

DROLET MARIE-CLAUDE

Évolution récente du marais intertidal de l'Île-aux-Coudres, Moyen estuaire du Saint-Laurent, Québec

Essai présenté
à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique de l'Université Laval
dans le cadre du programme de baccalauréat en géographie
pour l'obtention du grade de bachelier ès sciences (B.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE
FACULTÉ DE FORESTERIE, DE GÉOGRAPHIE ET DE GÉOMATIQUE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

Juin 2013

RÉSUMÉ

Le discours actuel des changements climatiques nous sensibilise face à la hausse du niveau marin à l'échelle mondiale et face au risque d'érosion des marais de l'estuaire du Saint-Laurent. Situé sur la rive Nord du moyen estuaire, le marais de l'Île-aux-Coudres a servi de site d'étude afin d'explorer l'évolution récente des marais intertidaux en zone tempérée nordique. La méthodologie a privilégié l'utilisation des transects biophysiques et la réalisation d'une analyse spatio-temporelle à l'aide de photographies aériennes. Ces données ont été synthétisées sous forme cartographique à partir de laquelle il a été possible de quantifier l'évolution du marais depuis 1964 jusqu'à nos jours. Il apparaît que le schorre du marais a progressé de manière importante dans les dernières cinquante années. Afin de savoir si cette dynamique est propre au marais de l'Île-aux-Coudres, nous l'avons comparé au marais de la baie de Kamouraska, situé sur la rive Sud du moyen estuaire. Bien qu'ayant des dynamiques naturelles différentes de sédimentation, les deux marais ont un bilan sédimentaire semblable. Ces résultats nous suggèrent que malgré l'annonce d'une érosion généralisée pour les marais de l'estuaire, il apparaît que certains secteurs démontrent au contraire une accrétion sédimentaire.

Mots-clés : Accrétion, érosion, géomorphologie littorale, Île-aux-Coudres, Kamouraska, marais salé, sédimentation.

AVANT-PROPOS

Je tiens à présenter mes plus sincères remerciements à Matthew G. Hatvany, mon directeur de recherche et professeur au Département de géographie à l'Université Laval, pour m'avoir proposé un sujet aussi passionnant. Ses conseils et ses encouragements me furent précieux tout au long de la réalisation de cette recherche. Merci de m'avoir donné un tel défi et de m'avoir fait confiance. Merci notamment à Donald Cayer, chargé de cours et responsable de travaux pratiques et de recherche au Département de géographie à l'Université Laval, d'avoir pris le temps pour approfondir mes connaissances d'ArcGIS. À tous deux j'adresse ma reconnaissance pour leur disponibilité, leur passion géographique et leur enthousiasme à bien vouloir partager leurs multiples connaissances.

Les sorties sur le terrain furent enrichissantes et une expérience inoubliable. Merci à tous ceux qui furent présents tant pour le marais de Kamouraska que pour celui de l'Île-aux-Coudres.

Également, mes remerciements vont à Rémi Larochelle, technicien en documentation au Centre GéoStat à la bibliothèque générale de l'Université Laval, pour sa précieuse aide à la recherche lors de l'inventaire des photographies aériennes existantes sur l'Île-aux-Coudres.

Je suis aussi reconnaissante envers mon ami, Jean-François Albert, pour le hasard qui m'a mené à entreprendre l'étude des marais salés. Merci en outre à mon cousin et ami, Maxim Gauvin, pour son hospitalité lors de mes passages à Québec qui m'ont permis de mener à bien ce mémoire.

Finalement, je remercie ma famille et belle-famille, ainsi que mes amis pour leur soutien et leur intérêt envers ma recherche. Dernièrement, une mention spéciale à mon amoureux, Olivier Goupil, toute ma gratitude pour sa patience, pour sa compréhension et toute sa confiance en moi durant la réalisation de cette recherche et au quotidien.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	III
AVANT-PROPOS	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
INTRODUCTION	1
LOCALISATION DU SITE D'ÉTUDE.....	3
<i>Sédimentation estuarienne</i>	10
CONTEXTE HUMAIN DU SITE DE L'ÉTUDE.....	12
PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	16
MÉTHODOLOGIE	18
<i>Revue de la littérature</i>	18
<i>Cueillette et traitement des données</i>	18
CHAPITRE PREMIER	22
1. CARACTÉRISTIQUES DES MARAIS INTERTIDIAUX EN ZONE TEMPÉRÉE NORDIQUE	22
<i>Exploitation des marais par l'Homme</i>	22
1.1. PHYSIOGRAPHIE.....	24
1.2. SLIKKE (TIDAL FLAT).....	26
1.3. SCHORRE (SALT MARSH).....	28
1.3.1. <i>Schorre inférieur et dominance de <i>Spartina alterniflora</i></i>	29
1.3.2. <i>Schorre supérieur</i>	31
1.4. CARACTÉRISTIQUES DE LA VÉGÉTATION.....	32
1.4.1. <i>Mécanismes d'adaptation</i>	32
1.4.2. <i>Les stress physiques</i>	33
1.4.3. <i>Les stress biologiques</i>	33
1.5. TRANSFERT D'ÉNERGIE.....	36
1.6. PERTURBATIONS ENVIRONNEMENTALES	38
1.7. ÉTAPES DE FORMATION D'UN MARAIS.....	39
CHAPITRE DEUXIÈME	41
2.1. TRANSECTS BIOPHYSIQUES	41
2.2. ANALYSE SPATIO-TEMPORELLE DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES	42
CHAPITRE TROISIÈME	45
3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	45
3.1. PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES	46
3.1.1. <i>Photographie aérienne de 1964</i>	46
3.1.2. <i>Photographie aérienne de 1980</i>	46
3.1.3. <i>Orthophotographie de 2001</i>	47
3.1.4. <i>Photographie aérienne de 2011</i>	48

3.2. CARTOGRAPHIE DE LA LIMITE INFÉRIEURE DU SCHORRE À PARTIR DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES DE 1964 À 1980	48
3.3. OBSERVATIONS CONSIGNÉES LORS DES SORTIES DE TERRAIN ET CARTOGRAPHIE	57
3.3.1. <i>Observations consignées lors des sorties de terrain</i>	57
3.3.2. <i>Transect 1</i>	59
3.3.3. <i>Transect 2</i>	63
3.3.4. <i>Transect 3</i>	64
3.3.5. <i>Transect 4</i>	66
3.3.6. <i>Transect 5</i>	68
3.3.7. <i>Observations générales</i>	68
3.4. CARTOGRAPHIE DES TRANSECTS BIOPHYSIQUES	69
CHAPITRE QUATRIÈME	71
4. DISCUSSION	71
4.1. <i>Dynamique du marais de l'Île-aux-Coudres</i>	71
4.2. <i>Localisation du marais de la baie de Kamouraska</i>	74
4.3. <i>Comparaison du marais de l'Île-aux-Coudres avec le marais de Kamouraska</i>	76
4.4. <i>Examen des discours scientifiques actuels et influence des changements climatiques</i>	78
CONCLUSION	83
BIBLIOGRAPHIE	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des photographies aériennes employées	21
Tableau 2. Longueur des cinq transects effectués sur le marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	24
Tableau 3. Superficie du schorre de l'IAC de 1964 à 2011	49
Tableau 4. Répartition des différents végétaux sur le transect 1, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	60
Tableau 5. Répartition des différents végétaux sur le transect 2, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	63
Tableau 6. Répartition des différents végétaux sur le transect 3, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	65
Tableau 7. Répartition des différents végétaux sur le transect 4, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	67
Tableau 8. Répartition des différents végétaux sur le transect 5, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	68
Tableau 9. Correspondance entre l'accrétion et la régression observées sur les marais de l'Île-aux-Coudres et de Kamouraska et le cycle du Saros	82

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Localisation de l'Île-aux-Coudres, moyen estuaire du fleuve Saint-Laurent, Québec	4
Figure 2. Caractéristiques de l'eau du fleuve Saint-Laurent, Québec	4
Figure 3. Île-aux-Coudres, Québec	6
Figure 4. Carte topographique du marais de l'Île-aux-Coudres	7
Figure 5. Carte bathymétrique du moyen estuaire du Saint-Laurent	8
Figure 6. Faille de chevauchement de l'Île-aux-Coudres	9
Figure 7. Relief de l'Île-aux-Coudres	9
Figure 8. Écoulement résiduel en surface, moyen estuaire du Saint-Laurent	11
Figure 9. Point nodal (<i>null point</i>) dans un estuaire à coin salé	12
Figure 10. Différenciation des masses d'eau du moyen estuaire du Saint-Laurent	13
Figure 11. Photographie thermique du moyen estuaire du Saint-Laurent	14
Figure 12. Stations de transects effectués sur le marais de l'Île-aux-Coudres, juin 2012	20
Figure 13. Marais de l'Île-aux-Coudres	25
Figure 14. Courbe de Hjulström	26
Figure 15. Profil type d'un marais intertidal salé	27
Figure 16. Cordons glaciels de basse mer, marais de l'Île-aux-Coudres	28
Figure 17. <i>Spartina alterniflora</i> et <i>Spartina patens</i> , marais de Kamouraska	29
Figure 18. Coupe transversale d'un aéréenchyme	30
Figure 19. Gradients de stress physique et biologique sur un marais intertidal	34
Figure 20. Marais de l'Île-aux-Coudres, 1964	50
Figure 21. Marais de l'Île-aux-Coudres, 1980	50
Figure 22. Marais de l'Île-aux-Coudres, 2001	51
Figure 23. Marais de l'Île-aux-Coudres, 2011	51
Figure 24. Limite du schorre inférieur en 1964, marais de l'Île-aux-Coudres	52
Figure 25. Limite du schorre inférieur en 1980, marais de l'Île-aux-Coudres	53
Figure 26. Limite du schorre inférieur en 2001, marais de l'Île-aux-Coudres	54
Figure 27. Limite du schorre inférieur en 2011, marais de l'Île-aux-Coudres	55
Figure 28. Évolution des différentes limites du schorre inférieur du marais de l'Île-aux-Coudres, 1964-2011	56
Figure 29. Secteurs qui ont servi aux agrandissements sur la carte de l'évolution spatio-temporelle de l'Île-aux-Coudres, 1964-2011	57

Figure 30. Agrandissement du secteur Ouest	58
Figure 31. Agrandissement du secteur Est	58
Figure 32. Agrandissement du secteur central	59
Figure 33. Blocs glaciels enterrés par les sédiments, marais de l'Île-aux-Coudres	60
Figure 34. Banc de sable dénudé entre les transects 1 et 2, marais de l'Île-aux-Coudres	62
Figure 35. Réseau de drainage affleurant la surface du marais de l'Île-aux-Coudres entre les transects 1 et 2	62
Figure 36. Micro-falaise à la limite supérieure du schorre à extension par vagues rétrogressives, colonisation et progression à la limite inférieure du schorre sur le transect 2, marais de l'Île-aux-Coudres	64
Figure 37. Zone perturbée colonisée par <i>Salicornia europaea</i> sur le transect 3 et zone de sédimentation entre les transects 3 et 4, marais de l'Île-aux-Coudres	65
Figure 38. Micro-falaise à l'extrémité du schorre inférieur suivie d'une zone dénudée sur le transect 3, marais de l'Île-aux-Coudres	66
Figure 39. Pente conforme du schorre inférieur sur le transect 4, marais de l'Île-aux-Coudres	67
Figure 40. Répartition des zones de <i>Spartina alterniflora</i> et de <i>Spartina patens</i> sur le marais de l'Île-aux-Coudres, 2012	70
Figure 41. Localisation du marais de la baie de Kamouraska, moyen estuaire du Saint-Laurent	75
Figure 42. Débris marins contraints par un aboiteau, marais de la baie de Kamouraska	77
Figure 43. Portrait du territoire de l'Isle-aux-Coudres dans le cadre de la gestion intégrée des îles habitées du Saint-Laurent	79

Introduction

Le bassin du Saint-Laurent est l'un des plus grands systèmes hydrographiques de la planète, il s'étend approximativement sur un million de km² et draine 25 % du volume mondial en eau douce. Le rôle écologique offert par les milieux humides, qu'il s'agisse de marais, de marécage, de tourbière ou de prairie humide, est nécessaire au bon fonctionnement du bassin versant du fleuve et de sa périphérie, la santé de la population humaine et de la faune en dépend. Une importance qui est d'ailleurs bien souvent sous-estimée puisqu'une réputation négative à leur endroit a longtemps persisté depuis l'industrialisation, particulièrement en ce qui concerne les marais, l'Homme percevait ces milieux comme improductifs et sources de divers maux. C'est d'ailleurs l'habitat le plus menacé à l'époque actuelle à l'échelle mondiale (Hatvany, 2009 : 17, 161; Environnement Canada, 2012).

Au Québec, les milieux humides occupent 10 % du territoire avec environ 17 millions d'hectares (Queste, 2011 : 1). Les rivages du fleuve Saint-Laurent font face à de fortes pressions anthropiques, la population québécoise se concentre en effet dans le Sud du territoire provincial autour de l'axe du Saint-Laurent, ce qui a des conséquences néfastes sur ces habitats. On estime que 80 % de ces milieux humides ont été détruits depuis la colonisation, dont 65 % des marais salés à des fins domiciliaires, agricoles ou pour la construction d'axes de communication. Malgré ce constat, au niveau du moyen estuaire du Saint-Laurent, les milieux humides ont gagné du terrain depuis 2000-2002, passant de 3 123 ha en 1990-1991 à 3 279 ha en 2000-2002. Ces gains seraient attribués au changement de perception vis-à-vis des milieux humides et à la mise en place de lois visant leur protection. En effet, depuis une quarantaine d'années bon nombre de lois y ont limité les activités anthropiques et des déductions fiscales ont été offertes en contrepartie de dons écologiques (Hatvany, 2009 : 160-161).

Fonctions naturelles des milieux humides

- Offrent un habitat essentiel à 600 espèces au Canada, ils contribuent à maintenir la diversité génétique des écosystèmes;
- Milieux très productifs en matière organique (plantes, bois, eau douce, lieux d'alimentation, lieux de reproduction, lieux de nidification, etc.);
- Filtration naturelle de l'eau : ils fournissent des sources d'eau potable, protègent et améliorent la qualité des eaux (en traversant un milieu humide, l'eau se débarrasse de jusqu'à 90 % de ses bactéries, c'est pourquoi ils sont considérés comme les reins de la planète);
- Régularisation des ressources en eau : les milieux humides emmagasinent des volumes d'eau considérables et les restituent de manière progressive (recharge de la nappe phréatique). Ainsi, ils atténuent les effets des sécheresses, des inondations et des changements climatiques;
- Absorption et emmagasinage des gaz à effet de serre de l'atmosphère terrestre (puits de carbone);
- Stabilisation et protection des sols : les milieux humides possèdent une végétation qui aide à la fixation des sols et qui protège les terres contre l'érosion causée par les vents et par les eaux;
- Support d'activités économiques : les richesses paysagères, floristiques, faunistiques et culturelles des milieux humides constituent la base d'activités récréatives et touristiques socialement et économiquement importantes (Larouche, 1995 : 26-27; Environnement Canada, 2011; Hatvany, 2011 : 1380; Queste, 2011 : 7; Canards Illimités Canada, 2012).

Exemples de pressions exercées sur les milieux humides du Saint-Laurent

- Navigation commerciale (qui devrait tripler au cours des 20 prochaines années) et récréative;
- Urbanisation, industrialisation, développement résidentiel, commercial et de villégiature à proximité des rives;
- Faible qualité de l'eau en provenance de certains affluents du fleuve, apport de polluants d'origine industrielle et provenant des stations d'épuration des eaux usées des villes du Québec;

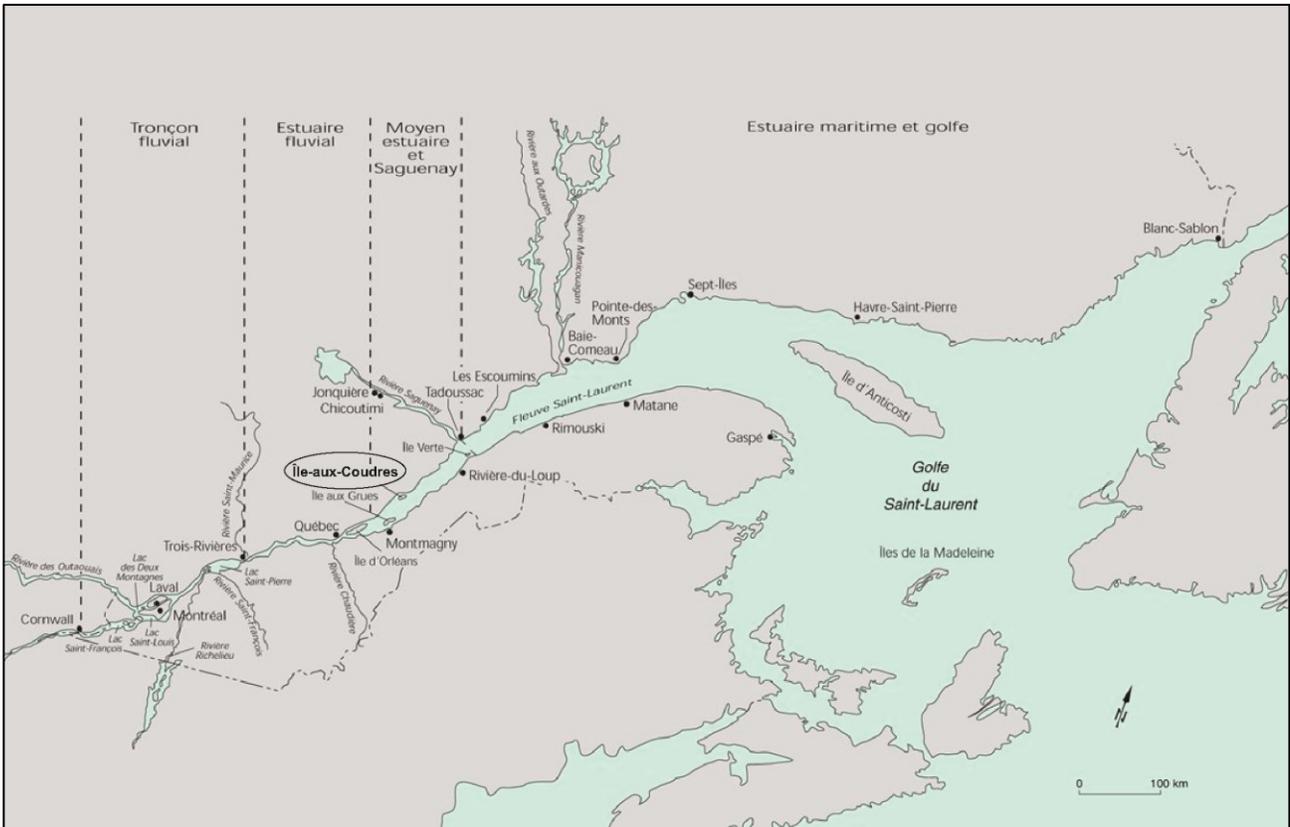
- Dragage d'entretien régulier de la voie maritime, de certains quais et marinas, et rejet des sédiments dans le milieu aquatique (sites de dépôts autorisés);
- Remblayage dans les marais et marécages intertidaux, ainsi qu'en plaine inondable et dans les terres hautes adjacentes au fleuve;
- Prolifération de certaines espèces envahissantes;
- Changements climatiques pouvant modifier les écoulements du fleuve et les niveaux d'eau, en plus de provoquer des remontées plus fréquentes d'eau salée;
- Aménagements non autorisés (Environnement Canada, 2011; Canards Illimités Canada, 2012).

Les marais salés intertidaux occupent une place importante au sein des milieux humides, le moyen estuaire du Saint-Laurent regorge, selon Hatvany (2009 : 25), de 9 575 ha de ces marais entre Québec et Gaspé. Ils se distinguent des autres milieux humides par leur concentration en sel au niveau édaphique et par leur végétation halophyte (Fleurbec, 1985 : 37).

Localisation du site d'étude

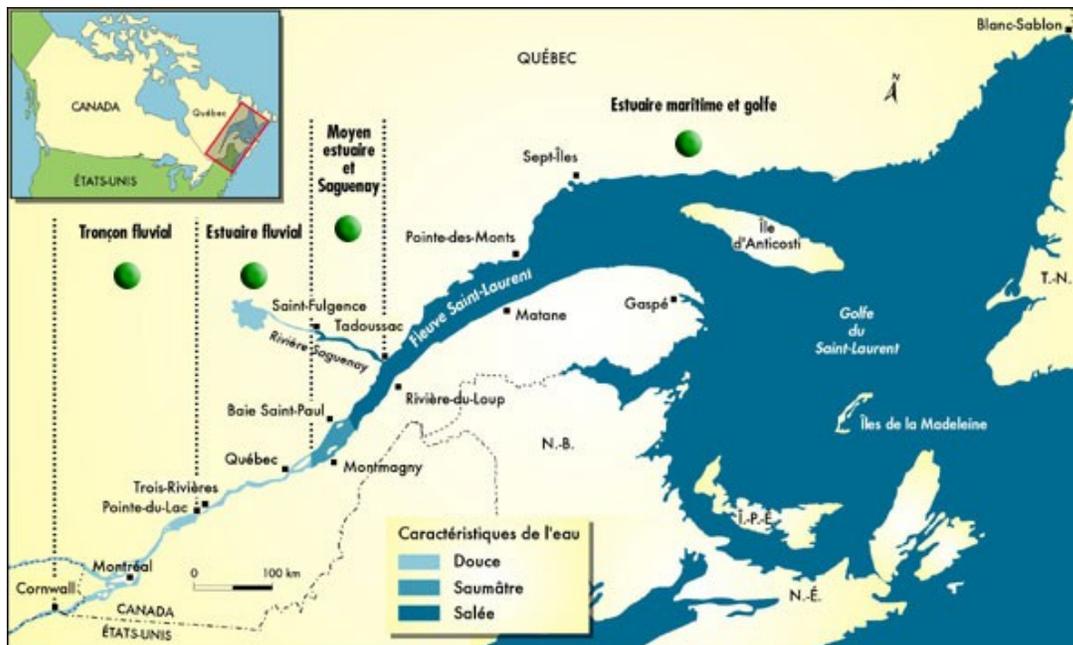
Le marais qui fait l'objet de cette étude se situe au Nord-Ouest de l'Île-aux-Coudres (IAC), au large de la région de Charlevoix à 91 km en aval de la ville de Québec (Figure 1). Ce secteur est situé dans le moyen estuaire du fleuve Saint-Laurent qui s'étend de l'île d'Orléans à l'embouchure du Saguenay sur 150 km, pour une largeur moyenne de 17 km (Environnement Canada, 2012). C'est une zone de turbidité élevée (bouchon vaseux) où la rencontre entre les eaux douces d'origine fluviale et les eaux salées en provenance de l'océan provoque leur mélange. La quantité de matière en suspension est élevée ; la sédimentation est, par conséquent, très active dans les zones abritées telles que les marais. La salinité de ce secteur du moyen estuaire du Saint-Laurent est de 13 ‰, c'est-à-dire 13 g/l. Ce sont donc des eaux saumâtres (Figure 2); à des fins de comparaison, l'eau de mer contient 35 g/l (Centre Saint-Laurent, 1996 : 7-8).

Figure 1. Localisation de l'Île-aux-Coudres, moyen estuaire du fleuve Saint-Laurent, Québec



Source : Modifiée de Centre Saint-Laurent, 1996.

Figure 2. Caractéristiques de l'eau du fleuve Saint-Laurent, Québec



Source : Tirée de Environnement Canada, 2012.

L'étranglement du corridor fluvial accentue l'effet des marées comparativement au golfe du Saint-Laurent. Autour de l'Île-aux-Coudres, les courants de marée sont semi-diurnes, il y a donc deux basses mers et deux hautes mers par jour, et macrotidales : le marnage peut ainsi atteindre jusqu'à 6,95 m, toutefois la moyenne est de 4,67 m. Les courants de marée, parallèles à la côte, ont dessiné de nombreux chenaux sur le marais de l'IAC qui permettent l'évacuation du jusant; les vagues de marées y sont puissantes; elles peuvent s'élever à une hauteur de 2 m (Brodeur et Allard, 1983 : 182).

Les vents du moyen estuaire du Saint-Laurent sont classifiés en tant que « bonnes brises » sur l'échelle de Beaufort avec une vitesse moyenne de 28,8 km/h. Les vents les plus extrêmes peuvent atteindre jusqu'à 54 km/h et équivalent à de « grands vents » (Brodeur et Allard, 1983 : 182; Gauthier et Roucheray, 2004). Dans ce secteur, les vagues suivent l'axe du Saint-Laurent, du Sud-Ouest et du Nord-Est, ces directions correspondent également aux vents dominants ainsi qu'aux plus longs fetchs. Les secteurs de l'île qui subissent les assauts des vagues les plus puissantes sont localisés au Sud-Ouest et Nord-Est (Brodeur et Allard, 1983 : 182). Le marais à l'étude est donc relativement protégé des vagues par sa situation géographique.

L'Île-aux-Coudres présente une forme oblongue, elle est orientée du Sud-Ouest au Nord-Est suivant l'axe du Saint-Laurent. Elle mesure 10,4 km par 4 km environ (Figure 3) (Brodeur et Allard, 1983 : 180). Le trait de côte du marais de l'Île-aux-Coudres a une orientation de 130°, face au Nord-Ouest, vis-à-vis de la baie Saint-Paul et de l'embouchure de la rivière du Gouffre. Le marais possède deux petits affluents en eau douce : le cours d'eau de la Cédrière au Sud-ouest et le cours d'eau Louis-Boudreault au Nord-Est (Figure 4).

Le passage entre l'IAC et le continent a une profondeur moyenne de 40 m, avec quelques fosses allant jusqu'à 60 m (Figure 5), les sédiments du fond sont grossiers, ce qui est signe de forts courants de marée. À cette profondeur, les vagues n'ont plus d'influence érosive sur le fond marin (Brodeur et Allard, 1985 : 185). La Ligne de Logan suit linéairement ce passage – cette faille sépare la province géologique Basses-Terres du Saint-Laurent de celle des Hautes-Terres des Appalaches (Béland et Bergeron, 1959 : 133; Perron et Gauthier, 2000 : 34).

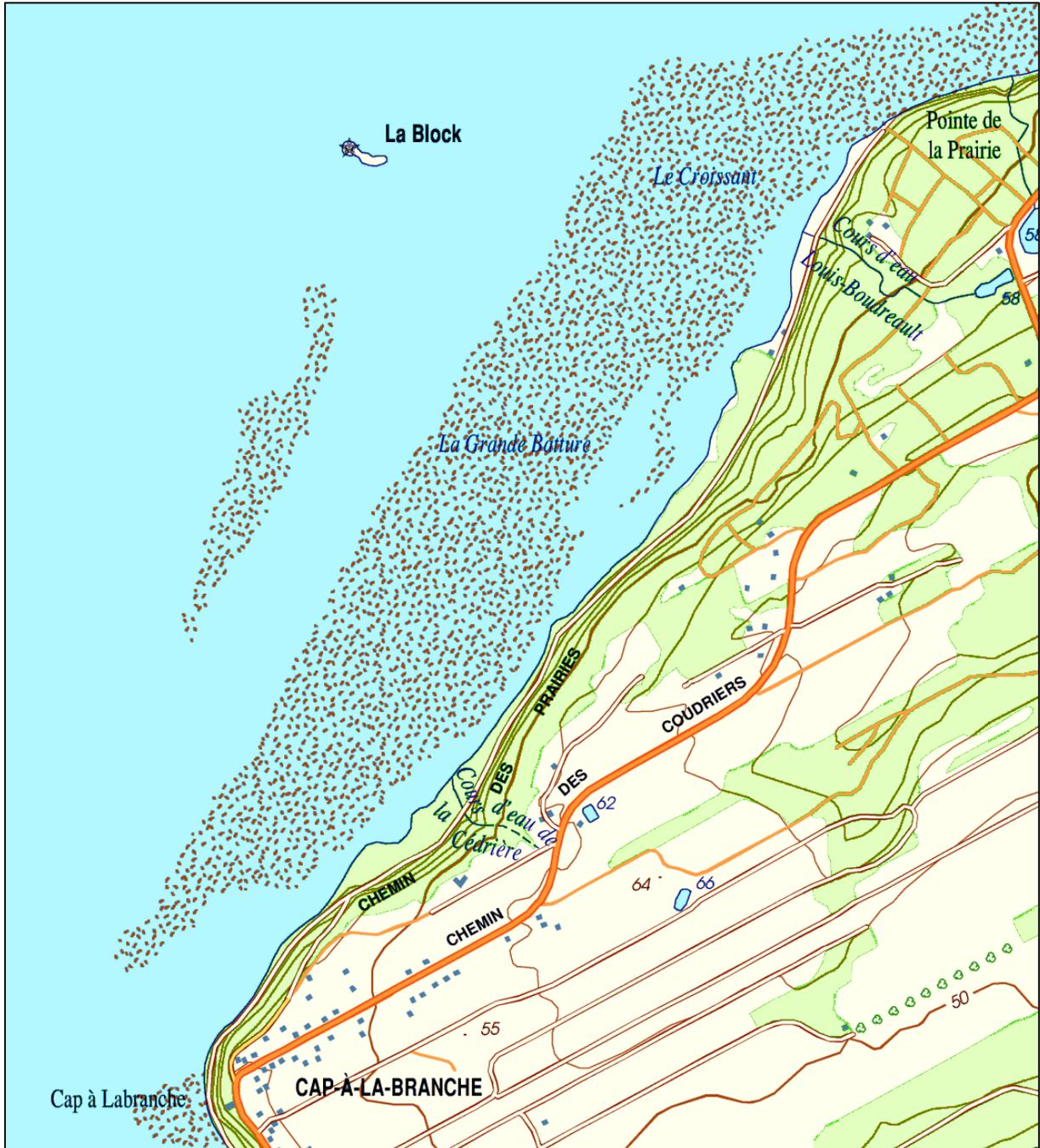
Figure 3. Île-aux-Coudres, Québec



Source : Modifiée de Google Earth, 2011.

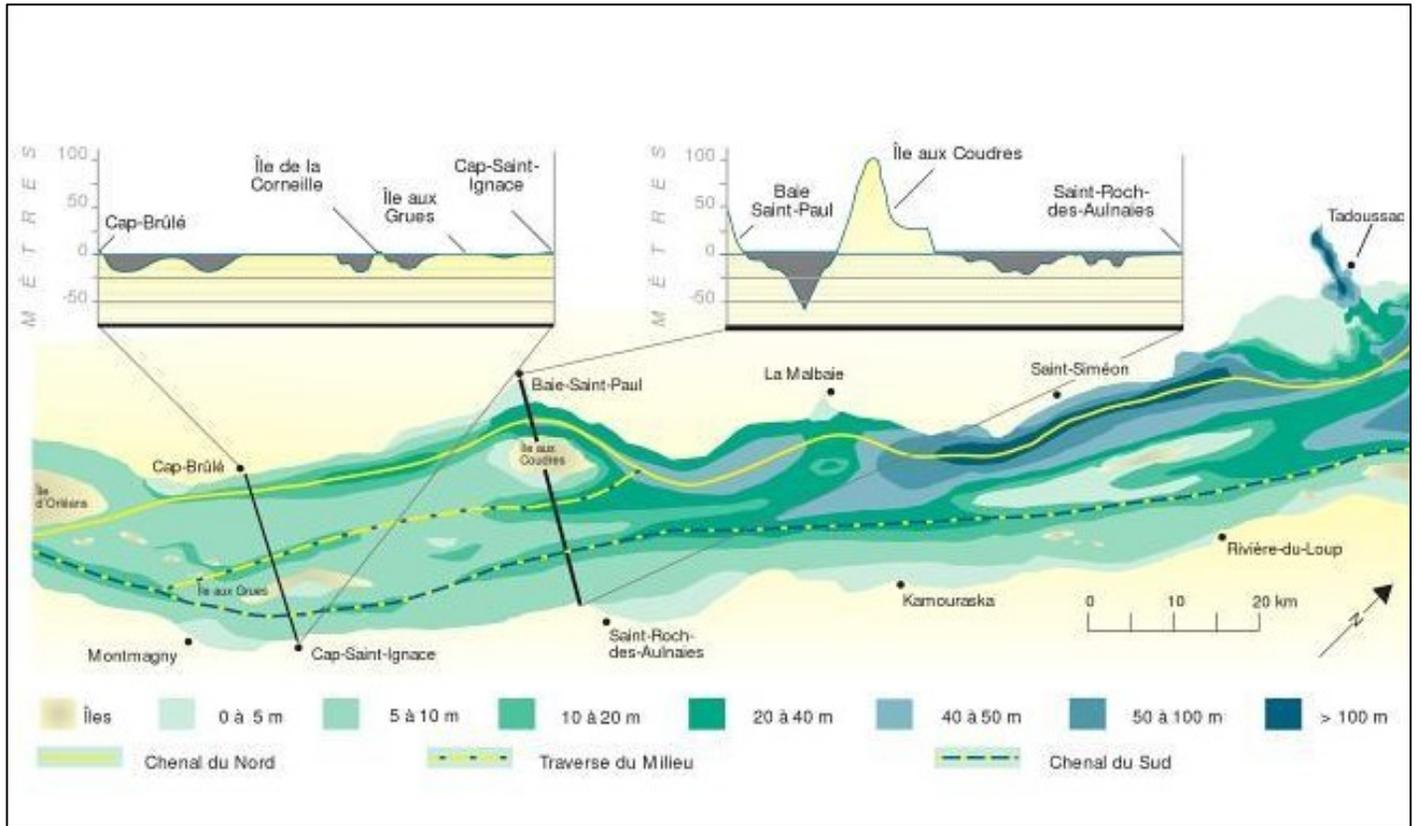
Une faille de chevauchement à forts pendages d'orientation Sud-Ouest/Nord-Est traverse l'île dans son centre et divise le relief en deux parties distinctes de proportion presque égale (Figure 6). Elle témoigne de la rencontre de deux séquences rocheuses sédimentaires appartenant à la formation des Appalaches il y a environ 475 millions d'années durant le Cambro-Ordovicien (Brodeur et Allard, 1983 : 180-181; Perron et Gauthier, 2000 : 34). L'Île-aux-Coudres se trouve au front des nappes de charriage des Appalaches. La moitié de l'île du côté Sud-Est de la faille de chevauchement se caractérise par un faciès flyschique (schistes argileux sédimentaires, microgrès) au travers duquel se retrouvent divers conglomérats contenant du calcaire et du grès. Le paysage y est relativement plat (Figure 7). L'autre moitié au Nord-Ouest est, au contraire, davantage accidentée ; elle inclut d'ailleurs le plus haut mont de l'île avec 102 m d'altitude. Elle se compose d'un faciès microgréseux (Brodeur et Allard, 1983 : 180-181; Brodeur et Allard, 1985 : 184).

