



Écosystèmes & biodiversité

Évolution des hauts marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent et stratégies de protection des espèces en situation précaire dans une perspective de changements climatiques

Rapport final remis à :
Consortium Ouranos du Québec

Par :
Najat Bhiry, Danielle Cloutier, Line Couillard, Aurée Gervais,
Philippe Lamarre, Mathieu Normandeau, Abdoul Ousmane Dia

Université Laval, Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique et Faculté de sciences et génie, Département de géographie et Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs

Rapport de recherche # 554016-111

Octobre 2013

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Canada 

www.planstlaurent.qc.ca

Québec 

Table des matières

1. Introduction	3
2. Contexte / objectifs.....	4
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	5
4. Méthodologie / données	6
5. Résultats	20
6. Analyse et discussion.....	111
7. Conclusion et recommandations	115
8. Références.....	118
Annexes	122

1. Introduction

Les pressions anthropiques exercées par les activités humaines telles les aménagements d'infrastructures routières, ferroviaires ou côtières, le développement industriel ou résidentiel, l'enrochement des rives et la construction de murets entraînent des pertes d'habitats des espèces végétales menacées ou vulnérables. Par l'application des lois et des réglementations actuelles, le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) dispose des outils nécessaires pour contrer ces menaces. Par exemple, en vertu de la Loi sur les espèces menacées ou vulnérables, il peut attribuer un statut de protection aux espèces qui le nécessitent ainsi qu'à leurs habitats. Le ministère élabore aussi des plans de conservation afin de définir les actions à mettre en œuvre pour assurer la survie à long terme des espèces en situation précaire sur l'ensemble de leur aire de répartition¹. Les marais intertidaux du fleuve Saint-Laurent, qui constituent des milieux très dynamiques, abritent quelques-unes des espèces concernées par de tels plans.

Toutefois, à long terme, les changements climatiques anticipés sont susceptibles d'entraîner une multitude d'impacts qui, indépendamment des efforts de conservation face aux activités humaines actuelles, risquent de mettre davantage en péril les espèces menacées ou vulnérables. Contrairement aux impacts des pressions anthropiques qui sont bien connus, les impacts sur ces milieux liés aux changements climatiques demeurent méconnus et peu documentés. Les travaux de Jolicœur et Couillard (2007a et b, 2008) identifient l'érosion des berges comme une menace potentiellement importante à la survie de plusieurs espèces menacées ou vulnérables. En effet, il a été observé que l'érosion est très présente dans plusieurs marais tels ceux de l'Isle-aux-Grues et de Château-Richer où de grands radeaux de végétation sont arrachés du haut marais, induisant ainsi une perte d'habitat pour ces espèces. Dans d'autres sites, ce phénomène semble moins actif, sans que l'on puisse vraiment comprendre pourquoi.

Dans les marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent, trois espèces floristiques menacées font l'objet de plans de conservation : la ciculaire de Victorin, l'ériocaulon de Parker et le gentianopsis de Victorin. Ces plantes ont également fait l'objet d'un suivi de l'état de leur population dans plusieurs marais de l'estuaire d'eau douce (Gilbert, 2009 et 2010).

Parmi les actions identifiées dans les plans de conservation du MDDEFP, ainsi que dans les rapports de Gilbert (2009 et 2010), il est recommandé de procéder à une évaluation de l'impact de l'érosion des rives sur l'habitat des espèces menacées ou vulnérables et de réaliser, pendant quelques années, le suivi d'un certain nombre de populations pour mieux comprendre leur dynamique. Or, aucune étude récente en regard du taux de recul des berges et des agents en cause dans l'ensemble de ce secteur du Saint-Laurent n'a été menée depuis les travaux de Troude (1986), de Dionne (1986 et 2000) et de Dionne et Bouchard (2000), lesquels sont limités à quelques sites en aval de Québec. Dans un contexte de changements climatiques, il est impératif de mieux documenter l'évolution des berges de l'estuaire d'eau douce afin d'anticiper les changements à venir et de prendre les mesures nécessaires pour assurer le maintien de sa biodiversité et la sauvegarde des espèces menacées ou vulnérables.

¹ (Voir : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/especes/index.htm>)

2. Contexte et objectifs de l'étude

Au sud du Québec, les marais intertidaux sont affectés par de l'érosion et/ou de la submersion induisant ainsi une perte d'habitat des espèces végétales ou animales. Les facteurs en cause peuvent être anthropiques, naturels ou la combinaison des deux. En termes naturels, les causes sont principalement d'ordre climatique : hausse du niveau de la mer ou du fleuve, tempêtes, redoux, disparition des glaces de rivage, etc. Par exemple, les hausses de températures durant l'hiver ou très tôt au printemps causent le morcellement du pied de glace qui, en principe, devrait protéger les marais de l'action érosive des vagues durant ces périodes. La destruction épisodique du pied de glace est suivie par le déplacement vers l'aval des glaces, sous lesquelles est soudée une couche de sédiments (Troude et Sérodes, 1988; Dionne, 1993), ce qui accentue l'érosion des marais. De même, la force et la fréquence des tempêtes accompagnées de forts vents augmentent l'action érosive des vagues.

La présente étude porte sur quatre marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent et a pour but de statuer sur les causes de l'érosion et la perte d'habitat des espèces menacées ou vulnérables. Il est suggéré que les différences intra-sites et inter-sites des taux d'érosion sont liées aux caractéristiques géomorphologiques, végétales et hydrodynamiques à l'échelle locale. Dans ce contexte, un travail pluridisciplinaire en géomorphologie, sédimentologie, océanographie et en écologie a été réalisé.

Le principal objectif de ce projet est de documenter la dynamique des marais intertidaux de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent et d'identifier les principaux facteurs responsables de l'évolution des berges (e.g. érosion), afin de permettre au MDDEFP d'adapter ses stratégies de sauvegarde des espèces menacées ou vulnérables et de la biodiversité de ce secteur.

Les objectifs spécifiques de l'étude consistent à :

- caractériser les marais à l'étude de l'estuaire d'eau douce en fonction des paramètres pouvant avoir un lien avec le taux d'érosion (configuration de la rive, exposition, topographie, dépôts de surface, végétation, etc.);
- documenter l'évolution historique des marais à l'étude;
- estimer le taux de recul du talus d'érosion;
- évaluer la diversité, la densité et le recouvrement de la végétation des marais de l'estuaire d'eau douce en mettant l'accent sur les espèces en situation précaire et en signalant l'occurrence des espèces exotiques envahissantes;
- analyser les paramètres marégraphiques et météorologiques relatifs au secteur à l'étude;
- à partir d'une meilleure compréhension des facteurs actuellement responsables de l'évolution des berges de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent, identifier les facteurs hydrologiques et/ou climatiques les plus susceptibles d'amplifier ces phénomènes et fournir un modèle conceptuel mettant en évidence la relation complexe entre ces divers facteurs;
- identifier les caractéristiques des sites qui pourraient être plus résilients ou les plus aptes à s'adapter aux changements climatiques et d'ajuster, en conséquence, le choix des cibles prioritaires de conservation lors de la mise à jour des plans de conservation des espèces menacées ou vulnérables.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

L'érosion des berges peut être attribuée à certaines activités humaines comme les variations des niveaux d'eau causées par les ouvrages tels des barrages, le déboisement des rives, l'effet des vagues produites par le passage des navires, l'enrochement, l'agriculture, etc. Elle peut être associée également à certains facteurs naturels, tels que la hausse du niveau marin relatif, les variations naturelles des niveaux d'eau, les courants influencés par les débits, les hautes vagues de tempêtes, le ruissellement de l'eau dû aux fortes pluies ou à la fonte des neiges, les mouvements des glaces de rive, le gel et le dégel.

Comme plus de la moitié du recul se produit au cours de la période inter-glacielle, les vagues et les courants de marée semblent constituer les principaux agents responsables de ce phénomène (Dionne et Bouchard, 2000). De même, la nature du sol, la pente de la rive, la morphologie ou l'exposition de la côte, ainsi que la dessiccation et la défloculation des argiles sont aussi identifiés comme des facteurs influençant le taux d'érosion des berges (Environnement Canada, 2010). Il a aussi été démontré que les processus de gel-dégel répétés et d'hydratation-déshydratation affectent d'une façon significative les berges formées de sédiments fins, ce qui provoque l'abaissement de la surface de l'estran (Dionne, 1989; Bernatchez et Dionne, 1999). Par ailleurs, l'érosion des marais est accentuée par l'activité intensive des oies sur la batture, au printemps et à l'automne. En certains endroits, le trop grand nombre d'oies constitue un facteur aggravant.

En aval de la région d'étude, dans l'estuaire d'eau salée et le golfe du Saint-Laurent, le recul du littoral, constitué de formations meubles varie généralement entre 0,5 et 2 m/an (Bernatchez et Dubois, 2004) ; ce recul émane principalement de l'action des vagues, particulièrement lors des marées de vive-eau et des tempêtes (Bernatchez, 2003). Dans le golfe du Saint-Laurent (Percé, Sept-Îles et les îles-de-la-Madeleine), l'érosion des berges et les risques de submersion, selon Bernatchez *et al.* (2008) et Savard *et al.* (2008), se sont intensifiés pendant le 20^e siècle ; ils sont dus principalement à la hausse du niveau de la mer, la diminution graduelle des glaces de mer et des glaces de rive, les changements du régime des tempêtes et les modifications de la fréquence des cycles de gel et de dégel des redoux hivernaux et des pluies hivernales.

Plus en amont, Environnement Canada a mis en place depuis 1998, un programme de suivi de l'érosion des berges à l'aide d'un réseau de piquets repères formé de plusieurs stations réparties entre le lac Saint-Louis et Saint-Pierre-les-Becquets (Environnement Canada, 2010). Les résultats obtenus révèlent des taux de recul très élevés notamment dans la partie nord-est de l'île des Barques où il a atteint 15 m/année entre 2005 et 2007. L'analyse des données suggère que la navigation (vagues de batillage) et les fluctuations du niveau de l'eau sont les principaux facteurs expliquant ces valeurs de recul dans cette portion du Saint-Laurent. Dans ce secteur, en plus de l'érosion, il semble que le niveau d'eau du fleuve continuera à baisser au cours des 50 prochaines années à cause des changements climatiques anticipés ce qui provoquera l'exondation davantage de vasières, milieux propices à la germination des graines des espèces exotiques envahissantes telles le roseau commun (Tougas-Tellier *et al.*, 2013).

Dans le secteur qui nous intéresse ici (estuaire d'eau douce), Dionne et Bouchard (2000) constatent qu'à Montmagny le taux annuel de recul de la microfalaïse des hauts marais a augmenté au cours de la dernière décennie passant de 129 cm, en 1984-1986, à 168 cm en 1996-1998. Selon ces auteurs, les facteurs qui auraient causé cette importante érosion sont multiples : tempêtes, marées, processus glaciels, hausse du niveau du fleuve, etc. Par ailleurs, ils concluent qu'en raison du bilan sédimentaire fragile des marais intertidaux estuariens, un seuil critique pourrait être dépassé très prochainement et qu'une gestion

plus éclairée de ces milieux s'impose. Compte tenu des informations fragmentaires dont nous disposons dans l'estuaire d'eau douce, il s'avère nécessaire d'entreprendre une étude basée sur des travaux de terrain ainsi que des analyses de bases données météorologiques et marégraphiques.

En plus des processus d'érosion des berges qui semblent induire une perte significative d'habitat de diverses espèces exacerbant ainsi leur vulnérabilité, il y aurait les menaces liées à la submersion ou à l'exondation des hauts marais de l'estuaire d'eau douce. L'occurrence de ces deux processus demeure très peu documentée dans ce secteur du fleuve. Or, il semble qu'une hausse du niveau marin peut induire la submersion des hauts marais et provoquer ainsi une perte d'habitat puisque certaines plantes ont probablement une tolérance limitée à l'inondation. D'un autre côté, l'exondation des berges suite à la baisse du niveau du fleuve Saint-Laurent pourrait survenir et favoriser la mise en place des espèces exotiques envahissantes. À ce titre, dans le tronçon fluvial, les substrats humides exondés sont des lieux propices pour la germination de certaines plantes exotiques telles le roseau commun eurasiatique (*Phragmites australis* subsp. *australis*) (Lavoie, 2008). Une fois établies, ces espèces peuvent prendre une expansion importante causant par le fait-même un déclin de la biodiversité des marais colonisés (Keller, 2000; Lavoie *et al.* 2003; Tougas-Tellier *et al.* 2013).

Dans l'estuaire d'eau douce, où le roseau envahisseur est également présent, son comportement est peu documenté. Il semble que celui-ci, à l'instar de la renouée japonaise (*Fallopia japonica*), une autre espèce exotique envahissante, s'installe dans la partie supérieure des marais à la suite de perturbations. Bien que ce processus semble avoir des effets moins prononcés dans notre secteur d'étude qu'en amont, il est important d'évaluer le risque que présente l'expansion des espèces exotiques pour les espèces indigènes, en particulier celles en situation précaire dans l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent, advenant une baisse significative du niveau du fleuve au cours des prochaines décennies, comme le prévoient certains modèles climatiques (Crowley, 2003; Morin *et al.* 2006).

Ce projet s'inscrit aussi dans les priorités identifiées dans la nouvelle entente Canada-Québec sur le Saint-Laurent. En effet, la conservation de la biodiversité, l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur les écosystèmes et la région de Québec font partie des enjeux, des orientations et des zones névralgiques prioritaires identifiés dans le plan d'action quinquennal (2011-2016).

4. Méthodologie

4.1 Région et sites d'études

Ce projet porte sur le secteur de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent tel que défini par Gauthier (2000) et dont les limites correspondent sensiblement aux municipalités de Bécancour et de Batiscan à l'ouest, et de Saint-Jean-Port-Joli et de Saint-Joachim (cap Tourmente) à l'est (Figure 1). À l'intérieur de ce territoire, quatre marais intertidaux ont été sélectionnés. En partant de l'amont, il s'agit des marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, de Château-Richer, de Beaumont et de l'Isle-aux-Grues (Figure 2). Ces marais ont déjà été identifiés par le MDDEFP comme cibles prioritaires d'intervention dans les plans de conservation de trois espèces végétales désignées menacées au Québec, soit la cicutaire maculée variété de Victorin, l'ériocaulon de Parker et le gentianopsis élancé variété de Victorin (Jolicoeur et Couillard, 2007a et b, 2008). Ces sites abritent les populations de meilleure qualité sur le plan démographique (effectifs) et écologique (habitat très peu anthropisé). De même, ils ont été choisis pour développer

une méthode de suivi et d'évaluation de l'état des populations de ces mêmes espèces en situation précaire (Gilbert, 2009). Le haut marais de l'Isle-aux-Grues, pour sa part, est reconnu depuis longtemps comme un habitat d'importance capitale pour le râle jaune, une espèce d'oiseau en situation précaire au Québec et au Canada. Aussi, ces sites ont été sélectionnés parmi les autres marais de l'estuaire d'eau douce pour représenter des conditions environnementales distinctes en termes écologiques, géologiques et géomorphologiques (ex. trait de côte, dépôts quaternaires, exposition).

Dans ce secteur, la largeur du fleuve varie de 870 m, au pont de Québec, à 15 km à l'extrémité est de l'île d'Orléans. La profondeur de la voie de navigation (chenal) varie en moyenne de 13 à 40 m. L'estuaire d'eau douce est soumis aux marées et est alimenté par les eaux douces provenant des Grands Lacs et par les autres tributaires situés en amont ainsi que d'eau légèrement saumâtre provenant du golfe. Les berges ont été modifiées, entre autres, à cause de la construction des infrastructures maritimes telles le quai de Portneuf et les ports de Bécancour, Trois-Rivières et Québec. De même, dans la région de Québec, les rives ont été presque entièrement artificialisées lors de l'aménagement de l'autoroute Dufferin-Montmorency au début des années 1970 et plus récemment du boulevard Champlain. Toutefois, plusieurs marais tels que ceux sélectionnés pour cette étude demeurent très peu anthropisés.

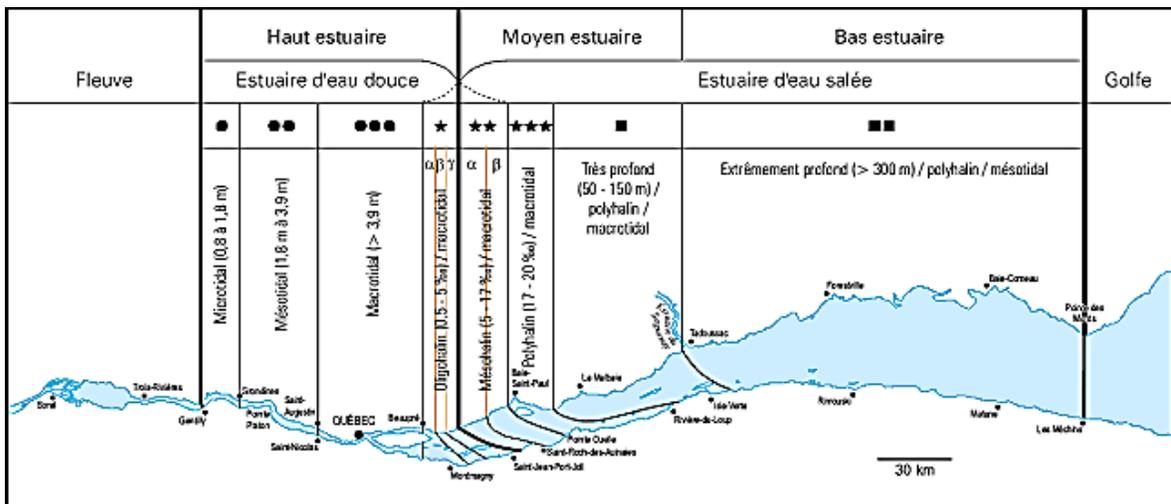


Figure 1 : Localisation et limites de l'estuaire du Saint-Laurent (Gauthier, 2000).

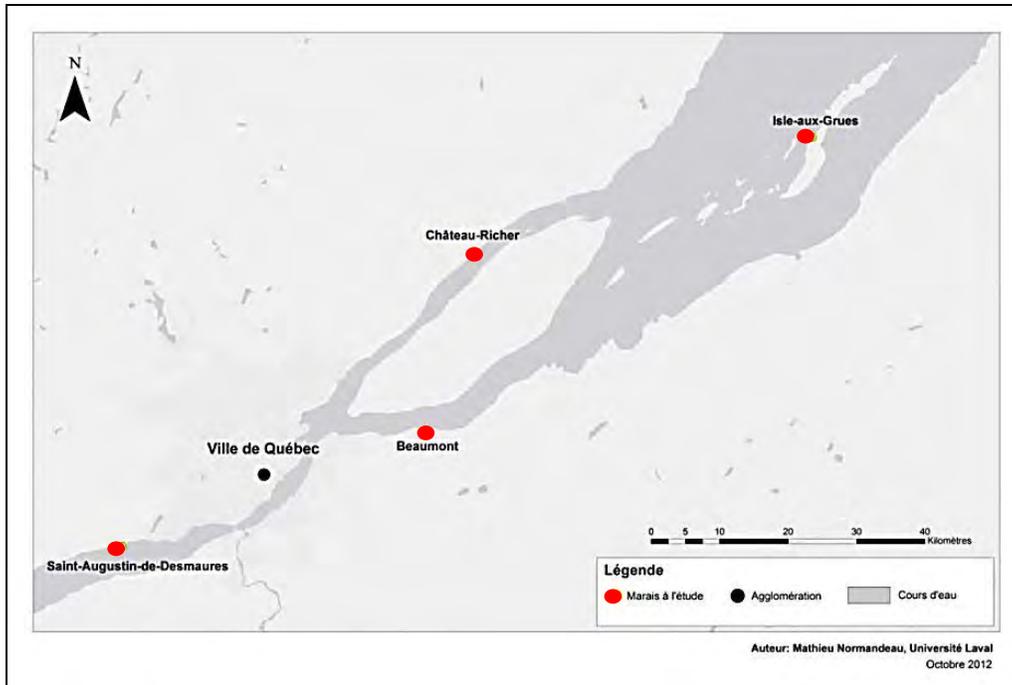


Figure 2 : Localisation des sites d'étude dans l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent.

Les principales caractéristiques de chacun de marais sont présentées ci-dessous, suivies d'un tableau comparatif (Tableau 1).

Marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures est situé en amont de la région d'étude, sur la rive nord du fleuve, au sein de la municipalité du même nom. Ce marais subit l'influence des marées dont le marnage est de 4,2 m et atteint 5,5 m lors des grandes marées. Le niveau moyen de l'eau est de 2,4 m. Ces données se réfèrent à la localité de Saint-Nicolas, qui est la plus proche du marais à l'étude; le port de référence est celui de Québec (Pêches et Océans Canada, 2012). Le courant près de cette zone peut atteindre 3 nœuds lors du jusant et 2,7 nœuds durant le flot. La marée est de type mixte semi-diurne, soit deux oscillations complètes par jour avec une inégalité en hauteur et en temps entre les deux oscillations (Services hydrographiques du Canada, 2012). La portion navigable (chenal) est de 1,3 km de largeur. Le chenal à cet endroit n'est pas balisé puisque la profondeur est suffisante pour la navigation (Services hydrographiques du Canada, carte 1315).

Le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, situé dans le Parc du Haut-Fond, occupe une baie semi-ouverte orientée vers le sud-ouest, donc exposée aux processus hydrodynamiques et aux vents provenant de cette direction. La zone étudiée de ce marais mesure environ 212 m de largeur par 207 m de profondeur.

Le site d'étude est composé d'un marécage arbustif et arboré, d'un schorre supérieur, d'un schorre inférieur et d'une slikke. La limite entre le marécage arbustif et arboré et le schorre est marquée par une microfalaise, dont la hauteur peut atteindre un mètre, et par une plage sableuse. Au niveau de cette microfalaise, les arbres sont déchaussés ou

déracinés, illustrant l'impact de l'érosion à cet endroit. La limite entre le schorre supérieur et le schorre inférieur est moins tranchée; en effet le talus du schorre supérieur est peu élevé, d'une hauteur de 5 à 15 cm à peine, ce qui est suffisant toutefois pour qu'il y ait un changement de végétation. Le passage du schorre inférieur vers la slikke est graduel et se traduit par une diminution notable de la densité de la végétation. L'abondance de blocs glaciels à l'entrée de la baie est une des caractéristiques remarquables de ce site. Par ailleurs, le marais est parcouru par deux cours d'eau : l'un dans sa partie ouest, qui est permanent, et l'autre, dans sa partie est, qui est intermittent et traverse une zone presque dénudée de végétation. L'ensemble du schorre inférieur est parsemé de mares et marelles.

Tableau 1: Principales caractéristiques des quatre marais à l'étude

CARACTÉRISTIQUES	Saint-Augustin	Beaumont	Château-Richer	Isle-aux-Grues
Géomorphologiques				
Forme de la rive	Baie semi-ouverte	Sub-sinueuse	Rectiligne	Rectiligne
Occurrence d'une plage	Présente à l'est	Présente	Absente	Absente
Pente moyenne (%)	1,5	4,3	3,1	2,9
Superficie du schorre supérieur (m ²)	4800	2106,7	1800	4100
Superficie du schorre inférieur (m ²)	19000	4500	9000	10250
Ratio schorre supérieur/schorre inférieur	0,25	0,47	0,20	0,40
Hauteur moyenne du talus (cm)	15	15	34	58
Exposition du talus (degré)	178	360	140	322
Épaisseur des dépôts de surface (cm)				
• Schorre supérieur	> 50	30	> 50	> 50
• Schorre inférieur	30-40	< 10	> 50	0-30
• Slikke	30	> 50	> 50	< 20
Hydrodynamiques				
Amplitude moyenne de la marée (m)	4,2	4,7	4,8	4,7
Amplitude grande marée (m)	5,5	6,2	6,2	6,3
Niveau d'eau moyen (m)	2,4	2,5	2,6	2,7

Marais de Beaumont

Le marais de Beaumont est situé dans l'anse de Vincennes, sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent, face à la portion ouest de l'île d'Orléans. À cet endroit, le fleuve est divisé en deux segments. Le segment nord est large de 2 km, toutefois la voie navigable n'est que 92 m de largeur. Le segment situé au sud de l'île a aussi une largeur de 2 km, incluant un chenal naturel de 1,7 km. Toutefois, les balises de la voie légalement navigable délimitent une zone de 650 m de largeur. Les marées près de Beaumont ont un marnage moyen de 4,7 m. Lors des grandes marées, ce marnage peut atteindre 6,2 m. Les courants de flots atteignent généralement 3 nœuds et les courants de jusant 4 nœuds. Ces données se réfèrent à la localité de Saint-Laurent, sur l'île d'Orléans; le port de référence est celui de Saint-François (Pêches et Océans Canada, 2012).

Le site d'étude borde une rive sub-sinueuse et a une largeur d'environ 130 m et une profondeur d'environ 70 m. Les dépôts de surface sont silto-sableux. Toutefois, l'estran rocheux occupe une importante superficie, soit environ 60 % du site. Les schorres supérieur et inférieur sont délimités par un talus de faible hauteur (5 cm – 10 cm) et sont confinés entre une plage sableuse en amont et une plate-forme rocheuse en aval. La slikke est très vaste (plus de 300 m de profondeur), limitée dans sa partie inférieure par un large cordon de gros blocs (d'environ 160 m). Une rivière se jette à l'est du marais par l'entremise d'une chute. De petits chenaux de drainage ainsi que des mares et marelles parsèment le bas marais.

Ce marais est caractérisé par sa localisation au pied d'une falaise morte rocheuse d'une centaine de mètres de hauteur. Cette falaise est colonisée par des arbres (conifères et feuillus) et des arbustes. Au pied de cette falaise, ont été observés plusieurs sacs de plastique remplis de déchets qui furent sans doute lancés à cet endroit par les résidents du camping et de son voisinage, qui occupent les terrains situés en haut de la falaise.

