

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**ÉVOLUTION CÔTIÈRE HAUTE RÉOLUTION DE LA RÉGION DE LONGUE-RIVE-  
FORESTVILLE,  
CÔTE NORD DE L'ESTUAIRE MARITIME DU SAINT-LAURENT, QUÉBEC**

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

comme exigence partielle

du programme de Maîtrise en océanographie (M. Sc.)

PAR

ANTOINE MORISSETTE

Octobre 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.



## REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent particulièrement à mon directeur de recherche Pascal Bernatchez qui a su me transmettre sa passion pour les littoraux de la Côte-Nord. Grâce à sa connaissance approfondie de ce grand territoire ainsi qu'à son implication dans le milieu nord-côtier, mes recherches en ont été grandement facilitées. Son attachement profond à ce coin de pays est exceptionnel et ce fut un grand plaisir de travailler avec lui; les discussions que nous avons eu ont été très enrichissantes pour mes recherches actuelles et mes projets futurs. Je veux le remercier aussi tout spécialement pour la confiance qu'il m'a accordée durant la réalisation de mes travaux. Je veux également remercier mon codirecteur de recherche, Patrick Lajeunesse, sa motivation et son esprit scientifique ont été très importants pour moi et pour mon accomplissement durant mon cheminement académique. Mes remerciements vont à Jean-Marie Dubois et Thomas Buffin-Bélangier pour la correction de ce mémoire, ce qui a grandement contribué à son amélioration.

Je tiens également à remercier les différents personnes qui m'ont assisté sur le terrain au cours de mes deux années de recherche, Steeve Dugas, Yan Crousset et Stéphanie Friesinger. L'esprit géographique est imprégné au sein de chacun d'eux et, lors des levés de terrain, leur caractère de grand observateur est une qualité que j'ai beaucoup appréciée. Un grand merci à mon ami Yvon Jolivet pour l'élévation de nos pensées vers les plus hautes strates de l'atmosphère ce qui a grandement contribué à développer ma pensée critique. Des remerciements vont aussi à tous mes amis et à tous les gens qui m'ont supporté durant la réalisation de ce mémoire. Je remercie mon frère pour son grand intérêt envers mes recherches ainsi que pour la correction de



ce mémoire, ma mère pour son support durant les périodes plus difficiles et mon père pour avoir su faire germer la curiosité et l'observation géographique en moi.

La réalisation de ce mémoire a été soutenu financièrement par une bourse personnelle du Fonds de Recherche sur la Nature et les Technologies du Québec. Cette bourse s'est avérée indispensable pour la réalisation des différentes campagnes de terrain sur la Côte-Nord. Le soutien financier de l'Institut des Sciences de la mer de Rimouski a également contribué à l'accomplissement de ce mémoire.

Finalement, je veux dédier la découverte des grands espaces du Québec maritime à la mémoire de Nordet qui fut un fidèle compagnon et assistant de terrain à ses heures durant ces deux années de recherche.

## RÉSUMÉ

Les côtes mondiales sont particulièrement étudiées dans un contexte de changement climatique et de hausse du niveau marin relatif. Au niveau des littoraux québécois, le phénomène d'érosion semble avoir pris de l'ampleur au cours des dernières décennies. En particulier, dans l'estuaire du Saint-Laurent, l'érosion affecte les côtes dominées par les sédiments quaternaires. Ce phénomène entraîne également la destruction d'habitats côtiers d'importance, notamment les marais maritimes. Les impacts socio-économiques de l'érosion se font sentir parmi les communautés côtières en modifiant leur milieu de vie et en menaçant les infrastructures le long des littoraux. Le déplacement de la ligne de rivage et la modification de la géomorphologie de la côte sont conditionnés par plusieurs facteurs environnementaux qui doivent être précisés. Cette étude à haute résolution spatiale et temporelle permet d'évaluer la sensibilité relative des différents types de systèmes côtiers aux processus d'érosion. L'objectif général de ce projet de recherche est de définir les causes et les facteurs environnementaux responsables de l'évolution récente de la position de la ligne de rivage du secteur côtier compris entre Longue-Rive et Forestville, sur la côte nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Pour atteindre cet objectif, une méthodologie utilisant les nouvelles technologies, les systèmes d'information géographique (SIG) ainsi que les photographies aériennes numériques, géoréférencées et orthorectifiées est développée. Cette méthodologie permet d'améliorer la résolution spatiale et temporelle des études d'évolution littorale existantes. La segmentation et la caractérisation de la côte en une variété de systèmes côtiers est l'approche préconisée. L'évolution littorale historique est mise en relation avec la lithostratigraphie et l'artificialité de la côte. Les processus d'origine terrestre et les processus qui originent de l'activité hydrodynamique des eaux côtières sont départagés pour identifier la prédominance des processus d'évolution côtière selon les différents systèmes côtiers.

Un secteur de rivage de la MRC de la Haute-Côte-Nord a été choisi comme laboratoire d'étude pour observer et quantifier les phénomènes d'érosion littorale. La méthodologie de ce projet se base sur les levés de terrain, l'interprétation de photographies aériennes, la vidéographie aéroportée et les SIG. L'intervalle temporel des mesures effectuées s'échelonne entre 1931 et 2004.

Les différents systèmes côtiers du secteur à l'étude sont des côtes rocheuses (4,5 %), des marais maritimes (19 %), des flèches littorales (30 %), des côtes deltaïques (20 %) et des terrasses de plage (19 %). De plus, 7,5 % de côte sont artificialisées. La période de 1930 à 1950 où il y a la formation d'une grande flèche littorale présente des taux d'accumulation tandis que la période de 1950 à 1990 présente de faibles taux d'érosion. Durant la première moitié de la décennie 1990, les taux d'érosion sont plus accentués que tous ceux des intervalles précédents. L'intervalle de 1990 à 1996, montrent une tendance à l'érosion et ce phénomène s'accélère et s'intensifie depuis le début des années 1990. Les mesures prises au moyen de bornes, entre 2000 et 2004, montrent d'une part que le nombre de mesures indiquant de l'érosion est en croissance et que d'autre part les taux d'érosion augmentent pour atteindre des valeurs maximales de 10 mètres/année. Les graphiques érosion/accumulation révèlent que les zones d'érosion sont plus étendues et que l'extension de ces zones s'est opérée durant la dernière décennie. L'artificialité dans un système côtier naturel entraîne une accélération du recul du trait de côte des segments adjacents. Ces constatations montrent que le phénomène d'érosion s'est généralisé et s'est intensifié durant les dernières années.

Un indice d'évolution côtière a été défini à partir de l'amplitude et de la fréquence des courbes d'érosion et d'accumulation. Au moyen de cet indice, les systèmes côtiers les plus sensibles à l'érosion sont dans l'ordre les marais maritimes et les flèches littorales, les terrasses de plage et les côtes deltaïques. Ce sont principalement les processus hydrodynamiques marins, soit les vagues et les surcotes associées aux tempêtes et aux marées de vive eau, les courants de dérive littorale ainsi que la hausse du niveau marin relatif, qui contribuent à la modification de la géomorphologie de ces systèmes côtiers. Quant aux côtes deltaïques, elles sont plutôt dépendantes des processus géomorphologiques terrestres, soit les mouvements de masse, les processus cryogéniques et la dessiccation. La composante lithostratigraphique des côtes deltaïques, l'alternance de lits de sédiments fins composés principalement de sable fin, de silt et d'argile, combinée à la teneur en eau du sol augmente l'indice de sensibilité de ce système côtier.

Les marais maritimes nordiques frangeants et abrités n'évoluent pas en fonction des mêmes processus. Les marais frangeants sont plutôt sensibles à l'action des vagues et des glaces alors que les marais abrités sont plutôt dépendants de l'évolution des flèches littorales et, dans une moindre mesure, ils sont sensibles à la hausse du niveau marin relatif et à l'action des glaces. Cependant, l'action des glaces, le ruissellement et la suffosion sont des processus qui ont un effet sur l'ensemble des marais maritimes nordiques sans égard à leur localisation et leur situation géographique. Ainsi, l'indice d'évolution côtière des marais exposés et protégés est aussi élevé que celui des flèches littorales puisqu'ils répondent rapidement à une multitude de facteurs environnementaux qui conditionnent leur évolution.

Des quatre systèmes côtiers les plus sensibles à l'érosion, deux d'entre eux : les marais maritimes et les terrasses de plage sont en voie de disparaître, entraînant une perte de la diversité

des littoraux et une perte d'habitats côtiers. Pour les 35 années à venir, les systèmes côtiers les plus sensibles à l'érosion sont voués à reculer au rythme minimum de 0 à 2 mètres/année et, ponctuellement, lors d'évènements extrêmes, ils peuvent reculer jusqu'à 70 mètres.

Finalement, ce projet de recherche a permis de développer et de mettre à l'épreuve une méthodologie utilisant les SIG comme outil de mesure pour le déplacement et la modification de la géomorphologie du trait de côte. L'utilisation des orthophotographies numériques comme base de géoréférencement commune pour tous les autres documents cartographiques a permis d'obtenir une précision en deçà de 5 mètres en mesures absolues et en deçà de 1 mètre en mesures relatives. Cette méthodologie devrait donc être utilisée dans la réalisation d'étude d'évolution côtière comme celle-ci.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	v
TABLE DES MATIÈRES.....	viii
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES PHOTOS.....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xii
LISTE DES ANNEXES.....	xiii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Problématique.....	1
1.1.1.Sensibilité des côtes à l'érosion : facteurs et causes.....	1
1.1.2.Érosion côtière au Canada et ailleurs dans le monde.....	4
1.1.3.Érosion côtière au Québec maritime.....	7
1.1.4.Marais maritimes.....	13
1.1.5.Impacts socio-économiques et gestion intégrée au Québec.....	15
1.1.6.Méthodologie et études antérieures.....	17
1.2. Buts et objectifs de l'étude.....	18
2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE.....	20
3. MÉTHODOLOGIE.....	28
3.1. Caractérisation et segmentation côtière au moyen de la vidéographie aéroportée...28	
3.2. Identification des systèmes côtiers.....	32

3.3.	Identification de la ligne de rivage .....	33
3.4.	Photointerprétation multidate et évolution côtière.....	38
3.5.	Sources d'erreur .....	43
3.6.	Analyse spatiale et traitement des données sur le recul des côtes .....	45
3.6.1.	Cartographie.....	45
3.6.2.	Graphiques.....	47
3.7.	Relevés de terrain.....	48
3.7.1.	Bornes de terrain.....	49
3.7.2.	Relevés saisonniers .....	55
3.7.3.	Stratigraphie.....	55
4.	RÉSULTATS.....	56
4.1.	Description et identification des systèmes côtiers .....	58
4.2.	Cartographie de la ligne de rivage (1931-2004) .....	70
4.2.1.	Secteur 1-Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton).....	71
4.2.2.	Secteur 2-Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert.....	77
4.2.3.	Secteur 3-Péninsule de Portneuf .....	82
4.2.4.	Secteur 4-Portneuf-sur-Mer .....	87
4.2.5.	Secteur 5-Falaises de Forestville .....	94
4.3.	Cartographie des marais maritimes (1931-2001).....	97
4.3.1.	Secteur 1-Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton).....	98
4.3.2.	Secteur 2-Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert.....	100
4.3.3.	Secteur 3-Péninsule de Portneuf .....	103

4.3.4.Secteur 4-Portneuf-sur-Mer .....	104
4.4. Évolution côtière et déplacement de la ligne de rivage .....	106
4.4.1.Position du trait de côte .....	107
4.4.2.Taux d'érosion et d'accumulation .....	109
4.5. Évolution côtière et systèmes côtiers.....	124
5. DISCUSSION.....	131
5.1. Évolution côtière.....	133
5.1.1.Causes et facteurs de l'évolution côtière .....	133
5.1.2.Intervalles temporels.....	137
5.1.3.Sensibilité des systèmes côtiers .....	143
5.1.4.Lithostratigraphie à fort potentiel d'érosion .....	147
5.1.5.Position des systèmes côtiers.....	150
5.1.6.Anthropisation des systèmes côtiers .....	153
5.2. Évolution des marais maritimes.....	153
5.2.1.Marais frangeants.....	154
5.2.2.Marais abrités.....	158
5.2.3.Perte d'habitat .....	161
5.2.4.L'humain et les marais.....	162
5.3. Utilisation des SIG dans les études d'évolution côtière .....	163
5.4. Scénarios prévisionnels d'évolution littorale.....	165
6. CONCLUSION.....	166
7. RÉFÉRENCES .....	170



## LISTE DES FIGURES

Figure 1- Sensibilité des côtes canadiennes à la hausse du niveau marin relatif .....	2
Figure 2- Variables retenues pour l'indice de sensibilité à la hausse du niveau marin relatif de Shaw <i>et al.</i> (1998) .....	2
Figure 3- Population vivant à moins de 100 km de la côte.....	6
Figure 4- Micro-habitats des milieux humides .....	6
Figure 5- Zones d'érosion critique pour le Saint-Laurent .....	8
Figure 6- Diversité des littoraux du Québec maritime .....	9
Figure 7- Productivité de différents écosystèmes .....	14
Figure 8- Carte de localisation.....	22
Figure 9- Coupe stratigraphique du secteur à l'étude .....	26
Figure 10- Stratigraphie du complexe deltaïque .....	27
Figure 11- Légende de la cartographie d'évolution côtière.....	46
Figure 12- Répartition des systèmes côtiers de la zone d'étude .....	60
Figure 13- Stratigraphie d'un marais maritime.....	62

## LISTE DES PHOTOS

Photo 1- Glissement de terrain sur la route 138 à l'ouest de Havre-Saint-Pierre.....	16
Photo 2- Maison menacée par l'érosion des côtes à Cap-Colombier .....	16
Photo 3- Enrochement d'une halte routière à Portneuf-sur-Mer .....	16
Photo 4- Installation de piquets repères.....	51

Photo 5- Borne de sécurité.....	51
Photo 6- Ligne de rivage à micro-falaise, Pointe-à-Boisvert.....	52
Photo 7- Débord organique près de la rivière Saint-Jean, Côte-Nord .....	52
Photo 8- Ligne de rivage végétalisée, Longue-Rive.....	53
Photo 9- Côte rocheuse, Longue-Rive.....	59
Photo 10- Marais maritime, Longue-Rive .....	59
Photo 11- Flèche littorale, Portneuf-sur-Mer.....	59
Photo 12- Côte deltaïque, Forestville .....	59
Photo 13- Terrasse de plage, Longue-Rive.....	59
Photo 14- Côte artificialisée, Pointe-à-Boisvert .....	59
Photo 15- Stratigraphie des falaises de Forestville.....	66
Photo 16- Microfalaise active, Longue-Rive .....	67
Photo 17- Haut de plage végétalisé, Pointe-à-Boisvert.....	67

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1- Types de côtes du Québec maritime.....	9
Tableau 2- Synthèse des taux d'érosion pour l'estuaire maritime du Saint-Laurent.....	11
Tableau 3- Attributs de la classification côtière .....	29
Tableau 4- Critères de classification côtière.....	31
Tableau 5- Inventaire des photographies aériennes utilisées.....	39

**LISTE DES ANNEXES**

Annexe 1- Carte géologique du secteur à l'étude.....	180
Annexe 2- Carte de localisation des secteurs cartographiés.....	182
Annexe 3- Cartes de segmentation côtière.....	184
Annexe 4- Coupes stratigraphiques.....	187
Annexe 5- Cartes d'évolution côtière.....	199
Annexe 6- Cartes d'évolution des marais maritimes.....	254
Annexe 7- Graphiques érosion/accumulation.....	259
Annexe 8- Graphiques érosion/accumulation selon les systèmes côtiers.....	276

# **1. INTRODUCTION**

## **1.1. Problématique**

### *1.1.1. Sensibilité des côtes à l'érosion : facteurs et causes*

La majorité des côtes mondiales sont actuellement soumises à l'érosion (Bird, 1985; Komar, 1998; Paskoff, 1994). Les côtes mondiales sont particulièrement étudiées dans un contexte de changement climatique et de hausse du niveau marin relatif. Cette hausse peut se traduire par une augmentation du risque de submersion des littoraux de faible altitude. Au Canada, une étude portant sur la sensibilité des côtes à la hausse du niveau marin relatif a été réalisée (Shaw *et al.*, 1998a) (Figure 1). Cette étude présente un indice de sensibilité des côtes selon un seul facteur environnemental, le niveau marin relatif, alors que le phénomène d'érosion est attribuable à une combinaison de processus (Bernatchez et Dubois, 2004a). Les variables retenues pour le classement du degré de sensibilité des côtes permettent d'identifier les impacts reliés uniquement à la hausse du niveau marin relatif (Figure 2).



Tiré de Shaw *et al.*, 1998a

Figure 1- Sensibilité des côtes canadiennes à la hausse du niveau marin relatif

VARIABLE	Ranking of sensitivity index				
	Very low	Low	Moderate	High	Very high
1 Relief (m)	1 >30	2 21-30	3 11-20	4 6-10	5 0-5
2 Rock type	Plutonic rocks, high-grade metamorphic & volcanic rocks	Metamorphic rocks	Most sedimentary rocks	Poorly consolidated sediments	Unconsolidated sediments, ice
3 Landform	Fjord, high rock cliffs, fiord	Moderate and low rock cliffs	Beach, unconsolidated sediment over bedrock	Barrier, bluffs, salt marsh, peat, mud flat, delta, spit, tombolo	Ice-bonded sediment, ice-rich sediment, ice shelf, tidewater glacier
4 Sea-level change (cm/100 a)	>-50	- 50 to - 20	-19 to +20	21 to 40	>40
5 Shoreline displacement (m/a)	>+0.1 accreting	0 stable	-0.1 to -0.5 eroding	-0.6 to -1.0 eroding	>-1.0 eroding
6 Tidal range (m)	<0.50	0.5-1.9	2.0-4.0	4.1-6.0	>6.0
7 One year maximum wave height (m)	0-2.9	3.0-4.9	5.0-5.9	6.0-6.9	>6.9

Figure 2- Variables retenues pour l'indice de sensibilité à la hausse du niveau marin relatif de Shaw *et al.* (1998a)

Le déplacement de la ligne de rivage est le résultat de l'action d'un ensemble de facteurs. L'équilibre entre les processus eustatiques et isostatiques entraîne des variations du niveau marin relatif (NMR) qui sont à l'origine de transgressions et de régressions, lesquelles ont une influence primordiale sur la géomorphologie et l'évolution des littoraux (Paskoff, 1994). Une hausse accélérée du NMR, associée à la hausse du niveau global des océans observée depuis un siècle (Gornitz, 1995), peut donc entraîner une submersion des terres, une accélération de l'érosion côtière et une modification de la dynamique sédimentaire dans la zone côtière (Environnement Canada, 1999; IPCC, 2001; PNUE, 2002). D'autres conditions géologiques, comme les propriétés géotechniques des sédiments et la lithostratigraphie (Shaw *et al.*, 1998b; Wilcock *et al.*, 1998), l'équilibre entre l'apport en sédiments et l'espace d'accommodation créé (Catuneanu, 2002; Miall, 1997) de même que la physiographie et la pente générale de la côte (Bruun, 1962; Posamentier et Allen, 1993) peuvent grandement influencer les processus et l'intensité de l'érosion côtière ainsi que le recul de la ligne de rivage. L'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes constitue également un facteur d'érosion et de risque de submersion des côtes (Forbes *et al.*, 2004; Hill *et al.*, 2004; Morton et Sallenger, 2003; Paskoff, 2001). Les épisodes de précipitations intenses ainsi que l'instabilité des talus côtiers sont des facteurs déterminants du risque de mouvements de masse dans la zone côtière (Duchesne *et al.*, 2003; Allard, 1984). De plus, la réduction de l'extension et de la durée du couvert de glace de mer causée par le réchauffement climatique fait augmenter le fetch des eaux libres et contribue à intensifier l'énergie des vagues pour l'érosion des côtes

(PNUE, 2002). Au niveau des littoraux des régions froides, la présence d'un pied de glace protège le littoral contre l'érosion des vagues pendant l'hiver. Des changements dans la durée et les conditions de ce pied de glace peuvent conduire à une rétrogradation de la ligne de rivage due à l'érosion (Allard *et al.*, 1998; Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004b; Evans, 1994). Les littoraux des régions froides sont également soumis aux processus cryoclastiques, se traduisant principalement par l'observation de cycles de gel/dégel (Allard *et al.*, 1998; Beaulieu et Allard, 2003) agissant sur les falaises littorales (Bernatchez et Dubois, 2007). La fonte du pergélisol dans les régions nordiques est causée par ces épisodes de redoux hivernaux et par les cycles gel/dégel (Beaulieu et Allard, 2003). De plus, la pression anthropique grandissante sur les zones côtières peut entraîner une accélération de l'érosion et ainsi mettre en danger les populations riveraines à cause de la submersion potentielle des terres (Paskoff, 1994). Ces facteurs forcent donc les côtes d'un estuaire à se réajuster constamment aux nouvelles conditions du milieu (Fletcher *et al.*, 1990). Une intégration des facteurs influençant l'évolution actuelle du littoral et une quantification des processus d'érosion côtière sont donc nécessaires pour établir les causes de l'érosion généralisée des littoraux.

### *1.1.2. Érosion côtière au Canada et ailleurs dans le monde*

Récemment, des taux moyens d'érosion de 0,8 mètre/année ont été mesurés sur les îles barrières de la côte atlantique des États-Unis (Komar, 1998). Sur la côte pacifique du

Canada, les côtes de formations meubles sont majoritairement en érosion. Durant une seule tempête, un recul moyen de 12 mètres du profil côtier a été mesuré dans la région de Prince Rupert (Barrie and Conway, 2002). Sur l'Île-du-Prince-Édouard, les dunes de la région de Malpèque ont reculé de plus de 5 mètres entre 1987 et 1999 (Catto *et al.*, 2002). Dans les Maritimes, une intensification de l'érosion a été enregistrée dans les grands ensembles dunifiés (Dagneau *et al.*, 2004). Dans le Parc national de Kouchibouguac au Nouveau-Brunswick, entre 1998 et 2000, un recul net de la côte de 15 mètres a été mesuré (Dagneau *et al.*, 2004). Entre 1998 et 1999, un recul de plus de 10 mètres s'est produit dans les dunes de l'Île-du-Prince-Édouard (Dagneau *et al.*, 2004). En Nouvelle-Écosse, à l'annexe côtière de Kejimikujik, des recul côtiers élevés, mais plus variables ont été mesurés dans les ensembles dunifiés. Les reculs nets varient entre 1 et 8 mètres pour la période allant de 1995 à 1999 (Dagneau *et al.*, 2004). Ce sont des données inquiétantes, considérant qu'en 1995, 39 % de la population mondiale vivait à moins de 100 kilomètres d'une côte (Figure 3) (CIESIN, 2000 ; WRI, 2005), ce qui est supérieur à toute la population mondiale en 1950 (Cohen *et al.*, 1997). Au Canada, près de 25 % de la population et environ 55 % de celle des États-Unis vivent dans les zones côtières (CEQ, 1997; Environnement Canada, 1999). De plus, les littoraux sont des écosystèmes très variés offrant une multitude d'habitats pour différentes espèces faunistiques et floristiques (Hughes, 1999; Keddy, 2000; PNUE, 2002) (Figure 4).



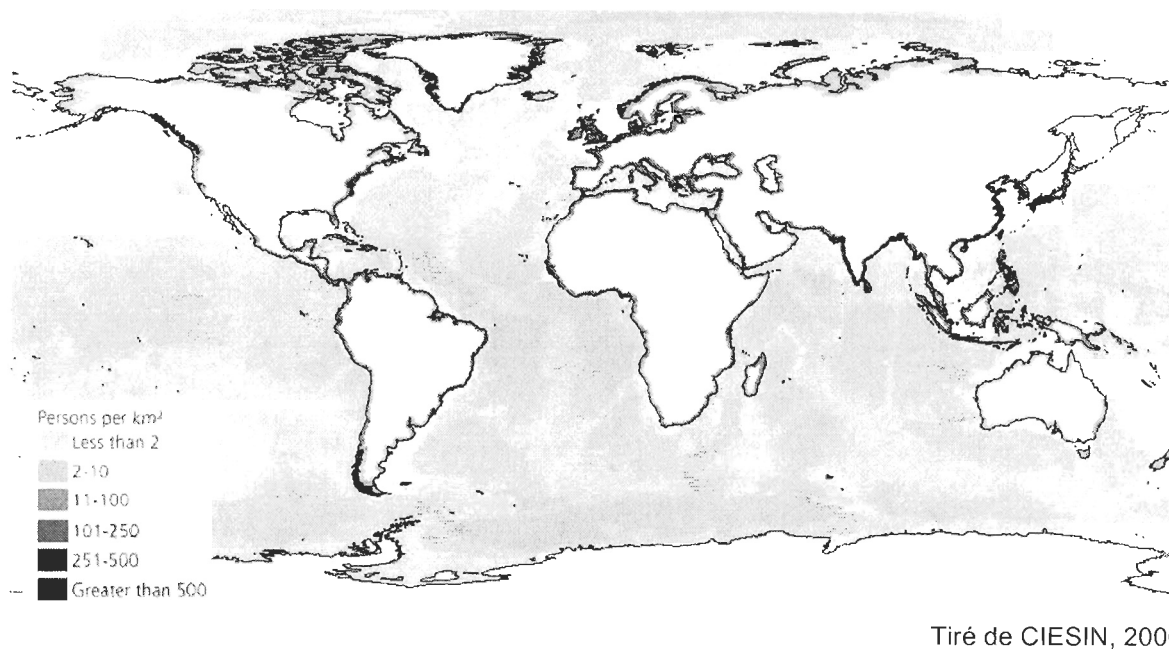


Figure 3- Population vivant à moins de 100 km de la côte

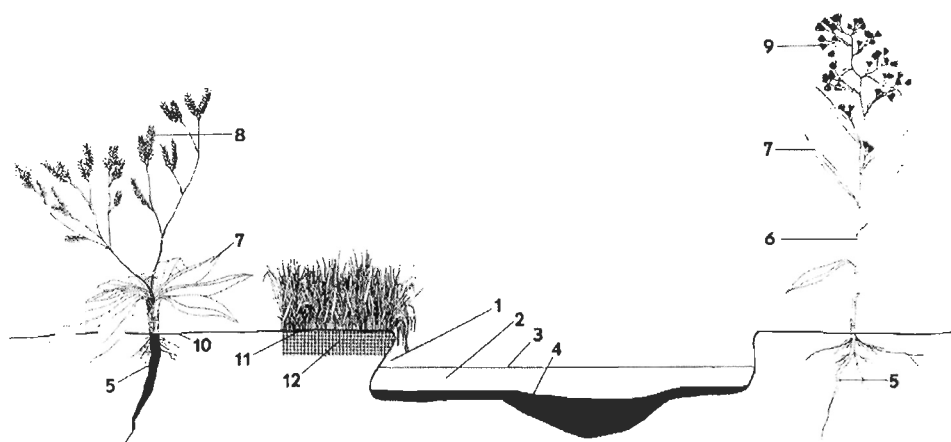


Fig. 7.1 Microhabitats in the saltmarsh: (1) underneath the overhanging margin of a pan; (2) permanent water (micro-pelagial); (3) water surface (epineustal); (4) organic mud on bottom of pan; (5) roots and rhizosphere; (6) plant stems; (7) leaves; (8) flowers; (9) seeds; (10) soil surface under relatively open vegetation; (11) soil surface under dense vegetation; (12) major rooting zone.

Tiré de Adam, 1990

Figure 4- Micro-habitats des milieux humides

### 1.1.3. Érosion côtière au Québec maritime

Au niveau des littoraux québécois, le phénomène d'érosion semble avoir pris de l'ampleur au cours des dernières décennies (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004b; Dionne et Bouchard, 2000; Dubois *et al.*, 2005). Sur l'ensemble du Saint-Laurent, l'érosion affecte particulièrement les côtes formées dans les sédiments quaternaires (Bernatchez et Dubois, 2004b; Dubois, 1999). Les côtes du Québec représentent 5,6 % du littoral canadien, c'est-à-dire 13 773 km mesurés à l'échelle du 1 : 250 000 (Dubois, 1993). Les côtes du fleuve Saint-Laurent représentent près de la moitié de toutes les côtes québécoises, soit 6 772 km (Dubois, 1993). La tendance à l'érosion généralisée sur les rives du Saint-Laurent (Figure 5) est vérifiable. La segmentation du littoral québécois en grands types de côtes permet de faire état de la diversité des côtes (Tableau 1 et Figure 6). La diversité des littoraux du Québec maritime laurentien, et plus particulièrement de la rive nord du Saint-Laurent (Bernatchez et Quintin, 2005), fournit un excellent laboratoire pour étudier la relation entre l'intensité de l'érosion des côtes et les différents facteurs environnementaux qui la conditionnent.

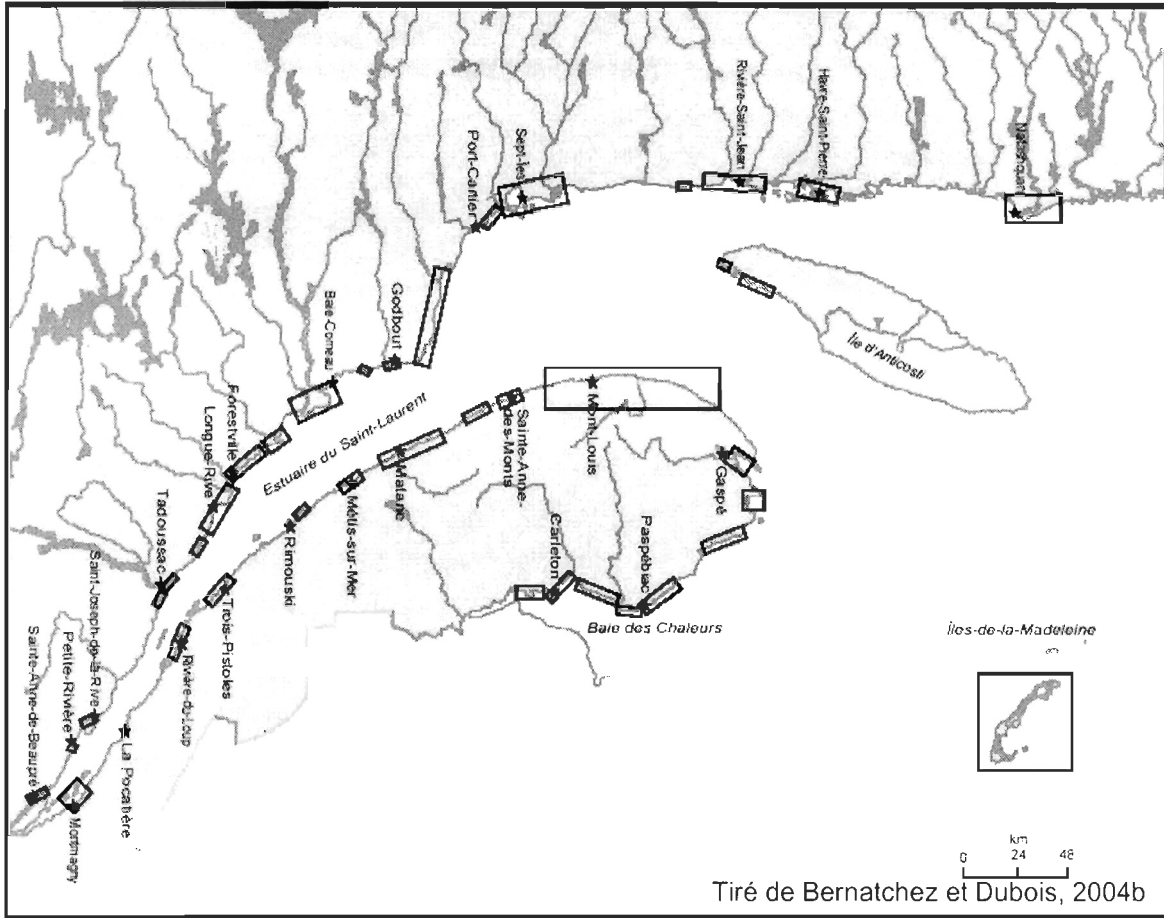


Figure 5- Zones d'érosion critique pour le Saint-Laurent

Tableau 1- Types de côtes du Québec maritime

TYPES DE CÔTES	GRANDS TYPES DE CÔTES
Côte à terrasse de plage avec marais maritime Côte à terrasse de plage avec lagune Côte à terrasse de plage à base rocheuse Côte à terrasse de plage	Côte à terrasse de plage
Côte à flèche littorale avec marais maritime Côte à flèche littorale avec lagune Côte à flèche littorale	Côte à flèche littorale
Côte à tombolo avec marais maritime Côte à tombolo	Côte à tombolo
Côte à marais maritime frangeant Côte à marais maritime abritée Côte à moyenne terrasse argileuse avec marais maritime Côte à moyenne terrasse argileuse Côte à basse terrasse argileuse avec marais maritime	Côte à marais maritime
Côte de till Côte rocheuse à fjord avec marais maritime Côte rocheuse à fjord	Côte glaciaire
Côte deltaïque glacio-marine Côte deltaïque avec marais maritime Côte à basse terrasse argileuse Côte deltaïque	Côte deltaïque
Côte rocheuse à marais maritime Côte à falaise rocheuse Côte à falaise rocheuse avec marais maritime Côte à très haute falaise rocheuse avec marais maritime Côte rocheuse avec dépôts meubles Côte rocheuse	Côte rocheuse

Tiré de Bernatchez et Quintin, 2005

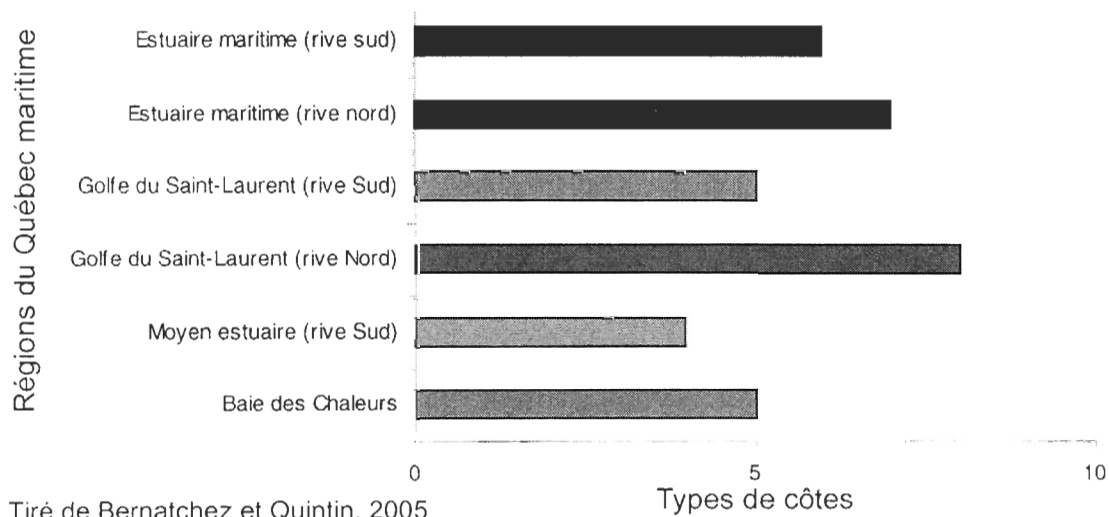


Figure 6- Diversité des littoraux du Québec maritime

À cet effet, une cartographie de l'évolution de la ligne de rivage de la Côte-Nord a déjà été réalisée dans le cadre d'une entente spécifique sur l'érosion des berges intervenue entre cinq ministères provinciaux (Dubois *et al.*, 2005), soit le ministère des Affaires municipales, des régions et de la Métropole, de l'Environnement, de la Sécurité publique, des Transports et celui des Ressources naturelles. Cette cartographie a permis de mesurer des taux de recul de la côte entre 1931 et 1964-1965 ainsi qu'entre 1964-1965 et 1996. Ainsi, les taux maxima moyens annuels de recul de la côte entre 1931 et 1996 ont été de 1 m. D'autres études d'évolution côtière ont également été réalisées sur la côte nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Les synthèses de Bernatchez (2003a) et de Bernatchez et Dubois (2004b) font état des travaux réalisés sur ce territoire et permettent de comparer les résultats de la présente étude avec les différents travaux portant sur l'érosion côtière réalisés à l'intérieur du système du Saint-Laurent (Tableau 2).