Figure 4. Carte topographique du marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Carte topographique, 1 : 20 000, NAD 83. Ressources naturelles et Faune, Québec, 2007.

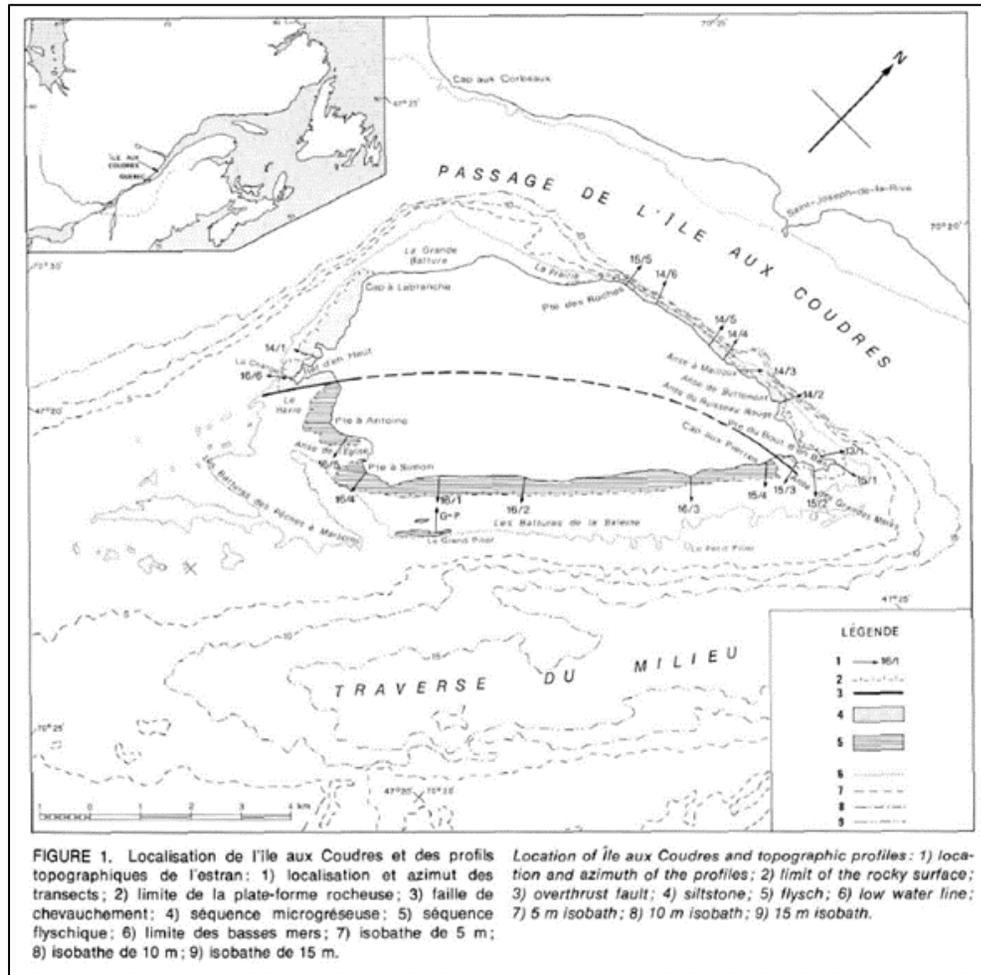
Figure 5. Carte bathymétrique du moyen estuaire du Saint-Laurent



Source : Tirée de Centre Saint-Laurent, 1996.

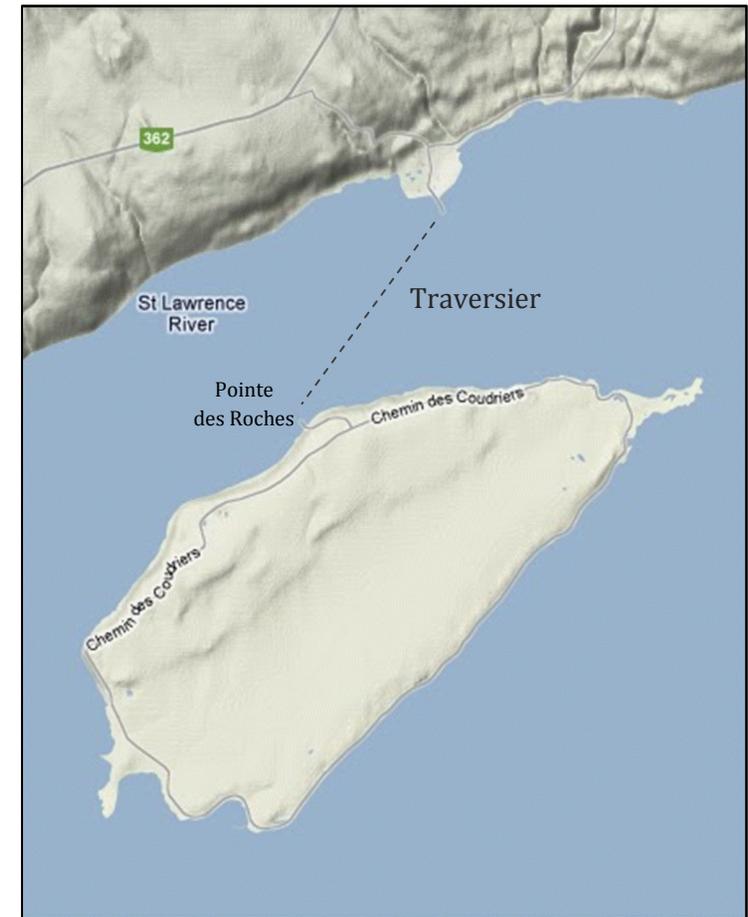
Les formes actuelles de l'île datent de 9 800 à 9 400 ans BP, lors de l'invasion marine suivant la dernière glaciation du Wisconsinien, on y trouve d'ailleurs des traces d'abrasion engendrées par le passage des glaciers, des anciennes crêtes de plage, des talus de terrasse marine, des dépôts d'origine marine et des dépôts d'origine glaciaire recouvrent l'île (Brodeur et Allard, 1983 : 180; Brodeur et Allard, 1985 : 195). Une étude palynologique récente sur l'Île-aux-Coudres a révélé la présence de varves s'élevant de 27 à 31 m au-dessus du niveau des hautes marées actuelles. Cette zone de l'estuaire moyen a été ennoyée par un épandage fluvio-deltaïque avant d'être recouverte par la Mer de Goldthwait dont l'altitude avoisinait 190 m (Clet et Occhietti, 1995 : 303; Brodeur et Allard, 1985 : 184). Lors du retrait de la mer et du soulèvement subséquent du continent, les dépôts se sont consolidés. Des sédiments pré-goldthwaitiens sont aujourd'hui préservés à la Pointe de la Prairie où ils ont subsisté à l'érosion suivant la déglaciation de l'Holocène. Les plates-formes tendent à être en équilibre en lien avec

Figure 6. Faille de chevauchement de l'Île-aux-Coudres



Source : Tirée de Brodeur et Allard, 1983, p.181.

Figure 7. Relief de l'Île-aux-Coudres



Source : Modifiée de Google Map (relief), 2012.

l'hydrodynamisme marin présent. Cependant, la région est en relèvement isostatique, mais les données sur le taux moyen annuel sont méconnues (Brodeur et Allard, 1985 : 184; Perron et Gauthier, 2000 : 40).

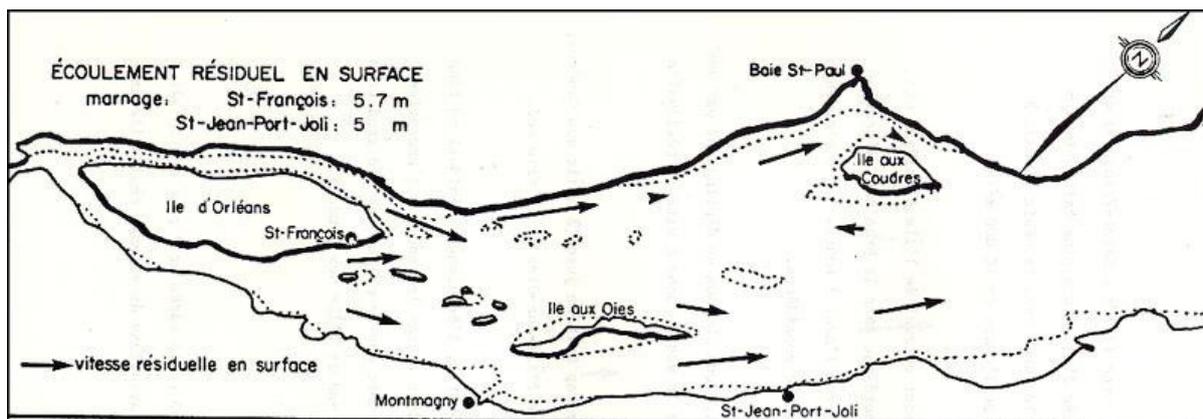
L'Île-aux-Coudres se trouve en zone boréale humide, elle est soumise à un micro-climat continental humide avec des étés tempérés où la saison de gel dure 245 jours, ce qui permet alors à un pied de glace de se former sur les battures malgré le taux de salinité. La mince couche d'eau recouvrant l'estran gèle rapidement et les méga-blocs présents aident à fixer et à retenir la glace. Les agents érosifs glaciels (dont la cryoclastie), en lien avec les marées, jouent d'ailleurs un rôle important dans l'abrasion des formations rocheuses littorales schisteuses et microgréseuses friables. Les températures maximales oscillent entre $-6,7^{\circ}\text{C}$ en janvier et 24°C en juillet (Deveau, 1968 : 603; Brodeur et Allard, 1983 : 182, 192).

Sur l'île, si la biodiversité végétale est comparable à celle des territoires continentaux avoisinants, il en est tout autrement de la biocénose animale. L'insularité restreint cet écosystème à des espèces limitées dont les associations demeurent précaires. Bien que l'île ne soit pas si distancée du continent, les forts courants servent d'obstacle et empêchent les nouvelles populations de traverser. On y retrouve le renard, le lièvre, la belette, la gélinotte huppée (perdrix) et autres oiseaux, ainsi que quelques rongeurs (Le Querrec, 1981 : 10-11).

Sédimentation estuarienne

Un estuaire est situé à la rencontre entre les eaux douces du continent et les eaux salées de l'océan. De cet échange naît une dynamique sédimentaire spécifique. L'intrusion du bras de mer à l'intérieur du moyen estuaire dépend majoritairement des variations annuelles du débit fluvial, elle est affectée au second plan par les variations journalières des marées et les variations mensuelles du marnage. Le mélange entre les eaux salées et douces crée des courants résiduels dont la charge sédimentaire est élevée (Figure 8). Ces courants qui se superposent voient leur puissance être diminuée par celle, plus forte, des courants de marée. La force de ces courants résiduels est également liée au débit fluvial, plus ce dernier est intense et plus ces courants seront puissants et individualisés (Allen et Klingebiel, 1974 : 265- 266).

Figure 8. Écoulement résiduel en surface, moyen estuaire du Saint-Laurent

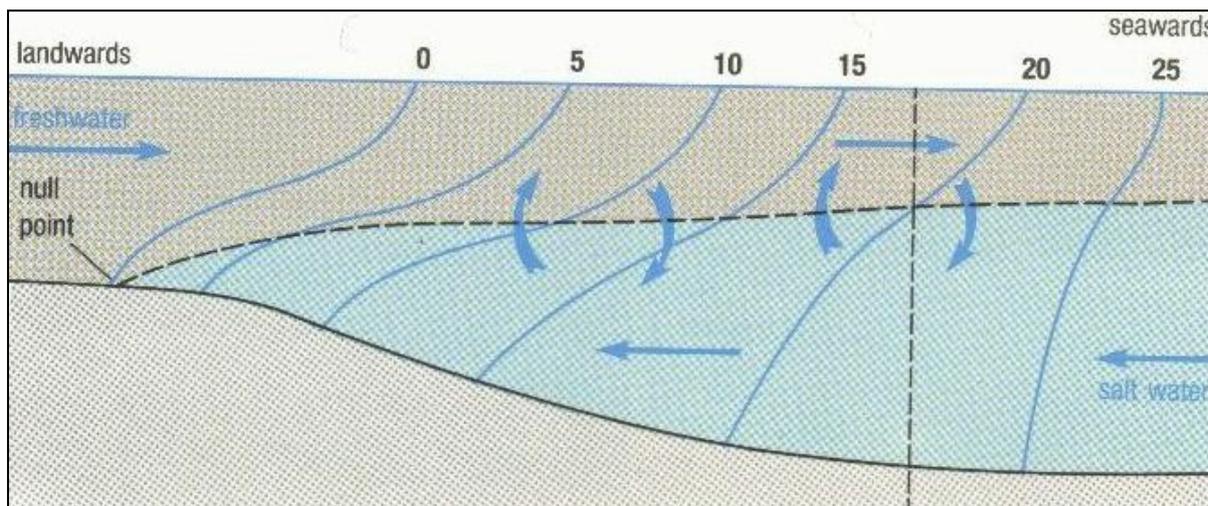


Source : Inconnue.

Le gradient de salinité vertical de la colonne d'eau du moyen estuaire est lié à la morphologie fluviale et à la connexité entre le débit fluvial et la quantité d'eau qui s'infiltré à l'intérieur de l'estuaire au moyen de la marée. Il existe également un gradient de salinité transversal qui est généré par la force de Coriolis, on remarque en effet que l'eau est en moyenne plus salée sur la rive gauche que sur la rive droite dans l'hémisphère Nord. Ce phénomène s'explique par la déviation des particules en mouvement du courant de flot vers la rive droite et celui du courant de jusant vers la rive gauche (Allen et Klingebiel, 1974 : 273).

Le moyen estuaire du Saint-Laurent appartient au type d'estuaire à coin salé avec marée. Le débit fluvial est alors plus puissant que les marées et l'eau douce, plus légère, s'écoule en surface vers l'aval alors que l'eau salée s'introduit en profondeur et se dirige vers l'amont. Par voie de conséquence, le taux de salinité est plus élevé pour la couche supérieure en aval, tandis qu'il est plus bas pour la couche inférieure en amont. La différence de densité entraîne donc la stratification de ces courants. Il existe toutefois quelques échanges à l'intérieur de la zone de l'halocline mais ceux-ci restent minimes (Allen et Klingebiel, 1974 : 266).

En amont de l'infiltration saline, à son extrémité, la vitesse de l'écoulement est décroissante et le courant finit par s'éteindre. Le courant fluvial occupe alors tout l'espace de la colonne d'eau. De cette façon, les courants résiduels convergent, c'est ce qu'on appelle le point nodal (Figure 9) (Allen et Klingebiel, 1974 : 268). Le point nodal est une zone de sédimentation importante, c'est à cet endroit que se forme un bouchon vaseux, ce dernier migre et suit le déplacement du point nodal en fonction du débit fluvial qui varie selon les saisons. Le bouchon vaseux se forme par les échanges verticaux entre les masses

Figure 9. Point nodal (*null point*) dans un estuaire à coin salé

Source : Tirée de Cataneo et Stretta (2000-2001).

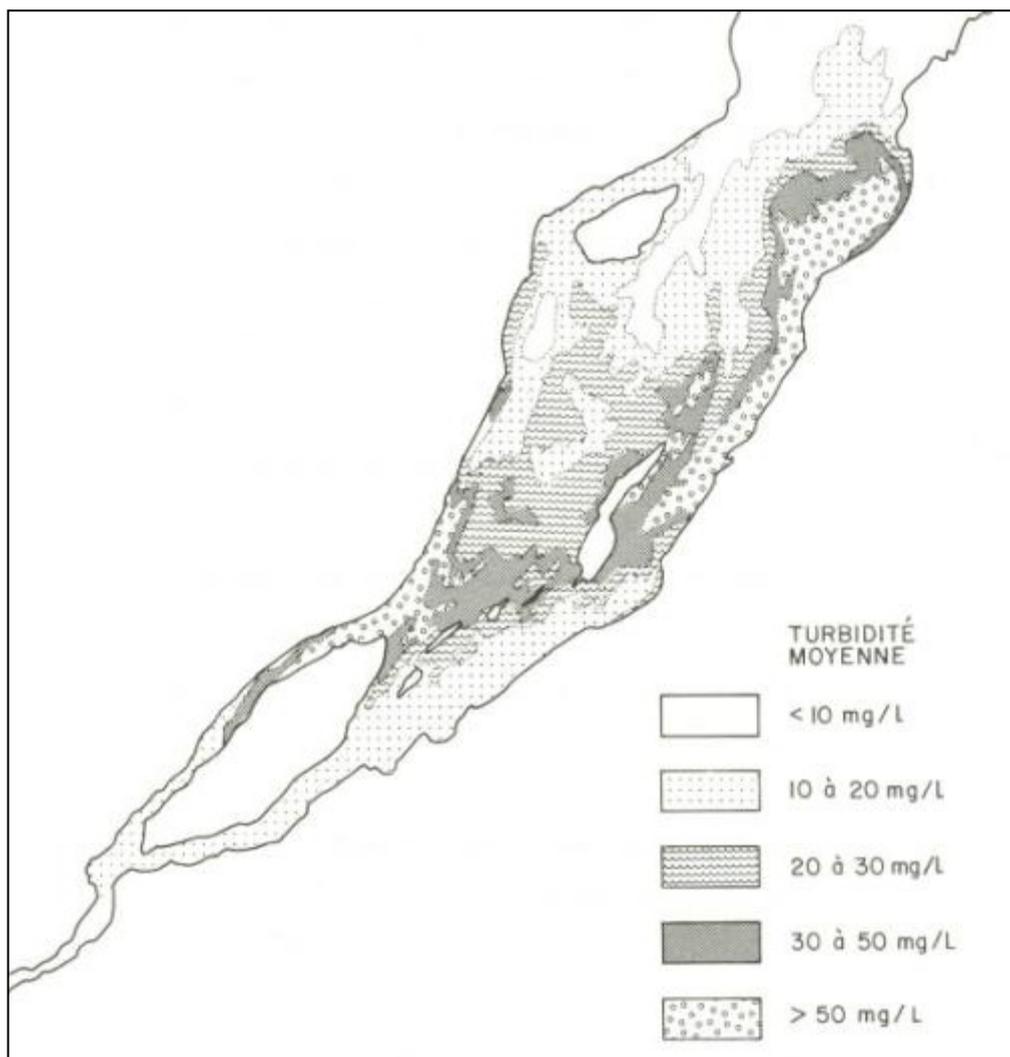
d'eau inférieures qui remontent et les masses d'eau supérieures qui descendent, et de leur charge sédimentaire respective. Du reste, ces échanges sont amplifiés par les marées. Un estuaire est donc propice aux renversements de courant (Anctil, 2008 : 108-109).

Les sédiments se déposent lorsque les étales de marée ont lieu, à ce moment le courant perd sa vélocité et les sédiments en suspension chutent alors vers le fond par gravité et par floculation (Strahler et Archibold, 2008 : 452; Allen et Klingebiel, 1974 : 277). La turbidité moyenne aux environs de l'Île-aux-Coudres se situe entre 10 et 20 mg/l (Figure 10). On voit d'ailleurs très bien la formation du bouchon vaseux sur la photographie thermique Landsat-5 TM de 2011 (Figure 11).

Contexte humain du site de l'étude

Le toponyme « l'Île-aux-Coudres » provient de Jacques Cartier qui la nomma ainsi en 1535 en raison de l'abondance des coudriers (ancien nom du noisetier). Cependant, la colonisation ne commencera qu'en 1728, les habitants vécurent alors presque uniquement en autarcie, trouvant toutes les ressources nécessaires sur place par les moyens de la pêche (dont la pêche à marsouin et à fascines), de la chasse, de l'agriculture et de l'exploitation forestière. La pêche à marsouin, probablement héritée des Amérindiens, fut d'une importance capitale pour l'économie locale étant donné le nombre de mains-d'œuvre qu'elle nécessitait (Le Querrec, 1981 : 35; Gauthier, 1999 : 19, 27; La Mémoire du Québec, 2012).

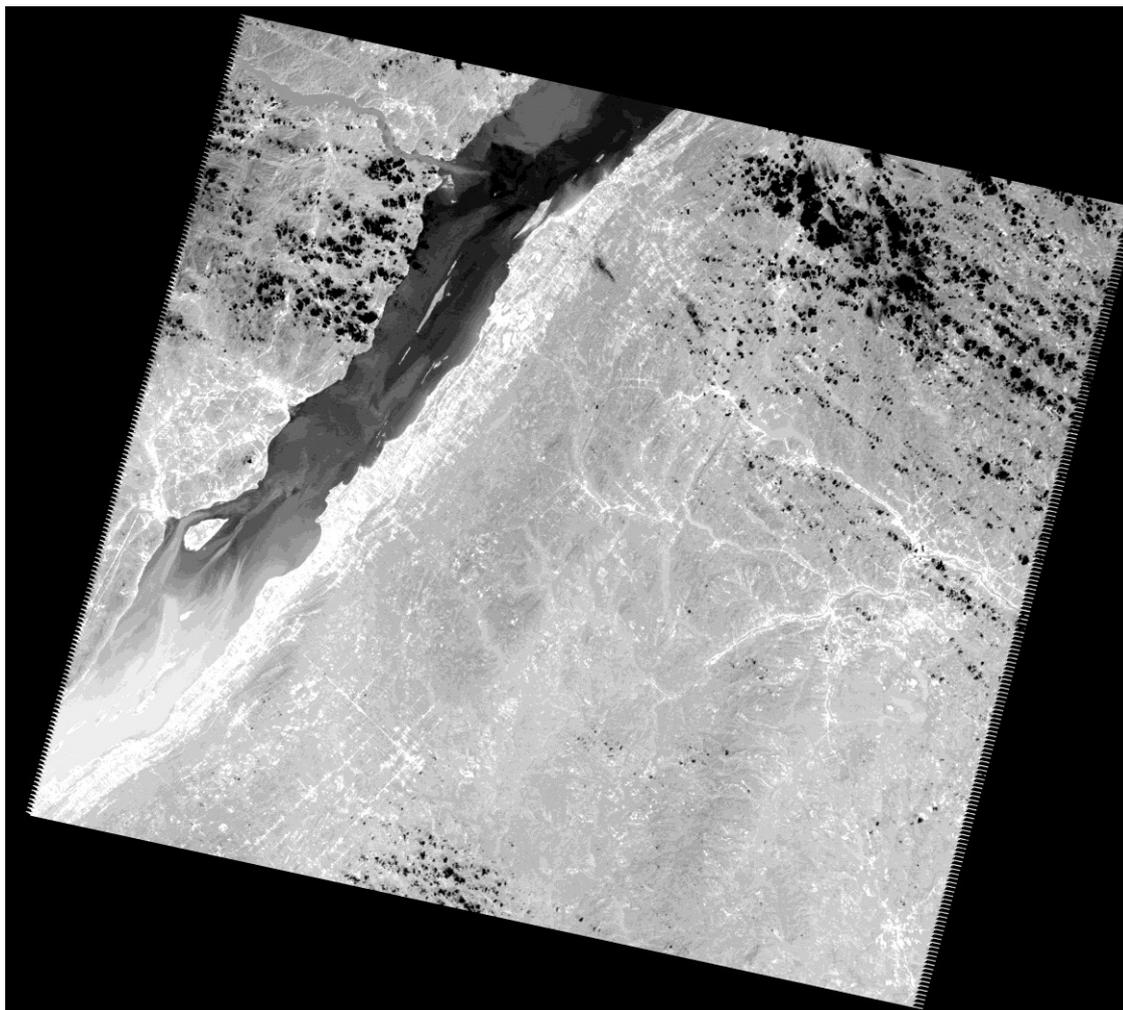
Figure 10. Différenciation des masses d'eau du moyen estuaire du Saint-Laurent



Source : Inconnue.

Dès les débuts de la colonisation, les habitants vécurent en étroite relation avec les grèves, utilisant les ressources en place pour subvenir à leurs besoins. Du reste, en 1751, un acte de partage vit le jour afin de répartir des portions de grève entre les habitants pour leur permettre d'avoir accès à du foin, que l'on récolte à marée basse, afin de nourrir leur bétail sans avoir à payer de redevances additionnelles au seigneur. Cette forme d'organisation perdura jusqu'en 1852, date à laquelle les grèves furent vendues à ceux qui voulaient bien les posséder. Le varech fut par la suite récupéré afin de servir d'engrais pour les cultures et principalement pour celle des patates. Cette nouvelle technique mena à une surproduction agricole. Le désir d'aller vendre ces surplus dans la ville de Québec conduisit l'industrie navale à se développer. L'apparition des chantiers de goélettes mena à un abandon progressif des emplois liés à l'agriculture au profit de la navigation (Le Querrec, 1981 : 26-27, 29, 32-33; Gauthier, 1999 : 6-7; La Mémoire du Québec, 2012).

Figure 11. Photographie thermique du moyen estuaire du Saint-Laurent



Source : USGS et NASA, 2011.

Au fil des ans, le marais de l'Île-aux-Coudres servit de mouillage aux goélettes et autres embarcations. En outre, les navires de l'amiral Durell transportant les soldats de l'armée britannique accostèrent en 1759 sur les battures de l'île et firent halte dans leur traversée pour aller assiéger la ville de Québec (La Mémoire du Québec, 2012).

À partir des années 1930, les industries agricoles se sont modernisées grâce à la mécanisation, à la motorisation et à la spécialisation des unités de production. Cela a eu pour résultat une baisse du nombre de fermes ainsi qu'une baisse de la population rurale. Les fermes deviennent la propriété, non d'individus comme cela avait été le cas jusqu'alors, mais de corporations. Plusieurs entreprises ont fermé leurs portes au fil des années, et certaines spécialisations sont mortes en même temps, telles que le cabotage par exemple. L'industrie de la construction navale a périclité et la construction des goélettes de bois n'existe plus. Il ne

subsiste de nos jours que le chantier d'AML à l'Île-aux-Coudres qui est le plus gros employeur de l'île (Perron et Gauthier, 2000 : 275-276, 283, 289).

La région de Charlevoix a opté pour l'industrie touristique afin de pallier à l'effritement des industries plus traditionnelles. La mise en avant de la beauté de la région de Charlevoix ainsi que l'incitation à la découverte de son artisanat local attirent une masse de touristes vitale pour les habitants. Des événements, des activités récréatives et culturelles, des circuits touristiques, des équipements sont mis sur pied pour répondre à la demande. Cette industrie reste précaire pour la main-d'œuvre, car la durée de la saison touristique et ce qu'elle rapporte en profits dépendent de plusieurs facteurs qui fluctuent selon les années. En outre, les conflits de travail restent un problème latent pour la population puisque les entreprises paient souvent leurs employés à des salaires moindres si on les compare à ceux de Québec, les menaces de grève subsistent donc encore. Le développement économique est donc mal proportionné et la population en reste dépendante, les attraits régionaux pour les touristes ont beau être diversifiés, il n'en reste pas moins que l'économie, elle, ne l'est pas. Les retombées économiques précaires de la région ont fait en sorte que la croissance démographique reste faible, voire nulle. D'autre part, les jeunes quittent la région, en majorité des femmes, pour des questions d'emploi. La population est vieillissante et le taux de natalité est inférieur à la moyenne québécoise. Le niveau de scolarité des personnes de plus de 15 ans est faible. Pour les entreprises, il devient difficile de trouver des employés qualifiés ou simplement bilingues (Perron et Gauthier, 2000 : 290-312).

Le dernier recensement de 2011 a dénombré 1 279 habitants, ils se répartissent dans une seule municipalité couvrant toute l'île, celle de l'Isle-aux-Coudres. C'est une baisse démographique si l'on compare au recensement précédent de 2006 ; il y avait alors 1 296 habitants. La densité est aujourd'hui de 43 h/m² pour une superficie totale de 29,54 km². L'âge moyen de la population se situe entre 50 à 74 ans (Statistique Canada, 2012).

Depuis la Pointe des Roches, l'île est reliée au continent par le biais d'un traversier qui accoste à une distance de 3,7 km à Saint-Joseph-de-la-Rive, sur la côte Nord du fleuve (Figure 7). Parfois, en hiver, lorsque les glaces ne permettent plus de traverser, l'île reste isolée. Un phare, dénommé La Block, se dresse sur la slikke du marais étudié (Figure 4).

Problématique et objectifs

Plusieurs recherches suggèrent que le niveau moyen des océans subit une hausse rapide en relation avec les changements climatiques que nous vivons actuellement. Le réchauffement entraîne l'expansion thermique des couches supérieures des océans ainsi qu'un apport accru en eau douce provenant des glaciers circumpolaires et continentaux (Verger, 2009 : 33-34). Cette élévation eustatique a de nombreuses conséquences sur les littoraux, elle accentue l'érosion, augmente les risques d'inondation et entraîne la migration de la plage. Certaines côtes sont plus sensibles que d'autres en fonction de leur relief, de leur composition géologique, de leur emplacement géographique, de la tendance locale du relèvement eustatique et isostatique, du niveau atteint par les vagues et les marées. Selon la Commission géologique du Canada (2009), la zone étudiée a un taux de sensibilité de 0 à 4,9 à la hausse du niveau marin, ce qui correspond à un taux bas. Pourtant, bien que le discours actuel sur la hausse du niveau marin soit connu du grand public, il n'existe pas de preuve de ce phénomène à l'échelle du fleuve Saint-Laurent. Une analyse récente des données marégraphiques du moyen estuaire du fleuve Saint-Laurent démontre que le niveau marin serait même légèrement en baisse (Hatvany, 2013 : 29).

Il faut mentionner toutefois que le niveau de la mer a constamment varié au cours de l'histoire de la planète et l'augmentation actuelle a débuté il y a plus de 4 000 ans, cette dernière n'est pas constante et subit des fluctuations positives comme négatives qui varient aussi en fonction de l'emplacement géographique. De plus, le cycle des marées de 18,6 ans, le Saros, semble avoir une influence sur les fluctuations du niveau marin surtout sur les régions macrotidales telles que l'Île-aux-Coudres. Une augmentation de 3 % du niveau moyen des pleines mers a été constatée lors de la première moitié de ce cycle et une baisse de 3 % lors de la seconde moitié. Ce phénomène aurait une incidence plus importante sur la hausse globale du niveau marin que le réchauffement climatique à court terme. D'ailleurs, les côtes dont l'érosion serait accentuée durant la première moitié du Saros auraient la possibilité de se régénérer durant la suivante. Actuellement, la seconde moitié du cycle de Saros se produirait entre 2015-2024 (Gratiot, 2008 : 169-171).

Bon nombre de discours ont un ton alarmiste et généralisent certains constats faits à l'ensemble des grands systèmes côtiers. L'exemple du fleuve Saint-Laurent démontre que certains auteurs (Bernatchez et Dubois, 2004) appliquent le phénomène de l'érosion côtière constaté sur certains secteurs à l'échelle entière du fleuve Saint-Laurent. Le taux de recul des

littoraux serait de 0,5 à 2 m et correspondrait au taux moyen observé à l'échelle mondiale, ils prédissent que ces taux continueront d'augmenter dans les années à suivre. Ainsi, les schorres supérieurs du moyen estuaire seraient fortement menacés et en érosion depuis des siècles. De telles affirmations doivent être prises avec prudence puisque ces observations ne rendent pas compte de la dynamique d'un écosystème aussi vaste et varié que le Saint-Laurent. Les facteurs extérieurs au fleuve, comme le cycle du Saros, les cycles de tempêtes et les cycles d'ouragans dans l'Atlantique pour ne citer qu'eux, doivent aussi être pris en compte afin de dresser un portrait réaliste de la dynamique actuelle. En outre, des études démontrent que le marais de Kamouraska présente des signes d'érosion et d'accrétion en même temps (Champagne et al., 1983; Sérodes et Dubé, 1983; Hatvany, 2012).