Marais de Château-Richer

Le marais de Château-Richer borde une rive rectiligne située à l'est de la municipalité du même nom, sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent, en face de la portion est de l'île d'Orléans. La hauteur de marnage des marées moyennes atteint 4,8 m et 6,2 m pour les grandes marées. Dans ce secteur, le niveau moyen de l'eau est de 2,6 m. Ces données sont basées sur la localité de Saint-Anne-de-Beaupré et le port de référence est celui de Saint-François (Pêches et Océans Canada, 2012).

Le marais de Château-Richer est, sans doute, partiellement abrité des vents du sud et du sud-ouest par l'île d'Orléans. Plusieurs chenaux de drainage parcourent le schorre inférieur et la slikke. De même, de nombreuses mares et marelles sont présentes à la surface du schorre supérieur et du schorre inférieur. Un des faits remarquables est la fracturation du schorre supérieur en larges blocs. Quand ces fractures sont exploitées par l'eau de ruissellement, elles sont surcreusées, ce qui contribue probablement au détachement de blocs. Ces fracturations résulteraient de l'effet combiné des processus de gel et dégel et de la circulation de l'eau.

La zone à l'étude du marais de Château-Richer mesure 150 m de largeur et 142 m de profondeur. Contrairement aux deux marais précédents, les schorres supérieur (bande mince) et inférieur sont nettement délimités par une rupture de pente (talus) qui mesure en moyenne 34 cm de hauteur. Le long de ce talus, ont été observés plusieurs encoches et des radeaux de végétation détachés. La végétation est assez dense et haute par endroits (voir section Résultats).

Marais de l'Isle-aux-Grues

Le marais à l'étude borde une rive rectiligne située du côté nord de l'Isle-aux-Grues, à mi-chemin entre ses deux extrémités. Long de 105 m et profond de 185 m, ce site longe une basse terrasse taillée dans les dépôts silteux de la mer de Goldthwait. À l'instar du marais de Beaumont, l'estran rocheux est présent, et affleure sur environ 55 % de la surface de la zone d'étude. Il est à noter que les deux marais de Beaumont et de l'Isle-aux-Grues exposés au nord ont un estran rocheux important. Il s'agit de formations géologiques associées aux Appalaches, qui affleurent par endroits le long des côtes de la rive sud et des îles du Saint-Laurent.

L'amplitude moyenne des marées de ce secteur est de 4,7 m et de 6,3 m lors de grandes marées alors que le niveau moyen de l'eau est de 2,7 m. Ces données sont basées sur la localité de l'Isle-aux-Grues et le port de référence est celui de Saint-Jean-Port-Joli (Pêches et Océans Canada, 2012). Le segment du fleuve situé au nord de l'île est d'une largeur de 9,6 km, alors que la portion navigable atteint à peine 800 m de largeur. Les courants de flots et de jusant se déplacent, ici aussi, à la vitesse de 3 nœuds. Le marais de l'Isle-aux-Grues est exposé aux facteurs hydrodynamiques de l'estuaire et aux vents du Nord.

Le secteur d'étude est composé d'un pré, d'un schorre supérieur, d'un schorre inférieur, qui est rocheux en grande partie, et d'une slikke. Le pré correspond à la section la plus en amont du marais (exempt d'arbres et d'arbustes) inondé lors des marées d'équinoxe. À l'instar du marais de Château-Richer, les schorres supérieur et inférieur sont délimités par un talus d'environ 0,5 à 1 m de hauteur. Le schorre supérieur est marqué de profonds chenaux de drainages, de rigoles, de dépressions et de cuvettes alors que le talus montre des encoches parfois profondes. Le schorre inférieur est parsemé de mares, de marelles, de radeaux du schorre supérieur.

4.2 Méthodes

La méthodologie utilisée dans la présente étude comporte des relevés de terrain et des analyses portant sur la géomorphologie, la sédimentologie, la végétation, les variations de niveaux d'eau, les conditions météorologiques et la validation par photographies automatisées.

4.2.1 Géomorphologie et sédimentologie

4.2.1.1 Évolution passée des marais à l'étude

Des photographies aériennes et orthophotos de chaque marais à l'étude ont été géoréférencées et analysées². La période couverte par l'analyse est d'environ une quarantaine d'années (1961-2010).

Les zones morfo-sédimentologiques des sites à l'étude ont été identifiées et leur superficie a été estimée pour chacune des années disponibles. L'évolution de cette superficie a ensuite été documentée sur ArcGIS.

Ensuite, l'évolution temporelle de la limite amont du schorre supérieur a été documentée à l'aide de points de repères fixes (routes, bâtisse, etc.) identifiés sur les photographies aériennes (point A et point B). Cet exercice a été fait uniquement sur les photographies aériennes et les orthophotos où cette limite est très visible.

² Les photographies aériennes et les orthophotos proviennent de la collection de la cartothèque de l'Université Laval et du MDDEFP.

4.2.1.2 Évolution actuelle des marais à l'étude

Suivi de l'évolution de la limite schorre inférieur-schorre supérieur

Un suivi mensuel de l'évolution de la limite du schorre inférieur-schorre supérieur dans les sites d'étude a été effectué entre juillet 2011 et novembre 2012 (sans mesures pendant la période hivernale). À cette fin, des piquets-repères ont été mis en place au pied de cette limite correspondant au talus d'érosion observable au début du projet, et le long de transects espacés de 10 mètres. Chaque transect comportait trois piquets (A, B et C), espacés de 5 m (Figure 3).

Le recul ou la progradation de cette limite a été documenté en mesurant l'écart entre le piquet A et le pied du talus (Figure 3) ou, dans certains cas, la distance occupée par les sédiments accumulés devant le piquet. Il a été observé que le recul typique du talus s'effectue de façon différente entre le dessus et le pied. Dans cette situation, trois mesures de recul ont été prises à chaque piquet (haut, milieu et bas) et une moyenne a été calculée pour les fins d'analyse (voir section Résultats).

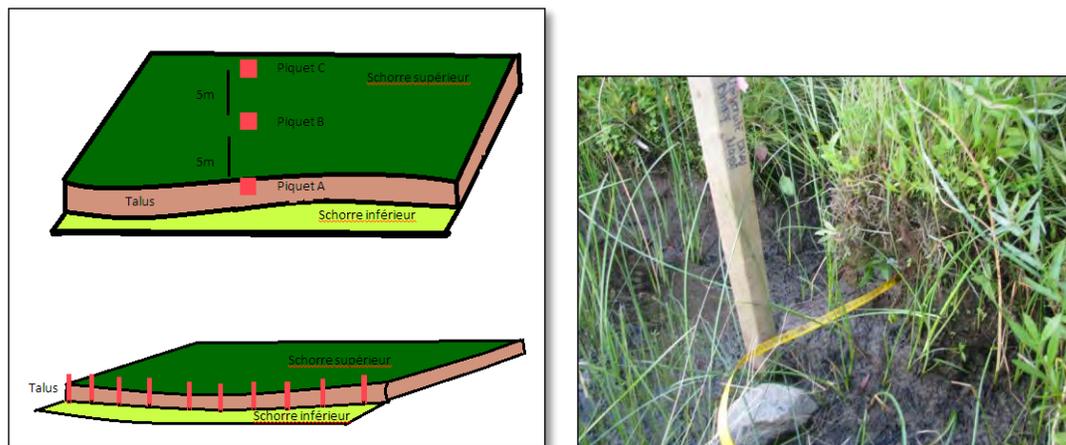


Figure 3 : Disposition des piquets A, B, C (en haut à gauche) et disposition du piquet A au pied du talus (en bas à gauche et à droite).

Mesures de la sédimentation et granulométrie des sédiments

Le suivi de la sédimentation sur les marais a été effectué à l'aide de plaques à sédiments installées sur l'estran (schorre inférieur et slikke) pendant toute la durée de l'étude (Figure 4). Les plaques ont été installées le long de deux transects, dont un à l'ouest et l'autre à l'est de chacun des marais (Figure 4), sauf au marais de Saint-Augustin où un transect a été ajouté dans la partie centrale. Au total, une dizaine de plaques à sédiments ont été installées sur chaque site.

Le suivi mensuel de la sédimentation/érosion a été réalisé en prenant plusieurs mesures de l'épaisseur du matériel accumulé. En l'absence de plaques sédimentaires due à la présence d'affleurements de la roche, des mesures ont été faites à des endroits rocheux dont les coordonnées précises étaient notées.

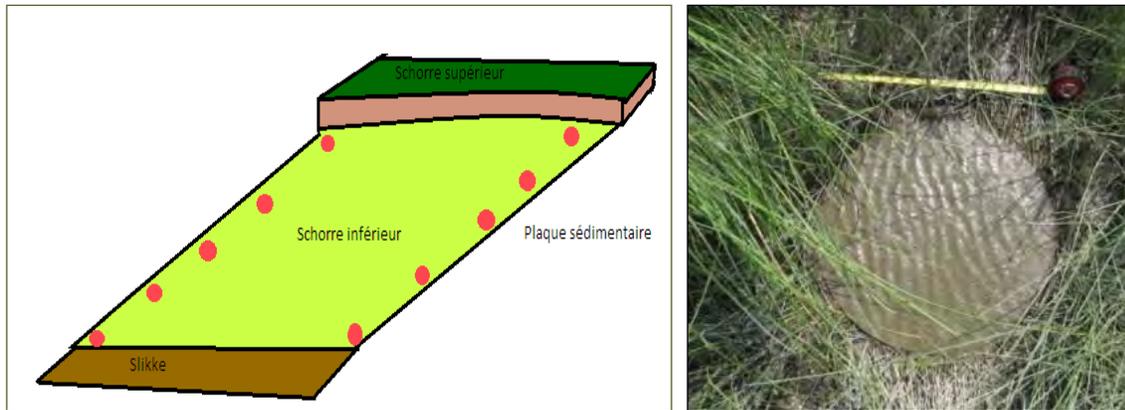


Figure 4: Schéma de disposition des plaques à sédiments sur les marais (à gauche) et plaque recouverte de sédiments (à droite).

La granulométrie des sédiments accumulés à proximité des plaques à sédiments a été réalisée au laboratoire de sédimentologie du département de géographie de l'Université Laval. Cette analyse avait pour but de déterminer la distribution de fréquence des différentes tailles des particules minérales composant un dépôt (Hadjouis, 1987). Elle a été effectuée à l'aide d'un granulomètre au laser de marque Horiba, modèle LA950v2.

Les classes granulométriques ont été établies selon l'échelle du programme Gradistat (Blott et Pye, 2001) selon laquelle les argiles ont une taille comprise entre 0,1 et 2 μm , les silts entre 2 et 63 μm , les sables entre 63 et 2000 μm et les graviers entre 2000 et 64 000 μm . Trois paramètres granulométriques ont été calculés selon la méthode des moments statistiques soit, la taille moyenne (T_m), l'indice de tri (I_t) et l'indice d'asymétrie ou Skewness (I_a).

Profils topographiques

La topographie des marais a été relevée à l'aide d'une station totale à intervalle de 5 m ou lors d'un changement marquant de la topographie ou des zones de végétation. Les variations altitudinales enregistrées le long des transects de chacun des marais, de la limite supérieure du schorre supérieur (environ 5 m du talus) à la slikke (niveau de la marée basse), sont illustrées par des profils topographiques et ont été reportées sur les photographies aériennes en utilisant ArcGis afin d'obtenir une représentation en trois dimensions.

4.2.2 Végétation

4.2.2.1 Caractérisation de la végétation

Dans chacun des marais à l'étude, les principales zones de végétation ont d'abord été distinguées sur le terrain à partir d'une différence dans la composition et/ou la structure de la végétation, comme l'illustre la figure 5. Comme ces zones sont généralement disposées parallèlement au fleuve, les relevés ont été placés le long d'un transect perpendiculaire au rivage. Des relevés hors-transect ont parfois été réalisés en raison de l'emplacement atypique de certaines zones de végétation, comme la zone 3 du marais de Saint-Augustin-de-Desmaures et la zone 5 du marais de l'Isle-aux-Grues (voir section Résultats). Chacune des zones a été identifiée par un code commençant par ZV, signifiant « zone de végétation » associé à un chiffre. De manière générale, les chiffres

sont distribués en ordre croissant du schorre supérieur (1, 2, 3) vers le schorre inférieur (4, 5, 6), à l'exception des deux relevés hors-transect.

Un relevé de végétation a été réalisé dans chacune des zones de végétation des marais à l'aide de quadrats de 100 m² de surface. Selon la configuration de la zone échantillonnée, le quadrat était carré (10 m x 10 m) ou rectangulaire (5 m x 20 m). Dans chacun des quadrats, les données suivantes ont été prises :

- pourcentage de recouvrement des différentes strates (herbacée supérieure, herbacée inférieure, muscinale, zone dénudée);
- densité de la végétation selon quatre classes qualitatives : très dense, dense, peu dense, très peu dense;
- hauteur maximale et moyenne de la végétation;
- recouvrement et sociabilité des espèces selon les codes de Braun-Blanquet (Tableaux 2 et 3).

Au total, 22 relevés de végétation ont été réalisés. Plusieurs espèces n'ont pu être identifiées sur le terrain. Le cas échéant, des spécimens récoltés et séchés en laboratoire ont été identifiés par la suite.

La diversité végétale de chaque zone de végétation échantillonnée a été évaluée au moyen de cinq classes, représentant le nombre d'espèces recensées : [0-6], [7-12], [13-18], [19-24], [25-30]. Le recouvrement total de la végétation dans chaque zone a aussi été déterminé en faisant la somme de la valeur médiane du code de recouvrement attribué à chaque espèce (Tableau 2), ce qui explique que l'on ait parfois obtenu des valeurs supérieures à 100 %. Enfin, pour chaque marais, le recouvrement moyen de la végétation du schorre supérieur et du schorre inférieur a été calculé.



Figure 5 : Représentation et délimitation des zones de végétation au marais de Château-Richer.

Tableau 2 : Codes de recouvrement des espèces

Code de recouvrement	Pourcentage (%)	Valeur médiane ((%)
+	Présence à proximité	
1	1 à 5	2,5
2	5 à 25	15
3	26 à 50	37,5
4	51 à 75	62,5
5	> 75	87,5

Tableau 3 : Indice de sociabilité

Indice	Sociabilité
1	Individus
2	Touffes
3	Petites colonies
4	Grandes colonies
5	Peuplements

4.2.2.2 Cartographie des zones de végétation

Toutes les zones de végétation ont été délimitées sur le terrain à l'aide d'une série de points GPS. Une première cartographie a été produite en raccordant ces points à l'aide du logiciel ArcGIS d'Esri. Étant donné que certains points étaient moins précis, les limites des zones ont été réajustées au besoin à l'aide des photographies aériennes et des photographies numériques prises sur le terrain. Les images générées sont projetées selon le système de coordonnées NAD83 MTM Zone 7.

4.2.2.3 Le recensement des espèces désignées menacées ou vulnérables

Afin de répertorier la présence des trois espèces menacées ciblées dans cette étude, soit la Ciculaire de Victorin, la Gentiane de Victorin et l'Ériocaulon de Parker, des transects, d'une largeur d'un mètre, ont été effectués dans les quatre marais à l'étude. Ces transects s'étendaient de l'amont vers l'aval des marais, sur la totalité du profil.

4.2.2.4 Recensement des espèces accompagnant les espèces menacées

Dans le but de caractériser précisément l'habitat des espèces, des quadrats secondaires, de 50 cm par 50 cm, ont été effectués sur chacun des sites. Ces quadrats avaient pour but de déterminer si la présence de chacune des trois espèces menacées pouvait être corrélée à d'autres espèces floristiques ou encore à un milieu particulier. De plus, une description du relief, des dépôts de surface, de l'humidité du sol et de la densité floristique était notée.

4.2.2.5 Répartition et épaisseur des sédiments de surface au sein des zones de végétation

L'épaisseur des dépôts meubles a été mesurée dans chacune des zones morpho-sédimentologique, en enfonçant dans le sédiment une règle métallique graduée à tous les 50 cm ou quand il y avait un changement notable dans la topographie. Les résultats ont été reportés sur une carte par le biais d'une mosaïque de polygones représentatifs de l'épaisseur des dépôts dans chaque zone. Un échantillon de sédiments de surface a de plus été prélevé au sein de chacun des quadrats établis pour effectuer les relevés de végétation et soumis à une analyse granulométrique.

4.2.3 Relevés et analyses des variations de niveaux d'eau et des conditions météorologiques

Cette section de l'étude a pour objectif de documenter les variations de niveaux d'eau afin de faire l'analyse de différents facteurs hydrodynamiques pouvant avoir une influence sur la stabilité des zones morpho-sédimentologiques des marais à l'étude et en particulier du haut marais. Les facteurs hydrodynamiques qui sont documentés ici sont les variations de niveaux d'eau par le biais d'un suivi marégraphique (fréquence de submersion) et la présence de vagues de tempêtes par le biais de prises d'images automatisées.

4.2.3.1 Relevés et analyses des variations de niveaux d'eau

Le suivi des variations de niveaux d'eau aux quatre sites d'étude a été réalisé entre juillet 2011 et novembre 2012, en période d'eau libre. Une description de la méthodologie utilisée lors des relevés est présentée ci-après:

- La bathymétrie de la zone d'étude a été obtenue par le biais des cartes bathymétriques disponibles au Service Hydrographique du Canada (SHC) et utilisée pour correction au zéro marégraphique ;
- Les instruments utilisés pour l'enregistrement des variations de niveaux d'eau sont des jauges à marées ou marégraphes de marque RBR modèle TGR-1050P immergées au niveau du haut du bas marais de chacun des sites³ (Figure 6);
- Les jauges ont été déployées sur des stations de mesures fixes, à 0,15 m au-dessus du fond (Figure 4). L'emplacement exact des jauges a été noté à l'aide d'un GPS.

³ En 2012, seulement un marégraphe a été utilisé à l'Isle-aux-Grues et également un à Beaumont.



Figure 6 : Emplacement du marégraphe sur le bas marais (à gauche) et sur le haut marais (à droite), Château-Richer

À la fin de la campagne de terrain, la marée a été extraite et les niveaux d'eau établis au niveau zéro des cartes. Par la suite la fréquence de submersion à mi-hauteur et au bord du talus sur le haut marais a été calculée. Une brève description de la méthodologie utilisée est présentée ci-après :

- Prétraitement des données enregistrées telles que la série temporelle des élévations de niveaux d'eau enregistrées avec les marégraphes ;
- Traitement des données à l'aide du logiciel Excel et représentation graphique des résultats;
- Filtrage numérique des données par la méthode des moyennes mobiles. La moyenne glissante ou mobile est un type de moyenne statistique utilisée pour analyser des séries ordonnées de données, le plus souvent des séries temporelles, en supprimant les fluctuations transitoires de façon à en souligner les tendances à plus long terme. Cette moyenne est mobile parce qu'elle est recalculée de façon continue;
- Comparaison avec les données du SHC (station de Saint-François Ile d'Orléans);
- Calcul de la fréquence de submersion à mi-hauteur et au bord du talus.

4.2.3.2 Analyses des conditions météorologiques

Les données portant sur les conditions météorologiques prévalant pendant la période d'étude de 2011 et 2012 ont été fournies par le Service de l'information sur le milieu atmosphérique, Direction du suivi de l'état de l'environnement du MDDEFP, Service Info-Climat. La liste des stations météo d'où les données ont été recueillies est présentée ci-après (Tableau 4).

Tableau 4 : Liste des stations météorologiques utilisées pour documenter le volet climatique de l'étude

No. station	Nom station	Site d'étude	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Ouverture (date)
7047441	Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans	Beaumont	46,8888	70,9662	25	2007-10-29
7041330	Château-Richer	Château-Richer	46,9541	71,0454	9	1980-11-15
7016901	Saint-Augustin-2	Saint-Augustin-de-Desmaures	46,7324	71,5281	71	2007-09-28
7055210	Montmagny	Isle-aux-Grues	46,9787	70,5896	15	1958-06-01

Les paramètres climatiques relevés aux différentes stations sont les suivants :

- Température maximale quotidienne
- Température minimale quotidienne
- Pluie quotidienne
- Neige quotidienne
- Précipitations totales quotidiennes
- Neige quotidienne cm
- Intensité des précipitations (sur 5, 10, 15, 30 min. et 1, 2, 6 et 12 hrs);
- Vents violents (> ou = 62 km/h)
- La vitesse et direction du vent ;
- La pression atmosphérique.
-

Les données de vitesse et directions du vent ont été récupérées aux stations météorologiques d'Environnement Canada situées à Saint-Augustin et à l'Isle-aux-Grues. Les données de pression atmosphérique proviennent de l'aéroport de Québec.

La présente analyse porte essentiellement sur les paramètres susceptibles d'exercer une influence directe ou indirecte sur l'érosion des marais et comprennent essentiellement les précipitations ainsi que la vitesse et la direction des vents. L'englacement/déglacement a notamment été documenté à l'aide des enregistrements photographiques automatisés (section suivante).

4.2.3.3 Analyses des enregistrements photographiques

Des enregistrements photographiques ont été réalisés aux quatre sites d'étude à l'aide de caméras fixes de marque Reconyx et ce, pendant les deux années de cueillette de données sur le terrain, soit 2011 et 2012. Les images captées sur l'ensemble des sites permettent de valider les conditions météorologiques et hydrodynamiques exceptionnelles (hauts niveaux d'eau, tempête, vagues, etc.), de documenter la période d'englacement et de fonte des glaces et tout autre événement pertinent. La position de la caméra fournit une vue globale de chaque site (Figure 7).



Figure 7 : Exemples de photographies prises au marais de Château-Richer le 3 août 2011, à marée haute et lors de hauts niveaux d'eau (à gauche), et le 4 août 2011, à marée basse (à droite). L'emplacement du talus est indiqué par une flèche.

5. Résultats

5.1 Évolution passée des marais à l'étude

5.1.1 Marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

L'analyse multodate du marais de Saint-Augustin-de-Desmaures a été faite sur une période de 45 ans, à l'aide de six photographies aériennes et orthophotos datant de 1965, 1977, 1993, 2002, 2008 et 2010.

Entre le début et la fin de la période couverte, l'analyse montre que la superficie du marécage arbustif et arboré a augmenté de façon importante (Figure 8). En 1965, sa superficie était de 20 180 m² alors qu'en 2010, elle a atteint 46 140 m², ce qui représente un gain de 25 960 m². La superficie du schorre supérieur (haut marais) a diminué d'environ 370 m² alors que celle du schorre inférieur a augmenté de 9 670 m². L'analyse montre également que la superficie de la plage sableuse située entre le schorre supérieur et le marécage arbustif et arboré a diminué de 1 306 m² au cours de cette période.

Par ailleurs, les résultats suggèrent que l'évolution des différentes zones du site d'étude ne s'est pas effectuée de façon continue pendant ces 45 années (Figure 8). À la suite de l'abandon des activités agricoles, la superficie du marécage arbustif et arboré a presque triplé entre 1965 et 1977, passant de 20 000 m² à 55 000 m². Par la suite, elle a graduellement diminué pour atteindre en 2002 environ 41 000 m². La plage, de faible superficie, semble avoir été plus importante en 1965 alors que l'agriculture occupait une grande partie des terres adjacentes. La superficie du schorre supérieur, peu importante elle aussi, a varié entre 200 et 500 m², avec une tendance à la baisse au cours des 10 dernières années. Quant au schorre inférieur, sa superficie oscille entre 1000 et 1800 m² pendant la période d'analyse (1965-2010). Il est difficile de conclure sur une tendance nette.

La distance entre la route au nord du marais et la limite amont du schorre supérieur (talus) a été mesurée afin de connaître le retrait ou l'avancée de la rive. En 1965 (Figure 9), le segment A mesurait 365 m et le segment B était de 310 m. En 2010, ces mêmes segments mesuraient 363 m et 305 m respectivement. Il semble donc que le schorre supérieur ait empiété sur la plage et peut-être aussi un peu sur le marécage arbustif et arboré sur une distance d'environ de 2 m au niveau du segment A et de 5 m au niveau du segment B. Bien qu'il faille considérer une marge d'erreur lors de la prise des mesures, ces résultats suggèrent une légère remontée du schorre supérieur, d'environ 0,10 m par année.

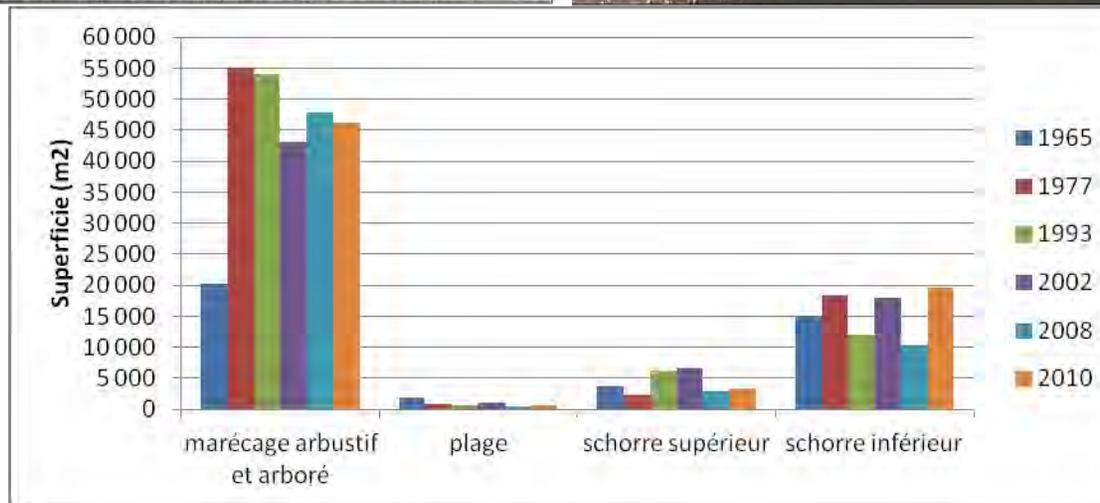


Figure 8 : Superficie des différentes zones du marais Saint-Augustin-de-Desmaures entre 1965 et 2010.