Tableau 2- Synthèse des taux d'érosion pour l'estuaire maritime du Saint-Laurent

Secteurs	Recul moyen annuel (m) (type de milieu)	Période et technique utilisée	Références
<u>Côte-Nord</u>			
Baie de Mille-Vaches	0,85 à 1,35 (schorre)	1931-1996 (photo)	Hardy <i>et al.</i> , 1998
Baie Laval	0,77 à 1,15 (schorre)	1964-1990 (photo)	Lamontagne, 1996
Pointe-à-Boisvert	0,77 à 2,3 (microfalaise)	1964-1990 (photo)	Lamontagne, 1996
Ouest de Forestville	0,2 à 0,6 (falaise)	1931-1987 (photo)	Soucy, 1988
	moy. : 0,4		
Ouest de Forestville	0,31 (falaise)	1931-1996 (photo)	Hardy <i>et al.</i> , 1998
Ouest de Forestville	0,6 (falaise)	1964-1990 (photo)	Savard, 1998
Ragueneau	0,3 à 0,6 (falaise)	1947-1977	Raynald, 1977
Ragueneau	4,1 (falaise)	1977-1981 (topo)	Long, 1983
Ragueneau	0,25 à 3,9 (falaise)	1976-1982 (topo)	Long <i>in</i> Tremblay, Deschênes et Associés, 1988
Ragueneau	0,3 à 2,6 (falaise)	1977-1986 (topo)	Hart, 1987
Ragueneau Ouest	0,80 à 2,2 (falaise)	1965-1992 (photo)	Lavallée, 1993
Ragueneau Est	0,2 à 0,6 (falaise)	1965-1992 (photo)	Lavallée, 1993
Ragueneau	1,9 (falaise)	(photo)	Morneau, 1999a
Ragueneau	1,65 (falaise)	1998-1999 (piquets, mesures directes)	Bernatchez et Dionne, 1999
Ragueneau	0,5 à 2,6 (falaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 1,3		
Ragueneau-Chute-aux-Outardes	0,3 à 0,5 (falaise)	Inconnu	Allard, 1984
Chute-aux-Outardes	1,9 (falaise)	Inconnu	Long, 1983
Chute-aux-Outardes	0,15 à 1,8 (falaise)	(photo)	Hart, 1987
Chute-aux-Outardes-Ragueneau	0,7 à 1,2 (falaise)	1977-1983 (topo)	Bérubé, 1983
Chute-aux-Outardes-Ragueneau	0,7 à 0,75 (falaise)	Topométrie	Long, 1982
Chute-aux-Outardes-Ragueneau	0,7 (falaise)	1935-1965 (photo)	Chagnon <i>et al.</i> , 1979
Chute-aux-Outardes-Ragueneau	0,35 à 0,75 (falaise)	1965-1978 (photo)	Chagnon <i>et al.</i> , 1979
Pointe-aux-Outardes	0,2 à 0,6 (falaise)	1982-1985 (piquets)	Dubois, 1999
Pointe-aux-Outardes	0,31 à 0,46 (falaise)	1931-1996 (photo)	Hardy <i>et al.</i> , 1998
Pointe-aux-Outardes	0,6 à 1,1 (falaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 0,9 (falaise)		
Pointe-aux-Outardes	0,5 (microfalaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
Pointe-aux-Outardes	0,64 (falaise)	1980-1996 (piquets)	Naturam Env., 1997

Pointe-aux-Outardes	0,1 à 2,15 (falaise)	1980-1981(piquets)	Hart, 1987
Pointe-aux-Outardes	0,98 (falaise)	1980-1981(piquets)	Roy et Desmeules, 1982
Pointe-aux-Outardes	0,5 à 2 (falaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. :1,3 (falaise)		
Pointe-aux-Outardes	0,6 à 2,6 (microfalaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. :1,4 (microfalaise)		
Baie Saint-Ludger	0,92 à 1,08 m (falaise)	1931-1996 (photo)	Hardy <i>et al.</i> , 1998
Baie-Saint-Ludger	0,75 (falaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
Baie Saint-Ludger	0,5 (falaise)	1989-1994 (photo)	Roche, 1997
Baie-Saint-Ludger	0,3 à + 1,5 (falaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. >1 (falaise)		
Baie-Saint-Ludger	0,5 à 1,7 (microfalaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 1		
Pointe Paradis	0,5 à 2,5 (microfalaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. :1,4		
Pointe Manicouagan	0,2 à 7,1 (microfalaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. :1,9		
Pointe-Label	0,35 (falaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
Pointe-Label	2,4 (falaise)	1982-1985 (piquets)	Dubois, 1994 <i>in</i> Bernatchez et Baker, 1995
Pointe-Label	0,6 à 1,2 (microfalaise)	1931-1965 (photo)	Hardy <i>et al.</i> , 1998
Pointe-Label	0,45 (haut de falaise) et 0,7 à 2,5 (bas de falaise) et 0,8 (microfalaise)	1996-2000 (photo et relevés de terrain)	Bernatchez, 2000b
Pointe Label	0,1 à 0,2	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
Pointe Label	1,9 à 2,9 (microfalaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 2,35		
Anse à la Peinture	0,5 à 0,6 (falaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 0,55 (falaise)		
Anse à la Peinture	0,8 à 2,9 (falaise)	1998-2001	Bernatchez, 2003a
	moy. : 2		
Anse à la Peinture	1,2 à 3,6 (falaise)	1996-2000 (photo)	Bernatchez, 2000b
	moy. : 2,5 (falaise)		
Anse à la Peinture	0,8 à 3,55 (falaise)	1998-2000 (piquets)	Bernatchez, 2000b
Péninsule de Manicouagan—Ragueneau	0,2 à 1,9 (falaise)	1931-1988 (photo)	Gronin <i>et al.</i> , 1990
Front péninsule de Manicouagan	0 à 4,0 (falaise)	1993-1994 (piquets)	Bernatchez et Baker, 1995
Front péninsule de Manicouagan	0,8 à 1,6 (falaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 1,1		
Front péninsule de Manicouagan	1,7 à 3,3 (microfalaise)	1998-2001 (piquets)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 2,45		

Front péninsule de Manicouagan	1,54 (falaise)	1931-1996 (photo)	Hardy <i>et al.</i> , 1998
Front péninsule de Manicouagan	0,4 à 1,35 (falaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 0,8 (falaise)		
Front péninsule de Manicouagan	0,1 à 0,7 (falaise)	1931-1996 (photo)	Bernatchez, 2003a
	moy. : 0,45 (falaise)		
Berge ouest estuaire de la Manicouagan	+ de 0,8 (falaise)	1981-1985 (piquets)	Dubois, 1999
<u>Côte sud</u>			
Estuaire maritime	0,25 à 0,5 m (schorre)	Inconnu	Dionne, 1999

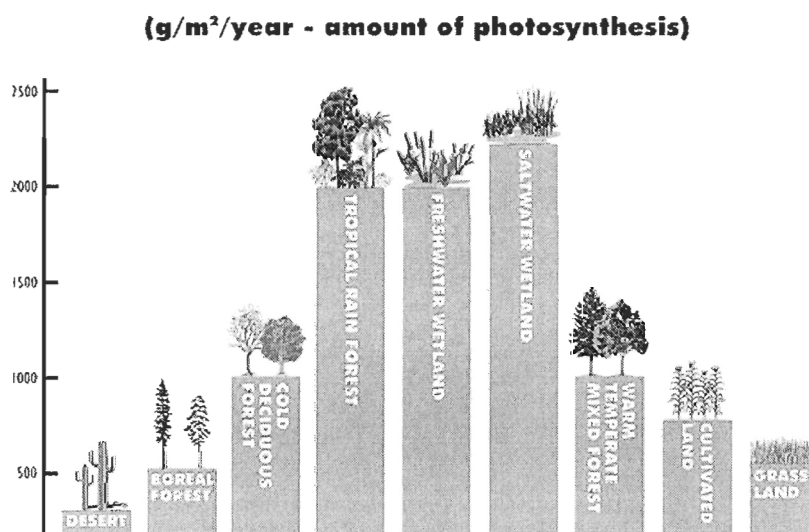
Tiré de Bernatchez et Dubois, 2004b

#### 1.1.4. Marais maritimes

D'un point de vue écologique, la destruction des marais maritimes engendrée par l'érosion des berges se traduit directement par une perte d'habitat (Adam, 2002), puisque les fonctions écologiques de cet écosystème assurent la survie d'une multitude d'espèces endémiques (Keddy, 2000). De plus, les marais et les marécages sont parmi les écosystèmes les plus productifs sur la planète (Figure 7). La quantité de photosynthèse effectuée par les marais côtiers avoisine 2 250 g/m<sup>2</sup>/an. Les espèces endémiques aux marais maritimes servent également de nourriture aux oiseaux migrateurs, par exemple, la grande oie des neiges (*Chen caerulescens atlantica*). Près du Saint-Laurent, elles s'alimentent surtout du rhizome des scirpes (*Scirpus spp.*). À l'aide de leur bec pointu, elles tirent les racines des vases épaisses du schorre supérieur et inférieur des marais maritimes (Service canadien de la faune, 2005). Elles sont donc un agent d'érosion non



négligeable responsable du recul du schorre supérieur dans les marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent (Dionne, 1985). Les marais sont également utilisés comme lieu de reproduction et comme pouponnière pour plusieurs espèces d'oiseaux, de poissons, de petits mammifères, d'invertébrés et d'insectes. L'étude de l'évolution historique des marais maritimes doit donc être un aspect important des programmes de gestion des habitats côtiers. En outre, peu d'études à hautes résolutions spatiale et temporelle ont porté sur la dynamique de l'évolution des marais, particulièrement sur la côte nord du fleuve Saint-Laurent.



Tiré de Amigos de Bolsa Chica, 2006

Figure 7- Productivité de différents écosystèmes

### *1.1.5. Impacts socio-économiques et gestion intégrée au Québec*

Les impacts socio-économiques de l'érosion côtière se font sentir de plusieurs façons au Québec, soit par la modification du tracé des routes longeant le littoral (Photo 1), par la protection de certaines infrastructures ferroviaires, par la relocalisation d'habitations mises en danger (Photo 2) ainsi que par la construction d'infrastructures de protection le long des côtes du Saint-Laurent (Photo 3).

Dans un contexte de changement climatique et de hausse du niveau marin relatif, le Québec maritime doit se doter d'études d'évolution littorale dans le but de comprendre les changements qui ont eu lieu depuis le début de l'Holocène pour mieux gérer l'avenir. Ce type d'étude pourra permettre une saine gestion du territoire et de mettre en perspective les scénarios élaborés par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) et l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Par la même occasion, cette gestion doit se dérouler au regard d'études qui permettent une meilleure compréhension du littoral québécois. Cette gestion doit non seulement intégrer les différentes connaissances acquises sur le territoire, mais aussi être basée sur une collaboration continue entre les différents acteurs des milieux gouvernementaux, municipaux, communautaires et environnementaux. Dans ce sens, un projet pilote du gouvernement du Québec a été réalisé sur la Côte-Nord (Dubois *et al.*, 2005).



Photo : Ministère des Transports du Québec

Photo 1- Glissement de terrain sur la route 138 à l'ouest de Havre-Saint-Pierre



Photo 2- Maison menacée par l'érosion des côtes à Cap-Colombier

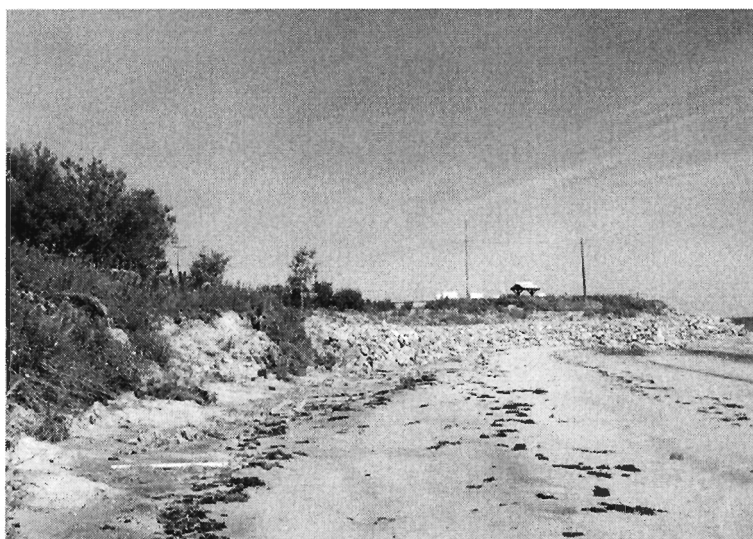


Photo 3- Enrochement d'une halte routière à Portneuf-sur-Mer

### 1.1.6. Méthodologie et études antérieures

Plusieurs études portant sur l'évolution côtière ont utilisé des documents de faible résolution spatiale (Grenier et Dubois, 1990). La résolution temporelle et spatiale ainsi que les techniques de prises de données de ces études ne présentaient donc pas une précision suffisante pour établir les tendances futures de l'évolution côtière et définir les causes de l'évolution historique (Grenier et Dubois, 1990). Dans le même ordre d'idée, la réalisation de l'entente spécifique sur l'érosion des berges pour la Côte-Nord (Dubois *et al.*, 2005) a permis de mesurer des taux de recul annuels sur de grands intervalles temporels. Les intervalles étudiés sont ceux de 1931-1965 et 1965-1996, ce qui correspond à un intervalle temporel moyen de 33 ans. L'utilisation de mosaïques de photographies aériennes et de calques de photointerprétation, qui sont par la suite géoréférencés, permet d'étudier de grands territoires, mais la précision accordée au déplacement de la ligne de rivage en est diminuée. Les taux de recul moyens calculés sur de grands intervalles entre les couvertures aériennes peuvent être raffinés en ajoutant toutes les années de couvertures aériennes disponibles entre les années déjà interprétées, ce qui permet de diminuer l'intervalle de temps sur lequel la moyenne est calculée. De plus, dans les études antérieures utilisant les photographies aériennes (Tableau 2), la précision associée au géoréférencement des mosaïques de photographies aériennes et à la photointerprétation classique était basée sur les cartes topographiques qui ont une marge d'erreur élevée. Lors du géoréférencement et de la cartographie des données de photointerprétation, l'utilisation de la position des entités géographiques des cartes topographiques ne permet pas d'atteindre une précision plus

élevée que 20 mètres dû à l'imprécision dans le positionnement de ces mêmes objets (Dubois *et al.*, 2005). La résolution spatiale de ces études doit tenir compte de cette erreur et, par conséquent, leur résolution spatiale ne peut être inférieure à 20 mètres au sol. Grâce à l'avènement des photographies aériennes numériques et géoréférencées, les orthophotographies, la résolution spatiale des études et des travaux de photointerprétation peut se raffiner et la marge d'erreur peut être ainsi considérablement diminuée en utilisant les orthophotographies comme base de géoréférencement pour les photographies aériennes en format papier.

## **1.2. Buts et objectifs de l'étude**

Dans ce mémoire, une amélioration de la résolution spatiale et temporelle dans la prise des données de photogrammétrie pour l'évolution côtière est présentée. Au Québec maritime, les travaux de Bernatchez (1995; 1998; 2000; 2003a; 2003b; 2004; Bernatchez et Baker, 1995; Bernatchez et Dionne, 1999; Bernatchez et Leblanc, 2000; Dubois *et al.*, 2005), utilisent depuis plusieurs années des relevés de terrain annuels sur différents sites d'études sur la côte nord de l'estuaire maritime et du golfe du Saint-Laurent. Ce projet se veut un approfondissement des données acquises sur l'érosion des côtes depuis plusieurs années (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004b; Bernatchez et Dubois, 2007; Dionne, 1986; Dionne, 2000; Dionne et Bouchard, 2000; Dubois, 1979; Dubois, 1999; Dubois *et al.*, 2005) et sur un secteur du littoral nord côtier déjà investigué par différents

auteurs (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004b; Dionne *et al.*, 2004; Dubois *et al.*, 2005; Hardy *et al.*, 1998; Lamontagne, 1996; Savard, 1998; Soucy, 1988). Les résultats des précédentes études ont permis de mettre en lumière les taux d'érosion littorale du secteur ainsi que des processus littoraux encore méconnus dans les zones de hautes latitudes. Il est nécessaire de poursuivre et de préciser l'analyse de données pour permettre une meilleure connaissance de la sensibilité et de la vulnérabilité des rives du Saint-Laurent à l'érosion.

L'objectif général de ce projet de recherche est de définir les causes et les facteurs environnementaux responsables de l'évolution récente de la position de la ligne de rivage du secteur côtier compris entre Longue-Rive et Forestville, sur la côte nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

Les objectifs spécifiques sont :

- Objectif 1 : Analyser les liens entre les taux d'érosion, les types de systèmes côtiers et la lithostratigraphie.
- Objectif 2 : Départager les systèmes côtiers qui ont évolué de façon naturelle de ceux dont l'évolution a été influencée par l'intervention humaine.
- Objectif 3 : Départager les causes de l'érosion du littoral reliées aux processus d'origine terrestre de celles reliées à l'activité hydrodynamique des eaux côtières.
- Objectif 4 : Comparer l'évolution des marais maritimes exposés et protégés et définir la perte ou le gain de superficie.

Ces objectifs sont réalisés dans le but d'évaluer la sensibilité et la vulnérabilité relatives des différents types de systèmes côtiers aux changements climatiques et aux processus d'érosion à partir d'un indice d'évolution littorale. Les causes de l'érosion sévissant le long du littoral pourront être identifiées, caractérisées et les processus actifs en zone côtière pourront être associés directement aux types de systèmes côtiers, afin de pouvoir décrire et comprendre les processus déterminants de l'évolution littorale de ces systèmes. Dans le but de représenter les liens entre les causes et les effets de l'érosion côtière, le développement d'une méthodologie utilisant un système d'information géographique (SIG) pour retracer les déplacements de la ligne de rivage permettra une visualisation synthétique des relations entre l'évolution littorale historique et les processus responsables des déplacements du trait de côte.

## **2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE**

Dans le cadre de la présente étude, un secteur de rivage de la MRC de la Haute-Côte-Nord a été choisi comme laboratoire d'étude pour observer et quantifier les phénomènes d'érosion littorale. Cette portion de côte se situe entre les municipalités de Longue-Rive et de Forestville sur la rive nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent (Figure 8). Cette côte fait principalement face à l'est, mais il est possible de la diviser plus précisément en quatre secteurs, ayant chacun leur propre orientation, qui diffèrent légèrement de l'orientation générale de la côte. Ces secteurs sont présentées du sud-ouest vers le nord-est

de la côte. Le secteur de côte compris entre la baie des Bacon et la baie de Mille-Vaches montre une orientation de  $130^\circ$  soit face au sud-est. Les flèches littorales de la pointe à Émile et de la pointe à Boisvert ont toutes deux une orientation de  $180^\circ$  soit face au sud. Le secteur de la côte entre la pointe à Boisvert et l'embouchure de la rivière Portneuf a la même orientation que le premier secteur soit  $130^\circ$ . La grande flèche littorale de la barre de Portneuf fait face à l'est avec une orientation de  $100^\circ$ . Finalement, les falaises de Forestville, soit entre l'embouchure de la rivière Portneuf et le quai de Forestville, ont une orientation identique à celle de la barre de Portneuf.



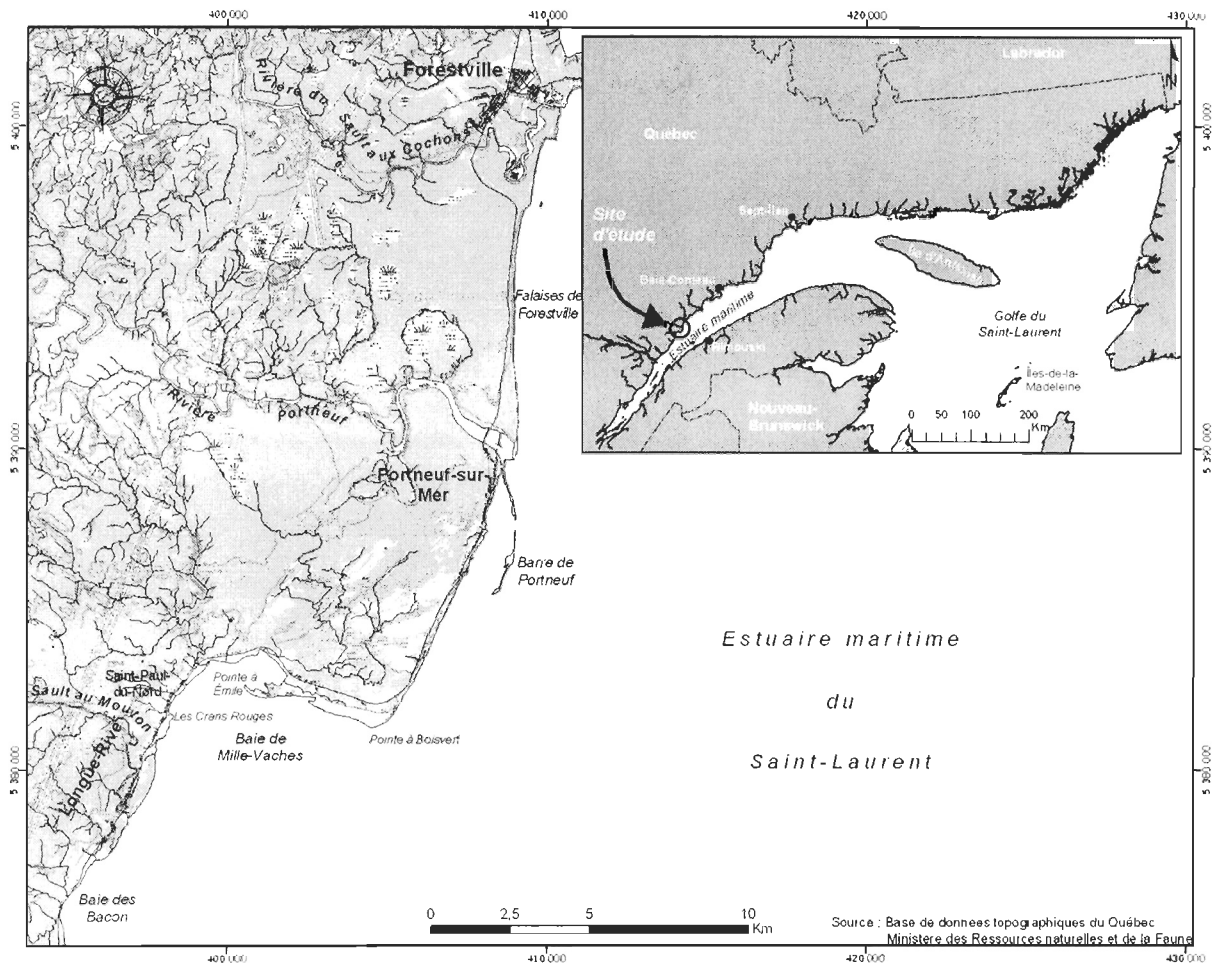


Figure 8- Carte de localisation

La longueur de la côte étudiée a été mesurée de manière numérique sur les orthophotographies ayant une résolution de 1 mètre. Ainsi, la côte qui s'étend de la baie des Bacon jusqu'au quai de Forestville, en excluant la flèche littorale de Portneuf-sur-Mer, a une longueur de 43,648 km. La barre de Portneuf, à cause de sa configuration et de sa géomorphologie, c'est-à-dire une flèche littorale détachée de la côte, présente une ligne de rivage face à la mer et une ligne de rivage vers l'intérieur des terres. Cette flèche littorale a

donc un trait de côte de 8,314 km. La longueur totale de la côte étudiée est donc de 51,962 km.

De façon générale, la géologie de la zone côtière est caractérisée par des dépôts meubles d'origine quaternaire (Dionne *et al.*, 2004; Rondot, 1986) (Annexe 1). Ces formations représentent une bande côtière d'environ un kilomètre dans le secteur de la baie des Bacon et de la baie de Mille-Vaches et une bande d'environ cinq kilomètres pour les autres secteurs. Elles sont d'origine marine et deltaïque, issues de la Mer de Goldthwait, ainsi que littorale prenant surtout la forme de cordons littoraux (Dionne *et al.*, 2004). Des dépôts organiques, principalement des tourbières, sont aussi concentrés entre la pointe à Boisvert et l'embouchure de la rivière Portneuf et près de la rivière du Sault aux Cochons.

Les affleurements du substratum rocheux sont sporadiques sur le littoral et sont plutôt situés à une distance considérable de la côte. Les affleurements rocheux ainsi que les formations rocheuses retrouvés dans le secteur ne seront décrits que brièvement, car les processus d'érosion littorale n'y ont que peu d'influence. Toutes les formations rocheuses décrites sont d'origine précambrienne et elles appartiennent à la province géologique de Grenville. Celle-ci est une province très importante au Québec, puisque les deux tiers de cette province affleurent au Québec. Dans le secteur à l'étude, il y a présence de deux affleurements d'importance en milieu côtier : un affleurement dans le village de Saint-Paul-du-Nord dans la municipalité de Longue-Rive et un autre affleurement situé aux abords de la ville de Forestville. L'affleurement du secteur de Saint-Paul-du-Nord constitue un cap

nommé Les Crans Rouges. Ce cap est formé de roches appartenant à la formation de Saint-Paul-du-Nord et à la formation du Moulin-à-Baude. La formation de Saint-Paul-du-Nord se compose de roches métamorphiques soit du gneiss granitique. Du côté nord, il y a un affleurement rocheux de plus faible superficie constitué de gneiss à biotite et de conglomérats qui appartient à la formation du Moulin-à-Baude. L'affleurement du secteur de Forestville est composé de roches appartenant au complexe de Tadoussac (Figure 9). La présence de failles est notable dans cet affleurement rocheux. Les roches du complexe de Tadoussac sont des migmatites granitiques de couleur rose (Rondot, 1986).

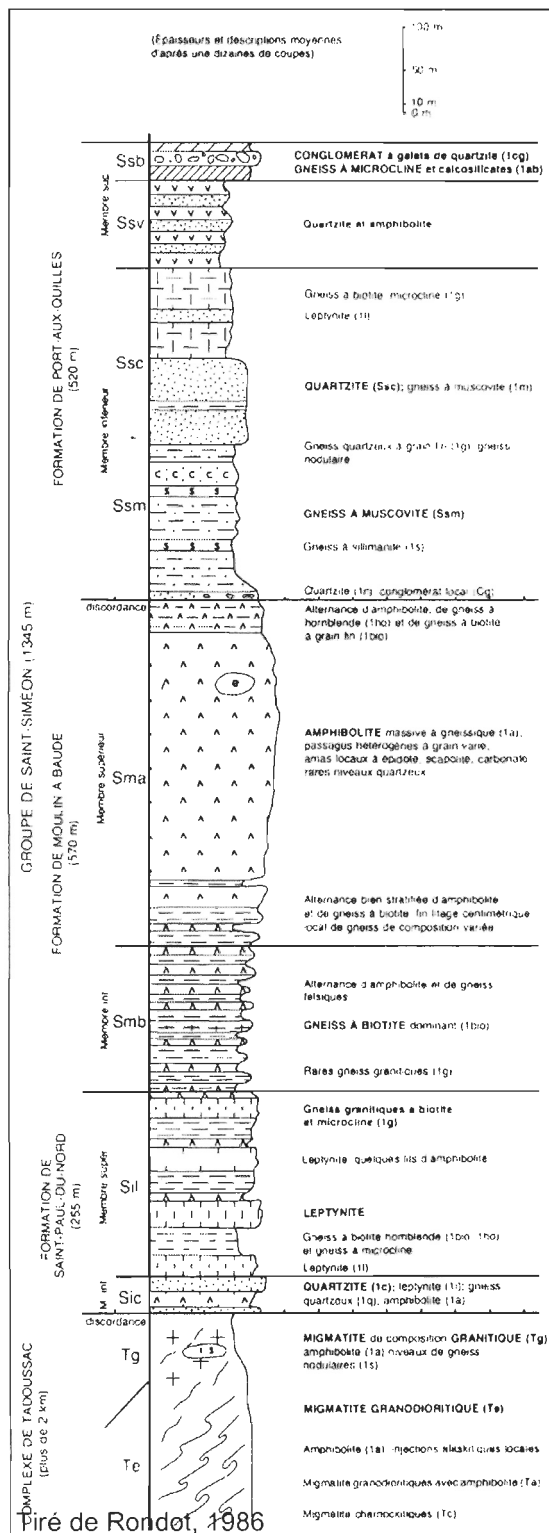


Figure 9- Coupe géologique du secteur à l'étude

La présence des formations meubles et du substratum rocheux sous-jacent permet d'expliquer la topographie de la zone à l'étude et de diviser le secteur de Longue-Rive-Forestville en deux grands ensembles physiographiques par une ligne de démarcation SSO-NNE. Un premier ensemble est caractérisé par un relief de plaine côtière formé par le complexe deltaïque des rivières Portneuf et du Sault aux Cochons et un second situé dans l'arrière-pays présentant un relief de basses collines.

Sur la plaine deltaïque, sise sur une base silto-argileuse, un mauvais drainage des terres favorise la stagnation des eaux dans les dépressions et l'accumulation de dépôts organiques entraînant la formation de tourbières. La stratigraphie du complexe deltaïque présente les dépôts deltaïques et prodeltaïques ainsi qu'une couche de dépôts littoraux au sommet (Figure 10). Au-delà de cent quarante mètres d'altitude, les dépôts glaciaires n'ont pas été remaniés (Bernatchez, 2003a). C'est à cette altitude que la Mer de Goldwaith a atteint son niveau maximal dans le secteur (Dionne *et al.*, 2004). La ligne de transport d'énergie suit sensiblement l'avancée maximale de la Mer de Goldthwait (Rondot, 1986).

Dans les basses collines du Bouclier canadien, des placages de till sont présents dans certaines vallées ainsi que dans les cuvettes dues au modelé du paysage glaciaire. Les nombreux affleurements rocheux de cette région présentent plusieurs plissements et failles. L'altitude du relief de ces basses collines s'abaissent de trois cents mètres à cent cinquante mètres de l'ouest vers l'est. À la limite de la plaine deltaïque, la première unité physiographique, les altitudes atteignent soixante-quinze mètres à la limite. La pente

générale du secteur est de 1,25 % vers l'ESE, mais celle des falaises de Forestville est de l'ordre de 15 %.

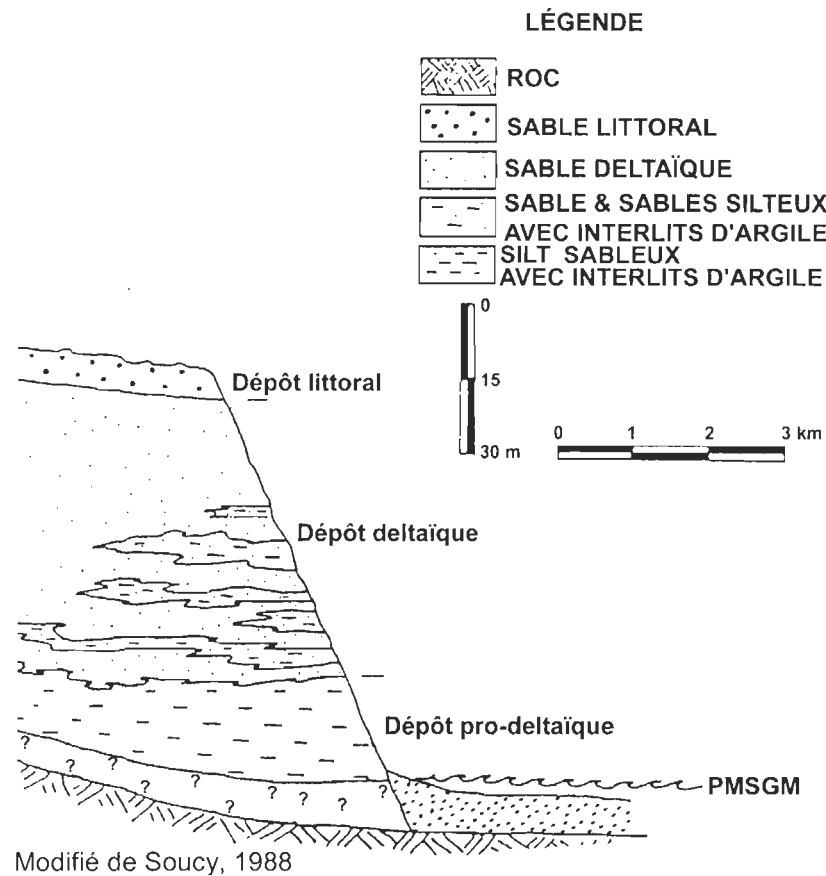


Figure 10- Stratigraphie du complexe deltaïque de Forestville

La région à l'étude est caractérisée par la présence de trois rivières d'importance soit celles du Sault aux Cochons, Portneuf et du Sault au Mouton (Figure 8). Ces rivières se sont encaissées de quarante-cinq à soixante mètres dans les dépôts d'origine marine et deltaïque. Les eaux d'écoulement provenant de la fonte du glacier lors de dernière déglaciation ont permis de mettre en place le complexe deltaïque présent entre les rivières

Portneuf et du Sault aux Cochons. Ce complexe deltaïque s'étend de Forestville jusqu'à la péninsule de Portneuf. Dans l'arrière-pays, plusieurs affleurements rocheux témoignent de la présence du Bouclier canadien. Ce paysage présente donc des collines de faibles altitudes, au travers desquelles les rivières ont tracé leur passage jusqu'à la mer pour former un réseau hydrographique de type dendritique en utilisant les dépressions et les axes de faiblesses du substratum rocheux.

### **3. MÉTHODOLOGIE**

La méthodologie utilisée se base sur les levés de terrain, la photointerprétation, les relevés aéroportés et la géomatique. L'intégration des données et l'analyse spatiale se font à l'aide d'un SIG. Le traitement des données de terrain ainsi que celles recueillies par photointerprétation a été fait séparément dans le but de comparer chaque méthode de mesure et de préciser les données retenues par photointerprétation.

#### **3.1. Caractérisation et segmentation côtière au moyen de la vidéographie aéroportée**

La vidéographie aéroportée est une technologie consistant à réaliser des survols aériens à basse altitude à l'aide d'une caméra numérique (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004a; Dubois *et al.*, 2005). La résolution des images numériques ainsi créées dépend de la hauteur du survol ainsi que du type de caméra (Désilets, 2004). Les images

utilisées dans le cadre de ce mémoire ont directement été géoréférencées pendant le vol et permettent une vision stéréoscopique à l'écran à l'aide du logiciel Cyclop-3D. Ces images sont ensuite analysées afin d'obtenir une classification côtière, laquelle attribue des caractéristiques à chaque segment de côte homogène. Une base de données associée à chaque segment de côte est constituée pour obtenir une classification très précise de la côte. Ce tableau de données présente les dix-huit champs différents constituant cette base de données (Tableau 3). Ainsi, chaque fois qu'un des champs se modifie le long du littoral, un nouveau segment de côte est créé. Par la suite, la base de données associée au trait de côte permet un regroupement des segments selon la caractéristique physique voulue. Cette classification permet une caractérisation très précise de la zone côtière, la précision des mesures relatives de hauteur (z) et de longueur (x et y), sur les images numériques ayant une résolution de 32 centimètres, est de 1 mètre (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004a; Dubois *et al.*, 2005).

Tableau 3- Attributs de la classification côtière

Types d'attributs	
No de segment	Hauteur totale de falaise
Type de ligne de rivage	Taux de recul
Type de côte	Type de plage
État de la ligne de rivage	Dérive littorale (orientation)
Sous-état de la côte (8 colonnes)	Type de végétation
Mode d'évacuation	Type d'infrastructures
Stratigraphie	État des structures
Gestion du sable	Commentaires
Épaisseur du sable	Type d'arrière-côte

Modifié de Bernatchez (2003a)



Une caractérisation et une segmentation côtière ont été réalisées dans le cadre de travaux antérieurs (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004a). Ces travaux ont permis de diviser la côte du secteur à l'étude en cent quatre-vingt-seize segments différents. Pour ce projet de recherche, les attributs associés à chacun de ces segments ont fait l'objet d'une analyse géomorphologique en fonction des formes et des processus littoraux. De cette analyse, il en résulte un regroupement en types de systèmes côtiers. Pour ce faire, certaines classes d'attributs ont été associées pour diminuer la quantité de segments à analyser. Cette association s'est effectuée en regroupant toutes les caractéristiques à l'intérieur des classes suivantes : type de ligne de rivage, type de côte et état de la ligne de rivage. Cette segmentation a été largement inspirée de travaux réalisés dans le Saint-Laurent (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Quintin, 2005; Dubois, 1973; Dubois, 1979). Sur la base des travaux de Finkl (2004) et de Fairbridge (2004), des critères se rapportant au type de matériel constituant la côte, au cadre physique du littoral, aux agents d'érosion actifs sur le milieu côtier ainsi qu'à la paléogéographie ont été retenus pour l'analyse géomorphologique de la base de données de vidéographie aéroportée (Tableau 4). Ainsi, ce regroupement réduit le nombre de segments qui sont regroupés selon six grandes classes de systèmes côtiers : les côtes rocheuses, les marais maritimes, les flèches littorales, les côtes deltaïques, les terrasses de plage et les côtes artificielles. Enfin, la méthodologie de Bernatchez (2003a) adaptée à ce projet de recherche et l'analyse géomorphologique multicritères ont permis d'établir des nouvelles divisions de la segmentation côtière. Le résultat de cette analyse présente quatre-vingt segments côtiers. Tous les attributs obtenus

par vidéographie aéroportée (Tableau 3) ont été conservés et demeurent associés aux nouveaux segments puisqu'ils font état entre autre de la stratigraphie de la côte, du type de plage, du mode d'évacuation des sédiments et de la dérive littorale.

Tableau 4- Critères de classification côtière

(1) <i>COASTAL, MATERIAL</i>	
(a)	<i>Soft, Weakly Consolidated and Easily Erodable</i> ; relative solubility (in seawater and rainwater). Creating mudflats, beaches, bluffs and low cliffs.
(i)	Relatively insoluble: detrital products such as mud, silt, sand, gravel, boulders (loose).
(ii)	Relatively soluble: reef limestones; bioclastic carbonate debris (foraminifera, calcareous algae, mollusca, coral). Beachrock and eolianite (calcareous cements often weak and temporary).
(iii)	Pre-weathered hard rocks: "grusification" or reduction in hot-wet tropics to grus or crumble, leaving unweathered corestones within easily eroded saprolite.
(iv)	Hard concretions (such as cherts or "flints") released by differential wave erosion to create cobble or "shingle" beaches.
(v)	Volcanic materials (interlayered lavas, pumice, ash or lapilli), reduced by wave action to boulders, black sands, etc.
(b)	<i>Hard Rock and Clifed Coasts</i>
(i)	Longevity of hard-rock coasts;
(ii)	Anomalous hard-rock boulders due to diachronous sea-ice transport;
(iii)	Landsliding, with rotational slip;
(iv)	Landsliding on volcanic cones, with control of atoll form;
(v)	Fault-controlled cliffs (taphrogenic and plate-margin);
(vi)	Fossil or "Dead" Cliffs (Falaise mortes Fr.)
(2) <i>PHYSICAL SETTING</i>	
(a)	Latitude (Solar Radiation, Seasonality and Weathering Potential).
(b)	Climate (Prevailing Winds, Storms, Sea Ice).
(c)	Fetch (Open water for wave approach).
(d)	Offshore Bathymetry (Wave Regime and Longshore Currents).
(e)	Tides (diurnal, seasonal and 18.6 yr nodal).
(f)	Tsunami Potential (volcanoes, submarine slides).
(g)	Homogeneity (beach extent, headland frequency).
(3) <i>EROSIVE AGENCIES</i>	
(a)	Physical Agencies
(i)	Abrasion
(ii)	Hydraulic; impact
(iii)	Wind and tide-driven ice floes and icebergs
(iv)	Ice-foot ("glaciel")
(b)	Chemical Agencies (H <sup>2</sup> O, CO <sup>2</sup> , CH <sup>4</sup> )
(i)	Subaerial weathering preparation (Mainly feldspars and micas)
(ii)	Carbonate rocks
(iii)	Volcanic rocks
(c)	Biological Agencies
(i)	Mangrove and salt marsh
(ii)	Limestone and Uplifted Coral Reef Undercuts, populated by borers and scrapers.
(iii)	Barnacles, footing solution.
(iv)	Echinoids and boring molluscs ( <i>Lithophagus</i> spp.).
(v)	Kelp and other algal holdfasts.

---

(4) *HISTORY: GEOTECTONIC, ISOSTATIC, GEOIDAL AND EUSTATIC*

---

- (a) Extensional, Passive, Trailing Edge or Pull-apart Plate Margins.
- (b) Collision or Intermediate-type (Back-Arc) Margins.
- (c) Isostatic Readjustments, of three types:
  - (i) Geotectonic, vertical motions associated with plate rupture.
  - (ii) Glacio-isostatic, crustal response to glacial loading and unloading (including marginal bulge effect).
  - (iii) Hydroisostatic crustal response to water loading.
- (d) Geoidal Readjustment to changes in the Earth's spinrate, mass loading, atmospheric pressure, winds and currents.
- (e) Steric changes, volumetric response to thermal and salinity changes.
- (f) Eustatic changes:
  - (i) Tectono-eustatic
  - (ii) Sedimento-eustatic
  - (iii) Glacio-eustatic
- (g) Artificial or man-made coasts.

Tiré de Fairbridge, 2004

---

### 3.2. Identification des systèmes côtiers

L'utilisation de dix-huit champs descriptifs (Tableau 3) pour la caractérisation et la segmentation côtière multiplie le nombre de segments côtiers à analyser, ce qui dilue l'homogénéité des processus littoraux régissant l'évolution côtière. Le concept de systèmes côtiers émane de la nécessité de présenter une segmentation côtière plus uniforme. La nouvelle segmentation côtière, selon les six grandes classes de systèmes côtiers, synthétise les travaux de plusieurs auteurs (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Quintin, 2005; Dubois, 1973; Dubois, 1979; Fairbridge, 2004; Finkl, 2004). Le système côtier est une portion de la zone côtière possédant une genèse, une morphologie et des processus sédimentaires similaires et évoluant selon les mêmes processus côtiers et marins. Ce type de classification côtière autorise une approche qui intègre l'ensemble des composantes de la

zone côtière qu'elles soient physiques, dynamiques, biologiques ou humaines. Pour comprendre la portée de cette classification, il est important de définir la notion de zone côtière à laquelle s'applique cette classification. La zone côtière est une frange littorale qui couvre le domaine terrestre, de la limite d'interdépendance des facteurs hydrologiques, atmosphériques, biologiques et géomorphologiques (Dubois, 1979) liés au milieu marin jusqu'à la limite d'influence des vagues sur le fond dans le domaine marin. Dans cette optique, les systèmes côtiers peuvent faire référence à un ou plusieurs types d'habitat côtier. L'approche par systèmes côtiers permet de caractériser l'ensemble du milieu côtier en intégrant toutes les caractéristiques propres à celui-ci ce qui permet une planification et une gestion efficace de la zone côtière. La compréhension de leur évolution et l'identification des processus agissants sur les systèmes côtiers permet de saisir l'impact des changements environnementaux observés.

### **3.3. Identification de la ligne de rivage**

Lors de la réalisation de projets d'évolution côtière, il est primordial de déterminer quelle ligne de rivage sera utilisée lors de la photointerprétation. Plusieurs traits de côte peuvent être utilisés. 1) La ligne de démarcation terre-eau; 2) la ligne du niveau moyen des mers; 3) la ligne des pleines mers supérieures de marée moyenne et 4) la ligne des pleines mers supérieures de grande marée.