Selon Hatvany (2012), les discours biocentriques portant sur l'érosion sont relativement récents, apparaissant au cours des années 1980. Ils apportent un certain réductionnisme au sein de la compréhension globale de la dynamique des marais intertidaux, en parlant alors soit d'expansion, soit de régression. Pourtant, les phénomènes d'érosion et d'accrétion sont cycliques et peuvent avoir lieu simultanément sur un même marais. De cette manière, les sédiments érodés sur un marais sont en général transportés vers les extrémités et vont de nouveau nourrir son exhaussement. De 1874 à 1980, les discours anthropocentriques font part du développement économique des marais et de leur accrétion continue par la sédimentation et les successions végétales. La preuve en est l'endiguement successif des marais français qui progressaient sans cesse en direction de la mer. Cette contradiction entre discours passés et présents rend compte de l'évolution de la perception de l'Homme envers son environnement qui s'est transformée en lien avec le contexte historique. Durant l'industrialisation, la vision de l'Homme comme maître sur son milieu a donné jour à des discours d'expansion continue des marais tandis que le discours moderne voyant l'Homme comme un élément nuisible a donné jour à des discours dans lesquels le facteur dominant demeure les impacts de l'homme menant à l'érosion. Cependant, la prise de conscience suscitée par la perte d'importantes superficies des marais a donné lieu à une gestion davantage responsable (Verger, 2009 : 58; Careau, 2010 : 10, 103; Hatvany, 2012 : 89-90, 94).

En prenant compte de ces divers éléments, les objectifs de cette étude ont été définis :

1. Évaluer l'évolution dynamique à long terme du marais salé de l'Île-aux-Coudres. L'inventaire des facteurs en cause ainsi que leurs conséquences sera également pertinent pour la compréhension du phénomène;

2. Définir la perte ou le gain de sa superficie dans un intervalle de temps déterminé (1964 à 2011);
3. Comparaison préliminaire de ce marais avec celui de Kamouraska, expliquer les différences et les similitudes en vue d'améliorer la compréhension globale de la dynamique actuelle et future de l'érosion du littoral québécois et, plus spécifiquement, celle de la Côte-Nord.
4. Examiner le discours scientifique actuel en le comparant avec les données récentes recueillies sur les marais de l'Île-aux-Coudres et le marais de Kamouraska, respectivement situés au Nord et au Sud du moyen estuaire du fleuve Saint-Laurent.

Méthodologie

Revue de la littérature

Jusqu'à ce jour, il n'existe pas d'étude portant sur l'évolution latérale ou verticale du marais de l'Île-aux-Coudres, c'est pourquoi un inventaire des ouvrages et articles ayant pour sujet les marais et l'Île-aux-Coudres a été effectué sur les deux sujets pris séparément.

Les livres de Paskoff (2006) et de Verger (2009), ainsi que l'article de Redfield (1972), font état de la physiographie typique des marais, ils s'attardent également sur les facteurs qui influencent et engendrent les formes physiques de ces milieux, tels que les processus sédimentaires et marégraphiques. Plusieurs auteurs (Fleurbec, 1985; Bertness, 2007) ont démontré que la répartition et les mécanismes d'adaptation des végétaux sont liés aux stress physiques et biologiques. Les articles décrivant la géomorphologie, la géologie et la stratigraphie de l'Île-aux-Coudres (Brodeur et Allard, 1983, 1985) ont permis la compréhension et la description du site de l'étude. Finalement l'article d'Hatvany (2012) a servi d'exemple pour la méthodologie spatio-temporelle utilisée à l'aide des photographies aériennes.

Cueillette et traitement des données

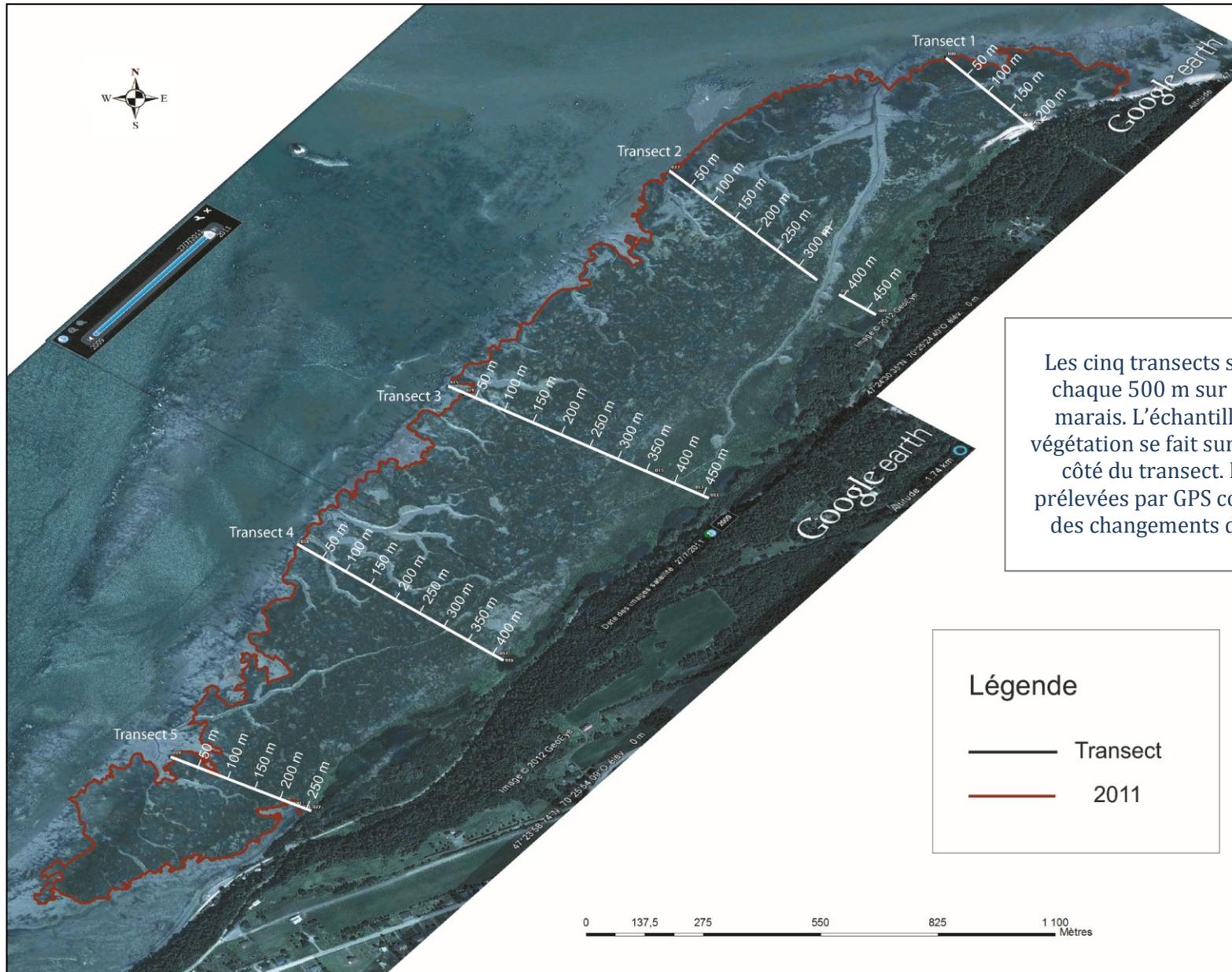
Une sortie sur le terrain a été réalisée sur le marais de Kamouraska, du 6 au 8 juin 2012, dans le but d'acquérir la compétence pour reconnaître les diverses formes spécifiques des marais salés. Par la suite, des relevés sur le terrain ont été effectués les 16 et 17 juin 2012 sur le marais de l'Île-aux-Coudres. Selon les prédictions des marées de la station 3057 de

Saint-Joseph-de-la-Rive pour le 16 juin, une marée basse de 1,7 m avait lieu à 9h15 alors qu'une marée haute de 4,9 m se présentait à 15h34. Pour le 17 juin, la marée était basse de 1,5 m à 9h56 et haute de 5 m à 16h15. Par conséquent, l'échantillonnage des végétaux présents sur le marais a eu lieu lors des périodes d'étiage, de même que la réalisation de cinq transects biophysiques répartis sur l'ensemble du marais (Figure 12).

Un GPS Garmin Map 78s en mode différentiel a relevé les données géographiques nécessaires à la réalisation de ces transects. Le niveau de précision du GPS était de 5 m pour un intervalle de confiance de 95 %, ce qui signifie que les données prélevées se trouvent dans un rayon de 5 m du point d'origine avec une probabilité de 19 fois sur 20. Chaque donnée prélevée correspond à un changement de végétation le long d'une ligne parcourue à partir de la limite du schorre supérieur à celle du schorre inférieur sur un intervalle de 500 m sur l'ensemble du marais. La limite du schorre inférieur a été déterminée selon des critères qualitatifs : lorsque 50 % de l'espace n'est plus occupé par *Spartina alterniflora*. L'observation et la prise de note des végétaux présents, ainsi que des anomalies présentes sur le terrain, dans une zone de 5 m de chaque côté de la ligne des transects viennent compléter cet inventaire. Ce dernier permet de cartographier une image d'ensemble de la biogéographie actuelle des plantes sur le marais, ce qui renseigne sur les niveaux atteints par les différents types de marée.

Une recherche des photographies aériennes du marais a mis à jour l'existence de photographies datant de 1964, 1980, 2001 et 2011 (Tableau 1). Les photographies ont été numérisées à une résolution de 600 dpi dans le but d'être manipulées numériquement. Le géoréférencement des photographies de 1964, 1980 et 2011 s'est opéré à partir de l'orthophotographie de 2001, dont la projection cartographique est NAD 83 MTM, à l'aide du logiciel ArcGIS. Afin de réaliser une carte montrant l'évolution spatio-temporelle du marais de 1964 à 2011, le traçage des différentes limites du marais a été réalisé sur ArcGIS en encerclant en polygone la végétation visible, tout en évitant les quelques zones pionnières et les rochers bordant le schorre inférieur dont l'apparence est similaire à la végétation sur certaines photographies.

Figure 12. Stations de transects effectués sur le marais de l'Île-aux-Coudres, juin 2012



Les cinq transects sont répartis à chaque 500 m sur le schorre du marais. L'échantillonnage de la végétation se fait sur 5 m de chaque côté du transect. Les données prélevées par GPS correspondent à des changements de végétation.

Légende

— Transect

— 2011

Source : Modifiée de Google Earth, 2011. Par Marie-Claude Drolet, 2012.

Tableau 1. Liste des photographies aériennes employées

Numéro de photo	Date	Échelle	Type de photo
Q64114-41	1964	1 : 15 840	Noir & Blanc
Q80624-158	1 ^{er} juillet 1980	1 : 20 000	Noir & Blanc
Q01806-070	2001	1 : 40 000	Noir & Blanc
<i>Google Earth</i>	27 juillet 2011	1 : 6 180	Couleur

Chapitre premier

1. Caractéristiques des marais intertidaux en zone tempérée nordique

Les marais salés sont des systèmes ouverts qui se forment sur des reliefs dont le profil est peu accidenté et à l'abri des vagues, ce qui permet l'accumulation successive des particules les plus fines (les sédiments) présentes dans l'eau sous l'action des marées. Ils se développent d'ailleurs très peu lorsque les marées sont faibles et lorsque la charge sédimentaire est insuffisante. Au moment où les plantes halophytes s'installent, elles favorisent l'accumulation et la rétention des particules sédimentaires en plus grande abondance et à une vitesse accélérée selon la densité des plantes. Le marais prend ainsi de l'expansion tant verticale que latérale. Conséquemment, les marais salés sont le résultat d'actions biogéniques et de l'interaction avec les forces dynamiques des marées (Redfield, 1972 : 205; Paskoff, 2006 : 100,106; Trenhaile, 2010 : 414).

Exploitation des marais par l'Homme

Les marais ont été exploités par l'Homme au cours de l'histoire, que ce soit pour la pêche, la chasse, la récolte du sel ou bien en tant que lieu de pâturage pour le bétail. Avant les bouleversements démographiques, économiques, technologiques et environnementaux induits par l'industrialisation, l'Homme vivait souvent en équilibre avec ces milieux. En Amérique, les indigènes pratiquaient une exploitation durable des milieux humides avant l'arrivée des premiers Européens. Puis, les techniques d'assèchement des marais furent importées des paysans européens qui, depuis le Moyen Âge, transformaient les marais en polders afin de récupérer ces terres riches pour l'agriculture. Ces techniques s'étaient alors développées pour permettre la survie des populations dont les pressions démographiques étaient grandissantes sur des territoires limités. Avec l'amélioration des techniques (moulin à vent, écluse, barrage et canal de drainage) et le capitalisme naissant, de plus en plus de marais furent asséchés. Au Québec, la construction d'aboiteaux sur le marais de Kamouraska témoigne des changements rapides vécus par ces habitants durant une courte période de temps et de la nécessité d'assurer leur survie par le biais de ces installations (Hatvany, 2009 : 34-35; Hatvany, 2009 : 241-244).

Un autre phénomène postérieur à l'industrialisation est le développement des axes de communication (routes et chemin de fer) qui entraîna le remblaiement et le fractionnement des milieux humides. D'importantes pertes en superficie des marais en découlèrent également. Une autre conséquence de ce phénomène est la séparation des marais fragmentés qui subsistent du contact avec le littoral et des marées dont ils dépendent (Bertness, 2007 : 374; Hatvany, 2012 : 89). Sans le mouvement des marées, l'eutrophisation s'amorce et l'eau salée stagnante devient progressivement de l'eau douce par lessivage. Ce nouveau milieu devient idéal pour le phragmite (*Phragmites australis*) qui supporte bien les milieux pauvres en nutriments et qui s'y installe. Il draine l'eau dans le sol et l'assèche, l'appauvrissant de ses nutriments. Le phragmite est très compétitif et remplace peu à peu les plantes natives comme les quenouilles (*Typha latifolia*, *Typha angustifolia*) qui sont reconnues pour leur capacité de filtrer les polluants. La disparition des plantes natives entraîne aussi l'extinction des insectes et des oiseaux qui dépendaient de ces plantes. *Phragmites australis*, accompagné de l'herbe à poux (*Ambrosia trifida*) et de l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*), s'étend à d'autres milieux, il borde maintenant bon nombre d'autoroutes au Québec et l'on peut difficilement s'en débarrasser vu la ténacité de son système racinaire et sa rapidité de propagation (Orson, 1989 : 24; Bertness, 2007 : 374; Bédard, 2008 : 2-4, 8-10).

Récemment, la société moderne tente de reconnaître les bienfaits des marais. Au Québec, Canards Illimités Canada fit son apparition en 1937 et débuta la promotion de la conservation des milieux humides. Il faut cependant attendre les années 80 pour voir un changement de mentalité dans les discours politiques et éducationnels. La transposition de la valeur environnementale en valeur économique des services rendus par les milieux humides a sensibilisé plusieurs gouvernements aux bienfaits prodigués par l'environnement et aux impacts que nos actions peuvent avoir sur la santé humaine à long terme. Aujourd'hui, la préservation et la restauration des marais sont devenues des préoccupations sociales répandues, tout comme le sont les changements climatiques, la réduction de la biodiversité et la rareté de l'eau potable. La mise sur pied de nombreuses lois protégeant les marais traduit ce changement de mentalité qui s'est opéré et manifeste une compréhension plus holistique de la place de l'Homme au sein de son environnement (Hatvany, 2009 : 160-162; Hatvany, 2009 : 242, 245-246; Hatvany, 2011 : 1380).

Les discours postmodernes dénonçant l'assèchement des marais dressaient un portrait de l'Homme peu flatteur, l'étiquetant en tant que destructeur. Ces discours ne tenaient pas compte des contextes historiques et ne tenaient pas compte de la relation d'équilibre qui avait

prévalu bien avant. Le maintien d'un équilibre écologique ne peut se faire sans reconnaître, comme auparavant, un rôle positif à l'Homme au cœur de son environnement (Hatvany, 2009 : 161-162; Hatvany, 2011 : 1380).

1.1. Physiographie

La physiographie d'un marais se compose de deux formes majeures : la slikke et le schorre. La première forme étant presque vierge de toute végétation (à l'exception de la *Zostera marina* et de certaines algues) alors que la seconde en regorge. Le marais de l'Île-aux-Coudres se localise sur un estran nommé La Grande Batture (Figures 3, 4 et 13). Son substrat rocheux est composé de grès plissé dont les pendages sont orientés vers les Appalaches. D'après des mesures prises sur *Google Earth*, le schorre mesure environ 2,18 km sur le sens de la longueur et s'étend sur 354,25 m de largeur en moyenne (Tableau 2). Dans ce secteur, la sédimentation estuarienne crée de vastes vasières sur la slikke lorsque le relief littoral et les paramètres environnementaux le permettent. Les eaux continentales sont chargées de matière en suspension et, au contact des eaux marines, crée un bouchon vaseux, tel que mentionné dans l'Introduction. C'est dans cette zone de l'île qu'il y a d'ailleurs le maximum de turbidité (Allen et Klingebiel, 1974 : 268, 276; Verger, 2009 : 51).

Tableau 2. Longueur des cinq transects effectués sur le schorre du marais de l'Île-aux-Coudres, 2012

Transects	Longueur du schorre
1	210,76 m
2	471,84 m
3	461,28 m
4	422,68 m
5	258,69 m
Moyenne	354,25 m

Dans les marais, la durée moyenne du courant de flot est inférieure à celle du courant du jusant. Tout comme pour le moyen estuaire, c'est au moment de l'étale de marée basse et, en second lieu, lors de l'étale de haute marée, que les sédiments peuvent s'accumuler au fond. Les particules fines sont aussi attirées par capillarité sur la slikke et compactées au moment de leur émergence à marée basse par drainage de l'eau interstitielle. Ce phénomène s'accroît

Figure 13. Marais de l'Île-aux-Coudres

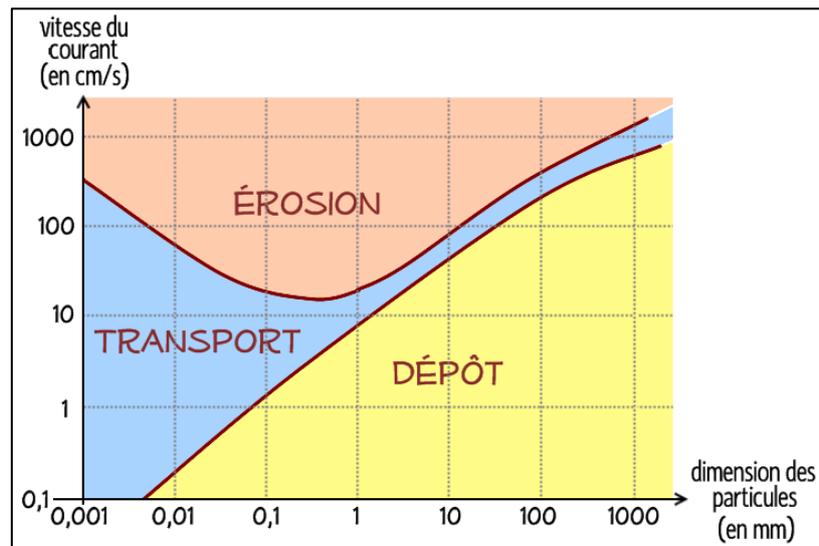


Source : Google Earth, 2011.

lors des journées chaudes d'été, la marée montante ne peut alors éroder en profondeur cette nouvelle couche. De plus, la faible vitesse du jusant lors de son retrait remet peu de particules en suspension. Selon la courbe de Hjulström, le transport des particules demande en effet une vitesse moindre que celle nécessaire à leur remise en suspension (Figure 14) (Paskoff, 2006 : 102-105).

Les vagues sont réfractées ou se brisent au moment où elles atteignent la limite du schorre, l'énergie des vagues y est par conséquent très limitée. Sur le marais, la végétation exerce une friction ralentissant le courant en limitant son niveau maximal de vitesse à moins de 0,15 m/s. La couverture végétale dissipe les vents générateurs de vagues sur des distances allant jusqu'à 10 m (Fagherazzi et al., 2011 : 3).

Figure 14. Courbe de Hjulström



Source : Tirée de Wikipédia, 2012.

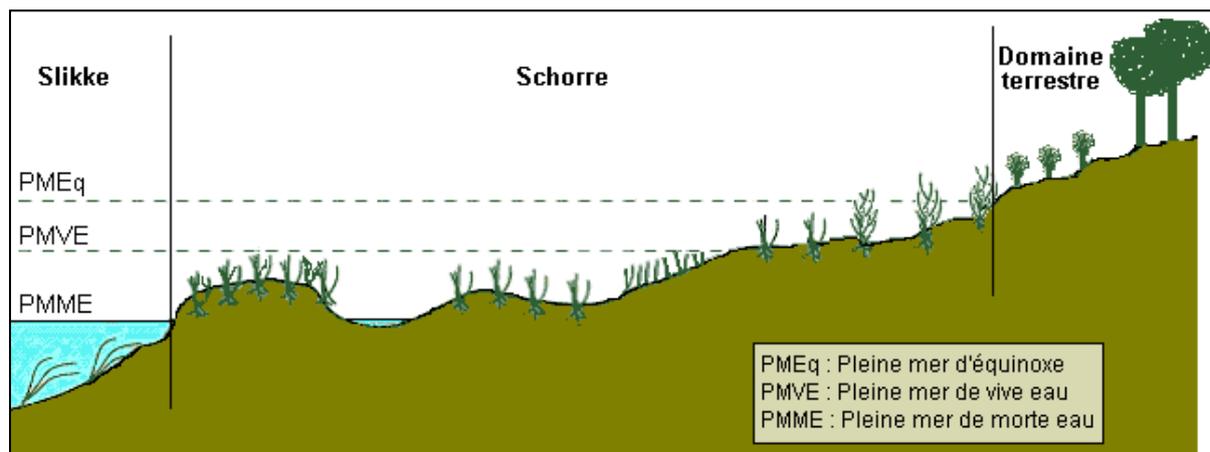
Le sol des marais a une structure lamellaire qui résulte de la sédimentation de couches successives d'alluvions. À basse altitude, le sol est davantage imprégné d'eau, anoxique et son taux de salinité est plus élevé qu'en haute altitude (Verger, 2009 : 47).

1.2. Slikke (tidal flat)

Située à une latitude de moins de 3 m, la slikke est la portion du marais qui est entièrement submergée à chaque marée haute, elle se localise dans la limite inférieure de la zone intertidale (Figure 15). Il n'y a pas de végétation sur la slikke, sauf parfois quelques algues ou zostères accrochées à des roches, qui y supportent les stress physiques. Au contraire du schorre, qui lui, est couvert de plusieurs espèces d'herbacés, les végétaux ne peuvent pas s'implanter dans un milieu aussi inconstant que la slikke. Sur la slikke, la nappe phréatique affleure la surface des eaux et l'impact des vagues est élevé. Les sédiments imprégnés d'eau sont en constant mouvement, remaniés à chaque marée. À marée basse, on peut parfois remarquer la formation de rides dans la vase dues au transport par les vagues du matériel meuble qui se déplace par saltation et roulement. La pente est faible variant entre 1 et 3 ‰ pour le secteur sous le niveau des pleines mers de mortes-eaux et variant entre 10 et 20 ‰ pour celui au-dessus. (Fleurbec, 1985 : 40; Paskoff, 2006 : 102-105).

Des chenaux formant des réseaux dendritiques parcourent la slikke permettant ainsi à la marée de monter et de s'évacuer par la suite. De rares chenaux, néanmoins imposants, qui sont l'œuvre des courants les plus forts se trouvent sur la limite supérieure de la slikke. Ceux

Figure 15. Profil type d'un marais intertidal salé



Source : Inconnue.

situés au niveau inférieur sont plus nombreux et plus petits, ils forment des réseaux qui sont rapidement colmatés de l'amont vers l'aval par les dépôts qui se renouvellent sans cesse. Des levées latérales s'élèvent de chaque côté des chenaux, leur apport en sédiments se fait par les débordements turbides en provenance des chenaux, la vélocité du courant diminuant à la sortie du chenal (Valadas, 2004 : 83; Paskoff, 2006 : 106).

Au niveau des étales de pleine mer de mortes-eaux, le taux de sédimentation est le plus considérable de tout l'ensemble du marais, c'est l'endroit où sont déposées les laisses de pleine mer. Celles-ci résultent des dépôts vaseux de l'étales de pleine mer, lorsque le courant de la marée se renverse et devient quasi immobile. Ce niveau correspond très grossièrement, à la frontière entre la slikke et le schorre. Sur cette frontière existe parfois des rassemblements pionniers de *Spartina alterniflora*. L'extension du schorre se fait donc à partir de cette zone (Verger, 1995 : 236-237; Paskoff, 2006 : 106; Verger, 2009 : 58).

On peut noter également la présence de cordons glaciels de basse mer (*boulder barricade*), au niveau de la limite supérieure de la slikke, sur le marais de l'Île-aux-Coudres (Figure 16). C'est typique des marais intertidaux en zone tempérée puisque ces méga-blocs résultent du transport glacial. En saison de gel, dans les zones de marées, la glace se forme à marée basse et épaissit à marée haute lorsque le gel s'amplifie. Les rochers présents sont alors pris dans la glace et sont peu à peu soulevés par les couches de glace consécutives qui s'amoncellent tout au long de l'hiver. Au printemps, lors du dégel, les glaces se fractionnent et dérivent en charriant ces rochers. L'accumulation progressive de ces rochers occasionne une augmentation de la rétention des radeaux de glace, et conséquemment la prolifération de rochers semblables. C'est ce que l'on peut observer sur le marais de l'Île-aux-Coudres : une

rangée d'innombrables rochers tous alignés sur l'estran. Leur présence protège, en outre, le marais contre l'action des vagues. Elle améliore aussi la rétention des sédiments, le schorre se fixe en quelque sorte sur ces rochers pour progresser (Dionne, 2003 : 95-97; Schwartz, 2005 : 206).

Figure 16. Cordons glaciels de basse mer, marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

1.3. Schorre (salt marsh)

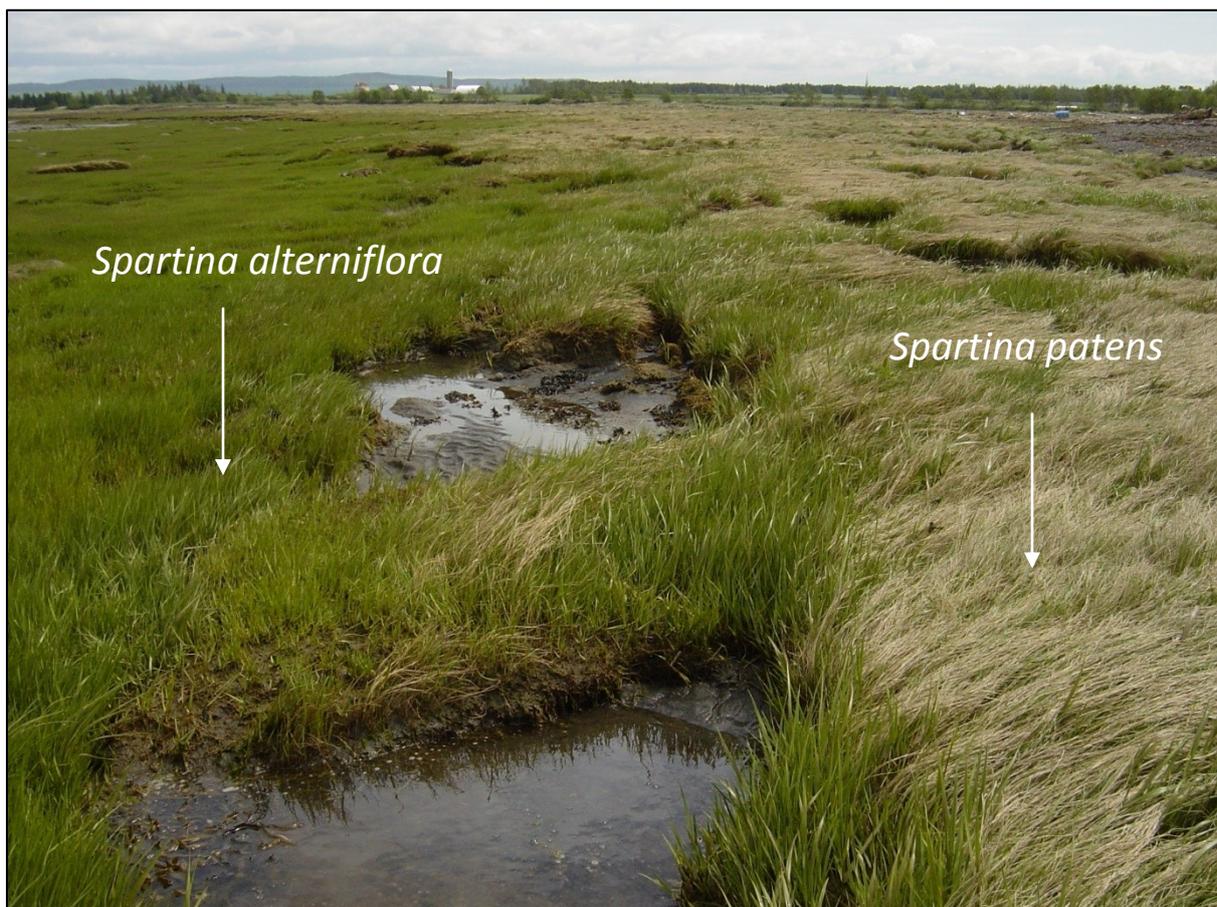
Le schorre correspond à la zone qui est submergée uniquement par les marées hautes de vives-eaux, c'est un écotone, un milieu de transition entre le monde marin et terrestre (Figure 15). Il se divise en deux parties distinctes : le schorre inférieur et le schorre supérieur. La limite inférieure du schorre inférieur correspond au niveau moyen de la mer qui est de 3,16 m d'altitude. La ligne des hautes eaux se situe à 6,2 m et atteint le schorre supérieur alors que la ligne des basses eaux, qui est de 0,1 m, atteint uniquement la slikke. Le développement du schorre se fait suite à l'exhaussement de la slikke et par sa consolidation grâce aux racines des végétaux. Le schorre inférieur se reconnaît par la présence monospécifique de la spartine à fleurs alternes (*Spartina alterniflora*), alors que le schorre supérieur se distingue par sa végétation diversifiée. Quelques marres peuplent également son

relief, ce sont des niches appréciées par les oiseaux pour leur reproduction (Paskoff, 2006 : 101-108; Verger, 2009 : 57-58, 64; Hatvany, 2012 : 91).

1.3.1. Schorre inférieur et dominance de *Spartina alterniflora*

Entre la zone des marées basses moyennes et celle des marées hautes moyennes se localise le schorre inférieur. Son étendue est intimement liée au marnage et sa pente est très faible avec une moyenne en dessous de 1 ‰. On reconnaît aisément ce secteur du marais par la présence unique de *Spartina alterniflora* (Figure 17). C'est la seule plante qui supporte une période de submersion équivalente à deux fois par jour par la marée, ce qui est approximativement 33% du temps total sur le schorre inférieur. *Spartina alterniflora* se confine aux marais salés dont les eaux ont une salinité égale ou qui surpasse 0,3 ‰ (Paskoff, 2006 : 105-106; Hatvany, 2012 : 91).

Figure 17. *Spartina alterniflora* et *Spartina patens*, marais de Kamouraska

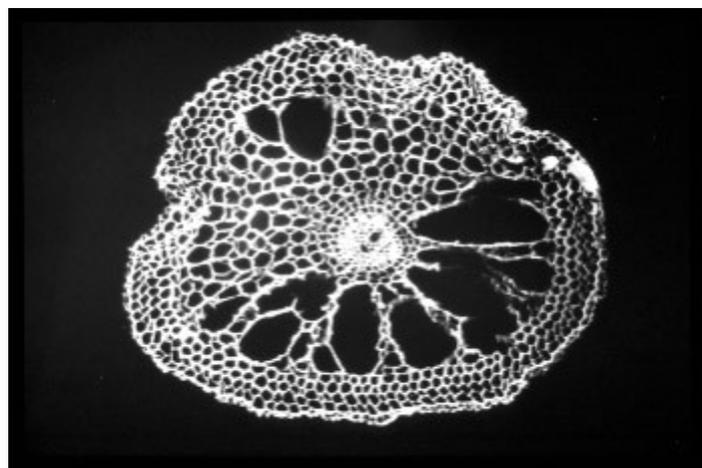


Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

Cette espèce vivace est propre à l'Amérique, dans l'estuaire du Saint-Laurent on la retrouve jusqu'à Saint-Jean-Port-Joli où elle fleurit durant les mois de juin-juillet. *Spartina alterniflora* est pionnière sur la zone intertidale, une fois établie elle s'étend grâce à ses rhizomes qui fixent en même temps les vases. Sa croissance rapide est pour beaucoup dans la réputation de milieux productifs que sont les marais salés. Extrêmement tolérante, elle peut adapter sa taille en fonction des conditions présentes. Si le sol est moins bien drainé ou davantage anoxique que de coutume, ou bien si le marais est surélevé, elle peut passer de 2 m à 25 cm. Sa productivité décroît alors jusqu'à 75 % et ses groupements sont plus denses. On remarque en général des spartines de grande taille sur le bord des chenaux, car la pente offre un bon drainage et les nutriments s'y concentrent. *Spartina alterniflora* ne peut pas survivre dans les zones qui sont submergées en continu malgré sa capacité à diffuser de l'oxygène jusqu'aux racines lors de son immersion. Ce sont les aerenchymes (Figure 18) qui sont responsables de ce phénomène; ces tissus forment des cavités remplies d'air se prolongeant des feuilles jusqu'au bout des racines (Redfield, 1972 : 204; Fleurbec, 1985 : 153-156; McKee et Patrick, 1988 : 476; Bertness, 2007 : 319, 328-332).