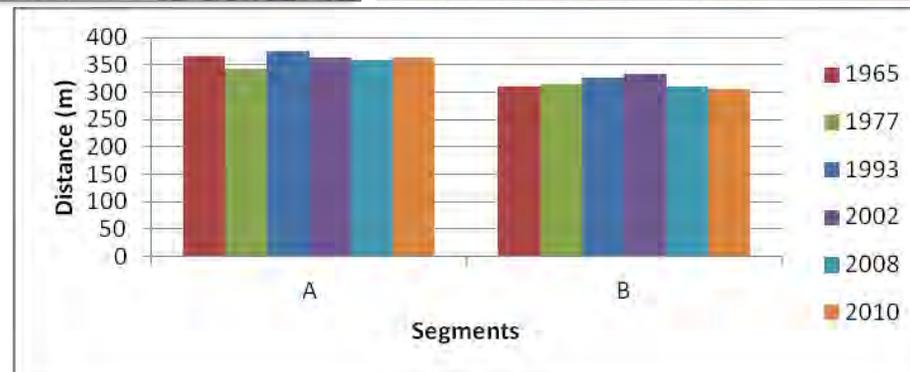


Figure 9 : Distance entre la limite supérieure du schorre supérieur et un point-repère fixe entre 1965-2010, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.

5.1.2 Marais de Beaumont

Pour le marais de Beaumont, l'analyse multidade a été réalisée sur une période de 47 ans, à partir d'une série de photographies aériennes et ortho-photos datant de 1963, 1964, 1980, 1993, 2000 et 2010.

Les résultats montrent une diminution de superficie de la forêt qui s'est installée sur la falaise surplombant le marais (Figure 10). En 1963, cette zone couvrait 5 500 m² et en 2010 une superficie un peu moindre de 5 010 m², ce qui représente une diminution de 490 m². Par ailleurs, il est intéressant de constater sur les photographies aériennes le changement de vocation des terres adjacentes au site d'étude (en haut de la falaise). Utilisées pour l'agriculture dans les années 60, elles servent maintenant de site de camping.

Le schorre supérieur mesurait 2 880 m² en 1963 et 2 110 m² en 2010, ce qui représente une diminution de 770 m². Par ailleurs, la superficie de la plage, située entre le schorre supérieur et la falaise, a aussi diminué de 1 300 m² à 590 m² (différence de 710 m²).

Le recul du schorre supérieur du marais de Beaumont a été mesuré entre 1963 et 2010 à l'aide de segments tracés à partir de points-repères (Figure 11). L'analyse montre qu'en 1963, les segments A et B mesuraient respectivement 287 et 258 m de longueur, alors qu'en 2010, ils mesuraient 274 et 253 m. La longueur du segment A, a diminué d'environ 13 m entre 1963 et 2010, alors que pour la même période, la longueur du segment B a diminué de 5 m. Comme pour le marais de Saint-Augustin, ces résultats suggèrent une légère remontée du schorre supérieur de l'ordre de 0,10 à 0,30 m par année durant cette période de 50 ans environ, au détriment de la plage qui s'est légèrement rétrécie.

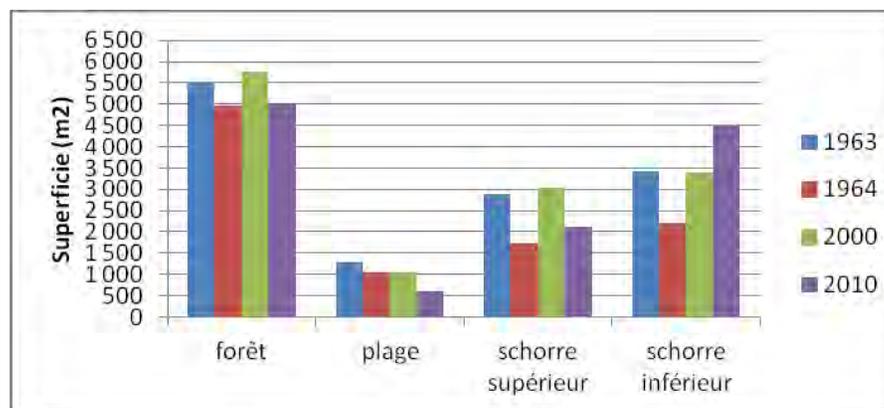
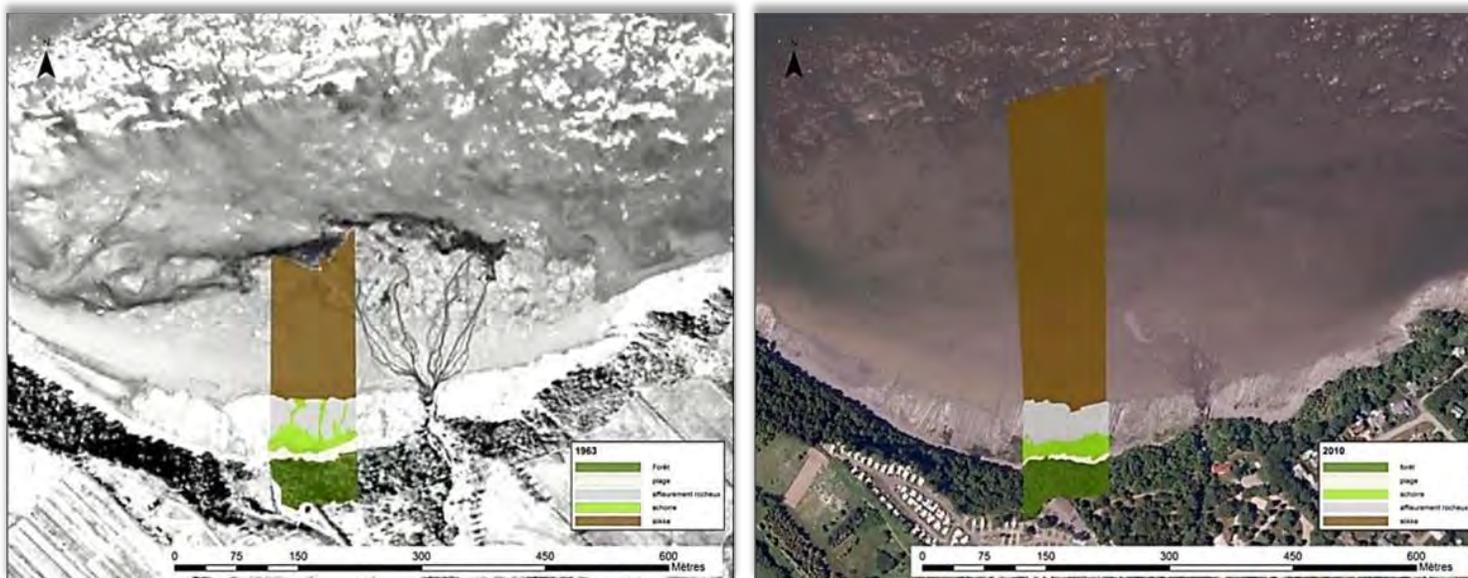


Figure 10 : Superficie des différentes zones du marais de Beaumont entre 1963 et 2010.

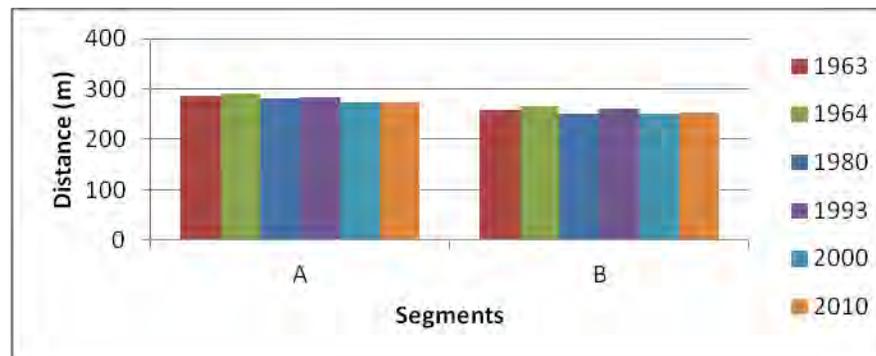
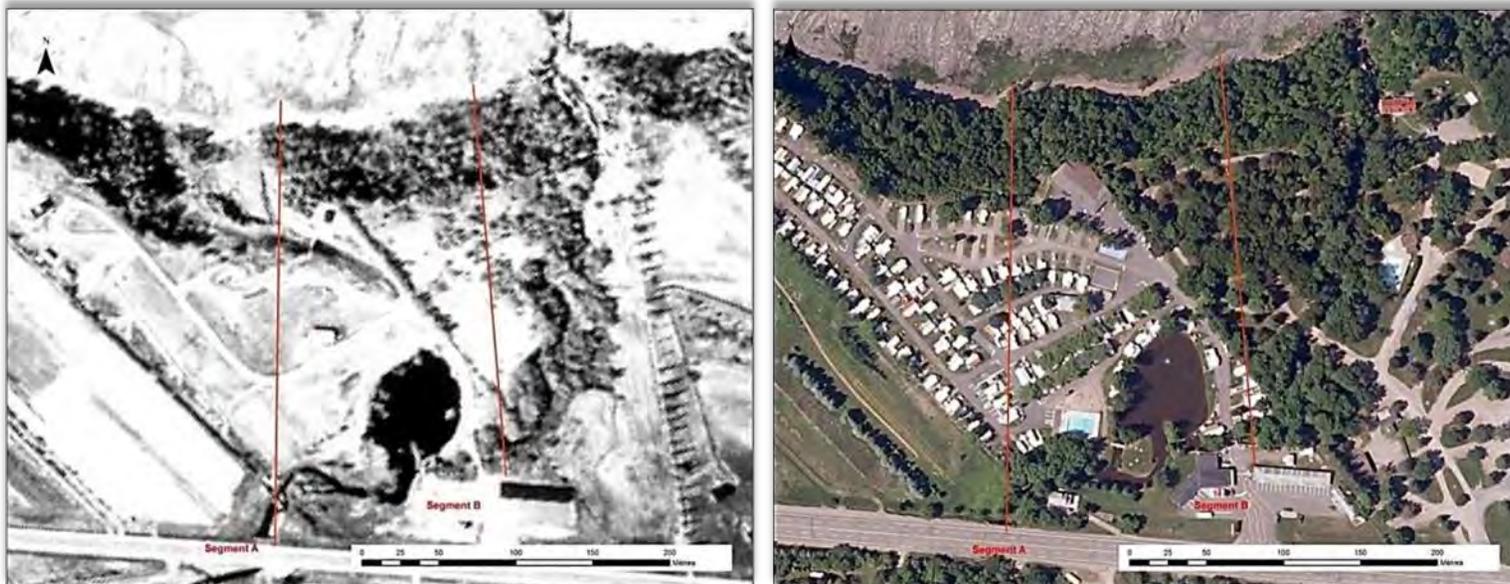


Figure 11 : Distance entre la limite amont du schorre supérieur et un point- repère fixe entre 1963 et 2010, marais de Beaumont.

5.1.3 Marais de Château-Richer

La période d'analyse du marais de Château-Richer est de 48 ans. Elle s'appuie sur l'analyse des photographies aériennes ou orthophotos datant de 1960, 1963, 1965, 1978, 2000 et 2008.

Entre 1960 et 2008, il appert que la superficie du marécage arbustif et arboré a augmenté de 7 890 m² alors que celle du schorre supérieur a diminué de 4 880 m² pendant cette même période (Figure 12). Ceci peut être expliqué par le recolonisation par les arbustes et les arbres des terres qui furent jadis agricoles. L'évolution du schorre inférieur est caractérisée par des périodes d'accrétion identifiées sur les photographies aériennes de 1963 et de 1965 et des périodes d'érosion visibles sur celles de 1978 et 2000.

Ici aussi, une remontée du schorre supérieur a été retracée par la mesure de deux segments, A et B, en 1960 et en 2008 (Figure 13). En 1960, la longueur du segment A était de 451 m alors que celle du segment B était de 434 m. En 2008, cette distance a été établie à 420 m pour le segment A et à 404 m pour le segment B. En 48 ans, les limites supérieures du schorre supérieur des parties ouest et est du marais ont donc reculé d'environ 30 m. En moyenne, le segment A, a diminué de 0,64 m/an et le segment B de 0,62 m par année de 1960 à 2008.

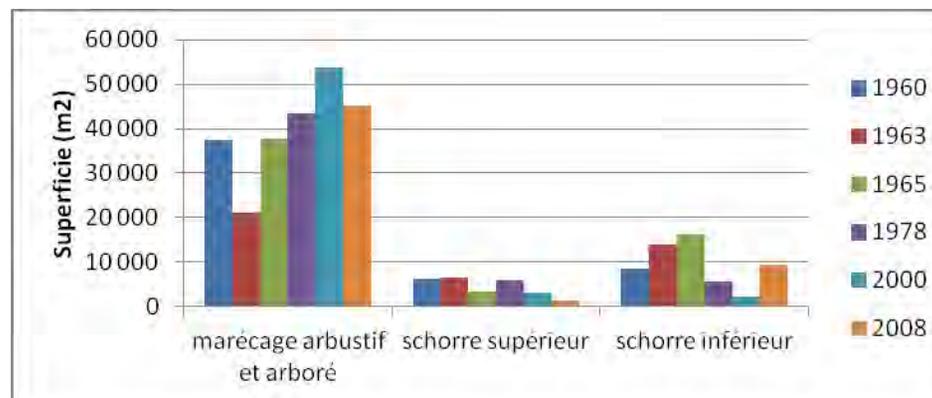


Figure 12 : Superficie des zones du marais de Château-Richer entre 1960 et 2008.

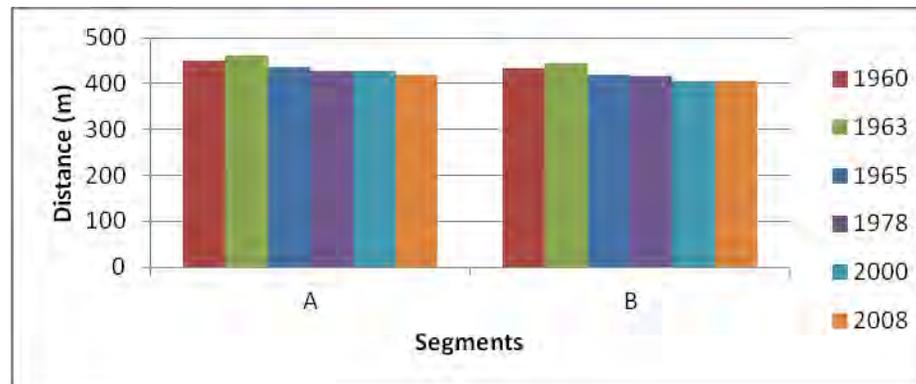
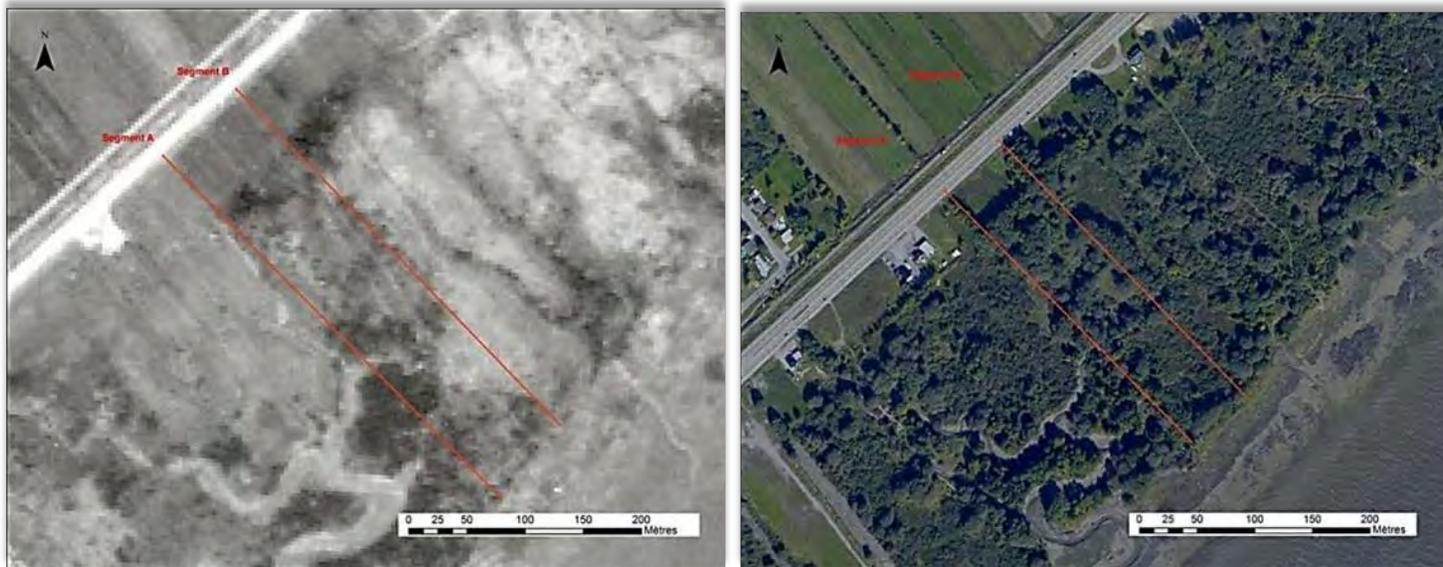


Figure 13 : Distance entre la limite amont du schorre supérieur et un point- repère fixe entre 1960 et 2008, marais de Château-Richer.

5.1.4 Marais de l'Isle-aux-Grues

Pour l'étude du marais de l'Isle-aux-Grues, l'analyse multitemporale a été réalisée sur des photographies aériennes ou orthophotos datées de 1961, 2001 et 2010. Deux faits majeurs ressortent suite à cette analyse. Le premier concerne la limite entre le pré et le schorre supérieur. En 1961, cette limite est très différente de celle de 2010 (Figure 14). La superficie du pré a augmenté de 2 120 m² au détriment du schorre supérieur qui a diminué de 4 395 m². Le second fait a trait au schorre inférieur, qui a connu un morcellement durant cette période. En 1961, la végétation de cette zone semble continue tandis qu'en 2010, elle est devenue morcelée; sa superficie totale a diminué de 2 525 m² en faveur des surfaces dénudées (affleurements rocheux).

L'évolution de la limite amont du schorre supérieur a été effectuée à l'aide de deux segments de mesure, soit A et B. En 1961 (Figure 15), le segment A mesurait 61 m et le B était de 70 m. En 2008, les segments A et B mesuraient 57 m et 66 m respectivement, une réduction d'environ de 4 m. Au cours de cet intervalle de près de 50 ans (1961-2008), on assiste donc à un léger déplacement de cette limite en direction de la route d'au maximum 0,10 cm/an.

Toutefois cette évolution n'a pas été constante. De 1961 à 2001, la limite amont du schorre supérieure s'est remontée en direction de la route de 13 m au niveau du segment A et de 22 m au niveau du segment B. Cependant, de 2001 à 2010, cette évolution s'est faite en sens inverse et cette limite est redescendue en direction du fleuve de 9 m (segment A) et 18 m (segment B). Il serait étonnant que ce phénomène soit naturel et on peut probablement l'attribuer aux travaux ayant rehaussé le niveau du sol à cet endroit lors de la construction de la route (route de la batture).

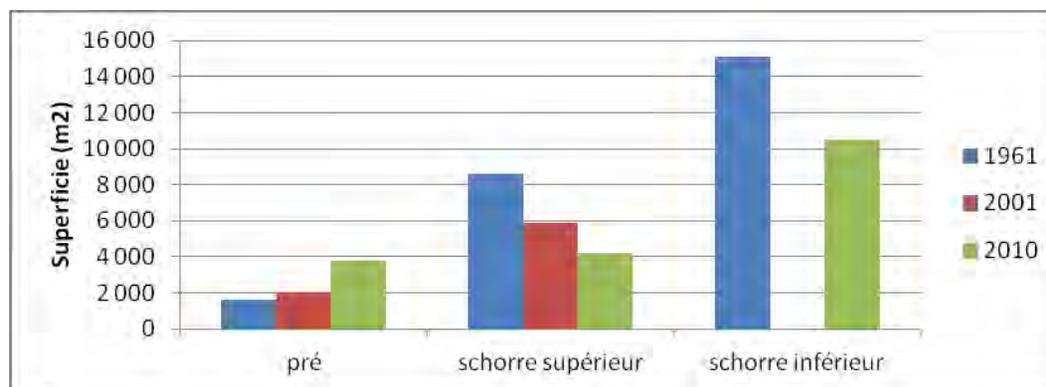
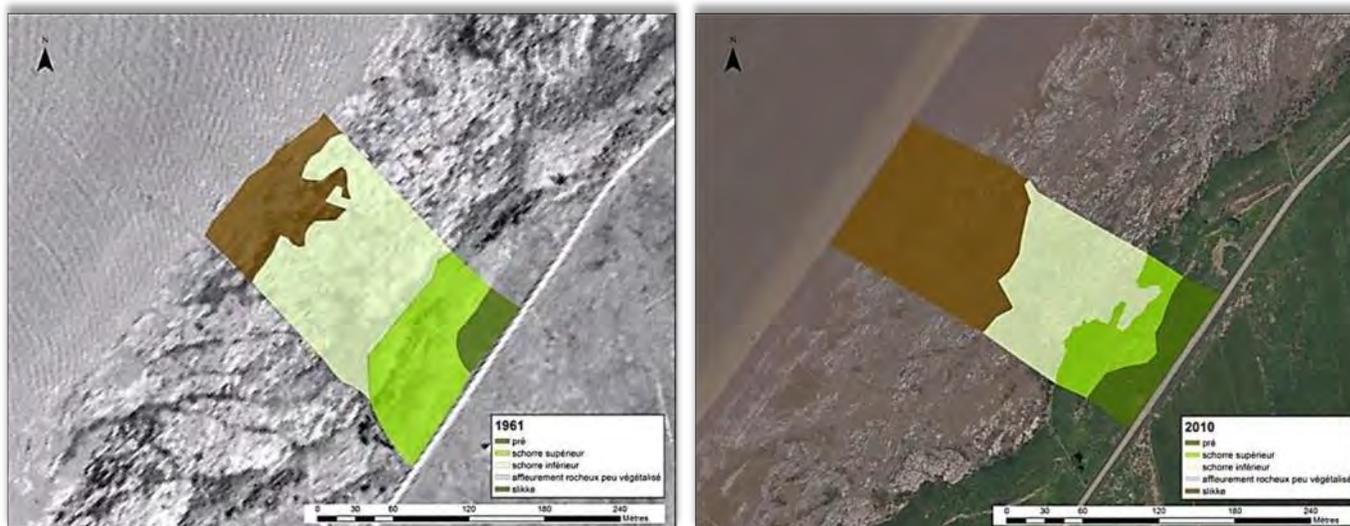


Figure 14 : Superficie des zones du marais de l'Isle-aux-Grues entre 1961 et 2010.

(La superficie du schorre inférieur n'a pu être mesurée sur la photo aérienne de 2001 à cause de la marée qui était haute.)

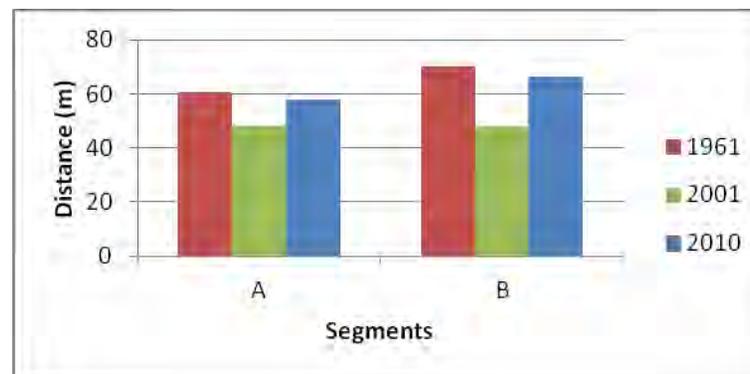


Figure 15 : Distance entre la limite amont du schorre supérieur et un point- repère entre 1961 et 2010, marais de l'Isle-aux-Grues.

5.1.5 Évolution spatio-temporelle passée des quatre marais : synthèse et interprétation

Au cours de la période d'analyse, étalée sur une cinquantaine d'années, les quatre sites d'étude ont subi diverses modifications. La plus marquante est le changement d'utilisation des terres adjacentes aux marais proprement dits (schorre inférieur et schorre supérieur). À Saint-Augustin, Beaumont et Château-Richer, la plus grande partie de ces terres étaient cultivées dans les années 60 (Figures 8, 10 et 12). À la suite de l'abandon de cette activité, ces terres ont été recolonisées par des peuplements forestiers de feuillus humides (marécage arboré) et des arbustaies (marécage arbustif), ce qui explique l'accroissement important de leur superficie à Saint-Augustin et Château-Richer. Dans ces deux sites, on peut se demander si l'érosion des terres agricoles ne contribuait pas à l'apport de sédiments dans la plage et le marais. À Beaumont, les champs cultivés ont été convertis en terrain de camping, alors qu'à l'Isle-aux-Grues, l'agriculture est toujours présente. (Figure 14).

Dans les quatre sites d'étude, les mesures effectuées, bien qu'elles soient parfois faibles, ont mis en évidence une diminution de la superficie du schorre supérieur généralement accompagnée d'une augmentation de celle du schorre inférieur (Figures 8, 10 et 12). Dans trois de ces sites, soit Saint-Augustin, Beaumont et Château-Richer, cette diminution de superficie est accompagnée d'une remontée de la limite amont du schorre supérieur vers l'intérieur des terres (Figures 8, 10 et 12), au détriment de la plage et/ou du marécage arbustif et arboré adjacent. Cette remontée est plus marquée à Château-Richer où elle a été établie à 0,64 m par année, entre 1960 et 2008.

Le marais de l'Isle-aux-Grues ne possède pas marécage arboré, mais un pré humide dominé par des herbacées hautes (Figure 14). Ce pré est parcouru parallèlement au littoral par une route (route de la batture); l'avancée de sa limite décelée suite à l'analyse des photographies aériennes vers le littoral pourrait résulter des impacts anthropiques (tels le drainage; la consolidation annuelle par remplissage de la route; le piétinement par les chasseurs et les touristes, etc.). Par ailleurs, dans ce marais, la diminution de la superficie du schorre supérieur serait due à la fois à cette avancée du pré humide ainsi qu'au recul du talus qui le grugerait par le bas.