Le trait de côte le plus facile à identifier sur les photographies aériennes, indépendamment de la qualité de la photo, est la ligne de démarcation terre-eau. Cependant, si cette ligne offre un avantage au niveau de l'identification et de la reconnaissance sur les photos, elle présente plusieurs désavantages. Ces inconvénients sont liés à la qualité de la photographie, à la prise de vue, à l'heure de prise de la photo, à la hauteur de la marée et à l'émulsion (Audet et Gérardin, 2001).

En premier lieu, l'heure à laquelle la photographie est prise est très variable. Le niveau d'eau lié au cycle de marée peut être calculé, mais la comparaison de ce type de ligne de rivage entre les différentes années de photographies utilisées s'avère très difficile en particulier lorsque la pente de la plage est faible et qu'il y a présence d'un large estran. Lorsque des mesures précises doivent être effectuées, la comparaison interannuelle des éléments identifiés sur les photographies se doit d'être fiable et juste. Ce projet de recherche implique des mesures de recul de la côte, alors cette ligne ne peut être utilisée. La reconnaissance de la ligne de démarcation terre-eau peut être biaisée par la présence de résurgence ou de suintement sur le bas de la plage, ce qui se produit fréquemment sur les rives du Saint-Laurent. De plus, la qualité des photographies, l'angle de prise de vue ainsi que l'émulsion photographique peuvent jouer un rôle déterminant dans l'application de la clé de photointerprétation associée la ligne de démarcation terre-eau puisque celle-ci se base principalement sur les différences de teintes. Une variation, même minimale, de ces trois paramètres peut fausser l'interprétation de la position de cette ligne de rivage.

Deux autres lignes utilisées lors des projets d'évolution littorale sont la ligne du niveau moyen des mers et la ligne des pleines mers supérieures de marée moyenne. Le niveau moyen des mers correspond à la moyenne de tous les niveaux d'eau enregistrés à chaque heure pour la période d'enregistrement disponible (Ressources Naturelles Canada, 2004). La ligne des pleines mers supérieures de marée moyenne, quant à elle, correspond à la moyenne des niveaux d'eau de toutes les grandes marées pendant 19 années d'enregistrement (Ressources Naturelles Canada, 2004). L'identification de ces deux lignes de rivage dépend directement de la qualité et de l'échelle des photographies aériennes ainsi que du cycle de marée et des lasses de marée présentes sur la plage. Puisque les photographies les plus anciennes sont celles de 1931 et de 1950 et que parmi les photographies de 1950 certaines de celles-ci sont à petite échelle soit au 1 : 40 000, il s'avère très difficile de réaliser une interprétation constante et comparable. Les orthophotographies font exception à cette règle, puisque ce sont des documents numériques et que leur résolution spatiale est de un mètre au sol. Cette résolution permet une visualisation adéquate des photographies jusqu'à l'échelle de 1 : 5 000. L'interprétation de ces photographies est également difficile parce que plusieurs facteurs environnementaux peuvent la biaiser. Parmi les différents facteurs environnementaux qui interfèrent lors de leur interprétation, il y a le niveau d'eau ou l'état du cycle de marée lors de la prise de la photographie qui est d'une importance considérable. Si le niveau d'eau est supérieur à la ligne du niveau moyen des mers, son identification devient impossible. La ligne des pleines mers supérieures de marée moyenne est identifiable à l'aide de deux principaux critères géomorphologiques, principalement la lasse de marée, mais aussi le dénivelé sur la

plage. Ces deux critères ne peuvent être identifiés de façon pérenne sur toutes les photographies. Dans plusieurs cas, la laisse de marée n'apparaît pas sur les photos ou elle est tout simplement absente. Il convient donc d'identifier le dénivelé, mais cet élément ne se présente pas de façon continu à certains endroits. La limite ne peut donc pas être tracée en continu; il s'ensuit un trait de côte intermittent. Ces lignes de rivage n'ont donc pas été retenues pour ce projet d'évolution littorale.

Puisque ce projet s'inscrit dans une continuité des travaux de Bernatchez (2003a) et de Dubois *et al.* (2005) et il convient d'utiliser la même ligne de rivage que celle utilisée lors de la réalisation de ces projets. La ligne de rivage utilisée par ces auteurs est la limite de végétation. La limite de la végétation représente très souvent la ligne des pleines mers supérieures de grande marée (PMSGM). Ce trait de côte est la moyenne des plus hautes pleines mers, en considérant la plus haute mer à chaque année pendant 19 années d'enregistrement (Ressources Naturelles Canada, 2004). Son identification est fiable et constante puisque la limite de végétation en milieu côtier présente un avantage considérable; soit l'identification à l'aide de trois critères de photointerprétation. Ces critères sont la différence de teinte, la différence de texture et l'aspect tridimensionnel où la stéréoscopie s'avère très utile. De plus, aux endroits où la végétation est absente, les laisses des grandes marées d'équinoxe ainsi que la micro-topographie associée à ces mêmes marées permettent un positionnement précis de cette ligne de rivage (Grenier et Dubois, 1990). Lors de travaux réalisés aux Îles-de-la-Madeleine (Grenier, 1993), cette même limite a été utilisée pour réaliser l'évolution littorale récente et étudier l'impact des

structures artificielles en milieu côtier. Cette ligne a également été utilisée pour des études sur la Moyenne Côte-Nord (Briard, 1980), sur le delta de la rivière Moisie (Lessard et Dubois, 1984), sur les péninsules de Manicouagan et de la rivière Betsiamites (Bernatchez, 2003a) et, finalement, pour l'étude des risques d'érosion littorale sur la Côte-Nord (Dubois *et al.*, 2005). Dans le but de comparer les résultats obtenus par photointerprétation multidate, la limite de végétation, limite des pleines mers supérieures de grande marée (PMSGM), a été retenue pour les côtes à faible dénivelé du secteur à l'étude.

Cependant, certaines caractéristiques des systèmes côtiers à l'étude ainsi que certains objectifs du projet ont forcé l'utilisation d'autres lignes de rivage. Dans le cas des systèmes côtiers à marais maritime, la limite de végétation a été utilisée pour la limite supérieure et inférieure du marais. Ces deux limites furent retenues afin de permettre le calcul des superficies des marais maritimes comprenant le schorre supérieur et le schorre inférieur. Pour les systèmes côtiers à flèche littorale, la limite de végétation n'étant pas présente et identifiable sur l'ensemble de la forme à cause de la dynamique du secteur. La limite des pleines mers supérieures a été identifiée à l'aide de deux autres critères géomorphologiques. En effet, la dénivellation associée à la limite des pleines mers supérieures de grande marée est plus importante que celle des autres types de ligne de rivage décrits précédemment. La dénivellation devient un des critères géomorphologiques très utiles lors du positionnement du trait de côte. Un autre critère important utilisé est la laisse de marée mise en place lors de grandes marées ou de marées de tempêtes. Ces lasses de marée sont beaucoup plus importantes que celles laissées lors de marées moyennes.



Elles sont facilement identifiables à l'aide de la texture qui diffère beaucoup du substrat sur lequel elles reposent : le sable. Aussi, le trait de côte des systèmes côtiers deltaïques a été tracé en considérant le sommet des falaises côtières. Les falaises des systèmes côtiers deltaïques évoluent par des processus géologiques terrestres comme par exemple les décrochements, les coulées sableuses, les glissements de terrain et la suffosion à partir du sommet des falaises. La ligne de rivage située à la base de ces falaises ne constitue pas un bon témoin de l'évolution littorale, puisque celle-ci s'effectue par le haut des falaises côtières. Le critère utilisé pour tracer cette ligne est la stéréoscopie qui permet de bien identifier la rupture de pente ou le sommet des falaises puisque celles-ci peuvent atteindre jusqu'à quatre-vingt mètres de hauteur.

#### **3.4. Photointerprétation multitemporelle et évolution côtière**

L'utilisation de photographies aériennes de différentes années est la méthode la plus couramment utilisée afin de pallier le manque de données de terrain (Grenier et Dubois, 1990). La banque de photographies aériennes recueillies et utilisées dans le cadre de la présente recherche comprend un grand éventail d'années entre 1931 et 2001 avec des échelles variant entre le 1 : 10 000 et le 1 : 40 000 (Tableau 5).

Tableau 5- Inventaire des photographies aériennes utilisées

<b>Année de survol</b>	<b>Échelle</b>	<b>Type de photo</b>
1931	1 : 15 000	Noir & Blanc
1950	1 : 15 000 1 : 40 000	Noir & Blanc
1964	1 : 15 840	Noir & Blanc
1978	1 : 10 000	Infrarouge
1981	1 : 15 000	Noir & Blanc
1990	1 : 15 000	Infrarouge
1996	1 : 15 000	Noir & Blanc
2000	1 : 15 000	Infrarouge
2001	1 : 40 000	Orthophoto N & B

Les photographies aériennes ont été numérisées à l'aide d'un scanner EPSON Expression 1640 XL à une résolution de 600 dpi. Cette résolution permet d'obtenir des pixels variant entre 0,7 et 0,9 mètres de côté. Toutes les photographies ont été enregistrées en *Tagged Image File Format* (.TIF). Elles ont par la suite été intégrées dans le logiciel ArcGIS par le module ArcCatalog. Ce module a permis d'établir la référence spatiale des données matricielles soit : NAD 83 MTM Zone 7. Par la suite, un fichier permettant un affichage et une consultation plus rapide des photographies à l'écran, le *Reduced Raster Display* (.RRD), a été créé.

Ensuite, l'ensemble de ces photographies aériennes fut géoréférencé à l'aide du logiciel ArcGIS. Les orthophotographies numériques et géoréférencées datant de 2001 ont

servi de base pour géoréférencer toutes les photographies des années antérieures. La résolution au sol des orthophotographies est d'un mètre. Lors du processus de géoréférencement, trente points de contrôle par photo furent choisis. Ces points fixes au sol devaient être reconnaissables sur la photographie à géoréférencer et sur la photographie de référence, c'est-à-dire l'orthophotographie. Les points choisis correspondent par exemple à des intersections de routes, à des ponts, à des confluences de cours d'eau ou à des fractures dans le substratum rocheux. Ces points de contrôle doivent être à une altitude la plus basse possible pour minimiser l'erreur due à la parallaxe. Lorsque la correspondance entre les trente points sur la photographie à géoréférencer et la photographie de base est terminée, un tri des points est effectué. Ce tri permet d'obtenir une homogénéité des points, la distribution recherchée étant des points bien répartis au centre de la photographie avec une concentration souhaitée le long du littoral. Le tri a aussi été effectué dans le but de réduire l'erreur quadratique moyenne (EQM) sous le seuil limite de deux. Ce seuil a été choisi pour obtenir la meilleure précision des mesures. L'EQM est calculée pour chaque transformation effectuée : elle indique la qualité de la transformation dérivée (ESRI, 2000). Les trente points choisis au début ont été éliminés jusqu'à ce qu'il n'en reste que dix. Par la suite, une transformation des données matricielles en coordonnées géographiques a été effectuée. Une transformation de premier ordre (*affine*) a été choisie. Cette transformation permet le déplacement, la mise à l'échelle et la rotation du fichier matriciel (ESRI, 2000). Ce type de transformation convenait aux besoins de l'étude puisque les pourtours des photographies aériennes, sujets à des déformations majeures dues à la lentille de la caméra, n'étaient pas analysés. Une transformation de

premier ordre ne nécessite que quatre points de contrôle. Cependant, même si l'erreur mathématique de transformation peut augmenter avec la création de liens supplémentaires, la précision générale de la transformation augmente également (ESRI, 2000). Les photographies aériennes du secteur à l'étude ont été géoréférencées et mosaïquées afin d'obtenir des données en continu. Le changement de position de la ligne de rivage permettra d'établir des mesures de modification de la géomorphologie de la côte.

Un stéréoscope a été utilisé en appliquant une clé de photointerprétation élaborée préalablement et permettant de positionner la ligne de rivage pour toutes les années de photographies aériennes utilisées. Les indices retenus pour positionner la ligne de rivage sont principalement la différence de teinte entre la végétation présentant une teinte beaucoup plus foncée que les sédiments de la plage et du haut de plage. La texture est également un élément retenu pour discerner les endroits où la végétation ne pouvait être prise en compte pour tracer la ligne de rivage. Finalement, la vision stéréoscopique à l'aide de lunettes de grossissement 3X ou même 8X, dans certains cas, permettait l'identification de la microfalaise et de constater son état. La clé de photointerprétation se base également sur les observations de terrain puisque durant la réalisation de ce projet de recherche, quatre campagnes de relevés des bornes repères sur le terrain ont été réalisées. Cette photointerprétation s'est faite conjointement à l'écran dans le logiciel ArcGIS. L'utilisation de l'outil de zoom dans ce logiciel permet d'agrandir l'image pour reconnaître plus de menus détails. La ligne de rivage pouvait donc être tracée directement à l'écran. Cette opération permet de minimiser les erreurs liées à la largeur du trait de crayon utilisé

sur des calques de photointerprétation. Le trait de côte a été tracé directement à l'écran avec un crayon numérique d'une largeur de 0,001 mm.

La position du trait de côte a été mesurée pour les neuf années de couvertures de photographies aériennes. Des points de mesure ont été répartis le long de la ligne de rivage à tous les cinquante mètres sur les 43,6 kilomètres du secteur à l'étude. Tous les points de mesure sont situés au même endroit sur les traits de côte des neuf années utilisées. Les mesures ont été prises perpendiculairement à la ligne de rivage par rapport à une ligne reliant deux repères fixes. Le repère fixe est un élément géographique stable sur l'intervalle de temps étudié, entre 1931 et 2001, et identifiable sur l'ensemble des photographies aériennes. Ce sont les mêmes types de structures utilisées dans le cas des points de contrôle. Des mesures de superficie et de périmètre ont aussi été prises sur tous les marais maritimes présents dans le secteur. La procédure de prise de mesure a été automatisée afin de minimiser les erreurs engendrées par l'utilisateur. Les mesures de recul de côte ont été effectuées à l'aide d'un outil du logiciel ArcGIS, *minimum distance two layers*. Pour la superficie et le périmètre, l'outil utilisé est XTools Pro version 2.0.1 pour ArcGIS.

Finalement, ces mesures ont été intégrées dans une base de données et des statistiques sur les taux d'érosion et d'accumulation ont été calculées. Les statistiques utilisées sont des moyennes pondérées des taux de recul annuels en fonction des types de systèmes côtiers. Les moyennes pondérées sont des moyennes calculées selon le nombre de segments côtiers

compris dans chaque système côtier. Des graphiques d'érosion/accumulation et de modification de la position de la ligne de rivage ont été créés afin de dégager les tendances d'évolution des différents types de systèmes côtiers. Ce traitement sert de base pour établir des relations entre les types de systèmes côtiers, la lithostratigraphie et les taux d'érosion. Les données de superficie de marais ont été mises en relation avec le type de marais afin d'établir la comparaison entre les milieux exposés et protégés et ainsi de quantifier les impacts sur ces écosystèmes.

### **3.5. Sources d'erreur**

Les différentes sources d'erreurs liées à la cartographie de l'évolution littorale sont dues à la performance des outils utilisés, à l'utilisateur et à la résolution des données de base. Les trois principales opérations pouvant entraîner des erreurs sont la géoréférence des photographies aériennes, le traçage de la ligne de rivage et les mesures d'évolution côtière. Ces trois sources d'erreurs sont intimement liées à la qualité des photographies aériennes utilisées, à la largeur du trait de crayon et à l'expérience du photointerprète.

Les photographies aériennes provenant de la Photocartotheque québécoise et de la Phototheque nationale de l'air de Ressources naturelles Canada sont de bonne qualité. Elles sont conservées de façon appropriée, et ainsi l'erreur engendrée lors de l'utilisation de ces photos n'est liée qu'à la sphéricité de la lentille de l'appareil photographique utilisé

(Dubois *et al.*, 2005). Lors de la géoréférence des photographies aériennes seulement le centre des photographies a été considéré, donc l'erreur reliée à la sphéricité de la lentille est ainsi éliminée. L'erreur due à la largeur de trait de crayon est négligeable, puisque la numérisation de tous les traits de côte s'est fait directement à l'écran à l'aide d'un crayon numérique d'une largeur de 0,001 mm. Finalement, les erreurs engendrées par le photointerprète sont négligeables puisque toutes les étapes ont été effectuées par la même personne expérimentée. En se basant sur les différents travaux antérieurs de photointerprétation (Bernatchez, 2003a; Briard, 1980; Crowell *et al.*, 1993; Dubois *et al.*, 2005; Grenier, 1993; Grenier et Dubois, 1990; Lessard et Dubois, 1984; Moore, 2000; Savard, 1998) et en comparant la technique utilisée avec les autres techniques, il est raisonnable de penser que l'erreur se situe en deçà de cinq mètres pour les mesures absolues et qu'elle est négligeable, soit inférieure à un mètre, pour les mesures relatives en cumulant toutes les erreurs des différentes opérations. De plus, comme l'ensemble du travail a été effectué par la même personne, la précision est relativement constante et l'erreur est donc négligeable lors de la comparaison des secteurs entre eux (Dubois *et al.*, 2005). Pour le secteur des falaises de Forestville, où la ligne de rivage correspond au sommet de la falaise, le positionnement de cette ligne doit se faire à l'aide de la stéréoscopie. L'erreur du positionnement de la ligne de rivage directement à l'écran est plus élevée.

### **3.6. Analyse spatiale et traitement des données sur le recul des côtes**

#### *3.6.1. Cartographie*

La cartographie de l'évolution côtière présente les traits de côte tracés par photointerprétation pour les couvertures aériennes utilisées. Le fond de carte utilisé pour présenter ces données sont les orthophotographies de 2001. Les traits de côte sont superposés et cartographiés en paire dans le but de permettre une meilleure visualisation et une meilleure compréhension des cartes. Par la suite, les statistiques pour chacun des segments côtiers sont présentées sous forme de bulles associées à chacun des systèmes côtiers. Chacune des bulles présente quatre données (Figure 11), au haut de la bulle il y a la segmentation côtière, c'est-à-dire le type de système côtier étudié, la deuxième valeur correspond au taux moyen d'accumulation ou d'érosion pour l'ensemble des bornes de mesure prise par photointerprétation comprises dans le système côtier pour l'intervalle de temps complet, la valeur suivante donne le taux moyen annuel d'accumulation ou d'érosion pour le système côtier et finalement la donnée au bas de la bulle présente le taux maximum d'érosion enregistré sur une des bornes de mesure durant l'intervalle temporel complet. Les valeurs présentées dans les bulles correspondent à des taux d'accumulation si la valeur est positive et à des taux d'érosion si la valeur est négative. Les taux moyens annuels sont calculés en divisant le taux moyen par le nombre d'années compris dans l'intervalle étudié.



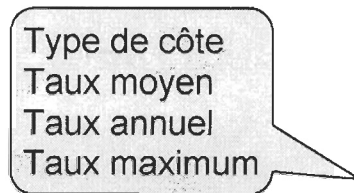


Figure 11- Légende de la cartographie d'évolution côtière

Les valeurs de déplacement de la ligne de rivage présentées dans les bulles sont divisées selon quatre grandes classes. Les bulles rouges correspondent à des valeurs élevées de recul du trait de côte, soit des taux moyens supérieurs à 1 mètre/année. Les bulles orangées sont pour les taux moyens annuels d'érosion faibles qui se situent entre 0,01 et 0,99 mètre/année. Les bulles jaunes correspondent à des taux moyens annuels d'accumulation accompagnés d'un taux maximum d'érosion enregistré pour le système côtier étudié. Les taux moyens annuels d'accumulation sont présentés à l'intérieur de bulles vertes. De plus, les bulles grises présentent les valeurs non disponibles pour le segment côtier, soit parce que les photographies aériennes ne couvraient pas la totalité ou une partie du secteur ou bien à cause de la piètre qualité des photographies aériennes, ce qui ne permettait pas une interprétation juste et complète du trait de côte. Finalement, certaines bulles grises présentent des valeurs non significatives, cette notation témoigne du fait que lors de la prise de mesures à l'aide du SIG, les données obtenues pour ce système côtier sont inférieures à la marge d'erreur engendrée qui est d'un mètre.

### 3.6.2. Graphiques

Les graphiques des taux d'érosion/accumulation ont été tracés en conservant la position géographique de la ligne de rivage et des systèmes côtiers. Chaque graphique présente un profil côtier du sud-ouest au nord-est en abscisse et des taux de recul ou d'avancée annuels en ordonnée. L'abscisse ou le profil côtier correspond à la distribution de toutes les bornes de mesures en partant de l'extrémité sud-ouest vers l'extrémité nord-est. La première borne sud-ouest est située dans la baie des Bacon et la plus à l'est correspond au quai de Forestville. Ce type de graphique permet de conserver la relation spatiale des données et de présenter de façon synthétique la relation temporelle.

Les taux de recul ou d'avancée présentés en ordonnée ont été calculés en soustrayant de la mesure prise pour chaque année la mesure de l'année précédente pour l'intervalle étudié. Cette mesure, lorsque négative, signifie un taux d'érosion et lorsqu'elle est positive un taux d'accumulation. Par la suite, les mesures obtenues ont été divisées par le nombre d'années compris dans l'intervalle étudié. Les taux annuels ont été calculés pour permettre une comparaison entre chaque intervalle étudié, puisque le nombre d'années entre chaque couverture aérienne n'est pas constant. Des moyennes en fonction de chaque type de systèmes côtiers et de leur position géographique ont été calculées. Ces moyennes sont calculées pour établir une comparaison entre chaque type de systèmes côtiers. Finalement, les graphiques présentant les données de photointerprétation permettront une comparaison

avec les données recueillies sur le terrain dont la méthodologie est présentée à la section 3.7.

### **3.7. Relevés de terrain**

Les relevés de terrain accomplis sur la portion de littoral compris entre la baie des Bacon et Forestville se sont échelonnés sur deux années. La première campagne de terrain a été effectuée durant les mois de mai et juin 2003. Cette campagne de terrain a permis de prendre des mesures de recul des côtes à partir du système de piquets repères installé par Bernatchez (2003a). Durant ces deux mois, dix coupes stratigraphiques ont également été effectuées. Ces coupes stratigraphiques représentent des coupes types pour chaque type de systèmes côtiers à l'étude.

La deuxième campagne de terrain s'est déroulée du 29 novembre 2003 au 2 décembre 2003 et la troisième durant le mois de juin 2004. Ces deux périodes de relevés de terrain avaient pour objectif le suivi des mesures sur le système de piquets repères.

Finalement, la dernière campagne de terrain a été effectuée durant une marée de vives eaux, le 14 novembre 2004. Cette dernière campagne a permis la caractérisation du site par la prise de photos lors de marées d'équinoxe et elle a également permis la confirmation du positionnement par photointerprétation de la ligne de rivage.

### 3.7.1. Bornes de terrain

Bernatchez (2003a) a implanté un système de suivi de l'érosion côtière sur la Côte-Nord, consistant en l'installation de piquets repères dans la zone côtière permettant d'obtenir des mesures de recul annuel, interannuel et saisonnier. Ces informations viennent compléter de manière détaillée la cartographie de l'évolution de la ligne de rivage depuis 1931. Dans le secteur à l'étude, cent vingt-cinq bornes de mesures permettent de faire un suivi de l'évolution de la côte. Dans le cadre de l'entente spécifique sur l'érosion des berges (Dubois *et al.*, 2005), le réseau de bornes installé dans le secteur était au nombre de soixante-treize. Lors de la réalisation du présent projet de recherche cinquante-deux nouvelles bornes ont été installées et suivies pendant deux ans.

Les bornes de terrain sont des piquets repères en bois semblables à ceux utilisés en arpentage. L'extrémité des piquets repères est peinte avec de la peinture de marquage fluorescente ou identifiée à l'aide d'un ruban de marquage pour faciliter leur repérage le long de la côte. Les piquets sont installés le long du littoral uniquement dans les zones d'érosion, cette méthodologie a été utilisée pour se conformer à la méthodologie de Dubois *et al.* (2005) et de Bernatchez (2003a) (Photo 4). Ces piquets sont plantés en moyenne à tous les cinquante mètres. Cependant, dans des zones où l'érosion semble moins active, la distance entre chaque piquets repères peut atteindre jusqu'à cinq cent mètres (Dubois *et al.*,

2005). Dans les zones très actives, la distance entre chaque piquet peut être réduite à vingt mètres. Tous les piquets possèdent un numéro d'identification unique et sont géoréférencés à l'aide d'un GPS conventionnel. Cette procédure facilite le classement et le repérage de toutes les bornes de terrain et permet la création d'une base de données à référence spatiale pour la mise à jour des données de recul côtier lors des relevés de terrain annuels. Lors de l'implantation des bornes de terrain, deux piquets repères sont toujours installés et la distance exacte entre chacune des bornes et la ligne de rivage y est indiquée. Le premier piquet se situe à environ cinq mètres et le deuxième est installé à environ dix mètres de la ligne de rivage. La distance entre la ligne de rivage et les piquets peut varier en fonction des caractéristiques du milieu ou de l'accessibilité du site. Le choix d'installer deux piquets joue deux rôles. Le premier rôle est de conserver une borne de sûreté, dans le cas de forts reculs durant une année, le deuxième piquet sert de sécurité pour ne pas perdre complètement la borne de terrain. Deuxièmement, les deux piquets permettent de prendre la mesure toujours avec la même orientation, c'est-à-dire en alignant le ruban à mesurer sur ceux-ci. Dans les zones où des taux d'érosion élevés sont enregistrés, un troisième piquet de sécurité situé à vingt mètres de la ligne de rivage est installé (Photo 5). Dans les régions anthropisées, des structures, des bâtiments ou des aménagements peuvent remplacer les piquets repères en bois. Les repères choisis peuvent être un élément fixe associé à l'une ou l'autre des structures précédentes.



Photo 4- Installation de piquets repères

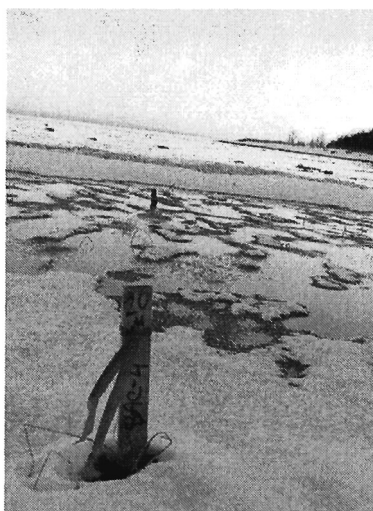


Photo 5- Borne de sécurité

Les mesures sont prises avec un ruban métrique en plastique possédant des divisions millimétriques (Photo 4). La distance entre la première borne et la ligne de rivage est mesurée dans l'axe des deux repères. Il peut s'avérer difficile d'identifier sur le terrain avec précision la ligne de rivage. Dans le cas où une falaise ou une microfalaise représente une limite, la mesure est prise à la rupture de pente (Photo 6). Il est également possible de

retrouver des débords organiques, des lambeaux de végétation en surplomb, sur ce type de côte (Photo 7). La largeur du débord organique doit être soustraite de la mesure. Pour les côtes sans falaise ou avec un haut de plage végétalisé, la végétation est le critère retenu pour déterminer la limite de la ligne de rivage (Photo 8).

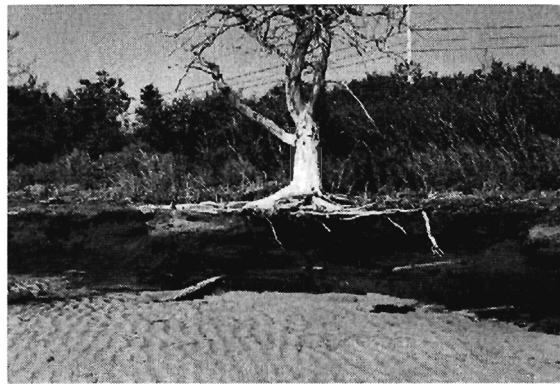


Photo 6- Ligne de rivage à micro-falaise, Pointe-à-Boisvert

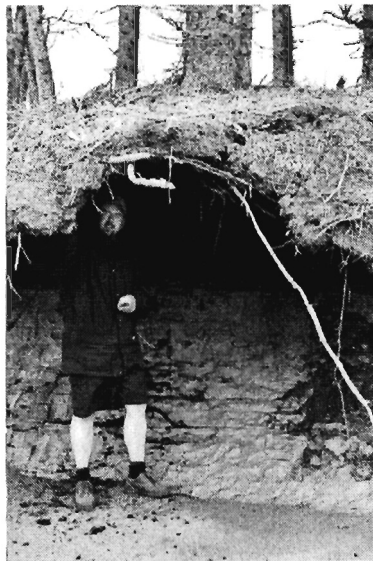


Photo 7- Débord organique près de la rivière Saint-Jean, Côte-Nord



Photo 8- Ligne de rivage végétalisée, Longue-Rive

Les erreurs associées à ces mesures sont cumulatives (Dubois *et al.*, 2005). Une des sources d'erreurs est la difficulté à identifier avec précision la limite de la ligne de rivage. Sur les côtes à falaise ou à microfalaise, l'identification de la ligne de rivage est dépendante de l'exactitude avec laquelle la limite est identifiée. Lorsque celle-ci est recouverte de végétation, l'erreur encourue est de l'ordre de cinq centimètres, ce qui n'est pas significatif. Pour le cas des côtes sans falaise ou sans microfalaise, l'identification de la limite de végétation peut être problématique. Cette limite est souvent interprétée à partir de l'environnement immédiat de la prise de mesure : elle correspond à une moyenne de la ligne de végétation du secteur. L'erreur engendrée dans ce type de ligne de rivage est de l'ordre de dix centimètres.

Une autre source d'erreur est l'utilisation des piquets en bois ou des structures anthropiques fixes. Dans le cas des repères en bois l'erreur peut être liée à la flexibilité du piquet et au côté sur lequel la mesure est prise. Cette erreur survient lorsque plusieurs



personnes effectuent les relevés de terrain. Dans la présente, cette erreur est négligeable puisque les relevés ont tous été effectués par la même personne. Dans le cas des repères fixes associés aux structures humaines, l'erreur de mesure est en deçà d'un centimètre (Dubois *et al.*, 2005). En somme, en cumulant les différentes sources d'erreurs, il appert que sur les côtes à falaise ou à microfalaise, l'erreur totale moyenne est de cinq à dix centimètres et l'erreur maximale peut atteindre quinze centimètres. Dans le cas des côtes sans falaise ou microfalaise, l'erreur cumulative est de quinze à vingt centimètres (Dubois *et al.*, 2005).

Les agents d'érosion, les taux de recul très importants ou le vandalisme peuvent entraîner la perte des bornes durant la période d'échantillonnage. Lorsqu'une borne de terrain est brisée ou perdue, elle est remplacée pour préserver la continuité et l'intégrité des données interannuelles. Dans le cas où les bornes sont situées dans des milieux où une circulation humaine intense est remarquée et que les bornes ne peuvent être retrouvées d'une année à l'autre, certaines peuvent être abandonnées ou déplacées. Seulement 10,7 % des bornes furent perdues ou définitivement abandonnées durant les relevés de terrain de cette étude.

### 3.7.2. *Relevés saisonniers*

La campagne de terrain réalisée durant l'automne 2003 a permis de mesurer l'impact des marées de vives eaux et des tempêtes automnales sur le recul annuel de la ligne de rivage. Ce relevé a été réalisé afin d'isoler les processus hivernaux pour dresser un portrait saisonnier du littoral. Lors de ce relevé de terrain, seulement les bornes visibles et accessibles ont été mesurées. Plusieurs bornes étant enfouies sous la neige, il était donc impossible de les mesurer. Cette campagne de terrain a permis de mesurer seulement vingt-trois bornes sur les cent vingt-cinq installées.

### 3.7.3. *Stratigraphie*

Les coupes stratigraphiques ont été effectuées dans les différents systèmes côtiers du secteur à l'étude. Chacun des types de systèmes côtiers a été étudié et un profil stratigraphique type fut dressé. Ces coupes ont été élaborées sur les falaises littorales déjà mises à nu par l'érosion. À ces endroits, il a été possible de réaliser une coupe stratigraphique sur l'ensemble de la falaise côtière. Lors de l'échantillonnage dans les marais maritimes, une description des différentes couches lithologiques sommitales a été exécutée. Cette portion de la coupe avait été dégagée par l'érosion.

Pour le cas des falaises de Forestville, certaines portions, d'environ quatre-vingt mètres de hauteur, ont été mises à nu par l'érosion. Ceci a permis de bien décrire la lithostratigraphie et les types de sédiments sur place.

#### **4. RÉSULTATS**

Les résultats sont divisés en deux parties, soit une section traitant de la segmentation et de la caractérisation côtière et une autre de l'évolution littorale. Pour la première section, les différents types de systèmes côtiers du secteur à l'étude ainsi que leurs caractéristiques géomorphologiques et lithostratigraphiques seront présentés. La cartographie de la répartition de ces différents types de systèmes côtiers est présentée en annexe 3, tandis que la localisation des coupes ainsi que les profils stratigraphiques seront présentés à l'annexe 4.

La seconde section traite de l'évolution littorale des systèmes côtiers à l'étude, à l'exception des marais maritimes et des côtes anthropisées qui font l'objet d'une section individuelle. La cartographie d'évolution littorale à haute résolution spatiale et temporelle est présentée en annexe 5. Les cartes présentent l'évolution littorale pour l'ensemble de la période mesurée par photointerprétation, c'est-à-dire entre 1931 et 2001, en plus de la période de mesures des piquets repères entre 2000 et 2004. Ensuite, une cartographie de l'évolution littorale décennale pour la période de 1931 à 2001 et de l'évolution littorale

annuelle, entre 2000 et 2004, sont présentées dans le but de raffiner l'intervalle de temps entre chaque observation. Les données obtenues par les relevés de terrain et les mesures historiques obtenues par photointerprétation permet de constituer une base de données historiques sur l'évolution de la côte. La cartographie et les graphiques créés permettent de mettre en relation les taux d'érosion/accumulation historiques et actuels avec les données de caractérisation côtière.

En dernier lieu, les marais seront analysés en fonction de la perte ou du gain de superficie et de leur degré d'exposition ou de protection aux vagues et aux glaces littorales. Les côtes qui ont été modifiées par l'humain seront analysées en fonction de l'impact des structures artificielles sur l'évolution du système côtier sous-jacent. Afin de mieux décrire la localisation des différents types de systèmes côtiers et de présenter la cartographie d'évolution littorale de façon uniforme, la zone d'étude a été divisée en cinq secteurs (Annexe 2). La municipalité de Longue-Rive, comprenant le village de Baie-des-Bacon et de Sault-au-Mouton, constitue le secteur 1. Le secteur 2 correspond au village de Saint-Paul-du-Nord, dans la municipalité de Longue-Rive, et au hameau de Pointe-à-Boisvert. Le secteur de la péninsule de Portneuf, le village de Portneuf-sur-Mer et les falaises de Forestville sont respectivement les secteurs 3, 4 et 5.

#### **4.1. Description et identification des systèmes côtiers**

Le secteur à l'étude comprend des côtes rocheuses (4,5 %) (Photo 9), des marais maritimes (19 %) (Photo 10), des flèches littorales (30 %) (Photo 11), des côtes deltaïques (20 %) (Photo 12) et des terrasses de plage (19 %) (Photo 13). De plus, 7,5 % des côtes sont artificialisées (Photo 14). Il est donc possible d'obtenir un aperçu rapide du type d'occupation du littoral et de son degré d'artificialité.



Photo 9- Côte rocheuse, Longue-Rive



Photo 12- Côte deltaïque, Forestville



Photo 10- Marais maritime, Longue-Rive



Photo 13- Terrasse de plage, Longue-Rive

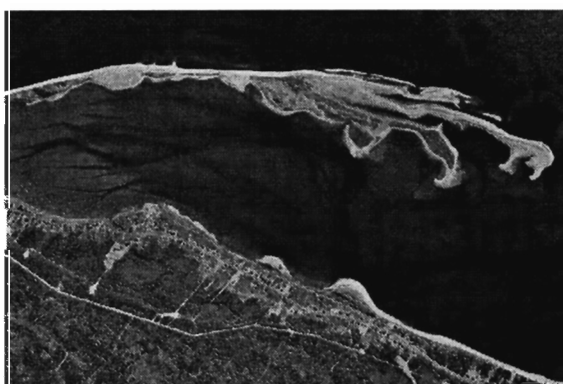


Photo 11- Flèche littorale, Portneuf-sur-Mer



Photo 14- Côte artificialisée, Pointe-à-Boisvert

La répartition des types de systèmes côtiers présente une variabilité intéressante pour ce type d'étude (Figure 12). Parmi les sept grands types de côtes du Québec maritime (Bernatchez et Quintin, 2005) (Tableau 1), cinq sont représentés dans le secteur à l'étude; il ne manque que les côtes à tombolo et les côtes glaciaires.

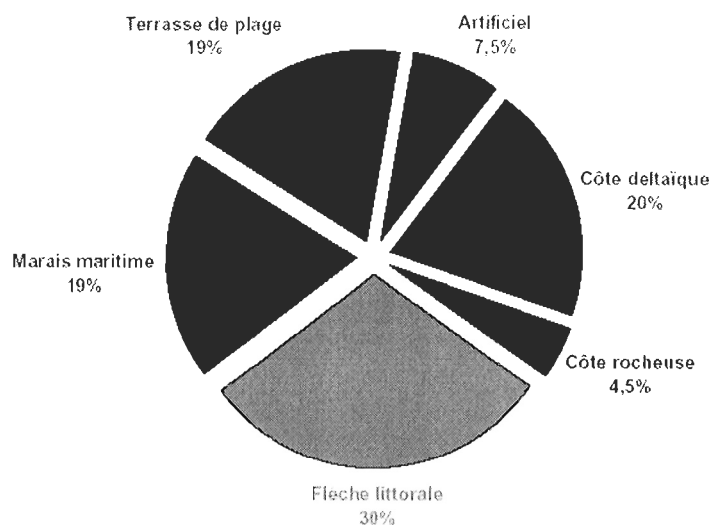
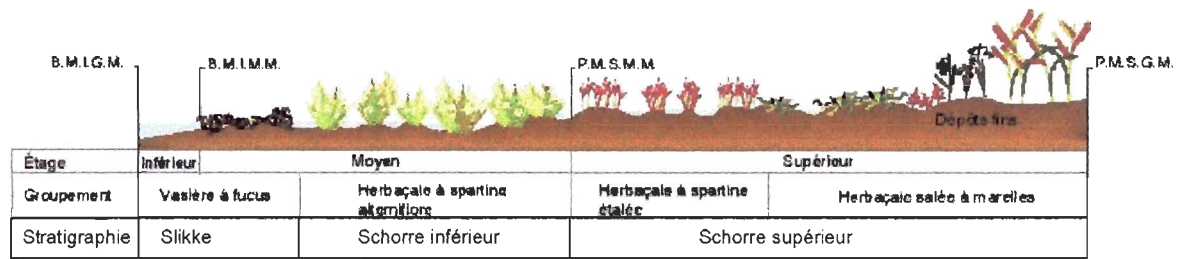


Figure 12- Répartition des systèmes côtiers de la zone d'étude

Les côtes rocheuses constituent des côtes où la ligne PMSGM se situe sur les affleurements du substratum rocheux (Annexe 3). Il y a peu de côtes rocheuses et celles-ci se trouvent principalement dans la municipalité de Longue-Rive compris entre la Baie-des-Bacon et la Pointe-à-Boisvert (Secteur 1 et 2, Annexe 2). Le segment de côte rocheuse le plus long se trouve dans ces secteurs et il correspond à un cap nommé Les Crans Rouges. Les autres segments rocheux dans ces secteurs se situent près de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton. Une autre portion de côte rocheuse se retrouve à proximité de la ville de Forestville près de l'embouchure de la rivière du Sault aux Cochons.

