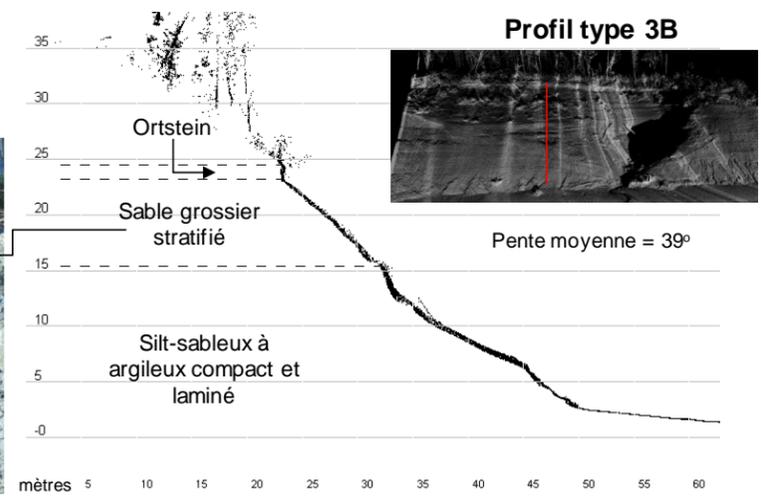
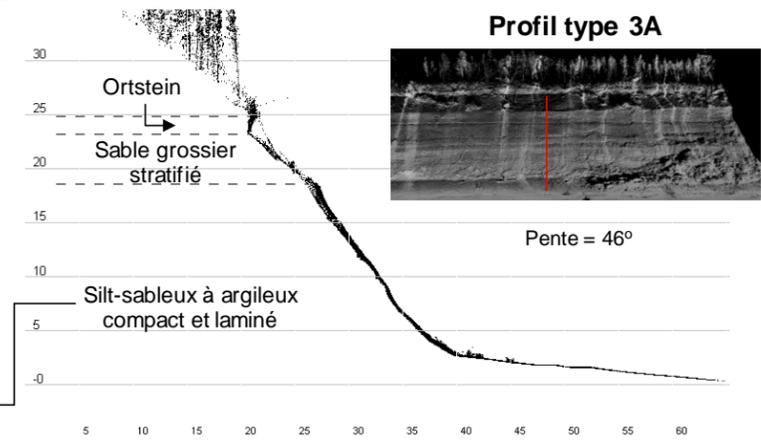
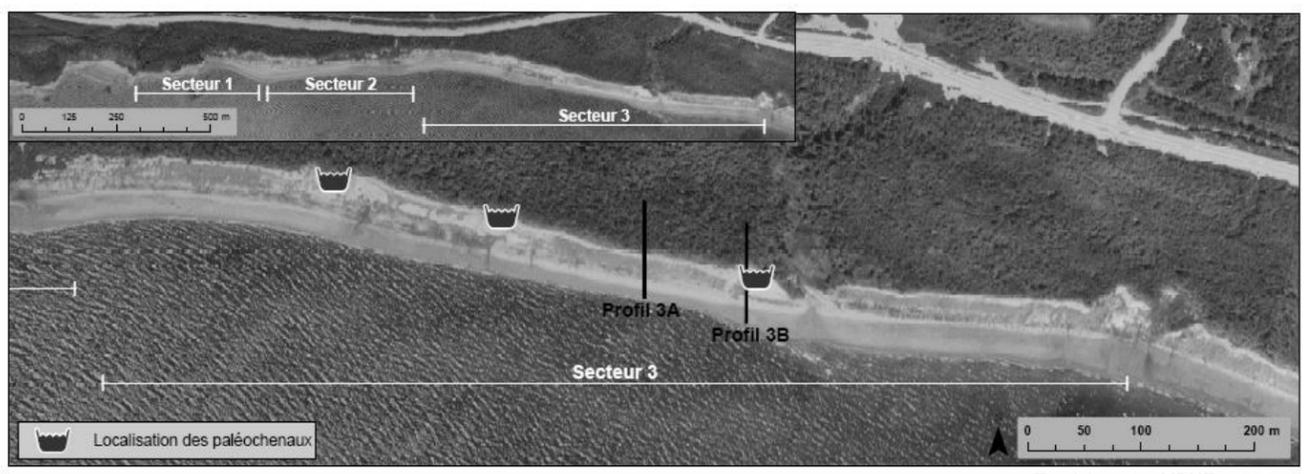
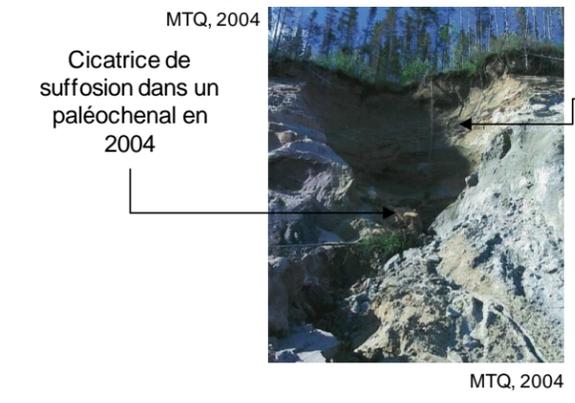
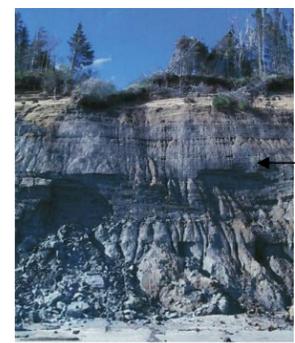