Entre la slikke et le schorre, on peut observer soit une micro-falaise ou une flexure. La présence d'une micro-falaise indique que le processus de l'érosion, lié à l'orientation du marais, est dominant à cet endroit. Les sédiments érodés sont transportés vers les extrémités et nourrissent le schorre inférieur. Il y a donc extension latérale. Au contraire, une flexure indique que c'est la sédimentation qui est le processus dominant. Le schorre inférieur est alors en progression à cet endroit (Verger, 1995 : 240).

Figure 18. Coupe transversale d'un aerenchyme



Source : Bertness, 2007: 332.

1.3.2. Schorre supérieur

Le schorre supérieur se situe entre les niveaux de la pleine mer moyenne et ceux des grandes marées d'équinoxe (au printemps et à l'automne). Il est inondé approximativement de 2 % à 25 % du temps par les marées. *Spartina alterniflora* cède la place à d'autres espèces moins tolérantes au temps de submersion, mais qui présentent tout de même des caractéristiques d'adaptation à ce milieu : la spartine étalée (*Spartina patens*) (Figure 17) qui domine, puis la glauce maritime (*Glauca maritima*), la limonie de nash (*Limonium nashii*), la verge d'or toujours verte (*Solidago sempervirens*), le carex écaillé (*Carex paleacea*), le plantain maritime (*Plantago maritima*), la potentille à fleurs tridentées (*Potentilla tridentata*), la salicorne d'Europe (*Salicornia europaea*), le jonc de la Baltique (*Juncus balticus*), l'arroche hastée (*Atriplex sp. (prostata ?)*), le troscart maritime (*Triglochin maritima*) et la spartine pectinée (*Spartina pectinata*) (Fleurbec, 1985 : 40).

Des marelles parsèment le schorre supérieur et la salinité de ces plans d'eau peut devenir élevée en cas d'évaporation. Elles sont créées par différents facteurs : par l'abrasion glacielle qui arrachent des radeaux de végétation (ce processus est d'ailleurs très actif dans les marais macrotidaux), par la décomposition organique qui mène à l'apparition de tourbière, par l'action humaine et animale ou bien elles peuvent être d'anciennes sections de chenaux qui ont été comblées. Ces petites mares abritent des petits invertébrés qui sont restés coincés lors du retrait du jusant, c'est de la nourriture de choix pour les oiseaux qui sont de passage ou qui viennent y faire leur nid. La biodiversité est corollairement plus élevée pour le schorre supérieur que pour le schorre inférieur (Dionne, 1989 : 281, 285).

De tous ces processus énumérés, le plus fréquent est l'arrachement glacielle des radeaux de végétation, ayant de 10 à 30 cm d'épaisseur, qui provoque la création d'anfractuosités sur le relief du schorre. Les radeaux les plus imposants sont généralement arrachés sur les parties latérales des chenaux ou aux abords d'une pente abrupte pour être transportés ailleurs sur le marais ou plus loin encore. La présence de ces radeaux modifie le relief et, par conséquent, la dynamique sédimentaire. L'accrétion verticale des sédiments est accentuée. Ceux qui sont déposés devant le schorre inférieur contribuent à l'accélération de son extension latérale. Cependant, après la saison de gel, ces radeaux sont érodés par les vagues auxquelles ils font obstacle (Dionne, 1989 : 285-287).

1.4. Caractéristiques de la végétation

Les communautés végétales vivant sur les berges du moyen estuaire du Saint-Laurent sont peu diversifiées, mais extrêmement tolérantes à leur environnement. Elles doivent en effet s'adapter aux fortes marées, aux variations du temps de submersion et de températures, ainsi qu'à la teneur en sel de l'eau (Environnement Canada, 2011).

Les groupements végétaux que l'on rencontre sur un marais pourraient semblablement vivre en eau douce et être encore plus productifs qu'ils ne le sont en milieu salé. Cependant ces plantes ne sont pas compétitives face aux espèces d'eau douce, les milieux salés sont donc un refuge pour elles. Sur le marais, les groupements se distribuent en bandes parallèles à la côte, en fonction de leur tolérance au temps de submersion par les marées et à la salinité du sol. La répartition de ces différentes bandes coïncide avec les niveaux de marée basse, haute moyenne et d'équinoxe. Toutefois, lorsqu'un micro-relief vient modifier la faible pente du marais, les groupements en bandes parallèles prennent la forme d'une mosaïque. Cette formation en bandes est causée par un autre facteur — elles résultent de l'évolution successive des groupements végétaux en lien avec l'extension du schorre (Fleurbec, 1985 : 38; Verger, 1995 : 240, 242; Cain, 2004 : 2548).

1.4.1. Mécanismes d'adaptation

Les habitats ayant un sol salé provoquent des stress physiques chez les végétaux semblables à ceux d'un milieu désertique puisque l'eau douce y est présente en faible quantité. La submersion continue par les marées rend le sol pauvre en oxygène et sans cet oxygène les plantes ne peuvent acheminer les nutriments dont leur organisme a besoin. Pour y remédier, les plantes ont trouvé divers moyens de s'adapter (Bertness, 2007 : 330).

En ce qui concerne *Spartina alterniflora* et le genre *Atriplex sp.* : leurs racines affleurent la surface pour faciliter l'apport en oxygène. Afin de diminuer la perte de l'eau au travers des racines par pression osmotique, les tissus végétaux ont une haute teneur en solutés — ce qui assure aux racines le pouvoir de retirer l'eau et les nutriments présents dans le sol pour les distribuer dans la partie subaérienne de la plante. Un autre mécanisme d'adaptation est l'aérenchyme (Figure 18), c'est un tissu dessinant des cavités remplies d'air à l'intérieur des racines et qui permet l'échange d'oxygène entre le système racinaire et le système caulinaire. Elles sont également munies de glandes pouvant concentrer et excréter le surplus de sel par les feuilles, cela permet à leur système de retrouver l'équilibre au niveau de leur

taux de salinité. *Glaux maritima* et *Limonium nashii* sont également munies de ces glandes (McKee et Patrick, 1988 : 476; Bertness, 2007 : 330-331).

D'autres mécanismes se rapportent aux plantes succulentes telles que *Salicornia europaea*, celle-ci retient d'importantes quantités d'eau à l'intérieur de ses tissus. Ces réserves la protègent de pertes par osmose qui pourrait lui être fatale. Pour réduire l'évapotranspiration, *Salicornia europaea* a recouvert ses feuilles de cire et a réduit leur surface au minimum. Pour compenser pour cette perte de surface disponible à la photosynthèse, elle peut l'élaborer au niveau même de sa tige (Bertness, 2007 : 332).

Bien que les plantes des marais salés se soient adaptées à leur milieu par divers moyens, il existe certains facteurs qui limitent leur expansion sur le schorre. Les stress physiques demeurent brutaux, aucune autre plante en dehors des espèces des marais n'y survit, et les stress biologiques que les plantes s'infligent entre elles hiérarchisent la dominance de certaines sur le schorre (Bertness, 2007 : 332-333).

1.4.2. Les stress physiques

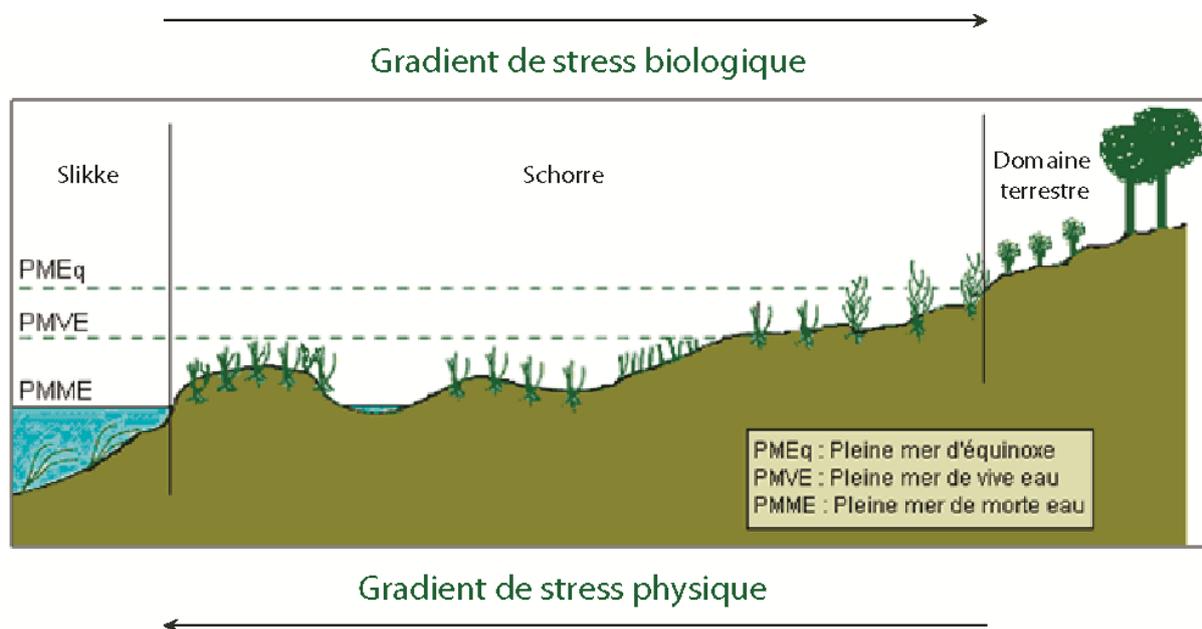
La répartition des plantes sur le schorre n'est pas l'unique résultat du temps de submersion par la marée et de la salinité du sol; la capacité d'adaptation de la plante joue un rôle majeur. Plus on se rapproche de la limite inférieure du schorre et plus le gradient de stress physique augmente puisque la durée et la fréquence de submersion s'intensifient graduellement. Au contraire, plus on s'en éloigne et plus il diminue (Figure 19). On retrouve donc sur ce gradient la répartition des plantes en fonction de leur tolérance. Sur la limite inférieure, seule *Spartina alterniflora* subsiste, puis elle laisse progressivement place à d'autres espèces également tolérantes aux conditions environnementales : *Salicornia europaea*, *Glaux maritima*, *Plantago maritima*, *Triglochin maritima*, *Limonium nashii*, *Spartina patens* et *Spartina pectinata* pour citer quelques exemples (Pennings and Callaway, 2003 : 1528; Bertness, 2007 : 332-335).

1.4.3. Les stress biologiques

Un gradient de stress inverse au stress physique (Figure 19) détermine la tolérance aux plantes à la compétition inter-espèce. Les espèces sont en compétition pour l'accès aux ressources limitées d'un milieu : l'eau, la lumière et les nutriments. Le stress biologique augmente continuellement du schorre inférieur au schorre supérieur. En effet, plus l'altitude

augmente et plus les espèces se multiplient, le stress physique est alors moins important : la durée de submersion et la salinité du sol diminuent. La salinité du sol évolue en fonction de l'élévation ce qui dépend de facteurs très différents. En basse altitude, la fréquence des marées réduit la probabilité d'accumulation du sel dans le sol. En moyenne altitude, l'ombre des plantes réduit l'évaporation superficielle de l'eau et limite ainsi sa concentration. Finalement, la pluie et le drainage lessivent davantage le sel en haute altitude (Pennings and Callaway, 2003 : 1528; Bertness, 2007 : 340).

Figure 19. Gradients de stress physique et biologique sur un marais intertidal



Source : Modifiée de source inconnue.

Ainsi, lorsque les plantes se trouvent en moyenne et haute altitude, les conditions plus favorables à l'implantation d'espèces végétales ont pour effet d'augmenter la capacité de compétitivité des plantes. Certaines espèces réussissent néanmoins à germer sur le schorre supérieur, mais meurent puisqu'elles ne peuvent survivre. C'est le cas de *Spartina alterniflora* qui pourrait survivre aux conditions présentes sur le schorre supérieur, toutefois elle ne résiste pas à la compétition inter-espèce. Ainsi, les espèces dominantes deviennent *Spartina patens* et, en plus haute altitude, *Spartina pectinata* bien qu'elles soient toutes deux accompagnées d'un cortège composé par d'autres espèces (Fleurbec, 1985 : 154-156; Bertness, 2007 : 333).

La majorité des plantes vivant sur les marais salés se reproduisent au moyen de leurs rhizomes malgré le fait qu'elles produisent aussi des graines. Cette ingéniosité leur permet de

coloniser ce milieu où la germination est parfois quasi impossible, la salinité étant trop élevée. Chaque année, de nouveaux clones et racines poussent à partir des rhizomes. Ces clones, dont la génétique est identique, demeurent reliés entre eux par les rhizomes. Ce phénomène permet aux plantes de partager entre elles l'eau, les nutriments et d'atténuer les stress, qu'ils soient biologiques ou physiques, auxquels elles font face. Par exemple, l'évacuation du sel en surplus et la fixation du carbone sont facilitées. La dissémination de leurs graines permet toutefois de coloniser des zones éloignées et, en général, sur des sédiments récemment mis en place. En outre, *Spartina alterniflora* met deux ans avant de produire un premier rhizome. Un autre moyen de dispersion de *Spartina alterniflora* est provoqué par l'action des glaces et des marées ; les glaces propulsées par les marées arrachent parfois des radeaux de végétation, puis les transportent ailleurs sur le marais. Lorsque les conditions sont idéales pour sa croissance, elle survit et poursuit son expansion. Cette méthode de dispersion reste cependant mineure si l'on compare à la dispersion des graines et à la production de clones à l'aide des rhizomes (Redfield, 1972 : 204, 211, 214; Bertness, 2007 : 336-338).

La capacité de résister à la compétition inter-espèce sur le schorre supérieur est le résultat de la combinaison de la taille et de la morphologie lors de la croissance de la plante. Plus les plantes croissent en de denses groupements et plus cela devient difficile pour d'autres espèces de s'implanter. L'espace aérien disponible est alors occupé par les tiges des clones très rapprochés et l'espace sous terre l'est aussi par le biais de la configuration des rhizomes. Les nouvelles plantes finissent par étouffer et disparaissent. L'avantage des groupements moins dense est leur rapidité de colonisation des espaces nus, comme c'est le cas de *Spartina alterniflora* (Bertness, 2007 : 336).

Malgré le fait que les plantes soient soumises à plusieurs formes de compétition entre elles, ce mécanisme permet la régulation des populations, et l'apport positif qu'elles s'apportent les unes aux autres et qu'elles retirent de leur symbiose avec les organismes qui peuplent le marais permet leur survie. Certaines plantes contribuent à améliorer la qualité du sol dont peuvent bénéficier d'autres espèces avoisinantes. Par exemple, la densité des racines stimule la croissance des plantes par une rétroaction positive. La perte d'oxygène par les aérochymes se concentre autour des racines dans la rhizosphère, cette présence accrue d'oxygène stimule la croissance des plantes, ce qui entraîne à son tour l'augmentation de l'oxygénation par la prolifération des aérochymes. Un autre exemple est la baisse de salinité du sol à une élévation intermédiaire grâce à l'ombre projetée sur le sol par les feuilles des

plantes. L'ombre limite l'évapotranspiration et donc la concentration du sel qui en résulte. Et, finalement, concernant la symbiose avec les organismes ayant pour habitat le marais, un exemple simple serait l'enrichissement du sol par le biais des excréments qui accentuent la présence de nitrogène dans le sol ce qui stimule la croissance des plantes. Conséquemment, cet engrais entraîne une plus grande production de biomasse accessible pour l'alimentation (Pennings and Callaway, 2003 : 1528; Bertness, 2007 : 325-326, 339).

1.5. Transfert d'énergie

Les écosystèmes littoraux sont davantage productifs que ceux en pleine mer et que ceux sur le continent. Ces écotones offrent de la nourriture en abondance pour la faune qui l'habite et les plantes retiennent également les sédiments riches en nutriments nécessaires à leur propre croissance. La productivité qui en découle est par la suite exportée et exploitée par les écosystèmes avoisinants. En conséquence de quoi, les écosystèmes littoraux font partie d'un continuum au long duquel se répartissent les espèces en fonction de l'accessibilité des nutriments.

Les débris végétaux et d'origine animale se décomposent en substances nutritives et leur sédimentation est possible *in situ*. Elles remontent ensuite à la surface au sein des courants d'eau froide, grâce aux vents, aux courants de marée et d'eau de ruissellement, et par mélange convectif. Le mélange convectif survient lorsqu'une stratification des différentes couches d'eau a lieu. Au moment où la couche d'eau superficielle se réchauffe, dès lors il n'y a plus d'échange entre la couche supérieure plus chaude et celle plus froide située en dessous. Puis, lorsque la température ambiante se rafraîchit, la couche supérieure se refroidit et s'enfonce en entraînant la couche inférieure vers la surface. Ainsi, les substances nutritives deviennent accessibles pour le phytoplancton qui vit sur les bords des rivages, comme en périphérie, et qui se maintient à la surface de l'eau afin de pouvoir produire la photosynthèse nécessaire à son maintien et à sa reproduction. Le phytoplancton est à la base de tous les réseaux trophiques, les eaux littorales attirent donc en abondance les poissons qui s'en nourrissent (Ricklefs et Miller, 2005 : 247-249).

Les plantes vivant sur les marais produisent des aliments pour la faune et offrent un abri à de multiples organismes (insectes, mollusques, reptiles, poissons, amphibiens, mammifères semi-aquatiques et oiseaux) pour s'y nourrir et s'y reproduire. Ceux-ci sont en majorité de nature détritivore. Ainsi, les escargots, les crabes et les amphibiens se nourrissent des débris des plantes. Les filtreurs comme les moules, les huîtres et les palourdes

s'alimentent du phytoplancton. Du reste, l'effet ravageur des herbivores sur la flore est minime, en effet, les plantes des marais sont difficiles à mâcher et à digérer car elles sont composées de cellulose et de silice dures. Comme plusieurs sécrètent aussi du sel, les herbivores ne sont pas attirés. Cependant, ils dévorent leurs fleurs et leurs graines. Les champignons et les bactéries anaérobies décomposent aussi la matière organique, ce qui diffuse une odeur de soufre (semblable à des œufs pourris), qui est un sous-produit de la décomposition (Bertness, 2007 : 352-353).

De plus, le vaste système racinaire qui se forme améliore la rétention des sédiments qui sont riches en matière nutritive, ce phénomène est relié à la faible profondeur de l'eau. Plus la profondeur est élevée et moins la sédimentation est substantielle et plus les sédiments risquent d'être transportés ailleurs, ce qui a d'ailleurs pour conséquence une baisse de la productivité (Pêches et Océans Canada, 2012).

Les plantes se nourrissent des éléments minéraux contenus dans le sol, les sels nutritifs fournissent l'azote essentiel pour les végétaux afin qu'ils puissent synthétiser les acides aminés (protéines) et qu'ils puissent produire de la photosynthèse. Ces sels nutritifs sont en réalité des cations (ions positifs), tels que le potassium, le calcium, le magnésium et le sodium. La richesse édaphique tient de la forte composition du sol en argiles ; les micelles qui les composent sont chargées négativement, elles attirent et retiennent ainsi les cations sur la surface du sol et les empêchent d'être lessivés. De cette façon, les sols des marais sont riches en éléments nutritifs disponibles pour alimenter sa végétation (Ricklefs et Miller, 2005 : 231-233).

Conséquemment, la productivité des marais tient la comparaison face à d'autres biomes. À titre d'exemple, un hectare de marais salé a une production biologique six fois plus élevée qu'un hectare de champ de blé (Pêches et Océans Canada, 2012).

Toute cette productivité est exportée vers d'autres écosystèmes marins à proximité, les courants, les marées et la turbidité transfèrent la matière organique d'un lieu à un autre. L'estuaire marin et le golfe du Saint-Laurent sont d'ailleurs de grands bénéficiaires des marais du moyen estuaire. On note la présence d'ichtyoplancton entre l'Île-aux-Coudres et le Saguenay, dont les deux espèces dominantes sont le Capelan et le Hareng. Ces larves naissent et se nourrissent dans le moyen estuaire avant de parvenir à un stade mature et d'achever leur existence dans l'estuaire et le golfe maritimes où il n'existe aucune zone d'alevinage pour ces espèces. Le zooplancton est recensé en petit nombre au Sud et à l'Ouest de l'Île-aux-Coudres

avant de se retrouver en vastes bancs en aval de l'île, secteur dans lequel la nourriture abonde et qui correspond en fait au transfert de la matière organique (Pêches et Océans Canada, 2012). Le marais de l'Île-aux-Coudres est donc d'une grande importance pour le maintien des réseaux trophiques du Saint-Laurent.

Les communautés biologiques du fleuve Saint-Laurent forment un continuum au long duquel la matière organique transite. L'accès aux ressources énergétiques n'est pas toujours facile puisque les eaux évacuent la matière organique sans répit. Comme la matière organique est un facteur limitant pour le système lotique, la répartition des espèces d'invertébrés (broyeurs, collecteurs, brouteurs et prédateurs) est régie entre elles, tout au long de ce continuum, afin de pouvoir retirer le plus de ces ressources énergétiques en fonction des besoins de chacune. Ces communautés peuvent alors assurer leur reproduction et leur place au sein de ce continuum. Ce renouvellement permet aux ressources énergétiques d'être réparties sur un gradient de temps continu durant lequel elles seront utilisées de façon optimale pour le remplacement des espèces (Vannote, 1980 : 130-132).

1.6. Perturbations environnementales

Les marais situés en haute latitude, tels que le marais de l'Île-aux-Coudres, sont soumis à des perturbations dues aux hivers rigoureux. Les principales sont la formation d'un pied de glace et l'accumulation de débris végétaux. Ces perturbations entraînent la dénudation de quelques portions de terrain qui laisse l'endroit disponible à une nouvelle succession végétale.

Ainsi, la formation d'un pied de glace en hiver peut éroder des secteurs du marais et tuer du même coup les plantes sur place, elle peut aussi déplacer des radeaux de végétation dans une nouvelle zone par arrachement et transport. Cependant, durant la période de temps où le marais est couvert par cette couche, le schorre est protégé de l'attaque des vagues (Bertness, 2007 : 342-343).

Une autre perturbation qui touche, elle, le schorre supérieur est l'accumulation de végétaux morts flottants et de débris qui forment un large et épais tapis lors de la mort des végétaux à l'automne. Au printemps, les marées restreignent cette couche de débris au schorre supérieur. Si elle n'est pas évacuée, celle-ci étouffe les plantes qui sont situées juste en dessus et engendre petit à petit la dénudation de la zone. Cette couche finira bientôt par se décomposer et nourrir le sol en nutriments. Le schorre inférieur subit un taux supérieur

d'immersion par la marée et n'est pas gêné par cette couche de débris. Le genre *Atriplex sp.* se retrouve en abondance dans les secteurs étouffés par ces débris (Bertness, 2007 : 343-344).

Ces perturbations mentionnées ci-haut génèrent donc des portions de terrain qui sont prêtes à être colonisées de nouveau. Les ressources contenues dans ces portions de terrain deviennent accessibles pour les nouveaux colonisateurs qui peuvent en tirer parti, c'est ce qu'on appelle la succession secondaire. Dans le schorre inférieur, seule *Spartina alterniflora* peut recoloniser efficacement cette zone, les autres plantes qui essaient finissent par périr. Sur le schorre supérieur, parfois des graines de plantes peu communes pour le secteur germent mais elles ne résistent pas longtemps face aux plantes à rhizomes. *Salicornia europaea*, le genre *Atriplex sp.* (plantes annuelles) et *Limonium nashii* (plante vivace) se reproduisent par germination, elles colonisent rapidement les zones perturbées, car leurs graines ont des poils qui leur permettent de s'accrocher aux débris flottants. Par la suite, ces plantes finissent tranquillement par disparaître de ces zones, laissant libre place aux plantes à rhizomes. Elles sont donc dépendantes des perturbations pour assurer leur pérennité (Bertness, 2007 : 344-346).

1.7. Étapes de formation d'un marais

Le marais intertidal en zone nordique se développe inégalement selon son exposition aux courants de marée, son taux de sédimentation et la vitesse à laquelle le développement de la végétation s'y fait. Les différentes étapes de développement sont reliées à l'élévation progressive du marais.

En premier lieu se produit la colonisation de bancs de sédiments dénudés par les graines de *Spartina alterniflora*, leur renforcement et l'expansion latérale des rhizomes. Apparaît ainsi le jeune marais. L'extension latérale du schorre est due au remplissage graduel par les sédiments de l'estran toujours protégé des vagues et du vent. L'origine de ces sédiments est, en grande majorité, les laisses de pleine mer, il se forme d'ailleurs un talus à l'emplacement de leur dépôt par la marée. Ce phénomène est à son paroxysme lors du solstice d'été puisque la hauteur moyenne des marées correspond davantage à ce talus. De plus, la chaleur habituelle de cette période de l'année favorise la fixation du sédiment par dessiccation et, l'abondance des végétaux étant plus importante qu'au solstice d'hiver, les eaux sont freinées et deviennent davantage propices à la sédimentation par gravité (Verger, 2009 : 58-60).

La présence de groupements pionniers de *Spartina alterniflora* au front du schorre inférieur incite à penser qu'un exhaussement de ce secteur est en train de se produire. Bientôt, il sera consolidé par les racines des plantes et fera partie intégrale du schorre inférieur. Il finira ensuite par être colonisé par d'autres espèces et appartiendra au schorre supérieur avec l'avancement continu du front du schorre inférieur (Verger, 2009 : 58-60).

Le jeune marais atteint une hauteur uniforme, sa surface couverte de *Spartina alterniflora* n'est pas parsemée de bancs ou de chenaux de drainage très importants. Ceux-ci se développent au fur et à mesure que grandit le marais. La pente des chenaux devient alors abrupte et leurs levées dépassent la hauteur de la végétation. Au niveau édaphique, on retrouve des couches contenant d'anciens rhizomes qui ont été recouvertes par de nouvelles générations (Redfield, 1972 : 214, 220-221).

Un marais mature se reconnaît par l'élargissement de ses chenaux et par les mares, situées entre la terre ferme et le marais, qui ont tendance à devenir plus profondes et à s'étendre latéralement, car l'apport en sédiments se raréfie. L'apport en eau salée devient aussi quasiment inexistant, les plantes d'eau douce commencent alors à pousser sur ce nouveau milieu à coloniser. Si la présence de *Spartina alterniflora* est déterminante pour le développement du schorre inférieur, il n'en est pas de même pour le schorre supérieur peuplé par d'autres espèces (Redfield, 1972 : 221-222; Desplanque and Mossman, 2004 : 66).

Au Québec, les marais ont commencé leur formation entre 8 000 et 6 000 ans BP. L'inondation de la vallée du Saint-Laurent par la Mer de Golthwait, confinée à cet endroit par les glaciers environnants, permit aux sédiments marins de s'y accumuler au moment du relèvement isostatique provoqué par le retrait des glaciers. Les taux d'accrétion pour les zones intertidales furent de 1,1 mm par année. Par la suite, autour de 8 000 à 4 000 ans BP, les végétaux, comme *Spartina alterniflora*, vinrent coloniser les zones dénudées de la vallée du Saint-Laurent par les glaciers (Hatvany, 2009 : 19).

Chapitre deuxième

Méthodologie

Tel que mentionné dans l'Introduction, la méthodologie spatio-temporelle employée pour cette étude se compose d'une revue de la littérature ayant pour sujet la géomorphologie des marais intertidaux salés (Redfield, 1972; Paskoff, 2006; Verger, 2009; Hatvany, 2012). Également à l'étude, les groupements végétaux types de ces milieux et leurs caractéristiques (Bertness, 2007; Fleurbec, 1985) appliquées à l'Île-aux-Coudres qui est le site de l'étude. Elle se compose finalement de la réalisation de transects biophysiques et d'un échantillonnage de la végétation sur le marais de l'Île-aux-Coudres qui ont eu lieu les 16 et 17 juin 2012. Puis, la réalisation d'une carte montrant l'évolution spatio-temporelle de la limite inférieure du schorre qui s'est effectuée à partir de la photo-interprétation vient compléter le tout. Des explications plus poussées en ce qui concerne les transects biophysiques et l'analyse de l'évolution spatio-temporelle des photographies aériennes peuvent éclairer le lecteur sur les résultats obtenus.

2.1. Transects biophysiques

La réalisation des transects biophysiques sur le marais de l'Île-aux-Coudres a permis de rendre compte du portrait actuel de la répartition des végétaux. Du même coup, l'observation de la géomorphologie du marais sur place a renforcé la compréhension de la dynamique de ce marais particulier.

Les transects biophysiques permettent de faire une image représentative de l'ensemble du marais en le divisant en parties égales à chaque 500 m. Avec les informations obtenues par les transects biophysiques, la réalisation d'une cartographie est possible. L'opérateur doit alors transposer les transects en zones; en imposant des limites à partir desquelles ces zones sont tracées. De plus, l'adaptation des relevés en fonction de la nature du terrain en fait un outil universel (Bazin et Gaudin, 2004; 9-10).

En ce qui concerne l'étape de la cartographie des transects, la délimitation de la frontière entre les zones de *Spartina alterniflora* et de *Spartina patens* entre les transects biophysiques s'est faite à partir de l'observation des différences zonales, entre les différents regroupements végétaux, observées sur les photographies aériennes (Figure 40). De même, la cartographie de la limite entre le schorre inférieur et supérieur s'est réalisée elle aussi grâce aux différentes répartitions des peuplements de *Spartina alterniflora* et de *Spartina patens*. Dans ces conditions, des problèmes de seuil peuvent être sujets à caution.

Le but de cette étape était de réaliser une synthèse sous une forme schématique du schorre afin d'en extraire des informations sur la structure du peuplement végétal. Cette synthèse met en lumière le phénomène de succession spatiale des populations végétales qui peuplent le schorre. Celui-ci est généré par la relation entre le niveau atteint par les marées et les capacités d'adaptation de *Spartina alterniflora* et de *Spartina patens*.

Les transects biophysiques viennent confirmer ou infirmer les observations dévoilées par les photographies aériennes tout comme c'est le cas pour les descriptions dont les textes renferment. Par exemple, distinguer *Spartina alterniflora* est généralement chose aisée sur une photographie aérienne, ce qui n'est pas le cas de *Spartina patens* qui pose plus de difficulté. Puisque *Spartina patens* sert de repère pour délimiter le schorre supérieur il est important de pouvoir la localiser adéquatement (Hatvany, 2012 : 90-94). C'est donc une étape cruciale pour la validité d'une étude semblable.

2. 2. Analyse spatio-temporelle des photographies aériennes

L'analyse spatio-temporelle permet de donner une représentation visuelle de l'évolution physique d'un milieu pour un intervalle de temps (Hatvany, 2012 : 90). Cette méthode a été choisie dans le cadre de cette étude, non seulement en fonction des outils à notre disposition, mais également en fonction des avantages qu'elle procure.

Le développement d'un écosystème varie dans l'espace et sur une échelle de temps. Il est lui-même contenu dans un écosystème toujours plus vaste et ainsi de suite. Cette hiérarchie règle l'organisation du monde vivant, de la molécule à l'écosystème, chacun étant interdépendant. Dans ces conditions, l'étude entière de la biosphère est pour ainsi dire impossible, c'est pourquoi toute étude doit se limiter à un écosystème précis et des paramètres définis capables d'expliquer le fonctionnement d'un écosystème selon une échelle

spatio-temporelle. L'espace devient révélateur des mécanismes sous-jacents au fonctionnement d'un écosystème, de leurs interactions et de leur organisation spatiale. Il va sans dire que la compréhension de la structure et du fonctionnement est liée à la variabilité dans le temps et dans l'espace. Ce type d'analyse spatio-temporelle contribue ensuite à la compréhension de système davantage complexe (Frontier et Pichod-Viale, 2008; Cernesson et Müller, 2010 : 17). De plus, l'un des avantages de la présentation de l'analyse spatio-temporelle au lecteur est de lui offrir la possibilité de voir et non uniquement d'imaginer, renforçant ainsi la compréhension et la mémorisation des connaissances (Hatvany, 2012 : 91-92).

La mesure de l'évolution d'un marais se fait grâce à l'analyse des mouvements latéraux générés par l'accrétion ou l'érosion du schorre. Le déplacement de la limite du schorre inférieur indiquera justement les modifications subies. Afin de rendre compte de ces évolutions, le traçage des limites du schorre inférieur doit être fait séparément pour chaque photographie aérienne séquentielle à l'aide d'ArcGIS. Cette étape réalisée, les différentes limites obtenues seront regroupées dans le but d'obtenir la cartographie de cette évolution spatio-temporelle (Hatvany, 2012 : 90-91).

La combinaison des photographies aériennes, ou des cartes anciennes, avec les logiciels accessibles aujourd'hui génère un outil qui permet la visualisation de l'évolution spatio-temporelle de divers milieux. Par exemple, avec le logiciel ArcGIS il est possible de visualiser et de superposer les images de 1964, 1980, 2001 et 2011 afin de visualiser l'évolution globale du marais de l'Île-aux-Coudres durant ces années. Avec la création de polygones à partir de chacune de ces images, ArcGIS offre la possibilité de mesurer ces différentes superficies et de pouvoir les comparer afin de quantifier leur évolution (Tableau 3).