Les marais maritimes peuvent être frangeants ou protégés par une flèche littorale. Les marais du Saint-Laurent sont relativement récents, ils se sont développés durant le dernier millénaire par accrétion verticale de sédiments fins (Dionne, 2004). Cette accumulation a permis leur colonisation par des espèces endémiques aux marais maritimes. L'évolution de ces marais conduit à la zonation de ces écosystèmes en deux grandes zones types soit la slikke et le schorre (Figure 13). La slikke correspond à la vasière où les sédiments fins sont peu ou pas colonisés par les plantes, alors que le schorre est densément colonisé par une végétation halophile. De façon générale, la limite supérieure du schorre correspond à la ligne de PMSGM. Le schorre peut se diviser en deux zones, le schorre supérieur et le schorre inférieur. Le schorre inférieur est caractérisé par des plantes plus halophiles puisque la fréquence d'inondation est supérieure à celle du schorre supérieur. Les espèces prédominantes du schorre supérieur sont principalement le jonc (*Juncus spp.*), le carex (*Carex spp.*) et la spartine étalée (*Spartina patens*) alors que la spartine alterniflore (*Spartina alterniflora*) domine pour le schorre inférieur. Cette distinction de végétation permet une bonne identification de ces deux zones.





Adapté de Centre Saint-Laurent et Université Laval, 1990

Figure 13- Stratigraphie d'un marais maritime

Les zones de marais maritimes sont nombreuses dans le secteur à l'étude puisqu'elles représentent presque 20 % de l'ensemble du littoral. Les marais frangeants se retrouvent principalement dans les secteurs 1, Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton) et 2, Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert (Annexe 3). Entre la baie des Bacon et l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton, il y a plusieurs segments de marais frangeants. Le littoral du village de Saint-Paul-du-Nord constitue le deuxième secteur d'importance où des sections de marais frangeants sont observées. Trois autres marais d'envergure se retrouvent dans les secteurs 2, Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert, 3, Péninsule de Portneuf, et 4, Portneuf-sur-Mer. Ce sont tous des marais protégés par des flèches littorales : le marais de la baie de Mille-Vaches protégé par la pointe à Émile, le marais protégé par la pointe à Boisvert, le marais protégé par la barre de Portneuf et, finalement, le marais protégé par la pointe des Fortin. Deux coupes stratigraphiques ont été effectuées dans le marais maritime du village de Saint-Paul-du-Nord, la coupe SSPN2 et SSPN3 (Annexe 4). La coupe SSPN2 a été réalisée dans un marais en érosion ; elle présente une unité basale de sable moyen avec présence de débris

de schorre. Au-dessus de cette dernière se retrouve une unité de sable fin silteux de 49 centimètres. L'unité suivante est composée de silt argileux et des plantes et des racines de spartine s'y trouvent. Au sommet de cette coupe, l'unité est silto-sableuse avec des débris de végétation du schorre supérieur. La coupe SSPN3 représente seulement une unité de sable moyen à grossier reposant sur des dépôts de schorre. Il y a présence de plantes dans cette unité. Les unités au sommet des profils stratigraphiques présentés sont représentatives de marais en érosion. Une autre coupe stratigraphique a été réalisée dans cet environnement, la coupe SSAP3. Cette coupe se situe dans un ancien marais situé dans le secteur 4 au sud du village de Portneuf-sur-Mer. La coupe présente deux portions bien distinctes : une portion comprenant quatre unités à la base et une autre portion comprenant une unité au sommet de la coupe. À la base, il y a une unité de sable moyen avec des stratifications parallèles, une unité de sédiments fins représentant la slikke et deux autres unités de sédiments plus grossiers avec plusieurs débris organiques représentant le schorre inférieur et supérieur. Ces unités sont surmontées par du sable moyen, incluant des bouts de bois et des troncs d'arbre, d'une épaisseur de 7 centimètres.

Les flèches littorales sont une accumulation de sable ou de gravier dont une des extrémités est attachée à la côte, le point d'ancrage, et l'autre extrémité se prolonge vers la mer ou à travers l'embouchure d'un estuaire ou d'une baie (Masselink and Hughes, 2003). Elles peuvent également se développer lors d'un changement brusque dans la direction de la côte. Dans certains cas, des dunes bordières peuvent être associées aux flèches littorales, mais elles demeurent relativement basses. La plupart de ces formes d'accumulation

littorale sont en ligne droite et se terminent en crochet à leur extrémité distale. Le développement des flèches littorales se fait généralement dans le sens de la dérive littorale principale. Elles croîtront tant et aussi longtemps que la dérive littorale transportera des sédiments pour alimenter cette forme. Ce type de système côtier est soumis aux processus littoraux selon deux schémas classiques : une zone d'accumulation à l'extrémité de la flèche et une zone d'érosion vers le point d'ancrage de dimensions variables en fonction des conditions océanographiques auxquelles elle est soumise. Le point d'inflexion de la flèche, ou *fulcrum*, détermine l'endroit où les processus d'érosion laissent place aux processus d'accumulation et il constitue un excellent indicateur de l'état d'activité général de la flèche. Le type de sédiments constituant cette forme littorale nécessite une énergie relativement faible pour entraîner leur mobilisation. Dans le secteur à l'étude, les flèches littorales se retrouvent aux mêmes endroits que les marais maritimes puisque l'évolution de plusieurs d'entre eux leur est associée (Annexe 3). Lors des relevés de terrain, les flèches littorales échantillonnées présentaient des caractéristiques sédimentologiques classiques, c'est-à-dire des sédiments sableux fins à grossiers, donc aucune coupe stratigraphique n'y a été nécessaire.

Les systèmes côtiers deltaïques sont issus des grands complexes deltaïques mis en place dans la Mer de Goldthwait à la fin de la dernière déglaciation. L'édification de ces deltas s'est effectuée à l'embouchure de rivières drainant des bassins-versants de grande envergure. Ces rivières fournissaient un apport sédimentaire important pour alimenter ces grands complexes deltaïques. Dans le territoire à l'étude, cet apport s'effectue à partir de

trois grands bassins-versants, soit la rivière du Sault au Mouton, la rivière Portneuf et la rivière du Sault aux Cochons. La stratigraphie de ce type de système côtier est constituée de lits sableux obliques et de sédiments fins prodeltaïques reposant sur des dépôts d'argile marine. La plupart des côtes deltaïques montrent des dépôts de sables littoraux au sommet des unités deltaïques. Plusieurs coupes stratigraphiques ont été effectuées dans les côtes deltaïques soit les coupes SSAM1, PFO1, SSAM2, SSAM3, SSAM8, SSAP1 et SSAP2. Ces coupes stratigraphiques représentent toujours deux unités stratigraphiques deltaïques et une unité de dépôts littoraux au sommet. De plus, le contact supérieur de la couche de sédiments fins prodeltaïques est composé de graviers et de galets. La présence des côtes deltaïques est relativement importante puisqu'elles représentent 20 % du littoral étudié. Pour la rivière du Sault au Mouton, la portion de côte deltaïque se retrouve dans le secteur 2 près du village de Saint-Paul-du-Nord au sud de la grande portion de côte rocheuse qui se trouve au centre du village. Les côtes deltaïques associées à la rivière Portneuf se retrouvent essentiellement dans le village de Portneuf-sur-Mer dans le secteur 4. Il y a deux segments qui se trouvent au sud du village et trois autres segments qui se trouvent en plein cœur du village derrière la barre de Portneuf. Finalement, la dernière portion de côte deltaïque, la plus importante, correspond à la coalescence des rivières Portneuf et du Sault aux Cochons, et correspond à l'ensemble de la zone des falaises de Forestville (Secteur 5). La coupe stratigraphique PFO1 a été effectuée dans ce segment côtier (Photo 15). Cependant, celle-ci n'est pas représentative de l'ensemble de la stratigraphie des hautes falaises de Forestville, puisque l'unité prodeltaïque n'est pas apparente sur l'ensemble du

segment côtier et l'unité de sable deltaïque sommital n'apparaît pas dans la coupe (Figure 10).

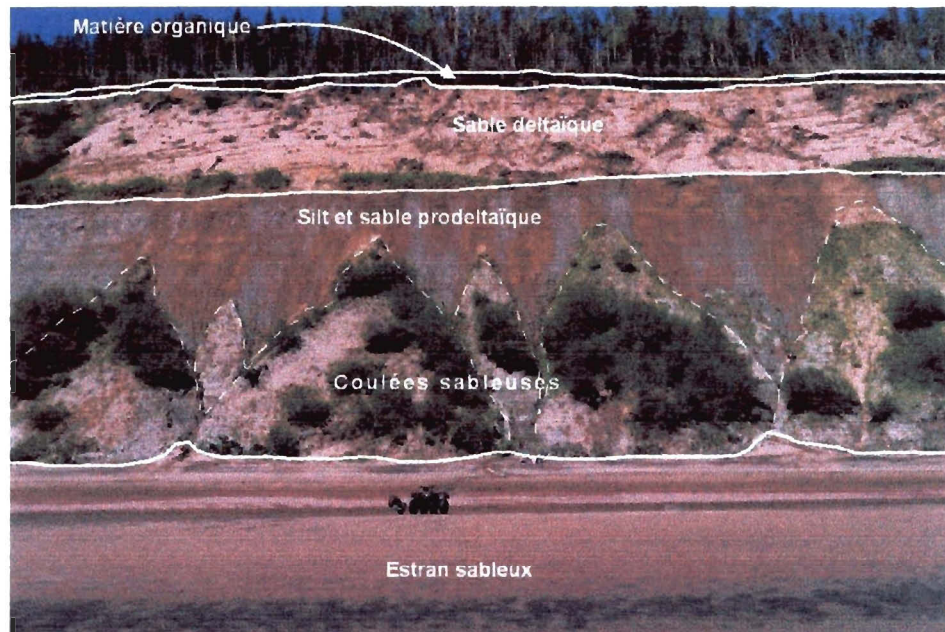


Photo 15- Stratigraphie des falaises de Forestville

Les systèmes côtiers à terrasse de plage correspondent à des zones où la dénivellation vers la côte est relativement faible. Le développement de ce type de côte s'effectue par une accumulation de sédiments sableux sur le haut de plage et par leur colonisation par des plantes halophiles permettant ainsi de stabiliser le milieu. L'accumulation se situe souvent entre la base d'une falaise située en arrière-côte et la ligne des hautes mers moyennes. Lorsque ce type de système côtier est en érosion, il se termine à la côte par une microfalaise vive ou active de hauteur variable (Photo 16). Lorsque les terrasses de plage sont en accumulation un haut de plage végétalisé ou semi-végétalisé est présent et ils se terminent à

la côte en pente douce (Photo 17). Dans la plupart des cas, ce type de système côtier peut s'apparenter aux flèches littorales dû au type de sédiments présents et à la géomorphologie à l'approche de la côte. Cependant, leur développement n'est pas aussi directement dépendant de la dérive littorale et du sens de celle-ci que pour les côtes à flèches littorales, mais plutôt dépendant du patron de réfraction des vagues. Lorsque les terrasses de plage se développent dans des milieux où l'activité éolienne est importante, il est possible de retrouver des dunes bordières comme dans le cas des flèches littorales.



Photo 16- Microfalaise active, Longue-Rive



Photo 17- Haut de plage végétalisé, Pointe-à-Boisvert

Dans la zone d'étude, les côtes à terrasses de plage sont réparties de façon uniforme, puisqu'elles sont présentes dans tous les secteurs à l'exception du secteur 5 où sont localisées les falaises de Forestville. Dans le secteur 1, Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton), elles constituent la majeure partie des côtes de ces deux villages. Dans le secteur 2, Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert, elles sont quasi-absentes. Un seul petit segment côtier de terrasses de plage se retrouve au sud des Crans Rouges dans le centre du village. Dans le secteur 3 et 4, la péninsule de Portneuf et le village de Portneuf-sur-Mer, elles sont situées entre la flèche littorale de la pointe à Boisvert et la barre de Portneuf. Seulement quelques terrasses de plages sont protégées par la barre de Portneuf. La stratigraphie de ces systèmes côtiers ressemble beaucoup à celle des flèches littorales. Aucune coupe stratigraphique n'a été réalisée dans ce type de système côtier puisque les observations effectuées sur ces environnements ont permis d'identifier une sédimentologie classique de sédiments sableux fins à grossiers à laminations parallèles.

Finalement, les côtes artificielles correspondent aux côtes modifiées par l'humain. Cette classe ne correspond pas à un type de côte, mais représente plutôt l'état d'artificialisation des systèmes côtiers naturels décrits précédemment. À l'exception des infrastructures pour la navigation, elles correspondent dans la plupart des cas à des structures de protection contre l'érosion. L'étude de l'artificialité des côtes permet d'évaluer la pertinence de l'installation des structures artificielles ainsi que leur efficacité en fonction de l'évolution subséquente de la côte. L'évolution est quantifiable par les taux

de recul enregistrés dans le secteur anthropisé. En bordure des structures de protection, l'érosion est souvent plus intense. Par exemple, l'effet de bout aux extrémités des enrochements ou des murets de protection peut entraîner l'érosion accélérée des systèmes côtiers. L'identification des côtes artificielles permet donc d'établir un suivi des interventions en milieu côtier. Dans le secteur à l'étude, les côtes artificielles sont peu nombreuses. Dans le secteur 1, Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton), il y a un enrochement lorsque la route 138 passe à proximité de la ligne des PMSGM. Un peu plus au nord, au sud du village de Sault-au-Mouton, il y a un muret de protection en bois et en pierres pour protéger une série de chalets et un quai se trouve à l'embouchure de la rivière. Dans le secteur 2, Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert, il y a trois segments de côte artificialisée. Le premier segment se situe dans le marais au centre du village de Saint-Paul-du-Nord : il correspond à un enrochement pour protéger les maisons dans la bordure littorale. Le deuxième segment est l'aboteau dans le marais de la baie de Mille-Vaches. Le troisième segment est un enrochement de protection pour des résidences secondaires et permanentes installées sur la flèche littorale de la pointe à Émile. Pour le secteur 3, la péninsule de Portneuf, il y a deux segments enrochés dans la même zone : un enrochement pour protéger des résidences secondaires et permanentes sur la flèche littorale de la pointe à Boisvert et un autre enrochement de protection pour la halte routière le long de la route 138 au sud du village de Portneuf-sur-Mer. Dans le secteur 4, Portneuf-sur-Mer, il y a un enrochement pour protéger les maisons du village. Dans l'embouchure de la rivière Portneuf, il y a deux quais. Finalement, dans le secteur 5, les falaises de Forestville, les systèmes artificiels sont localisés près de l'embouchure de la



rivière du Sault aux Cochons : il y a deux enrochements et le quai de Forestville, tous trois à proximité l'un de l'autre.

#### **4.2. Cartographie de la ligne de rivage (1931-2004)**

La cartographie de la ligne de rivage a été réalisée en fonction des cinq secteurs décrits précédemment (Annexe 2). Les résultats pour chacun des secteurs sont présentés séparément (Annexe 5). La cartographie de l'évolution littorale présente en premier lieu l'ensemble de la période de mesure par photointerprétation multidate, soit la période entre 1931 et 2001, qui est subdivisé pour présenter l'évolution décennale. Finalement, l'évolution littorale annuelle, entre 2000 et 2004, à partir des piquets repères est cartographiée. Cette cartographie est appuyée au moyen de graphiques présentant les bilans d'érosion et d'accumulation selon la position des segments côtiers sur un profil allant du point à l'extrême sud-ouest (Baie-des-Bacon) jusqu'à l'extrême nord-est (Forestville) du territoire d'étude. Ces graphiques seront analysés à la section 4.4. Les résultats de l'évolution côtière de la flèche littorale de Portneuf-sur-Mer, la barre de Portneuf, sont présentés sur un graphique d'érosion et d'accumulation, dans la section 4.4., afin d'obtenir une meilleure vue d'ensemble des mesures effectuées.

#### 4.2.1. Secteur 1-Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton)

Le secteur 1 présente seize segments côtiers en excluant les marais maritimes qui seront analysés dans la section 4.3. Pour la période entre 1931 et 2001, le nombre de zones d'accumulation et de zones d'érosion sont similaires. Ainsi, huit des dix-sept mesures présentent des taux d'accumulation, ce qui correspond à une longueur de côte de 2,5 kilomètres. Cependant, les taux d'accumulation demeurent relativement faibles avec des valeurs annuelles moyennes se situant toutes en deçà de 30 centimètres par année. Il y a six zones d'érosion qui se situent vers le nord-est du secteur et qui totalisent 4,3 kilomètres de côte. Comme dans le cas des zones d'accumulation, les zones d'érosion présentent des valeurs relativement faibles se situant également toutes sous les 30 centimètres par année à l'exception des deux secteurs situés de part et d'autre de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton où des valeurs moyennes supérieures à 1 mètre par année ont été mesurées, soit 1,10 mètres/année et 1,13 mètres/année. Les taux d'érosion maxima mesurés sur les 70 années de mesure pour ce secteur se situent entre 1,64 mètres et 130,19 mètres au nord-est du secteur.

L'intervalle de 1931 à 1950 présente des taux d'érosion pour presque tout le secteur. Sur les dix-sept mesures, seulement une mesure présente un taux d'accumulation. Cette valeur a été mesurée à l'extrémité nord-est du secteur avec une taux moyen relativement faible de moins de 30 centimètres d'accumulation par année pour les 19 années de mesure. Par contre, le reste du secteur présente des valeurs moyennes d'érosion se situant entre 0,17

et 3,40 mètres par année. Les zones les plus critiques sont les zones identifiées qui se situent à l'extrémité sud-ouest du secteur dans la baie des Bacon et de part et d'autre de la rivière du Sault au Mouton. Les valeurs maximales d'érosion pour les 19 années de mesure sont élevées surtout à l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton, où des mesures dépassent 100 mètres d'érosion. Les valeurs maximales d'érosion sont également très importantes dans le sud-ouest du secteur avec des valeurs oscillant autour de 40 mètres.

Pour la période se situant entre 1950 et 1964, seulement 4 des 17 segments côtiers mesurés présentent des taux d'érosion, soit les segments situés au nord-est du secteur. Les valeurs d'érosion moyennes annuelles se situent entre 0,30 et 1,17 mètres. Les zones les plus critiques demeurent toujours les deux zones situées de part et d'autre de la rivière du Sault au Mouton. En plus des 4 segments côtiers précédents, 2 autres segments présentent une ou plusieurs bornes de mesure ayant des valeurs d'érosion. Malgré le fait que la moyenne pour le segment soit à l'accumulation, ces taux d'érosion maximum sont de 7,06 mètres pour le segment situé au sud-ouest et de 9,19 mètres pour le segment au nord-est. À l'opposé, les taux d'accumulation pour les autres segments se situent entre 2,91 mètres/année pour la zone du sud-ouest et 0,21 mètre/année pour la zone du nord-est.

Les photographies aériennes de 1950 ne présentaient pas une qualité exceptionnelle. De plus, le territoire ne pouvait être couvert dans son ensemble par des photos à la même échelle. Une portion du territoire a été couvert par des photographies au 1 : 40 000. Dans le but de pallier ces irrégularités, des mesures pour l'intervalle entre 1931 et 1964 ont

également été effectuées, en éliminant les données de 1950. Ainsi, il sera possible de comparer les mesures prises pour les intervalles 1931-1950 et 1950-1964 avec l'intervalle 1931-1964. Donc, entre 1931 et 1964, la moitié des segments côtiers présente des taux moyens annuels d'érosion de 0,08 à 2,46 mètres/année. Les valeurs critiques se retrouvent de part et d'autre de l'embouchure de la rivière Sault au Mouton, les valeurs les plus élevées étant 2,46 mètres/année et 1,46 mètre/année. Les autres segments présentent des taux moyens annuels d'érosion assez faibles, les valeurs pour les segments situés au sud-ouest du secteur ne dépassent pas 0,15 mètre/année. Le même scénario se produit pour les segments situés au nord-est du secteur, sauf un segment présentant un taux d'érosion moyen annuel de 0,47 mètre/année.

La période de mesure de 1964 et 1978 présente seulement 6 segments côtiers avec des valeurs moyennes annuelles d'érosion situées entre 0,27 et 1,42 mètre/année et ils se situent au nord-est du secteur. Les valeurs les plus critiques se situent à l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton, mais un segment au sud-ouest présente la valeur d'érosion la plus élevée. Pour cette période de mesure, les valeurs moyennes d'accumulation sont assez importantes pour les segments situés au sud-ouest du secteur avec des valeurs variant entre 0,57 et 1,02 mètre/année.

Pour la période entre 1978 et 1982, seulement 13 segments côtiers ont été mesurés puisque les valeurs n'étaient pas disponibles pour 3 segments situés au sud-ouest. Des valeurs d'accumulation ont été mesurées pour 3 segments côtiers sur 13. Des 10 segments

côtiers présentant des taux moyens annuels d'érosion, 8 d'entre eux ont des valeurs élevées, soit des valeurs supérieures à 1 mètre/année. Les valeurs d'érosion des segments côtiers situés au nord-est du secteur oscillent autour de 3 mètres/année. Le taux annuel moyen d'érosion le plus élevé se situe près de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton avec une valeur de 7,92 mètres/année. Dans la portion sud-ouest du secteur la valeur la plus élevée est de 3,30 mètres/année.

Puisque les photographies aériennes de 1978 ne couvrent pas l'ensemble du secteur à l'étude, un autre intervalle a été mesuré afin de pouvoir réaliser une comparaison pour l'ensemble des secteurs sur la base des mêmes intervalles de mesure. Pour la période entre 1964 et 1982, des 13 segments mesurés, seulement 3 segments ne sont pas en érosion. Les valeurs d'accumulation sont très faibles et elles ne sont pas significatives dû à la marge d'erreur. Les segments côtiers présentant les valeurs d'érosion les plus élevées se situent près de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton avec des valeurs variant entre 1,13 et 2,21 mètres/année. Les taux moyens annuels d'érosion pour l'ensemble du secteur varient entre 0,48 et 2,21 mètres/année. Les valeurs maximales absolues d'érosion varient de 5,39 à 73,57 mètres pour les 18 années d'intervalle.

Pour l'intervalle entre 1982 et 1990, 13 segments côtiers ont pu être mesurés. Des 13 segments mesurés, seulement 3 présentent des valeurs maximales d'érosion pour les 8 ans d'intervalle. Ces segments se situent près de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton et à l'extrémité nord-est du secteur avec des valeurs absolues de 25,78 mètres pour

le segment le plus au nord-est, 4,81 mètres pour celui le plus près de l'embouchure et 6,78 mètres pour le dernier. Les taux moyens annuels d'accumulation de tous les segments oscillent entre 0,05 et 3,33 mètres/année.

Pour la période se situant entre 1990 et 1996 seulement 15 segments côtiers furent mesurés. Durant cet intervalle, 6 segments côtiers présentent des taux moyens annuels d'érosion avec des valeurs variant entre 0,09 et 2,91 mètres/année et 4 segments côtiers présentent de l'accumulation. Cependant, sur les segments côtiers en accumulation, une borne de mesure ou plus présente une valeur d'érosion et celle-ci est comptabilisée dans la moyenne d'accumulation. Les valeurs les plus élevées se situent à l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton avec un taux moyen annuel de 1,33 mètre/année et à l'extrémité nord-est du secteur avec des valeurs de 2,91 mètres/année et 1,87 mètre/année. Les taux d'accumulation moyens annuels sont assez faibles avec des valeurs qui se situent entre 0,21 et 0,70 mètre/année. Les valeurs maximales d'érosion atteignent 34,80 mètres à l'extrémité nord-est du secteur et elles varient entre 2,21 et 34,80 mètres pour l'ensemble du secteur durant les 6 années de mesures.

Durant l'intervalle 1996-2000, 15 segments côtiers ont été mesurés et 4 présentent des taux moyens annuels d'érosion variant entre 0,09 et 2,09 mètres/année. Toutefois, 5 segments présentent des taux moyens annuels d'accumulation avec une borne de mesure ou plus présentant une valeur d'érosion et qui est comptabilisée dans la moyenne d'accumulation. Ces valeurs se situent entre 0,37 et 2,24 mètres, alors que les valeurs

maximales d'érosion pour l'ensemble du secteur varient de 0,37 à 28,00 mètres pour les 4 ans de mesure. Les taux moyens annuels d'érosion les plus élevés sont localisés sur la rive droite de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton, soit 2,09 mètres/année, et à l'extrémité sud-ouest du secteur, soit 1,06 mètre/année. Les autres segments présentant des mesures d'érosion se situent autour de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton et vers l'extrémité nord-est du secteur. Les taux moyen annuel d'accumulation varient entre 0,34 et 1,29 mètre/année.

Le dernier intervalle de mesures prises par photointerprétation est la période entre 2000 et 2001. Des 17 segments côtiers mesurés pour ce secteur, 7 sont en érosion avec des taux moyens annuels variant entre 0,74 et 10,40 mètres/année. À ces segments, s'ajoutent 4 segments qui présentent des taux moyens annuels d'accumulation et au moins une borne de mesure présentant une valeur d'érosion pour chacun de ces 4 segments. Ces valeurs d'érosion se situent entre 2,17 et 8,69 mètres pour l'intervalle. Sur les 7 segments en érosion, 5 présentent des valeurs élevées et ils sont répartis sur l'ensemble du secteur à l'étude soit 2 segments à l'extrémité sud-ouest, 2 segments près de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton et 1 segment à l'extrémité nord-est. Les taux moyens annuels d'accumulation se situent entre 0,57 et 4,41 mètres/année pour l'ensemble du secteur.

Le dernier intervalle pour le secteur 1 est l'intervalle 2000-2004 réalisé à partir des mesures sur les piquets repères sur le terrain. Ces piquets repères sont uniquement installés dans des secteurs en érosion. Sur les 18 piquets repères installés, les mesures sont

disponibles pour seulement 15 d'entre eux. À l'exception d'une seule borne, située à l'extrémité nord-est du secteur et présentant un état stable, toutes les bornes présentent des valeurs de recul variant entre 0,03 et 5,78 mètres. Le sud-ouest du secteur 1 présente les valeurs d'érosion les plus élevées, elles sont toutes au-dessus de 1 mètre/année, et elles varient de 1,43 mètres à 5,78 mètres. Les intervalles 2000-2001 et 2003-2004 sont ceux pendant lesquels le recul maximum est observé, ces maxima varient entre 0,10 et 5,85 mètres.

#### *4.2.2. Secteur 2-Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert*

Dans le secteur 2, 7 segments côtiers ont fait l'objet de mesures. Dans ce secteur, le segment correspondant au marais de la baie de Mille-Vaches n'est pas présenté ici, puisqu'il le sera à la section 4.3.

Durant la période de mesure située entre 1931 et 2001, 4 des 7 segments mesurés sont en érosion et 2 autres sont en accumulation, mais ces derniers montrent une valeur d'érosion sur au moins une des bornes de mesure pour chaque segment durant les 70 ans de mesure. Les taux annuels d'érosion sont très faibles, c'est-à-dire moins de 0,20 mètre/année avec une seule valeur élevée de 1,82 mètre/année située au centre du secteur. Les valeurs maximales d'érosion varient entre 10,69 mètres à l'extrême ouest et 158,01



mètres au centre du secteur. Les taux moyens annuels d'accumulation sont de 0,05 et 0,67 mètre/année pour les deux segments au centre du secteur.

La période de mesure entre 1931 et 1950 présente 2 segments en érosion. Cependant les données pour seulement 6 segments sont disponibles à cause du territoire couvert par les photographies aériennes. Leur taux moyen annuel d'érosion est de 0,37 mètre/année et de 3,07 mètres/année, ce qui montre un taux d'érosion élevé supérieur à 1 mètre/année pour le second segment côtier situé au nord-est du secteur. Les valeurs maximales d'érosion associées à ces segments sont respectivement de 10,99 mètres et 84,98 mètres. Les autres segments mesurés présentent des taux d'accumulation annuels variant entre 0,10 mètre/année et 3,79 mètres/année.

Pour l'intervalle compris entre 1950 et 1964, il y a 4 segments qui présentent des taux moyens annuels d'érosion auxquels s'ajoutent 2 segments côtiers présentant une valeur d'érosion pour au moins une borne de mesure. Les taux annuels d'érosion sont de 0,46, 0,86, 0,47 mètre/année. Un taux élevé de 1,12 mètre/année a été mesuré à l'extrême est du secteur. La valeur maximale d'érosion de ce dernier est de 17,86 mètres. La valeur maximale d'érosion la plus élevée du secteur est située au centre, soit 37,85 mètres. Par ailleurs, les autres valeurs maximales varient entre 4,77 et 15,66 mètres. Les taux moyens d'accumulation sont respectivement de 0,08 et 0,32 mètre/année pour les segments à l'ouest et au centre du secteur.

Durant la période comprise entre 1931 et 1964, seulement 6 segments ont pu être mesurés à cause du territoire couvert par les photographies aériennes dont 4 sont en accumulation et 2 en érosion. Dans chacun des 4 segments en accumulation, une mesure maximale d'érosion a été relevée sur au moins une borne de mesure. Les taux d'érosion varient entre 0,14 mètre/année pour le segment le plus à l'ouest et 1,63 mètre/année pour le segment situé au centre du secteur. La valeur maximale d'érosion mesurée à cet endroit est la plus élevée avec 69,10 mètres. Les autres valeurs maximales d'érosion sont de 9,73 mètres pour le segment le plus à l'ouest et 12,08 mètres pour le segment le plus à l'est. En revanche, les segments en accumulation montrent des taux annuels moyens de 0,22 mètre/année et 1,82 mètre/année pour l'ouest et le centre et de 0,03 mètre/année pour le segment le plus à l'est.

Seulement 5 des 7 segments ont été mesurés durant l'intervalle 1964 et 1978, puisque la couverture aérienne de 1978 s'arrête à la pointe à Boisvert. Les mesures réalisées pour cet intervalle montrent que 4 segments sur 5 sont en érosion avec des taux annuels moyens variant entre 0,14 mètre/année et 3,13 mètres/année. Le taux d'érosion le plus élevé est situé au centre du secteur, avec un taux de 3,13 mètres/année et une valeur maximale de 72,05 mètres. Par ailleurs, les autres valeurs maximales d'érosion se situent entre 3,42 mètres et 28,67 mètres. Le segment en accumulation est à l'extrême ouest. Comme la mesure est très faible compte tenu de la marge d'erreur, le taux n'est pas significatif.

Seulement 5 segments sur 7 ont pu être mesurés par photointerprétation entre 1978 et 1982, dû à la couverture aérienne de 1978 qui s'arrête à la pointe à Boisvert. Des taux annuels moyens d'érosion ont été mesurés pour 2 segments au centre du secteur et les 3 autres présentent des taux annuels moyens d'accumulation faible, jugés non significatifs : les taux annuels moyens d'érosion sont de 0,48 mètre/année, avec une valeur maximale de 9,05 mètres, et 1,21 mètre/année, avec une valeur maximale de 14,05 mètres.

L'intervalle de mesure s'échelonnant entre 1964 et 1982 a permis de prendre des mesures pour les 7 segments. À l'exception d'un seul segment qui présente des valeurs d'accumulation très faibles jugées non significatives, tous les autres segments sont en érosion. Les taux d'érosion varient entre 0,10 et 2,71 mètres/année. Un seul taux d'érosion élevé est observé au centre du secteur avec un taux de 2,71 mètres/année et une valeur maximale de 61,50 mètres pour les 18 années de mesures. Les autres valeurs maximales se situent entre 2,36 mètres et 32,77 mètres.

Pour la période de mesure de 1982 à 1990, les mesures montrent que 2 segments sur 7 sont en érosion et que 2 segments présentent des taux moyens d'accumulation avec une borne ou plus où des valeurs d'érosion ont été mesurées. Les segments en érosion se situent au centre du secteur avec des taux de 0,33 mètre/année au centre ouest et un taux élevé de 5,21 mètres/année au centre est. Les valeurs maximales d'érosion vont de 4,85 à 50,71 mètres. La valeur maximale la plus élevée est associée au taux d'érosion le plus élevé. Les deux autres maxima d'érosion observés se situent à l'est et à l'ouest de ces

mêmes segments. Les taux moyens des 5 segments en accumulation vont de 0,11 à 0,44 mètre/année.

Entre 1990 et 1996, sur les 7 segments mesurés, 2 présentaient des taux moyens annuels d'érosion. Ces segments sont situés à l'extrême est du secteur et présentent des taux de 0,16 mètre/année et une valeur élevée de 1,21 mètre/année pour celui le plus à l'est. À ces segments en érosion s'ajoute un segment au centre ayant une valeur maximale absolue d'érosion de 13,31 mètres et deux autres segments plus à l'est ayant quant à eux des valeurs maximales d'érosion de 12,00 mètres et de 7,90 mètres. Les taux moyens annuels d'accumulation se situent entre des valeurs très faibles, jugées non significatives, et 7,19 mètres/année. Cette valeur est supérieure à tous les taux d'érosion du secteur.

La période de 1996 à 2000, présente 3 segments en érosion sur les 7 segments mesurés avec des taux de l'ordre de 0,25 mètre/année à 2,68 mètres/année. Deux des segments en érosion sont situés au centre du secteur et l'autre à l'ouest. Le taux d'érosion le plus élevé est situé au centre du secteur. De plus, 1 segment en accumulation à l'est présente une valeur maximale d'érosion sur une de ses bornes de mesures de 21,26 mètres. Les valeurs maximales d'érosion se situent entre 3,81 mètres et 21,26 mètres. Les taux moyens d'accumulation sont situés entre des valeurs très faibles et 13,46 mètres/année.

Le dernier intervalle de mesures par photointerprétation est entre 2000 et 2001. À l'exception de deux segments situés à l'ouest du secteur tous les autres segments sont en

érosion. Les taux moyens d'accumulation varient entre des valeurs très faibles, non significatives, et 0,71 mètre/année. Les 5 segments en érosion présentent des taux élevés. Les taux moyens d'érosion vont de 2,51 mètres/année à 50,14 mètres/année. Un des deux segments en accumulation présente une valeur maximale d'érosion de 5,40 mètres.

Dans le secteur 2, le dernier intervalle présenté est la période entre 2000 et 2004. Cette période correspond aux mesures prises sur le terrain. Pour ce secteur, 27 bornes ont été installées et les mesures de 24 d'entre elles sont disponibles. Parmi les mesures réalisées sur le terrain, 16 bornes sur 24 montrent un recul élevé avec des valeurs supérieures à 1 mètre/année. Les zones d'érosion élevées sont bien réparties sur l'ensemble du secteur, mais avec une concentration sur le segment côtier à l'extrême est du secteur. Les reculs se situent entre 0,07 mètre et 11,20 mètres, tandis que les valeurs maximales pour l'intervalle de mesure se situent entre 0,20 et 11,40 mètres. Les taux maximums ont principalement été mesurés durant l'intervalle 2000-2001 et 2003-2004.

#### *4.2.3. Secteur 3-Péninsule de Portneuf*

Pour la péninsule de Portneuf, 7 segments côtiers ont été mesurés par photointerprétation pour chacun des intervalles temporels. Des taux d'érosion ont été mesurés sur 3 segments et, en contrepartie, 4 secteurs sont en accumulation entre 1931 et 2001. De ces 4 secteurs en accumulation, un des segments côtiers présente une valeur

maximale d'érosion pour au moins une des bornes durant les 70 années de mesure. Les taux moyens annuels d'érosion varient entre 0,17 mètre/année et 1,43 mètre/année. Le taux d'érosion le plus élevé a été mesuré au nord-est du secteur cartographié. Ce segment présente également la valeur maximale d'érosion la plus élevée soit 115,24 mètres. Les autres valeurs maximales d'érosion varient de 26,74 mètres à 115,24 mètres. Sur les 3 segments en érosion, 2 sont situés au nord-est du secteur et l'autre est au sud-ouest près du point de changement de direction de la côte. Les taux annuels moyens d'accumulation sont élevés pour le secteur avec des taux variant de 0,05 mètre/année à 3,71 mètres/année.

La période de mesure de 1931 à 1950 est surtout en accumulation car un seul des 7 segments, localisé à l'extrême nord-est du secteur, présente un taux d'érosion de 0,52 mètre/année avec une valeur d'érosion maximale mesurée de 18,52 mètres pour les 19 années de mesures. Tous les autres segments présentent des taux annuels d'accumulation élevés qui varient entre 2,13 mètres/année et 17,56 mètres/année. Les valeurs les plus élevées ont été mesurées sur les segments côtiers de l'extrême sud-ouest du secteur.

Durant la période suivante, soit entre 1950 et 1964, l'ensemble des segments est en érosion. Pour cette période, les mesures de 6 segments sur 7 sont disponibles à cause de la couverture photographique. De ces 6 mesures, 5 ont des taux élevés, supérieurs à 1 mètre/année, avec des données variant de 2,12 mètres/année à 4,39 mètres/année. Le seul segment présentant un taux plus faible a un taux annuel moyen d'érosion de 0,40 mètre/année et une valeur maximale d'érosion de 23,08 mètres. Les valeurs maximales des

autres segments varient entre 53,57 mètres et 102,25 mètres. Les taux d'érosion les plus élevés ont été mesurés sur les segments se situant près de la zone de changement de direction de la côte et au nord-est du secteur. La valeur maximale d'érosion enregistrée, 102,25 mètres, est celle du segment à l'extrémité sud-ouest du secteur.

Seulement 6 segments ont été mesurés pour l'intervalle allant de 1931 à 1964. Il y a 2 segments en érosion sis à l'extrémité nord-est du secteur. L'avant-dernier segment présente un taux moyen annuel d'érosion de 1,72 mètre/année avec une valeur maximale d'érosion de 77,28 mètres pour les 33 années de mesure. Le dernier segment a un taux annuel moyen d'érosion de 1,66 mètre/année et une valeur d'érosion maximum de 72,09 mètres. Les autres segments présentant des taux annuels moyens d'accumulation variant entre 1,45 mètre/année et 9,58 mètres/année. Le taux d'accumulation le plus élevé est situé sur le segment à l'extrême sud-ouest du secteur.

Les photographies aériennes de 1978 ne couvrent pas le secteur de la péninsule de Portneuf. À cet effet, les intervalles 1964-1978 et 1978-1982 ne sont pas présentés. L'intervalle utilisé pour pallier cette lacune est celui de 1964-1982.

Pour la période de mesure entre 1964 et 1982, seulement 6 segments ont été mesurés. De ces segments, 2 présentent des taux annuels moyens d'érosion de 0,28 mètre/année pour le segment à l'extrême sud-ouest et 0,52 mètre/année pour l'avant-dernier segment au nord-est du secteur. Les valeurs maximales d'érosion pour les 18 années de mesure sont de

65,92 mètres et 16,67 mètres respectivement. De plus, le dernier segment au nord-est du secteur présente un taux moyen d'accumulation de 0,19 mètre/année avec, toutefois, une valeur maximale d'érosion de 2,94 mètres mesurée sur une des bornes. Les taux annuels moyens d'accumulation pour le secteur 3 varient entre 1,02 mètre/année et 1,28 mètre/année. Ces 4 segments sont localisés près de la zone de changement de direction de la côte.

Entre 1982 et 1990, 5 segments sont en érosion et 2 en accumulation. Un des segments en accumulation a cependant une valeur maximale d'érosion enregistrée sur au moins une des bornes de mesures. Les zones en érosion ont des taux moyens annuels bas, mais un des segments, situé au nord-est du secteur, présente un taux élevé d'érosion de 2,06 mètres/année avec une valeur maximale d'érosion pour les 8 années de mesure de 15,96 mètres. Les autres zones d'érosion présentent des taux moyens annuels variant entre 0,10 mètre/année et 0,73 mètre/année et des valeurs maximales de 1,15 mètre à 31,60 mètres. La valeur maximale d'érosion la plus élevée, 31,60 mètres, a été mesurée sur le segment au sud-ouest du secteur. La première zone en accumulation est dans la zone de changement de direction de la côte avec un taux annuel moyen d'accumulation de 0,46 mètre/année. La deuxième est au nord-est du secteur avec un taux de 0,77 mètre/année.