Figure 16. Planche graphique – Secteur 3

Le profil 3A occupe donc la majeure partie du secteur 3. Il est composé à la base de sédiments prodeltaïques surtout silto-sableux et silto-argileux plus homogènes et moins déformés qu'au secteur 2. Cette unité contient cependant plusieurs couches de sables fins de quelques centimètres à 60 centimètres d'épaisseur qui permettent le maintien d'une nappe d'eau perchée, la suffosion et le ruissellement concentré (Figure 17). Elle est aussi affectée par des décrochements superficiels (Figure 18). L'épaisseur de cette unité est de 15,90m sur une hauteur totale de la falaise de 21,65m. L'épaisseur de l'unité sableuse est similaire au secteur 2 (4,75m). L'origine des sables est surtout littorale et ils contiennent des lits de graviers et de galets. L'ortstein est toujours présent et a exactement la même épaisseur qu'au deuxième secteur (1,05m).



Figure 17. Suffosion et ruissellement concentré



Figure 18. Décrochement superficiel

Les paléochenaux (profil 3B) possèdent la même base silto-argileuse que les profils 3A (Figure 16). Elle est cependant entaillée par les paléochenaux jusqu'à près de la mi-hauteur. Les paléochenaux sont comblés par des sables fluviaux contenant des lits de graviers et de galets au dessus desquels reposent des sédiments littoraux (sables, graviers et galets) sur lesquels se trouve un ortstein (1,05m). La taille des paléochenaux reste relativement modeste : ils sont larges d'une quarantaine à une cinquantaine de mètres et profonds d'environ 3 à 5 mètres. En ajoutant les sables littoraux, l'épaisseur de l'unité sableuse atteint 8,05m (profil type 3B, Figure 16) à 10 mètres au centre des paléochenaux. Le mode de recul est surtout associé à la suffosion, qui combiné avec les coulées de sable sec, forment de gros amphithéâtres au pied desquels se forment des cônes de déjection (Figure 19).



Figure 19. Suffosion, coulée de sable sec et cône de déjection

Le secteur 3 se termine à l'est par une zone où les processus hydrogéologiques sont intenses, provoquant du ravinement, de la suffosion et des coulées boueuses (Figure 20 et 21). Cela se traduit par un trait de côte irrégulier et par une surface de la falaise fortement échantreée.



Figure 20. Zone de résurgences et d'écoulements souterrains intenses



Figure 21. Coulée boueuse

6. SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION CÔTIÈRE

Les projections d'évolution côtière selon les différents scénarios envisagés sont présentées sous forme de cartes aux figures 22 à 25 et sont aussi disponibles sous format numérique à l'Annexe II. Le premier constat est que tous les scénarios prévoient que la route 138 dans sa position actuelle sera emportée par l'érosion d'ici 2100. En excluant du calcul la marge de sécurité définie pour les reculs événementiels, la route serait affectée sur une longueur variant entre 125m (scénario 1) et 665m (scénario 4). En ajoutant la possibilité d'un recul événementiel, la portion touchée serait alors comprise entre 345 et 780 mètres. Au contraire, aucun scénario ne prévoit un recul assez important pour affecter le tracé projeté. Le quatrième scénario, qui envisage le recul le plus rapide, indique que le trait de côte s'approchera au maximum à 50 mètres du tracé projeté. Cette distance est d'ailleurs supérieure à la distance actuelle entre le trait de côte et la route 138 au centre du secteur étudié (40 mètres). Pour que le tracé projeté soit menacé, il faudrait un recul moyen annuel de l'ordre de 2,30 à 2,45 mètres sur l'ensemble de la falaise meuble et de 1,30 mètre sur la falaise meuble à base rocheuse, ce qui est un scénario improbable.