Comme c'est le cas pour les transects biophysiques, cet outil oblige l'utilisateur à aller sur les lieux étudiés en vue de vérifier les observations obtenues à l'aide des photographies aériennes. Certaines observations peuvent s'avérer fausses et compromettre la justesse d'une recherche. D'ailleurs, la confirmation de certaines données par les coordonnées GPS s'avère efficace et rapide.

L'analyse spatio-temporelle est donc un outil récent permettant une vision plus globale des changements environnementaux. L'analyse effectuée à l'aide de documents anciens et de logiciel performant permet de jeter un coup d'œil en arrière et de voir

l'évolution selon les différents contextes historiques. Cette nouvelle manière d'étudier l'environnement réduit la linéarité de penser que les milieux évoluent soit vers l'érosion ou l'accrétion sans tenir compte que les deux phénomènes sont bien souvent interconnectés (Hatvany, 2012 : 90, 94).

Chapitre troisième

3. Présentation des résultats

Les résultats de cette étude sont divisés en deux sections, la première présente sous forme cartographique l'évolution spatio-temporelle du marais, alors que la deuxième section fait part des observations notées lors de la réalisation des transects biophysiques sur le marais.

La présentation des photographies aériennes de 1964, 1980, 2001 et 2011 (Tableau 1) est faite en ordre chronologique. Une première fois afin de localiser des éléments importants pour la compréhension de la dynamique environnementale du marais, et une seconde fois afin de présenter la cartographie réalisée à partir des photographies aériennes. Sur cette dernière série de photographies est illustrée la démarcation entre le schorre inférieur et la slikke. À la suite de quoi, est exposée la synthèse de ces résultats sous la forme d'une nouvelle carte, celle-ci est appuyée par des mesures réalisées à l'aide d'ArcGIS sur les différents taux de sédimentation. Ceci constituera une nouvelle banque de données sur l'évolution du marais pour une période de 47 ans.

Finalement, les observations consignées sur les regroupements de végétaux et sur la géomorphologie lors de la sortie de terrain des 16 et 17 juin 2012 viendront ajouter des éléments complémentaires à la cartographie. Du reste, une dernière carte fut réalisée avec les données des transects biophysiques afin d'illustrer les répartitions des espèces fondamentales se trouvant sur le marais (*Spartina alterniflora*, *Spartina patens*) dont la présence ou l'absence délimite les formes majeures du marais (slikke, schorre inférieur et schorre supérieur). Cette dernière carte renseigne donc sur la constitution actuelle du marais.

3.1. Photographies aériennes

3.1.1. Photographie aérienne de 1964

La première photographie aérienne du marais de l'Île-aux-Coudres date de 1964 (Figures 20 et 24). Cette photographie est très pâle si l'on compare aux autres photographies aériennes de l'Île-aux-Coudres de la série temporelle. Grâce à cette spécificité, on voit mieux les contours limitant les zones de *Spartina alterniflora* que pour les photographies subséquentes. Le schorre inférieur apparaît effectivement plus foncé que le schorre supérieur. Plusieurs zones du schorre sont dénudées et la densité de la végétation n'est pas élevée. On distingue aussi très bien des zones pionnières qui s'avancent vers la slikke. Cependant, la plupart des chenaux sillonnant le schorre ne deviennent apparents que lorsque l'on agrandit la photographie. Leur tracé se confond avec les zones alternantes de dénudation et de végétation. Le principal chenal, qui est formé de la rencontre de deux chenaux, a un parcours singulier, traversant le schorre au complet du Nord-Ouest vers le Nord, divisant le schorre en deux parties distinctes.

Les contours de la slikke sont bien définis, le niveau de la marée étant bas, le fucus apparent délimite bien la frontière supérieure de la slikke. La traînée de sédiments, laissée lors du retrait de la marée, qui s'étend derrière les méga-blocs sur la slikke pointe en direction Nord-Est, ce qui correspond à la direction empruntée par les vents dominants et les vagues. Une légère turbidité formée par les courants est également visible aux alentours du marais. Sur le domaine terrestre, on observe d'anciennes crêtes de plage qui témoignent de la transgression marine de la Mer de Golthwait.

3.1.2. Photographie aérienne de 1980

La première chose que l'on remarque sur cette photographie (Figures 21 et 25) est la forte densification de la végétation depuis 1964. L'intervalle de temps séparant celle de 1964 et de 1980 est de 16 ans, il est donc normal de constater des écarts observables. En regardant avec attention l'évolution du tracé des chenaux entre 1964 et 1980, il en ressort que les chenaux principaux sont restés identiques au fil des ans. Seule une légère modification des chenaux secondaires à l'Ouest a été observée et une plus minime encore à l'Est du marais. Le centre est resté stable.

Des éléments similaires à la photographie de 1964 reviennent : la traînée de sédiments derrière les méga-blocs est visible et pointe toujours vers le Nord-Est. Lors de l'agrandissement de la photographie, on constate que le fucus situé à proximité du schorre inférieur est positionné perpendiculairement à la côte suivant l'évacuation des eaux par le drainage. Ce phénomène était beaucoup plus discret sur la photographie de 1964. La turbidité observable est plus élevée que pour celle de 1964. Or, on voit également le jusant évacuant par les chenaux des eaux chargées en sédiments. Et les reliques d'anciennes plages sont encore visibles du haut des airs, bien que moins apparentes que sur la photographie de 1964.

3.1.3. Orthophotographie de 2001

L'écart temporel séparant la photographie précédente de l'orthophotographie de 2001 (Figures 22 et 26) est le plus considérable de la série temporelle avec 21 ans au total. La densification de la végétation semble s'être faite surtout sur le secteur Est durant cet intervalle. Sur l'orthophotographie de 2001, on peut observer un niveau de marée plus élevé que sur les autres photographies. C'est un niveau de mi-marée (plus ou moins de 3 m), les sédiments sont par conséquent imbibés d'eau et l'on distingue plus difficilement l'emplacement de la slikke. Cependant, nous avons évalué cette photographie comme étant conforme puisque l'on peut très bien apercevoir la vasière à fucus et les blocs glaciels situés en deçà de la limite inférieure du schorre.

Lors de l'agrandissement de l'orthophotographie, on remarque que la qualité de la résolution est moindre que pour les photographies aériennes de 1964 et de 1980. Cependant, le tracé des chenaux est plus apparent que sur les autres photographies aériennes. Il n'a d'ailleurs pas évolué entre 1980 et 2001. Un secteur de la slikke émerge, au Nord-Ouest du marais, abordant une forme triangulaire qui semble être le lieu d'une forte sédimentation (Figures 22 et 23).

L'inclinaison des vagues allant toucher la côte est sensiblement réfractée, car l'inclinaison normale des vagues est parallèle à la côte. Étant donné que les courants principaux de ce secteur du moyen estuaire suivent l'axe du Saint-Laurent du Sud-Ouest vers le Nord-Est, la dérive littorale qui génère le déplacement de sédiments emprunte la même direction en suivant la ligne de côte. Comme l'axe fluvial s'élargit à la suite de l'île d'Orléans et de l'Isle-aux-Grues (en amont de l'IAC), l'énergie de ces courants doit se dissiper et s'affaiblir quelque peu. En observant la Figure 11, on constate que les courants sont déviés aux abords de l'île et que le contournement de l'île par les courants entraîne la formation

d'une importante zone de turbidité en aval de l'île. De plus, le courant chargé de sédiments s'engouffre dans le passage de l'Île-aux-Coudres en évitant quelque peu le marais. Comme la force d'un courant se concentre en son centre, l'énergie reçue par le marais ne doit pas générer de forte érosion (Verger, 2009 : 17, 26).

3.1.4. Photographie aérienne de 2011

Afin de produire cette dernière image, deux photographies ont été téléchargées à partir de *Google Earth* dans le but de préserver la qualité de la résolution. Puis, chacune a ensuite été géoréférencée pour la réalisation d'une mosaïque (Figures 23 et 27). La résolution reste toutefois plus limitée que pour les autres photographies.

Sur l'image, le niveau de la marée est assez élevé, mais l'on aperçoit aisément les contours du schorre inférieur. La slikke est du reste plus dégagée que pour la figure précédente. De plus, certaines levées sont plus larges à l'Est du marais et un recul de la végétation y est notable sur celles-ci comparativement à l'orthophotographie de 2001. Les chenaux du Sud-Ouest sont difficilement discernables, étant immergés, tandis que ceux du Nord-Est émergent et sont faciles à voir. On peut donc déduire que l'élévation est moindre pour la portion de l'Ouest du marais que pour celle de l'Est.

Un triangle de sédimentation est de nouveau apparent sur la slikke au Nord-Ouest du marais, on peut supposer que cette zone a effectivement un taux de sédimentation plus élevé que sa périphérie, peut-être dû à la présence des blocs glaciels, et que ce secteur est en exhaussement. On remarque aussi un banc de sable, noté lors de la sortie de terrain (voir Figure 23), qui n'apparaît que sur cette photographie. Sa genèse est par conséquent relativement récente.

3.2. Cartographie de la limite inférieure du schorre à partir des photographies aériennes de 1964 à 1980

Les Figures 24 à 27 illustrent les différentes limites entre le schorre inférieur et la slikke tracées par photo-interprétation. En regardant les photographies séparément, il est difficile d'affirmer que le marais a bel et bien évolué et de quelle manière. C'est pourquoi la Figure 28 combine toutes ces limites afin de pouvoir visualiser simultanément cette évolution spatio-temporelle. Dans le but de quantifier cette évolution, diverses mesures ont été prises à

l'aide d'ArcGIS en transformant tous ces tracés en polygones. À partir de ceux-ci, il est possible de connaître leur localisation respective. Le tableau 3 résume les données compilées en hectares. La superficie du schorre en 1964 était de 64,73 ha. En seize ans il a gagné 11,58 ha pour atteindre un total de 76,31 ha en 1980. Le taux moyen était alors de 0,72 ha/année. Il passe ensuite à un bilan positif de 0,42 ha/année pour les vingt et un ans qui ont suivi avec un gain de 8,79 ha pour la superficie totale. En 2001, la superficie du schorre était de 85,1 ha. Pour finir, dix ans plus tard en 2011, le schorre a une superficie de 85,79 ha, c'est une augmentation de 0,69 ha avec un taux moyen d'accrétion de 0,069 ha/année. Pour résumer, le schorre du marais de l'Île-aux-Coudres a fait un gain total de 21,06 ha, ayant passé de 64,73 ha en 1964 à 85,79 ha en 2011 (avec un taux moyen de 0,45 ha/année).

Tableau 3. Superficie du schorre de l'IAC de 1964 à 2011

Année	Hectares	Changement (Ha)	Taux moyen
1964	64,73	—	—
1980	76,31	11,58	0,72
2001	85,1	8,79	0,42
2011	85,79	0,69	0,069
		Total	\bar{x}
		21,06	0,45/année

On peut remarquer grâce à la Figure 28 que ce sont les extrémités du schorre qui ont subi le plus de modifications au cours des années. Le schorre en 1964 est plus proche de la côte que ne l'est sa localisation subséquente. Le schorre de l'Ouest est plus pointu et mince qu'en 2011 où il devient plus arrondi et large. Toutefois, l'expansion de ce secteur reste confinée à un seul endroit et semble s'être produite majoritairement entre 1980 et 2001. L'extension la plus importante du schorre s'est effectuée sur cette extrémité avec la progression de 215,96 m entre 1964 et 2011. Alors que pour l'extrémité Est, l'expansion est distribuée plus uniformément et semble avoir eu lieu principalement entre 1964 et 1980. Malgré ces changements, il n'y a pas de modification notable au centre du marais qui est resté relativement stable; il ne montre pas de signe d'expansion. En effet, on peut voir que les différents tracés du schorre se superposent, surtout les tracés de 2001 et 2011 qui sont très semblables. Il n'y a pas de régression à l'exception d'un petit secteur proche de l'extrémité Ouest qui a été érodé entre 1980 et 2001 ainsi qu'un secteur situé entre le domaine terrestre et l'extrémité Ouest qui a reculé et progressé de façon cyclique.

Figure 20. Marais de l'Île-aux-Coudres, 1964



Figure 21. Marais de l'Île-aux-Coudres, 1980



Évacuation des eaux
chargées de sédiments

Traînée de sédiments

Densification de la végétation

Chenal traversant le marais
du Nord-Ouest vers le Nord

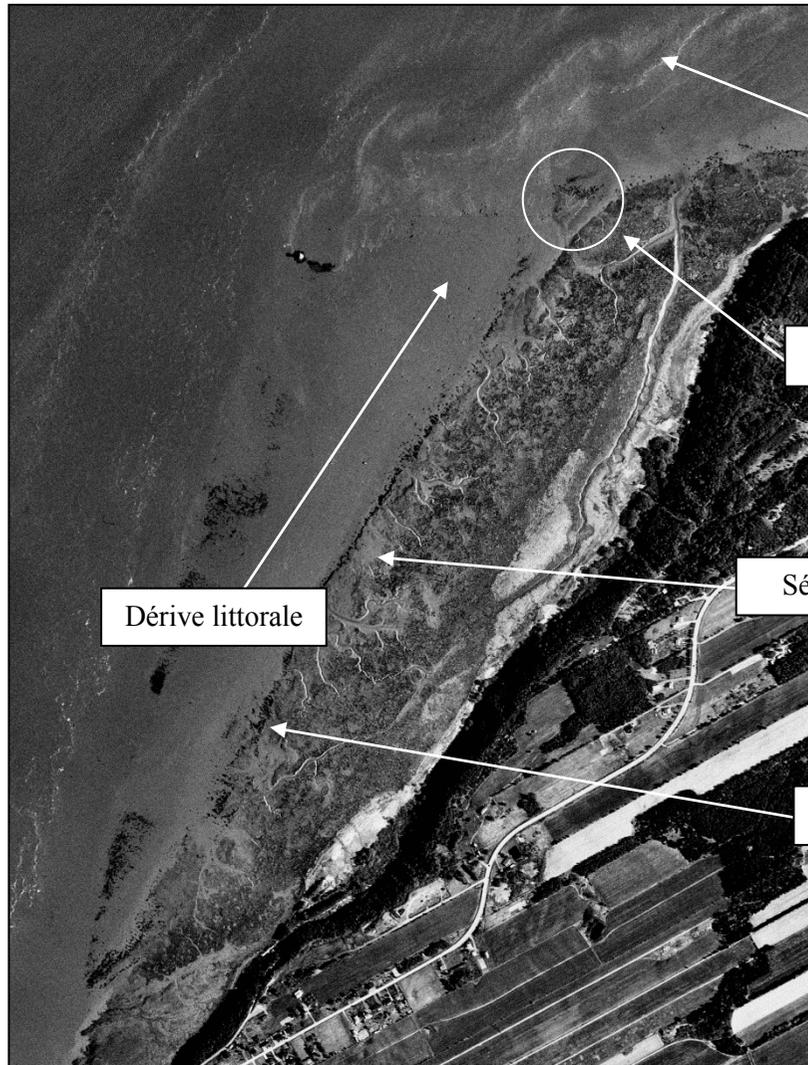
Zone pionnière

Anciennes crêtes de plage

Source : Photographie aérienne Q64114-41, 1 : 15 840, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, La Géomathèque, 1964.

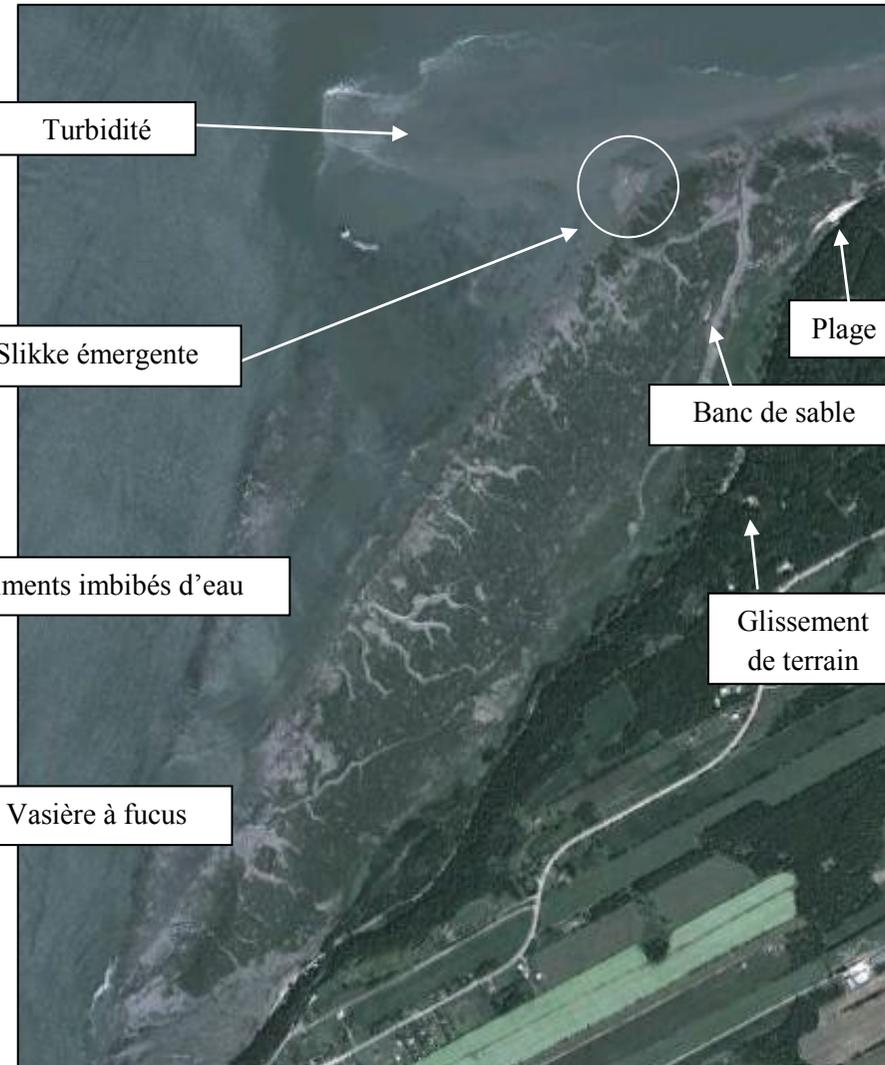
Source : Photographie aérienne Q80624-158, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, La Géomathèque, 1980.

Figure 22. Marais de l'Île-aux-Coudres, 2001



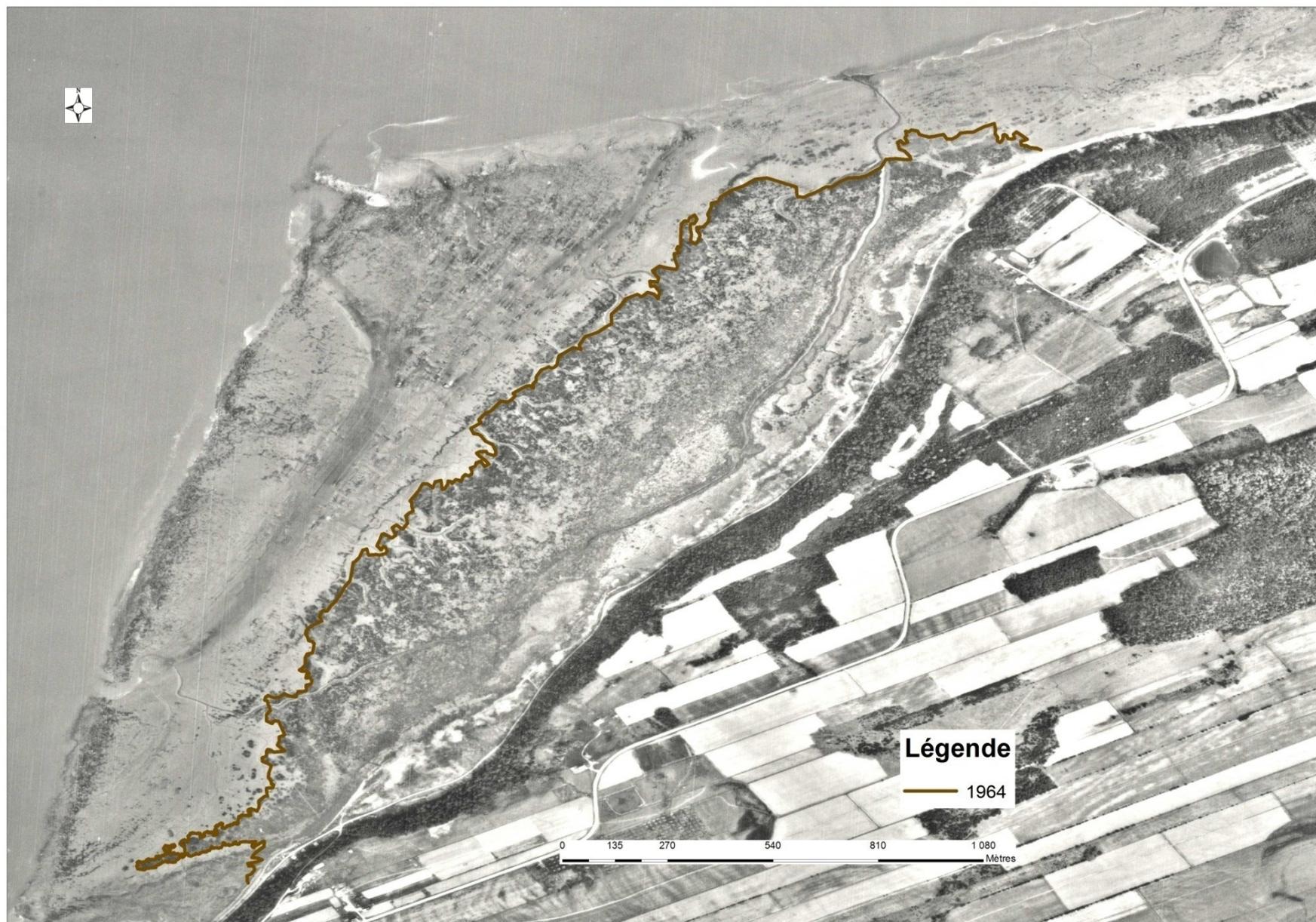
Source : Orthophotographie Q01806-070, 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, Photocartotheque québécoise, 2001.

Figure 23. Marais de l'Île-aux-Coudres, 2011



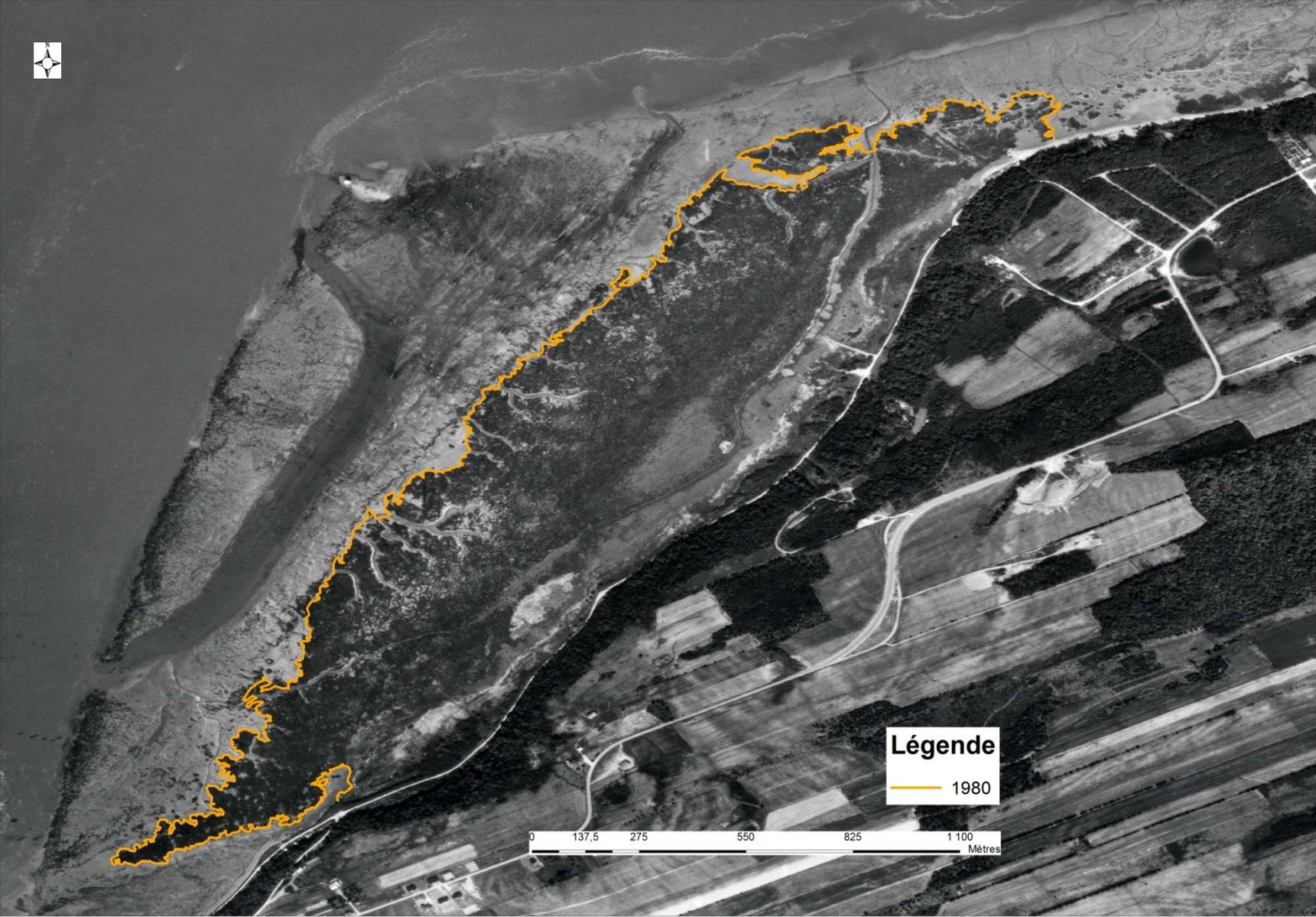
Source : Photographie aérienne de Google Earth, 1 : 6 180, 2011.

Figure 24. Limite du schorre inférieur en 1964, marais de l'Île-aux-Coudres



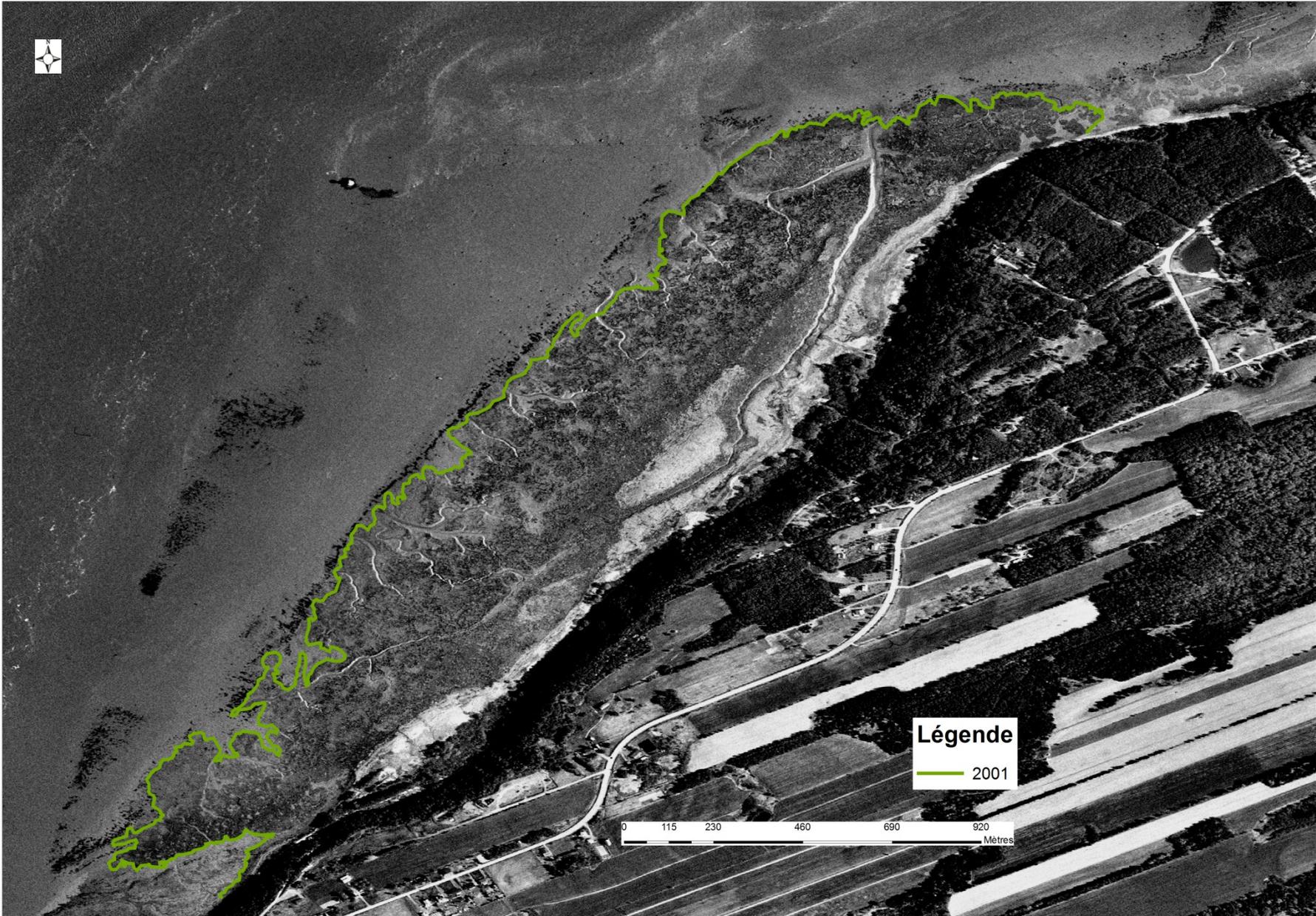
Source : Modifiée de photographie aérienne Q64114-41, 1 : 15 840, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, La Géomathèque, 1964. Par Marie-Claude Drolet, 2012.

Figure 25. Limite du schorre inférieur en 1980, marais de l'Île-aux-Coudres



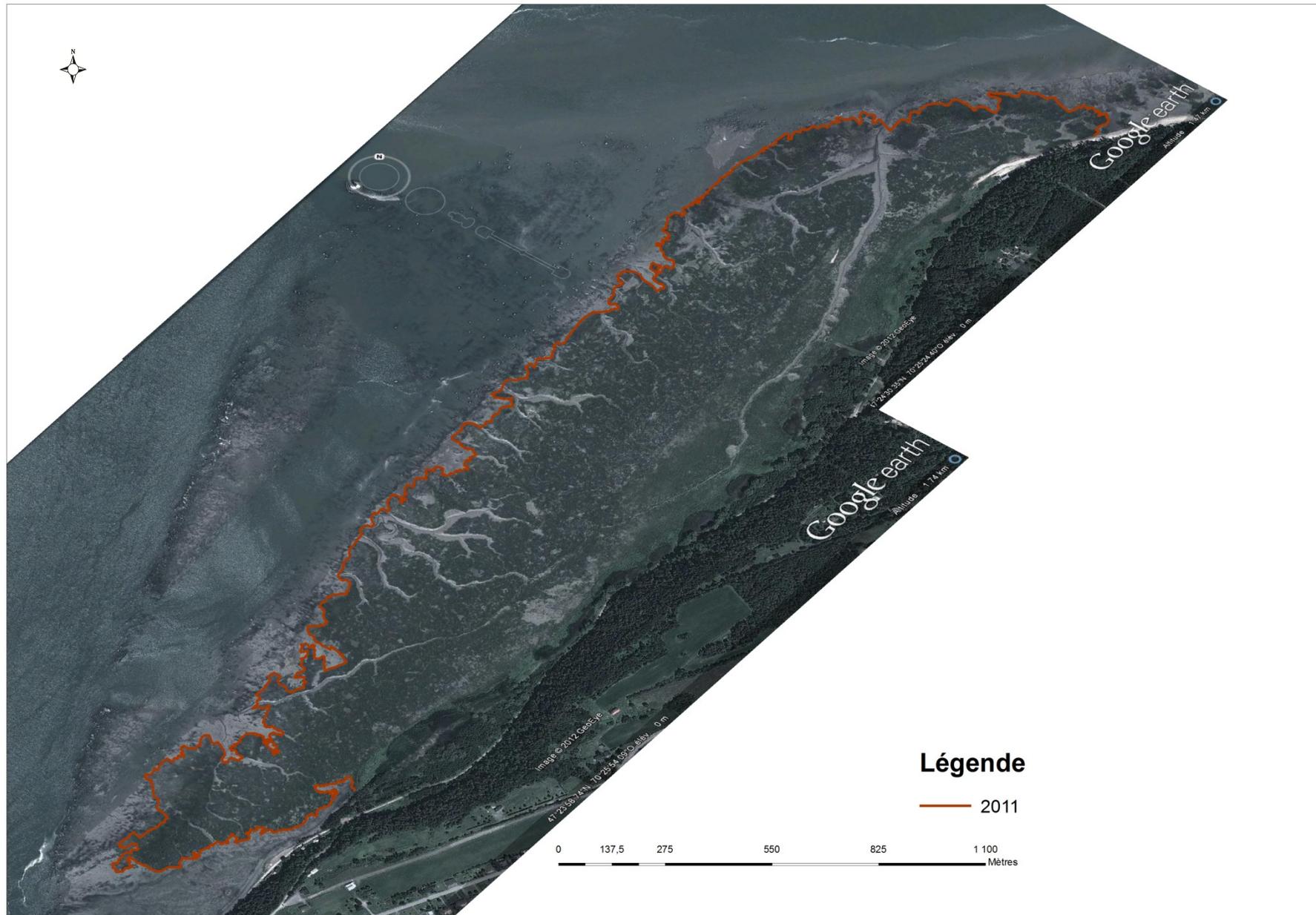
Source : Modifiée de la photographie aérienne Q80624-158, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, La Géomatèque, 1980. Par Marie-Claude Drolet, 2012.