Entre 1990 et 1996 tous les segments sont en érosion. De plus, 6 segments sur 7 ont des taux annuels moyens d'érosion supérieurs à 1 mètre/année. Les données pour ces segments varient entre 1,05 mètre/année et 3,48 mètres/année et ils sont situés vers le nord-



est du secteur. Les valeurs maximales d'érosion pour ces 6 années de mesures varient de 9,81 mètres à 42,25 mètres. La valeur maximale la plus élevée a été enregistrée sur le seul segment qui n'a pas un taux élevé d'érosion, soit le segment situé au sud-ouest du secteur. Ce segment côtier a un taux annuel moyen d'érosion de 0,44 mètre/année.

L'intervalle de mesure entre 1996 et 2000 montrent que 3 des 7 segments ont des taux annuels moyens d'érosion et que ces taux sont élevés : ils varient entre 3,47 mètres/année et 4,27 mètres/année avec des valeurs maximales entre 14,37 mètres et 23,94 mètres. Il y a deux de ces segments qui sont dans la zone de changement de direction de la côte et l'autre est à l'extrême nord-est du secteur. Les 4 autres segments mesurés présentent des taux moyens annuels d'accumulation de 1,25 mètre/année à 2,51 mètres/année. Cependant, ils présentent tous une valeur maximale d'érosion qui varie entre 2,00 mètres et 14,89 mètres mesurée sur au moins une des bornes du segment. La valeur maximale la plus élevée a été mesurée sur le segment côtier à l'extrémité sud-ouest du secteur.

Le dernier intervalle de mesures par photointerprétation est celui de 2000 à 2001. Durant cette période, 2 segments côtiers sur 7 présentent des taux annuels moyens d'érosion. Un de ces segments est situé à l'extrémité nord-est du secteur, avec un taux élevé d'érosion de 4,16 mètres/année et une valeur maximale d'érosion de 25,07 mètres. Le second est près de la zone de changement de direction de la côte avec un taux annuel moyen d'érosion de 1,55 mètre/année et une valeur maximale d'érosion de 16,40 mètres.

Les 5 autres segments présentent des taux annuels moyens d'accumulation variant entre 0,51 mètre/année et 1,85 mètre/année. De ces 5 segments, 4 ont des valeurs maximales d'érosion, enregistrées sur au moins une des bornes de mesure de chaque segment, qui oscillent entre 0,57 mètre et 12,24 mètres. L'avant-dernier segment au nord-est du secteur a un taux annuel moyen d'accumulation de 1,59 mètre/année.

Pour la période entre 2000 et 2004, la cartographie des bornes de mesures présente les données pour 32 piquets repères sur 33. Deux bornes présentent un état stable, elles sont situées au nord-est et au centre du secteur. En revanche, toutes les autres bornes présentent des valeurs d'érosion élevées. De plus, 14 d'entre elles ont des valeurs d'érosion dépassant 1 mètre/année. Ces valeurs se situent entre 1,05 mètres et 7,20 mètres. Le recul absolu pour l'ensemble des bornes varie entre 0,18 mètre et 7,20 mètres. Les zones d'érosion élevée sont bien réparties sur l'ensemble du secteur de la péninsule de Portneuf.

#### *4.2.4. Secteur 4-Portneuf-sur-Mer*

Le secteur 4 comprend la côte du village de Portneuf-sur-Mer et la barre de Portneuf. Dans ce secteur, 15 segments ont été mesurés par photointerprétation. Dans le cas de la barre de Portneuf, les mesures seront présentées sous forme graphique dans la section 4.4. La représentation graphique est plus adaptée à ces mesures, puisque plusieurs couvertures

de photographies aériennes ne sont pas disponibles et certaines ne couvrent pas entièrement le territoire ou encore la qualité des photos ne permettait pas une bonne photointerprétation. Les 15 segments du secteur 4 ne correspondent pas à la totalité des segments pour ce secteur. Cependant, selon la méthodologie établie, les petits segments mesurant moins de 50 mètres ne pouvaient être mesurés par photointerprétation, puisque la longueur du segment est inférieure à la distance entre deux bornes de mesure. Toutefois, ces segments ne sont pas ignorés car, lors de la photointerprétation, ces segments ont été caractérisés et ils sont pris en considération lors de l'interprétation des résultats.

Pour l'intervalle s'échelonnant de 1931 à 2001, les 15 segments ont été mesurés. La majorité des segments sont en accumulation, soit 11 segments sur 15 avec des taux annuels moyens d'accumulation variant entre 0,12 mètre/année et 1,02 mètre/année. Des 11 zones d'accumulation, une seule présente une valeur maximale d'érosion de 2,02 mètres pour une des bornes du segment. Ce segment se localise au milieu du secteur. Les quatre autres zones qui sont en érosion présentent des valeurs très faibles, les taux annuels moyens d'érosion variant entre 0,07 mètre/année et 0,17 mètre/année. Les valeurs d'érosion maximales mesurées sur ces segments sont également faibles : elles varient de 10,62 mètres à 27,40 mètres. Les zones d'érosion sont concentrées à l'extrémité nord du secteur sur les segments protégés par la barre de Portneuf.

Les mesures prises dans l'intervalle entre 1931 et 1950 dénotent une majorité de segments en érosion. Sur les 15 segments mesurés, deux segments sont en accumulation.

Le segment à l'embouchure de la rivière Portneuf, sur la rive droite, a un taux moyen d'accumulation de 0,79 mètre/année et un autre segment situé au nord du secteur, derrière la barre de Portneuf, présente un taux moyen d'accumulation extrêmement faible, non significatif. Les 13 autres segments sont en érosion dont 3 présentent des taux annuels moyens supérieurs à 1 mètre/année variant de 1,25 mètre/année à 1,76 mètre/année avec des valeurs maximales de 28,09 mètres à 42,93 mètres. Ces segments en forte érosion sont situés au sud du secteur derrière la barre de Portneuf. Les autres taux annuels moyens d'érosion pour le secteur 4 varient entre 0,13 et 0,95 mètre/année avec des valeurs maximales de 6,54 mètres à 31,51 mètres.

Les résultats pour l'intervalle de mesure de 1950 à 1964 montrent une forte majorité de zones d'accumulation. Dans le secteur de Portneuf-sur-Mer, 13 zones sont en accumulation et 2 sont en érosion. Les segments côtiers où des taux annuels moyens d'érosion ont été mesurés sont les deux segments à chaque extrémité du secteur. Au nord, le taux d'érosion est de 0,26 mètre/année et la valeur maximale d'érosion est de 14,16 mètres. Le segment le plus au sud a un taux annuel moyen d'érosion de 0,67 mètre/année et une valeur maximale d'érosion de 32,75 mètres, ce segment n'est pas situé derrière la barre de Portneuf. Toutes les autres mesures montrent une accumulation qui varie entre de très faibles valeurs annuelles, non significatives, jusqu'à 6,20 mètres/année.

Les mesures pour la période de 1931 à 1964 témoignent d'une forte majorité de sites d'accumulation. À cet effet, sur les 15 segments mesurés, un seul présente de l'érosion : il

s'agit du segment situé à l'extrémité sud du secteur. Son taux d'érosion est de 0,39 mètre/année et la valeur d'érosion maximale enregistrée pour les 33 années de mesure est de 26,37 mètres. Ce segment n'est pas situé derrière la barre de Portneuf. Les 14 autres segments présentent des taux annuels moyens d'accumulation qui se situent dans une fourchette de valeurs comprises entre de faibles taux d'accumulation non significatifs et 2,12 mètres/année.

Comme pour le secteur 3, les photographies aériennes de 1978 ne couvrent pas le secteur 4. Cette situation élimine les intervalles de 1964-1978 et de 1978-1982.

Les mesures prises dans l'intervalle de 1964 à 1982 présentent également une majorité de zones d'accumulation. Il y a 12 zones d'accumulation, et seulement 3 zones d'érosion. Les segments côtiers en érosion sont au centre du secteur et à l'extrémité nord. Ils présentent des taux annuels moyens d'érosion variant entre 0,15 mètre/année et 0,46 mètre/année. Le segment au nord présente un taux annuel moyen d'érosion de 0,46 mètre/année et une valeur maximale d'érosion de 18,92 mètres. Les deux segments au centre ont des taux moyens d'érosion de 0,30 mètre/année et 0,15 mètre/année et des valeurs maximales de 15,89 mètres et 16,93 mètres respectivement. Des 12 segments en accumulation, 2 présentent au moins une borne de mesure avec des valeurs maximales d'érosion. Un de ces segments est au centre nord du secteur, avec une valeur maximale d'érosion de 2,02 mètres et le second segment se situe au centre sud du secteur avec une valeur maximale d'érosion de 48,45 mètres. D'autre part, toutes les zones d'accumulation

présentent des valeurs variant entre de très faibles valeurs, non significatives, et 1,63 mètre/année.

Il y a 9 zones d'accumulation et 6 zones d'érosion pour la période entre 1982 et 1990. De plus, sur les 9 segments en accumulation 4 présentent des valeurs maximales d'érosion pour au moins une borne. Les 6 zones d'érosion se situent au centre et au nord du secteur, derrière la barre de Portneuf. Les 3 segments situés au centre présentent des taux annuels moyens d'érosion élevés, ils varient entre 1,64 mètre/année et 2,02 mètres/année et les valeurs maximales d'érosion varient de 20,76 mètres à 28,66 mètres. Les autres zones d'érosion ont des taux moyens plus faibles, variant entre 0,06 mètre/année et 0,57 mètre/année. Leur valeur maximale d'érosion varie entre 1,96 mètre et 12,56 mètres. Pour les zones d'accumulation, les taux annuels moyens varient entre de très faibles valeurs, non significatives, et 4,06 mètres/année pour le segment situé à l'extrême nord du secteur. Sauf un seul segment, tous les segments en accumulation ont des valeurs supérieures à 1 mètre/année.

L'intervalle de mesure de 1990 à 1996 montre une forte majorité de zones d'érosion. Des 15 segments mesurés, uniquement 3 sont en accumulation et les 12 autres sont en érosion. Parmi ces derniers, 10 segments ont des taux annuels moyens supérieurs à 1 mètre/année, ils varient entre 1,07 mètre/année et 5,46 mètres/année et les valeurs maximales oscillent entre 10,11 mètres et 46,00 mètres. Les deux derniers segments en érosion ne présentant pas de valeurs élevées ont des taux annuels moyens de 0,44

mètre/année et 0,95 mètre/année et des valeurs maximales d'érosion de 5,67 mètres et 14,23 mètres. Tous les segments en érosion sont localisés derrière la barre de Portneuf, répartis uniformément du sud au nord. De plus, un des 3 segments en accumulation, le plus au nord, présente une valeur maximale d'érosion de 14,51 mètres pour une des bornes. Les taux moyens d'accumulation des segments situés au centre du secteur sont de 0,52 mètre/année et de 1,21 mètre/année et pour celui au nord le taux d'accumulation est plus élevé, atteignant 3,24 mètres/année.

Entre 1996 et 2000, la majeure partie des segments sont en accumulation, soit 12 sur 15. Cependant, parmi ces 12 segments, 5 présentent des valeurs maximales d'érosion enregistrées sur une des bornes de chaque segment. Les 3 zones d'érosion sont situées à l'extrémité nord du secteur, derrière la barre de Portneuf. Les taux annuels moyens d'érosion sont de 2,82 mètres/année, 3,26 mètres/année et 6,32 mètres/année du sud vers le nord et les valeurs maximales associées sont de 12,45 mètres, 19,54 mètres et 26,48 mètres respectivement. Les 5 segments qui présentent des valeurs maximales d'érosion malgré leur taux moyen d'accumulation ont des mesures qui varient de 1,75 mètre à 23,43 mètres. La valeur la plus élevée se retrouve sur le segment qui n'est pas protégé par la barre de Portneuf, à l'extrémité nord du secteur. Les taux annuels moyens d'accumulation pour le secteur varient entre 0,52 mètre/année et 9,18 mètres/année.

Le dernier intervalle de prise de mesures par photointerprétation est la période de 2000 à 2001. Durant cet intervalle, il y a 5 segments en érosion et 10 segments en

accumulation. Par contre, des 10 segments en accumulation, 5 ont des valeurs maximales d'érosion pour au moins une de leur borne. Les 5 zones d'érosion sont situées principalement au centre du secteur à l'exception d'une seule située à l'extrémité nord du secteur, non protégée par la barre de Portneuf. Toutes les zones d'érosion du secteur présentent des taux élevés d'érosion. Leur taux moyens annuels vont de 2,19 mètres/année à 34,01 mètres/année avec des valeurs maximales de 7,77 mètres à 76,01 mètres pour l'année d'intervalle. Les segments en accumulation présentant des maxima d'érosion varient entre 0,30 mètre et 8,34 mètres. Les zones d'accumulation présentent des taux moyens de 3,36 mètres/année à 26,35 mètres/année. Ces zones se situent au nord et au sud du secteur.

Dans le secteur 4, les mesures ont pu être recueillies pour seulement 27 bornes de mesure sur 31 piquets repères installés. De ces 27 bornes, 6 présentent un état stable de la côte : il s'agit des bornes installées à l'extrémité sud de la barre de Portneuf. Cependant une seule année de suivi a été effectuée sur ces bornes, ce qui n'est pas représentatif d'un taux moyen pour l'intervalle 2000-2004. Les autres bornes se trouvent au centre de la barre de Portneuf et la situation est la même pour ces bornes. Il est possible de diviser les bornes en deux groupes : les piquets repères derrière la barre de Portneuf et ceux situés sur la barre de Portneuf et la pointe des Fortin. Les bornes derrière la barre de Portneuf présentent des reculs annuels variant entre 0,04 mètre et 0,45 mètre, avec des valeurs maximales comprises entre 0,14 mètre et 1,52 mètres. Par ailleurs, les autres bornes de la barre de Portneuf et de la pointe des Fortin montrent presque toutes des taux élevés d'érosion. Le



recul de la côte varie entre 0,25 mètre et 6,03 mètres. Le recul maximum mesuré durant la période de suivi varie entre 0,50 mètre et 9,59 mètres. Dans le secteur 4, les différents maxima mesurés ne présentent pas d'intervalle préférentiel. Pour ce secteur, les données non disponibles pourraient correspondre à des bornes perdues à cause de très forts taux d'érosion.

#### *4.2.5. Secteur 5-Falaises de Forestville*

Le secteur des falaises de Forestville est caractérisé par un long segment côtier de côte deltaïque. Les mesures prises par photointerprétation ont pu être réalisées sur un nombre de segments variable, soit 3 ou 5 segments selon les intervalles de mesures. Les résultats présentés sont très fragmentaires. Ainsi, dans plusieurs cas, les erreurs de la photointerprétation à l'écran entraînaient des valeurs bien en deçà de la marge d'erreur générée. De plus, pour certaines couvertures de photographies aériennes, les photographies couvrant la baie de Forestville n'étaient pas disponibles.

Durant l'intervalle entre 1931 et 2001, seulement 1 segment a été mesuré. Les données pour les deux segments situés au nord du secteur ne sont pas disponibles à cause de la couverture de photographies aériennes. Le plus long secteur, les falaises de Forestville, montre des valeurs faibles, donc elles sont notées comme non significatives.

Pour la période s'échelonnant entre 1931 et 1950, les résultats sont les mêmes que pour l'intervalle précédent.

Pour l'intervalle de 1950 à 1964, 2 segments à l'extrémité nord du secteur 5, qui n'avaient pas été mesurés précédemment, ont été mesurés. Sur les 5 segments mesurés, seul ces 2 segments présentent des taux d'érosion. L'avant-dernier segment au nord présente un taux annuel moyen d'érosion de 2,38 mètres/année avec une valeur maximale de 45,41 mètres pour les 14 années de mesure. Le dernier segment à l'extrémité nord présente un taux annuel moyen d'érosion de 0,99 mètre/année et une valeur maximale de 18,20 mètres. D'autre part, sur les 3 segments situés au sud, il n'y a pas de résultat pour 1 de ces segments et les 2 autres segments présentent des valeurs faibles, c'est-à-dire non significatives.

Durant la période de mesure de 1931 à 1964, les données pour 2 segments seulement sont disponibles. Le segment au sud présente des taux annuels moyens non significatifs. Le segment au nord présente un taux annuel moyen d'érosion de 0,14 mètre/année avec une valeur maximale d'érosion de 15,45 mètres.

Pour le secteur 5, comme dans le cas des deux secteurs présentés précédemment, il n'y a pas eu de couverture aérienne en 1978. Les intervalles 1964-1978 et 1978-1982 ne sont donc pas présentés.

Durant l'intervalle de 1964 à 1982, 3 segments ont fait l'objet de mesures. Un segment situé au sud du secteur et deux segments situés à l'extrémité nord du secteur. Le dernier segment au nord présente un taux annuel moyen d'accumulation de 0,59 mètre/année, tandis que l'avant-dernier présente un taux annuel moyen d'érosion de 0,60 mètre/année avec une valeur maximale d'érosion de 17,37 mètres. Le segment le plus au sud présente des valeurs faibles non significatives.

Pour la période de mesure comprise entre 1982 et 1990, le scénario est le même que pour l'intervalle 1931-2001 et 1931-1950.

Une seule mesure a pu être prise durant l'intervalle de 1990 à 1996 : il s'agit du segment le plus au sud du secteur. Celui-ci présente un taux annuel moyen d'érosion élevé de 2,96 mètres/année avec une valeur maximale d'érosion de 45,54 mètres. Les mesures pour les deux autres segments au nord du secteur ne sont pas disponibles parce que le territoire ne fut pas couvert par les photographies aériennes.

Pour l'intervalle de 1996 à 2000, les mesures ont été prises sur 3 segments. Il y a un segment en accumulation, un segment en érosion et le segment le plus au sud témoigne de faibles valeurs non significatives. La zone d'érosion correspond au segment à l'extrémité nord du secteur avec un taux annuel moyen d'érosion de 0,54 mètre/année et une valeur maximale d'érosion de 11,11 mètres. Le segment en accumulation est situé au sud du précédent : son taux annuel moyen d'accumulation est de 3,23 mètres/année.

Le dernier intervalle de mesures par photointerprétation est celui de 2000 à 2001. Durant cet intervalle, 3 segments ont fait l'objet de mesures. Il y a une zone d'érosion, une zone d'accumulation et un segment, celui le plus au sud du secteur, qui présente des taux très faibles non significatifs. Le segment côtier en érosion présente un taux moyen élevé de 1,35 mètre/année avec une valeur maximale d'érosion de 5,60 mètres. Ce segment est localisé dans la baie de Forestville au nord du secteur. Le segment situé à l'extrémité nord du secteur présente un taux d'accumulation de 12,89 mètres/année.

Dans le secteur des falaises de Forestville, il y a peu de piquets repères installés sur le terrain. Il y a 4 piquets repères pour l'ensemble du secteur et les données de seulement 3 d'entre eux sont disponibles, le quatrième ayant été installé en 2004. La borne de mesure la plus au nord du secteur est la seule qui présente un littoral stable. Les deux autres bornes, un peu plus au sud, présentent des reculs de 0,16 mètre et de 0,73 mètre avec des maxima de 0,50 mètre et de 2,20 mètres respectivement. Ces maxima ont été mesurés entre 2000 et 2001 et entre 2003 et 2004.

#### **4.3. Cartographie des marais maritimes (1931-2001)**

Pour la cartographie des marais maritimes les mêmes secteurs que pour la ligne de rivage ont été utilisés (Annexe 2). La cartographie des marais est présentée pour

l'ensemble de la période de mesures réalisées par photointerprétation, c'est-à-dire entre 1931 et 2001 (Annexe 6). Les zones de marais maritimes sont toutes superposées sur la même carte pour permettre une meilleure synthèse de l'évolution. De plus, les données de superficie et de périmètre sont présentées dans un encart sur les cartes. Le type de marais à l'étude est également identifié pour permettre de dégager les tendances pour les deux types de marais rencontrés, les marais frangeants et les marais protégés. Dans plusieurs cas, les photographies aériennes ne couvraient pas l'ensemble des marais puisque ceux-ci sont présents assez loin au large des côtes. Ainsi, lors de la réalisation de la photointerprétation, le contour des marais n'a pu être tracé en entier ce qui a rendu les mesures impossibles à effectuer dans certaines zones pour certaines périodes.

#### *4.3.1. Secteur 1-Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton)*

Deux marais maritimes sont présents dans le secteur 1, il s'agit du marais de la baie des Bacon et du marais de Sault-au-Mouton. Tous deux sont des marais frangeants. Le marais de la baie des Bacon s'étend à partir d'un petit ruisseau situé à l'extrémité sud du territoire à l'étude, dans la baie des Bacon, jusqu'au quai désaffecté du village de Sault-au-Mouton. Ce marais couvre environ 4,34 kilomètres de littoral mesurés sur l'orthophotographie de 2001 à un mètre de résolution au sol. Le marais de Sault-au-Mouton couvre le littoral correspondant au village. Ce marais s'étend sur environ 1,76 kilomètre linéaire le long de la côte.

Dans le cas du marais de la baie des Bacon, les mesures de superficie et de périmètre n'ont pu être réalisées pour les années 1931 et 1950 puisqu'il n'y a pas de couverture aérienne et à cause de la mauvaise qualité de la couverture de 1950. En 1950, la réflexion du soleil sur l'estran ne permettait pas d'identifier correctement la limite des marais. De 1964 à 1978, il y a une augmentation de la superficie et du périmètre du marais. Le gain en superficie pour cet intervalle est de 152 200 mètres<sup>2</sup> (10 871 mètres<sup>2</sup>/année) et le gain en périmètre est de 828 mètres (59 mètres/année). Pour les deux autres intervalles subséquents, 1978-1982 et 1982-1990, il y a une perte de superficie et une diminution du périmètre. La perte de superficie est de 264 900 mètres<sup>2</sup> (66 225 mètres<sup>2</sup>/année) et 178 140 mètres<sup>2</sup> (22 267 mètres<sup>2</sup>/année) pour les intervalles de 1978-1982 et de 1982-1990 respectivement. La diminution du périmètre est de 1 568 mètres (392 mètres/année) et 1 621 mètres (203 mètres/année) pour les mêmes intervalles. Par la suite, entre 1990 et 1996, la superficie et le périmètre du marais de la baie des Bacon augmentent soit respectivement de 139 430 mètres<sup>2</sup> (23 238 mètres<sup>2</sup>/année) et de 3 568 mètres (595 mètres/année). La perte de superficie entre 1996 et 2000 est de 15 520 mètres<sup>2</sup> (3 880 mètres<sup>2</sup>/année) et pour le périmètre la diminution est de 1 737 mètres (434 mètres/année). Pour l'intervalle entre 2000 et 2001, la perte de superficie est de 32 800 mètres<sup>2</sup> pour cette année et la diminution du périmètre est de 1 072 mètres.

Pour le marais de Sault-au-Mouton, seulement l'année 1950 n'a pas pu être mesurée pour les raisons évoquées précédemment. Entre 1931 et 1978, le marais gagne en

superficie et en périmètre. Pour la période de 33 ans, s'échelonnant entre 1931 et 1964, la superficie a augmenté de 29 190 mètres<sup>2</sup> (885 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre de 1 237 mètres (37 mètres/année). Par la suite, entre 1964 et 1978, la superficie a augmenté de 54 710 mètres<sup>2</sup> (3 908 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre a augmenté de 1 526 mètres (109 mètres/année). De 1978 à 1990, les mesures présentent une diminution autant dans la superficie que dans le périmètre. La perte de superficie est de 10 310 mètres<sup>2</sup> (2 578 mètres<sup>2</sup>/année) et de 17 060 mètres<sup>2</sup> (2 133 mètres<sup>2</sup>/année) pour les intervalles de 1978-1982 et de 1982-1990, respectivement. La diminution du périmètre est de 130 mètres (32 mètres/année) et 184 mètres (23 mètres/année) pour les périodes de 1978 à 1982 et de 1982 à 1990, respectivement. Entre 1990 et 1996, il y a une augmentation pour les deux paramètres. Ces valeurs d'augmentation sont de 41 680 mètres<sup>2</sup> (6 947 mètres<sup>2</sup>/année) pour la superficie et de 1 955 mètres (326 mètres/année) pour le périmètre. Entre 1996 et 2000 et entre 2000 et 2001, il y a une diminution générale des mesures. La superficie diminue de 30 290 mètres<sup>2</sup> (7 573 mètres<sup>2</sup>/année) et de 28 530 mètres<sup>2</sup> et le périmètre diminue de 1 104 mètres (276 mètres/année) et de 1 439 mètres respectivement.

#### *4.3.2. Secteur 2-Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert*

Dans le secteur de Saint-Paul-du-Nord et de Pointe-à-Boisvert, deux marais maritimes différents se sont développés. Le marais frangeant du village de Saint-Paul-du-Nord et le marais abrité de la baie de Mille-Vaches. Ce dernier est protégé par la flèche

littorale de la pointe à Émile. Il s'étend de l'embouchure de la rivière Éperlan jusqu'à l'extrémité de la flèche littorale de la pointe à Émile, en 2001 il couvrait une portion du littoral d'environ 5 kilomètres. Le marais frangeant de Saint-Paul-du-Nord s'étend du segment rocheux des Crans Rouges jusque près de l'embouchure de la rivière Éperlan. Ce marais occupe une portion de côte d'environ 2 kilomètres.

Le marais de Saint-Paul-du-Nord est en constante perte de superficie pour l'ensemble des années de mesures, sauf les intervalles de 1978 à 1982 et de 1990 à 1996. Le périmètre ne suit pas la tendance de la superficie. La perte de superficie est de 293 210 mètres<sup>2</sup> (15 432 mètres<sup>2</sup>/année), 45 730 mètres<sup>2</sup> (3 266 mètres<sup>2</sup>/année) et 11 540 mètres<sup>2</sup> (824 mètres<sup>2</sup>/année) pour les intervalles de 1931-1950, 1950-1964 et 1964-1978 respectivement. Quant au périmètre, il diminue de 4 262 mètres (224 mètres/année) pour 1931-1950, il augmente de 201 mètres (14 mètres/année) pour 1950-1964 et il diminue de 449 mètres (32 mètres/année) pour 1964-1978. La superficie et le périmètre augmentent de 10 410 mètres<sup>2</sup> (2 602 mètres<sup>2</sup>/année) et de 384 mètres (96 mètres/année) respectivement pour l'intervalle de 1978 à 1982. La superficie et le périmètre diminuent de 28 110 mètres<sup>2</sup> (3 514 mètres<sup>2</sup>/année) et de 387 mètres (48 mètres/année) entre 1982 et 1990. Les deux paramètres augmentent pour la période de 1990 à 1996. Cette augmentation est de 4 110 mètres<sup>2</sup> (685 mètres<sup>2</sup>/année) pour l'aire et de 161 mètres (27 mètres/année) pour le périmètre. De 1996 à 2000, la superficie du marais diminue de 31 110 mètres<sup>2</sup> (7 778 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre augmente est de 38 mètres (10 mètres/année). Finalement,



pour les années 2000 à 2001 l'aire diminue de 44 740 mètres<sup>2</sup> et le périmètre diminue de 811 mètres.

Les mesures prises dans le marais de la baie de Mille-Vaches couvrent toutes les années à l'exception de 1990, du fait qu'il manquait une photographie pour compléter le traçage de la limite du marais. De 1931 jusqu'à 1964, la superficie du marais augmente pour ensuite diminuer jusqu'en 2001, avec une augmentation entre 1982 et 1996. Pour le périmètre, la tendance est à peu près la même sauf qu'aucune augmentation n'a été mesurée entre 1982 et 1996, mais une augmentation a été mesurée entre 1978 et 1982. Les augmentations de superficie sont de 61 490 mètres<sup>2</sup> (3 236 mètres<sup>2</sup>/année) et 126 160 mètres<sup>2</sup> (9 011 mètres<sup>2</sup>/année) pour les intervalles de 1931-1950 et de 1950-1964 respectivement. Pour ces mêmes intervalles, le périmètre diminue de 17 mètres (1 mètre/année) entre 1931 et 1950 et il augmente de 804 mètres (57 mètres/année) entre 1950 et 1964. Ensuite, la superficie et le périmètre diminuent, respectivement de 15 220 mètres<sup>2</sup> (1 087 mètres<sup>2</sup>/année) et de 303 mètres (22 mètres/année) pour l'intervalle 1964 à 1978. Pour 1978-1982, la superficie diminue de 50 100 mètres<sup>2</sup> (12 525 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre augmente de 1 609 mètres (402 mètres/année). Pour ces trois derniers intervalles, le périmètre diminue de 229 mètres (16 mètres/année) entre 1982 et 1996, de 461 mètres (115 mètres/année) entre 1996 et 2000 et de 292 mètres entre 2000 et 2001. Les superficies augmentent de 56 040 mètres<sup>2</sup> (4 003 mètres<sup>2</sup>/année) entre 1982 et 1996 et par la suite, elles diminuent de 80 690 mètres<sup>2</sup> (20 173 mètres<sup>2</sup>/année) pour 1996-2000 et de 21 240 mètres<sup>2</sup> entre 2000 et 2001.

#### 4.3.3. Secteur 3-Péninsule de Portneuf

Ce secteur compte seulement un marais qui s'est développé à l'abri derrière la flèche littorale de la pointe à Boisvert. À l'origine, en 1931, le marais de la pointe à Boisvert était un marais frangeant puisque la flèche littorale n'était pas encore construite. En 2001, il s'étendait de la zone de changement de direction de la côte jusqu'au point d'ancrage de la flèche littorale de la pointe à Émile, il s'étendait sur environ 3,5 kilomètres de côte. Les couvertures aériennes pour ce secteur n'étant pas toutes complètes, les mesures en 1964 et en 1978 n'ont pu être effectuées.

Pour le marais de la pointe à Boisvert, la superficie et le périmètre diminuent fortement durant les premières années, ainsi entre 1931 et 1950 l'aire et le périmètre diminuent de 332 920 mètres<sup>2</sup> (17 522 mètres<sup>2</sup>/année) et de 2 112 mètres (111 mètres/année). Pour les intervalles suivants soit entre 1950 et 1982, entre 1982 et 1990 et entre 1990 et 1996 la superficie augmente de 123 310 mètres<sup>2</sup> (3 853 mètres<sup>2</sup>/année), 44 420 mètres<sup>2</sup> (5 553 mètres<sup>2</sup>/année) et 12 290 mètres<sup>2</sup> (2 048 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre augmente de 1 633 mètres (51 mètres/année), diminue de 739 mètres (92 mètres/année) et diminue de 377 mètres (63 mètres/année) respectivement. Pour la période de 1996 à 2000, la superficie diminue de 52 210 mètres<sup>2</sup> (13 053 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre augmente de

566 mètres (141 mètres/année). Entre 2000 et 2001, la superficie et le périmètre augmentent respectivement de 27 290 mètres<sup>2</sup> et de 691 mètres.

#### *4.3.4. Secteur 4-Portneuf-sur-Mer*

La cartographie du dernier secteur à l'étude présente deux marais maritimes protégés. Un de ces marais est protégé par la barre de Portneuf : il occupe la presque totalité du secteur compris entre la barre de Portneuf et le littoral du village. Il couvre une portion de littoral d'environ 3,2 kilomètres. Le marais s'étend assez loin vers le large, de sorte que les photographies aériennes des années 1964, 1978, 1982 et 1996 ne couvrent pas la totalité du secteur. Les mesures de superficie et de périmètre n'ont donc pas pu être complétées pour ces années. Le marais de la rivière Portneuf se situe à l'embouchure de la rivière Portneuf sur sa rive gauche. Ce marais est protégé par la flèche littorale de la pointe des Fortin et il s'étend sur environ 2 km le long de la berge de la rivière. Les photographies aériennes de 1978 ne couvrent pas ce marais.

La superficie et le périmètre du marais de la barre de Portneuf diminuent de 37 430 mètres<sup>2</sup> (1 970 mètres<sup>2</sup>/année) et de 1 593 mètres (84 mètres/année) respectivement entre les années 1931 et 1950. Pour les deux périodes suivantes, c'est-à-dire de la période allant de 1950 à 1990 et celle allant de 1990 à 2000, les paramètres mesurés augmentent. La superficie augmente 918 150 mètres<sup>2</sup> (22 954 mètres<sup>2</sup>/année) et de 322 220 mètres<sup>2</sup> (32 222

mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre augmente de 8 910 mètres (223 mètres/année) et de 4 450 mètres (445 mètres/année) pour ces deux périodes. La dernière période de mesure, entre 2000 et 2001, la superficie et le périmètre diminuent de 199 920 mètres<sup>2</sup> et de 8 207 mètres.

Le marais de la rivière Portneuf a subi maintes fluctuations au cours de la période de mesures. De 1931 à 1964, la superficie diminue de 25 440 mètres<sup>2</sup> (1 339 mètres<sup>2</sup>/année) et le périmètre augmente de 1 071 mètres (56 mètres/année). Entre 1950 et 1964, l'aire et le périmètre diminuent respectivement de 28 620 mètres<sup>2</sup> (2 044 mètres<sup>2</sup>/année) et de 343 mètres (24 mètres/année). Durant les deux intervalles suivants, 1964 à 1982 et 1982 à 1990 la superficie augmente de 105 860 mètres<sup>2</sup> (5 881 mètres<sup>2</sup>/année) et de 89 090 mètres<sup>2</sup> (11 136 mètres<sup>2</sup>/année) respectivement. Le périmètre augmente de 367 mètres (20 mètres/année) et de 1 251 mètres (156 mètres/année) pour ces mêmes périodes. Par la suite, pour la période entre 1990 et 1996, la superficie et le périmètre diminuent de 133 530 mètres<sup>2</sup> (22 255 mètres<sup>2</sup>/année) et de 519 mètres (87 mètres/année). Durant les années 1996 à 2000, la superficie et le périmètre augmentent de 70 140 mètres<sup>2</sup> (17 535 mètres<sup>2</sup>/année) et de 79 mètres (20 mètres/année). Entre 2000 et 2001, la superficie et le périmètre diminuent respectivement de 59 460 mètres<sup>2</sup> et de 818 mètres.

#### 4.4. Évolution côtière et déplacement de la ligne de rivage

L'évolution de la ligne de rivage pour le secteur à l'étude a été présentée sous forme de carte d'évolution côtière (Annexe 5). Cependant, la dynamique de certains segments côtiers peut influencer les segments adjacents. Dans cette optique, des graphiques des taux d'érosion et d'accumulation sont présentés pour tous les intervalles de données prises par photointerprétation (Annexe 7). Ces graphiques permettent une vue d'ensemble de la dynamique de la côte étudiée. De plus, lors de la cartographie, toutes les lignes de rivage n'ont pu être superposées : ainsi un graphique de la position du trait de côte en fonction d'une ligne repère fixe est présenté. Cette courbe permet de visualiser l'ensemble des données recueillies par photointerprétation. Un graphique des taux d'érosion pour l'ensemble des bornes est aussi présenté pour permettre une synthèse des mesures recueillies lors des relevés de terrain réalisés entre 2000 et 2004. Tous les graphiques réalisés conservent la même abscisse (x). Celle-ci présente le littoral à l'étude toujours dans le même ordre, c'est-à-dire que le point zéro sur le graphique correspond au début du premier segment situé dans la baie des Bacon et le point à l'extrême droite sur l'abscisse (x) correspond à la fin du dernier segment côtier situé à l'extrême nord-est du secteur à l'étude dans la baie de Forestville. Cette procédure permet de positionner plus facilement les variations observées sur les graphiques.

#### *4.4.1. Position du trait de côte*

Le graphique de la position du trait de côte (Annexe 7) permet de constater cinq anomalies, c'est-à-dire cinq zones où des variations du trait de côte sont remarquables. Tout d'abord, la portion de côte de 0,55 kilomètre du début de la ligne de rivage analysée jusqu'à 2,20 kilomètres a subi des oscillations d'une quarantaine de mètres. Cette zone correspond au marais maritime frangeant de la baie des Bacon. La deuxième zone où des variations majeures sont observées est le trait de côte situé entre le kilomètre 4 et le kilomètre 5,25. La variation pour cette zone atteint une centaine de mètres. Cette zone est correspond à une côte artificielle et elle est localisée à l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton. La troisième zone est située entre le kilomètre 9 et 11 et correspond au marais maritime et à la flèche littorale du village de Saint-Paul-du-Nord. Le graphique montre une oscillation du trait de côte allant jusqu'à 150 mètres. La quatrième zone est située entre le 15<sup>e</sup> kilomètre et le 27<sup>e</sup> kilomètre. Cette zone englobe toute la péninsule de Portneuf de la pointe à Boisvert jusqu'à l'embouchure de la rivière Portneuf. La ligne de rivage de cette zone s'est déplacée entre 100 mètres et 450 mètres. En dernier lieu, la cinquième zone avec des variations moins importantes est celle des falaises de Forestville, comprise entre le kilomètre 29 et le kilomètre 37,25. Le déplacement de la ligne de rivage pour cette zone est inférieur à 70 mètres. Toutefois, l'oscillation mesurée est faible par rapport à celles des autres zones. De plus, compte tenu de la marge d'erreur élevée engendrée lors de la prise des mesures pour cette zone, ces valeurs ont un poids plus faible dans l'interprétation.

Dans le cas de la barre de Portneuf, un graphique individuel présente les données selon un tronçon côtier partant du point d'ancrage de la flèche littorale, au nord, vers l'extrémité de celle-ci, au sud (Annexe 7). La barre de Portneuf est en constante migration vers l'intérieur des terres. Dans le premier kilomètre et demi à partir du nord, le déplacement vers l'intérieur est plus marqué, ce qui correspond à la zone 1 du graphique de la position du trait de côte de la barre de Portneuf. La ligne de rivage s'est déplacée de près de 300 m entre 1931 et 2001. Les variations du trait de côte sont moins accentuées pour le kilomètre suivant, elles sont de l'ordre de 100 m. L'extrémité de la flèche, qui correspond à la zone 2 du graphique, a subi deux modifications majeures. Premièrement, la flèche littorale s'est allongée de plus de 1 km entre 1931 et 2001. De plus, le trait de côte de l'extrémité de la flèche a migré vers la mer pour atteindre 600 m à la pointe de la flèche entre 1931 et 1981. Cependant, la dernière décennie de mesures indique une tendance inverse. Une anomalie du graphique, près du kilomètre 4,5, montre que la ligne de rivage au bout de la flèche durant les années 1990 a migré vers l'intérieur des terres.

La présentation de ces anomalies permet de mieux cibler les secteurs où des mouvements appréciables de la ligne de rivage sont observés. Compte tenu de l'échelle du graphique et pour raffiner les mesures, les graphiques d'érosion et d'accumulation permettent de présenter les résultats avec une plus haute résolution. Ces graphiques ont été réalisés pour les mêmes intervalles que ceux de la cartographie d'évolution côtière, ils permettent de bien identifier les secteurs en érosion ou en accumulation.

#### 4.4.2. Taux d'érosion et d'accumulation

Les graphiques d'érosion et d'accumulation sont présentés en annexe 7. Le premier intervalle traité est celui de 1931 à 2001. Les quatre premiers kilomètres du secteur à l'étude présentent une alternance entre les zones d'érosion et les zones d'accumulation. Une zone d'érosion présentant des valeurs inférieures à 1 mètre/année est insérée entre deux petites zones d'accumulation ayant des taux similaires. Cette zone d'érosion se situe entre le 2<sup>e</sup> et le 3<sup>e</sup> kilomètre. Cette variation est suivie d'une zone d'érosion plus importante avec des taux approchant 2 mètres/année entre le 4<sup>e</sup> et le 5<sup>e</sup> kilomètre. Par la suite, les variations sont très mineures jusqu'au 9<sup>e</sup> kilomètre où une zone d'accumulation d'une longueur de 1,5 kilomètre est observée avec des taux de l'ordre de 1 à 2 mètres/année. Elle est suivie par une zone d'érosion d'importance d'une longueur de quelques centaines de mètres avec des taux supérieurs à 2 mètres/année. Entre le 11<sup>e</sup> et le 14<sup>e</sup> kilomètre, les mesures de cette zone, qui correspond au marais de la baie de Mille-Vaches, sont absentes puisqu'elles sont analysées à la section 4.3. Par la suite, jusqu'au 26<sup>e</sup> kilomètre des variations de grande envergure ont été mesurées. Il y a un pic d'accumulation prononcé entre les kilomètres 15,10 et 18,70. Les taux annuels d'accumulation pour ce pic dépassent 5 mètres/années. Ce secteur correspond à la pointe à Boisvert. De chaque côté du pic d'accumulation, deux zones d'érosion présentent des taux annuels inférieurs à 1 mètre/année. Autour du kilomètre 14, une petite zone d'accumulation correspond à l'extrémité de la pointe à Émile. Suite à l'important pic d'accumulation de la pointe à Boisvert, il y a alternance de zones d'érosion et de zones



d'accumulation. Il y a deux zones d'érosion et deux zones d'accumulation présentant des taux similaires. La zone d'accumulation qui s'étend entre le 23<sup>e</sup> et le 26<sup>e</sup> kilomètre est celle qui occupe la plus longue portion de côte. Autour du kilomètre 28, une importante zone d'accumulation est présente avec des valeurs supérieures à 1 mètre/année : cette zone correspond à la pointe des Fortin. Les mesures qui s'étendent sur les kilomètres suivants ne peuvent pas être prises en considération puisque ce secteur correspond aux falaises de Forestville et les valeurs sont en deçà de la marge d'erreur.