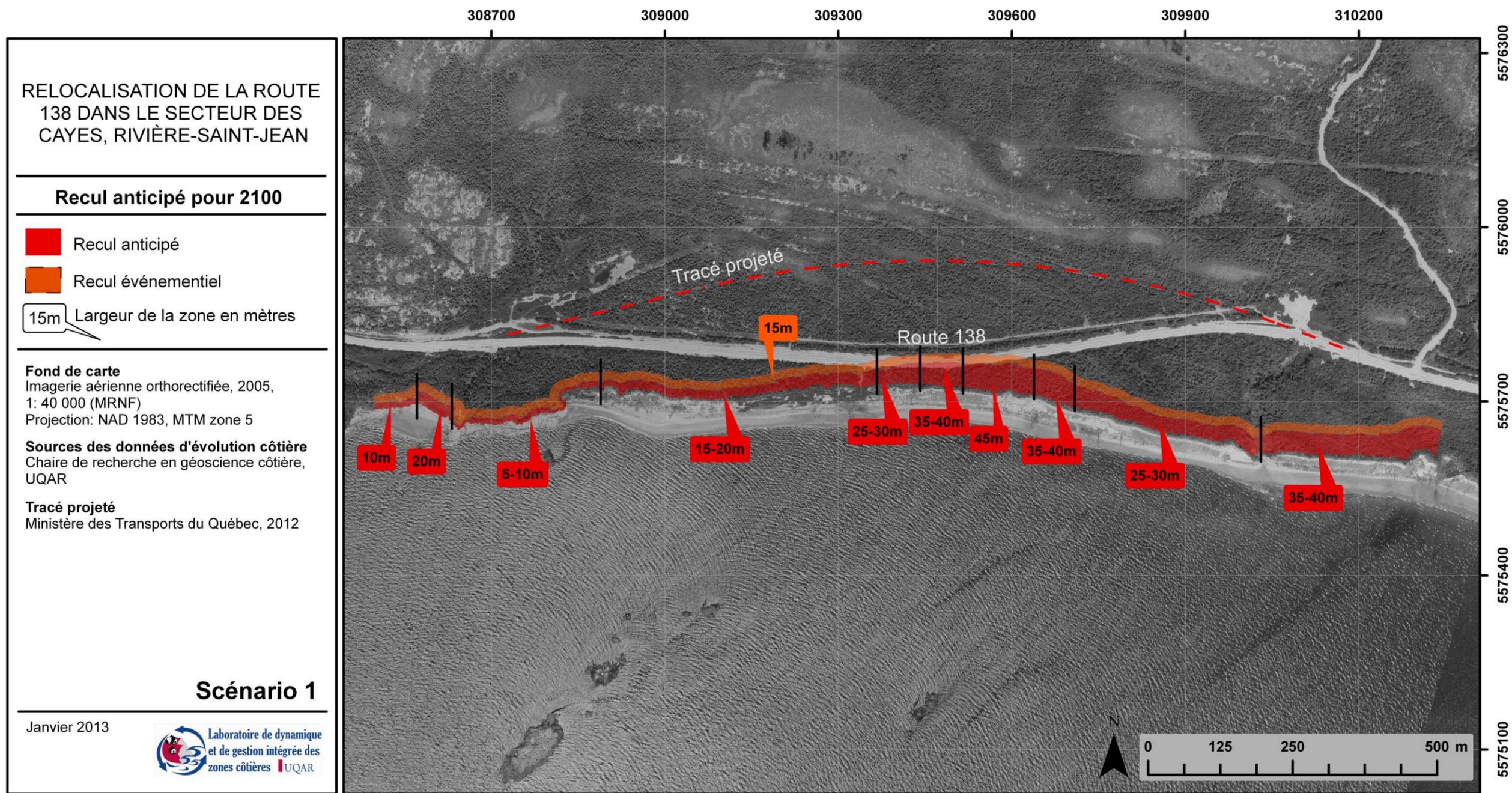


Figure 22. Scénario 1 : projection de l'évolution côtière pour l'horizon 2100

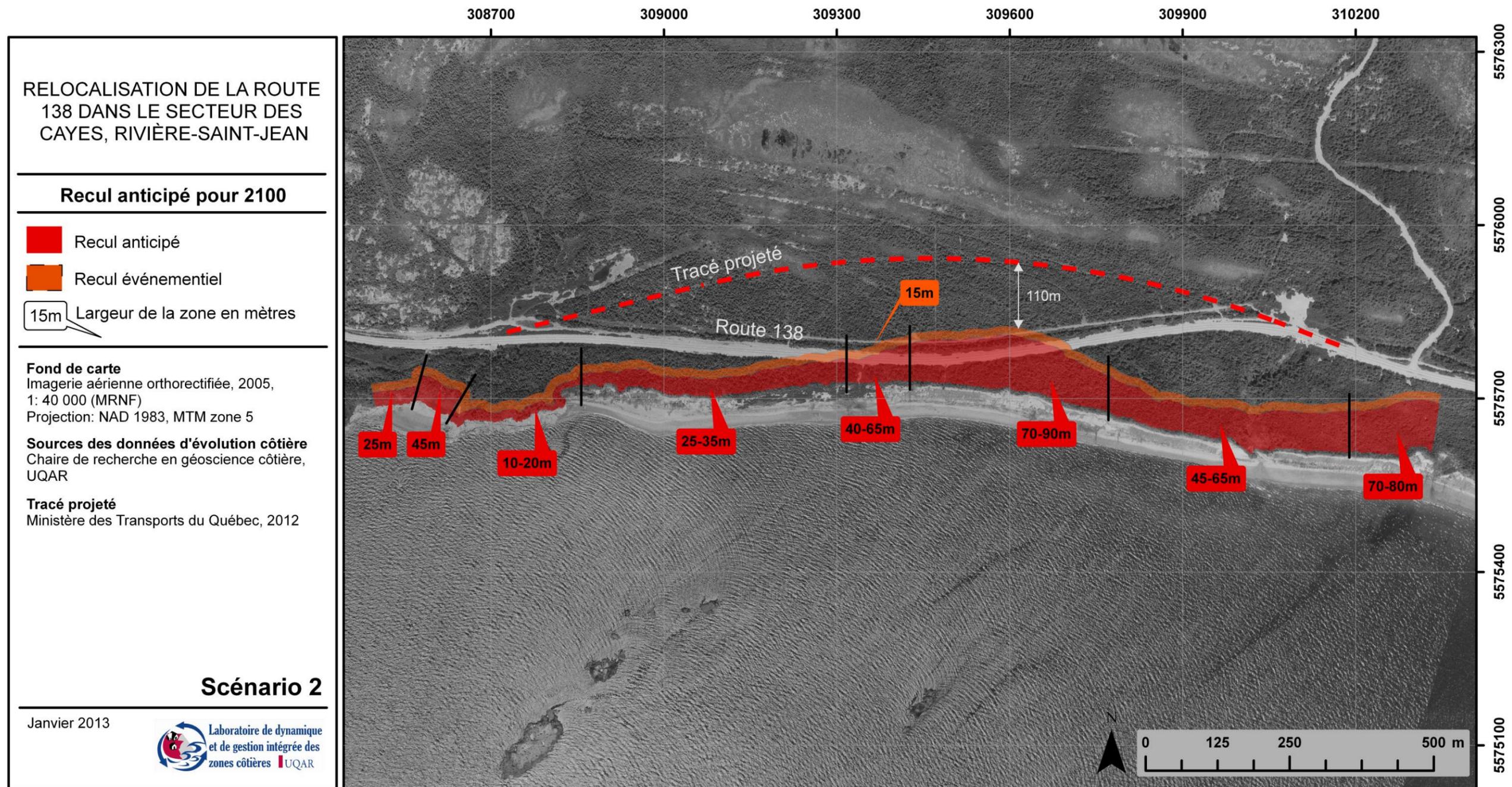


Figure 23. Scénario 2 : projection de l'évolution côtière pour l'horizon 2100

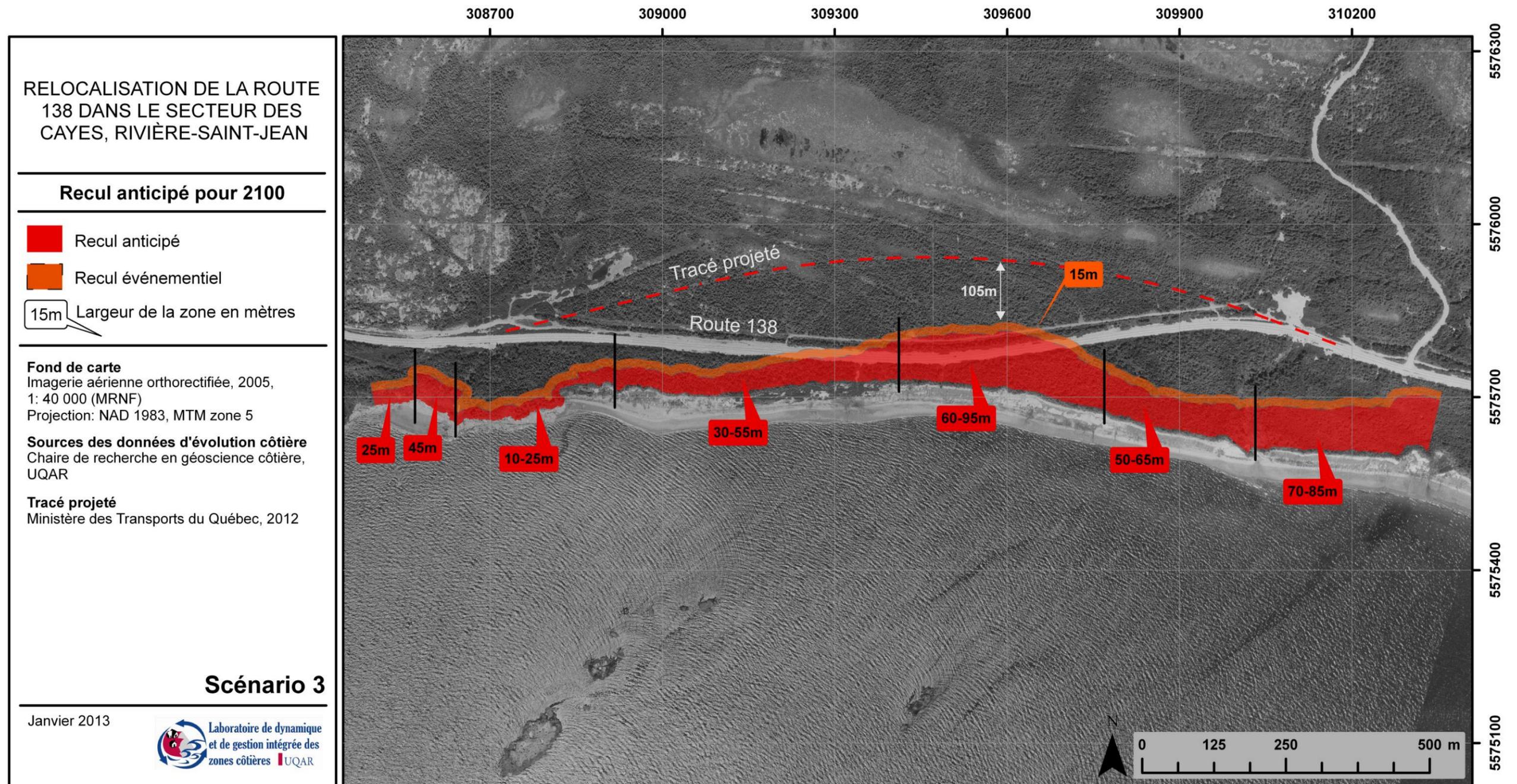


Figure 24. Scénario 3 : projection de l'évolution côtière pour l'horizon 2100

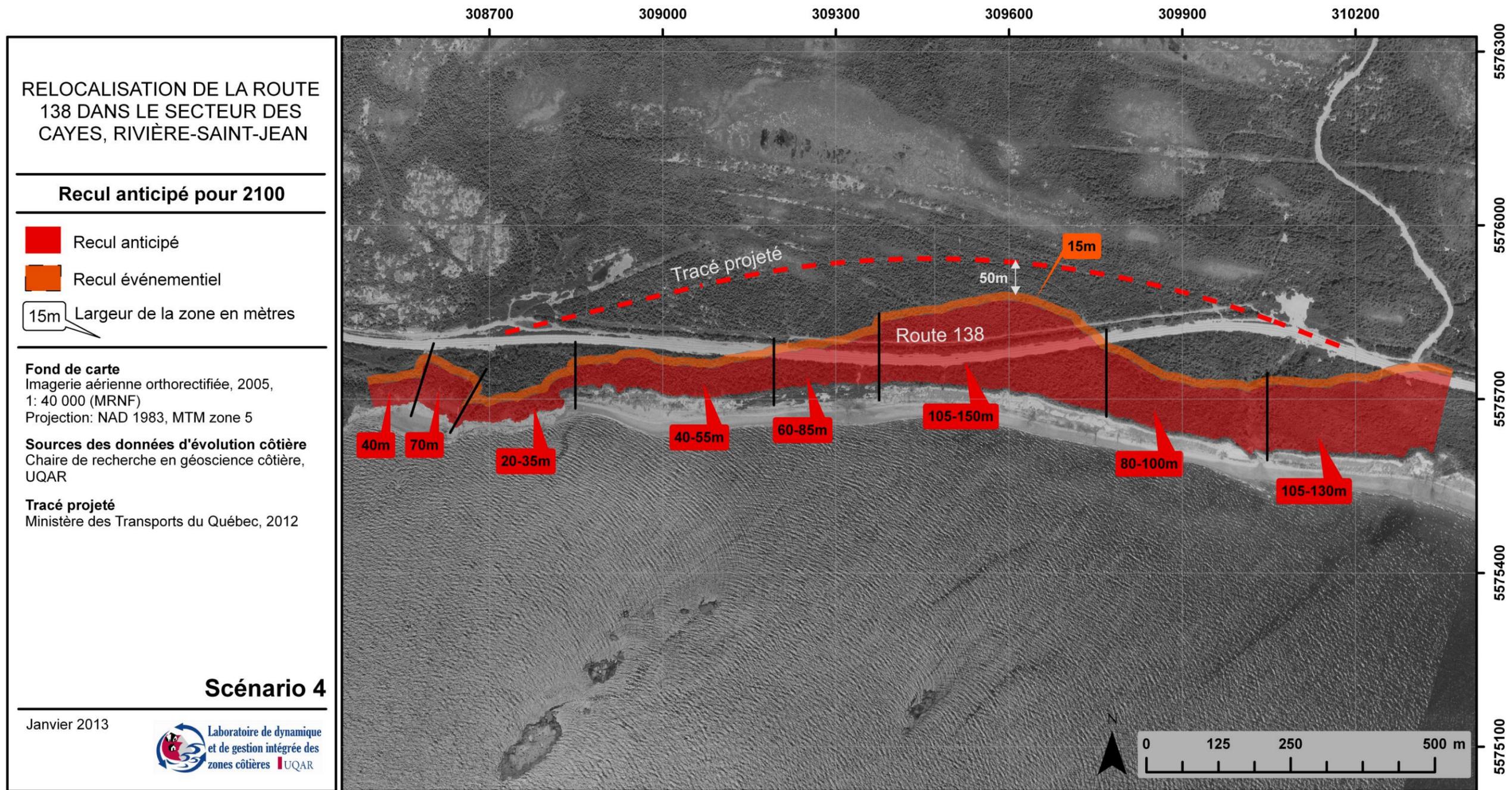


Figure 25. Scénario 4 : projection de l'évolution côtière pour l'horizon 2100

7. RECOMMANDATIONS ET CONCLUSION

La vitesse de recul de la falaise du secteur des Cayes s'est accélérée au cours de la période de 1949 à 2012, et plus particulièrement entre 2000 et 2012. Cette falaise est principalement sensible aux processus hydrogéologiques. Malgré qu'il n'ait pas été possible d'étudier les processus d'érosion