Figure 26. Limite du schorre inférieur en 2001, marais de l'Île-aux-Coudres



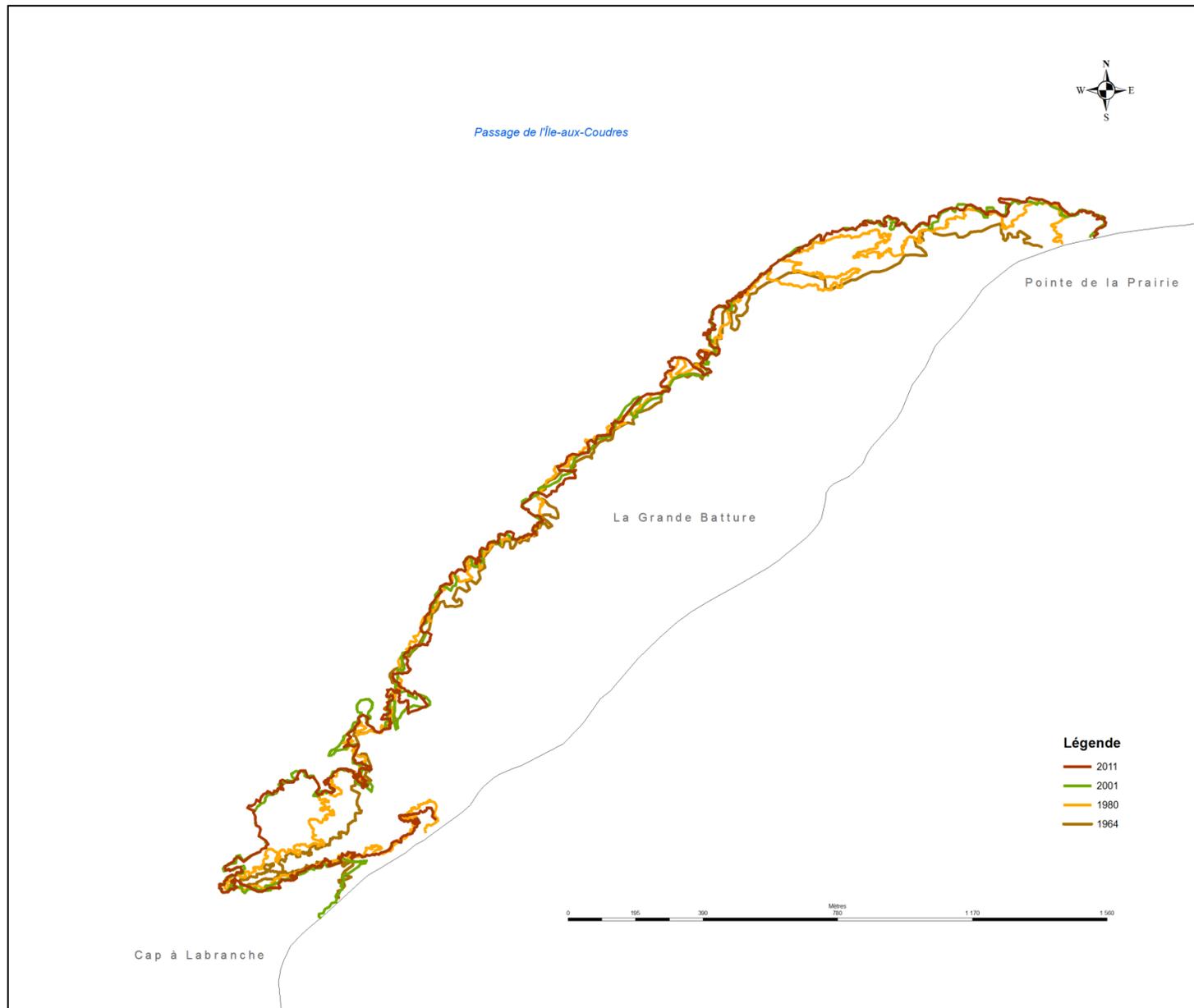
Source : Modifiée de l'orthophotographie Q01806-070, 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Gouvernement du Québec, Photocartotheque québécoise, 2001. Par Marie-Claude Drolet, 2012.

Figure 27. Limite du schorre inférieur en 2011, marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Modifiée de la photographie aérienne de Google Earth, 1 : 6 180, 2011. Par Marie-Claude Drolet, 2012.

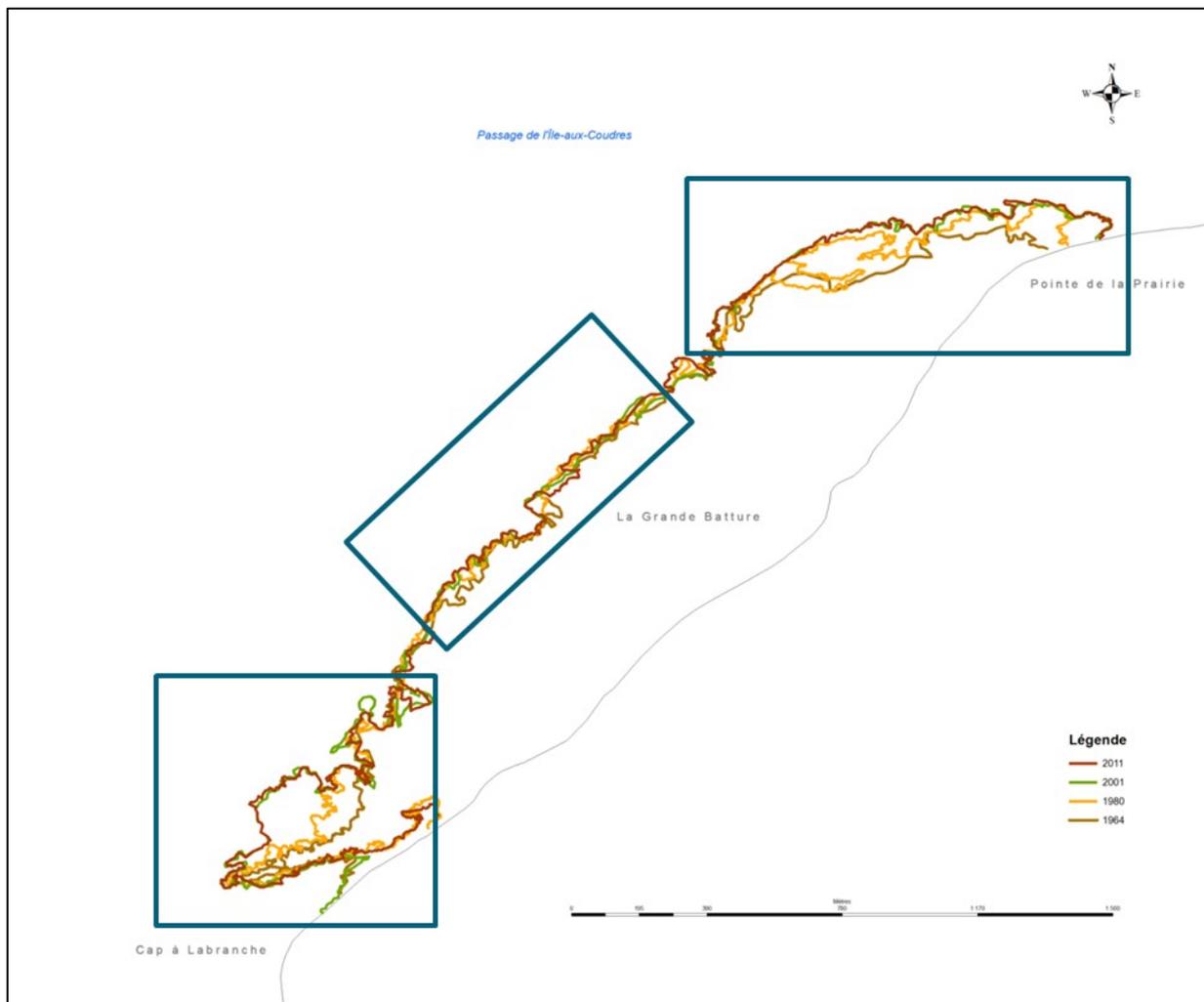
Figure 28. Évolution des différentes limites du schorre inférieur du marais de l'Île-aux-Coudres, 1964-2011



Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

Ces résultats sont résumés sur les Figures 29 à 32 afin d'illustrer ces propos. Des secteurs de la Figure 28 ont été agrandis et les éléments les plus importants ont été énumérés.

Figure 29. Secteurs qui ont servi aux agrandissements sur la carte de l'évolution spatio-temporelle de l'Île-aux-Coudres, 1964-2011



3.3. Observations consignées lors des sorties de terrain et cartographie

3.3.1. Observations consignées lors des sorties de terrain

Les relevés de terrain aident à comprendre la dynamique actuelle du marais de l'Île-aux-Coudres en examinant les formations physiques et végétales qui y ont été remarquées. Les observations sont présentées en ordre chronologique, selon l'ordre des transects effectués. Viennent ensuite des observations générales relevées entre les transects ou englobant plusieurs transects.

Figure 30. Agrandissement du secteur Ouest

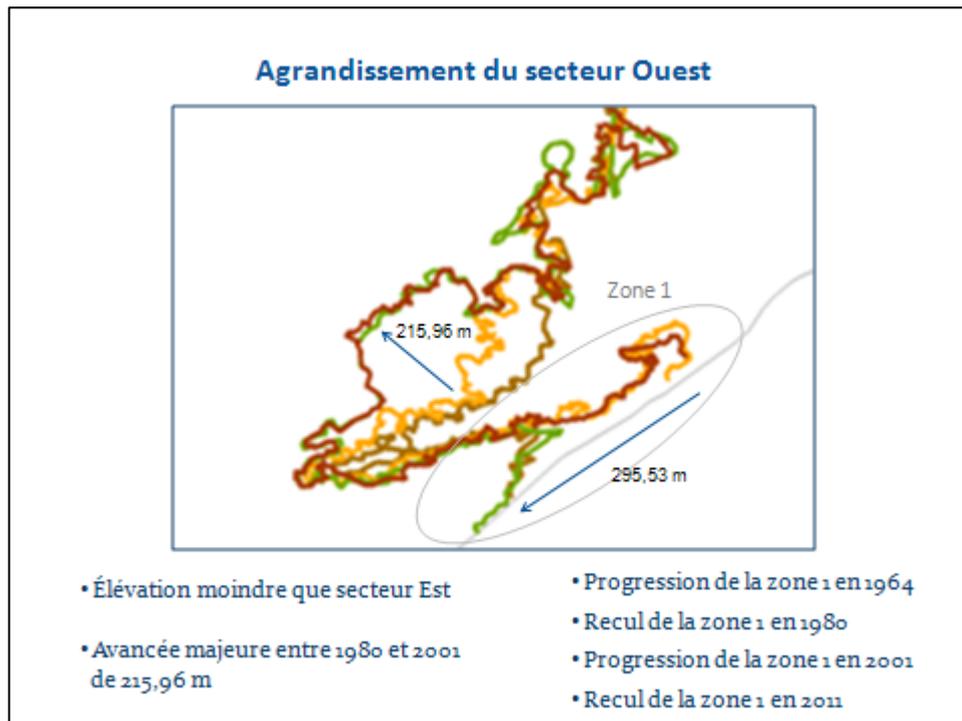


Figure 31. Agrandissement du secteur Est

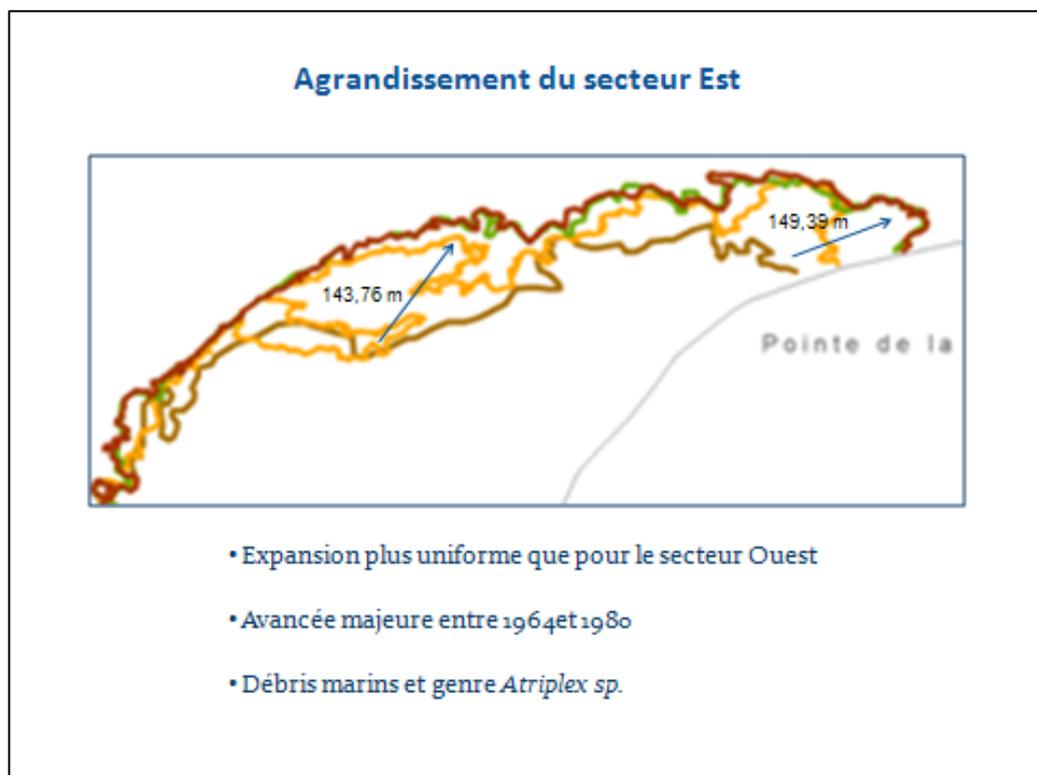
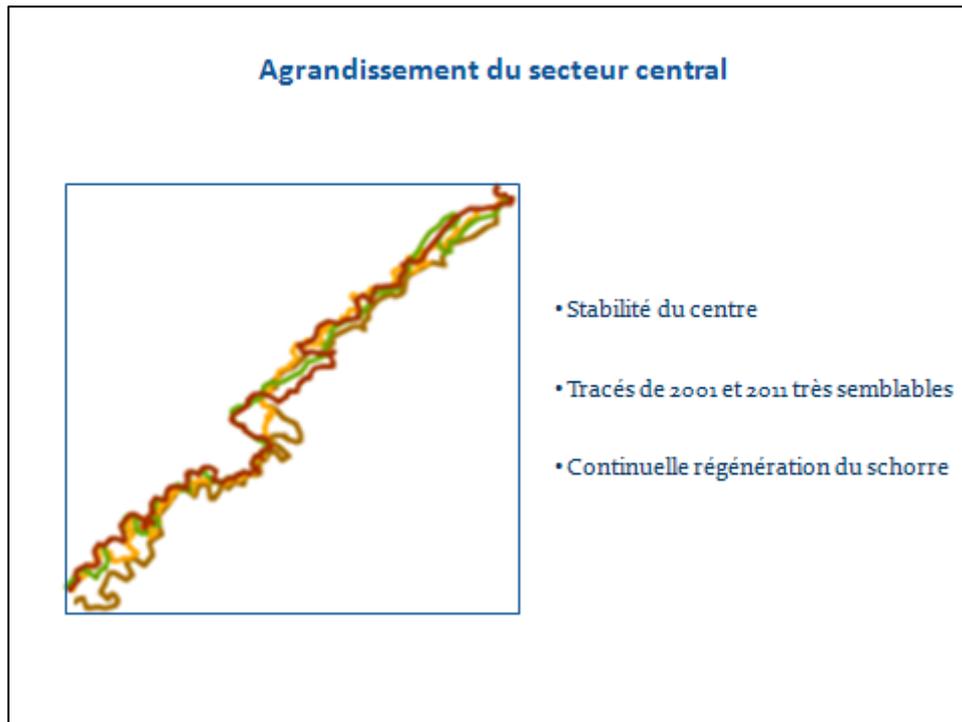


Figure 32. Agrandissement du secteur central



3.3.2. Transect 1.

Pour le transect 1 (Figure 12), le schorre supérieur est peuplé de *Limonium nashii*, *Plantago maritima*, *Solidago sempervirens*, *Spartina alterniflora* et *Spartina patens* (Tableau 4). *Limonium nashii* est reconnue pour se plaire en présence de *Plantago maritima*, on les retrouve souvent ensemble dans les groupements végétaux des marais salés. *Solidago sempervirens* se trouve habituellement sur des sédiments fixés, on peut donc supposer que ce secteur du schorre est plutôt mature (Fleurbec, 1985 : 50, 97). À l'extrémité du schorre inférieur, on note que *Spartina alterniflora* devient plus courte en direction du large. En effet, sa grandeur est influencée par les conditions environnementales. Un sol moins bien drainé, anoxique et dont le taux de salinité est plus élevé sera colonisé par des spartines de petite taille dont les groupements seront plus denses. *Spartina alterniflora* exhibera une grande taille aux abords des chenaux, car les nutriments s'y concentrent. Ses groupements seront plus denses au moment où le temps de submersion par la marée diminue (Fleurbec, 1985 : 154, 156; Verger, 2009 : 47).

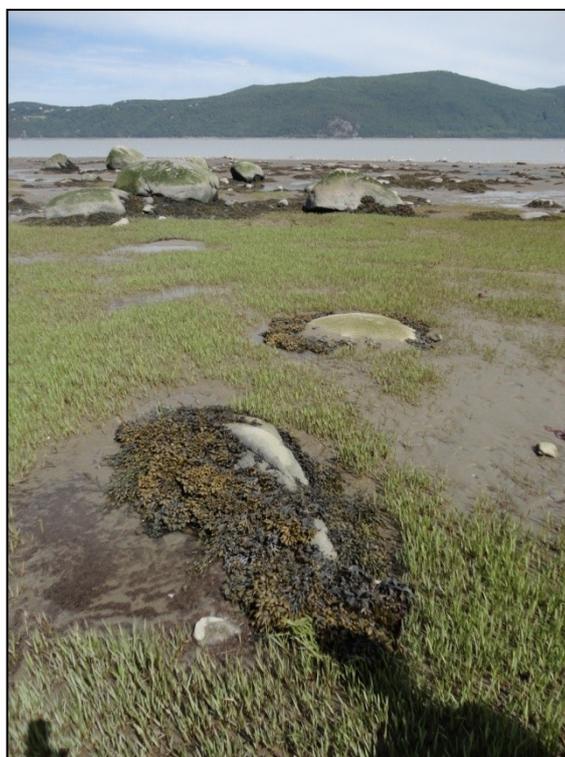
Des marelles couvrent 15 % de la surface et quelques radeaux de végétation ont trouvé refuge sur le schorre. À l'aide d'un carottier, des racines de *Spartina patens* ont été mises à nu jusqu'à 30 cm sous la surface. Ainsi, les couches de végétation se sont succédé d'année en année. De petits chenaux serpentent ce secteur et leur tracé laisse supposer que

c'est par leur colmatage progressif que se sont formées la plupart des marelles. Le sol est fait de boue silteuse aux lits entremêlés, une légère couche de sable fin recouvre la surface par endroits. Ainsi, tous ces éléments suggèrent que cette section subit des transformations depuis un certain temps. Si l'on observe d'ailleurs l'emplacement de ce transect (Figure 12), on s'aperçoit que le secteur était déjà végétalisé sur la photographie de 1964 (Figure 24). Sur la Figure 33, à la limite inférieure du schorre, on peut voir que les blocs glaciels sont en train de se faire enterrer par les sédiments, on peut supposer que ce phénomène est provoqué par l'extension du schorre.

Tableau 4. Répartition des différents végétaux sur le transect 1, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012

Transect 1		
Mesure (m)	Végétation	Zone du marais
210,76 m - 184,57 m	<i>Limonium nashii</i>	Schorre supérieur
	<i>Plantago maritima</i>	
	<i>Solidago sempervirens</i>	
	<i>Spartina alterniflora</i>	
	<i>Spartina patens</i>	
184,57 m - 0 m	<i>Spartina alterniflora</i>	Schorre inférieur

Figure 33. Blocs glaciels enterrés par les sédiments, marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

En direction du transect 2 (Figure 12), on remarque qu'un chenal d'orientation Nord-Est/Sud-Ouest génère la dénudation de larges levées par la dissipation de son énergie. Un deuxième carottage a été effectué et a mis à jour des couches sableuses à 60 cm de profondeur, les lits sont discontinus : de courts lits sableux alternent avec de longs lits argileux. Le drainage des sédiments n'est pas uniforme pour l'ensemble du marais, certaines zones sont imbibées alors que d'autres sont asséchées. On retrouve le genre *Atriplex sp.* en compagnie de *Phragmites australis* à la limite terrestre du schorre supérieur, ils profitent d'une zone perturbée par des débris marins qui étouffent la couche inférieure pour s'installer. Quelques céloplèvres brillantes (*Coelopleurum lucidum*) se trouvent à proximité, elles fixent la limite des marées de haute mer (Fleurbec, 1985 : 88).

Un unique banc de sable dénudé a été observé sur le marais (Figure 34) et prend la forme d'une levée latérale parallèle au chenal. Sur la même figure on note une cicatrice de glissement de terrain. L'hypothèse la plus plausible de l'apparition du banc de sable sur le marais semble être que le sable fût transporté sur le schorre par le glissement de terrain, qu'il fût remanié par les vagues et dispersé ainsi sur la surface du marais. Le banc de sable serait probablement dû au transport de ces sédiments par le courant du chenal, le dépôt de sable à cet endroit étant provoqué par la perte de la vitesse du courant lors des débordements sur les levées.

Un réseau de petites cavités affleurant la surface du marais a été observé sur le marais (Figure 35). Les canaux de drainage sont formés par les eaux de ruissellement et d'inondation qui s'infiltrèrent entre les sédiments du schorre. Ces eaux souterraines se concentrent et forment un réseau de canaux. La mise à jour de ces canaux de drainage ne semble pas être due à l'érosion. Il semblerait que ce soit un ancien réseau de drainage qui, avec le temps, est devenu instable par l'érosion continue de la ligne de fond des canaux et s'est effondré. Ces fractures sur la surface du marais tendront à se transformer par la suite en réseau de marelles. Selon Redfield (1972 : 232-233), au moment où les marelles seront colonisées par des végétaux, la sédimentation subira une accélération et les marelles s'exhausseront.

Figure 34. Banc de sable dénudé entre les transects 1 et 2, marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

Figure 35. Réseau de drainage affleurant la surface du marais de l'Île-aux-Coudres entre les transects 1 et 2



Source : Maries-Claude Drolet, 2012.

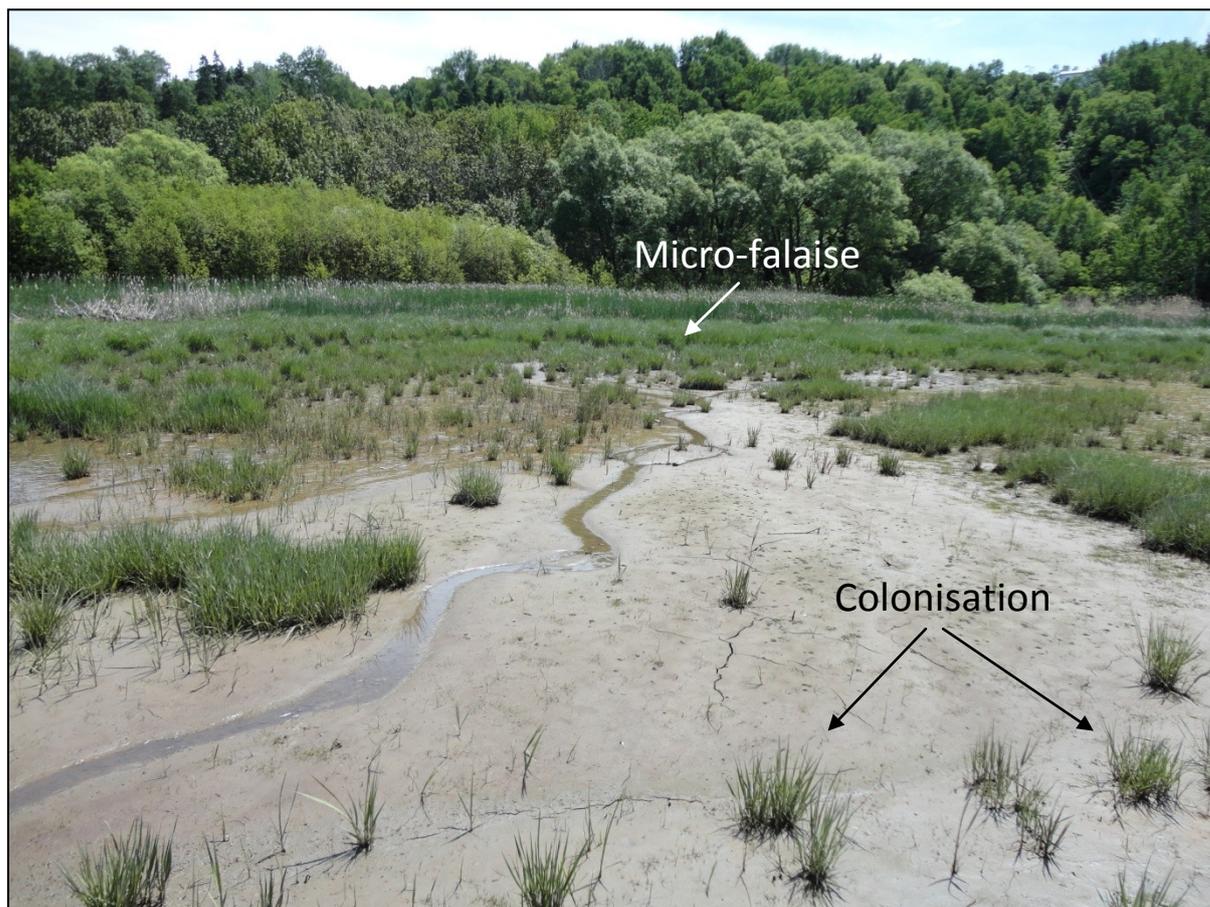
3.3.3. Transect 2.

En ce qui concerne le transect 2 (Figure 12), la présence de *Carex paleacea*, *Glaux maritima*, *Juncus sp. (balticus ?)*, *Potentilla tridentata*, *Salicornia europaea* a été consignée sur le schorre supérieur (Tableau 5). Dans cette partie supérieure du marais, *Carex paleacea* pousse sur son secteur de prédilection. Quant à *Juncus sp.*, son occurrence s'explique grâce à la présence d'un plan d'eau douce à la frontière entre le schorre supérieur et le domaine terrestre, car il vit bien souvent dans les secteurs où l'eau douce s'infiltre dans le marais. Ce plan d'eau est probablement alimenté par le cours d'eau Louis-Boudreaul (Figure 4) tout comme par les précipitations et les eaux de ruissellement. Ces marelles isolent les végétaux qui y poussent de l'eau salée. Finalement, *Potentilla tridentata*, qui se trouve dans la totalité des zones de végétation du Québec, possède l'avantage de vivre en symbiose avec un champignon (*Endogone calospora*) dont les mycéliums servent de prolongement à ses racines. En milieu aride, une telle association symbiotique améliore l'absorption de l'eau et des nutriments (Fleurbec, 1985 : 75, 143, 168-169, 173). Finalement, une micro-falaise marque la limite supérieure du transect 2 (Figure 36). Devant celle-ci on peut remarquer une ancienne zone auparavant dénudée qui est en voie de recolonisation par *Spartina alterniflora*. Lorsque l'érosion d'une micro-falaise est active et qu'une zone de colonisation se trouve en avant, cela signifie que le processus d'érosion est endogène au marais. De plus, l'érosion de la micro-falaise permet le rajeunissement du marais, ce qui permet le maintien d'une plus grande biodiversité (Fagherazzi et al., 2011 : 6).

Tableau 5. Répartition des différents végétaux sur le transect 2, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012

Transect 2		
Mesure (m)	Végétation	Zone du marais
471,84 m - 392,08 m	<i>Carex paleacea</i>	Schorre supérieur
	<i>Glaux maritima</i>	
	<i>Juncus balticus</i>	
	<i>Potentilla tridentata</i>	
	<i>Salicornia europaea</i>	
	<i>Spartina alterniflora</i>	
	<i>Spartina patens</i>	
	<i>Typha latifolia</i>	
392,08 m - 0 m	<i>Spartina alterniflora</i>	Schorre inférieur

Figure 36. Micro-falaise à la limite supérieure du schorre à extension par vagues rétrogressives, colonisation et progression à la limite inférieure du schorre sur le transect 2, marais de l'Île-aux-Coudres



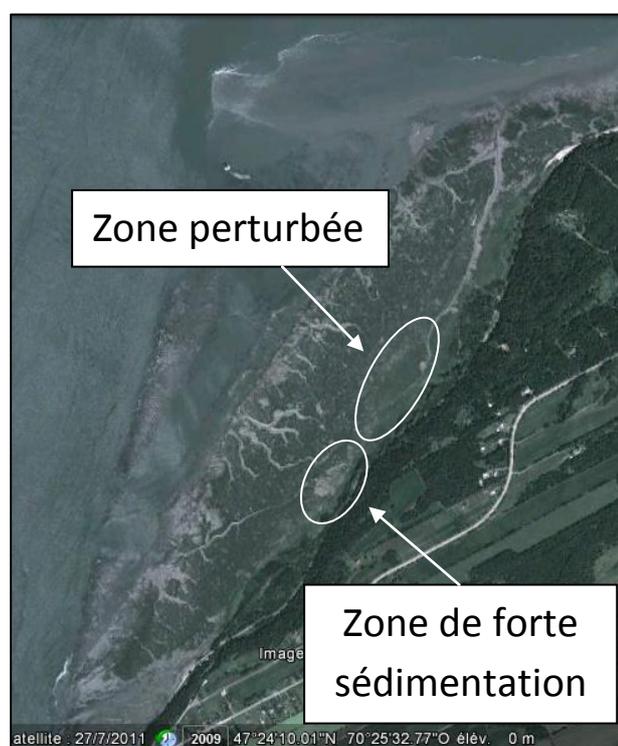
Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

3.3.4. Transect 3.

Le schorre supérieur du transect 3 (Figure 12) est peuplé de *Carex paleacea*, *Glaux maritima*, *Solidago sempervirens*, *Spartina alterniflora* et *Typha sp.* (Tableau 6). Suite à ce peuplement végétal, une étendue de *Salicornia europaea* occupe l'espace, cette plante annuelle colonise presque entièrement d'anciens secteurs ayant subi des perturbations. L'évapotranspiration est forte au niveau des peuplements de *Salicornia europaea*, l'absence de feuilles projetant de l'ombre accentue ce phénomène et la salinité du sol s'accroît. L'emplacement de cette étendue correspond à un secteur plus dénudé qu'en périphérie, ce phénomène suggère qu'une perturbation survient à ce même endroit par intervalle de temps. Cette zone est encerclée sur la Figure 37. On la voit d'ailleurs très bien sur les autres photographies aériennes (Figures 24 à 26). Un embranchement du chenal principal du marais pointe en direction de cette zone, la dispersion d'un surplus d'énergie par le chenal pourrait expliquer ces bouleversements.

Tableau 6. Répartition des différents végétaux sur le transect 3, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012

Transect 3		
Mesure (m)	Végétation	Zone du marais
461,28 m - 433,88 m	<i>Carex paleacea</i>	Schorre supérieur
	<i>Glaux maritima</i>	
	<i>Solidago sempervirens</i>	
	<i>Spartina alterniflora</i>	
	<i>Typha latifolia</i>	
433,88 m - 363,25 m	<i>Salicornia europaea</i>	Schorre supérieur
	<i>Spartina alterniflora</i>	
363,25 m - 0 m	<i>Spartina alterniflora</i>	Schorre inférieur

Figure 37. Zone perturbée colonisée par *Salicornia europaea* sur le transect 3 et zone de sédimentation entre les transects 3 et 4, marais de l'Île-aux-Coudres

Source : Modifiée de la photographie aérienne de Google Earth, 2011.

Le schorre inférieur de cette section se termine par une micro-falaise, les sédiments y sont parfois sableux. Une étendue sableuse parsemée de roches et de fucus suit la micro-falaise en direction du large, à la suite de laquelle une zone de colonisation a été relevée (Figure 38).