Les graphiques suivants correspondent aux intervalles décennaux, afin de préciser l'évolution de la ligne de rivage. La période de 1931 à 1950 se caractérise par une zone d'érosion sur les 6 premiers kilomètres. Cette zone correspond au début de la ligne de rivage jusqu'à la sortie du village de Sault-au-Mouton. Les taux d'érosion sont presque tous supérieurs à 1 mètre/année et ils atteignent 5 mètres/année vers le 5<sup>e</sup> kilomètre. Par la suite, jusqu'au 9<sup>e</sup> kilomètre, une zone d'érosion et une zone d'accumulation alternent avec des taux de moins de 1 mètre/année. La zone d'accumulation suivante s'étend jusqu'à 10,5 kilomètres : elle correspond au rivage du village de Saint-Paul-du-Nord. Cette zone présente des valeurs importantes allant jusqu'à 8,5 mètres/année. Un pic d'érosion centré sur le 11<sup>e</sup> kilomètre présente également des taux importants de près de 5 mètres/année. Une série de pics d'accumulation suit entre les kilomètres 14 et 22 : ce sont les flèches littorales des pointes à Émile et à Boisvert. Dans le cas du premier pic d'accumulation, les taux sont autour de 1 mètre/année, le pic suivant présente des taux jusqu'à 25 mètres/année. Une petite zone d'érosion s'intercale entre les deux zones d'accumulation qui suivent.

Cette petite zone présente des taux d'érosion faibles en comparaison à la zone d'accumulation qui suit avec des taux oscillant entre 3 et 4 mètres/année. Entre les kilomètres 22 et 27, il y a une zone d'érosion avec des taux pouvant atteindre plus de 2 mètres/année. Une zone d'accumulation au kilomètre suivant présente des taux dépassant 2 mètres/année. À partir du kilomètre 29, les falaises de Forestville présentent des valeurs inférieures à la marge d'erreur de la méthodologie et ne sont pas prises en considération.

Le graphique des zones d'érosion et d'accumulation pour les années 1950 à 1964 présente pour les premiers 4 kilomètres une zone d'accumulation avec des taux de plus de 4 mètres/année. Au centre, un pic d'érosion est enclavé entre les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> kilomètre avec des taux inférieurs à 1 mètre/année. Par la suite, jusqu'au kilomètre 11 les oscillations sont nombreuses, toutefois les zones d'érosion prédominent. Elles se retrouvent entre les 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> kilomètre, entre les 6<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> kilomètre, autour du 10<sup>e</sup> kilomètre et finalement vers le kilomètre 11,5. Le taux d'érosion pour certains pics est supérieur à 3 mètres/année. Cependant, la première zone présente des taux inférieurs à 2 mètres/année. Quant aux zones d'accumulation, elles ont des taux annuels inférieurs à 1 mètre/année. Ensuite, sur le tronçon côtier entre les 14<sup>e</sup> et 15<sup>e</sup> kilomètre, un pic d'érosion se dégage avec des taux généralement inférieurs à 1 mètre/année. Il y a une importante alternance de zones d'érosion et d'accumulation entre les kilomètres 16 et 27. Dans cette zone, il y a 4 pics d'érosion, dont trois présentent des taux supérieurs à 5 mètres/année. Il s'agit de deux pics situés sur la pointe à Boisvert et du dernier au sud du village de Portneuf-sur-Mer. Le plus faible pic d'érosion a des taux supérieurs à 1 mètre/année. Il y a également quatre pics

d'accumulation, mais ceux-ci sont de moins grande étendue avec des taux variant entre 1 mètre/année et 2 mètres/année. À l'exception du dernier, qui a une très grande étendue, du 23<sup>e</sup> au 27<sup>e</sup> kilomètre, et qui a des taux supérieurs à 5 mètres/année. Les pics suivants sont ceux des falaises de Forestville, mais ils sont écartés compte tenu de la marge d'erreur. Finalement, les deux derniers pics autour du kilomètre 40, un d'érosion et un d'accumulation, ont tous deux des taux inférieurs à 2 mètre/année. Ces pics sont localisés à l'extrémité nord-est du secteur à l'étude dans la baie de Forestville.

À l'instar des cartes d'évolution côtière, un intervalle supplémentaire a été ajouté, celui de 1931 à 1964. Lors des mesures prises sur les photographies aériennes de 1950, la mauvaise qualité des photos a engendré une marge d'erreur importante. Les 6 premiers kilomètres du tronçon côtier présentent une alternance entre les zones d'érosion et d'accumulation avec des taux annuels sont inférieurs à 1 mètre/année. Cependant, deux zones d'accumulation et une zone d'érosion se dégagent. La première zone d'accumulation est centrée sur le 1<sup>er</sup> kilomètre, tandis que la deuxième se situe entre les 3<sup>e</sup> et le 4<sup>e</sup> kilomètre. La zone d'érosion se retrouve entre les kilomètres 2 et 3. Cette variation est suivie de deux pics d'érosion de faible étendue qui se situent entre le 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> kilomètre. Le premier pic affiche des taux supérieurs à 2 mètres/année, alors que celui du deuxième dépasse 3 mètres/année. Ces deux pics correspondent aux segments côtiers de l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton. Entre les kilomètres 5 et 6, il y a alternance entre une zone d'accumulation et une zone d'érosion présentant des taux inférieurs à 1 mètre/année. La zone suivante est une zone d'érosion de grande étendue avec

des taux annuels inférieurs à 1 mètre/année. Un pic d'accumulation entre les kilomètres 9 et 10,5 présente des taux supérieurs à 4 mètres/année : cette portion de côte correspond au marais frangeant du village de Saint-Paul-du-Nord. Cette zone est suivie par une zone de faible étendue présentant des taux d'érosion supérieurs à 1 mètre/année. Une alternance entre une zone d'accumulation et une zone d'érosion est observée entre les 14<sup>e</sup> et 15<sup>e</sup> kilomètre. Ces deux zones, qui se trouvent sur la flèche littorale de la pointe à Émile, présentent des taux annuels inférieurs à 1 mètre/année. Par la suite, un pic d'accumulation de très grande envergure se démarque avec des taux d'accumulation allant jusqu'à 13 mètres/année. Ce pic est localisé sur la flèche littorale de la pointe à Boisvert. Entre les 20<sup>e</sup> et 27<sup>e</sup> kilomètre, deux zones d'accumulation se dégagent par rapport à une seule zone d'érosion. Les deux zones d'accumulation se situent entre les kilomètres 20 et 21,5 et entre les kilomètres 23,5 et 27. Leurs taux d'accumulation ne dépassent pas 3 mètres/année. La zone d'érosion intercalée entre les deux zones précédentes a des taux d'érosion allant jusqu'à 2 mètres/année. Au début du 28<sup>e</sup> kilomètre, une zone d'accumulation correspondant à la pointe des Fortin et montre des taux inférieurs à 1 mètre/année. Finalement, les dernières zones sont celles des falaises de Forestville. Compte tenu de la marge d'erreur, ces données ne sont pas analysées.

Les deux graphiques d'érosion et d'accumulation qui suivent sont ceux des intervalles de 1964 à 1978 et de 1978 à 1982. Puisque les photographies aériennes de 1978 ne couvrent pas l'ensemble du secteur à l'étude, seulement les données pour les 11 premiers kilomètres sont disponibles. Pour la période de 1964 à 1978, autour du premier kilomètre,

il y a une zone d'accumulation avec des taux supérieurs à 1 mètre/année. Par la suite, entre les kilomètres 1,5 et 7, la tendance générale est à l'érosion avec des taux presque tous inférieurs à 2 mètres/année. Cette portion de côte correspond au début du secteur à l'étude jusqu'à la côte rocheuse du village de Saint-Paul-du-Nord. Cette grande zone d'érosion est ponctuée par quatre petites zones d'accumulation, dont trois présentent des taux inférieurs à 1 mètre/année et un pic avec des taux s'approchant de 3,5 mètres/année. Par la suite, une zone d'accumulation et une zone d'érosion alternent. Ces deux zones présentent une longueur similaire. La première zone rencontrée s'étend du 7<sup>e</sup> au 9<sup>e</sup> kilomètre et elle présente des taux d'accumulation de l'ordre de 1 à 2 mètres/année. Finalement, la dernière zone, une zone d'érosion, sur le graphique se situe entre le 9<sup>e</sup> et le 11<sup>e</sup> kilomètre. Les taux d'érosion pour ce secteur sont importants : ils atteignent 5 mètres/année.

L'intervalle de 1978 à 1982 présente quatre zones bien définies dans les 7 premiers kilomètres : deux zones d'érosion et deux zones d'accumulation. Les deux zones d'érosion couvrent une plus grande portion de littoral : la première est située entre les kilomètres 1 et 2,5 avec des taux d'érosion atteignant les 5 mètres/année. Pour sa part, la deuxième zone d'érosion se situe entre les kilomètres 3,5 et 6. Cette zone a des taux d'érosion atteignant 10 mètres/année. Les zones d'accumulation sont localisées entre les kilomètres 2,5 et 3,5 et entre les kilomètres 6 et 7. Les taux d'accumulation de la première zone sont près de 2 mètres/année, tandis que ceux de la deuxième atteignent plus de 15 mètres/année. Les derniers taux d'érosion et d'accumulation du graphique montrent une variation très prononcée entre l'accumulation et l'érosion. Aucune tendance ne se dégage de cette

variation : autant les taux d'érosion que les taux d'accumulation se situent autour de 3 mètres/année.

Puisque les intervalles précédents ne couvrent pas l'ensemble du secteur, l'intervalle entre 1964 et 1982 a été analysé pour remédier au manque de données pour la décennie 1970. Une grande zone d'érosion se dégage pour les 7 premiers kilomètres et la plupart des taux d'érosion y sont inférieurs à 1 mètre/année. Cependant, un important pic ressort de cette zone avec des taux d'érosion de près de 4 mètres/année. Dans cette zone d'érosion, quatre pics d'accumulation sont observés avec des taux inférieurs à 1 mètre/année. Ensuite, entre les 7<sup>e</sup> et 9<sup>e</sup> kilomètre, deux maxima d'accumulation sont présents. Les taux annuels du premier sont près de 4 mètres/année, tandis que pour le 2<sup>e</sup>, les taux sont autour de 2 mètres/année. La zone d'érosion suivante, entre les kilomètres 9<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup>, est semblable en longueur et en taux annuels à la zone d'accumulation précédente. Cette zone d'érosion se divise en deux secteurs : un secteur avec des taux de près de 2 mètres/année et un autre avec des taux avoisinant 4 mètres/année. Par la suite, il y a une alternance entre une zone d'érosion et une zone d'accumulation. La zone d'accumulation s'étend sur 0,5 kilomètre tandis que la zone d'érosion occupe 1 kilomètre de la côte. Pour ces deux zones, les taux annuels sont presque tous inférieurs à 1 mètre/année. Autour du 16<sup>e</sup> kilomètre, il y a une petite zone avec des taux d'accumulation de moins de 1 mètre/année. Ensuite, une seconde alternance entre une zone d'érosion et une zone d'accumulation est observée. La zone d'érosion se situe des kilomètres 16,5 à 17,5 et la zone d'accumulation entre les kilomètres 17,5 et 18,5. Les taux pour chacune de ces deux zones atteignent 3,5 mètres/année. Un

petit pic d'érosion est identifié à l'intérieur de la zone d'accumulation avec des taux inférieurs à 1 mètre/année. Autour du 21<sup>e</sup> kilomètre, il y a une zone d'accumulation importante avec des taux annuels de plus de 2 mètres/année. Elle est suivie par une petite zone d'érosion, entre les kilomètres 21,5 et 22, présentant des taux inférieurs à 1 mètre/année. Ensuite, des kilomètres 22 à 27, il y a une grande zone d'accumulation avec des taux qui oscillent entre 1 mètre/année et 2 mètres/année, à l'exception de la dernière partie où les taux sont inférieurs à 1 mètre/année. À l'intérieur de cette grande zone, trois maxima d'érosion se dégagent avec des taux d'érosion supérieurs à 2 mètres/année pour le premier et inférieurs à 1 mètre/année pour les deux autres. Les données suivantes correspondent aux falaises de Forestville jusqu'au kilomètre 37,5 et ces résultats ne sont pas analysés. Finalement, trois dernières zones se dégagent pour l'extrémité du secteur à l'étude soit deux zones d'érosion et une zone d'accumulation : toutes trois ont des taux inférieurs à 1 mètre/année.

L'intervalle de 1982 à 1990 présente une grande zone d'accumulation dans les 7 premiers kilomètres où les taux d'accumulation varient entre 2 mètres/année et 4 mètres/année. Jusqu'au 11<sup>e</sup> kilomètre, les variations entre les zones d'accumulation et les zones d'érosion sont très nombreuses, toutefois deux maxima d'érosion et deux maxima d'accumulation s'en dégagent. Pour les pics d'accumulation, les taux sont autour de 2 mètres/année. Le premier pic d'érosion présente des taux de 3 mètres/année et le second a des taux de près de 5 mètres/année. Entre les kilomètres 13 et 27, il y a une zone d'érosion avec des taux annuels variant entre 1 mètre/année et 4 mètres/année. Dans cette grande

zone, trois zones d'accumulation de faible étendue et une de plus grande envergure viennent s'insérer. Les taux d'accumulation de la première zone sont entre 2 et 3 mètres/année, les deux suivantes présentent des taux inférieurs à 1 mètre/année et la dernière a des taux variant entre 3 et 5 mètres/année. Finalement, à partir du 29<sup>e</sup> kilomètre, les taux sur le graphique sont ceux des falaises de Forestville et ne sont donc pas analysés.

Pour l'intervalle de 1990 à 1996, les zones d'érosion prédominent. Les taux d'érosion pour toutes les zones se situent entre 1 mètre/année et 5 mètres/année, avec des maxima atteignant 7 mètres/année à certains endroits. Les maxima d'accumulation sont également assez nombreux, mais de moins grande étendue. Trois pics sont présents entre les 1<sup>er</sup> et 7<sup>e</sup> kilomètre et ceux-ci ont des taux d'accumulation autour de 1 mètre/année. Entre les 9<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> kilomètre, il y a deux maxima dont un qui montre des taux atteignant 13,5 mètres/année. Entre les kilomètres 13 et 28, il y a 9 pics d'accumulation. Les quatre premiers sont de même étendue avec des taux d'accumulation variant entre 2 et 4 mètres/année. Les quatre suivants sont semblables en longueur avec des taux d'accumulation inférieurs à 1 mètre/année. Quant au dernier, il est plus prononcé que les précédents et le taux d'accumulation atteint 11 mètres/année. Les dernières variations entre les kilomètres 29 et 38,5, sont celles des falaises de Forestville et ne sont pas analysées.

L'intervalle de mesures de 1996 à 2000 présente une alternance entre 4 zones d'accumulation et 3 zones d'érosion dans les 7 premiers kilomètres du secteur à l'étude. Les taux d'accumulation annuels oscillent autour de 2 mètres/année, tandis que les taux



d'érosion sont plus variables. La première zone montre des taux de 2 mètres/année, la deuxième zone des taux inférieurs à 1 mètre/année alors que la troisième se distingue avec des taux d'érosion atteignant 7 mètres/année. Celle-ci est située entre les kilomètres 4,5 et 5. Entre les 9<sup>e</sup> et 11<sup>e</sup> kilomètre, il y a 2 zones d'érosion : la première montre des taux annuels de 1 mètre/année et les taux annuels sont de 2 mètres/année pour la deuxième. Une zone d'accumulation est intercalée entre ces deux zones d'érosion et elle présente des taux de 1 mètre/année. Du 13<sup>e</sup> au 28<sup>e</sup> kilomètre, les zones d'accumulation prédominent avec des taux de 3 mètres/année accompagnés de certaines valeurs extrêmes qui frôlent les 18 mètres/année. Dans cette portion du graphique, 7 zones d'érosion de faible étendue sont identifiées. La première et la troisième zone montrent des taux d'érosion inférieurs à 1 mètre/année, tandis que les 5 autres zones ont des taux plus élevés atteignant 6 mètres/année, mais généralement près de 3 mètres/année. Les variations entre les kilomètres 29 et 38,5 sont celles des falaises de Forestville et ne sont pas analysées. Finalement, l'analyse se termine avec deux zones d'accumulation et une zone d'érosion. La zone d'érosion possède des taux inférieurs à 1 mètre/année et les zones d'accumulation ont des taux de 2 mètres/année pour la première et de 4 mètres/année pour la deuxième.

Le dernier intervalle de mesures prises par photointerprétation est celui de 2000 à 2001. Compte tenu des forts taux de déplacement de la ligne de rivage pour cet intervalle, l'échelle de l'abscisse ( $x$ ) présente plus de valeurs que les graphiques précédents puisque le déplacement annuel atteint plus de 60 mètres. De façon générale, il y a une grande variabilité des zones et des valeurs d'accumulation et d'érosion. Les 11 premiers

kilomètres présentent de nombreuses variations entre les valeurs d'accumulation et d'érosion. Ces variations présentent des valeurs annuelles autour de 10 mètres, ce qui est inférieur aux autres portions du graphique. Entre les 11<sup>e</sup> et 13<sup>e</sup> kilomètre, il y a une forte zone d'accumulation, entrecoupée au kilomètre 12 par une zone d'érosion présentant un fort recul de près de 35 mètres. Dans la grande zone d'accumulation, les valeurs varient également autour de 35 mètres. Par la suite, entre les 13<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> kilomètre, une grande zone d'érosion se dégage avec des valeurs variant de 1 mètre à plus de 40 mètres. Entre les 17<sup>e</sup> et 18<sup>e</sup> kilomètre, il y a alternance de deux zones d'érosion et d'une zone d'accumulation, toutes trois présentant de faibles valeurs par rapport à l'ensemble des données présentées malgré que celles-ci atteignent jusqu'à 10 mètres. Des kilomètres 18 à 20,5, il y a une zone d'accumulation avec des valeurs atteignant 20 mètres. Ensuite des kilomètres 20,5 à 26,5, il y a de nombreuses oscillations entre des zones d'accumulation et d'érosion. L'envergure de ces zones est faible et les valeurs sont généralement de moins de 10 mètres. Cependant au 24<sup>e</sup> kilomètre, un pic d'accumulation se dégage avec des valeurs de 15 mètres et au kilomètre 24,5 un pic d'érosion présente des valeurs supérieures à 50 mètres. Il y a alternance entre trois zones d'érosion et trois zones d'accumulation entre les kilomètres 26,5 et 29. Les deux premières zones d'érosion et d'accumulation occupent la plus grande portion de littoral et elles possèdent également les valeurs les plus élevées soit supérieures à 20 mètres. Les variations suivantes sur le graphique, c'est-à-dire entre les 29<sup>e</sup> et 38<sup>e</sup> kilomètre correspondent aux falaises de Forestville et elles ne sont pas prises en compte dans l'analyse. Le graphique se termine par une alternance de deux zones d'accumulation et deux zones d'érosion similaires en distance et en valeurs. Les valeurs se situent autour

de 10 mètres, à l'exception du premier pic d'accumulation qui correspond à une plus petite portion de côte et qui présente des valeurs d'accumulation plus élevés de 60 mètres.

Le graphique des taux d'érosion mesurés à partir des bornes sur le terrain présente les valeurs de reculs absolus pour les quatre intervalles entre 2000 et 2004. Toutefois, compte tenu de la méthodologie, ce graphique ne présente aucune zone d'accumulation. Les bornes identifiées BAC sont localisées au début du tronçon côtier. Elles s'étendent jusqu'à l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton. Ce groupe de bornes présente des valeurs d'érosion élevées pour l'intervalle 2000-2001, deux des bornes de mesures présentent des taux supérieurs à 1 mètre/année. Les deux périodes suivantes montrent un recul plus faible avec une seule borne de terrain présentant une valeur supérieure à 1 mètre/année. Le dernier intervalle pour ce groupe de bornes, soit 2003-2004, présente les valeurs d'érosion les plus élevées avec deux bornes dont le recul atteint 2 mètres. Les bornes suivantes sont celles dont le numéro d'identification commence par LON. Ces bornes peuvent se diviser en deux groupes, le premier comprenant les bornes LON-1 jusqu'à LON-19 : il correspond au segment côtier entre l'embouchure de la rivière du Sault au Mouton et le marais de la baie de Mille-Vaches. Les valeurs d'érosion pour ce groupe augmentent entre les années 2000 et 2004. La borne LON-4 et les bornes adjacentes montrent un recul de près de 1,5 mètre pour le premier intervalle pour atteindre des valeurs supérieures à 5 mètres entre 2003 et 2004. Un autre pic d'érosion est visible pour la borne LON-11 et les bornes adjacentes. L'augmentation des valeurs de recul de la côte est observable pour ces bornes comme dans le cas des bornes précédentes. Les valeurs de recul pour les années 2000 sont

de près de 1,5 mètres, pour atteindre plus de 11 mètres pour le dernier intervalle mesuré. De plus, le nombre de bornes présentant un recul de la côte est en croissance pour l'ensemble de ce groupe. Le nombre de bornes en érosion pour l'intervalle 2003-2004 est plus élevé que celui de tous les intervalles précédents. Le deuxième regroupement de bornes identifiées LON, correspond aux bornes allant jusqu'à LON-42, ces bornes sont situées entre la flèche littorale de la pointe à Émile et le sud du village de Portneuf-sur-Mer. En général, l'ensemble de ce groupe de bornes présente des valeurs d'érosion élevées pour les deux premiers intervalles avec un recul avoisinant 2 mètres. Ces valeurs décroissent durant les deux derniers intervalles et moins de bornes sont en érosion. Une seule borne, LON-31A, présente un important pic d'érosion avec une valeur de plus de 7 mètres. Par la suite, le groupe de bornes dont le numéro d'identification débute par NEU, a été mesuré uniquement pour l'intervalle entre 2003 et 2004. Ce groupe de bornes se situe aux mêmes endroits que le groupe LON, elles sont donc intercalées entre celles-ci. Pour l'intervalle 2003-2004, l'ensemble des bornes présente un recul avoisinant 2 mètres. Le numéro d'identification des bornes suivantes commence par SAP. Ces bornes peuvent être divisées en deux groupes, un premier groupe des bornes (SAP-1 à SAP-8) correspondant au littoral du village de Portneuf-sur-Mer et un second regroupant les bornes SAP-11 à SAP-24 et BPO correspondant aux flèches littorales de la barre de Portneuf et de la pointe des Fortin. Les valeurs d'érosion pour le premier groupe sont négligeables pour tous les intervalles de mesures. En revanche, plusieurs maxima d'érosion sont observables pour le deuxième groupe. Le recul annuel oscille autour de 1 mètre, avec des valeurs extrêmes atteignant près de 10 mètres. Finalement, le numéro d'identification des dernières bornes mesurées

début par FOR. Elles sont situées dans le secteur des falaises de Forestville. Les valeurs d'érosion pour cette zone sont tous inférieurs à 1 mètre, à l'exception de la borne FOR-2 ayant un recul de 2,20 mètres pour l'intervalle entre 2000 et 2001.

Les graphiques d'érosion et d'accumulation pour la ligne de rivage de la barre de Portneuf n'ont pas été présentés avec l'ensemble du trait de côte à l'étude. Tous les intervalles de mesure ont été traités sur le même graphique, à l'exception de l'intervalle entre 2000 et 2001, puisque les taux d'érosion sont très élevés (Annexe 7). Sur le graphique synthèse des bilans annuels d'érosion et d'accumulation, il y a 4 pics qui se distinguent. De façon générale, les fluctuations entre les périodes d'érosion et d'accumulation d'une part, et les zones d'érosion et d'accumulation d'autre part, sont assez importantes, soit plus de 15 mètres annuellement. Les zones d'érosion et d'accumulation alternent durant la totalité des intervalles de mesures prises par photointerprétation. Cependant, le premier kilomètre de la barre de Portneuf est en érosion pour l'ensemble des années de mesures. De 1996 à 2000, il y a des taux d'érosion atteignant 15 mètres/année entre les kilomètres 0,75 et 2,5. Entre 1950 et 1964, il y a des taux d'érosion très élevés près du kilomètre 3,5, atteignant près de 20 mètres/année. En contrepartie, au même endroit, entre 1931 et 1950, un maximum d'accumulation de 15 mètres/année a été mesuré. Finalement, les couvertures de photographies aériennes ne permettent pas de dépasser le 4<sup>e</sup> kilomètre de la barre de Portneuf.

Les valeurs d'érosion pour l'intervalle s'échelonnant entre 2000 et 2001 sur la barre de Portneuf sont très élevées, elles atteignent plus de 50 mètres. Dans cet intervalle de mesure, il y a principalement des zones d'érosion. Sur les 5,5 km de mesure, il y a 6 zones d'érosion d'étendues importantes avec des reculs très élevés et, à l'opposé, 5 zones d'accumulation de plus faibles étendues avec des valeurs variant entre 10 et 20 mètres. Entre le début et le kilomètre 0,5 de la barre de Portneuf en partant du nord, les variations entre les valeurs d'érosion et d'accumulation sont importantes. Toutefois, l'accumulation prédomine avec des valeurs variant entre 1 mètre et 20 mètres. Ce secteur est suivi par une zone d'érosion s'étendant jusqu'à 1,5 kilomètre avec des valeurs de recul oscillant autour de 10 mètres. Par la suite, une zone d'érosion est intercalée entre deux zones d'accumulation, toutes trois présentent une étendue similaire et des valeurs inférieures à 10 mètres. La zone suivante présente des valeurs de recul dépassant 50 mètres : elle se situe entre les kilomètres 2,5 et 3. Elle est suivie par la zone d'accumulation la plus importante pour cet intervalle, laquelle s'étend sur près de 1 km, entre les 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> kilomètre, avec des valeurs d'accumulation de l'ordre de 10 mètres et un pic approchant 20 mètres. Le dernier kilomètre et demi est dominé par des zones d'érosion avec des maxima d'érosion de 50 mètres. Quelques mesures présentent des valeurs d'accumulation atteignant 20 mètres.

#### 4.5. Évolution côtière et systèmes côtiers

La cartographie de l'évolution côtière permet de dégager les grandes lignes de la modification de la géomorphologie de la côte ainsi que son déplacement dans le temps et l'espace. Les taux d'érosion et d'accumulation de chacun des intervalles de mesures sont présentés selon le type de système côtier. Les graphiques d'érosion et d'accumulation en fonction des systèmes côtiers présentent des moyennes pondérées des taux d'accumulation et des taux d'érosion et ils constituent une bonne synthèse de l'évolution côtière (Annexe 8).

Pour la période entre 1931 et 2001, la courbe oscille autour de zéro. Sur la gauche du graphique, 2 pics d'érosion bien distincts se dégagent. Tous deux ont des valeurs d'érosion de plus de 1 mètre/année et ce sont les côtes à terrasses de plage naturelles et artificialisées. Au centre du graphique, un maxima d'accumulation est présent avec des valeurs de près de 4 mètres/année. Le système côtier en accumulation est une flèche littorale. Ce secteur d'accumulation est précédé d'un pic d'érosion ayant des valeurs de près de 2 mètres/année qui correspond également à une flèche littorale. Par la suite, plusieurs pics d'accumulation et d'érosion alternent avec des valeurs généralement inférieures à 1 mètre/année. Les systèmes côtiers qui correspondent à ces pics sont principalement des terrasses de plage et des flèches littorales, sauf un pic qui correspond à un marais maritime au centre du graphique.

L'intervalle de 1931 à 1950 présente trois maxima importants d'accumulation, ces trois pics sont situés au centre du graphique. Le premier pic présente des taux d'accumulation de l'ordre de 4 mètres/année pour une flèche littorale et pour une côte à marais maritime. Quant au second pic, les taux d'accumulation sont supérieurs au précédent avec des valeurs de 18 mètres/année pour un système côtier à flèche littorale. Le dernier pic présente des taux d'accumulation de 3 mètres/année pour une terrasse de plage. Le reste de la côte à l'étude présente des taux d'érosion oscillant entre 1 mètre/année et 2 mètres/année pour les autres types de systèmes côtiers. Deux pics d'érosion ayant des valeurs de 2 mètres/année et de 3 mètres/année pour des terrasses de plage se dégagent de l'ensemble des autres valeurs. Les dernières mesures représentées sur le graphique correspondent également à un système côtier à flèche littorale en accumulation avec des valeurs autour de 1 mètre/année. Dans les grands secteurs en érosion, les terrasses de plage présentent des taux d'érosion relativement supérieurs à ceux des types de systèmes côtiers adjacents.

Le graphique réalisé pour l'intervalle entre 1950 et 1964 démontre plusieurs maxima d'accumulation pour l'ensemble du territoire étudié. Les valeurs des pics d'accumulation varient entre 2 mètres/année et 6 mètres/année, ce qui entraîne l'engraissement principalement des terrasses de plage. Les flèches littorales sont construites à partir de ces grandes zones d'accumulation, à l'exception du premier pic à la gauche du graphique qui correspond à un marais maritime. En contrepartie, les deux maxima d'érosion correspondent à des côtes à terrasses de plage, des flèches littorales et une côte deltaïque



avec des taux annuels d'érosion de 4 mètres/année. Les autres oscillations entre les systèmes côtiers en érosion et ceux en accumulation s'effectuent avec des valeurs de 1 mètre/année.

L'intervalle de 1931 à 1964 a également été traité pour présenter les résultats des taux d'érosion et d'accumulation en fonction du type de systèmes côtiers. Cet intervalle reprend les scénarios présentés précédemment. Cependant, les oscillations mineures sont moins perceptibles que sur les deux graphiques précédents. Il se dégage 4 pics d'accumulation de ce graphique, leur valeur varie entre 1 mètre/année et 10 mètres/année. Les systèmes côtiers en accumulation pour cet intervalle sont en premier les flèches littorales, en second les terrasses de plage et en dernier les marais maritimes. Pour cette période de mesure, 4 pics d'érosion présentant des taux entre 1 mètre/année et 2 mètres/année sont observables. Ces zones d'érosion correspondent également aux terrasses de plage et aux flèches littorales et pour le dernier pic, le système côtier en érosion est une côte deltaïque. Les autres oscillations mineures ne présentent pas de particularités.

Les deux intervalles suivants ne couvrent pas la totalité du secteur à l'étude puisqu'il s'agit des intervalles comprenant la couverture aérienne de 1978. Entre 1964 et 1978, les fluctuations entre les zones d'érosion et les zones d'accumulation sont nombreuses et les valeurs associées à ces variations ne sont guère supérieures à 1 mètre/année. Un seul pic important d'érosion à l'extrémité droite du graphique est attribuable à une flèche littorale. Les autres pics présents sur le graphique sont mineurs. Autant l'érosion que l'accumulation

ont lieu dans des côtes à terrasses de plage. À l'exception du premier pic d'accumulation à la gauche du graphique qui se situe dans une côte à marais maritime. Entre 1978 et 1982, la courbe du graphique est plus prononcée avec des pics plus marqués. Durant cet intervalle, l'érosion prédomine, seulement deux pics d'accumulation se dégagent sur le graphique avec des taux entre 2 mètres/année et 5 mètres/année. Le premier maxima se situe dans une côte à terrasse de plage alors que le second se situe dans une côte deltaïque, ce qui indique la création d'une terrasse de plage au pied de la falaise deltaïque devenue morte. Les 5 pics d'érosion présents sur le graphique ont des valeurs entre 2 mètres/année et 8 mètres/année, toutes ces zones d'érosion se situent dans des côtes à terrasses de plage et une de celles-ci est un marais artificialisé à gauche du graphique. La flèche littorale présente à l'extrémité droite du graphique est également en érosion.

Le graphique pour l'intervalle de 1964 à 1982 présente de faibles variations autour de zéro. Cependant, il est possible de remarquer cinq maxima d'érosion présentant des valeurs entre 1 mètre/année et 5 mètres/année. Tous les pics correspondent à des côtes à terrasse de plage sauf le pic au centre du graphique attribuable à une flèche littorale. À la gauche du graphique, il y a un pic d'accumulation avec une valeur légèrement supérieure à 1 mètre/année qui se situe dans une côte deltaïque, indiquant l'apparition d'une terrasse de plage à la base de celle-ci. Les autres systèmes côtiers en accumulation, avec des valeurs autour de 1 mètre/année, sont principalement les terrasses de plage et les flèches littorales.

Le graphique d'érosion et d'accumulation des systèmes côtiers pour les huit années de mesures entre 1982 et 1990 présente une courbe se situant principalement au-dessus du zéro, c'est-à-dire dans la zone des valeurs d'accumulation. Le graphique montre plusieurs pics d'accumulation avec des valeurs entre 1 mètre/année et 4 mètres/année. L'accumulation la plus importante s'effectue sur une côte à flèche littorale, les autres pics d'accumulation sont attribuables aux systèmes côtiers de terrasses de plage et de flèches littorales et un seul pic d'accumulation correspond à un marais maritime. Ce graphique présente 4 maxima d'érosion, les systèmes côtiers en érosion sont une flèche littorale présentant la valeur la plus élevée avec plus de 5 mètres/année. Les 3 autres pics présentent des valeurs entre 2 mètres/année et 3 mètres/année et ce sont des côtes deltaïques naturelles et artificielles et des terrasses de plage.

L'intervalle entre 1990 et 1996 présente principalement des systèmes côtiers en érosion. La courbe du graphique présente une multitude de maxima d'érosion avec des valeurs entre 1 mètre/année et 5 mètres/année. Le pic d'érosion le plus élevé se situe dans une côte à flèche littorale. Les côtes deltaïques sont le principal système côtier dans lequel des taux d'érosion ont été mesurés. Les terrasses de plage artificialisées sont le second type de système côtier présentant des valeurs d'érosion et un marais maritime est également en érosion. Il y a 4 maxima d'accumulation, les systèmes côtiers en accumulation sont principalement les côtes à flèche littorale, au nombre de 2. Une côte à terrasse de plage représente le second pic en importance sur le graphique. L'autre pic d'accumulation de

moindre importance est attribuable à un système côtier de côte deltaïque qui pour cet intervalle temporel correspond à un système de côte à terrasse de plage.

Le graphique pour la période de mesure de 1996 à 2000 peut se diviser en deux grands secteurs. Le secteur à la gauche du graphique présente des oscillations mineures entre les systèmes côtiers en érosion et ceux en accumulation. Les valeurs d'accumulation les plus élevées atteignent près de 2 mètres/année. Ces 2 pics correspondent aux systèmes côtiers à terrasses de plage naturelles et artificielles et aux côtes deltaïques, lesquels indiquent l'apparition de terrasses de plage à leur base. En contrepartie, à la gauche du graphique 2 pics d'érosion sont également présents avec les mêmes valeurs et ceux-ci correspondent à un système côtier à terrasse de plage et à flèche littorale. La courbe dans le secteur de droite du graphique présente plutôt des valeurs d'accumulation, les maxima d'accumulation sont plus importants que dans le secteur de gauche. Il y a 2 pics d'accumulation très importants, ces derniers correspondent à une flèche littorale. Le premier maxima présente des valeurs de près de 14 mètres/année, alors que le second des valeurs de 9 mètres/année. D'autres pics d'accumulation avec des valeurs variant entre 2 mètres/année et 5 mètres/année sont également observables. La plupart de ces pics d'accumulation correspondent à des systèmes côtiers à terrasses de plage naturelles et artificialisées et les autres sont des systèmes côtiers deltaïques, où les pics d'accumulation indiquent la création de terrasses de plage au pied de ces systèmes côtiers. Dans ce secteur, seulement 2 pics d'érosion sont présents, le premier système côtier en érosion est une terrasse de plage avec des valeurs de 4 mètres/année. Le second, étant plus étendue,

correspond à deux types de systèmes côtiers, soit un marais maritime et une terrasse de plage. C'est le marais maritime qui présente les valeurs les plus élevées atteignant 6 mètres/année.

Le graphique pour l'intervalle annuel de 2000 à 2001 montre des valeurs d'accumulation et d'érosion beaucoup plus élevées que les graphiques analysés précédemment. L'échelle de l'ordonnée ( $y$ ) a donc été augmentée pour présenter des valeurs négatives, d'érosion, de 50 mètres/année jusqu'à des valeurs positives, d'accumulation, de 30 mètres/années. L'analyse de ce graphique permet de le diviser en deux portions bien distinctes. La limite de ces deux secteurs se situe tout près du centre du graphique. Du côté gauche du graphique, se retrouvent maintes fluctuations entre des systèmes côtiers en érosion et en accumulation. Toutes ces oscillations présentent des valeurs en deçà des valeurs de 5 mètres/année, à l'exception du premier système côtier, à l'extrême gauche du graphique, avec une valeur d'érosion de 10 mètres/année dans une terrasse de plage. Sur les 6 pics d'accumulation les plus importants pour cette portion du graphique, 4 pics correspondent à des terrasses de plage. Dans le secteur de droite du graphique, il y a également beaucoup de variations entre les systèmes côtiers en accumulation et ceux en érosion. Cependant, les valeurs de modification du littoral sont beaucoup plus élevées, celles-ci atteignent 50 mètres d'érosion par année. La courbe de cette portion du graphique montre deux pics majeurs d'érosion sur des flèches littorales naturelles et artificialisées avec des valeurs de 50 et de 34 mètres/année. Trois autres maxima d'érosion se dégagent de ce graphique avec de plus faibles valeurs que les

précédentes, mais ce sont également les flèches littorales et les terrasses de plage qui sont en érosion. Les taux d'érosion se situent entre 5 et 15 mètres/année. Il y a également la présence de 2 maxima d'accumulation. Le premier est pour une flèche littorale artificialisée avec des valeurs supérieures à 15 mètres/année tandis que le second pic est pour un marais maritime avec un taux d'accumulation de près de 27 mètres/année. Les autres oscillations sont plutôt mineures comparativement à l'ensemble du graphique, cependant les systèmes côtiers en accumulation sont plus nombreux, mais présentent de plus faibles valeurs que les maxima d'érosion montrés sur le graphique.