de la falaise en période hivernale dans le cadre de ce mandat, les recherches menées à quelques kilomètres à l'est indiquent clairement que l'unité silteuse constituant la majeure partie de la falaise est fortement sensible aux processus cryogéniques qui contribuent de manière significative au recul de la falaise. Dans le contexte des changements climatiques appréhendés, on peut donc s'attendre à ce que la vitesse de recul de la falaise continue à s'accroître. En ce sens, le taux moyen historique proposé par le scénario 1 est trop optimiste. À l'opposé, le scénario quatre pourrait s'avérer trop alarmiste. Il est basé sur des vitesses de recul plus élevées mesurées à l'est du secteur d'étude, où l'épaisseur de l'unité sableuse est plus importante et les processus hydrogéologiques plus intenses. Ce scénario souligne néanmoins que même avec le tracé proposé, la route 138 pourrait être affectée en 2100 par le recul de la falaise immédiatement dans la partie est du secteur d'étude. Il serait donc important au cours des prochaines années de porter une attention particulière au rythme de recul de la falaise immédiatement à l'est du secteur étudié. À la lumière des connaissances actuelles, les scénarios 2 et 3 sont les plus réalistes. Pour ces scénarios, la localisation du tracé retenu par le ministère des Transports du Québec est adéquate et sécuritaire puisqu'une bande de terrain résiduelle d'au moins 100 mètres demeure entre le tracé et le trait de côte projeté pour 2100.

Par ailleurs, il est important de mentionner que les problèmes d'instabilité d'ordre géotechnique ne faisaient pas partie du mandat réalisé. Les projections d'évolution côtière ne tiennent donc pas compte d'un recul événementiel pouvant être lié à des glissements rotationnels de grande ampleur ou à des coulées argileuses. Considérant la présence d'amphithéâtres de glissements rotationnels et de coulées argileuses pouvant atteindre une profondeur de 430 mètres en bordure de la falaise à l'est du secteur d'étude, il est recommandé d'obtenir un avis géotechnique pour évaluer le risque de mouvements de terrain de grande ampleur pour le secteur visé par le déplacement de la route 138.

Enfin, considérant l'intensité des processus d'érosion, le mode et le rythme de recul de la falaise, le déplacement de la route 138, tel que proposé par le ministère des Transports du Québec, est la solution d'adaptation la plus appropriée pour la protéger contre les aléas côtiers.