Ainsi, une constatation générale se dégage suite à cette analyse multidate des photographies aériennes : il y a eu, entre 1960 et 2010, un déplacement de 2 à 30 m vers l'intérieur, des zones morpho-sédimentologiques de chacun des quatre marais. Cette interprétation corrobore les résultats de Jean et Létourneau (2011) issus d'une analyse multidate (1970 et 2002) des milieux humides aux environs de Québec-Lévis. Ces auteurs ont identifié deux types de transformations internes des marais, progressives et régressives. À titre d'exemple de transformation régressive, il s'avère qu'au marais de la Côte-de-Beaupré (situé à 10 km à l'est de Château-Richer), une superficie de plusieurs dizaines d'hectares de marécages arborés et arbustifs s'est transformée en haut marais et une superficie appréciable du haut marais a été changée en bas marais (Jean et Létourneau, 2011).

Ce recul pourrait être associé à une hausse du niveau marin accompagnée d'une augmentation de la fréquence des tempêtes engendrant un taux de submersion plus élevé. La discussion de ces hypothèses fait partie de la section 6.

5.2 Suivi de l'évolution de la limite schorre inférieur-schorre supérieur en 2011 et 2012

5.2.1 Marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Le suivi de l'évolution de la limite entre les schorres inférieur et supérieur a été fait en mesurant, par rapport à chaque piquet repère, le recul du talus (valeurs négatives) ou l'accumulation sédimentaire devant celui-ci (valeurs positives). À cet effet, il est important de rappeler qu'au marais de Saint-Augustin, la limite entre les schorres supérieur et inférieur consiste en un talus peu élevé (5-10 cm en moyenne), mais généralement suffisant pour délimiter deux zones de végétation distinctes (Figure 16).



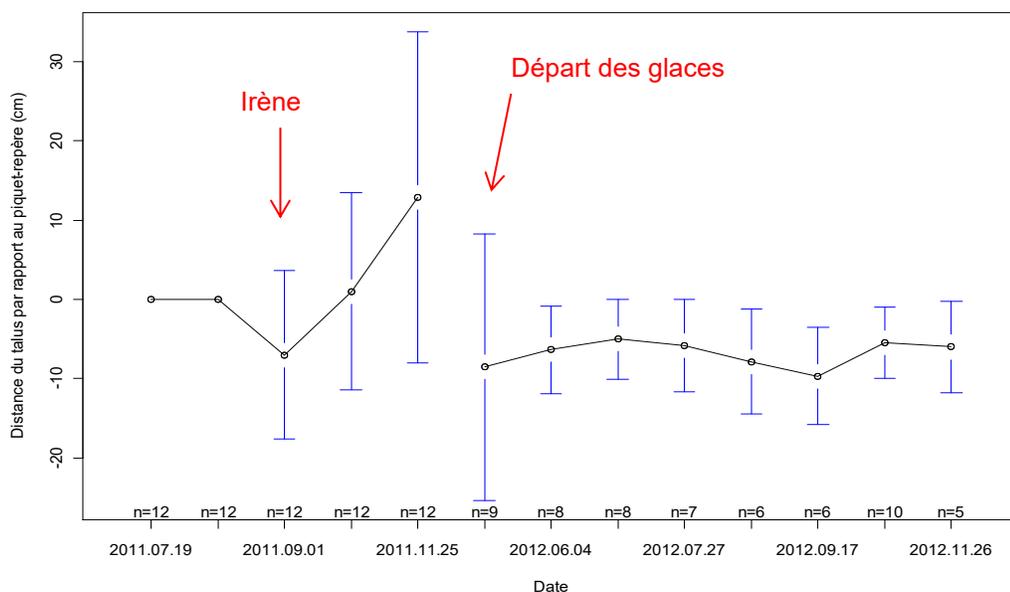
Figure 16. Transition du schorre supérieur vers le schorre inférieur au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.

Les résultats présentés à la figure 17 correspondent aux distances moyennes mensuelles mesurées entre les piquets repères et le talus observable. Les relevés ont commencé en juillet 2011. L'intervalle de confiance plus ou moins grand indique que l'évolution du talus ne s'est pas effectuée d'une façon similaire au niveau de tous les piquets installés. Lors d'une même visite, par exemple, il est parfois arrivé de noter un recul du talus à certains piquets et une accumulation de sédiments (progradation) à d'autres. Cette observation s'applique aux quatre marais étudiés.

Malgré des intervalles de confiance élevés, les distances moyennes calculées font ressortir deux événements significatifs. Ainsi, le recul moyen de 7 cm mesuré le 1^{er} septembre 2011 fut sans doute engendré par la tempête « Irène » survenue le 28 août

2011. Par la suite, les mesures indiquent plus d'accumulation de sédiments que d'érosion, si bien que la saison 2011 se termine par un bilan plutôt positif et une accumulation moyenne de sédiments devant le talus initial d'une dizaine de centimètres.

Le second événement significatif est associé au départ des glaces, en mai 2012, qui s'est également traduit par un recul plus marqué de la limite schorre inférieur-schorre supérieur. Pendant le reste de la saison de croissance, cette limite est demeurée relativement stable. Un épisode de recul un peu plus prononcé a cependant été noté en septembre 2012, lequel a été suivi par une phase d'accumulation en octobre-novembre 2012. Globalement, entre le début et la fin de la prise de données, le talus du marais de Saint-Augustin-de-Desmaures semble donc avoir subi un léger recul par rapport à sa position initiale.



Figure

17 : Évolution du talus en 2011 et 2012 au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

5.2.2 Marais de Beaumont

Au marais de Beaumont, les schorres supérieur et inférieur ne sont pas non plus limités par un talus bien défini; il est d'environ 10 cm de hauteur. La distinction entre les deux zones morpho-sédimentologiques est cependant perceptible par un net changement de végétation. La prise de mesures à chaque piquet au pied du talus a été donc possible (Figure 18).



Figure 18 : Limite entre les schorres supérieur et inférieur ou estran rocheux au marais de Beaumont. Des petites touffes de végétation du schorre supérieur se sont formées au-delà de cette limite, sur la roche à l'été 2011.

Contrairement au marais précédent, la mesure prise au début septembre 2011, à la suite du passage de la tempête « Irène », indique une accumulation moyenne de sédiments d'une quarantaine de cm devant le talus (Figure 19). Le visionnement des photos prises le 28 août (lors de la tempête Irène) montre que les sédiments de la plage, qui est limitée par une haute falaise rocheuse, ont été fortement remobilisés par les fortes vagues, transportés et déposés partout dans le marais après la baisse du niveau d'eau. Ce phénomène expliquerait l'accumulation de sédiments enregistrée au début septembre. Par la suite, ces sédiments ont été érodés graduellement jusqu'à la période d'englacement à la fin de novembre 2011, mais sans que le talus atteigne sa position initiale de juillet 2011.

Après le départ des glaces, en mai 2012, les mesures indiquent, comme dans le marais de Saint-Augustin, un recul marqué du talus. Toutefois, celui-ci n'a pu être mesuré avec précision en raison de la perte de plusieurs piquets repères. Néanmoins, il semble que la plus grande partie des sédiments déposés au cours de la saison précédente aient été érodés. Au cours de l'été et de l'automne 2012, le talus est demeuré relativement stable, avec une phase plus marquée d'accumulation en juillet et de faible érosion en novembre. Au final, le recul du talus dans le marais de Beaumont semble avoir été peu important par rapport à sa position initiale en juillet 2011.

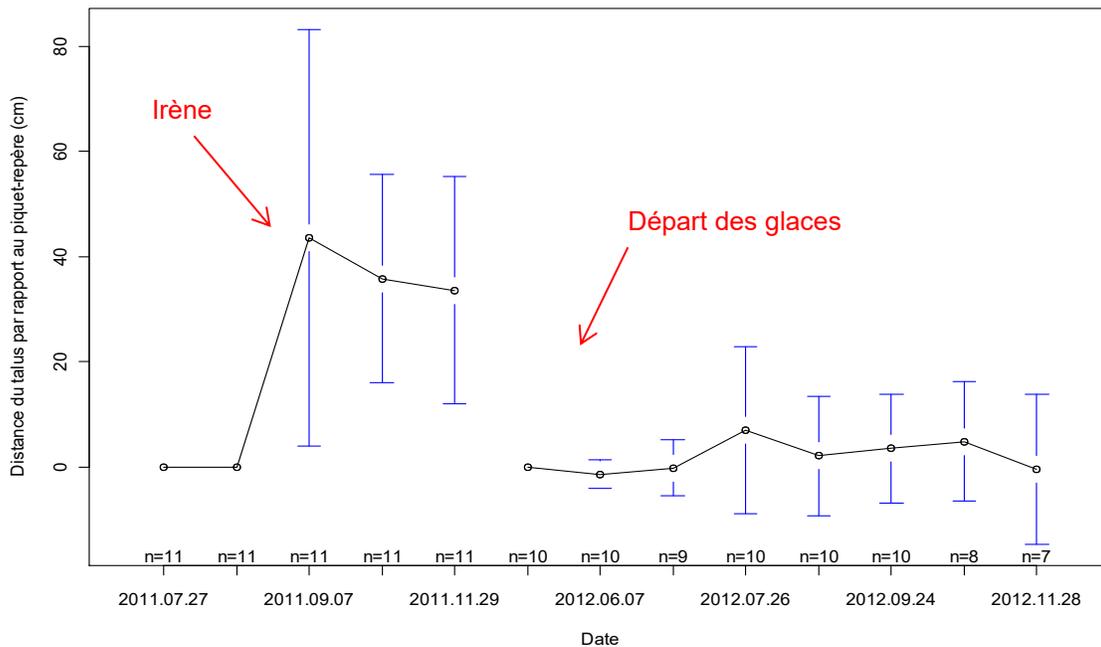


Figure 19 : Évolution du talus en 2011 et 2012 au marais de Beaumont.

5.2.3 Marais de Château-Richer

Contrairement aux marais précédents, les schorres supérieur et inférieur du marais de Château-Richer sont délimités par un talus d'érosion bien marqué, de 30-40 cm de hauteur (Figure 20). À quelques centimètres du talus, on observe souvent des radeaux de végétation du schorre supérieur (Figure 20), dont certains ont été transportés par les vagues et les courants jusqu'au niveau de la slikke (Figure 21).



Figure 20. Talus d'érosion délimitant les schorres supérieur et inférieur au marais de Château-Richer; des radeaux de végétation du schorre supérieur sont arrachés et sont déposés près du talus.



Figure 21 : Radeau de végétation du schorre supérieur arraché et déposé sur la slikke, marais de Château-Richer.

La figure 22 illustre l'évolution mensuelle moyenne du talus en 2011 et 2012. Les résultats indiquent un recul quasi continu de celui-ci pendant toute la période durant laquelle le marais est habituellement libre de glace (avril-novembre). Mais c'est à la fin de l'été 2011 que le processus d'érosion semble avoir été le plus actif, particulièrement en août et septembre. Le recul de 13 cm, mesuré le 1^{er} septembre est sans doute associé au passage de la tempête Irène (28 août 2011). En 2012, à l'instar des autres marais, un recul plus marqué du talus s'est produit après le départ des glaces survenu en avril. Au cours de l'été 2012, la limite du talus demeure relativement stable, puis connaît un recul en octobre, suivi d'une accumulation en novembre 2012. Par rapport à sa position initiale en juillet 2011, le talus du marais de Château-Richer a connu un recul moyen de près de 18 cm, donc plus important que celui des deux marais précédents.

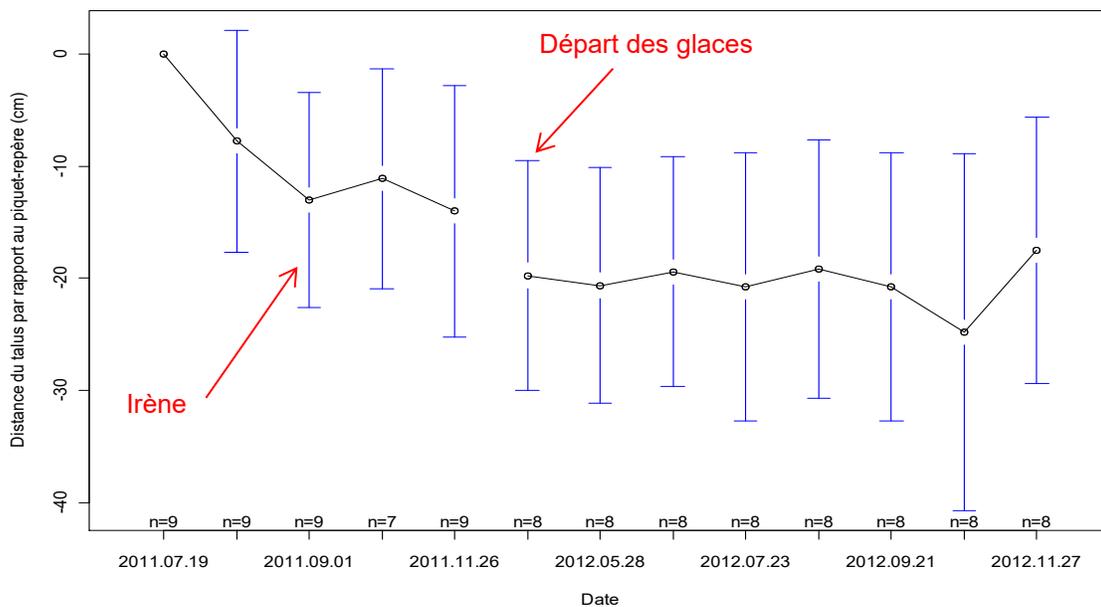


Figure 22 : Évolution du talus en 2011 et 2012 au marais de Château-Richer.

5.2.4 Marais de l'Isle-aux-Grues

Comme au marais de Château-Richer, les schorres supérieur et inférieur du marais de l'Isle-aux-Grues sont délimités par un talus qui peut atteindre plus d'un mètre de hauteur par endroits (Figure 23). Le talus peut être marqué localement pas l'affouillement des sédiments minéraux sous la végétation du haut marais (Figure 24).



Figure 23. Talus en érosion; notez les radeaux de végétation du haut marais (flèches) détachés et déposés au pied du talus; marais de l'Isle-aux-Grues.



Figure 24. Affouillement des sédiments minéraux du talus sous la végétation du haut marais, marais de l'Isle-aux-Grues.

Les résultats présentés à la figure 25 mettent en évidence un recul progressif du talus pendant la plus grande partie de la saison de croissance 2011. Le recul moyen de 10 cm, enregistré au début de septembre serait associé à la tempête « Irène ». Ce recul s'est ensuite poursuivi jusqu'à la fin du mois d'octobre. Par la suite, les données indiquent une accumulation sédimentaire relativement importante de 15 cm qui s'explique en bonne partie par le basculement d'un gros bloc de schorre supérieur au niveau d'un piquet.

Au même titre que les précédents marais, la mesure prise en mai 2012 indique un recul du talus consécutif au départ des glaces. Au cours de l'été et de l'automne 2012, la position du talus a peu varié. Au final, entre le début et la fin de la prise de données, le talus du marais de l'Isle-aux-Grues a reculé en moyenne d'une vingtaine de cm, ce qui constitue la valeur d'érosion la plus importante pour les quatre marais.

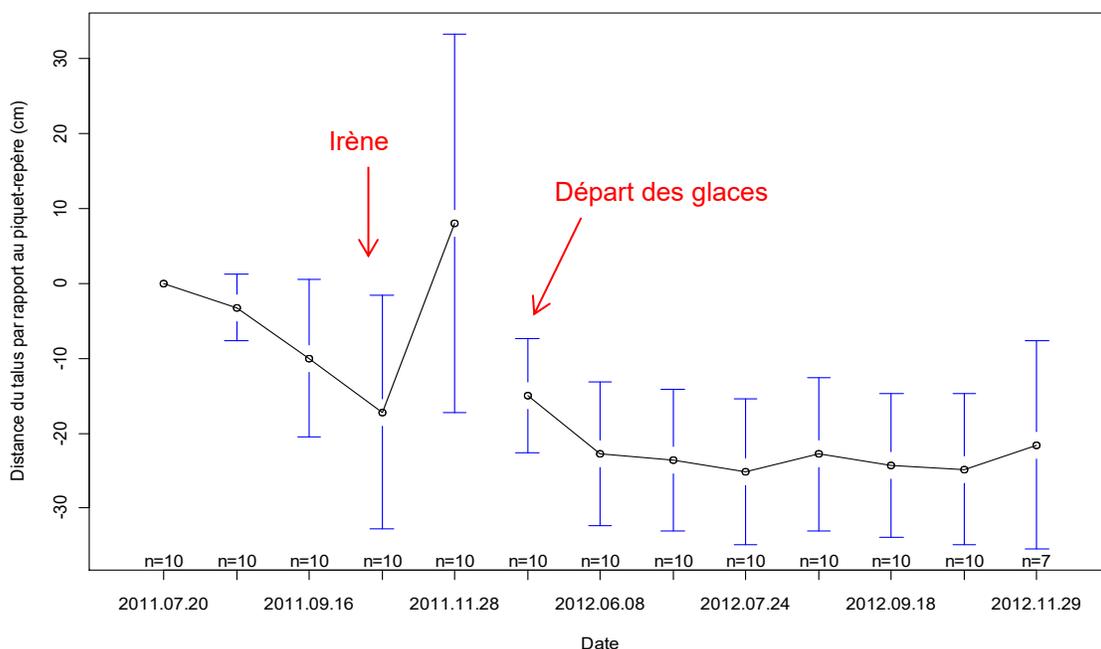


Figure 25 : Évolution du talus en 2011 et 2012 au marais de l'Isle-aux-Grues.

5.2.5. Évolution spatio-temporelle actuelle : Synthèse est interprétation

Quatre faits principaux ressortent de cette analyse du suivi de l'évolution de la limite entre les schorres inférieur et supérieur:

- 1- La tempête Irène, caractérisée par de forts vents et d'abondantes précipitations, a eu un impact relativement important dans les marais à l'étude. Alors qu'à Beaumont les fortes vagues ont remobilisé et redistribué les sédiments au travers du marais, le talus des autres marais a reculé d'une dizaine de cm en moyenne, ce qui est très significatif quand on considère la largeur restreinte du schorre supérieur (de l'ordre d'une quinzaine de mètres).
- 2- C'est au début du printemps que le talus affiche le recul le plus important par rapport à sa position à la fin de l'automne-début de l'hiver. Ce constat suggère que les mouvements

des glaces, en contribuant à l'arrachement des radeaux du schorre supérieur, provoque un recul du talus. En plus des processus glaciels, Troude et Sérodes (1988), évoquent le dégel, lequel fragilise le talus et favorise l'érosion.

3- En 2012, tant au printemps, qu'en été et en automne, le talus n'a pas enregistré de recul important ce qui pourrait être associé aux conditions météorologiques stables et relativement peu « arrosées » ayant caractérisé cette période.

4- À Beaumont et à Saint-Augustin il y a eu par endroits, une accumulation sédimentaire devant le talus. Selon nos observations sur le terrain, ces sédiments sont parfois colonisés par des plantes du schorre supérieur qui les consolident temporairement, alors que dans la majorité des cas, ils sont rapidement érodés par les courants et les vagues. Ce phénomène a aussi été observé par Troude et Sérodes (1988) dans le marais de Cap Tourmente situé à une vingtaine de kilomètres à l'est du marais de Château-Richer. Il a été attribué à la fonte de glaçons chargés de sédiments échoués près du talus.

Bien qu'il soit important, le recul du talus aux marais de Château-Richer et de l'Isle-aux-Grues demeure inférieur à celui du talus des marais situés dans la portion aval de l'estuaire d'eau douce ou au début de l'estuaire d'eau salée (Figure 1), en l'occurrence les marais de Sainte-Anne-de-Beaupré, de Cap-Tourmente, de Montmagny et de l'île d'Orléans (Dionne, 2000). En effet, dans ces marais, le retrait annuel du talus varie entre 86 cm et 500 cm. Les périodes de suivi sont comprises entre 1963 et 1986 et reposent principalement sur l'analyse multirate des photographies aériennes.

Bien que la durée des relevés soit courte, les mesures prises à chaque mois pendant une année et demie révèlent que l'érosion du talus est relativement plus significative au début du printemps, avec le départ des glaces. À Cap Tourmente, Troude et Sérodes (1988) déduisent que l'érosion se produit principalement en automne et au printemps. Ceci a été expliqué par le fait qu'en automne le talus n'est plus protégé par la végétation tandis qu'au printemps, il est fragilisé par les glaces en mouvement et par le dégel. Selon Dionne (1999), à Saint-Anne-de-Beaupré, situé à une dizaine de kilomètres à l'est de Château-Richer; le taux de recul est relativement plus important pendant la saison estivale (mai-octobre) que pendant la période hivernale (novembre-avril).

Une analyse comparative de l'évolution du talus des marais à l'étude en relation avec les différents facteurs qui ont été documentés conditions climatiques est présentée à la section 6.

5.3 Suivi de la sédimentation en 2011 et 2012

Rappelons qu'au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, des plaques sédimentaires ont été installées le long de trois transects, un à l'ouest, un au centre et un à l'est, alors qu'aux marais de Beaumont, de Château-Richer et de l'Isle-aux-Grues, des plaques sédimentaires ont été installées le long de deux transects seulement, un à l'extrémité ouest et un à l'extrémité est. Chaque transect comporte 4 ou 5 plaques. À chaque mois, l'épaisseur des sédiments accumulés sur la plaque a été mesurée. Quand, au contraire, un écart s'est créé entre la plaque et le plancher du marais, cet écart a aussi été mesuré (valeur négative), ce qui correspond à l'érosion du plancher du marais.

5.3.1 Sédimentation sur le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Les résultats illustrés à la figure suivante (Figure 26) présentent la valeur moyenne de l'accumulation de sédiments sur les plaques au cours de la période de mesure (2011 et 2012). De façon générale, l'année 2011 se caractérise par une érosion des sédiments de

faible amplitude (< 1 cm) dans les différentes parties du marais, à l'exception d'une légère accumulation mesurée au pied du talus du transect central. L'analyse des mesures moyennes mensuelles (Figure 27) suggère que ces deux processus (accumulation-érosion) ont été plus actifs au cours des mois d'octobre et de novembre. Par contre, au cours de l'année 2012, une mince pellicule de sédiments a été mise en place sur la plus grande partie du marais et ce, de façon quasi continue tout au long de la saison de croissance. Une faible érosion des sédiments s'est tout même produite au pied des talus des transects centre et est, en juillet et novembre essentiellement.

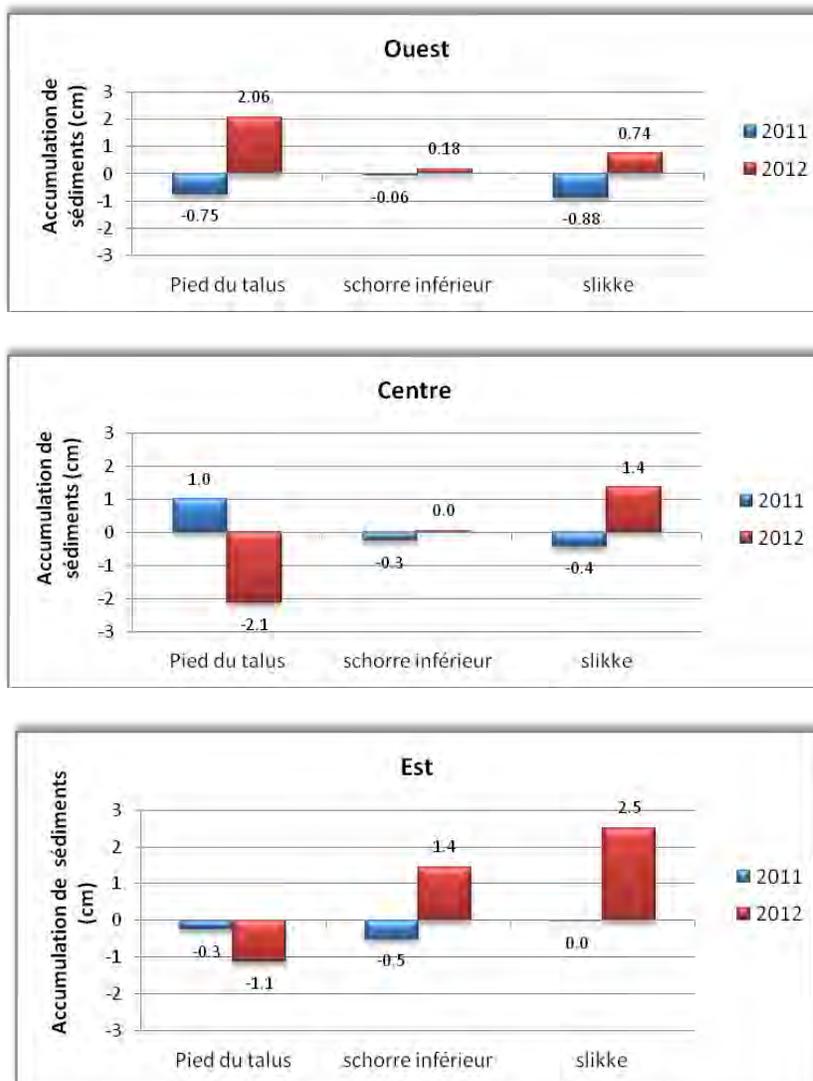


Figure 26: Accumulation moyenne annuelle de sédiments, marais Saint-Augustin-de-Desmaures.

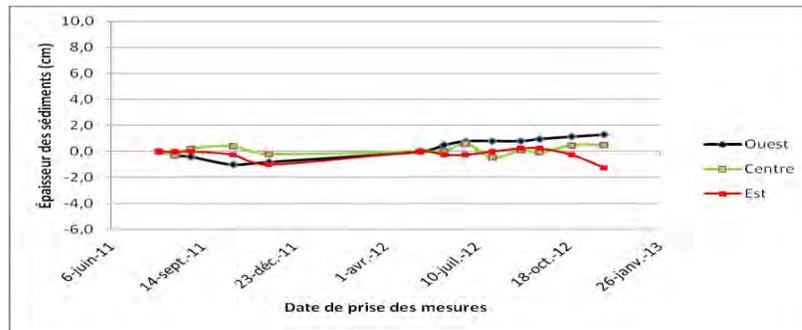


Figure 27 : Accumulation mensuelle moyenne de sédiments par transect, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.