## **5. DISCUSSION**

La problématique de l'évolution côtière à hautes résolutions spatiale et temporelle soulevée dans le cadre de ce projet de recherche présente deux aspects principaux. Le premier traite des intervalles temporels de déplacement du trait de côte. Le second permet l'évaluation de la sensibilité à l'érosion selon les systèmes côtiers étudiés à partir d'un indice d'évolution littorale. Afin de répondre à l'objectif principal de cette étude, il s'avère également nécessaire de définir les causes et les facteurs qui conditionnent l'évolution littorale récente des différents types de systèmes côtiers ainsi que les périodes d'érosion importante du littoral. Cette approche permet notamment de déterminer s'il est possible d'observer une intensification de l'érosion durant les 73 années de mesures. Les marais maritimes sont des habitats côtiers de premier plan et des zones de grande production

biologique (Adam, 1990; Dionne *et al.*, 2004; Keddy, 2000). Dans cette optique, une section complète traite de la modification de cet habitat en fonction des processus d'érosion actifs dans ces milieux. De plus, un des objectifs de ce projet est de développer une nouvelle méthodologie intégrant les nouvelles données cartographiques disponibles ainsi que les photographies aériennes numériques à l'intérieur d'un SIG. La possibilité d'utiliser cette méthodologie est innovatrice pour de futurs projets d'évolution littorale historique. À cet effet, une section sur l'utilisation et l'application des SIG pour l'évolution côtière est présentée. Finalement, tous les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre de l'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* (IPCC, 2001) suggèrent une hausse des températures à la surface du globe. Cette situation permet d'appréhender une accélération du réchauffement climatique (Bernatchez et Dubois, 2004b). L'érosion côtière, qui est un phénomène en lien avec les changements climatiques, (Adam, 2002; Bernatchez, 2004; Bernatchez et Dubois, 2004b; IPCC, 2001, Paskoff, 2001; PNUE, 2002; Shaw *et al.*, 1998b) sera également touchée. Il est ainsi raisonnable de présenter des scénarios prévisionnels en se basant sur les données historiques et actuelles (Crowell *et al.*, 1993) de recul des côtes afin d'envisager les modifications éventuelles de la géomorphologie côtière et du recul de la côte pour les prochaines décennies. De plus, certaines études en cours sur le Québec maritime laurentien tendent vers cette approche (Bernatchez, 2004).

Dans le même ordre d'idée, la sensibilité des systèmes côtiers doit être reliée aux facteurs environnementaux qui en sont responsables. En se basant sur la

photointerprétation géomorphologique, les effets et les impacts des processus d'érosion sont identifiés et interprétés selon leur impact à la côte puisque dans le cadre de cette étude, les données climatiques historiques n'ont pu être analysées faute de temps. Le manque de données climatiques est ainsi comblé par la photointerprétation géomorphologique et les observations terrain (Dubois et Briard, 1979; Dubois et Briard, 1980; Grenier et Dubois, 1990; Savard, 1998). Cette approche permet entre autre l'identification des secteurs de côtes qui ont été perturbés par l'humain vis-à-vis ceux ayant demeurés naturels (Savard, 1998). Cette démarche permet également de définir le type d'évolution littorale qui prévaut pour chacun des types de systèmes côtiers, c'est-à-dire une évolution contrôlée par des facteurs d'hydrodynamique côtière ou des facteurs reliés à la géomorphologie terrestre (Bernatchez et Dubois, 2004b; Soucy, 1988).

## **5.1. Évolution côtière**

### *5.1.1. Causes et facteurs de l'évolution côtière*

Il s'avère très difficile d'isoler une seule cause ou un seul facteur de l'évolution du littoral, l'interdépendance de chacun des facteurs est considérable en zone côtière (Ouellet et Baird, 1978; Bernatchez et Dubois, 2004b). Cependant, les différents types de système côtier à l'étude peuvent être regroupés en fonction des principaux processus d'érosion qui les affectent. Ainsi, l'évolution des côtes à flèche littorale et les côtes à terrasse de plage, qui sont des côtes sableuses, est en premier lieu conditionnée par les processus



hydrodynamiques. Celles-ci sont affectées principalement par les vagues lors des tempêtes et des marées de vive eau ainsi que par les surcotes de tempêtes (Bernatchez et Dubois, 2004b; Dubois *et al.*, 2005; Ouellet et Baird, 1978; Savard, 1998) durant la période interglaciale. Les vagues ne sont pas les seules responsables de l'évolution de ce type de côte, mais la combinaison de l'effet des vagues avec des paramètres d'ordre océanographique (marée de vive eau, surcote) ou d'ordre climatique (tempête, présence de glace) permet de mieux comprendre l'effet érosif de celles-ci à la côte (Bernatchez et Dubois, 2004b). La présence d'un pied de glace tend à protéger les côtes à flèche littorale et les côtes à terrasse de plage contre l'effet des processus mentionnés précédemment (Moign, 1972). Par contre, lors de la débâcle, le départ des glaces est à la fois un agent d'érosion et de transport sédimentaire (Bernatchez, 2003a). À certains égards, dans les côtes sableuses, le pied de glace, lorsque celui-ci est installé sur la haute plage, contribue à l'abaissement du bas de plage par réflexion des vagues. Il agit au même titre qu'une structure de protection rigide (Bernatchez et Dubois, 2004b). Dans une moindre mesure, les côtes à flèche littorale et les côtes à terrasse de plage de la région à l'étude présentent une évolution qui est conditionnée par la présence de végétation stabilisatrice sur celles-ci (Savard, 1998). Cette végétation réduit l'effet des vagues sur ces côtes et, dans certains cas, retarde la formation de brèches de tempête (« Outwash ») (Savard, 1998). La présence humaine dans le territoire à l'étude contribue à dégrader et à réduire la végétation sur ces formes littorales à cause du piétinement et de la circulation motorisée, ce qui constitue un facteur indirect de l'érosion du littoral (Bernatchez et Dubois, 2004b; Savard, 1998).

Finalement, l'activité éolienne, localisée sur la barre de Portneuf, érode et transporte le sable qui compose cette flèche littorale (Bernatchez et Dubois, 2004b).

Les côtes à marais maritime évoluent selon divers processus. L'action des vagues sur le schorre contribue à former de multiples rentrants de dimensions variables ou des encoches et des trous à la base de celui-ci (Dionne et Bouchard, 2000). Les rentrants finissent par isoler des pointes qui se détachent progressivement de la côte et qui sont ensuite dégagées par l'action des vagues et des courants de marée (Bernatchez et Dubois, 2004b). Les encoches et les trous se creusent jusqu'à former un débord organique de schorre qui protège la côte de l'action des vagues pendant une certaine période et qui ensuite se détache de la côte dû à l'action des glaces (Dionne et Bouchard, 2000). Les glaces peuvent également arracher des radeaux de schorre à divers endroits et ainsi mettre à nu le schorre (Dionne et Bouchard, 2000). Finalement, l'activité anthropique contribue grandement à la dégradation du schorre, soit par les activités agricoles qui demandent un drainage et un endiguement des marais maritimes (Adam, 2002), soit par les activités urbaines et industrielles qui effectuent un remblaiement et un empiétement sur certains secteurs de marais maritime (Adam, 2002).

Dans le cas des côtes deltaïques, les processus hydrodynamiques ont un effet beaucoup moins important sur l'évolution de ce type de côte et historiquement ces processus ont eu tendance à être surestimés (Bernatchez et Dubois, 2004b). Les vagues agissent plutôt comme agent d'évacuation des sédiments à la base des falaises deltaïques

(Bernatchez, 2003a; Soucy, 1988). Les côtes deltaïques du territoire à l'étude sont composées d'une couche de sable qui repose sur une unité silto-argileuse (Figure 10), ainsi les processus cryogéniques et la dessiccation affectent l'unité à la base de la falaise (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2007; Bernatchez et Dubois, 2004b), alors que les coulées de sable sec affectent l'unité de sable sommitale (Bernatchez et Dubois, 2004b). Les glissements et les coulées sont particulièrement actifs dans ce type de côte, ils se produisent lorsque le sol atteint sa saturation, il s'ensuit une liquéfaction des sédiments fins (Bernatchez et Dubois, 2004b). Finalement, un processus méconnu dans l'évolution des falaises deltaïques est la suffosion (Bernatchez et Dubois, 2004b; Dubois, 1999; Morneau, 1999). La suffosion entraîne par écoulement souterrain, à l'interface entre l'unité sableuse plus perméable et l'unité silto-argileuse plus imperméable, les sables vers la côte, ce qui contribue à l'effondrement et au ravinement des terres en surface. L'apport de sédiments à la côte, par les différents processus décrits précédemment, contribue à équilibrer la falaise deltaïque durant une période qui est fonction du temps d'évacuation des sédiments par l'action des vagues (Bernatchez et Dubois, 2004b; Soucy, 1988). Le déblaiement de la base de la falaise contribue à la déstabilisation de son profil d'équilibre, donc à la reprise de l'activité des processus de versants.

Les côtes rocheuses n'évoluent pas à la même échelle temporelle que les différents types de côtes décrits précédemment (Dubois et Briard, 1980), ainsi le principal facteur affectant ces côtes est la hausse du niveau marin (Barrie and Conway, 2002; Shaw *et al.*, 1998b). Cependant, dans une perspective centennale la hausse du niveau marin affecte

l'ensemble des types de côte à l'étude (Shaw *et al.*, 1998b). Finalement, le déficit sédimentaire est un facteur indirect qui affecte également l'ensemble des côtes à l'étude (Bernatchez, 2003a).

### 5.1.2. Intervalles temporels

La cartographie de l'évolution de la ligne de rivage entre Longue-Rive et Forestville (Annexe 5) appuyée par les courbes présentées sur les graphiques (Annexe 7) permet de constater une alternance entre les périodes d'érosion et d'accumulation pour l'ensemble de la période étudiée. De façon générale, les 20 premières années de mesures présentent des taux élevés d'accumulation pour le secteur de la pointe à Boisvert. Les mesures réalisées pour la période entre 1931 et 1950 montrent une légère tendance à l'accumulation. Celle-ci est suivie par une période présentant de faibles taux d'érosion. Au cours des décennies 1950, 1960 et 1970, une faible tendance à l'érosion se dégage des mesures prises par photointerprétation. Cependant de nombreuses oscillations de faible amplitude autour de la ligne de stabilité sont observées. Durant les années 1980, les valeurs enregistrées présentent une tendance marquée à l'accumulation, à l'exception de certains segments côtiers en érosion situés principalement dans le village de Saint-Paul-du-Nord. La couverture aérienne de 1996 est importante puisqu'elle constitue une année charnière. Deux tendances diamétralement opposées sont observées durant la décennie 1990. Les taux d'érosion sont très marqués durant la première moitié de la décennie et cette tendance

se renverse durant la deuxième moitié de la décennie avec des taux d'accumulation importants. Durant la première moitié de la décennie 1990, les taux d'érosion sont plus accentués que tous ceux des intervalles précédents. Cette période présente donc une intensification de l'érosion contrastant avec les mesures établies dans les premiers intervalles étudiés. Les mesures annuelles des bornes montrent une augmentation du nombre de bornes en érosion, entre 2000 et 2004.

Les intervalles temporels récents présentent une amélioration de la résolution temporelle lors de la prise de mesures par photointerprétation par rapport aux premiers intervalles mesurés. Alors que, durant les premières décennies de mesures, un intervalle entre deux couvertures aériennes correspondait à 20 années d'écart, les intervalles récents atteignent un écart entre 1 an et 5 ans entre les années de couvertures aériennes. La résolution temporelle est grandement améliorée grâce au suivi annuel des bornes sur le terrain (Dubois *et al.*, 2005; Grenier et Dubois, 1990).

La période de 1930 à 1950 est une période présentant des taux d'accumulation très élevés pour la pointe à Boisvert et pour le secteur de Portneuf-sur-Mer. C'est durant cette période que la pointe à Boisvert se forme puisqu'elle n'apparaît pas sur les photographies aériennes de 1931. Durant cette période, les apports sédimentaires étaient très importants. La source de ces apports sédimentaires peuvent être de trois natures; les apports des bassins versants des rivières, l'érosion des falaises littorales et les glissements de terrain et les coulées de sable sec (Dubois et Briard, 1979; Dubois et Briard, 1980; Dubois *et al.*, 2005).

Dans le cas des apports côtiers, la zone d'étude est composée de plusieurs unités hydrosédimentaires et les limites de ces unités correspondent exactement aux limites du secteur à l'étude (Dubois *et al.*, 2005). Ces limites sont, pour le sud-ouest, la baie des Bacon et pour le nord-est, la pointe Laval située au nord de l'embouchure de la rivière du Sault aux Cochons. Les unités hydrosédimentaires; unités géomorphologiques le long du littoral où il n'y a aucune entrée ou sortie de sédiments littoraux (Dubois, 1979; Dubois et Briard, 1979), délimitent les secteurs où le transit sédimentaire est influencé par un seul courant de dérive littorale principal. Pour le secteur à l'étude, il n'y a donc aucune entrée ou sortie de sédiments littoraux vers le nord ou vers le sud. Durant l'intervalle de 1931 à 1950, le secteur présente des taux d'accumulation très élevés pour les systèmes côtiers à flèche littorale. C'est durant cette période que la flèche littorale de la pointe à Boisvert se construit et que la barre de Portneuf et la pointe des Fortin s'engraissent considérablement. De plus, il y a la formation de terrasse de plage au pied des basses falaises au nord de la pointe à Boisvert. Par contre, les marais maritimes et les côtes deltaïques sont en érosion. Une partie des sédiments nécessaires à la construction des ces grands systèmes côtiers vient de l'érosion de segments côtiers en amont de ces flèches littorales (Savard, 1998; Soucy, 1988). Pour la période 1931-1950, une grande portion des falaises de Forestville montrent des signes d'érosion puisque celles-ci sont soit semi-végétalisées ou vives (Savard, 1998). Cette situation indique la contribution importante de ce système côtier à l'engraissement des flèches littorales et des terrasses de plage mentionnées précédemment. Dans le cas des apports sédimentaires fluviaux, les sédiments sont transportées par les rivières jusqu'à la mer et ensuite pris en charge par les courants de dérive littorale qui les transportent le long

de la côte pour ainsi favoriser l'engraissement des formes d'accumulation littorale (Dubois et Briard, 1979; Dubois et Bernatchez, 2004b). De plus, les activités au sein du bassin versant des rivières du secteur étudié influencent directement l'apport sédimentaire à la côte. De 1946 à 1975 les activités forestières du bassin versant de la rivière Portneuf ont été très intenses (Savard, 1998). La déforestation et le flottage du bois augmentent la quantité de sédiments transportés à la côte lors des crues des rivières printanières (Savard, 1998).

Durant la période de 1950 à 1964, les flèches littorales qui se sont formées durant l'intervalle précédent sont désormais en érosion. Ainsi, la barre de Portneuf et la pointe des Fortin s'amincissent et la pointe à Boisvert est également en érosion alors que le littoral derrière la barre de Portneuf et le marais de la baie des Bacon sont en accumulation. Il ne se dégage pas de tendance marquée pour cette période, mais les nombreuses variations de la courbe d'érosion/accumulation (Annexe 7) autour de la ligne de stabilité témoignent d'un intervalle où les apports et le transit sédimentaires ont diminué. La disparition des crochets à l'extrémité de la barre de Portneuf durant cet intervalle indique une diminution du transit sédimentaire. C'est également durant cette période que la végétation arbustive gagne les falaises de Forestville (Savard, 1998), cependant les activités forestières intenses se poursuivent dans le bassin versant de la rivière Portneuf, même que la déforestation du bassin versant et du littoral fut complète (Savard, 1998). La diminution des apports sédimentaires n'est donc pas majeure, il s'agit plutôt de la diminution du transit sédimentaire qui explique l'érosion et l'amincissement des flèches littorales (Dubois et

Briard, 1980). De plus, les taux d'érosion pour la période de 1950 à 1980 sont assez faibles, ce qui ajoute au déficit sédimentaire pour le secteur. Les segments côtiers présentant des maxima d'érosion sont en croissance. Ces maxima sont associés à l'impact des tempêtes à la côte et elles sont un facteur d'érosion important pour ces trois décennies (Savard, 1998). L'impact des tempêtes en association avec le déficit sédimentaire est le facteur clé du recul des côtes.

Durant les années 1980, une faible tendance à l'accumulation se dégage à la suite des 30 années précédentes où de faibles taux de recul ou une stabilité relative ont été enregistrés. Les taux d'accumulation sont assez faibles et les apports sédimentaires à la côte sont une combinaison des apports fluviaux et côtiers. Les sédiments proviennent de l'érosion des segments côtiers et dans une moindre mesure du bassin versant (Savard, 1998), ils contribuent à alimenter les systèmes côtiers par les courants de dérive littorale (Dubois *et al.*, 2005). Dans le cas de la source sédimentaire provenant de l'érosion littorale, certains taux d'érosion atteignant 7 mètres/année ont été mesurés, ce qui contribue à alimenter le système de façon significative. La péninsule de Portneuf et du village de Portneuf-sur-Mer font exception à la tendance pour les années 1980 puisque ceux-ci montrent une tendance à l'érosion et à l'augmentation du nombre de maxima d'érosion. Ils constituent également un apport sédimentaire au système. Plusieurs brèches et encoches ont été observées le long du trait de côte, ils constituent des maxima d'érosion associés principalement à l'impact des tempêtes pour cette période (Morton and Sallenger, 2003).



La décennie 1990 se divise en deux périodes : la première moitié de la décennie montre une forte tendance à l'érosion et la seconde moitié est dominée par l'accumulation. L'intervalle de 1990 à 1996 présente des taux d'érosion élevés pour l'ensemble du secteur à l'étude. Pour cette période, il y a déficit sédimentaire des segments côtiers (Savard, 1998). Pour la deuxième moitié de la décennie 1990, la photointerprétation géomorphologique permet de constater les effets de la crue exceptionnelle de 1996 puisque la couverture aérienne date du 27 septembre alors que la crue a eu lieu durant le mois de juillet 1996. Lors de cet épisode, les forts débits des rivières ont transporté une grande quantité de sédiments vers les côtes (Savard, 1998) et de plus de forts taux d'érosion ont été enregistrés dans les côtes deltaïques, ce sont les deux principales sources sédimentaires à la côte pour cette période. Par la suite, de 1996 à 2000, les sédiments ont été répartis et ont contribué à l'engraissement des systèmes côtiers du secteur. Finalement, l'harnachement des rivières Portneuf et Sault aux Cochons durant la deuxième moitié des années 1990, joue un rôle de rétention sédimentaire en ce qui à trait aux apports fluviaux (Savard, 1998). La présence de bassins de sédimentation en amont des barrages réduit considérablement la source sédimentaire d'origine fluviale pour les années subséquentes.

Les bornes de mesure sur le terrain des années 2000 à 2004 présentent des taux d'érosion similaires à ceux mesurés par photointerprétation durant la décennie 1990, soit des taux atteignant 10 mètres/année. Les mesures prises sur les bornes montrent une augmentation des taux d'érosion de 2000 à 2004. De plus, le nombre de bornes montrant

un recul du littoral augmente également (Bernatchez, 2004; Bernatchez et Dubois, 2004b). Les taux d'érosion sont beaucoup plus élevés que les taux d'accumulation des premières décennies de mesure soit entre 1930 et 1950.

Les graphiques d'érosion et d'accumulation pour les différents intervalles temporels mesurés permettent d'évaluer la récurrence de l'érosion ou de l'accumulation sur l'évolution côtière. Puisque les données historiques couvrent uniquement les années 1930 jusqu'à aujourd'hui, il est seulement possible d'évaluer de courtes périodes de récurrence. Les résultats obtenus ne montrent pas de cycles de courte période entre l'érosion et l'accumulation. Cependant l'intervalle de 1990 à 1996, montrent une tendance claire : l'érosion côtière domine et ce phénomène s'accélère et s'intensifie depuis le début des années 1990 (Bernatchez, 2003a; Bernatchez, 2004; Bernatchez et Dubois 2004b; Dionne et Bouchard, 2000).

### *5.1.3. Sensibilité des systèmes côtiers*

La sensibilité des côtes aux facteurs environnementaux est définie selon : 1) la valeur des taux mesurés, c'est-à-dire l'amplitude de la courbe (Annexe 8); 2) la fréquence de réaction d'un type de système côtier, plus le système réagit fréquemment plus il est sensible. Cet indice d'évolution côtière permet de déterminer la sensibilité des différents types de système côtier et de discerner les causes et les facteurs responsables de l'érosion

selon qu'ils soient d'ordre marins ou terrestres. Il s'ensuit une classification des types de systèmes côtiers à partir de cet indice d'évolution du littoral (Shaw *et al.*, 1998a).

Le système côtier qui présente la plus grande sensibilité aux facteurs environnementaux est la flèche littorale. Ce système présente les plus grandes amplitudes sur des courbes. L'évolution naturelle des flèches littorales dépend en grande partie des facteurs hydrodynamiques marins dans la zone côtière et selon que la source sédimentaire soit proximale ou distale (Bernatchez et Dubois, 2004b; Savard, 1998). Parmi ces facteurs, il y a principalement les courants de dérive littorale et de marée, les vagues, les surcotes de marée et les tempêtes. Les flèches sont une forme d'accumulation littorale, mais les résultats de cette étude démontrent clairement que le bilan sédimentaire global des flèches littorales du secteur à l'étude est négatif sauf pour la flèche littorale de la pointe à Boisvert. Celle-ci s'est formée entre les années 1930 et 1950 à cause des apports sédimentaires fluviaux et littoraux. Par la suite, l'érosion des segments côtiers au nord de cette flèche, c'est-à-dire en amont de l'unité hydrosédimentaire, a grandement contribué à maintenir l'engraissement de celle-ci (Dubois *et al.*, 2005), en particulier l'érosion de la barre de Portneuf. Un bilan sédimentaire négatif associé aux facteurs environnementaux décrits précédemment entraînent la présence de formes caractéristiques des milieux en érosion et en transgression marine soit des brèches de tempête et des lobes transgressifs (Bernatchez, 2003a; Dionne et Bouchard, 2000; Morton and Sallenger, 2003). Ces deux indices ont été relevés sur l'ensemble des flèches littorales du secteur à l'étude. La présence de marais maritimes protégés par une flèche littorale peut accroître la sensibilité de ces dernières. À

cet effet, cet habitat côtier fait l'objet d'une section complète, la section 5.2., son indice d'évolution côtière y est expliqué.

La terrasse de plage est le système côtier venant au second rang pour la sensibilité des côtes. Ce système ne présente pas des amplitudes aussi fortes que les flèches littorales, mais les variations des courbes sont importantes. De plus, la fréquence de réaction de ce système est élevée. Cette variation, soit à l'érosion ou à l'accrétion, dépend de l'action des vagues à la côte, des surcotes de marée et des tempêtes mais également de l'apport sédimentaire (Bernatchez, 2003a; Bernatchez, 2004b). Durant la dernière décennie, certaines terrasses de plage ont complètement ou partiellement disparu. Cette disparition entraîne une diminution de la diversité des littoraux pour le secteur à l'étude. Une diminution de cette diversité est inévitable puisqu'en aucun autre endroit de la zone d'étude de nouvelles terrasses de plage sont apparues.

La sensibilité des deux types de systèmes côtiers précédents est reliée principalement aux facteurs hydrodynamiques côtiers et fluviaux. Ainsi, ces deux types de systèmes sont ceux qui réagissent le plus vivement à la modification de ces facteurs environnementaux. En conséquence, ils constituent un indicateur de premier ordre de la modification de ces facteurs environnementaux.

Les côtes deltaïques se trouvent en troisième position de la sensibilité des systèmes côtiers. Elles sont peu nombreuses dans le secteur à l'étude et l'amplitude des courbes qui

leur sont associée est faible sauf quelques maxima extrêmes et leur fréquence de réaction est également faible. Il existe deux exceptions pour les côtes deltaïques où il est possible d'enregistrer des taux d'accumulation : lors de la formation de terrasses de plage au pied d'une falaise deltaïque ou lors d'un glissement de terrain ou d'une coulée. Dans la présente étude les maxima enregistrés correspondent à des taux d'accumulation. Au paragraphe précédent, il a été montré qu'aucune nouvelle terrasse de plage est apparue dans le secteur d'étude. Donc, les taux d'accumulation enregistrés dans les côtes deltaïques correspondent à des événements de glissement de terrain ou de coulée (Bernatchez, 2004b). Les côtes deltaïques dépendent des processus géomorphologiques terrestres. Ainsi, la sensibilité de ce système côtier se traduit par une sensibilité aux mouvements de masse et à la suffosion. Les côtes deltaïques évoluent ainsi par la saturation du sol en eau et par la liquéfaction des sédiments fins (Bernatchez, 2004b). Les processus cryogéniques et la dessiccation contribuent également au recul de ce type de côte (Bernatchez, 2004b). La déstabilisation des talus côtiers peut s'effectuer lors d'épisodes d'averses intenses, de redoux hivernaux, de tempêtes ou de vibrations liées aux séismes ou à d'autre nature (Bernatchez, 2003a; Bernatchez, 2004b; Duchesne *et al.*, 2003). Durant une période plus ou moins prolongée, un lobe de sédiments se retrouve sur la plage, ce qui se traduit par une avancée vers la mer de la ligne des PMSGM. Ce lobe de sédiments contribue à stabiliser temporairement le talus côtier (Soucy, 1988). L'évacuation de ce lobe est effectuée par l'action des vagues (Dubois *et al.*, 2005; Soucy, 1988), plus l'évacuation des sédiments est rapide, plus le talus côtier redeviendra rapidement instable. Les taux d'accumulation enregistrés dans le secteur à l'étude correspondent à des mouvements de masse de faible envergure. Cependant, des

traces d'anciens mouvements de masse ont été relevées dans le secteur du village de Longue-Rive (Dionne *et al.*, 2004; Dubois *et al.*, 2005).

Les côtes rocheuses viennent au dernier rang de la sensibilité des côtes. L'indice de sensibilité des côtes rocheuses à la hausse du niveau marin relatif est également faible (Shaw *et al.*, 1998a). L'échelle temporelle étudiée est relativement courte pour observer des modifications au niveau de la position de la ligne des PMSGM pour les côtes rocheuses. De plus, le substratum rocheux cristallin nord côtier est très résistant aux processus d'érosion tant de nature marine que terrestre. À l'échelle de l'Holocène par exemple, certaines modifications peuvent être observées en particulier celles reliées aux variations du niveau marin relatif. Ainsi, il convient plutôt de parler de sensibilité des côtes à l'élévation du niveau marin relatif (Shaw *et al.*, 1998a) ou de sensibilité à la submersion marine.

Finalement, les systèmes côtiers qui ont été artificialisés font l'objet de la section 5.1.6.

#### *5.1.4. Lithostratigraphie à fort potentiel d'érosion*

La section précédente présente l'évolution côtière et la sensibilité des systèmes côtiers aux facteurs environnementaux. Les flèches littorales ainsi que les terrasses de

plage ont été identifiés comme les systèmes côtiers les plus sensibles. Les flèches littorales et les terrasses de plage ont également été classées comme des systèmes côtiers en érosion et en déficit sédimentaire (Bernatchez, 2004b). Les facteurs environnementaux responsables de l'évolution côtière de ces systèmes sont par conséquent les facteurs responsables du recul du trait de côte. Pour les côtes deltaïques, les processus actifs sont d'origine terrestre ce qui diffère de l'origine marine des processus actifs dans les deux systèmes côtiers précédents. La modification de la géomorphologie des côtes deltaïques par les mouvements de masses, la suffosion, les processus cryogéniques et la dessiccation entraîne également un recul du trait de côte. L'indice de d'évolution du littoral doit donc être mis en relation avec la lithostratigraphie des systèmes côtiers afin d'améliorer la compréhension du phénomène et de préciser les causes de l'érosion des côtes.

La composition et la structure sédimentaires des flèches littorales et des terrasses de plage représentent du sable moyen à grossier en strates plus ou moins épaisses (Dubois *et al.*, 2005; Savard, 1998). Le facteur de cohésion entre les particules de ce matériel n'est pas très élevé. L'action des processus hydrodynamiques côtiers, présentée à la section précédente, sur ce type de matériel entraîne une grande mobilisation des sédiments (Bernatchez et Dubois, 2004b). Dans une moindre mesure, les processus terrestres s'attaquent également à ce type de structure sédimentaire par l'action des précipitations et du ruissellement qui sont des facteurs d'érosion et de transport sédimentaire. Les deux processus faisant reculer le trait de côte qui sont le plus couramment rencontrés sont l'arrachement des sédiments en place par le sapement des vagues et la transgression sous

forme de lobes (Bernatchez et Dubois, 2004b; Dubois *et al.*, 2005). Les lobes transgressifs ont pour effet d'ensabler la végétation qui se trouve sur les systèmes côtiers (Dionne et Bouchard, 2000). Cette végétation agit comme agent de stabilisation du littoral (Savard, 1998) et un ensablement contribue à sa destruction. Les sédiments ainsi mis à nu peuvent être plus facilement arrachés et entraînés par les vagues. L'action combinée de tous ces facteurs environnementaux sur des côtes de très faible altitude, comme les flèches littorales et les terrasses de plage, contribuent à leur destruction et à la diminution de la diversité des systèmes côtiers le long du littoral (Bernatchez, 2004). De nombreuses brèches de tempêtes sont également observées dans ces systèmes côtiers. Celles-ci contribuent à l'affaiblissement général de ces côtes, à la diminution de la résistance à la mobilisation des sédiments et il s'ensuit un agrandissement de ces brèches de tempêtes (Savard, 1998). De plus, l'érosion de ces formes littorales devrait alimenter les courants de dérive littorale qui par la suite engraisent d'autres systèmes côtiers. Toutefois, un déficit sédimentaire est observé, ce qui signifie que ces sédiments sont évacués du système. La sensibilité de ces systèmes côtiers est donc majorée à cause de leur lithostratigraphie.

Les côtes deltaïques occupent le troisième rang de la sensibilité des côtes. Leur évolution naturelle par mouvements de masses a été décrite à la section précédente. L'indice d'évolution côtière est donc défini en fonction de la stabilité des talus côtiers. La présence de sédiments fins interlaminés, c'est-à-dire de l'argile, du silt et du sable fin, détermine un potentiel d'instabilité élevé de ces talus (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2004b; Duchesne *et al.*, 2003). Les côtes deltaïques sont souvent composées d'un



talus côtier à base argileuse ou silto-argileuse, leur lithostratigraphie est donc une unité de sable sommitale reposant sur une unité de sédiments fins. Les processus prédominants d'évolution littorale pour ce système côtier sont ceux d'origine géomorphologique terrestre (Bernatchez, 2003a; Bernatchez et Dubois, 2007; Bernatchez et Dubois, 2004b). La sensibilité de cette lithostratigraphie à la présence d'eau provenant du ruissellement, de la percolation ou des embruns marins est importante. Une modification dans la teneur en eau du sol entraîne deux aléas côtiers majeurs : les mouvements de masse et les effondrements dus à la suffosion (Bernatchez et Dubois, 2004b).

Finalement, la lithostratigraphie des côtes rocheuses cristallines n'est pas un facteur qui a été pris en compte. Elle offre une grande résistance à l'érosion pour la période étudiée.

#### *5.1.5. Position des systèmes côtiers*

Sur les graphiques d'érosion et d'accumulation (Annexes 7 et 8), la position des segments côtiers est indiquée selon un axe du sud-ouest vers le nord-est, soit de la baie des Bacon à l'embouchure de la rivière du Sault aux Cochons. L'orientation des systèmes côtiers est également un facteur important à considérer. Dans la zone d'étude, la majeure partie de la côte fait face à l'est-sud-est à l'exception de la portion de côte entre le marais de la baie de Mille-Vaches et la pointe à Boisvert qui fait face au sud. Donc, les vagues de

tempêtes du nord-est, où le fetch est le plus grand, affectent la majeure partie du secteur à l'étude. La portion de côte comprise entre la baie de Mille-Vaches et la pointe à Boisvert est à l'abri de ces vagues de tempête, cependant celle-ci est affectée par les tempêtes en provenance du sud-ouest, mais le fetch y est beaucoup moins important.

L'analyse de la position des segments côtiers permet de constater que la flèche littorale de la pointe à Émile constitue un point de transition. En effet, les taux mesurés et les tendances diffèrent entre les systèmes côtiers situés de part et d'autre de cette flèche. Cette transition s'explique par la convergence de deux grands courants de dérive littorale à cet endroit. Cette zone correspond à une limite d'unité hydrosédimentaire. Les grands courants de dérive littorale provenant du sud-ouest rencontrent ceux du nord-est. Les flèches littorales de la pointe à Émile et de la pointe à Boisvert se trouvent donc alimentées par ces deux courants. Tel que présenté aux sections précédentes, la flèche de la pointe à Boisvert présente un bilan sédimentaire positif. Ce bilan est dépendant du transport littoral qui dépose sa charge sédimentaire à cet endroit. L'érosion de tous les systèmes côtiers de part et d'autre de cette zone contribue ainsi à son engraissement. Les courants de dérive littorale provenant du nord-est ont également contribué à l'édification de la flèche littorale de la pointe des Fortin et de la barre de Portneuf. La charge sédimentaire transportée par ce courant a été très importante. Les sources sédimentaires sont de nature fluviale et littorale. L'exposition des segments de flèches littorales et de terrasses de plage confirme leur sensibilité aux multiples facteurs environnementaux. Malgré le fait que la zone de rencontre des courants de dérive littorale comprenne deux flèches littorales et qu'elles sont

en accumulation pour la période de 1931 à 2001, les données des bornes de mesures sur le terrain confirment également leur sensibilité élevée. En effet, il y a un plus grand nombre de bornes en érosion et les taux d'érosion sont plus élevés pour les flèches littorales de la pointe à Émile et de la pointe à Boisvert.

Durant l'intervalle 1931-1950, les flèches littorales face au sud présentent une période d'accumulation marquée, tandis que celles face à l'est-sud-est sont en érosion. Pour l'intervalle de 1950 à 1990, la tendance est inversée alors que les flèches littorales face au sud sont en érosion et celles face à l'est-sud-est sont en accumulation. La première moitié de la décennie 1990 présente des taux d'érosion pour l'ensemble des flèches littorales tandis que pour la deuxième moitié de cette décennie, celles-ci sont en accumulation. Finalement, les dernières années de mesure présentent des taux d'érosion très élevés pour l'ensemble des flèches littorales peu importe leur orientation. Cette constatation sur les flèches littorales permet de confirmer les tendances des intervalles temporels de la section 5.1.2.

L'analyse des courbes des graphiques d'érosion et d'accumulation (Annexes 7 et 8) révèle que les zones d'érosion s'élargissent, durant la dernière décennie. D'autre part, certaines zones d'érosion se sont déplacées durant les années 1930 à 1950, mais l'érosion s'est récemment généralisée sur l'ensemble des systèmes côtiers plus sensibles à l'érosion (Bernatchez, 2004; Bernatchez et Dubois, 2004b; Dubois *et al.*, 2005).

### *5.1.6. Anthropisation des systèmes côtiers*

Les structures artificielles le long du littoral à l'étude ne sont pas toutes apparues au même moment. Elles sont principalement des structures de protection contre l'érosion, à l'exception de deux quais situés sur des côtes rocheuses et deux quais dans l'embouchure de la rivière Portneuf. Lors de l'installation d'une infrastructure dans un système côtier naturel, le recul du trait de côte diminue pour le secteur protégé de manière artificielle, mais les bornes de mesures aux abords de la structure artificielle présentent une augmentation des taux d'érosion. Ce phénomène équilibre les taux de reculs moyens. Malgré le fait que la zone à protéger soit désormais stable, les zones d'érosion migrent vers les zones adjacentes à la structure, ce qui se traduit par des mesures de taux d'érosion pour le système côtier naturel. Les structures de protection établies sur les flèches littorales et en moindre mesure sur les terrasses de plage ne sont pas efficaces, puisque le recul du trait de côte à ces endroits continue à s'effectuer. Le suivi de l'état des structures artificielles n'a pas été réalisé dans le cadre de ce projet, toutefois, ce type de suivi serait nécessaire pour déterminer l'efficacité des structures de protection installées (Grenier, 1993).

## **5.2. Évolution des marais maritimes**

Pour évaluer l'évolution des marais maritimes, deux paramètres ont été retenus : le périmètre et l'aire. Le périmètre permet d'identifier la présence d'échancrures d'érosion ou

de rentrants qui le feront augmenter. Les variations de la mesure du périmètre servent à déterminer le mode d'évolution de la limite inférieure des marais maritimes, c'est-à-dire au niveau moyen des mers. Les variations de superficie font référence à la modification de l'habitat côtier. Ces deux paramètres sont présentés tant pour les marais exposés que pour les marais abrités, afin d'établir une comparaison entre ces deux types de milieux. Le mode d'évolution des marais maritimes est décrit à la section 5.1.1. et les paramètres utilisés permettent de déterminer l'indice d'évolution côtière pour ce type de système côtier, comme il a été fait pour les autres types de système côtier à la section 5.1.3.

#### *5.2.1. Marais frangeants*

Deux marais frangeants se trouvent dans le secteur de Longue-Rive (Baie-des-Bacon et Sault-au-Mouton) et un autre se retrouve dans le secteur de Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et de Pointe-à-Boisvert.

Pour le marais de la baie des Bacon, les pertes de superficie sont plus importantes que les gains, soit 4 intervalles sur 6. La perte de superficie la plus importante se situe entre 1978 et 1990, avec des valeurs plus élevées de 1978 à 1982. La seconde période de perte importante de superficie est entre 1996 et 2001. Lors de ces mêmes intervalles de mesure, le périmètre diminue également, c'est entre 2000 et 2001 que la diminution est la plus importante. En contrepartie, pendant les intervalles qui précèdent une diminution de superficie le périmètre augmente. Entre 1990 et 1996, une importante augmentation

importante du périmètre précède ainsi une diminution de la superficie du marais de 1996 à 2001. Le même phénomène se produit pour l'intervalle précédent la perte de superficie de 1978 à 1990, car de 1964 à 1978 le périmètre a augmenté. En définitive, le marais de la baie des Bacon a perdu près de 26 % de superficie pour l'ensemble des années étudiées par rapport à sa superficie initiale de 1964, ce qui correspond à une perte nette de 19,973 hectares.

Pour le marais frangeant de Sault-au-Mouton, les modifications de géomorphologie du marais sont beaucoup moins élevées que celles du marais de la baie des Bacon. La même tendance est observée : les pertes de superficie se situent dans les intervalles de 1978 à 1990 et de 1996 à 2001. L'intervalle allant de 2000 à 2001 présente la perte la plus importante. Les deux intervalles de perte de superficie sont également précédés d'une augmentation du périmètre pour 1964 à 1978 et pour 1990 à 1996. Pour l'ensemble des intervalles, la superficie du marais de Sault-au-Mouton a augmenté de façon très importante puisque le marais a gagné huit fois sa superficie initiale de 1931. Cependant, ce marais est très peu étendu et le gain net est faible, soit de 3,939 hectares. En effet, cette valeur est très faible par rapport à la perte de superficie du marais de la baie de Bacon qui est de 19, 973 hectares.

Le marais du village de Saint-Paul-du-Nord a subi des pertes de superficie plus importantes que les gains. Sur les 8 intervalles étudiés, il n'y a que 2 intervalles où la superficie augmente légèrement. La période de 1996 à 2001 enregistre la perte de

superficie la plus importante et cette période s'accompagne de la plus importante diminution du périmètre. La tendance d'évolution de ce marais est similaire à celle observée pour les deux marais précédents puisque les deux mêmes périodes d'érosion des marais ressortent. Entre 1978 et 1990, la superficie des marais diminue malgré une légère augmentation de 1978 à 1982. Une perte de superficie est également enregistrée de 1931 à 1978 avec des valeurs plus importantes que celles de l'intervalle précédent. Comme dans le cas des autres marais maritimes frangeants, les périodes où la superficie diminue sont précédées d'un intervalle où le périmètre augmente. Il est intéressant de noter une grande perte de superficie du marais de Saint-Paul-du-Nord entre 1931 et 1950. Cette période concorde avec l'aménagement de ce marais afin de récupérer des terres agricoles (Dionne *et al.*, 2004). La photointerprétation a permis de déterminer que le marais a été drainé pour faire des pâturages et des champs de cultures. Cette observation est remarquable puisque les autres valeurs de perte ou de gain de superficie sont exceptionnellement inférieures à celles enregistrées durant la période allant de 1931 à 1950. Cependant, il est impossible d'établir un comparatif avec les deux autres marais frangeants puisque les mesures de superficie ne sont pas disponibles pour cette période. La perte nette de superficie pour ce marais est importante puisqu'elle représente 80 % de la superficie initiale mesurée en 1931, dont 53 % dû uniquement à l'intervention humaine de 1931 à 1950. La perte de superficie est également importante en valeur absolue puisqu'elle représente 43,992 hectares de marais maritime.