RÉFÉRENCES

- Allard, J.D. (1980). Étude ponctuelle de stabilité de la terrasse inférieure dans la municipalité de Rivière Saint-Jean, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Service de la géotechnique, Québec, 18p.
- Archambault, S. (2002). Région naturelle n° 20 « Les Hautes-Terres Boréales Laurentiennes » Synthèse des connaissances et analyse comparative de trois sites d'intérêt : rivières Manitou, Magpie et Mingan. Rapport présenté au ministère du Patrimoine canadien, Agence Parcs Canada, Québec, viii, 212p.
- Bachand, E. (2010). Datation dendrochronologique des mouvements de masse de grande ampleur en milieu côtier. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 40p.
- Bernatchez, P. (2003). Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives. Thèse de doctorat, Université Laval, 460 p.
- Bernatchez, P., Bouchard, J-D., Dugas, S., Drejza, S., Fraser, C., Morneau, F., Nicorici, C. et Jolivet, Y. (2010). Principes et fondements méthodologiques appuyant l'évaluation des marges de recul d'érosion en zone côtière. Document de travail remis au ministère de la Sécurité Publique du Québec, avril 2010, 42 p.
- Bernatchez, P. Boucher-Brossard, G., et Sigouin-Cantin, M. (2012b). Contribution des archives à l'étude des événements météorologiques et géomorphologiques causant des dommages aux côtes du Québec maritime et analyse des tendances, des fréquences et des temps de retour des conditions météo-marines extrêmes. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité publique du Québec, 140 p.
- Bernatchez, P., Drejza, S., Van-Wierst, S. et Didier, D. (2012a). Vulnérabilité des infrastructures routières de l'est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Rapport méthodologique. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport méthodologique remis au ministère des Transports du Québec, février 2012, 60 p. + annexes.
- Bernatchez, P. et Dubois, J-M.M, (2004). Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 58, no. 1; p. 45-71.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S. et Morissette, A., (2008). Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.

-
- Bernatchez, P., Friesinger, S., Denis, C. et Jolivet, Y. (2012c). Géorisques côtiers, vulnérabilité et adaptation de la communauté d'Ekuanitshit dans un contexte de changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Conseil tribal Mamuitun et au Ministère des affaires autochtones et Développement du Nord Canada, 220 pages.
- Bernatchez, P., Jolivet, Y., Corriveau, M. (2011). Development of an automated method for continuous detection and quantification of cliff erosion events. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 36, p. 347-362.
- Brossard, G.B. (2012). Rythme et modes de recul des falaises à sommet tourbeux de la Côte-Nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 179p.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. et Buckley M.K. (1991). Historical shoreline change : error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, vol. 7, no. 3, p. 839-852.
- Dolan, R., Fenster, M. S. et Holmes, S. J. (1991). Temporal Analysis of Shoreline Recession and Accretion. *Journal of Coastal Research*, vol. 7, no 3, p. 723-744.
- Dubois, J.-M.M. (1977). Nature, stratigraphie et dynamique des formations meubles le long de la route 138 entre Sheldrake et Mingan, moyenne côte-nord du Saint-Laurent. Rapport soumis à Roy, Bergeron, Gariépy, Leroux, Dupont et Ass, Montréal, 5p. + cartes.
- Dubois, J.-M.M. (1979). Environnements quaternaire et évolution post-glaciaire d'une zone côtière en émergence en bordure sud du Bouclier Canadien : La moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent, Québec. Thèse de doctorat, Université d'Ottawa, 754p.
- Dubois, J.-M.M. (1980). Géomorphologie du littoral de la Côte Nord du Saint-Laurent : analyse sommaire. p. 215-238, in S.B. McCann (éd.) *The Coastline of Canada, littoral processes and shore morphology*. Geological Survey of Canada, Ottawa, paper 80-10, 439p.
- Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S. (2006). Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période 1996-2003. Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 p. + annexes.
- Dubois, J.-M.M. et Lessard, G. L. (1986). Erosion Rates and Causes, Northern Gulf of St. Lawrence, Québec, Canada. *Thalassas*, vol. 4, no 1, p. 63-70.
- Dubois, J.-M.M. et St-Pierre, L. (1986). Carte des matériaux d'emprunt et des zones de risques sur la moyenne Côte-Nord du Saint-Laurent, Bulletin de recherche no. 92-93, Département de géographie, Université de Sherbrooke, 8p. + cartes.
- Environnement Canada. (2012).
Archives nationales d'informations et de données climatiques.
http://www.climat.meteo.gc.ca/climateData/canada_f.html
- Fletcher, C., Rooney, J., Barbee, M., Lim, S.-C., Richmond, B. (2003). Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, no. 38, p. 106-124.