5.3.2 Sédimentation sur le marais de Beaumont

Au marais de Beaumont, les mesures montrent une accumulation de quelques centimètres de sédiments au cours des deux années de suivi, essentiellement au niveau de la slikke (Figure 28). En 2011, cette accumulation a été plus importante dans la partie est du marais (9,4 cm) et s'est produite principalement au cours des mois d'août et septembre (Figure 29). En 2012, les sédiments se sont surtout accumulés dans la partie ouest (10 cm) avec des taux d'accumulation plus significatifs au cours des mois d'automne (septembre, octobre et novembre).

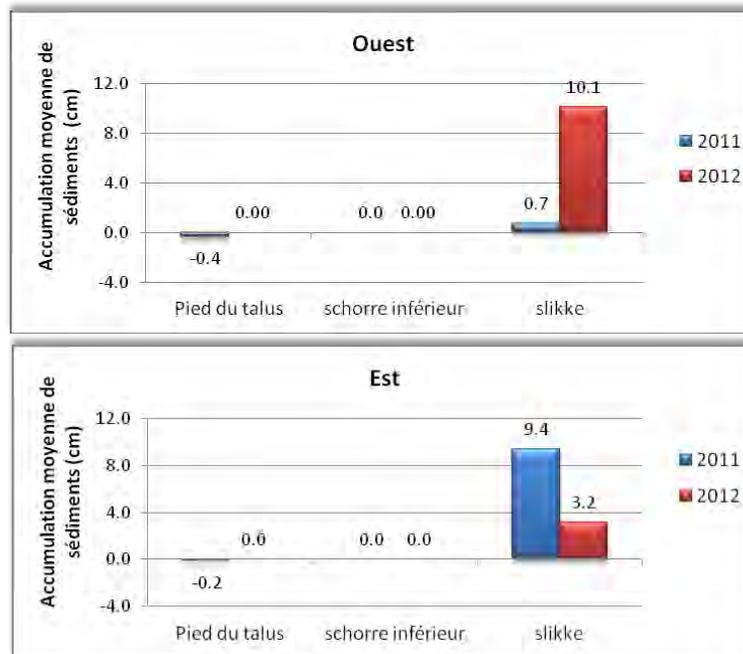


Figure 28 : Accumulation moyenne annuelle de sédiments, marais de Beaumont.



Figure 29 : Accumulation mensuelle moyenne de sédiments, marais de Beaumont.

5.3.3 Sédimentation sur le marais de Château-Richer

Au marais de Château-Richer, les mesures prises en 2011 montrent qu'il y a eu très peu d'érosion pendant cette période, mais plutôt une accumulation de sédiments à très faible taux, 0,60 cm en moyenne (Figure 30). En 2012, les processus d'accumulation et d'érosion ont été plus actifs, Alors que le schorre inférieur de la partie est du marais a enregistré une accumulation de 2 cm de sédiments, la slikke des parties est et ouest a subi une érosion de 1 à 3 cm en moyenne. L'accumulation de sédiments s'est principalement faite à partir du mois de juillet (Figure 31), tandis que l'érosion affiche un pic en juillet dans la partie est.

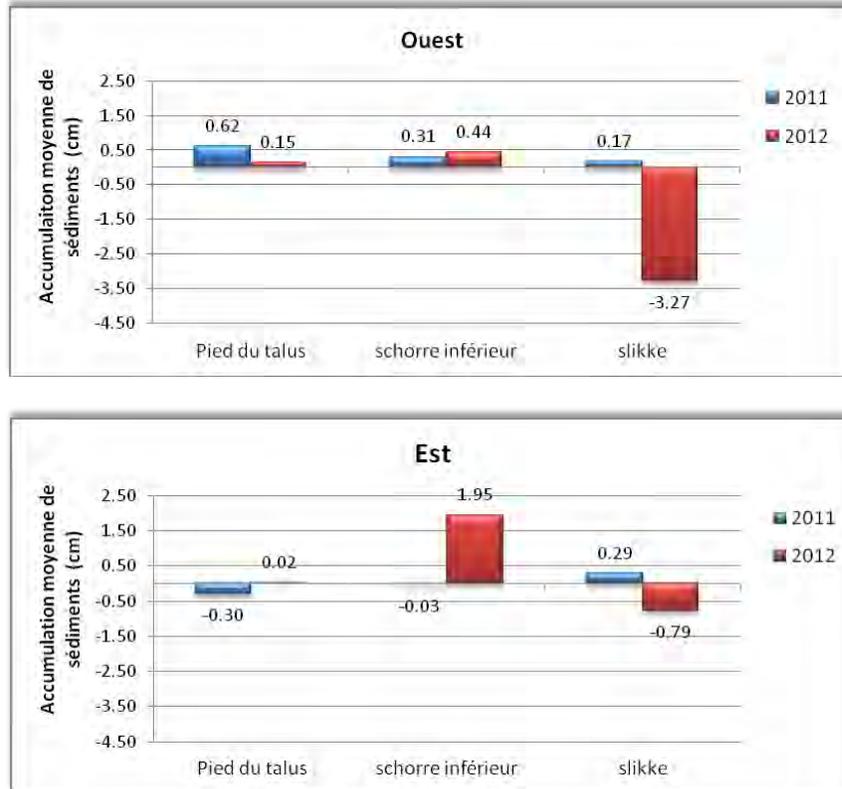


Figure 30 : Accumulation moyenne annuelle de sédiments, marais de Château-Richer.

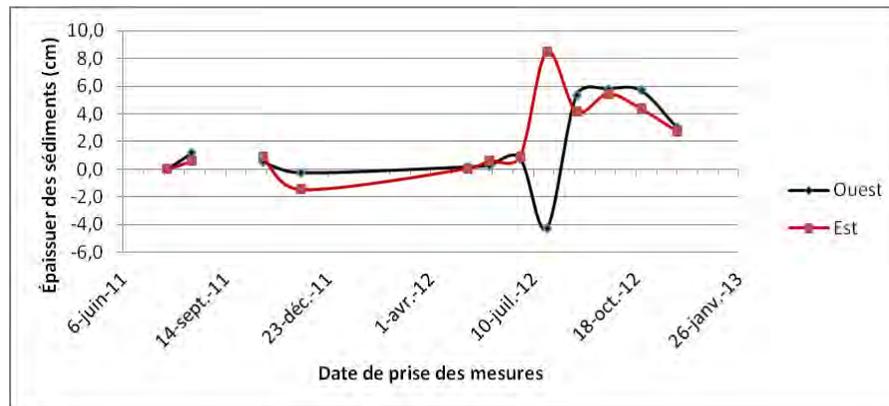


Figure 31 : Accumulation mensuelle moyenne de sédiments, marais de Château-Richer.

5.3.4 Sédimentation sur le marais de l'Isle-aux-Grues

Ce qui ressort de la figure 32 est le fait que le marais de l'Isle-aux-Grues a enregistré une accumulation sédimentaire positive (pas d'érosion) et ce, dans toutes les parties des transects : pied du talus, schorre inférieur et slikke. Cette sédimentation positive pourrait résulter du phénomène bien connu de floculation des argiles et particules fines lorsque l'eau douce entre en contact avec l'eau saumâtre et salée. Bien qu'elle soit faible (0,3 – 3 cm), cette accumulation sédimentaire semble avoir été plus significative en 2012 qu'en 2011. Les relevés mensuels montrent qu'en 2011, l'accumulation sédimentaire a eu lieu en juillet et novembre alors qu'en 2012, elle s'est produite principalement au cours des mois de juillet, août et septembre (Figure 33).

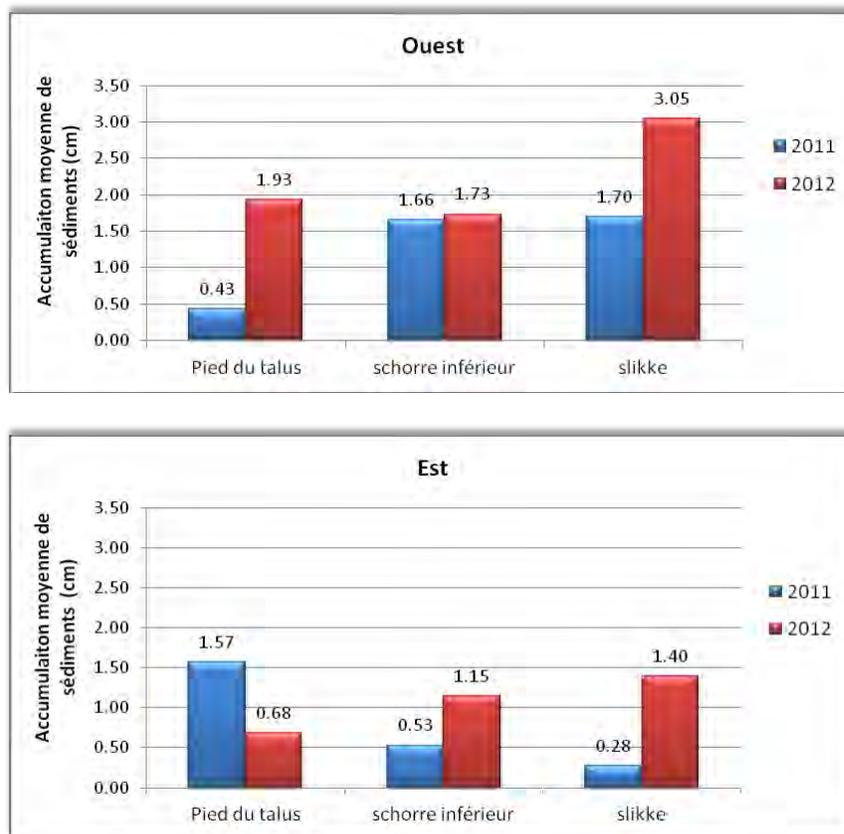


Figure 32 : Accumulation moyenne annuelle de sédiments, marais de l'Isle-aux-Grues.

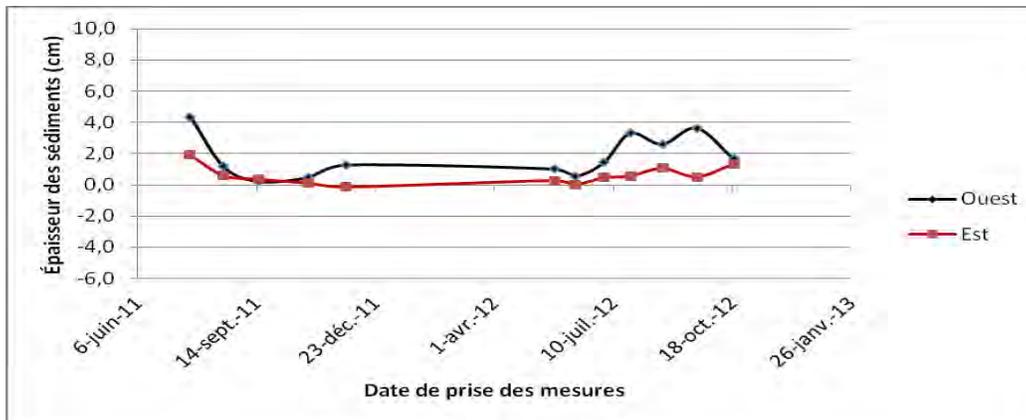


Figure 33 : Accumulation mensuelle moyenne de sédiments, marais de l'Isle-aux-Grues.

Les mesures de novembre 2012 ne sont pas disponibles pour ce terrain car la glace, lors de la sortie de novembre, recouvrait les plaques sédimentaires.

5.3.5 Sédimentation sur les quatre marais : synthèse et interprétation

En général, les sédiments accumulés au pied du talus, sur le schorre inférieur et la slikke, quand ils sont existants, sont de faible épaisseur (2-3 cm), excepté au niveau de la slikke du marais de Beaumont où une accumulation d'une dizaine de centimètres a été observée. La période de relevés fut courte et quelques erreurs de mesures ont pu survenir. Les résultats montrent que les patrons de sédimentation/érosion varient d'un marais à l'autre, mais sont similaires au sein d'un même site. Dans l'ensemble, l'accumulation de sédiments tend à se faire en été (à partir de juillet) et en automne (septembre et octobre) alors que la végétation est bien développée, mais très rarement au printemps, comme cela a été observé à Beaumont.

Cette variabilité peut être associée à divers facteurs, tels l'exposition du marais aux paramètres hydrodynamiques, la topographie du site, le microrelief et la densité de la végétation. Par ailleurs, les sédiments accumulés peuvent provenir du talus du haut marais dont l'érosion se fait habituellement au printemps et à l'automne. La sédimentation au printemps pourrait aussi résulter du délestage de sédiments minéraux suite à la fonte sur place de la glace et des glaçons riches en vase apportés par les marées sur l'estran. Ce processus a été documenté ou observé sur l'estran de Montmagny, de l'île d'Orléans (extrémité aval) et de Cap-Tourmente (Dionne, 1981; Allard, 1981; Troude et Sérodes, 1988).

De même, les cours d'eau qui se déversent dans les marais peuvent aussi transporter des alluvions plus ou moins grossières qui se déposent le long du chenal tout en contribuant localement à l'accrétion verticale du marais. Ce processus a été observé dans la région de l'Isle-Verte par Quintin *et al.* (2006).

5.4 Diversité et densité de la végétation

5.4.1 Marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

5.4.1.1 Zonation de la végétation

Dans le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, six zones de végétation ont été identifiées, une au niveau du schorre supérieur et cinq dans le schorre inférieur (Figure 34). Les limites entre les premières zones de végétation sont progressives de sorte qu'elles ont été plus difficiles à cartographier. Au total, 55 espèces ont été recensées dans ce marais. C'est le plus diversifié des quatre marais à l'étude.

La Zone 1, située la plus près de la rive, est caractérisée par une végétation très dense (Figure 35) et haute, soit 110 cm de hauteur avec une valeur moyenne de 52 cm. Elle est dominée par *Eutrochium maculatum* (L.) et *Spartina pectinata* (Link.), qui occupent chacun entre 26 % et 50 % de la strate herbacée supérieure. Dans la strate herbacée inférieure, *Galium palustre* (L.) est l'espèce dominante, avec un recouvrement entre 26 et 50 % également. Les autres espèces abondantes sont *Euthamia graminifolia* (L.), *Symphyotrichum lanceolatum* (Will.), *Lythrum salicaria* (L.) et *Calamagrostis canadensis* (Michaux). Dans cette zone, 29 espèces ont été dénombrées (Figure 36). et la somme de leur recouvrement individuel totalise 225 %. C'est le nombre maximal atteint pour une zone de végétation.

La Zone 2 correspond également à une zone de végétation très dense (Figure 35), dominée par *Bidens frondosa* (L.) et *Eupatorium perfoliatum* (L.), deux espèces de la famille des astéracées occupant chacune entre 26 et 50 % de la superficie du relevé. Les autres espèces abondantes sont *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.), *Symphyotrichum lanceolatum* (Will.), *Euthamia graminifolia* (L.), *Schoenoplectus pungens* (Vahl.), *Juncus brevicaudatus* (Engelm.), *Mentha arvensis* (L.), *Lythrum salicaria* (L.) et *Calamagrostis canadensis* (Michaux). Avec 22 espèces, cette zone présente une diversité spécifique un peu moins élevée que la précédente (Figure 36).

La Zone 3, située en dehors du transect, se distingue des autres zones par la très faible densité de sa végétation (Figure 35). Bien que 40 % de sa superficie soit dénudée, on y trouve tout de même 22 espèces (Figure 36). L'espèce dominante est *Najas flexilis* (Will.), dont le recouvrement se situe entre 26 et 50 %. Les autres espèces abondantes sont *Lycopus asper* (Greene), *Mentha arvensis* (L.) et *Cyperus rivularis* (Kunth). Ces dernières comptent beaucoup d'individus, mais ont un recouvrement faible en raison de leur très petite taille, qui ne dépasse guère une quinzaine de centimètres de hauteur. Il est intéressant de noter que cette zone contient sept espèces exclusives à ce marais et à cette zone, soit *Alisma gramineum* (Lejeune), *Chara* sp., *Tillaea aquatica* (L.), *Eleocharis ovata* (Roth), *Schoenoplectus smithii* (A. Gray), *Limosella subulata* (E. Ives) et *Juncus nodosus* (L.). Plusieurs des espèces recensées dans cette zone se comportent comme des plantes pionnières qui ont la capacité de s'installer rapidement sur de nouveaux substrats ou des surfaces remaniées. Lorsque le substrat se stabilise, elles sont remplacées par des espèces plus hautes qui les privent de la lumière dont elles ont besoin pour croître.

Un changement important dans la composition de la végétation se produit lors du passage de la Zone 2, dominée par des astéracées, vers la Zone 4, où *Schoenoplectus pungens* (Vahl.), espèce de bas marais, devient très abondante, avec un recouvrement supérieur à 50 %. La deuxième espèce la plus commune est *Eupatorium perfoliatum* (L.), dont le pourcentage de recouvrement se situe entre 26 et 50 %. Les autres espèces abondantes sont *Sium suave* (Walt.), *Eleocharis* sp. (R. Brown), *Najas flexilis* (Will.), *Zizania aquatica*

var. *brevis* (Fassett) et *Steironema ciliatum* (L.). La végétation de cette zone est dense et diversifiée (Figures 35 et 36). On y a répertorié 18 espèces.

Dans la zone 5, la végétation possède une densité et une diversité spécifique (12 espèces) plus faibles. *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) y occupe plus de 75 % du milieu (Figures 35 et 36). Les autres espèces abondantes sont *Najas flexilis* (Will.), *Sium suave* (Walt.), *Eleocharis* sp. (R. Brown) et *Zizania aquatica* var. *brevis* (Fassett).

La Zone 6, la plus en aval, est très peu dense et ne contient que deux espèces (Figures 35 et 36) qui ont chacune un recouvrement inférieur à 5 % : *Alisma triviale* (Pursh) et *Zizania aquatica* var. *brevis* (Fassett). Le sol dénudé occupe 95 % de cette zone.

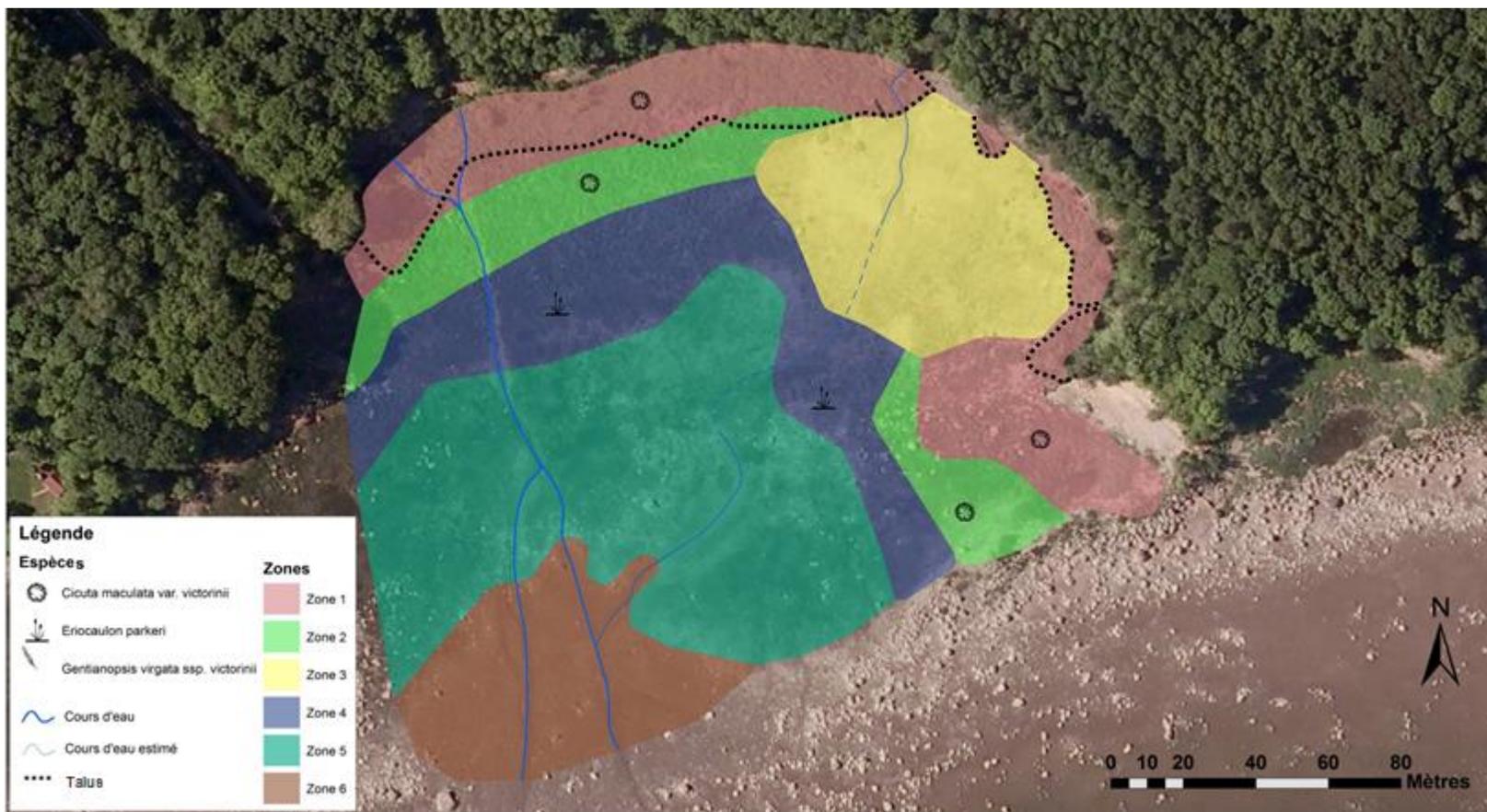


Figure 34: Zones de végétation et emplacement d'espèces menacées, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.



Figure 35 : Densité de végétation, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.

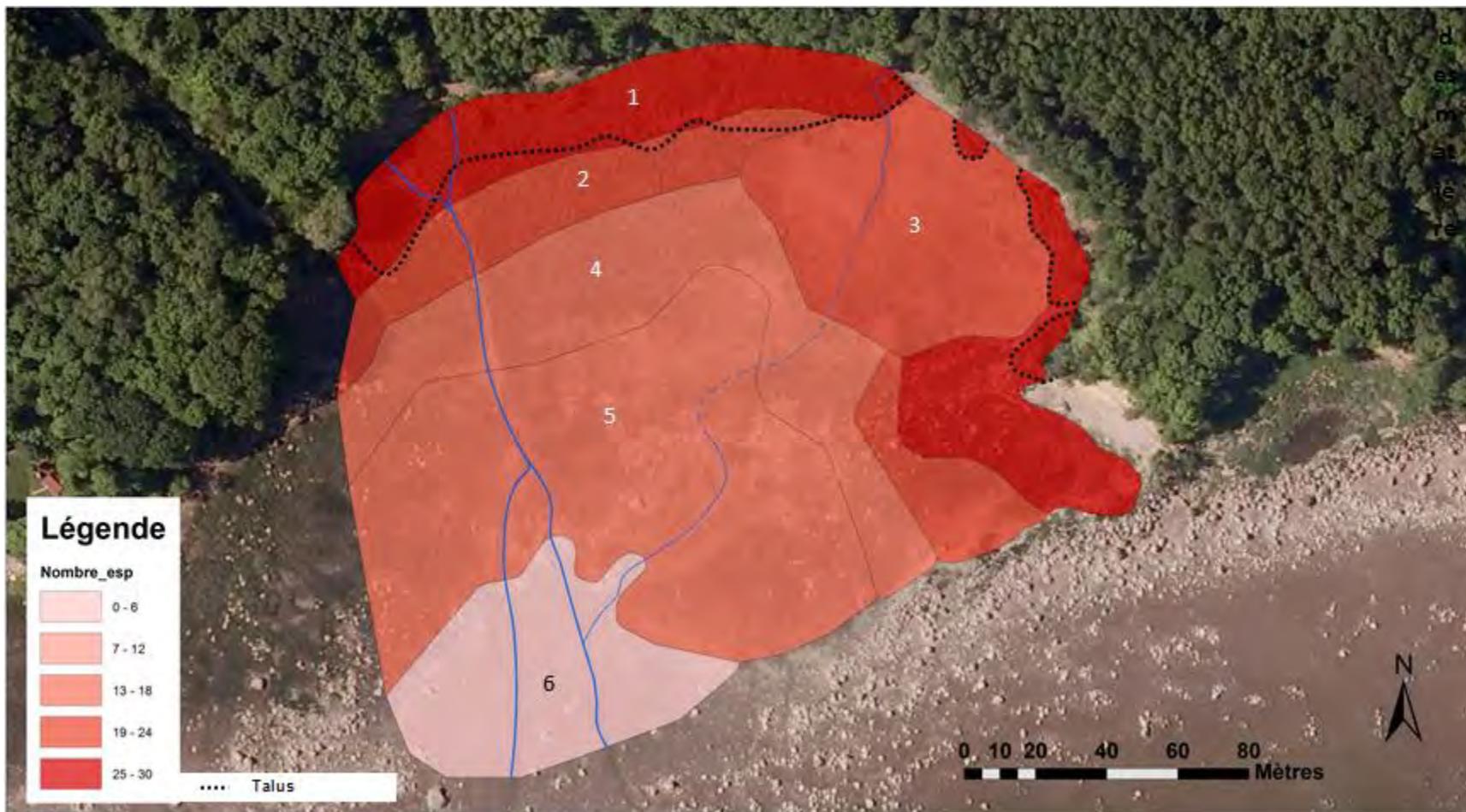


Figure 36 : Diversité floristique par zone, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.

5.4.1.2 Espèces végétales exotiques envahissantes

Les milieux humides sont des systèmes très dynamiques et leur composition végétale peut changer rapidement. L'installation d'espèces végétales envahissantes est une situation de plus en plus préoccupante sur les rives du Saint-Laurent. Parmi les 5000 espèces végétales exotiques des écosystèmes nord-américains, 80 se trouvent sur les rives du fleuve Saint-Laurent, dont certaines sont envahissantes.