Les tendances observées pour les trois marais frangeants témoignent d'une évolution des marais maritimes nordiques qui s'effectue par l'action des vagues, des glaces et des eaux de ruissellement sur la limite inférieure du schorre inférieur et sur le schorre inférieur et supérieur (Dionne et Bouchard, 2000). Ces agents contribuent à créer des échancrures et des rentrants à la limite du marais, ce qui se traduit par une augmentation du périmètre. Ces échancrures finissent par isoler des pointes et affaiblissent la cohésion du schorre (Dionne et Bouchard, 2000). De plus, la présence de mares et de marelles, qui sont dépourvues de végétation, accélère le processus de formation d'échancrures (Dionne, 1986; Dionne, 2000; Dionne et Bouchard, 2000). Les pointes qui ont été isolées finissent par se détacher du trait de côte ou de la limite inférieure du marais, ce qui provoque l'apparition de radeaux de schorre. Ces radeaux sont ensuite évacués par les vagues, les courants de marée ou les glaces (Dionne et Bouchard, 2000). La perte de superficie des marais est donc très liée aux processus de formation de radeaux et de leur disparition graduelle au fil des saisons. Par la suite, il y a reprise du processus de formation d'échancrures le long de la limite inférieure du marais. La cyclicité du phénomène est observable par des périodes de recrudescence de l'érosion : des augmentations du périmètre accompagnées de pertes de superficie. Celles-ci alternent avec des moments où la limite inférieure des marais est relativement rectiligne, avec des gains en superficie ou une stabilité relative. Cette alternance est observable au niveau de tous les marais maritimes frangeants : la période de 1978 à 1990, et notamment de 1978 à 1982, a été une période d'érosion importante suivie, entre 1990 et 1996, d'un gain de superficie relativement faible pour terminer avec une dernière période d'érosion importante entre 1996 et 2001. Il est raisonnable de penser que



la période de 1931 à 1950 a également été une période de perte de superficie importante. En effet, les données recueillies durant cette étude sur le marais de Saint-Paul-du-Nord indiquent une perte importante de superficie à cause de l'intervention humaine par le drainage du marais. Dans le marais de la baie des Bacon, qui se situe également en milieu agricole, le même phénomène s'est produit. La présence de grands canaux de drainage est bien visible par photointerprétation.

### 5.2.2. *Marais abrités*

Quatre marais abrités sont présents dans les secteurs de Longue-Rive (Saint-Paul-du-Nord) et Pointe-à-Boisvert, de la péninsule de Portneuf et de Portneuf-sur-Mer. Le marais de la baie de Mille-Vaches présente plus de périodes de perte de superficie que de périodes de gain, malgré un gain net de 7,644 hectares, ce qui correspond à 7 % de sa superficie initiale mesurée en 1931. Il présente sensiblement les mêmes périodes d'érosion que pour les marais frangeants, soit de 1964 à 1982 et de 1996 à 2001. Les pertes en superficie s'accompagnent généralement d'une diminution du périmètre. Le gain le plus important en superficie a été mesuré entre 1950 et 1964 et il s'accompagne également d'une importante augmentation du périmètre.

Le marais de la pointe à Boisvert présente beaucoup plus de périodes de gains en superficie que de pertes, mais la perte nette en superficie est de 24 % de sa superficie

initiale de 1931, ce qui correspond à une perte de 17,782 hectares de marais. Ce marais présente également une tendance à la diminution de superficie et de périmètre pour les mêmes intervalles de mesures. La perte de superficie pour ce marais maritime durant l'intervalle 1996-2000 correspond à la deuxième plus importante perte de superficie sur l'ensemble des intervalles étudiés.

La superficie du marais de la barre de Portneuf a augmenté pour l'ensemble des intervalles mesurées, même si les périodes de perte égalent celles de gain. Le gain le plus important se situe entre 1950 et 1990, tandis que la perte la plus importante se situe entre 2000 et 2001. Les réductions de superficie s'accompagnent toujours d'une diminution du périmètre. Pour l'ensemble des intervalles étudiés, la superficie nette a augmenté de 50 % de sa superficie initiale mesurée en 1931 avec une valeur de 100,302 hectares.

Les périodes de perte de superficie sont presque équivalentes à celles des gains pour le marais de la rivière Portneuf. Les deux principaux intervalles de perte de superficie sont de 2000 à 2001 et de 1990 à 1996, la perte la plus importante ayant été enregistrée durant le premier intervalle. L'intervalle de 1931 à 1964 présente également une perte de superficie, mais les taux sont moins élevés. Tous les cas de pertes de superficie sont accompagnés d'une réduction du périmètre des marais. Le gain en superficie est important entre 1996 et 2000 et de 1964 à 1990. Le gain net en superficie est de l'ordre de 5 % de sa superficie initiale mesurée en 1931, ce qui correspond à une augmentation de 1,804 hectares.

À partir des tendances observées pour les marais maritimes abrités, il faut conclure qu'ils n'évoluent pas de la même façon que les marais maritimes frangeants. En effet, la tendance à une perte de superficie s'est accentuée depuis la dernière décennie (Dionne et Bouchard, 2000), particulièrement entre 2000 et 2001. Il faut remarquer également que les pertes de superficie des marais abrités ne s'accompagnent pas d'une diminution du périmètre, comme c'est le cas pour les marais exposés. Ainsi il n'y a pas la formation d'échancrures sur la limite inférieure du marais, donc le trait de côte a tendance à reculer de façon plutôt uniforme. L'action des vagues a peu d'influence sur ce type de milieu puisqu'il est habituellement derrière des flèches littorales. L'évolution des marais maritimes abrités derrière une flèche littorale est donc principalement conditionnée par l'évolution littorale de ces dernières. La formation de brèches de tempêtes, la présence de lobes transgressifs et la migration des flèches littorales vers les terres sont les principaux processus responsables de l'évolution de ces marais. Cet apport considérable de sable qui enfouit la végétation des marais maritimes change les conditions hydrologiques et granulométriques nécessaires à la croissance et à l'expansion des marais maritimes. L'ensablement des marais ainsi que la réduction de superficie sont accélérés par le recul de la flèche littorale vers la côte. Ce recul entraîne donc la migration des flèches littorales par-dessus les zones de marais maritimes. L'ensablement des marais provoque le colmatage des chenaux de marée qui permettent l'inondation périodique de ces milieux. Une fois que le patron des chenaux est modifié, les conditions propices à la survie des espèces végétales endémiques aux marais sont modifiées. Certaines espèces peuvent ainsi mourir et créer un affaiblissement de la cohésion des schorres inférieur et supérieur, entraînant les mêmes

conséquences que celles décrites à la section précédente. En contrepartie, l'allongement des flèches littorales est un facteur environnementale responsable de l'augmentation de la superficie des marais maritimes puisqu'une plus grande zone de protection est ainsi créée derrière la flèche littorale. Cette zone de protection favorise l'expansion et la croissance des espèces végétales qui colonisent les marais maritimes. Dans certains cas, l'augmentation de la superficie dans les premiers intervalles de mesure correspond à la période d'allongement de la flèche littorale. Dans une moindre mesure, les glaces agissent sur de grandes portions de marais abrités en déchaussant la végétation (Dionne et Bouchard, 2000) et contribuent ainsi à la perte de superficie. Un autre facteur important agit également à la limite inférieure du marais; c'est la hausse du niveau marin relatif (Adam, 2002). Ce processus combiné aux surcotes de tempêtes entraînent la formation de lobes ou de cordons sableux transgressifs qui envahissent le marais (Bernatchez et Dubois, 2004b; Dionne et Bouchard, 2000).

### 5.2.3. *Perte d'habitat*

Les marais maritimes nordiques frangeants et abrités n'évoluent pas de la même façon et ils ne sont pas soumis aux mêmes processus géomorphologiques et océanographiques. La perte de superficie des marais maritimes est généralisée entre 2000 et 2001. Cet intervalle présente, dans la plupart des cas, la valeur de perte de superficie la plus élevée toutes données confondues. Ainsi, la deuxième moitié de la décennie 1990 fut

critique pour les marais qu'ils soient frangeants ou abrités, à l'exception de ceux de Portneuf-sur-Mer. De plus, la perte d'habitat des marais maritimes touche plus particulièrement les marais frangeants. Des trois marais étudiés, deux présentent une perte nette de superficie alors que le troisième présente un faible gain net. Quant aux marais abrités, l'augmentation de leur superficie se traduit par un gain net au niveau des habitats côtiers. Les marais maritimes frangeants sont en forte diminution alors la quantité d'habitats côtiers a augmenté au cours de certaines décennies grâce à la contribution des marais protégés. Cependant, dans les dernières années, les marais abrités montrent une intensification de l'érosion ce qui laisse présager une éventuelle perte nette d'habitat côtier (Dionne et Bouchard, 2000). Ainsi, l'indice d'évolution côtière des marais exposés et protégés est très élevée puisqu'ils répondent rapidement à une multitude de facteurs environnementaux qui conditionnent leur évolution. La sensibilité des marais maritimes à l'érosion est donc aussi élevée que celle des flèches littorales. De plus, ce sont des milieux très riches au niveau écologique (Bernatchez et Dubois, 2004b).

#### 5.2.4. *L'humain et les marais*

Dans le secteur à l'étude, les marais maritimes frangeants et abrités furent utilisés entre les années 1930 et 1950 à des fins agricoles et de pâturage. Les réseaux de drainage dans le marais de la baie des Bacon et de Saint-Paul-du-Nord ainsi que l'aboteau installé dans un chenal du marais de la baie des Mille-Vaches témoignent de cette époque (Dionne *et al.*,

2004). Ces infrastructures ont contribué à diminuer la superficie des marais puisque ces terres humides ont été drainées pour les transformer en pâturage ou en champ de cultures. Ce phénomène se traduit par une perte importante d'habitat côtier, mais également par l'augmentation des risques de submersion marine des terres ainsi drainées (Adam, 2002). L'inondation de ces terres peut avoir des impacts importants sur les communautés côtières par la destruction ou l'endommagement des bâtiments qui y sont érigés. Les années 1960 ont été le théâtre de l'abandon de l'agriculture. Ainsi, pour les intervalles de 1964 à 1978 et de 1978 à 1982, les terres drainées sont abandonnées au profit d'autres activités économiques. L'abandon de ces terres agricoles n'a pas entraîné une augmentation considérable de la superficie des marais côtiers. Les habitats disparus au profit de l'agriculture ne sont pas récupérés lors de l'abandon des terres agricoles.

### **5.3. Utilisation des SIG dans les études d'évolution côtière**

Ce projet de recherche a permis de développer et de mettre à l'épreuve une méthodologie utilisant les SIG comme outil de mesure pour les déplacements et la modification de la géomorphologie du trait de côte (Crowell *et al.*, 1993; Forbes *et al.*, 2004; Grenier et Dubois, 1990). Cette méthodologie se base principalement sur l'utilisation des photographies aériennes numériques, géoréférencées et orthorectifiées produites par le ministère des Ressources Naturelles du Québec. Ces photos sont ainsi utilisées comme base cartographique et elles constituent l'unique document de référence pour positionner

les autres photographies aériennes ou documents cartographiques dans l'espace. Cette méthodologie élimine ainsi plusieurs erreurs liées à la photointerprétation classique, particulièrement les erreurs de positionnement (Dubois *et al.*, 2005; Grenier et Dubois, 1990). Toutes les étapes de géoréférencement, de photointerprétation, de traçage et de mesures sont réalisées à l'aide du SIG. Les erreurs les plus couramment rencontrées sont les erreurs dues à la qualité des photographies aériennes en format papier, puisque les plus anciennes photographies présentent un aspect flou ou de la réflexion spéculaire (Grenier et Dubois, 1990). Lors de la numérisation, la qualité de ces photographies n'a pu être améliorée. Cette méthode permet également la création simultanée d'une base de données à référence spatiale. De plus, l'automatisation de la prise de mesures et l'intégration de toutes les étapes à l'intérieur d'un SIG permet d'obtenir une précision supérieure à 5 mètres en mesures absolues et une précision supérieure à 1 mètre en mesures relatives. Les orthophotographies étant disponibles pour une bonne partie des côtes du Québec maritime, cette méthodologie peut donc être appliquée à de futurs projets d'évolution côtière en utilisant ces orthophotographies comme base de géoréférencement. Cela permettrait de créer une base de données d'évolution littorale historique de haute résolution à l'échelle du Québec maritime.

#### 5.4. Scénarios prévisionnels d'évolution littorale

À partir de la base de données sur l'évolution littorale historique, il est possible d'appréhender certains changements futurs au plan de la géomorphologie de la côte et des taux de recul. La dernière décennie de mesures prises par photointerprétation présente des taux de recul particulièrement élevés, surtout de 2000 à 2001 et ces valeurs sont corroborées par les mesures de terrain. Lors de l'élaboration de prévisions, il est important de prendre en compte le nombre d'années étudiées et de ne pas prévoir sur un nombre d'années plus élevées que la base de données historiques étudiée (Crowell *et al.*, 1993). Pour la présente étude, la base de données historiques couvrent 73 années, il est donc raisonnable de faire des prévisions pour les 35 années futures, c'est-à-dire jusqu'en 2039. Il est possible de s'attendre pour les 35 prochaines années à des taux de recul au minimum égaux à ceux enregistrés durant les 70 années de photointerprétation (Bernatchez, 2004). Les taux de recul moyen entre 1931 et 2001 oscillent entre 0 et 2 mètres/année et le trait de côte continuera donc au minimum à évoluer à ce rythme pour les prochaines années. Cependant, les taux de reculs des derniers intervalles de mesures prises par photointerprétation ainsi que les taux d'érosion des bornes de terrain oscillent entre 5 et 70 mètres/années. Les taux de reculs moyens se situent entre 1,1 et 6,8 mètres/année. Dans les systèmes côtiers les plus sensibles aux facteurs environnementaux, il est donc possible d'appréhender des taux équivalents. De plus, ces systèmes seront les premiers touchés par l'intensification de l'érosion côtière. La diversité des systèmes côtiers sera en diminution



puisque les flèches littorales, les terrasses de plages et les marais maritimes pourraient disparaître.

## **6. CONCLUSION**

Cette étude d'évolution côtière à hautes résolutions spatiale et temporelle a permis de définir le rang de sensibilité des systèmes côtiers aux facteurs environnementaux en fonction d'un indice d'évolution littorale. L'approche par systèmes côtiers couplée à la résolution spatio-temporelle obtenue tiennent compte de la particularité et de l'unicité de chaque système côtier tout en conservant la relation spatiale entre ces systèmes. Cette approche permet également d'obtenir une segmentation, une caractérisation et une évolution côtière justes et représentatives des systèmes côtiers.

Les résultats de cette étude montrent que le phénomène d'érosion s'est généralisé et s'est intensifié durant les dernières années. L'intervalle de 1930 à 1950 est une période où il y a la formation de la flèche littorale de la pointe à Boisvert, ce qui correspond à une accumulation littorale d'envergure. Aucun événement comparable ne réapparaît dans les années subséquentes. La récurrence de l'érosion ou de l'accumulation excède la période de mesure, cependant pour la période de 1990 à 1996 une tendance à l'érosion se dégage ce qui corrobore les observations réalisées dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Les événements extrêmes ont de plus en plus d'effets sur le recul des côtes et sur la

modification de sa géomorphologie. Un indice d'évolution littorale a été défini à partir de l'amplitude et de la fréquence des courbes d'érosion et d'accumulation. Cet indice identifie, dans l'ordre, les flèches littorales, les terrasses de plage, les côtes deltaïques et finalement les côtes rocheuses comme les systèmes côtiers les plus sensibles à l'érosion, les marais maritimes sont un milieu écologique très riche et ils sont également très sensibles à l'érosion puisque leur évolution est conditionnée par celle des flèches littorales. De plus, les marais frangeants ou exposés sont en perte de superficie durant les dernières années. Ce sont principalement les processus hydrodynamiques marins qui agissent sur ces systèmes côtiers à l'exception des côtes deltaïques qui sont plutôt dépendantes des processus géomorphologiques terrestres. La lithostratigraphie de ces systèmes côtiers augmente leur indice de sensibilité particulièrement dans le cas des côtes deltaïques composées de sédiments fins très sensibles à la modification de la teneur en eau du sol.

Les marais maritimes nordiques frangeants et abrités évoluent selon deux modes différents. Les marais frangeants sont plutôt sensibles à l'action des vagues et des glaces alors que les marais abrités sont plutôt sensibles à l'évolution des flèches littorales, et dans une moindre mesure à la hausse du niveau marin relatif et à l'action des glaces.

Les deux systèmes côtiers les plus sensibles à l'érosion : les flèches littorales et les terrasses de plage sont en voie de disparition, entraînant ainsi une perte de la diversité des littoraux et une perte d'habitats côtiers. Pour les 35 années à venir, ces systèmes côtiers

sont voués à reculer au rythme minimum de 0 à 2 mètres/année et, lors d'événements extrêmes, ils peuvent reculer jusqu'à 70 mètres.

L'application d'une nouvelle méthodologie pour cette étude a donné des résultats concluants. L'utilisation des orthophotographies numériques comme base de géoréférencement commune pour les mosaïques de photographies aériennes et pour la cartographie des traits de côte a permis d'obtenir une précision supérieure à 5 mètres en mesures absolues et une précision supérieure à 1 mètre en mesures relatives pour les différents intervalles de photographies aériennes. Cette méthodologie peut facilement être utilisée pour de futures études d'évolution côtière.

La présente étude nécessite plusieurs améliorations et dans le cadre de futures études d'évolution côtière plusieurs points pourraient être ajoutés. Tout d'abord, une analyse d'une base de données climatiques historiques et l'acquisition de données climatiques récentes et plus précises seraient nécessaires afin de raffiner les relations établies dans cette étude. Une acquisition de données hivernales, notamment sur l'effet des glaces sur les systèmes côtiers, et de données plus précises sur la micro orientation des systèmes côtiers permettraient d'évaluer la contribution de ces facteurs environnementaux. Dans le but de compléter les bilans sédimentaires de cette zone d'étude, des mesures de transport sédimentaire littoral seraient nécessaires. Dans le cas des falaises de Forestville, la présente étude couvrait un trop grand territoire pour raffiner ce secteur, mais une étude ciblée sur cette zone viendrait compléter la base de données d'évolution littorale historique. Il reste

également un travail colossal pour mieux définir et compléter les variables retenues pour l'indice d'évolution côtière et évaluer la sensibilité des systèmes côtiers aux facteurs environnementaux et climatiques. Finalement, ce type d'étude permet d'obtenir des informations pertinentes pour des projets de gestion intégrée des zones côtières et de définir des bases communes de travail pour mieux comprendre et approcher la complexité du milieu côtier.

## **7. RÉFÉRENCES**

- Adam, P., 1990. Saltmarsh ecology. Cambridge studies in ecology. Cambridge University Press, Cambridge, England, 461 pp.
- Adam, P., 2002. Saltmarshes in a time of change. *Environmental Conservation*, 29(1): 39-61.
- Allard, J.D., 1984. Zone exposée aux mouvements de terrain dans la région de Chutes-aux-Outardes. Ministère de l'Énergie et des Ressources, Direction générale de l'exploitation et du développement, Québec, DV-83-01, 42 pp.
- Allard, M., Michaud, Y., Ruz, M.-H. and Héquette, A., 1998. Ice foot, freeze-thaw of sediments, and platform erosion in a subarctic microtidal environment, Manitousuk Strait, northern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 35(9): 965-979.
- Amigos de Bolsa Chica, 2006. Tidal marsh. *In* Birds and Science. [www.amigosdebolsachica.org/birdsandscience.htm](http://www.amigosdebolsachica.org/birdsandscience.htm)
- Audet, G. et Gérardin, V., 2001. Proposition méthodologique pour l'établissement de la limite naturelle des hautes eaux lacustres. Contribution de la cartographie écologique no 61, [Québec] Direction du patrimoine écologique et du développement durable, Ministère de l'environnement, 17 pp.
- Barrie, J.V. and Conway, K.W., 2002. Rapid sea-level change and coastal evolution on the Pacific margin of Canada. *Sedimentary Geology*, 150(1-2): 171-183.
- Beaulieu, N. and Allard, M., 2003. The impact of climate change on an emerging coastline affected by discontinuous permafrost : Manitousuk strait, Northern Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(10): 1393-1404.
- Bernatchez, P., 1995. Classification de l'érosion des berges de la péninsule de Manicouagan. Rapport soumis à la Municipalité régionale de comté (MRC) de Manicouagan, Baie-Comeau, 44 p.
- Bernatchez, P., 1998. Le recul rapide de la frange côtière de la région de Manicouagan: problèmes de gestion et impacts environnementaux, p. 29. *In* Programme et résumés: 19<sup>e</sup> Colloque du Centre d'études nordiques (Université Laval, Québec, 11 et 12 décembre 1998).

- Bernatchez, P., 2000. Évaluation de l'évolution récente des falaises littorales à Pointe-Label: taux et mode de recul. Rapport présenté au Conseil régional de développement (CRD) de la Côte-Nord, Baie-Comeau, 14 pp.
- Bernatchez, P., 2003a. Évolution littorale holocène et actuelle des complexes deltaïques de Betsiamites et de Manicouagan-Outardes : synthèse, processus, causes et perspectives, Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, 460 pp.
- Bernatchez, P., 2003b. Les impacts de changements climatiques sur les littoraux de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. Bulletin de l'AQQUA (Association québécoise pour l'Étude du Quaternaire), 29: 8-9.
- Bernatchez, P., 2004. Impacts et causes de l'érosion côtière du Québec maritime. Résumés: 1<sup>er</sup> symposium Ouranos sur les changements climatiques (Montréal, 9 et 10 juin 2004).
- Bernatchez, P. et Baker, N., 1995. Analyse du littoral de la péninsule de Manicouagan. Rapport de baccalauréat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 122 p.
- Bernatchez, P. et Dionne, J.-C., 1999. Observations sur les processus cryogéniques dans l'érosion des falaises meubles: l'exemple de la Haute Côte-Nord, p. 29-30. *In* Programme et résumés: 20<sup>e</sup> Colloque du Centre d'études nordiques (Québec, 9 et 10 décembre 1999).
- Bernatchez, P. et Dubois, J.M.M., 2004a. Classification côtière haute résolution de la Côte-Nord du Saint-Laurent à l'aide de la vidéographie 3D géoréférencée. Congrès annuel de l'Association canadienne des géographes, Moncton, 25-29 mai 2004.
- Bernatchez, P. et Dubois, J.-M.M., 2004b. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. Géographie physique et Quaternaire, 58(1): 45-71.
- Bernatchez, P. et Dubois, J.-M.M., 2007. Seasonal Quantification of Coastal Processes and Cliff Erosion on Fine Sediment Shorelines in a Cold Temperate Climate, North Shore of the St. Lawrence Maritime Estuary, Québec. *Journal of Coastal Research*.
- Bernatchez, P. et Leblanc, R., 2000. Impacts morphosédimentologiques et écologiques du pied de glace sur un littoral sableux: exemple du delta de Manic-Outardes, estuaire maritime du Saint-Laurent, p. 53. *In* Programme, résumés-abstracts:

**Congrès de l'Association québécoise pour l'Étude du Quaternaire (AQQUA) (Montréal, 22 au 27 août 2000).**

- Bernatchez, P. et Quintin, C., 2005. Portrait préliminaire de la diversité des côtes du Québec maritime. Rapport de recherche no. UQARGEORR-15, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 34 pp.**
- Bérubé, R., 1983. Projet de suréquipement des centrales des complexes Manicouagan et Outardes. Description du milieu naturel et identification sommaire des impacts. Hydro-Québec, Vice-présidence Environnement, Montréal, 86 pp.**
- Bird, E.C.F., 1985. Coastline changes : A global review. A Wiley-Interscience publication. John Wiley, Chichester, England, 219 pp.**
- Briard, M., 1980. L'évolution actuelle du littoral de la moyenne Côte-Nord de 1948-1976, Rapport de baccalauréat en géographie, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 36 pp.**
- Bruun, P., 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. Journal of the Waterways and Harbors Division, 88: 117-130.**
- Catto, N., MacQuarrie, K. and Hermann, M., 2002. Geomorphic response to Late Holocene climate variation and anthropogenic pressure, northeastern Prince Edward Island, Canada. Quaternary International, 87(1): 101-117.**
- Catuneanu, O., 2002. Sequence stratigraphy of clastic systems: concepts, merits, and pitfalls. Journal of African Earth Sciences, 35(1): 1-43.**
- CIESIN, Center for International Earth Science Information Network, 2000. Gridded Population of the World, Version 2. Columbia University, International Food Policy and Research Institute and World Resources Institute, Palisades, New York. <http://sedac.ciesin.org/plue/gpw>**
- Centre Saint-Laurent et Université Laval, 1990. Atlas environnemental du Saint-Laurent-Les milieux humides : des habitats au contact de la terre et de l'eau. Environnement Canada, Région du Québec, Conservation et Protection, Montréal. Collection «BILAN Saint-Laurent».**
- Chagnon, J.Y., Laroche, F. et Lefebvre, G., 1979. Comportement des berges de l'estuaire de la Rivière aux Outardes. Rapport final. Comité consultatif d'Hydro-Québec, Québec, 49 pp.**

- CEQ, Council on Environmental Quality, 1997. *Environmental Quality : the 25th Anniversary Report of the Council on Environmental Quality*. Council on Environmental Quality, Washington, 547 pp.
- Cohen, J.E., Small, C., Mellinger, A., Gallup, J. and Sachs, J., 1997. Estimates of coastal populations. *Science*, 278(5341): 1211-1212.
- Crowell, M., Leatherman, S.P. and Buckley, M.K., 1993. Shoreline change rate analysis : Long term versus short term data. *Shore & Beach*, 61(2): 13-20.
- Dagneau, B., Dionne, J.-C. et Dubois, J.-M.M., 2004. Évolution holocène récente et dynamique actuelle des systèmes de barrières sableuses dunifiées de Parcs nationaux canadiens des Maritimes. *Bulletin de recherche no 173-175*, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 184 pp.
- Deschênes, Tremblay et Associés, 1988. *Municipalité régionale de comté (MRC) de Manicouagan: protection des berges. Rapport d'avant-projet 88-1750*, Baie-Comeau, 40 pp.
- Désilets, N., 2004. Le relevé CYCLOP-3D : un outil incomparable pour l'étude géomorphologique pour la création d'un SIG. *Bulletin d'information électronique de GÉO-3D, Le point G-3D*, [http://www.geo-3d.com/downloads/pointg3d\\_6/index.html](http://www.geo-3d.com/downloads/pointg3d_6/index.html).
- Dionne, J.-C., 1985. Tidal marsh erosion by geese, St. Lawrence estuary, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 39: 99-105.
- Dionne, J.-C., 1986. Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 40(3): 307-323.
- Dionne, J.-C., 1999. L'érosion des rives du Saint-Laurent : vue d'ensemble et état de la question, p. 2-19. *In Actes : Colloque régional sur l'érosion des berges : vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin (Baie-Comeau, 19 au 21 février 1999)*. Municipalité régionale de comté (MRC) de Manicouagan et Comité de la Zone d'intervention prioritaire (ZIP) de la rive nord de l'estuaire, Baie-Comeau, 207 pp.
- Dionne, J.-C., 2000. Érosion récente du shore supérieur à Saint-Anne-de-Baupré, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 54(1): 69-89.
- Dionne, J.-C., 2004. Âge et taux moyen d'accrétion verticale des schorres du Saint-Laurent estuarien, en particulier ceux de Montmagny et de Sainte-Anne-de-Baupré, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 58(1): 73-108.



- Dionne, J.-C. et Bouchard, M.-C., 2000. Nouvelles données sur l'érosion du schorre supérieur à Montmagny, moyen estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 54(2): 219-230.
- Dionne, J.-C., Dubois, J.-M.M. et Bernatchez, P., 2004. La terrasse Mitis à la pointe de Mille-Vaches (péninsule de Portneuf), rive nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent : nature des dépôts et évolution du niveau marin relatif à l'Holocène. *Géographie physique et Quaternaire*, 58(2-3): 281-295.
- Dubois, J.-M.M., 1973. Essai de classification géomorphologique d'une côte en vue d'une utilisation en génie côtier. *Bulletin de recherche no. 10*, Université de Sherbrooke, Département de géographie, Sherbrooke, 140 pp.
- Dubois, J.-M.M., 1979. Environnements quaternaires et évolution postglaciaire d'une zone côtière en émergence en bordure sud du Bouclier canadien : la moyenne côte du Saint-Laurent, Québec, Thèse de doctorat, Université d'Ottawa, Ottawa, 754 pp.
- Dubois, J.-M.M., 1993. The Saint Lawrence River System, Atlantic Coast of Quebec. *Symposium on Coastal and Ocean Management*, New Orleans, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 159-169.
- Dubois, J.-M.M., 1999. Dynamique de l'érosion littorale sur la Côte-Nord du Saint-Laurent, p. 20-52 *In Actes: Colloque régional sur l'érosion des berges: vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin (Baie-Comeau, 19 au 21 février 1999)*. Municipalité régionale de comté (MRC) de Manicouagan et Comité de la Zone d'intervention prioritaire (ZIP) de la rive nord de l'estuaire, Baie-Comeau, 207 pp.
- Dubois, J.-M.M. et Briard, M., 1979. Photographie aérienne panchromatique et dynamique littorale. *Comptes rendus de l'Atelier sur les appareils de mesure des courants et sédiments de la zone littorale*, Conseil National de Recherches du Canada, Ottawa, 24-25 octobre 1979, pp. 121-140.
- Dubois, J.-M.M. et Briard, M., 1980. Évolution historique du littoral de la Côte Nord du Saint-Laurent, Québec, Canada. 24<sup>e</sup> congrès international de géographie, Commission de l'environnement côtier. Shimoda marine Research Center, Tsukuba University, Japon, 24 au 29 août 1980, 24 pp.
- Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S., 2005. Évaluation du risque d'érosion littorale sur la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003, *Conférence régionale des élus de la Côte-Nord*, 359 pp.

- Duchesne, M.J., Long, B.F., Urgeles, R. and Locat, J., 2003. New evidence of slope instability in the Outardes Bay delta area, Quebec, Canada. *Geo-Marine Letter*, 22: 233-242.
- Environnement Canada, 1999. *Canada's Oceans : Experience and Practice. Canadian Contribution to the Oceans and Seas Dialogue, Monographie no. 7, Septième séance de la Commission des Nations Unies sur le développement durable (CDD), New York , 20 pp.*
- ESRI, 2000. *Utilisation d'ArcMap. Environmental Systems Research Institute, Redlands, 534 pp.*
- Evans, D.J.A., 1994. *Cold climate landforms. J. Wiley, Chichester, England, 526 pp.*
- Fairbridge, R.W., 2004. Classification of Coasts. *Journal of Coastal Research*, 20(1): 155-165.
- Finkl, C.W., 2004. Coastal Classification: Systematic Approaches to Consider in the Development of a Comprehensive Scheme. *Journal of Coastal Research*, 20(1): 166-213.
- Fletcher, C.H., Knebel, H.J. and Kraft, J.C., 1990. Holocene evolution of an estuarine coast and tidal wetlands. *Geological Society of America bulletin*, 102: 283-297.
- Forbes, D.L., Parkes, G.S., Manson, G.K. and Ketch, L.A., 2004. Storms and shoreline retreat in southern Gulf of St. Lawrence. *Marine Geology*, 210: 169-204.
- Gornitz, V., 1995. Sea-Level Rise: A Review of Recent Past and Near-Future Trends. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20: 7-20.
- Grenier, A., 1993. *Évolution littorale récente et impact des structures artificielles aux Îles-de-la-Madeleine, golfe du Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Département de géographie et télédétection, Sherbrooke, Québec, 275 pp.*
- Grenier, A. et Dubois, J.-M.M., 1990. Évolution littorale récente par télédétection : Synthèse méthodologique. *Photo-interprétation* 90(6): 3-16.
- Grondin, G., D'Astous, J., Demers, D. et Dorval, P., 1990. L'érosion des berges de la péninsule Manicouagan et de la région de Ragueneau, Québec, p. 503-520. *In Comptes-rendus: Conférence canadienne sur le littoral 1990 (Kingston, 8 au 11 mai 1990), Conseil national de recherches du Canada, Publication NRC 31460, Ottawa, 547 pp.*

- Hardy, L., Savard, J.-P. et Lalumière, R., 1998. Mesures de protection des berges en milieux estuarien et marin. Rapport présenté à la Direction Expertise et Support technique de Production d'Hydro-Québec, Poly-Géo Longueuil inc., Longueuil, 104 pp.
- Hart, B.S., 1987. The evolution of the Outardes estuary. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 197 pp.
- Hill, H.W., Kelley, J.T., Belknap, D.F. and Dickson, S.M., 2004. The effects of storms and storm-generated currents on sand beaches in Southern Maine, USA. *Marine Geology*, 210: 149-168.
- Hughes, R.G., 1999. Saltmarsh erosion and management of saltmarsh restoration; the effects of infaunal invertebrates. *Aquatic conservation : Marine and Freshwater Ecosystems*, 9(1): 83-95.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001. *Climate Change 2001 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, 1032 pp.
- Keddy, P.A., 2000. *Wetland ecology : principles and conservation*. Cambridge studies in ecology. Cambridge University Press, Cambridge, England, 614 pp.
- Komar, P.D., 1998. *Beach processes and sedimentation*. Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J., 544 pp.
- Lamontagne, Y., 1996. Étude de l'évolution littorale de l'estuaire maritime du Saint-Laurent : application à la gestion des bancs coquilliers : exemple de la Côte Nord. Mémoire de maîtrise, Département des Sciences de l'environnement, Université du Québec à Montréal, Montréal, 106 pp.
- Lavallée, J.G., 1993. Suréquipement des centrales de la rivière aux Outardes. Rapport final sur le comportement des berges de l'estuaire de la rivière aux Outardes. Hydro-Québec, Direction Aménagements de centrales, Service Géologie et structures, Montréal, 35 pp.
- Lessard, G.L. et Dubois, J.-M.M., 1984. Évolution littorale multitemporelle d'une côte récemment déglacée du nord du golfe du Saint-Laurent. *Revue de géomorphologie dynamique*, 33(3): 81-96.
- Long, B.F., 1982. L'estuaire aux Outardes: sédimentologie et hydrodynamisme. INRS-Océanologie, Rimouski, Rapport présenté à Hydro-Québec, 80 pp.

- Long, B.F., 1983. Evolution of the Outardes estuary after the hydraulic power regulation, p. 327-328 *In* B.J. Holden. édit., *Comptes rendus: Conférence canadienne sur le littoral 1983* (Vancouver, 11 au 14 mai 1983). Conseil national de recherches du Canada, Sous-comité associé de recherche sur l'érosion et la sédimentation, Ottawa, 330 pp.
- Masselink, G. and Hughes, M.G., 2003. *Introduction to coastal processes and geomorphology*, Arnold, London, 354 pp.
- Miall, A.D., 1997. *The geology of stratigraphic sequences*. Springer-Verlag, Berlin, 433 pp.
- Moign, Y., 1972. *Étude dynamique d'une plage subarctique : Sept-Îles*. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 303 pp.
- Moore, L.J., 2000. Shoreline Mapping Techniques. *Journal of Coastal Research*, 16(1): 111-124.
- Morneau, F., 1999. Programme de protection des berges de la péninsule de Manicouagan (1989-1996), p. 65-72. *In* Actes: Colloque régional sur l'érosion des berges: vers une gestion intégrée des interventions en milieu marin (Baie-Comeau, 19 au 21 février 1999). Municipalité régionale de comté (MRC) de Manicouagan et Comité de la Zone d'intervention prioritaire (ZIP) de la rive nord de l'estuaire, Baie-Comeau, 207 pp.
- Morton, R.A. et Sallenger, A.H.J., 2003. Morphological Impacts of Extreme Storms on Sandy Beaches and Barriers. *Journal of Coastal Research*, 19(3): 560-573.
- Naturam Environnement, 1997. *Restauration des berges du parc régional de Pointeaux-Outardes: élaboration d'un projet expérimental*. Rapport présenté au ministère des Pêches et des Océans du Canada, Baie-Comeau, 137 pp.
- Ouellet, Y. et Baird, W., 1978. L'érosion des rives du Saint-Laurent. *Canadian Journal of Civil Engineers*, 5 : 311-323.
- Paskoff, R., 1994. *Les littoraux : impact des aménagements sur leur évolution*. Géographie. Masson, Paris, 256 pp.
- Paskoff, R., 2001. Le changement climatique et les espaces côtiers, L'élévation du niveau de la mer, risques et réponses. Actes du colloque d'Arles. La Documentation française, Paris, 97 pp.
- PNUE, Programme des Nations Unies pour l'Environnement, 2002. *L'avenir de l'environnement mondial 3 : Le passé, le présent et les perspectives d'avenir*.

- L'avenir de l'environnement mondial. Earthscan Publications Ltd., Royaume-Uni, 446 pp.
- Posamentier, H.W. et Allen, G.P., 1993. Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors. *Sedimentary Geology*, 86(1-2): 91-109.
- Québec, 1994. Géologie du Québec. Ministère des ressources naturelles, Québec, 154 pp.
- Raynald, M., 1977. Étude géologique et géotechnique des rives de l'estuaire la rivière aux Outardes (Comté de Saguenay). Rapport présenté à Hydro-Québec, Direction Projets de centrales, Service Géologie et géotechnique, Montréal, 25 pp.
- RNC, Ressources naturelles Canada, 2004. L'atlas du Canada. <http://atlas.gc.ca/site/francais/learningresources/facts/tides.html>
- Roche Ltée, 1997. Baie Saint-Ludger: Protection du littoral. Faisabilité technique et environnementale de la mise en place d'épis. Étude de faisabilité. Rapport final. Rapport présenté au ministère des Transports du Québec, Québec, 106 p.
- Rondot, J., 1986. Géologie de la région de Forestville-Les Escoumins. Ministère de l'énergie et des ressources Direction générale de l'exploration géologique et minérale, Québec, ET 85-05, 46 pp.
- Roy, A. et Desmeules, G., 1982. Évolution géographique de la pointe aux Outardes. Rapport de baccalauréat, module de géographie, Université du Québec à Rimouski, 64 pp.
- Savard, J.P., 1998. Avis scientifique sur la dynamique sédimentaire dans l'estuaire de la rivière Portneuf. Rapport d'étude préliminaire présenté à Hydro-Québec, InterRives, Baie-Comeau, 50 pp.
- Service canadien de la Faune, 2005. La grande oie des neiges. *In* Fiche d'information sur les oiseaux. [http://www.hww.ca/hww2\\_f.asp?id=44](http://www.hww.ca/hww2_f.asp?id=44)
- Shaw, J., Taylor, R.B., Forbes, D.L., Ruz, M.-H. and Solomon, S., 1998a. Sensitivity of the coasts of Canada to sea-level rise. Rapport no. 0-660-17569-X, Geological Survey of Canada, Ottawa, 79 pp.
- Shaw, J., Taylor, R.B., Solomon, S., Christian, H.A. and Forbes, D.L., 1998b. Potential impacts of global sea-level rise on Canadian coasts. *The Canadian Geographer*, 42(4): 365.

- Soucy, B., 1988. Taux et mode de régression de la falaise de Forestville entre la rivière Portneuf et Sault-aux-Cochons, Comté de Saguenay. Rapport de fin d'étude, Ministère des Transports et Département de géologie, Université Laval, Québec, 18 pp.**
- Wilcock, P.R., Miller, D.S., Shea, R.H. and Kerkin, R.T., 1998. Frequency of Effective Wave Activity and the Recession of Coastal Bluffs: Calvert Cliffs, Maryland. Journal of Coastal Research, 14(1): 256–268.**
- WRI, World Resources Institute, 2005. The Wealth of the Poor: Managing ecosystems to fight poverty. World Resources Institute in collaboration with United Nations Development Programme, United Nations Environment Programme, and World Bank, Washington, DC, 264 pp.**

**ANNEXE 1- CARTE GÉOLOGIQUE DU SECTEUR À L'ÉTUDE**