Figure 38. Micro-falaise à l'extrémité du schorre inférieur suivie d'une zone dénudée sur le transect 3, marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Matthew G. Hatvany, 2012.

3.3.5. Transect 4.

Phragmites australis et *Typha latifolia* sont les seules espèces, mis à part *Spartina patens*, à coloniser le schorre supérieur du transect 4 (Figure 12 et Tableau 7). Tel qu'observé sur le transect 1, *Spartina alterniflora* devient plus petite en taille à la limite du schorre inférieur. La présence de *Typha latifolia* et de *Phragmites australis*, deux espèces d'eau douce, ont été relevées à proximité du plan d'eau douce à la frontière entre le schorre supérieur et le domaine terrestre. Ce plan d'eau est possiblement approvisionné par le cours d'eau de la Cedrière (Figure 4).

Une zone de sédimentation est observable sur le schorre supérieur, l'épaisseur des sédiments déposés par la marée précédente est importante, plus que pour les autres transects observés (Figure 37). Peut-être que les sédiments sont transportés par le chenal qui traverse le marais complètement du Nord-Est vers le Nord ? Et que la perte de vitesse expliquerait ce dépôt ? Le transect 4 est sectionné par un chenal sur le schorre inférieur, mais, contrairement au transect 2, cette fois la traversée à pied a été réalisable pour effectuer le transect (Figure 12).

Sur ce secteur du marais de l'Île-aux-Coudres, on peut remarquer des zones de *Spartina alterniflora* pionnières sur le schorre inférieur. La pente qui termine le schorre inférieur est conforme (douce et continue) (Figure 39), c'est le signe qu'il est en expansion. Celle-ci est freinée par la formation des glaces. Cette portion du marais est donc en continuelle reconstruction. Toutefois, les radeaux de végétation sont rares sur cette portion du schorre, en conséquence de quoi on peut affirmer que la glace n'a pas été active récemment sur ce secteur. Il faut dire que c'est un phénomène dont la dynamique est très variable d'année en année (Dionne, 2003 : 95-97).

Tableau 7. Répartition des différents végétaux sur le transect 4, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012

Transect 4		
Mesure (m)	Végétation	Zone du marais
422,68 m - 407,52 m	<i>Phragmites australis</i>	Schorre supérieur
	<i>Spartina alterniflora</i>	
	<i>Spartina patens</i>	
	<i>Typha latifolia</i>	
407,52 m - 0 m	<i>Spartina alterniflora</i>	Schorre inférieur

Figure 39. Pente conforme du schorre inférieur sur le transect 4, marais de l'Île-aux-Coudres



Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

3.3.6. Transect 5.

Finalemment, sur le transect 5 (Figure 12), *Carex paleacea*, *Glaux maritima*, *Phragmites australis*, *Spartina patens* et *Triglochin maritima* peuplent le schorre supérieur (Tableau 8). C'est un regroupement typique que l'on retrouve dans les marais salés au-dessus du niveau moyen des hautes marées moyennes. Selon Fleurbec (1985 : 110), le regroupement de *Glaux maritima* et de *Triglochin maritima* est fréquent à proximité des chenaux. Il y a effectivement un chenal dont le tracé est situé directement derrière le schorre à proximité et qui est contigu au transect (Figure 12). L'observation faite sur le transect 5 vient ainsi confirmer cet énoncé (Fleurbec, 1985 : 110, 143).

Tableau 8. Répartition des différents végétaux sur le transect 5, marais de l'Île-aux-Coudres, 2012

Transect 5		
Mesure (m)	Végétation	Zone du marais
258,69 m - 222,63 m	<i>Carex paleacea</i>	Schorre supérieur
	<i>Glaux maritima</i>	
	<i>Spartina alterniflora</i>	
	<i>Spartina patens</i>	
	<i>Triglochin maritima</i>	
	<i>Typha latifolia</i>	
222,63 m - 0 m	<i>Spartina alterniflora</i>	Schorre inférieur

3.3.7. Observations générales

On remarque que *Spartina pectinata* n'est présente sur aucun transect (Figure 40). Cette espèce se trouve normalement sur le schorre supérieur et succède à *Spartina patens*. Une telle absence dénote une dynamique différente pour le présent marais qui est peut-être tributaire de l'emplacement singulier du chenal qui traverse le marais de part en part. Malgré ce fait, le schorre supérieur du marais de l'Île-aux-Coudres offre une grande biodiversité.

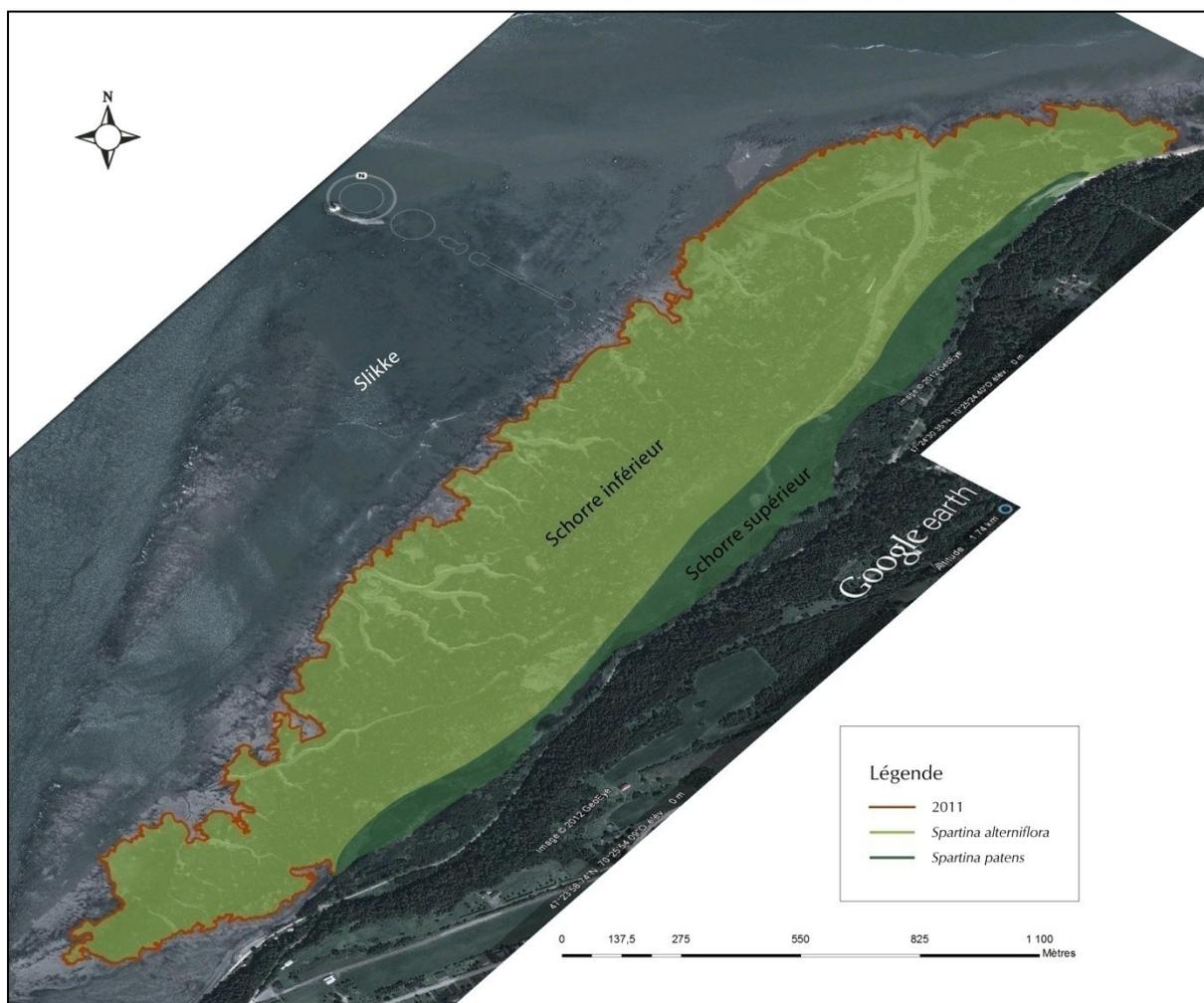
Pour l'ensemble du marais et sur le haut du schorre supérieur, on fait la rencontre de débris marins déposés par les marées successives qui restreignent ces couches de débris à ce secteur. Ces couches sont minces, éparses et peu nombreuses sur le marais de l'Île-aux-Coudres, ce n'est pas une perturbation majeure pour cet écosystème. Elles finiront bientôt par se décomposer et nourriront le sol en nutriments (Bertness, 2007 : 343-344).

3.4. Cartographie des transects biophysiques

Les données GPS qui ont été recueillies lors de la réalisation des transects biophysiques ont été combinées avec la photographie de 2011 montrant la limite inférieure du schorre (Figure 12). On constate que les points, à partir desquels ont été tracés les transects, correspondent bien aux limites du marais. La fiabilité des données est confirmée. Les transects 1, 3 et 5 dépassent cependant légèrement de la limite du schorre inférieur de 2011, ce fait s'explique par l'accrétion du schorre entre 2011 et 2012. D'ailleurs, pour le transect 3, l'observation d'une zone en voie de colonisation a été notée à cet endroit précis. Ainsi, les transects démontrent des tendances similaires à celles observées par l'analyse spatio-temporelle : les extrémités du schorre ont tendance à s'accroître alors que le centre reste stable. La Figure 40 montre les différentes zones de végétation recensées sur le marais. La zone à *Spartina alterniflora* correspond aux limites du schorre inférieur alors que la zone à *Spartina patens* trace les frontières du schorre supérieur.

Comme on l'a vu, un écosystème est en constant bouleversement, les conditions environnementales changeantes qui le gouvernent l'obligent à se modifier pour s'adapter continuellement. Dans ces circonstances, il est normal d'observer des changements sur un court intervalle de temps. *Ipsa facto*, tout écosystème est le théâtre où s'affrontent des forces contraires dans le but d'atteindre un climax. Ces forces génèrent des équilibres temporaires qui s'opposent et qui créent, par cette opposition, une stabilité permettant le maintien de l'écosystème et la survie de sa biocénose. Grâce aux modifications observées sur le marais depuis 47 ans, on peut affirmer que le marais de l'Île-aux-Coudres est en recherche continue de son équilibre, mais comme les changements ne sont pas majeurs on peut prétendre qu'il a atteint un certain équilibre avec l'hydrodynamique actuelle.

Figure 40. Répartition des zones de *Spartina alterniflora* et de *Spartina patens* sur le marais de l'Île-aux-Coudres, 2012



Source : Modifiée de la photographie aérienne de Google Earth, 1 : 6 180, 2011. Par Marie-Claude Drolet, 2012.

Chapitre quatrième

4. Discussion

4.1. Dynamique du marais de l'Île-aux-Coudres.

L'analyse spatio-temporelle effectuée à partir des photographies aériennes de 1964 à 2011 révèle que le marais de l'Île-aux-Coudres est en expansion. Les taux d'accrétion varient selon les décennies observées. En ordre décroissant, on note ainsi le taux le plus élevé entre 1964 et 1980 (0,72 ha/année), le second entre 1980 et 2001 (0,42 ha/année) et le dernier entre 2001 et 2011 (0,069 ha/année) (Tableau 3). Malgré ces variations et selon les tracés observés, on constate que le processus dominant demeure la sédimentation.

Ces variations au fil des ans peuvent s'expliquer par plusieurs facteurs : les vents de tempêtes, le cycle des marées (Saros) qui affecte davantage les marais macrotidaux, le relèvement isostatique, la fonte des glaces et la fluctuation du niveau marin. Le positionnement géographique du marais de l'Île-aux-Coudres le protège des vents dominants comme des vagues. La déviation des courants en amont de l'île et la réfraction des vagues à proximité de la côte réduit la probabilité pour le schorre de subir de l'érosion. Toutefois, le vent du Nord qui souffle lors des tempêtes en automne et en hiver doit affecter, bien que légèrement, en grande partie le secteur Est du marais. De plus, le secteur Est est également le seul secteur sur lequel pousse le genre *Atriplex sp.* et où les débris marins sont les plus considérables, il est donc sujet à un nombre plus important de perturbations.

Les observations consignées lors de la réalisation des transects de végétation suggèrent que le processus de sédimentation n'est pas uniforme sur l'ensemble du marais. Ainsi, il semblerait que l'extension du secteur Ouest se fait davantage de façon latérale alors que l'extension du secteur Est se fait davantage verticalement. En effet, de prime abord on découvre grâce à la mosaïque de 2001 (Figures 22 et 26), sur laquelle le niveau de la marée est élevé, que le schorre inférieur Ouest est moins élevé que le secteur Est puisqu'une portion des chenaux du secteur occidental est immergée alors que ce n'est pas le cas pour le secteur oriental. Le schorre inférieur Ouest est plus jeune que celui de l'Est. Une portion de la slikke

du secteur Est est d'ailleurs émergente sur les photographies de 2001 et 2011 (Figures 20 et 21); la sédimentation y est donc importante. Le tracé des chenaux a subi de légères modifications entre 1964 et 1980, surtout pour le secteur Ouest, alors qu'il s'est stabilisé par la suite. Le secteur Est était donc déjà plus stable ou plus élevé. Suite à cela, les levées se sont élargies entre 2001 et 2011 pour le secteur Est, ce qui laisse penser que le marais est rendu à un niveau assez mature de son développement. Selon Redfield (1972 : 222), comme le marais s'agrandit, les levées s'élargissent et les pentes deviennent plus abruptes, ce qui est le cas principalement pour le secteur oriental. La végétation a même légèrement reculé. La dérive littorale qui se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est alimente tous les secteurs du marais. L'extrémité Ouest semble grandement en bénéficier puisque c'est le secteur qui a le plus progressé en terme de longueur. Le secteur Est du marais en profite également puisque la dérive littorale transporte les sédiments érodés de l'Ouest vers l'Est. La sédimentation se produit plus uniformément sur le secteur oriental, la progression du schorre inférieur se fait sur toute la longueur, alors que pour le secteur occidental elle se concentre complètement à l'extrémité du schorre ou sur son schorre supérieur (Figure 28).

À l'aide de la Figure 40, on constate que le schorre supérieur est plus large dans le secteur Est et le secteur central que dans celui de l'Ouest. On peut supposer que le chenal principal du marais déborde trop fréquemment sur le secteur Ouest et ne laisse pas la chance à d'autres espèces que *Spartina alterniflora* de s'installer. Une autre hypothèse serait que le secteur Est serait effectivement plus élevé et que son schorre supérieur serait en conséquence plus développé. Une haute altitude favorise la biodiversité et la compétition inter-espèces.

On dénote aussi dans le secteur Est la présence de *Solidago sempervirens* sur le schorre supérieur dont le développement nécessite une plus grande stabilité des sédiments sur lesquels ils poussent. On ne retrouve cette espèce nulle part ailleurs sur le marais mis à part sur le schorre supérieur au centre du marais, ce secteur est par ailleurs un secteur plutôt stabilisé. La limite du schorre supérieur dans le secteur Est se distingue par la présence d'une micro-falaise suivie d'une zone perturbée. Par conséquent, la sédimentation du schorre inférieur (pour le même secteur) semble être alimentée par l'érosion du schorre supérieur. Une partie des sédiments seraient remis en suspension lors du retrait de la marée et déposés alors que le courant perd sa vitesse en atteignant le schorre inférieur.

La sédimentation pourrait aussi être décrite comme étant uniforme sur le marais. La progression du secteur Ouest est peut-être la plus longue, mais celle de l'Est est davantage

étendue. Le volume de sédiments reçu par les différents secteurs pourrait hypothétiquement être équivalent.

Le secteur du marais ayant subi le plus de modifications entre 1964 et 2011 est l'extrémité Ouest du marais, plus précisément la zone 2 sur la Figure 30. On relève une avancée de cette zone en 1964, puis un recul en 1980, suivi d'une progression en 2001 alors qu'elle est de nouveau en régression en 2011. Certaines crues importantes peuvent être responsables de telles modifications dans le tracé. On remarque aussi que la régénération de ce secteur revient cycliquement. La sédimentation du secteur Ouest semble importante sur le schorre supérieur, ce qui peut être l'œuvre de ce chenal. Les sédiments érodés à partir de la zone mentionnée seraient déposés sur le schorre supérieur.

Cependant, le marais s'est exhaussé dans son ensemble entre 1964 et 1980 (Figures 20 et 21), car on remarque que la végétation s'est densifiée notamment sur le schorre inférieur. Les groupements de *Spartina alterniflora* sont effectivement plus denses lorsque le temps de submersion par la marée diminue. À l'aide de carottages on a retrouvé d'anciennes racines de végétation sous la surface, ce qui prouve que plusieurs couches de *Spartina alterniflora* se sont déjà succédé. La progression du schorre pourrait aussi être confirmée par la sédimentation qui recouvre certains blocs glaciels sur le secteur Est du marais si cette hypothèse s'avère véridique (Figure 33).

Sur la Figure 40, on constate que la zone de *Spartina alterniflora* est très étendue comparativement à celle de *Spartina patens*. Ce fait s'explique par l'amplitude des marées, le marnage moyen est de 4,67 m sur l'île, ce qui est suffisant pour que les marées puissent couvrir une vaste superficie sur un relief aussi peu accidenté, l'impact érosif des vagues est également limité par un vaste marnage. D'autres facteurs secondaires limitant la zone de *Spartina patens* sont le taux de salinité, la disponibilité en nutriments et la fréquence des perturbations (Brodeur et Allard, 1983 : 182; McKee and Patrick, 1988 : 143).

Le marais de l'Île-aux-Coudres est singulier par l'absence de *Spartina pectinata* sur le schorre supérieur, car on la retrouve sur les autres marais salés de ce secteur. *Spartina pectinata* tolère moins l'immersion de l'eau salée que *Spartina alterniflora* et *Spartina patens*, c'est pourquoi elle pousse habituellement à la limite entre le domaine terrestre et le schorre supérieur où son système racinaire qui s'enfonce très profondément lui assure de l'emporter en compétition inter-espèces. Le chenal principal qui traverse le schorre de part et d'autre (Figure 20) ainsi que le chenal qui s'écoule à l'arrière du schorre sont possiblement

responsables de cette absence par des submersions trop rapprochées de la surface du marais et par la continuelle alimentation de la nappe phréatique. Bien qu'affectant pousser sur les bords des chenaux, lorsque le gradient-inondation est trop élevé, *Spartina pectinata* ne peut survivre. En effet, elle supporte un temps d'immersion correspondant à 0,3 % de l'année, ce qui signifie qu'elle n'est atteinte que par les grandes marées de pleines mers de vives-eaux moyennes ou par les pleines mers de vives-eaux d'équinoxe. Une autre hypothèse concernant l'absence de *Spartina pectinata*, c'est qu'elle serait due à la contamination des frênes (*Fraxinus nigra*) par une espèce de champignon (*Puccinia fraxinata*) qui s'attaque également à *Spartina pectinata*. Gauthier (1999 : 10) note la disparition brutale de cette espèce sur l'Île-aux-Coudres. Fut-elle générée par la contamination de *Puccinia fraxinata* ? Quoi qu'il en soit, on peut prétendre que le schorre supérieur est plus sujet à l'érosion puisque la présence de cette espèce l'atténue considérablement (Fleurbec, 1985 : 152; Careau, 2010 : 76).

Comme on l'a vu grâce à l'évolution spatio-temporelle (Figure 28), les secteurs de l'Ouest et de l'Est ont évolué, tandis que le centre présente une bonne stabilité entre 1964 et 2011. Le schorre inférieur au centre du marais se termine par une micro-falaise suivi d'une zone de colonisation (Figure 38), ce secteur est donc en continuelle régénération, ce qui peut expliquer pourquoi on ne constate pas d'évolution.

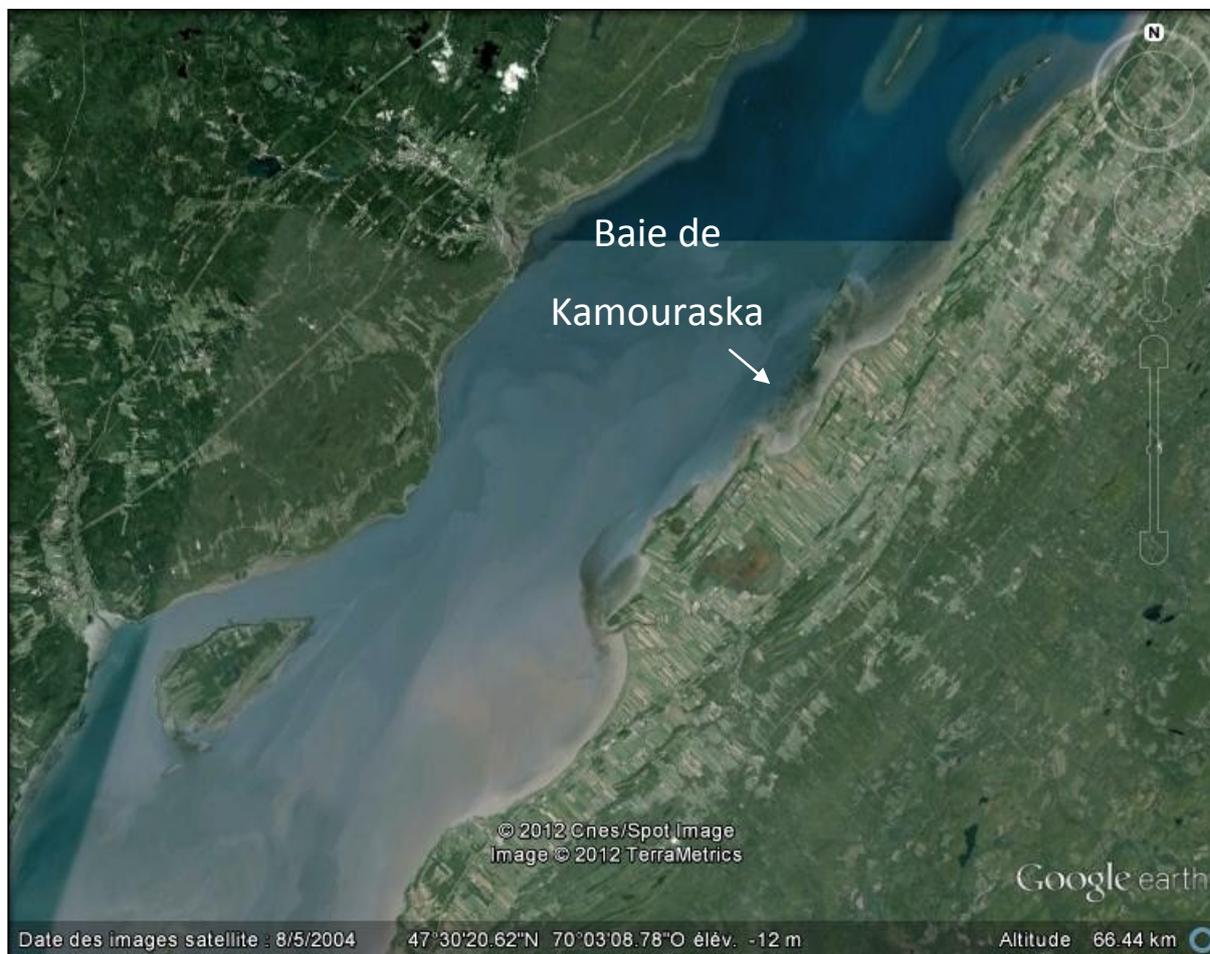
4.2. Localisation du marais de la baie de Kamouraska

La comparaison du marais de l'Île-aux-Coudres avec celui de Kamouraska servira à éclairer sur la dynamique de ce secteur du moyen estuaire du Saint-Laurent. Avec ces nouvelles connaissances, il sera plus facile de prévoir le comportement des littoraux en fonction des fluctuations du niveau marin.

Le marais de la baie de Kamouraska (Figure 41) est situé sur la rive Sud du moyen estuaire du Saint-Laurent à 150 km de la ville de Québec. Ce marais s'étend entre le Cap au Diable à Saint-Denis au Sud-Ouest et le Cap Blanc au Nord-Est. Sa superficie est de 6,5 km pour une largeur variant entre 80 et 240 m. La végétation se compose principalement de *Spartina alterniflora*, *Spartina patens* et *Spartina pectinata*. Lorsque les premiers colons arrivèrent à Kamouraska vers 1680, ils s'inspirèrent des pratiques amérindiennes millénaires et pratiquèrent rapidement la chasse et la pêche sur le marais, notamment la pêche à l'anguille, ils utilisèrent le foin de mer pour nourrir le bétail et en tant que matériel pour la fabrication des toits de chaume. Au début du 18^e siècle, des travaux d'endiguement eurent lieu afin de protéger les routes et les cultures des inondations occasionnées par les marées. La

construction d'aboiteaux se poursuit jusqu'au 20^e siècle avec leur reconstruction et leur rénovation en 1937-1938, 1948 et 1979-1980 (Mathieu, 2008 : 10-11; Hatvany, 2009 : 109; Careau, 2010 : 51-52; Hatvany, 2012 : 89).

Figure 41. Localisation du marais de la baie de Kamouraska, moyen estuaire du Saint-Laurent



Source : Modifiée de Google Earth, 2012.

La dynamique naturelle du marais de Kamouraska est modifiée par la présence de cette barrière artificielle qui contraint l'espace intertidal entre cette dernière et le niveau marin. Selon l'étude spatio-temporelle de Mathieu (2008 : 33-34), les groupements principaux de spartines se sont adaptés à ces nouvelles conditions : leur répartition, auparavant étendue, a régressé en de maigres bandes parallèles à la côte. Le processus de sédimentation ne s'est pas modifié, le schorre est d'ailleurs en expansion à l'Est, mais, malgré ce constat, on remarque une forte érosion du schorre à l'Ouest. Ce marais possède donc une évolution bidirectionnelle.

4.3. Comparaison du marais de l'Île-aux-Coudres avec le marais de Kamouraska

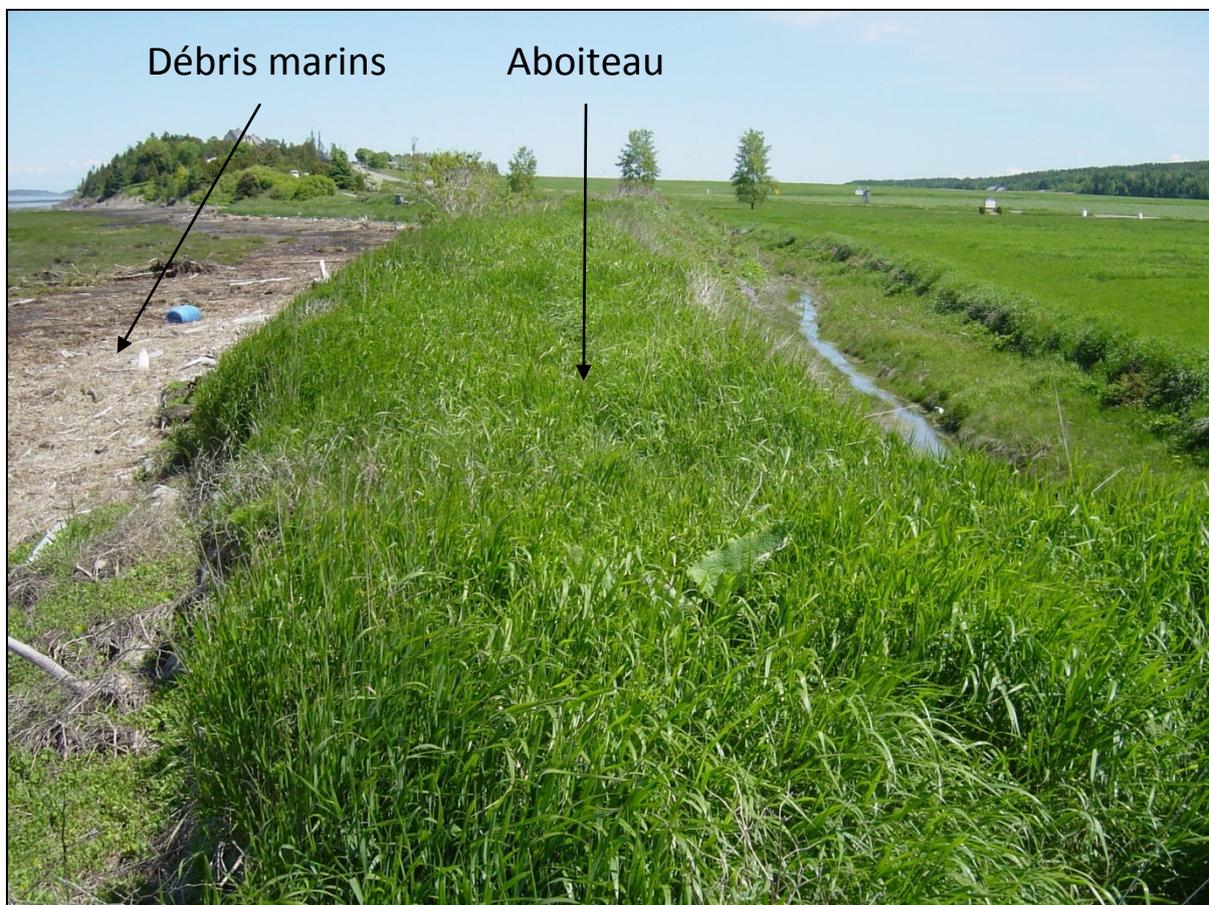
En premier lieu, on constate que la relation des premiers colons fut divergente envers le marais de l'Île-aux-Coudres et celui de Kamouraska, bien que ceux-ci exploitèrent les berges aux mêmes fins (pêche, chasse, pâturage). Les Coudrislois ne connurent pas le risque de voir leurs cultures détruites par une inondation en provenance du marais. La falaise morte qui surplombe le marais les protège. C'est tout le contraire des habitants de Kamouraska qui durent trouver un moyen de contenir les eaux d'inondation afin de pouvoir subvenir à leurs besoins. Ainsi, le marais de Kamouraska fut endigué et sa dynamique naturelle en fut modifiée. Le marais de l'Île-aux-Coudres resta vierge de toute installation anthropique et ne fut pas contraint de voir sa dynamique s'altérer.

Les conditions environnementales du moyen estuaire du Saint-Laurent sont semblables pour le marais de l'Île-aux-Coudres et celui de Kamouraska (taux de salinité, marées semi-diurnes, direction des vagues et des vents dominants, sédiments en provenance du bouchon vaseux). Toutefois, leur superficie et leur forme divergent, le marais de Kamouraska est plus imposant et arbore une forme en demi-lune alors que celui de l'Île-aux-Coudres est plus petit et possède une forme oblongue.

La quantité de débris marins couvrant le schorre supérieur et la surface colonisée par le genre *Atriplex sp.* est très importante sur le marais de Kamouraska. L'aboiteau freine le déplacement des débris par la marée laissant ceux-ci s'accumuler (Figure 42) et le genre *Atriplex sp.* profite de ces perturbations pour s'installer (Gauthier, 2011 : 47-48). Le marais de l'Île-aux-Coudres n'est pas très affecté par cette perturbation temporaire. De surcroît, c'est le signe que ce dernier est davantage protégé des vagues et des vents de tempêtes que ne l'est le marais de Kamouraska. En outre, l'expansion du marais de Kamouraska est réfrénée par la présence de l'aboiteau. La végétation est aussi affectée puisqu'elle migre de façon continue en direction de la côte, ce phénomène réduit la capacité de consolidation des sédiments par les racines. L'énergie des vagues est moins bien dissipée qu'auparavant et le sol est de plus en plus sujet à l'érosion. Les services écologiques rendus par cet écosystème sont également réduits. Dans le contexte des changements climatiques, le marais de la baie de Kamouraska semble être plus menacé que celui de l'Île-aux-Coudres dont l'expansion n'est freinée en aucune façon si ce n'est par les facteurs environnementaux. Si le niveau marin s'élève, le marais de Kamouraska pourrait se retrouver inondé et certaines espèces végétales pourraient disparaître de sa surface. Des oiseaux migrateurs seraient aussi affectés et devraient changer

leur parcours. Toutefois, selon Mathieu (2008 : 41), le bilan sédimentaire du marais de Kamouraska serait positif entre 1948 et 2008 avec un gain de 3,68 ha (Mathieu, 2008 : 12, 45).

Figure 42. Débris marins contraints par un aboiteau, marais de la baie de Kamouraska



Source : Marie-Claude Drolet, 2012.

En comparant ces deux marais, on observe que leurs dynamiques divergent : le marais de l'Île-aux-Coudres progresse par ses deux extrémités et le marais de la baie de Kamouraska progresse vers l'Est, son secteur subissant l'érosion étant celui à l'Ouest. L'incidence des tempêtes est le facteur affectant le plus l'érosion des marais. Ainsi, la partie occidentale du marais de Kamouraska est affectée par les vents de tempêtes de l'Est, mais surtout du Nord-Est qui sont les plus puissants, les vents arrivent directement dans la baie sans franchir d'obstacle. Les vagues ainsi générées par de longs fetchs et les vagues de marée qui sont amplifiées attaquent avec puissance la côte et remettent les sédiments en suspension (Quilliam et Allard, 1989 : 369; Careau, 2010 : 23). Ces mêmes vents ne peuvent attaquer de la même façon le marais de l'Île-aux-Coudres, le mince espacement entre la terre ferme et

l'île ne permet pas à des vagues de grandes envergures de se former. Les vents dominants de l'axe du Saint-Laurent qui atteignent l'île ne sont pas des vents de tempêtes. Ce marais est donc grandement préservé de l'érosion.