Dans ce marais, comme espèce envahissante, a été identifié *Lythrum salicaria* (L.), qui occupe entre 5 et 25 % des Zones 1 et 2 et moins de 5 % de la Zone 3. Les individus de cette espèce sont distribués en touffes dispersées assez uniformément à l'intérieur des zones concernées.

5.4.1.3 Espèces menacées

Les trois espèces menacées considérées dans cette étude sont présentes dans ce marais. *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) (Figure 37) est une herbacée vivace d'une hauteur variant entre 0,5 et 2 m. Endémique à l'estuaire du fleuve Saint-Laurent, cette espèce croît dans les marais intertidaux d'eau douce et saumâtre. On la trouve entre Batiscan et Saint-Jean-Port-Joli, surtout dans la région de Québec (Figure 38) (Frère Marie-Victorin, 1995; Jolicoeur & Couillard, 2007a; Nature Québec, 2011a).

Dans le marais de Saint-Augustin, cette espèce a un recouvrement inférieur à 5 % dans la Zone 1 et entre 5 et 25 % dans la Zone 2. Elle est donc distribuée de part et d'autre du talus d'érosion, dans des zones de densité de végétation très élevée et de diversité floristique élevée (Figure 34). Il s'agit du seul marais où l'espèce a été recensée dans le schorre inférieur (bas marais). De plus, son pourcentage maximal d'occupation, dans la Zone 2, est associé à des sédiments d'une épaisseur supérieure à 50 cm et riches en sable.



Figure 37: *Cicuta maculata* var. *victorinii*.

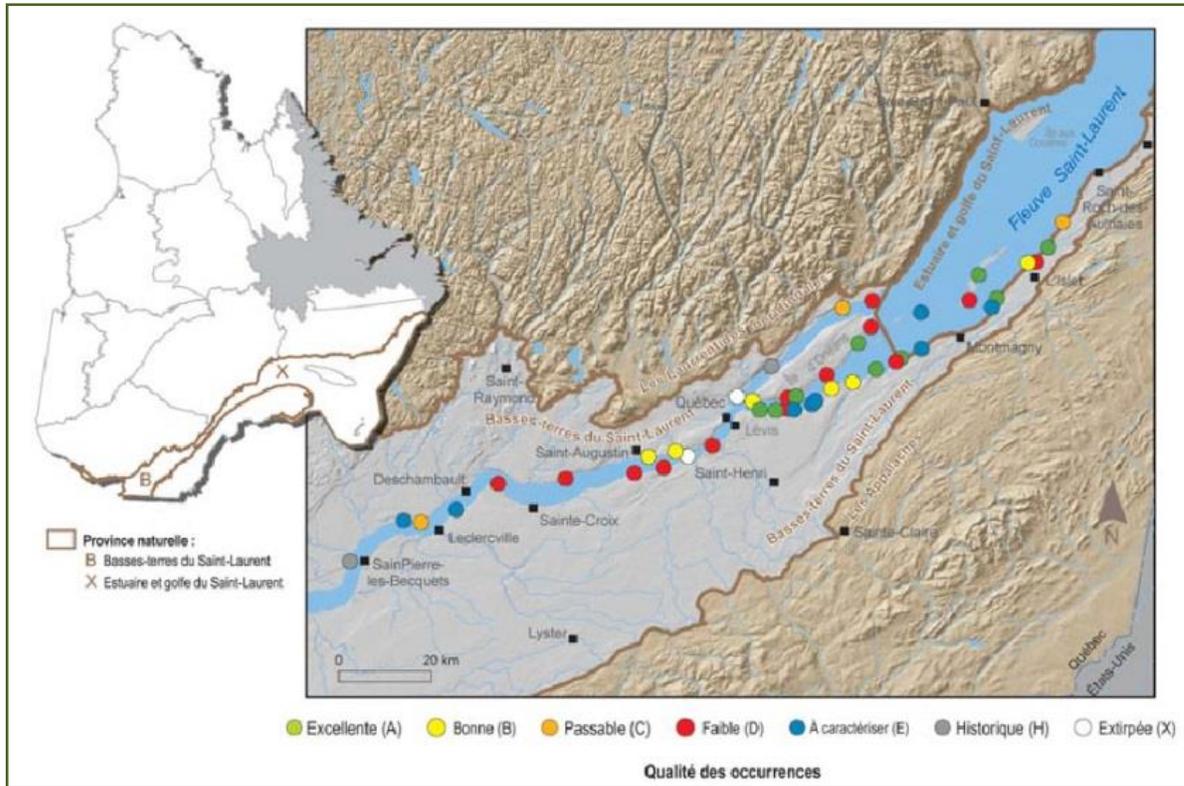


Figure 38 : Répartition des occurrences de la Cicutaire maculée, variété de Victorin au Québec.

Gentianopsis virgata subsp. *victorinii* (Fern.), est une espèce endémique à l'estuaire du Saint-Laurent. C'est une plante herbacée annuelle ou bisannuelle d'une hauteur variant entre 10 et 50 cm (Figure 39). Elle croît habituellement dans les marais intertidaux d'eau douce et saumâtre, entre Deschambault-Grondines et Saint-Roch-des-Aulnaies (Figure 40) (Frère Marie-Victorin, 1995; Jolicoeur & Couillard, 2007b).

Gentianopsis virgata subsp. *victorinii* (Fern.) n'est observable que dans la Zone 1, dans le schorre supérieur (haut marais) et en bordure du talus d'érosion (Figure 34). Les individus observés, au nombre d'une vingtaine, croissent sur un îlot de schorre supérieur qui se trouve au sein de la Zone 3 ainsi qu'au niveau du talus d'érosion qui marque la limite entre la Zone 1 et l'ouest de la Zone 3. Elle n'a pas été recensée dans la section ouest du marais, probablement en raison de la végétation très haute, atteignant 115 cm. La zone de végétation associée à cette espèce est très dense et très diversifiée. Toutefois, la position des individus en bordure du talus d'érosion indique que l'espèce a besoin de lumière pour se développer, une condition qu'elle trouve en bordure de la Zone 3, caractérisée par une végétation plus basse et moins dense.



Figure 39: *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii*

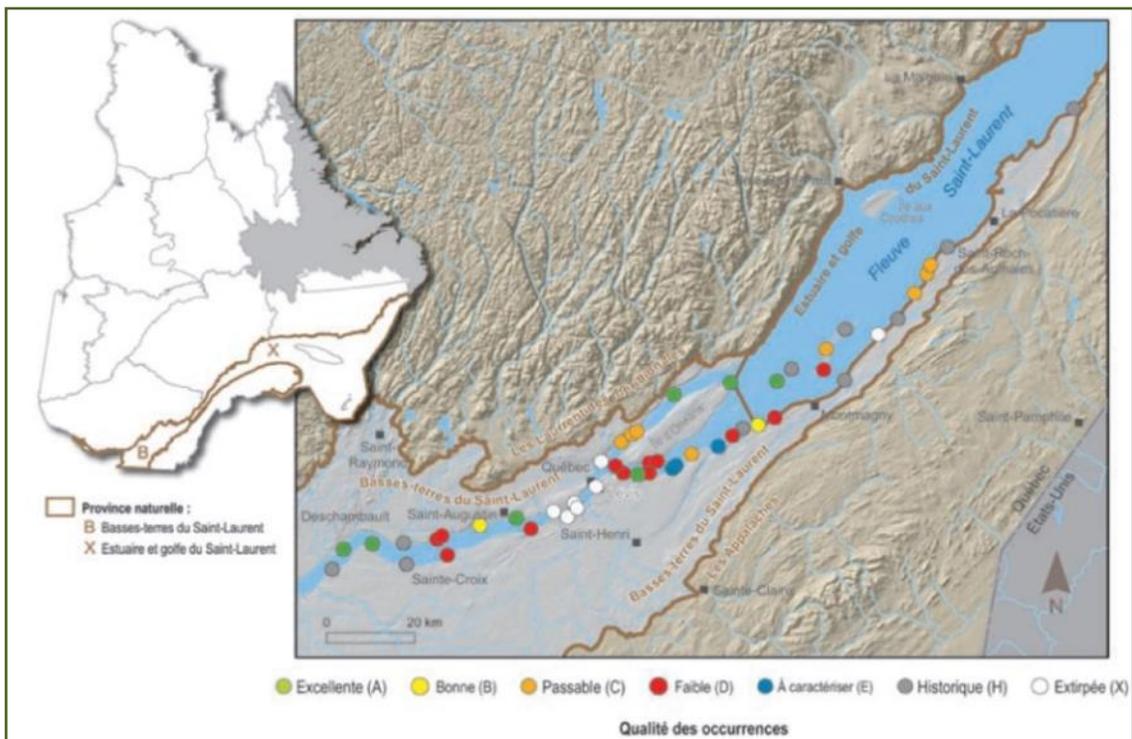


Figure 40 : Répartition des occurrences du *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* au Québec.

Eriocaulon parkeri (Robinson) (Figure 41) est aussi une espèce désignée menacée au Québec, mais n'est pas endémique à l'estuaire du Saint-Laurent. Son aire de répartition dans la province (Figure 42) s'étend de Saint-Antoine-de-Tilly à l'Islet, où elle croît dans les marais estuariens (Frère Marie-Victorin, 1995; Jolicoeur & Couillard, 2008). On la trouve également le long des estuaires côtiers des États-Unis et au Nouveau-Brunswick. Cette espèce a déjà disparu des États de la Pennsylvanie et de New York et est en situation précaire dans l'ensemble de son aire de répartition (Jolicoeur & Couillard, 2008). Il s'agit d'une herbacée annuelle d'une hauteur ne dépassant généralement pas 10 cm que l'on trouve dans la section inférieure des marais intertidaux, dans les vasques, les mares ainsi que les herbaçaias denses à *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) (MDDEP, 2001c; Nature Québec, 2011c.).

Eriocaulon parkeri (Robinson) a été répertorié dans la zone 4 (bas marais), où l'espèce possède un recouvrement inférieur à 5 % (Figure 34). Toutefois, ce faible pourcentage est attribuable à la très petite taille de la plante, car plus d'une centaine d'individus sont présents dans cette partie du marais. La végétation associée à son lieu d'occurrence est dense et moyennement diversifiée. Les sédiments sur lesquels s'installe cette espèce ont une épaisseur variant de 1 à 30 cm et sont riches en sable ainsi qu'en silt.



Figure 41 : *Eriocaulon parkeri*

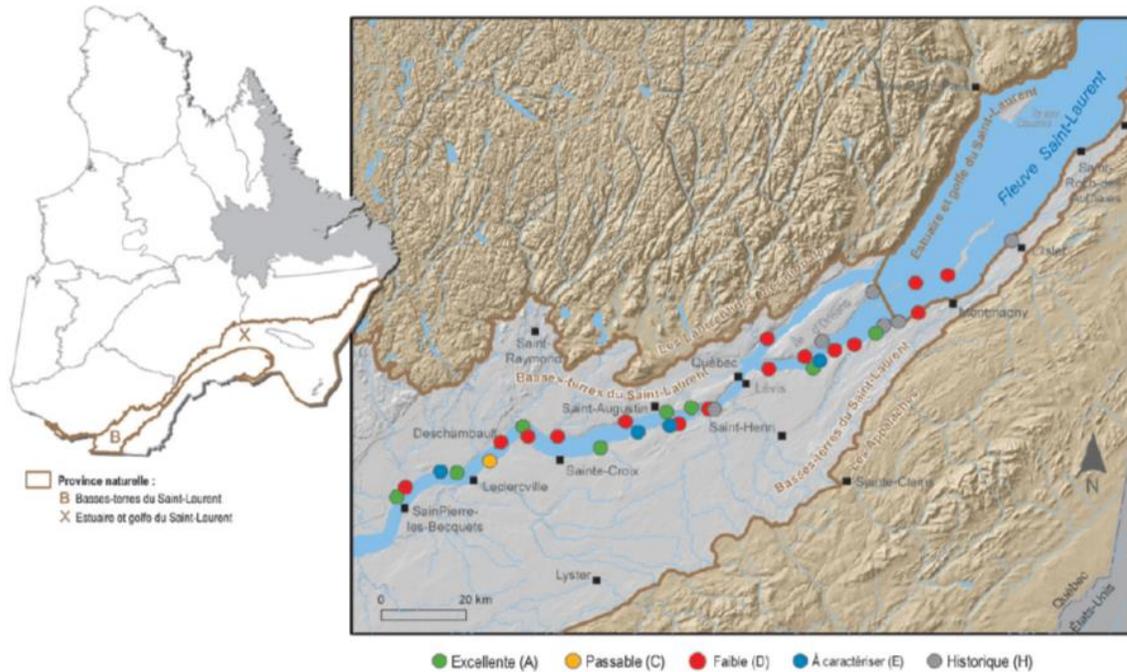


Figure 42 : Répartition des occurrences d'*Eriocaulon parkeri* (Robinson) au Québec.

5.4.1.4 Synthèse des connaissances sur la végétation

Le haut marais du site de Saint-Augustin-de-Desmaures se caractérise par des espèces floristiques appartenant majoritairement aux familles des astéracées et des poacées. Dans le bas marais, ce sont les cypéracées qui dominent. La végétation diminue graduellement en densité et en diversité du haut vers le bas du marais, formant six zones dont la répartition est principalement régie par un gradient de submersion. Le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures est le seul qui abrite les trois espèces menacées considérées dans cette étude. *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) colonise principalement le haut marais et la zone la plus élevée en altitude du bas marais. La végétation associée à son aire d'établissement est très dense et diversifiée. *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.) colonise le haut du talus d'érosion, uniquement dans la partie centrale du marais, en bordure de la Zone 3. *Eriocaulon parkeri* (Robinson) n'a été recensé que dans ce marais, au milieu du bas marais où la végétation est dense et moyennement diversifiée.

5.4.1.5 Épaisseur et granulométrie des dépôts de surface

La carte ci-dessous (Figure 43) présente l'épaisseur des sédiments meubles dans le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures. Dans celui-ci, aucune mesure n'a été prise dans le haut marais, mais on peut déduire par le contexte environnant que l'épaisseur des dépôts y est supérieur à 50 cm. Dans le bas marais, on remarque que les sédiments sont plus épais (plus de 31 cm) à l'ouest et à l'est. Au centre du bas marais ainsi que dans la slikke, la couche de sédiments est généralement plus mince, inférieure à 30 cm (teintes vertes). Ces secteurs correspondent probablement à des zones plus turbulentes où il se fait peu d'accumulation.

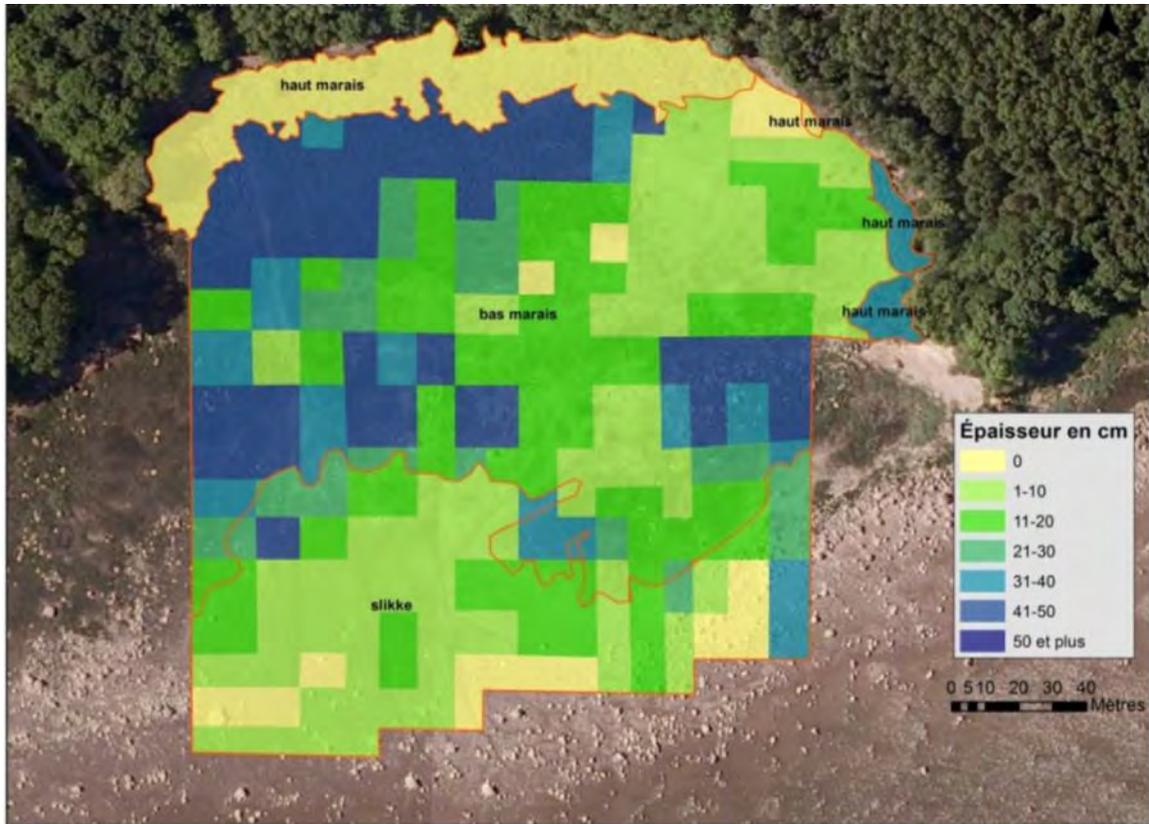


Figure 43 : Épaisseur des dépôts de surface, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures.

Il semble y avoir un lien entre l'épaisseur des sédiments meubles dans le marais et certaines zones de végétation. En effet, on remarque que la Zone 2, qui est très dense et diversifiée, repose généralement sur des sédiments de plus de 31 cm d'épaisseur. Les Zones 3, 4 et 6 sont plutôt associées à des sédiments dont l'épaisseur est faible, variant entre 1 et 20 cm. En ce qui concerne la Zone 5, qui est peu diversifiée et de densité faible, elle est couverte d'une couche de sédiments plus épaisse à l'ouest (31 cm et plus), et plus mince à l'est, entre 1 et 31 cm.

Dans le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, la proportion d'argile est faible et représente moins de 5 % des sédiments dans toutes les zones (Tableau 5). Le silt est moyennement présent dans toutes les zones et abonde dans la Zone 1, où il compte pour 42 % de la fraction granulométrique. Le sable est abondant dans le marais, particulièrement dans la Zone 6, où il compte pour 61 % des particules. Le gravier se trouve dans toutes les zones du marais, mais principalement dans les Zones 3 et 5, où la végétation est très peu dense.

Les dépôts de surface du schorre supérieur sont majoritairement composés de silt et de sable (Tableau 6), alors que dans le bas marais, ils sont composés principalement de sable et de gravier.

Tableau 5 : : Distribution granulométrique en fonction des zones de végétation, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Taille des particules	Zones de végétation (ZV - #)					
	ZV-1	ZV-2	ZV-3	ZV-4	ZV-5	ZV-6
Argile (%)	3	2	1	2	1	1
Silt (%)	42	25	21	31	15	13
Sable (%)	39	46	41	42	31	61
Gravier (%)	14	27	36	16	53	11

Tableau 6 : Distribution granulométrique moyenne du marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Taille des particules	Haut marais	Bas marais
Argile (%)	3	1
Silt (%)	42	23
Sable (%)	39	40
Gravier (%)	14	33

5.4.2 Marais de Beaumont

5.4.2.1 Zonation de la végétation

Dans le marais de Beaumont, quatre zones de végétation ont été identifiées, trois au niveau du schorre supérieur et une seule dans le schorre inférieur. On y a recensé 44 espèces (Figure 44).

La Zone 1, la plus près de la falaise, présente une végétation très dense et continue (Figure 45), dominée par *Spartina pectinata* (Link.) qui possède un pourcentage de recouvrement entre 26 et 50 %. Les autres espèces abondantes sont *Eutrochium maculatum* (L.), *Phalaris arundinacea* (L.), *Lysimachia terrestris* (L.), *Steironema ciliatum* (L.), *Salix eriocephala* (Michaux) et *Viola* sp. (L.). Cette zone compte 29 espèces (Figure 46) et est aussi diversifiée que la Zone 1 du marais de Saint-Augustin.

La Zone 2 se caractérise par une végétation un peu moins dense, dominée par *Eutrochium maculatum* (L.), avec un recouvrement entre 26 et 50 %. Elle est principalement accompagnée par *Schoenoplectus pungens* (Vahl.), *Galium palustre* (L.) et *Viola* sp. Avec 22 espèces, la diversité spécifique de cette zone est élevée.

La Zone 3 présente un couvert végétal discontinu et par conséquent moins dense que celui de la zone précédente. *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) et *Juncus brevicaudatus* (Engelm.) sont les espèces dominantes, chacune possédant un recouvrement entre 26 et 50 %. Les autres espèces abondantes sont *Sium suave* (Walt.), *Spartina pectinata* (Link.), *Lythrum salicaria* (L.) et quelques espèces d'astéracées. Cet assemblage floristique semble inhabituel, *Schoenoplectus pungens* étant une espèce de bas marais alors que *Spartina pectinata* est caractéristique du haut marais. La cohabitation de ces deux espèces s'explique du fait qu'il s'agit d'une zone de transition dans laquelle *Schoenoplectus pungens* semble prendre de plus en plus d'importance en réponse, peut-être, à une augmentation de la fréquence de submersion. Cela pourrait traduire une remontée du bas marais (schorre inférieur) au dépend du haut marais (schorre supérieur), une tendance également détectée avec les données de suivi géomorphologique présentées dans le chapitre précédent.

Enfin, la Zone 4, la seule à se développer au niveau du schorre inférieur qui est très rocheux, se caractérise par une végétation très peu dense et très peu diversifiée (5 espèces).

Le talus d'érosion se situe directement à la jonction des zones de végétation 3 et 4.

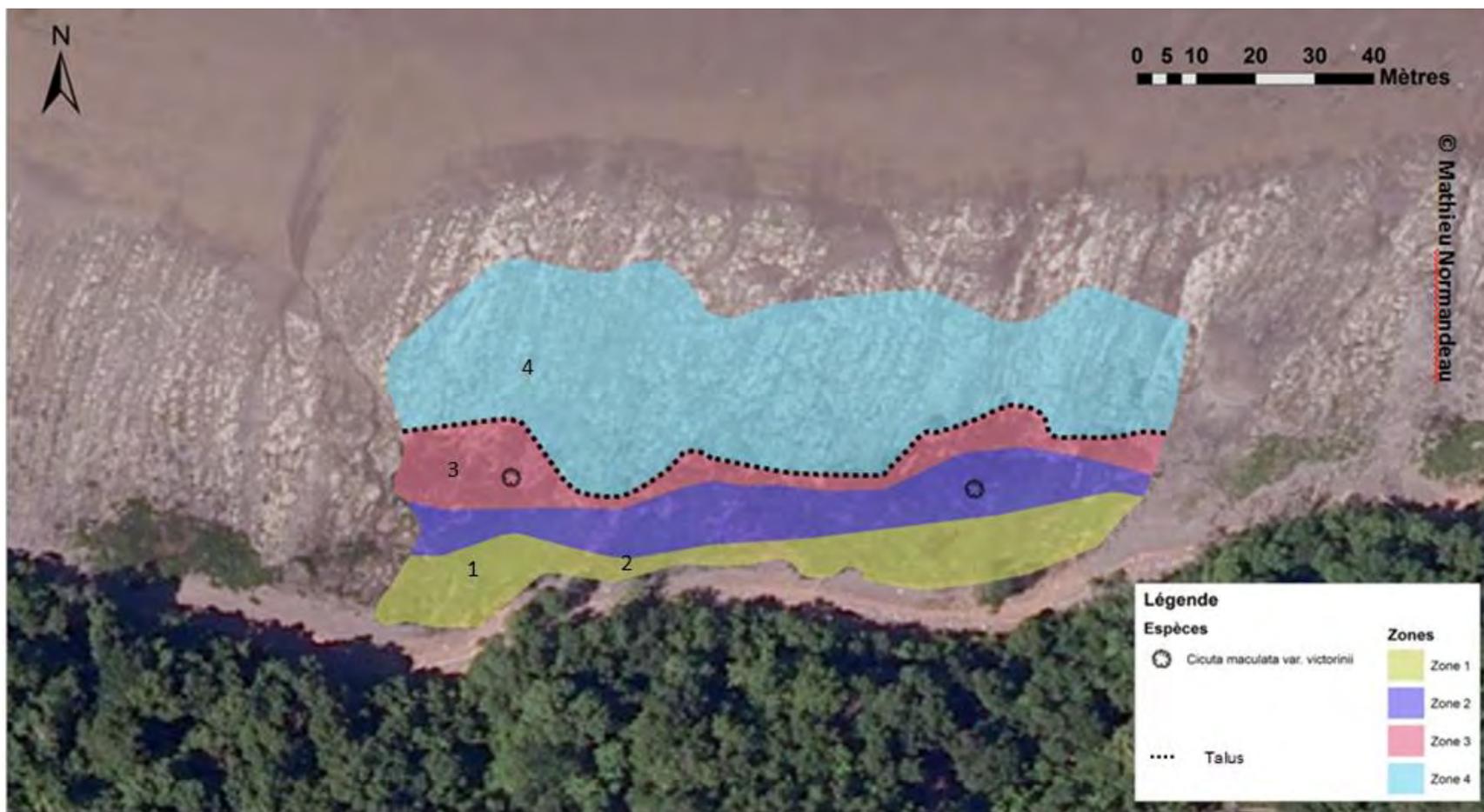


Figure 44 : Zones de végétation et présence d'espèces menacées, marais de Beaumont.



Figure 45 : Densité de la végétation par zone, marais de Beaumont.