-
- Hudier, E. (1986). Mise au point de la jauge nucléaire : applicabilité à l'étude du transport sédimentaire dans la zone de déferlement. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 133p.
- Jolicoeur, S. et O'Carroll, S. (2007). Sandy barriers, climate change and long-term planning of strategic coastal infrastructures, Îles-de-la-Madeleine, Gulf of St. Lawrence (Québec, Canada). *Landscape and Urban Planning*, 81, p. 287–298.
- Long, B. et Champlain, G. (1985). Les variations topographiques des barres d'avant-côte : mise en évidence des mouvements par utilisation d'une jauge nucléaire, p. 73-88. In D.L. Forbes, edit., Canadian Coastal Conference, St. John.
- Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF), (2005). Imagerie aérienne orthorectifiées pour la région de la Côte-Nord, échelle 1 : 40 000.
- Ministère du Transport du Québec (MTQ), (2012). Base de données numérique, route 138, tronçon 11, section 40, chaînage 1+000 à 2+600, Rivière Saint-Jean.
- Moore, L.J. (2000). Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, vol. 16, no. 1, p. 111-124.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. et McMahon, T. A. (2007). Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 11, no 5, p. 1633-1644.
- Pye, K. et Blott, S.J. (2006). Coastal processes and morphological change in de Dunwich-Sizewell area, Suffolk, U.K., *Journal of Coastal Research*, vol 22, no.3, p. 453-473.
- Ressources Naturelles Canada, (2006).
Base nationale de données topographiques (BNDT)
<http://www.GeoGratis.gc.ca>
- Ross, N. et Long, B. (1989). Évolution morpho-sédimentaire de la barre de déferlement : un exemple dans le golfe du Saint-Laurent, Québec. *Géographie Physique et Quaternaire*, vol. 43, no. 3, p. 377-388.
- Service Hydrographique du Canada (2012).
Marées, courants et niveaux d'eau
<http://www.waterlevels.gc.ca/fra/accueil>
- Sharma, K. N. M. et Franconi, A. (1975). Région des rivières Magpie, Saint-Jean, Romaine (Grenville 1970). Ministère des Richesses Naturelles du Québec, Rapport géologique 163, 73p.
- Thieler, R.E. et Danforth, W.W. (1994). Historical shoreline mapping (II) : Application of the digital shoreline mapping and analysis system (DSMS/DSAS) to shoreline change mapping in Puerto Rico. *Journal of Coastal Research*, vol. 10, no. 3, p. 600-620.
- Thieler, E. R., Martin, D. et Ergul, A. (2003). The Digital Shoreline Analysis System, Version 2.0: Shoreline Change Measurement Software Extension for ArcView. USGS U.S. Geological Survey Open-File Report 03-076.

ANNEXE I : PRÉCISION DU LEVÉ LIDAR TERRESTRE

INFORMATIONS GÉNÉRALES	
Date du relevé : 7 mai 2012	
Résolution spatiale : Entre 1 et 5 cm	
Précision altimétrique : RMS = 0,01 Moyenne = 0,002	
Précision planimétrique : RMS = 0,02 Moyenne = 0,04	
Type d'équipement : Laser Riegl VQ-250	
Système de référence des données : Horizontal NAD83(SCRS) MTM fuseau 5	
Provenance des contrôles terrain : UQAR	
Acquisition et traitement: Stéfanie Van-Wierts	Date : Mai 2012

point	no	Z (m)	z_laser (m)	diff_z (m)	diff_XY (m)	Position
rsj001	1	1,81404	1,801671	0,012369	0,05	ext
rsj002	2	1,87658	1,854041	0,022539	0,05	dessus
rsj003	3	1,82757	1,804592	0,022978	0,1	int
rsj004	4	1,84712	1,850186	-0,003066	0,05	ext
rsj005	5	1,77645	1,756997	0,019453	0,04	ext
rsj006	6	1,81975	<i>nd</i>	<i>nd</i>	<i>nd</i>	-
rsj007	7	1,7716	1,769751	0,001849	0,04	int
rsj008	8	1,74367	1,747649	-0,003979	0,02	ext
rsj009	9	0,8908	0,890996	-0,000196	0,02	ext
rsj010	10	0,93355	0,93441	-0,00086	0,04	dessus
rsj011	11	0,87535	0,875648	-0,000298	0,05	int
rsj012	12	0,88625	0,891792	-0,005542	0,02	ext
rsj013	13	0,77919	0,800092	-0,020902	0,02	ext
rsj014	14	0,85015	0,840159	0,009991	0,03	dessus
rsj015	15	0,79856	0,805521	-0,006961	0,04	int
rsj016	16	0,78755	0,797737	-0,010187	0,09	ext

nd : aucun point laser correspondant au point de contrôle

ANNEXE II : DONNÉES NUMÉRIQUES



Apposer le CD de données ici