L'apport en sédiments du bouchon vaseux ne peut se faire de l'Ouest vers l'Est pour le marais de Kamouraska, étant donné la forme en demi-lune de la baie et puisque la dérive littorale ne connaît pas d'autre direction. Le secteur Est de ce marais est donc le grand bénéficiaire. L'Île-aux-Coudres profite de la dérive littorale sur toute sa longueur, grâce à elle les sédiments érodés à l'Ouest peuvent servir à alimenter l'Est.

Comparer les taux moyens d'accrétion et de régression pour les deux marais n'est pas chose aisée étant donné que le taux moyen du marais de la baie de Kamouraska ne donnerait pas une bonne représentation de la réalité, car les processus de sédimentation et d'érosion sont actifs simultanément. De plus, comme les constructions successives d'aboteaux sur le marais ont modifié la dynamique naturelle, il est difficile de comparer les deux marais sans investiguer davantage. Cependant, l'exercice a été réalisé au chapitre suivant en prenant séparément les taux moyens de sédimentation et de régression pour le marais de Kamouraska.

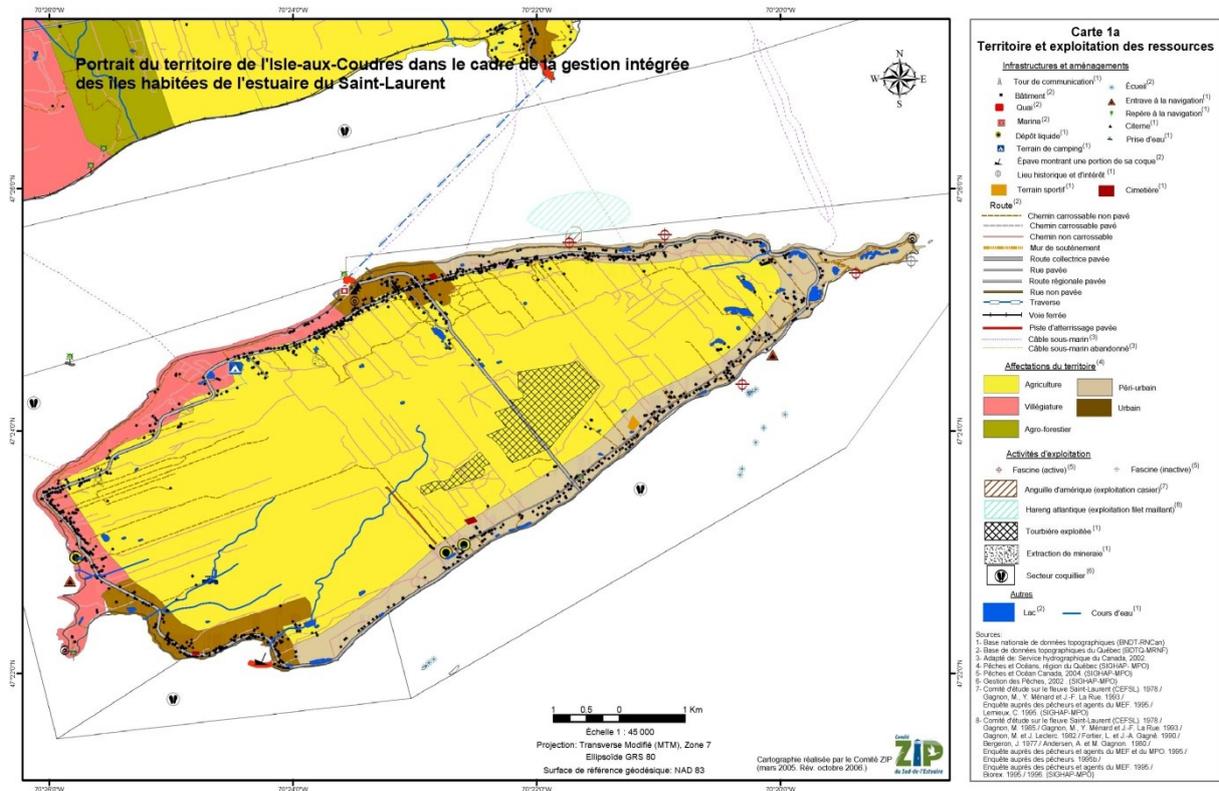
D'autre part, selon une carte réalisée dans le cadre de la gestion intégrée des îles habitées de l'estuaire du Saint-Laurent (Comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire, 2006), l'affectation du territoire couvert par le marais de l'Île-aux-Coudres est la villégiature, ce qui signifie qu'il est sous la protection du gouvernement (Figure 43). Le marais ne subit pas de pressions anthropiques pour l'instant et sa dynamique naturelle est protégée pour les années futures. Tandis que les installations sur le marais de Kamouraska vont demeurer sur place et continueront d'affecter sa dynamique. Les terres agricoles de la région sont toujours exploitées et les habitants ne pourraient fonctionner adéquatement sans cette protection.

4.4. Examen des discours scientifiques actuels et influence des changements climatiques

Les discours biocentriques actuels font état de l'érosion généralisée des zones littorales à l'échelle planétaire. La réalité n'est pas aussi simpliste que cela. Avec une hypothétique montée du niveau marin, les marais s'exhausseront et verront leur superficie diminuer. Puisque l'apport en sédiments des marais est tributaire de l'inondation par les marées, les marais intertidaux salés sont soumis à l'évolution du niveau marin. Les tempêtes, le niveau marin et la variation dans l'apport en sédiments influencent l'évolution du schorre et influencent la relation entre la végétation et la géomorphologie du marais. Le cycle du

Saros est également à étudier pour rendre compte de son influence sur les fluctuations du niveau marin.

Figure 43. Portrait du territoire de l'Isle-aux-Coudres dans le cadre de la gestion intégrée des îles habitées du Saint-Laurent



Source : Tirée du Comité ZIP du Sud-de-l'Estuaire, 2006.

Plus le marais s'exhausse et plus le taux de sédimentation diminue. Ceci s'explique par le fait que les secteurs inférieurs du marais sont inondés à un niveau plus élevé qu'auparavant, plus fréquemment et plus longtemps. Un nombre plus important de sédiments risque alors d'être déposé. La sédimentation est plus importante pour les marais dont l'altitude est basse et qui sont inondés sur de longues périodes. Et chaque couche de sédiments qui s'ajoute réduit la possibilité pour le marais de recevoir un apport de sédiments par l'étalement des hautes marées. Les sédiments qui seront érodés sur le pourtour du schorre serviront à nourrir cette accretion verticale. C'est pourquoi la surface des schorres subit une régression. Les groupements végétaux devront migrer afin de s'adapter aux nouvelles conditions environnementales. En supposant que la hausse du niveau marin se fasse lentement, les marais s'exhausseront lentement aussi puisque les inondations seront peu nombreuses (Desplanque and Mossman, 2004 : 66; Fagherazzi et al., 2011 : 16).

Le réchauffement des températures moyennes aurait pour conséquence d'accentuer la productivité de *Spartina alterniflora* et de *Spartina patens*. La concentration du sel par évapotranspiration risque d'augmenter et de favoriser les relations d'association des groupements végétaux. Cependant, les effets du réchauffement n'auraient pas autant d'impacts que la hausse du niveau marin sur la végétation (Gedan and Bertness, 2010 : 480, 485).

Selon Desplanque et Mossman (2004 : 22, 63, 118), la majorité des marais s'élève au niveau moyen atteint par les marées au cours du cycle de 18,6 ans appelé Saros. Ce cycle correspond aux diverses variations de déclinaison de la Lune et du Soleil par rapport à l'Équateur. Il est influencé par la variation de distance entre la Terre et la Lune et par les positions relatives entre le Soleil, la Lune et la Terre. En outre, les marais s'élèvent en moyenne à 1,2 m sous le niveau atteint par les plus hautes marées qui se produisent tous les 18,6 ans. Durant la première partie du cycle, le niveau des marées augmente de 3 % par an, le niveau des marées peut être de 40 à 50 % plus élevé que la moyenne pour la Nouvelle-Écosse, ce qui peut donner une idée de l'impact sur le moyen estuaire du Saint-Laurent qui connaît un rétrécissement important. Les marées ne recouvrent que très peu de temps les schorres et lorsque la marée dépasse de beaucoup le niveau moyen, sa capacité de transport est réduite. Cependant, les tempêtes qui surviennent durant la première partie du cycle sont d'une grande violence, l'érosion est encore plus active que normalement. Lors de la deuxième partie du cycle du Saros, il y a une diminution régulière du niveau des pleines mers (de 3 % par année) qui se produit. Dans le contexte actuel, cette diminution compensera pour la hausse du niveau marin mondial. Les schorres supérieurs peuvent donc ne pas être inondés pendant des mois. Cette baisse du niveau marin permet aux côtes qui ont été érodées durant la première partie du cycle de se régénérer. Ce cycle influence davantage les marais à court terme que la hausse du niveau marin. En ayant une influence sur le niveau marin, le Saros fait en sorte que la dynamique sédimentaire évolue au cours du cycle tout comme la capacité d'érosion des vagues. Actuellement, le prochain cycle de régénération aurait lieu entre 2015 et 2024.

Nous avons comparé les taux moyens d'accrétion et de régression pour les marais de l'Île-aux-Coudres et de Kamouraska avec les années qui correspondent au cycle d'érosion et de régénération du Saros (Tableau 9) (Desplanque et Mossman, 2004 : 117-118). L'année où les relevés sur le terrain ont été réalisés a été choisie afin de déterminer l'intervalle d'années qui servira à des fins de comparaison. La raison est en que, comme les changements peuvent

être rapides sur un marais, l'année au cours de laquelle l'observation a eu lieu correspond davantage que les précédentes à la représentativité des données prélevées. Les taux moyens les plus élevés ont été surlignés en vert. L'étiquette qualitative des cycles du Saros qui semblait correspondre avec les taux moyens (les plus significatifs entre le gain et la perte en ce qui concerne le marais de Kamouraska) a été surlignée en bleu. Il en ressort que la correspondance entre les taux moyens et les différents cycles du Saros est plutôt élevée. Cependant, ce résultat doit être pris à la légère et l'exercice peut servir comme piste de réflexion, car nous ne lui attribuons pas une grande validité.

Donc, pour le marais de l'Île-aux-Coudres, le taux moyen le plus élevé (0,72 ha/année pour l'intervalle entre 1964 à 1980) correspond à un cycle de régénération du Saros encore jeune qui eut lieu entre 1979 et 1988. Le taux le plus faible (0,069 ha/année pour l'intervalle entre 2001 à 2011) concorde avec un cycle favorisant l'érosion (2006 à 2015). En ce qui concerne le marais de Kamouraska, le taux le plus élevé pour la sédimentation (1,09 ha/année pour l'intervalle entre 1974-1985) coïncide avec un cycle de régénération qui s'est déroulé entre 1979 et 1988. Le taux le plus élevé pour l'érosion (0,48 ha/année pour l'intervalle entre 1985-2008) correspond à un cycle d'érosion (2006 à 2015). L'examen de ces données suggère que les différents cycles du Saros ont un impact sur les processus d'érosion et de sédimentation des marais de l'Île-aux-Coudres et de Kamouraska. L'impact des cycles du Saros de 1979-1988 (régénération) et de 2006-2015 (érosion) concorde pour les deux marais. Toutefois, comme l'échantillonnage des données n'est pas élevé, il faut rester prudent sur son interprétation.

Selon plusieurs auteurs (Dionne, 2003; Bernatchez et Dubois, 2004), les marais du fleuve Saint-Laurent sont en érosion et ne démontrent aucune progression. Tout récemment, certains marais auraient même disparu. Pourtant, les preuves d'érosion doivent s'échelonner sur une longue période de temps avant d'être mentionnées comme étant le processus dominant. Selon Hatvany (2012), ces discours sont directement influencés par notre époque axée sur les changements climatiques. Sur un marais, l'érosion peut être active en même temps que l'est la sédimentation. Une micro-falaise observée sur un marais ne signifie pas que le schorre entier est soumis à l'érosion. La linéarité de pensée de ces auteurs, qui parlent soit d'érosion soit de régression, ne rend pas compte de la dynamique systémique complexe des marais salés. Le rôle positif joué par l'érosion n'est également pas pris en compte. Grâce à l'érosion, le schorre est en continuel rajeunissement et conserve une plus grande biodiversité, ce qui contribue à un sain maintien de cet écosystème. Ces discours sont récents

Tableau 9. Correspondance entre l'accrétion et la régression observées sur les marais de l'Île-aux-Coudres et de Kamouraska et le cycle du Saros

Île-aux-Coudres (année)	Kamouraska (année)	Gain (ha)	Perte (ha)	Taux moyen (ha/année)	Cycle d'érosion du saros	Cycle de régénération du saros
1964-1980		11,58		0,72		1979-1988
1980-2001		8,79		0,42		1997-2006
2001-2011		0,69		0,069	2006-2015	
	1929-1948	2,91		0,15		1943-1952
	1948-1974	11,57		0,45	1970-1979	
	1974-1985	12,02		1,09		1979-1988
	1985-2008	3,04		0,13	2006-2015	
	1929-1948		8,58	0,45		1943-1952
	1948-1974		1,7	0,06	1970-1979	
	1974-1985		4,57	0,42		1979-1988
	1985-2008		11	0,48	2006-2015	

Source : D'après des données de Careau (2010) In Mathieu (2008 : 41).

et ne tiennent pas compte de facteurs externes à l'écosystème tels que le cycle du Saros par exemple. Des études suggèrent que le niveau marin mondial est en hausse, mais les données sont encore mal connues et se contredisent; ses impacts ne seront peut-être pas ceux auxquels on s'attend. En ce qui concerne le moyen estuaire du Saint-Laurent, l'analyse des données marégraphiques prouve que le niveau marin est, au contraire, en baisse (Hatvany, 2013 : 29). Les marais ont bien résisté jusqu'à maintenant aux diverses fluctuations du niveau marin, pourquoi en serait-il autrement de nos jours ? D'autant plus que l'élévation du niveau marin à l'échelle mondiale semble demeurer pour l'instant suffisamment lente pour que les marais aient le temps de s'adapter. Le cycle de régénération du Saros qui va s'amorcer en 2015 devrait également permettre aux marais de progresser en atténuant les effets de la hausse du niveau marin mondial.

Conclusion

Les marais salés se forment sur des reliefs peu accidentés et à l'abri des vagues, ce qui permet aux sédiments en suspension de se déposer. Ils se divisent en deux parties distinctes : la slikke et le schorre qui sont parcourus par des chenaux permettant la montée et l'évacuation de la marée. La slikke est une large vaseuse qui est presque entièrement submergée à chaque marée haute, aucune végétation ne peut survivre dans ces conditions. Le schorre est un milieu de transition entre le monde marin et terrestre. Il est submergé par les marées hautes de vives-eaux, ce qui permet à une végétation halophyte (*Spartina alterniflora* et *Spartina patens*) de pouvoir y pousser. Celle-ci augmente la consolidation des sédiments et permet au schorre de s'agrandir et de s'exhausser. Les services écologiques rendus par les marais intertidaux sont nombreux et essentiels au bien-être de la biosphère.

La protection de ces milieux est aujourd'hui d'actualité. Plusieurs lois contraignent les pressions anthropiques et sensibilisent la population à leur endroit. Les marais ont d'ailleurs longtemps vécu en équilibre avec l'Homme, ce n'est qu'à partir de l'industrialisation que leur superficie commença à régresser avec l'apparition de discours prônant la maîtrise de l'être humain sur l'environnement. Les discours scientifiques parlaient alors de la continuelle progression des marais. La perception de l'Homme a évolué en fonction du contexte historique. Les discours actuels décrivent ainsi l'Homme comme étant un élément nuisible au sein de son habitat et les études font part de l'érosion des marais causée par les changements climatiques. Ces discours ont permis la réhabilitation des marais et leur gestion est davantage responsable.

L'évaluation de l'évolution dynamique du marais de l'Île-aux-Coudres s'est fait grâce à une revue de la littérature, par des sorties de terrain durant lesquelles des données sur l'échantillonnage des végétaux furent prélevées par GPS, ces données permirent par la suite la réalisation de diverses cartes permettant de quantifier cette évolution.

Le marais de l'Île-aux-Coudres est situé dans le moyen estuaire du Saint-Laurent qui est un estuaire à coin salé avec marée. Un important bouchon vaseux est créé par la rencontre entre les eaux douces continentales et les eaux salées de l'océan dans ce secteur et alimente le

marais en sédiments par le biais des marées semi-diurnes et macrotidales. Il apparaît que le marais s'est agrandi entre 1964 et 2011 de 21,06 ha pour un taux moyen de 0,45 ha/année. Le marais est d'ailleurs protégé par son emplacement géographique des vents et des vagues dominants qui suivent l'axe fluvial du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

La différence de dynamique entre le marais de l'Île-aux-Coudres et celui de la baie de Kamouraska serait principalement le résultat de leur emplacement géographique. Le secteur du Nord-Ouest de l'Île-aux-Coudres est protégé des vents de tempêtes alors que la baie de Kamouraska ne l'est pas. Cependant, les deux marais sont en équilibre avec les conditions marines présentes.

À l'inverse des discours scientifiques actuels, nous avons démontré que les marais du fleuve Saint-Laurent ne sont pas tous en danger d'érosion dans le cadre des changements climatiques. Ce sont des écosystèmes dynamiques qui évoluent cycliquement. Leur capacité d'adaptation leur a permis de subir la hausse du niveau marin depuis 4 000 ans, il reste donc beaucoup d'espoir pour la protection et la restauration des milieux humides du Québec au cours des années à venir. Les connaissances globales du fonctionnement d'un écosystème aussi vaste et différencié que le fleuve Saint-Laurent ne sont pas encore accessibles dans sa totalité. C'est par la recherche de facteurs extérieurs au fleuve tels que les cycles du Saros ou les cycles d'ouragans dans l'Atlantique qui ont des impacts encore mal connus que nous pourrions mieux comprendre le cycle des marais en lui-même.

Bibliographie

- ALLEN, George P., KLINGEBIEL, André (1974) « La sédimentation estuarienne : exemple de la Gironde », *Bulletin du Centre de Recherches Pau-SNPA*, 8 (1) : 263-293.
- ANCTIL, François (2008) *L'eau et ses enjeux*, Bruxelles, Les Presses de l'Université Laval et les Éditions De Boeck Université.
- ATLAS DU CANADA (2009) Sensibilité des côtes à l'élévation du niveau de la mer. [Document cartographique] 1 cm = 20 km, Ottawa, Commission géologique du Canada.
- BAZIN, Nicolas et GAUDIN, Sylvain (2004) « Cartographie des stations : méthodes et conseils », Version 1.6., Champagne, CRFP, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires rurales.
- BÉDARD, Yves et al. (2008) « L'envahissement du réseau autoroutier du Québec par le roseau commun (*Phragmites australis*) », Exposé sur la séance sur la gestion de la propagation de plantes envahissantes du congrès annuel de 2008 de l'Association des transports du Canada à Toronto (Ontario).
- BÉLAND, Jacques et BERGERON, Robert (1959) « Esquisse géologique du Québec méridional », *Cahiers de géographie du Québec*, 3 (6) : 131-138.
- BERNATCHEZ, Pascal et DUBOIS, Jean-Marie M. (2004) « Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien », *Géographie physique et Quaternaire*, 58 (1) : 45-71.
- BERTNESS, Mark D. (2007) *The Ecology of Atlantic Shorelines*. Brown University, Sunderland, Sinauer Associates, Inc. Publishers.
- BOLDUC, Andrée et DUCHESNE, Mathieu J. (2008) « Découverte de mégadunes dans l'estuaire moyen du fleuve Saint-Laurent, Québec, Canada », *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 22 (2) : 125-134.
- BRODEUR, Denis et ALLARD, Michel (1983) « Les plates-formes littorales de l'Île-aux-Coudres, Moyen estuaire du Saint-Laurent, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, 37 (2) : 179-185.
- (1985) « Stratigraphie et Quaternaire de l'île aux Coudres, estuaire moyen du Saint-Laurent, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, 39 (2) : 183-197.
- CANARDS ILLIMITÉS CANADA (2012) « L'importance des milieux humides et les bienfaits qu'ils procurent », Canards Illimités Canada - La conservation des

- milieux humides. [En ligne] <http://www.ducks.ca> (page consultée le 30 juillet 2012).
- CAREAU, Chrystian (2010) « Les marais intertidaux du Saint-Laurent: complexités et dynamiques naturelles et culturelles », Université Laval, Département de géographie, Faculté de foresterie et de géomatique, Mémoire de maîtrise.
- CATANEO, Géraldine et STRETTA, Céline (2000-2001) « Les Estuaires. Lagunes et Estuaires sous l'influence de la marée », Département Hydraulique et Mécanique des Fluides, École nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique, d'Informatique, d'Hydraulique et des Télécommunications. [En ligne] <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0001/travaux/optsee/hym/9/estuaire.htm> (page consultée le 20 août 2012).
- CENTRE SAINT-LAURENT (1996) *Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume 1. L'écosystème du Saint-Laurent*, Montréal, Environnement Canada – Région du Québec, Conservation de l'environnement – et Éditions MultiMondes (Coll. « BILAN Saint-Laurent »).
- CENTRE SAINT-LAURENT (1996) *Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume 2. L'écosystème du Saint-Laurent*. Montréal, Environnement Canada – Région du Québec, Conservation de l'environnement – et Éditions MultiMondes (Coll. « BILAN Saint-Laurent »).
- CERNESSON, Flavie et MÜLLER, Jean-Pierre (2010) « Méthodes d'analyse spatiale et de modélisation spatio-temporelle », Extrait du dossier thématique « Information spatiale pour l'environnement et les territoires », Montpellier, Agropolis International.
- CHAMPAGNE, P., DENIS, R. et LEBEL, C. (1983) *Établissement de modèles caractérisant l'équilibre dynamique des estrans de la rive sud du moyen estuaire du Saint-Laurent*, Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques no. 1711. Québec Ministère des Pêches et des Océans.
- CLET, Martine et OCCHIETTI, Serge (1995) « Palynologie des sédiments de la fin de l'optimum climatique de l'interglaciaire sangamonien, Île aux Coudres, estuaire du Saint-Laurent, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, 49 (2) : 291-304.
- COMITÉ ZIP DU SUD-DE-L'ESTUAIRE (2006) Portrait du territoire de l'Isle-aux-Coudres dans le cadre de la gestion intégrée des îles habitées de l'estuaire du Saint-Laurent. [Document cartographique] 1 : 45 000. Transverse Modifié (MTM) Zone 7, NAD 83.
- CRAIN, Caitlin Mullan, SILLIMAN, Brian R., BERTNESS, Sarah L. and BERTNESS, Mark D. (2004) « Physical and Biotic Drivers of Plant Distribution Across Estuarine Salinity Gradients », *Ecology*, 85 (9) : 2539-2549.
- DESPLANQUE, Con and MOSSMAN, David J. (2004) « Tides and their seminal impact on the geology, geography, history and socio-economics of the Bay of Fundy, eastern Canada », *Atlantic Geology*, 40 : 1-130.

- DEVEAU, Jean-Pierre (1968) « Quelques idées récentes sur les glaces de l'estuaire du Saint-Laurent », *Géographie alpine*, 56 (3-4) : 603-610.
- DIONNE, Jean-Claude (1989) « An Estimate of Shore Ice Action in a Spartina Tidal Marsh, St. Lawrence Estuary, Québec », *Journal of Coastal Research*, 5 (2) : 281-293.
- (2003) « Observations géomorphologiques sur les méga-blocs du secteur sud-est de la batture argileuse de la baie à l'Orignal, au parc du Bic, dans le Bas-Saint-Laurent (Québec) », *Géographie physique et Quaternaire*, 57 (1) : 95-101.
- (2004) « Âge et taux moyen d'accrétion verticale des schorres du Saint-Laurent estuarien, en particulier ceux de Montmagny et de Sainte-Anne-de-Beaupré, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, 58 (1) : 73-108.
- DRAPEAU, Georges (1992) « Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent », *Géographie physique et Quaternaire*, 46 (2) : 233-242.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2011) « Plus ou moins de milieux humides le long du Saint-Laurent ? », Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca> (page consultée le 27 juillet 2012).
- (2012) « Fleuve Saint-Laurent », Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca> (page consultée le 27 juillet 2012).
- (2012) « Hydrographie du Saint-Laurent », Environnement Canada. [En ligne] <http://www.ec.gc.ca> (page consultée le 1^{er} août 2012).
- FAGHERAZZI, Sergio, KIRWAN, Matthew L., MUDD, Simon M., GUNTENSPERGEN, Glenn R., TEMMERMAN, Stijn, D'ALPAOS, Andrea, VAN DE KOPPEL, Johan, RYBCZYK, John M., REYES, Enrique, CRAFT, Chris and CLOUGH, Jonathan (2011) « Numerical Models of Salt Marsh Evolution : Ecological, Geomorphic, and Climatic Factors », *Reviews of Geophysics*, 49 : 1-28.
- FLEURBEC (1985) *Plantes sauvages du bord de la mer, Guide d'identification*, Saint-Augustin, Fleurbec éditeur.
- FRONTIER, Serge et PICHOD-VIALE, Denise, et al. (1998) *Écosystèmes. Structure, Fonctionnement, Évolution*, Quatrième édition, Paris, Dunod (« Coll. Sciences Sup »).
- GAUTHIER, Gérard (1999) *L'Isle-aux-Coudres (1535-2005). Histoire, beautés et misères des anciens*, Chicoutimi, Association de généalogie des familles Gauthier.
- GAUTHIER, Maud (2011) « Écologie et répartition spatiale du genre *Atriplex* sur le marais salé de la baie de Kamouraska », Université Laval, Département de géographie, Faculté de foresterie et de géomatique, Mémoire de baccalauréat.
- GAUTHIER, Nathalie et ROUCHERAY, Pascale (2004) « La mesure de la vitesse et de la direction du vent », InterMET. [En ligne] <http://galileo.cyberscol.qc.ca> (page consultée le 27 juillet 2012).

- GEDAN, Keryn B. and BERTNESS, Mark D. (2010) « How will warming affect the salt marsh foundation species *Spartina patens* and its ecological role? », *Oecologia*, 164 : 479-487.
- GOOGLE EARTH (2011) Photographie aérienne du marais de l'Île-aux-Coudres, 1 : 6 180.
- GRATIOT, N. et al. (2008) « Significant contribution of the 18.6 year tidal cycle to regional coastal changes », *Nature Geoscience* (1) : 169-172.
- HATVANY, Matthew G. (2009) *Paysages de marais. Quatre siècles de relations entre l'humain et les marais du Kamouraska*, Québec, Société historique de la Côte-du-Sud, Ruralys.
- (2009) « Wetlands and Reclamation », In KITCHIN, R. and THRIFT, N. (eds) *International Encyclopedia of Human Geography*, Volume 12, Oxford, Elsevier.
- (2011) « Wetlands », In BROSNAN, Kathleen A. (2011) *Encyclopedia of American Environmental History*, Volume 4, New York, Facts on File.
- (2012) « Growth and Erosion: A Reflection on Salt Marsh Evolution in the St. Lawrence Estuary using HGIS », In BONNELL, Jennifer and FORTIN, Marcel, *Historical GIS in Canada*, Calgary, University of Calgary Press "Canadian History & Environment" Series (en presse 2013).
- (2013) « Progression et érosion des marais salés : La construction de paradigmes et discours de développement et de risque au Québec », Exposé dans le cadre du cinquième colloque international du Groupe d'Histoire des Zones Humides de 2013 co-organisé avec l'Université Laval et Dalhousie University (Orléans).
- LA MÉMOIRE DU QUÉBEC (2012) « L'Isle-aux-Coudres (municipalité) », La Mémoire du Québec. [En ligne] <http://www.memoireduquebec.com> (page consultée le 2 août 2012).
- LAROUCHE, Ursula (1995) « Les milieux humides : attention fragiles! », *Continuité*, 64 : 26-27.
- LE QUERREC, Jacques (1981) « L'île aux Coudres. Vers un divorce ethno-écologique ? », *Anthropologie et Sociétés*, 5 (1) : 165-189.
- MATHIEU, Kim (2008) « Évolution du marais de la baie de Kamouraska : l'effet de coincement », Université Laval, Département de géographie, Faculté de foresterie et de géomatique, Mémoire de maîtrise.
- MCKEE, Karen L. and PATRICK, W.H., Jr. (1988) « The Relationship of Smooth Cordgrass (*Spartina alterniflora*) to Tidal Datums : A Review », *Estuaries*, 11 (3) : 143-151.
- MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DE LA FAUNE (1964) Photographie aérienne du marais de l'Île-aux-Coudres, Q64114-41, 1 : 15 840, Québec, Gouvernement du Québec, La Géomathèque.

- (1980) Photographie aérienne du marais de l'Île-aux-Coudres, Q80624-158, 1 : 20 000, Québec, Gouvernement du Québec, La Géomathèque.
- (2001) Orthophotographie du marais de l'Île-aux-Coudres, Q01806-070, 1 : 40 000, Québec, Gouvernement du Québec, Photocartotheque québécoise.
- OCCHIETTI, S., et al. (1995) « Séquence de la transition Illinoien-Sangamonien : forage IAC-91 de l'Île aux Coudres, estuaire moyen du Saint-Laurent, Québec », *Earth Science*, 32 : 1950-1964.
- ORSON, Richard A., WARREN, R. Scott, NIERING, William A. (1987) « Development of a Tidal Marsh in a New England River Valley », *Estuaries* (10) 1 : 20-27.
- PASKOFF Roland (1998) « Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer prévue pour les prochaines décennies », *Annales de Géographie*, 107 (600) : 233-248.
- (2006) *Les littoraux : impacts des aménagements sur leur évolution*, Paris, Armand Colin.
- PÊCHES ET OCÉANS CANADA (2012) « Archivé - Marais salés », Pêches et Océans Canada. [En ligne] <http://www.glf.dfo-mpo.gc.ca> (page consultée le 1^{er} août 2012).
- PENNINGS, Steven C. and BERTNESS, Mark D. (2001) *Marine Community Ecology*, Sunderland, Sinauer Associates.
- PENNINGS, Steven C. and CALLAWAY, Ragan M.. (2003) « Geographic Variation in Positive and Negative Interactions Among Salt Marsh Plants », *Ecology*, 84 (6) : 1527-1538.
- PERRON, N. et GAUTHIER, S. (2000) *Histoire de Charlevoix*, Québec, Les Presses de l'Université Laval et les Éditions de l'IQRC.
- QUESTE, Caroline (2011) « Les milieux humides dans le Sud du Québec : entre destruction et protection. Analyse critique et élaboration d'une stratégie de conservation », Québec, Université du Littoral Côte d'Opale, Université des Sciences et Technologies de Lille, Nature Québec, Rapport de stage.
- QUILLIAM, Louise et ALLARD Michel (1989) « Évolution géomorphologique du glissement de terrain et du marais littoral de Saint-Joseph-de-la-Rive, Charlevoix, Québec », *Géographie physique et Quaternaire*, 43 (2) : 367-376.
- REDFIELD, Alfred C. (1972) « Development of a New England Salt Marsh », *Ecological Monographs*, 42 (2) : 201-237.
- RICKLEFS, Robert E. et MILLER, Gary L. (2005) *Écologie*, Bruxelles, Éditions De Boeck Université.
- SCHWARTZ, Maurice L., ed. (2005) *Encyclopedia of Coastal Science*, Whashington, Department of Geology Western Washington University, Springer (Coll. « Encyclopedia of Earth Sciences Series »).

- SÉRODES, J.B. et DUBÉ, M. (1983) « Dynamique sédimentaire d'un estran à spartines (Kamouraska, Québec) », *Le Naturaliste canadien*, 110 : 11-26.
- STATISTIQUE CANADA (2012) « L'Isle-aux-Coudres (Municipalité) », Statistique Canada. [En ligne] <http://www12.statcan.gc.ca> (page consultée le 27 juillet 2012).
- STRAHLER, Alan and ARCHIBOLD, O. W. (2008) *Physical Geography. Science and Systems of the Human Environment*, Fourth Edition Canadian Version, Hoboken, Jon Wiley & Sons, Inc.
- TRENHAILE, Alan S. (2010) *Geomorphology. A Canadian Perspective*, Fourth Edition, Don Mills, Oxford University Press.
- TURNER, Nancy J. (2012) « Quenouille », L'Encyclopédie canadienne. [En ligne] <http://www.thecanadianencyclopedia.com> (page consultée le 20 août 2012).
- USGS et NASA (2011). Photographie thermique Landsat-5 TM du marais de l'Île-aux-Coudres, LT50120272011229EDC00, Prise le 17 août 2011 à 15h14, UTM zone 19N, WGS 84, Virginie.
- VALADAS, Bernard (2004) *Géomorphologie dynamique*, Paris, Armand Collin (Coll. « Campus »).
- VANNOTE, Robin L. et al. (1980) « The River Continuum Concept », *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* (37) : 130 à 137.
- VERGER Fernand (1995) « Slikkes et schorres : milieu et aménagement », *Norois*, 165 : 235-245.
- (2009) *Zones humides du littoral français : estuaires, deltas, marais et lagunes*, Paris, Belin.