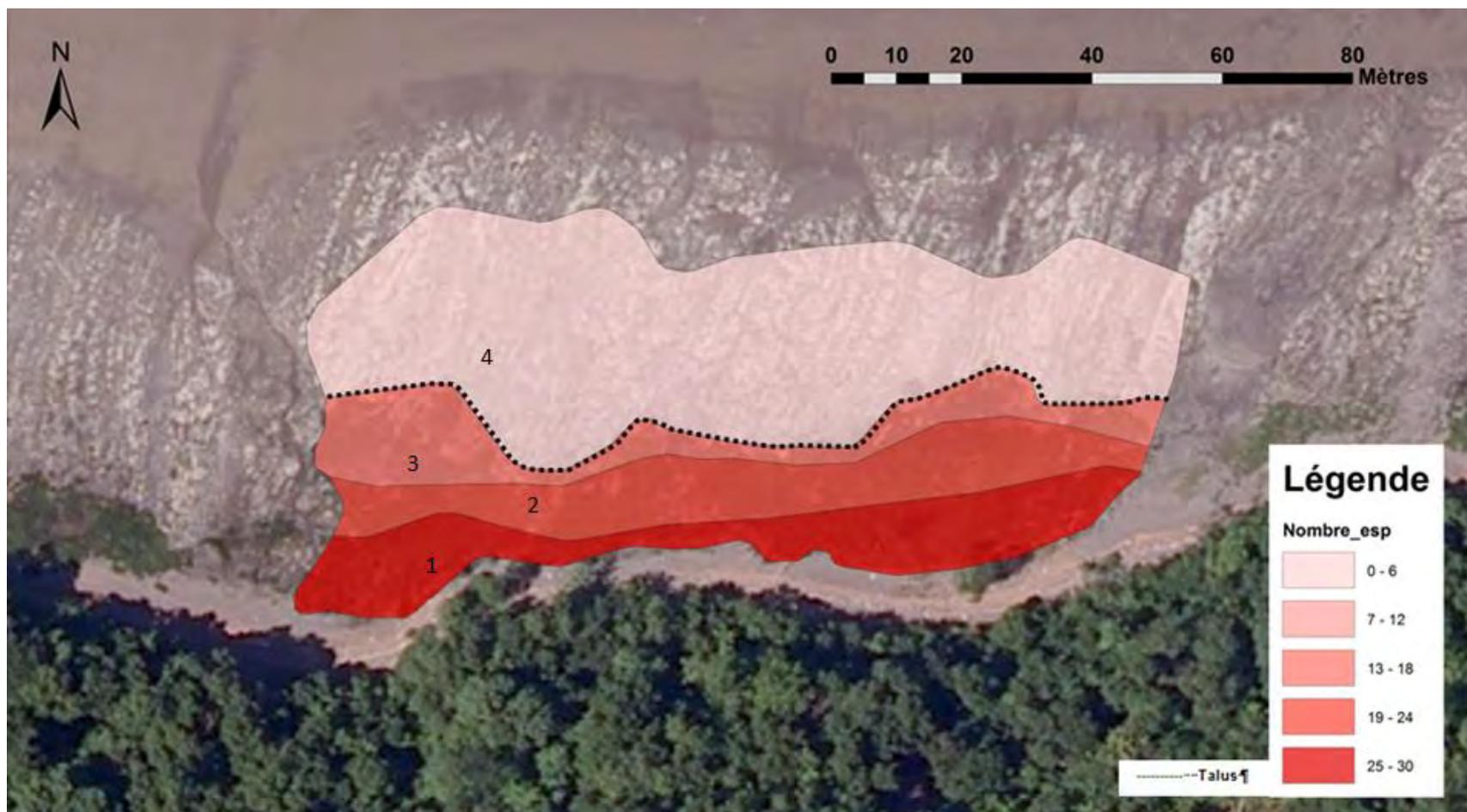


Figure 46 : Diversité floristique par zone, marais de Beaumont.

5.4.2.2 Espèces envahissantes

Deux espèces envahissantes ont été répertoriées dans le marais de Beaumont. *Lythrum salicaria* (L.) occupe effectivement moins de 5 % des Zones 1 et 2 ainsi qu'entre 5 et 25 % de la Zone 3. Cette espèce est distribuée en petits îlots ou en individus. La deuxième espèce présente, *Phalaris arundinacea* (L.), occupe entre 5 et 25 % de la Zone 1 et est distribuée sous forme de peuplement.

5.4.2.3 Espèces menacées

Parmi les espèces menacées, on trouve dans ce marais uniquement *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.), occupant moins de 5% de la Zone 2 et entre 5 et 25% de la Zone 3. L'espèce s'est établie partout dans le marais et croît sur des sédiments d'épaisseurs variables très riches en sable. Selon nos relevés, l'espèce est plus abondante dans la section est du marais, où les sédiments meubles sont plus épais, que dans la section ouest.

5.4.2.4 Synthèse des connaissances sur la végétation

Le marais de Beaumont comprend quatre zones de végétation, dont trois confinées dans le schorre supérieur, où les familles des astéracées, des poacées, des cypéracées et des joncacées sont en codominance. Le bas marais occupe une plate-forme rocheuse où la végétation est très éparse. La densité ainsi que la diversité de la végétation diminuent graduellement de l'amont vers l'aval du marais suivant un gradient de submersion. Parmi les espèces menacées, seul *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) a été recensé dans les Zones 2 et 3. Les espèces envahissantes observées sont *Lythrum salicaria* (L.) et *Phalaris arundinacea* (L.). *Lythrum salicaria* (L.) n'est dominant dans aucune zone alors que *Phalaris arundinacea* (L.) est fréquent dans la Zone 1.

5.4.2.7 Épaisseur et granulométrie des dépôts de surface - marais de Beaumont

La carte ci-dessous présente l'épaisseur des sédiments meubles du marais de Beaumont (Figure 47). Ce marais est caractérisé par des variations dans la zone de haut marais entre la section ouest, avec des épaisseurs de l'ordre de 1 à 30 cm, et la section est, avec des épaisseurs généralement de plus de 31 cm. Le bas marais se développe essentiellement sur une plate-forme rocheuse comprenant quelques zones de sédiments de moins de 10 cm d'épaisseur. Au niveau de la slikke, l'épaisseur des sédiments dépasse 50 cm.

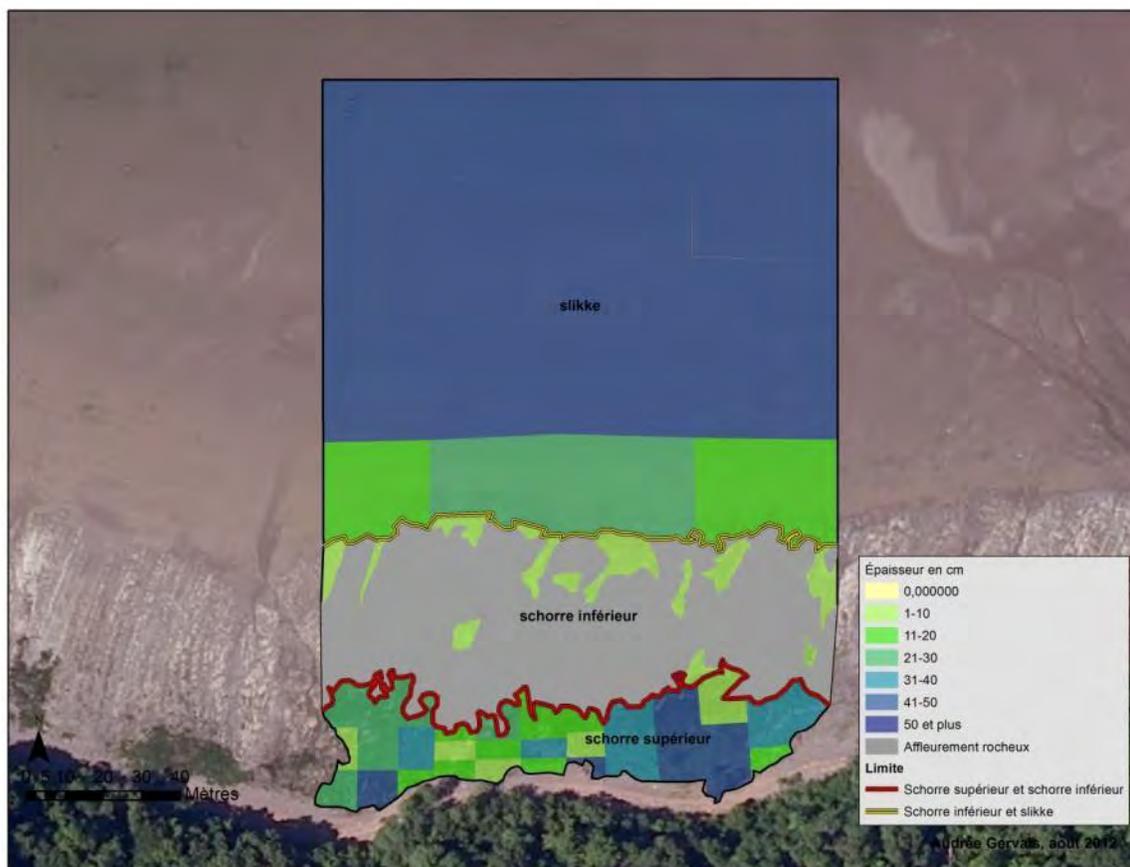


Figure 47 : Répartition des dépôts de surface, marais de Beaumont

Contrairement au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures où les zones de végétation sont associées à des classes d'épaisseur de dépôts meubles, profonds ou peu profonds, les limites des zones de végétation du marais de Beaumont ne correspondent pas à celles des différentes classes d'épaisseur des dépôts meubles. C'est donc la durée de submersion qui détermine leur dans ce marais.

Les sédiments de surface du marais de Beaumont sont principalement sableux-silteux, excepté dans la slikke où les sédiments sont plutôt sablo-graveleux (Tableau 7). En effet, le silt est abondant dans toutes les zones à l'exception de l'estran rocheux (Zone 4). Le sable est la fraction granulométrique la mieux représentée, avec des proportions variant entre 51 et 76 %. Le gravier se trouve principalement dans la Zone 4, où il compte pour 44 % de la distribution. Dans ce marais, les Zones 1 et 3 ont des distributions granulométriques semblables, avec très peu de gravier et beaucoup de sable.

La section de haut marais diffère largement de la section de bas marais (Tableau 8). En effet, on retrouve principalement du sable et du silt en amont du talus, alors que c'est plutôt du sable et du gravier en aval de celui-ci.

Tableau 7 : Distribution granulométrique en fonction des zones de végétation, marais de
Beaumont

Taille des particules	Zone de végétation (ZV - #)			
	ZV-1	ZV-2	ZV-3	ZV-4
Argile (%)	1	2	1	0
Silt (%)	22	32	23	3
Sable (%)	74	49	75	50
Gravier (%)	3	17	1	42

Tableau 8 : Distribution granulométrique moyenne du marais de Beaumont

Taille des particules	Haut marais	Bas marais
Argile (%)	1	0
Silt (%)	26	3
Sable (%)	66	50
Gravier (%)	7	42

5.4.3. Marais de Château-Richer

5.4.3.1 Zonation de la végétation

Le marais de Château-Richer comprend six zones de végétation, une au niveau du schorre supérieur et cinq dans le schorre inférieur. Elles forment des bandes linéaires et parallèles au rivage (Figure 48) et la transition de l'une à l'autre se fait abruptement et est donc très perceptible. Un total de 43 espèces ont été répertoriées dans ce marais.

La Zone 1, localisée dans le haut marais, présente une végétation très dense (Figure 49), et diversifiée (24 espèces) (Figure 50). Elle est dominée par *Eutrochium maculatum* (L.) et *Apios americana* (Medikus), qui présente chacun un recouvrement situé entre 26 et 50 %. Les autres espèces abondantes sont *Symphyotrichum lanceolatum* (Will.), *Leersia oryzoides* (L.), *Polygonum sagittatum* (L.), *Sanguisorba canadensis* (L.) et *Viola* sp. (L.).

La Zone 2, située directement en bas du talus d'érosion, est un peu moins dense (Figure 49) mais presque aussi diversifiée (22 espèces). Elle est dominée par *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) et par *Spartina pectinata* (Link.) (héritage du haut marais probablement), qui ont chacun un recouvrement de 26 à 50 %. Les autres espèces dominantes sont *Sium suave* (Walt.), *Bidens frondosa* (L.), *Eupatorium perfoliatum* (L.), *Juncus brevicaudatus* (Engelm.) et *Lythrum salicaria* (L.).

La Zone 3 se caractérise par une végétation peu dense (Figure 49) et peu diversifiée (8 espèces). Elle est dominée par *Juncus brevicaudatus* (Engelm.), qui a un pourcentage de recouvrement de 51 à 75%, et par *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) qui est un peu moins abondant (recouvrement de 26 à 50 %). Les autres espèces abondantes sont *Bidens frondosa* (L.) et *Zizania aquatica* var. *brevis* (Fassett).

La Zone 4 a la particularité de se trouver de part et d'autre de la Zone 5. En amont de la Zone 5, elle est très dense et composée de quatre espèces, dont les plus abondantes sont *Zizania aquatica* var. *brevis* (Fassett), qui occupe entre 51 et 75 % de la zone, et *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) dont le recouvrement est de 26 à 50 %. Les deux autres espèces répertoriées dans cette zone sont *Sagittaria latifolia* (Will.) et *Bidens frondosa* (L.). En aval, la densité est plus faible, mais la composition est la même, à l'exception de *Bidens frondosa* (L.), qui est absent.

La Zone 5 présente une végétation dense, mais peu diversifiée (3 espèces). Elle est caractérisée par une dominance évidente de *Juncus effusus* (L.), qui atteint plus de 2 m de hauteur (Figure 51). Son pourcentage de recouvrement est de 26 à 50 %, tout comme *Zizania aquatica* var. *brevis* (Fassett). La troisième espèce répertoriée dans cette zone est *Schoenoplectus pungens* (Vahl.).

La Zone 6, la plus basse en altitude, est composée également de trois espèces. C'est celle qui présente la plus faible densité de végétation (Figure 49). Elle est dominée par *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) dont le recouvrement est supérieur à 75%.

Le talus d'érosion de ce marais est plus haut que celui des marais de Saint-Augustin-de-Desmaures et de Beaumont. Il marque une limite nette entre les Zones de végétation 1 et 2, dont la composition végétale diffère complètement.



Figure 48: Zones de végétation et présence d'espèces menacées, marais de Château-Richer.



Figure 49 : Densité de la végétation par zone, marais de Château-Richer.



Figure 50 : Diversité floristique par zone, marais de Château-Richer.



Figure 51 : Présence de *Juncus effusus* dans la zone 5, marais de Château-Richer.

5.4.3.2 Espèces envahissantes

Les mêmes espèces envahissantes que celles identifiées dans le marais de Beaumont se trouvent dans le marais de Château-Richer, soit *Lythrum salicaria* (L.) et *Phalaris arundinacea* (L.). *Lythrum salicaria* (L.) colonise principalement le bas marais, où il occupe entre 5 et 25 % de la Zone 2. Les deux espèces sont aussi présentes dans le haut marais avec un taux d'occupation de moins de 5 %.

5.4.3.3 Espèces menacées

Parmi les trois espèces menacées concernées par cette étude, *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) a été trouvé dans la Zone 1, où il a un recouvrement situé entre 5 et 25 %. Il n'est présent que dans le haut marais. La zone de végétation qui l'abrite se caractérise par une végétation très dense et très diversifiée qui repose sur des sédiments meubles d'une épaisseur supérieure à 50 cm et très riches en silt.

Gentianopsis virgata subsp. *victorinii* (Fern.) a aussi été observé dans la Zone 1, où il a un recouvrement inférieur à 5 %. Plus d'une centaine d'individus ont été observés sur toute l'étendue étudiée, tous situés en bordure du talus d'érosion sur des sédiments silteux d'une épaisseur supérieure à 50 cm.

5.4.3.4 Synthèse des connaissances sur la végétation

Le marais de Château-Richer se caractérise par une végétation où prédominent les espèces de la famille des astéracées et des fabacées dans le haut marais. Le bas marais se caractérise plutôt par la présence des poacées, des cypéracées et des juncacées. L'unique zone de végétation qui forme le haut marais possède une diversité floristique élevée, alors qu'elle est beaucoup plus faible pour la plupart des zones du bas marais. Deux espèces menacées, *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) et *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.), ont été recensées exclusivement dans le haut marais, et cette dernière y est relativement abondante malgré son faible recouvrement. Les espèces

envahissantes, *Lythrum salicaria* (L.) et *Phalaris arundinacea* (L.), ont été observées dans ce marais, mais aucune d'entre elles n'est en situation de dominance.

5.4.3.5 Épaisseur et granulométrie des dépôts meubles

Le marais de Château-Richer est très riche en sédiments meubles, dont l'épaisseur dépasse 50 cm sur toute sa surface (Figure 52). Par conséquent, la variation des paramètres de densité et de diversité de la végétation n'est pas en lien direct avec ce facteur.

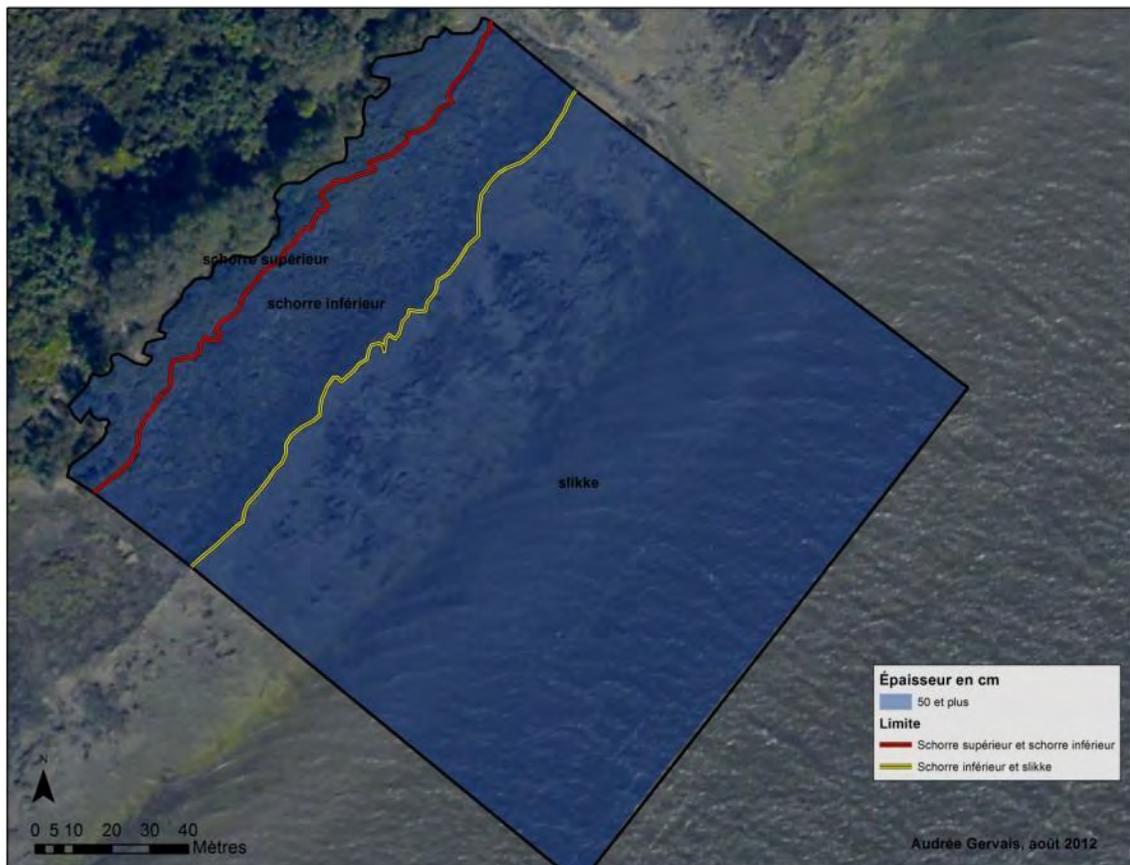


Figure 52 : Répartition des sédiments meubles, marais de Château-Richer

Contrairement aux marais de Saint-Augustin-de-Desmaures et de Beaumont, le marais de Château-Richer s'est développé sur des sédiments de texture fine, principalement constitués de silt, lequel dépasse 70 % dans toutes les zones de végétation identifiées (Tableau 9). L'argile est plus abondante que dans les trois autres marais. Après le silt, le sable est la deuxième fraction granulométrique la plus abondante, mais elle est presque absente des Zones 4 et 5. La distribution granulométrique générale de ces deux dernières zones diffère de celle des quatre autres, dont les distributions sont assez semblables.

Les sections du haut marais et du bas marais sont toutes deux composées principalement de silt (Tableau 10). On trouve plus de sable en haut du talus d'érosion (24 %) que dans le bas de celui-ci (15 %).

Tableau 9 : Distribution granulométrique en fonction des zones de végétation, marais de Château-Richer

Taille des particules	Zones de végétation (ZV-#)					
	ZV-1	ZV-2	ZV-3	ZV-4	ZV-5	ZV-6
Argile (%)	5	4	5	7	9	5
Silt (%)	71	70	73	91	88	75
Sable (%)	24	26	23	2	3	20
Gravier (%)	0	0	0	0	0	0

Tableau 10 : Distribution granulométrique moyenne du marais de Château-Richer

Taille des particules	Haut marais	Bas marais
Argile (%)	5	6
Silt (%)	71	79
Sable (%)	24	15
Gravier (%)	0	0

5.4.4 Marais de l'Isle-aux-Grues

5.4.4.1 Zonation de la végétation

Cinq zones de végétation forment le marais de l'Isle-aux-Grues (Figure 53); deux occupent le haut marais (schorre supérieur), et trois, le bas marais (schorre inférieur). La transition entre ces zones est plus facile à délimiter dans le haut marais que dans le bas marais. Un total de 35 espèces a été recensé dans ce marais.

La Zone 1, dans le haut marais, se caractérise par une végétation très dense (Figure 54) et moyennement diversifiée (14 espèces) (Figure 55). Les espèces dominantes sont *Calamagrostis canadensis* (Michaux), occupant entre 51 et 75 % de la zone et *Eutrochium maculatum* (L.) dont le recouvrement se situe entre 26 à 50 %. Les autres espèces présentes sont *Apios americana* (Medikus), *Lythrum salicaria* (L.) et *Sanguisorba canadensis* (L.).

La Zone 2, aussi située dans le haut marais, est également très dense, mais moins diversifiée (6 espèces). Les espèces de la famille des poacées prédominent et sont représentées par *Calamagrostis canadensis* (Michaux), qui a un recouvrement de 51 à 75 %, et par *Spartina pectinata* (Link.) qui est un peu moins abondant (entre 26 et 50 % de recouvrement).

La Zone 3, située en aval du talus d'érosion, est dense et peu diversifiée (10 espèces). Elle est dominée par *Schoenoplectus pungens* (Vahl.), dont le recouvrement est supérieur à 75 %. Avec un pourcentage d'occupation entre 5 et 25 %, *Sagittaria latifolia* (Will.), *Sium suave* (Walt.), *Bidens frondosa* (L.) et *Cyperus rivularis* (Kunth) sont les autres espèces les plus fréquentes dans cette zone.

La Zone 4, localisée sur l'estran rocheux, possède une végétation monospécifique et peu dense (Figures 54 et 55). On y trouve uniquement l'espèce *Schoenoplectus pungens* (Vahl.), dont le recouvrement est évalué entre 51 et 75 %. Elle forme de grandes colonies entrecoupées de zones dénudées.

La Zone 5 est colonisée par *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) et *Trifolium hybridum* (L.), qui ont chacun un recouvrement de 26 à 50 %. Cette dernière espèce, qui est introduite, témoigne probablement des activités humaines (agricoles) à proximité. Avec 19 espèces, cette zone est la seconde plus diversifiée du marais. Cette situation est due au fait que des blocs de haut marais se sont décrochés à proximité et ont été colonisés par des espèces typiques du bas marais. On y trouve donc un mélange d'espèces caractéristiques des zones 1 et 2, auxquelles se sont ajoutées des espèces de la zone 3 à savoir *Juncus brevicaudatus* (Engelm.), *Calamagrostis canadensis* (Michaux), *Spartina pectinata* (Link.) et *Agalinis paupercula* (A. Gray).

Le talus d'érosion de ce marais est le plus élevé des marais étudiés, atteignant 1 m par endroits. Il délimite les zones 2 et 3 à l'ouest du marais et la zone 1 des zones 3 et 5 dans à l'est.

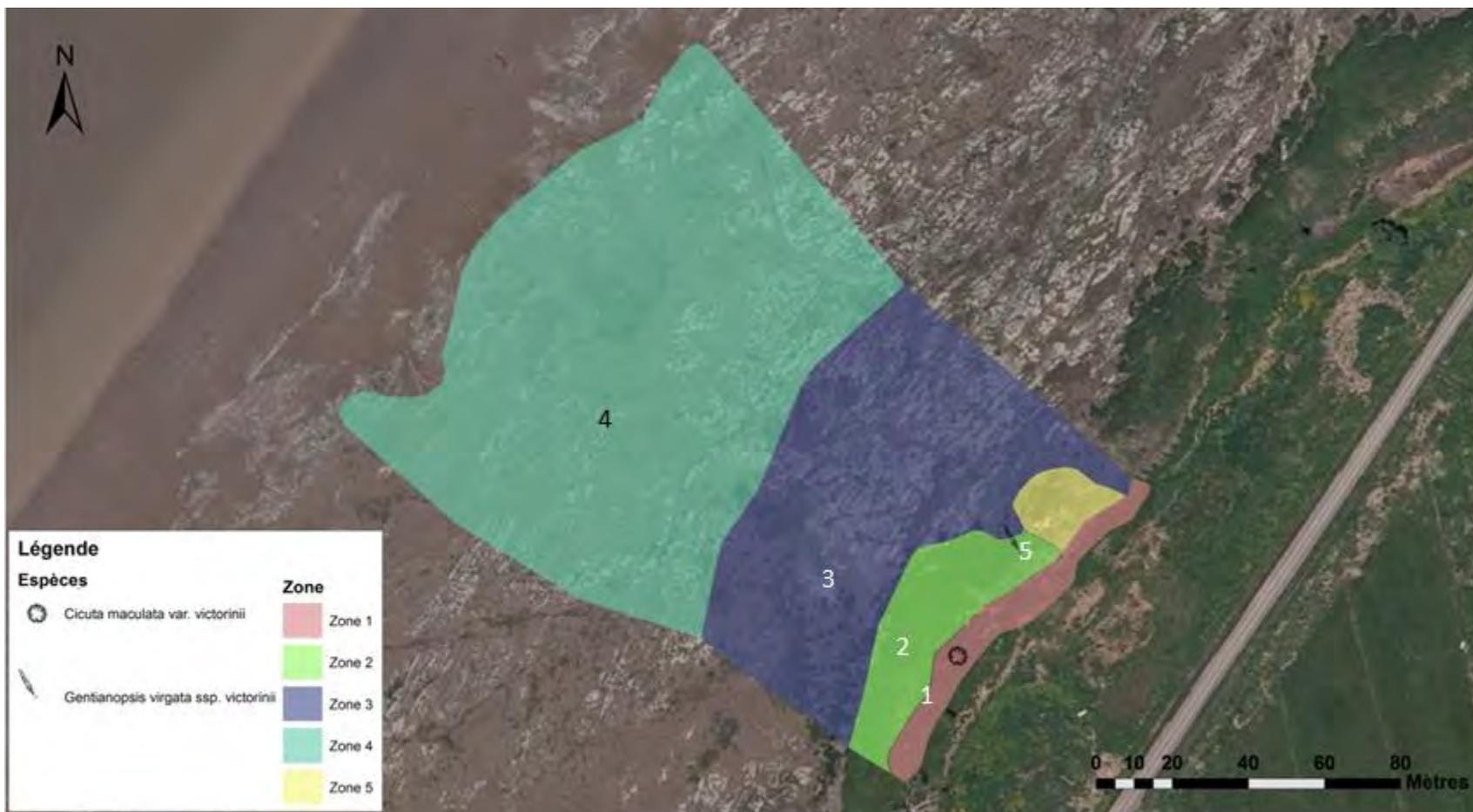


Figure 53 : Zones de végétation et présence d'espèces menacées, marais de l'Isle-aux-Grues.



Figure 54 : Densité de la végétation par zone, marais de l'Isle-aux-Grues.

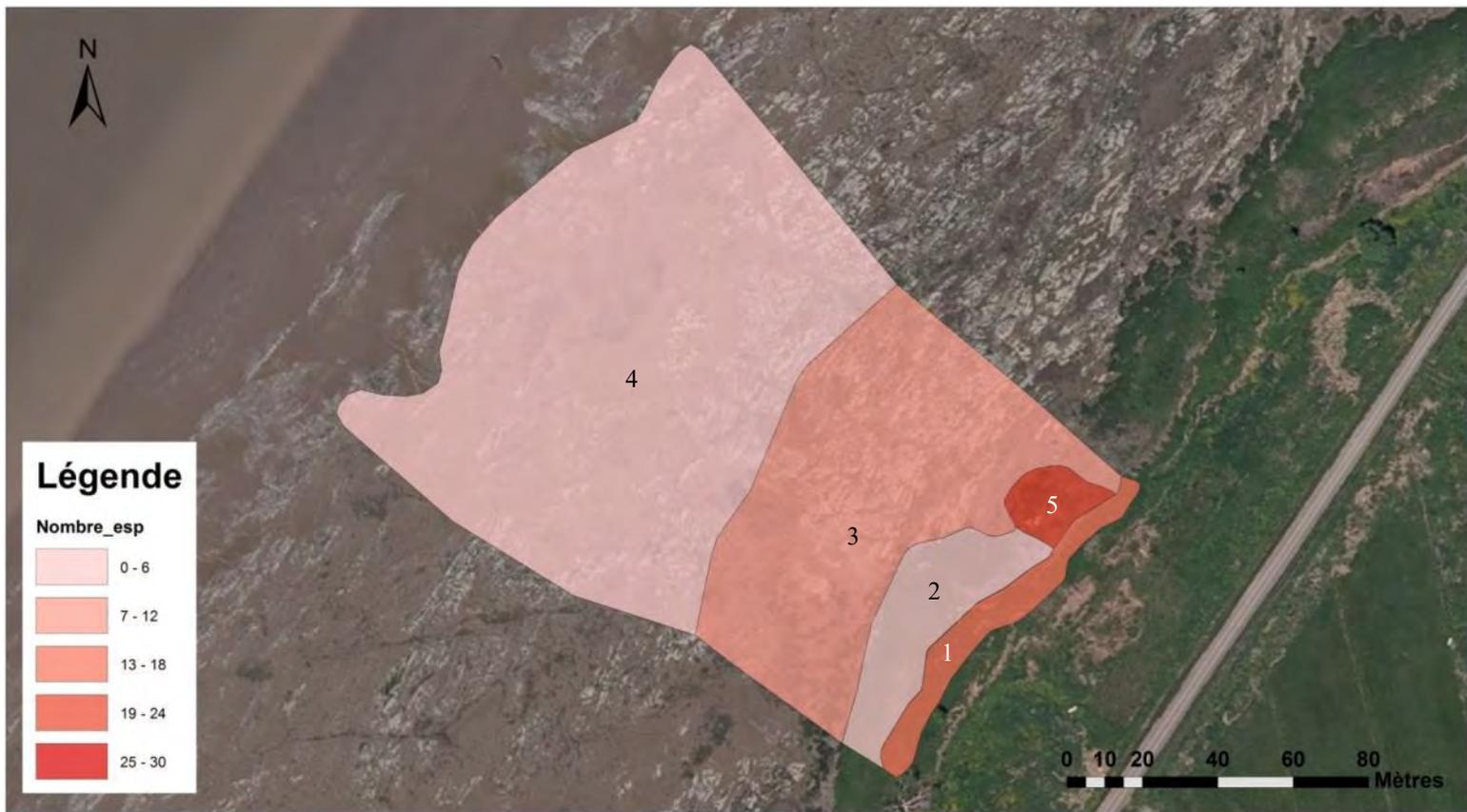


Figure 55 : Diversité floristique par zone, marais de l'Isle-aux-Grues.

5.4.4.2 Espèces envahissantes

Parmi les espèces envahissantes, seul *Lythrum salicaria* (L.) a été recensé dans la portion étudiée du marais, occupant entre 5 et 25 % de la Zone 1 et moins de 5 % des Zones 2 et 5. Toutefois, de grands peuplements de *Phragmites australis* (Cav.) ont été observés à environ 100 m à l'est du secteur étudié, dans les zones du schorre supérieur et du schorre inférieur. D'autres petits peuplements ont également été relevés non loin, en amont du marais, vers le sud-est.

5.4.4.3 Espèces menacées

Deux espèces menacées ont été recensées dans ce marais. *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) a été observé dans la Zone 1 sur des sédiments silteux de plus de 50 cm d'épaisseur comme dans les autres marais. Toutefois, sa situation semble assez précaire puisque seulement quelques individus ont été dénombrés.

Gentianopsis virgata subsp. *victorinii* (Fern.) a aussi été observé, mais uniquement sur le talus d'érosion (Figure 58), près de la Zone 5. Quelques dizaines d'individus seulement ont été comptés. Aucun individu de cette espèce n'a été recensé sur le talus d'érosion à l'ouest du marais.

5.4.4.4 Synthèse des connaissances sur la végétation

Le marais de l'Isle-aux-Grues se caractérise par un haut marais dominé par des espèces de la famille des poacées, en codominance avec des astéracées. Ce marais possède une végétation très dense en amont du talus d'érosion et de moins en moins dense en aval de celui-ci. La diversité de la végétation est aussi très élevée dans le haut marais, mais uniquement dans la Zone 1. La Zone 2, aussi située dans le haut marais, est peu diversifiée et presque uniquement composée de *Calamagrostis canadensis* (Michaux) et *Spartina pectinata* (Link.). La Zone 5 est aussi très diversifiée puisqu'on y trouve un mélange d'espèces caractéristiques du haut et du bas marais, ce qui témoigne d'une forte activité d'érosion. Les autres zones de végétation du bas marais sont peu diversifiées. *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) et *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.) ont été recensés dans ce marais, tous deux en situation assez précaire. Uniquement *Lythrum salicaria* (L.) a été recensé comme espèce envahissante, occupant trois zones, sans être en situation de dominance.

5.4.4.5 Épaisseur et granulométrie des dépôts meubles

La carte ci-dessous présente l'épaisseur des dépôts meubles du marais de l'Isle-aux-Grues (Figure 56). La zone de haut marais (schorre supérieur) repose sur des dépôts de plus de 50 cm d'épaisseur. Dans le bas marais (schorre inférieur et slikke), les sédiments meubles ont plus de 50 cm d'épaisseur dans la portion située entre le talus d'érosion et l'affleurement rocheux. Plus bas, l'épaisseur des sédiments varie de 0 à 30 cm jusqu'à la slikke où les sédiments ont au maximum 20 cm d'épaisseur.

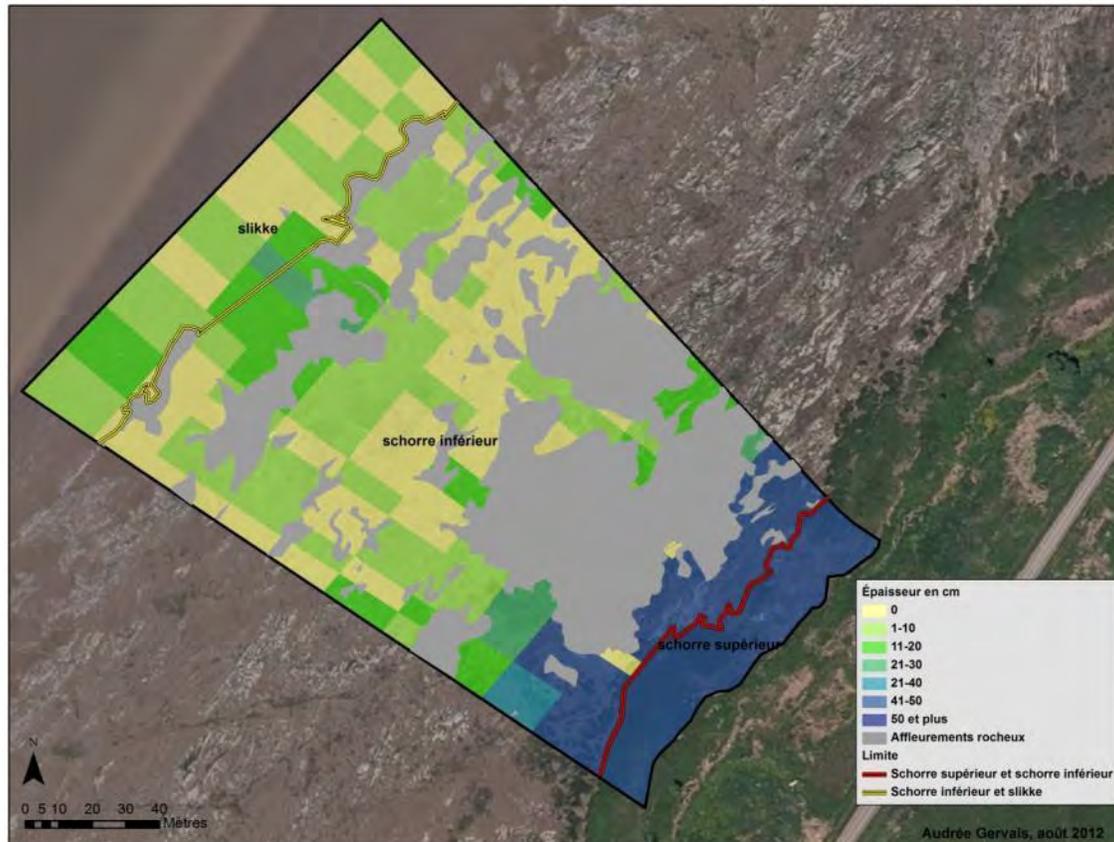


Figure 56 : Répartition des sédiments meubles, marais de l'Isle-aux-Grues.

Les dépôts de surface associés aux assemblages 1, 2 et 5 sont d'une épaisseur de plus de 50 cm. Plus en aval, dans les zones 3 et 4, les dépôts ont des épaisseurs variant entre 0 et 30 en fonction de la microtopographie du substrat rocheux.

La distribution granulométrique des sédiments du marais de l'Isle-aux-Grues varie beaucoup d'une zone à l'autre (Tableau 11). Le silt est la fraction la plus abondante dans le marais, excepté dans la Zone 2 où c'est le sable qui domine, comptant pour 67 % de la fraction granulométrique.

La section du haut marais est principalement composée de silt et de sable dans des proportions similaires (Tableau 12). Le bas marais est toutefois composé majoritairement de silt, comptant pour 69 % de la fraction, comparativement à 27% pour le sable. On

trouve de l'argile et du gravier dans les deux sections, avec des proportions semblables et faibles.

Tableau 11 : Distribution granulométrique en fonction des zones de végétation, marais de l'Isle-aux-Grues

Taille des particules	Zones de végétalisation (ZV-#)				
	ZV-1	ZV-2	ZV-3	ZV-4	ZV-5
Argile (%)	6	1	2	7	4
Silt (%)	76	31	67	86	54
Sable (%)	19	67	31	6	41
Gravier (%)	0	1	0	0	<1

Tableau 12: Distribution granulométrique moyenne, marais de l'Isle-aux-Grues

Taille des particules	Haut marais	Bas marais
Argile (%)	4	5
Silt (%)	53	77
Sable (%)	43	19
Gravier (%)	1	<1

5.4.5 Comparaison entre les quatre marais étudiés en termes de diversité et densité végétales

À l'instar des trois autres marais, celui de Saint-Augustin-de-Desmaures est composé d'une végétation très dense et très diversifiée dominée par des espèces appartenant aux familles des astéracées et des poacées dans le haut marais et d'une végétation moins dense et moins diversifiée caractérisée par une prédominance des cypéracées dans le bas marais. L'espèce envahissante *Lythrum salicaria* (L.) est présente au sein de plusieurs zones de végétation, comme c'est le cas dans les trois autres marais. Toutefois, elle n'est en situation d'abondance dans aucune zone. Ce marais se distingue des autres principalement par sa forme, une baie semi-ouverte orientée vers le sud-ouest, et par la présence d'une zone de végétation particulière (la zone 3) abritant sept espèces exclusives en plus d'être très diversifiée et très peu dense à la fois. C'est également le marais où le nombre d'espèces est le plus élevé, totalisant 55 espèces et le seul où *Eriocaulon parkeri* (Robinson) a été observé. Dans ce marais, la limite entre le haut marais et le bas marais est difficile à distinguer à partir de la végétation. Enfin, ce marais est celui où la proportion en gravier est la plus élevée dans le haut marais, atteignant 14 %.

Le marais de Beaumont possède des gradients de densité et de diversité de végétation semblables aux autres marais, diminuant du haut vers le bas. Comme les marais de Château-Richer et de l'Isle-aux-Grues, *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) colonise exclusivement le haut marais. Ce marais se distingue des trois autres sous plusieurs aspects. Il s'agit du marais le plus étroit. Toutefois, il comporte le plus de zones dans le haut marais (3) et le moins de zones dans le bas marais (1) et au total (4). De plus, on trouve beaucoup d'espèces des familles des cypéracées et des joncacées caractéristiques du schorre inférieur en situation d'abondance dans les zones 2 et 3 de végétation du haut marais. Une situation particulière qui semble due au confinement du marais entre une haute falaise et un estran rocheux. L'exposition aux vagues, la structure de la roche en place (microtopographie) pourraient être d'autres facteurs expliquant cette situation particulière. Une seule espèce menacée y a été répertoriée, alors qu'on en trouve deux ou trois dans les autres marais. Ce marais est celui où l'espèce envahissante *Phalaris arundinacea* (L.) est la plus abondante. Le bas marais de Beaumont est marqué par une forte proportion de gravier, 42 % de la fraction granulométrique; aussi le sable est abondant, autant dans le haut marais (66 %) que dans le bas marais (50 %).

Comme les autres marais, celui de Château-Richer possède une végétation plus dense et plus diversifiée au niveau du haut marais. Le marais de Château-Richer se distingue par la forme presque rectiligne de ses zones de végétation et la transition très perceptible entre celles-ci. D'autre part, il s'agit du marais où la diversité de la végétation est la moins graduelle du haut vers le bas du marais. Une chute abrupte de diversité se produit entre la Zone 3, contenant 22 espèces, et la Zone 4 qui en compte uniquement huit. Ce marais est le seul où on trouve *Juncus effusus* (L.), qui est très abondant dans la Zone 5 en plus d'atteindre une hauteur de plus de 2 m, ce qui marque le paysage du marais. *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) occupe uniquement le haut marais tandis que *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.) croît en bordure du talus d'érosion, comme dans les autres marais. L'épaisseur des dépôts de surface est supérieure à 50 cm sur toute sa surface, et le silt domine, représentant 71 % des sédiments du haut marais et 79 % de ceux du bas marais. Avec le marais de Beaumont, Château-Richer est le seul autre marais occupé par l'espèce envahissante *Phalaris arundinacea* (L.).

Tel que cela a été observé dans les autres marais, le gradient de densité de végétation à l'Isle-au-Grues diminue graduellement du haut vers le bas du marais. De plus, *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) occupe le haut marais avec *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.). Comme pour les marais de Beaumont et de Château-Richer, le talus d'érosion marque une division nette entre deux zones de végétation. Le haut marais est moins diversifié, abritant 16 espèces seulement. Ce marais et celui de Beaumont comprennent une zone mixte (Zone 5), composée d'espèces caractéristiques du schorre supérieur et du schorre inférieur. Ce marais est le moins diversifié de tous, comptant 35 espèces, soit 20 de moins que le plus diversifié, le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures. Le marais de l'Isle-aux-Grues est également celui où le talus d'érosion est le plus élevé, atteignant 1 m de hauteur. De plus, l'espèce envahissante *Phragmites australis* (Cav.), bien que non recensée dans la zone d'étude, a été observée à proximité.

5.5 Comparaison granulométrique des sédiments de surface des marais

La granulométrie des dépôts de surface des marais diffère remarquablement entre les deux marais de l'est et les deux marais de l'ouest (Figure 57). En effet, dans les marais de Saint-Augustin-de-Desmaures et de Beaumont, à l'ouest, les sédiments sont généralement sableux (50-63 %) alors que la fraction silteuse atteint en moyenne 23 % et le gravier 20 % (Figure 60). La fréquence des sédiments relativement grossiers peut être expliquée par la présence dans les environs immédiats des sablières de Saint-Nicolas et de Saint-Augustin ainsi que par la présence de cordons littoraux. Toutefois, les sédiments de surface des marais de Château-Richer et de l'Isle-aux-Grues, à l'est, sont plutôt silteux (77-62 %) alors que la fraction sableuse atteint en moyenne 26 %. Cette situation pourrait être due à la présence d'un bouchon de turbidité dans le fleuve Saint-Laurent à l'endroit où se situent ces deux marais (Environnement Canada, 2012). En effet, à cet endroit, les concentrations de matières en suspension (MES) sont élevées et peuvent varier entre 10 et 70 mg/l (MDDEFP, 2007). De plus, la sédimentation de particules fines s'y ferait de façon plus importante au contact de l'eau salée.

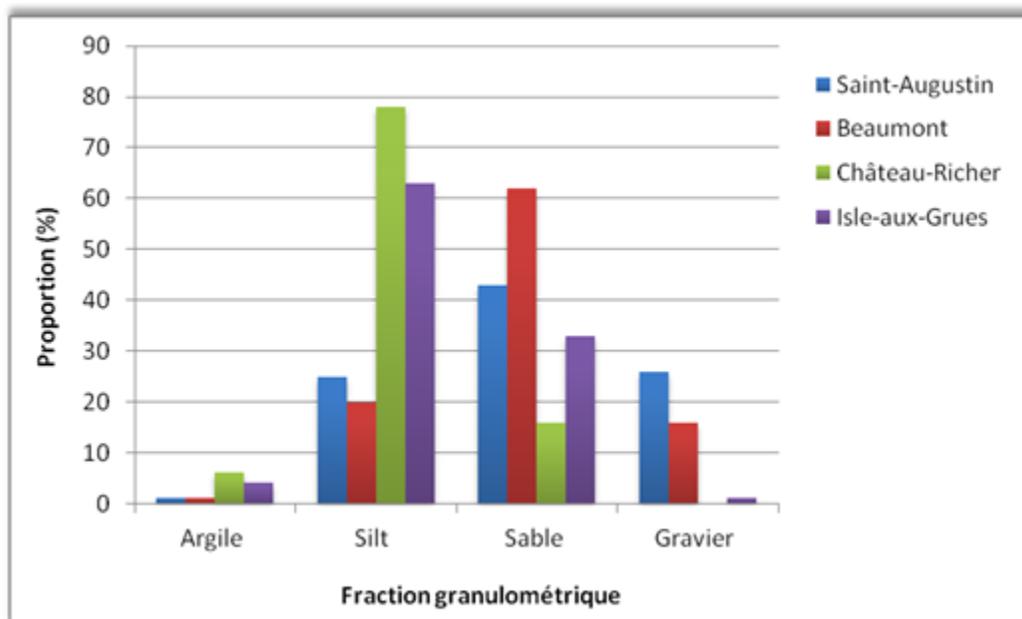


Figure 57 : Fractions granulométriques des sédiments de surface des marais à l'étude.

Les figures 58 et 59 présentent la relation entre les divers paramètres granulométriques des sédiments prélevés des différentes zones morpho-sédimentologiques de chacun des marais étudiés ainsi que la relation entre les indices de la taille moyenne et d'asymétrie. Il appert clairement que les sédiments du marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, qui est en forme de baie ouverte, sont plus hétérogènes alors que ceux des autres marais ont des caractéristiques granulométriques similaires en termes de taille et de tri.

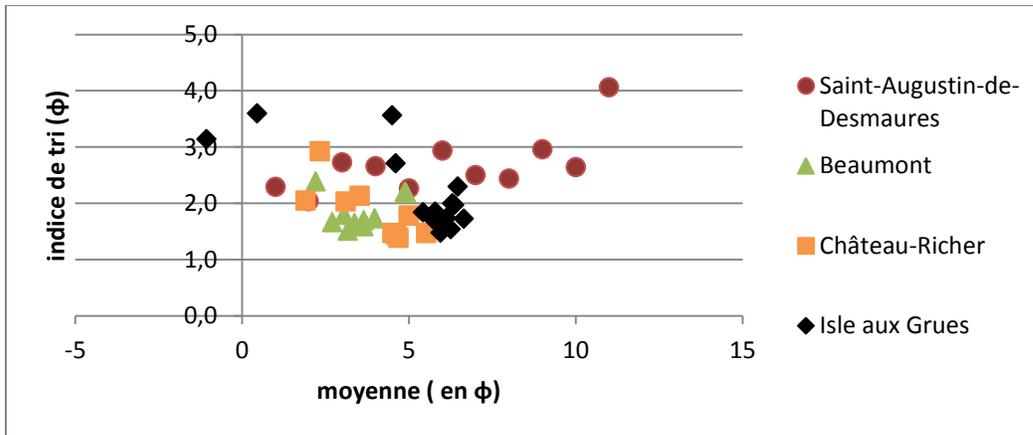


Figure 58 : Relation entre la taille moyenne et l'indice de tri des sédiments de surface des quatre marais

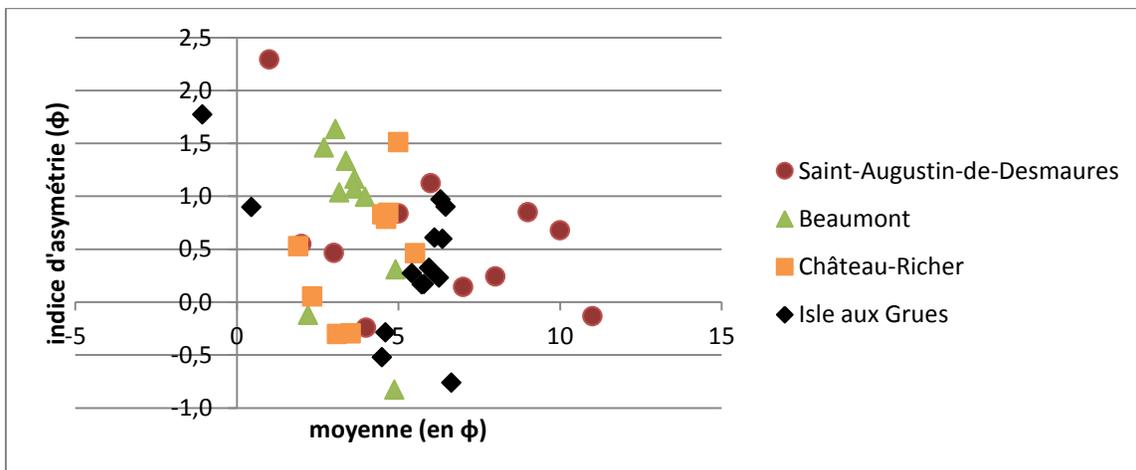


Figure 59: Relation entre la taille moyenne l'indice d'asymétrie des sédiments de surface des quatre marais

5.6 La distribution des espèces désignées menacées ou vulnérables

D'après les résultats obtenus, il s'avère que parmi les marais étudiés, seul le marais de Saint-Augustin-de-Desmaures est colonisé par les trois espèces menacées (Figure 60). De plus, *Eriocaulon parkeri* (Robinson) est si abondant (en 2011) dans ce marais, qu'il a

été impossible d'en faire un dénombrement précis, mais il y en a certainement plusieurs centaines de spécimens.

Quant à *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.), cette espèce colonise les quatre sites étudiés. Cependant, elle est nettement plus abondante au site de Beaumont qu'aux sites de Château-Richer, de Saint-Augustin-de-Desmaures et de L'Isle-aux-Grues.

Très peu de spécimens de *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.) ont été recensés dans les marais de Saint-Augustin-de-Desmaures, de Château-Richer et de l'Isle-aux-Grues, alors qu'aucun spécimen n'a été trouvé au marais de Beaumont (Figure 60).

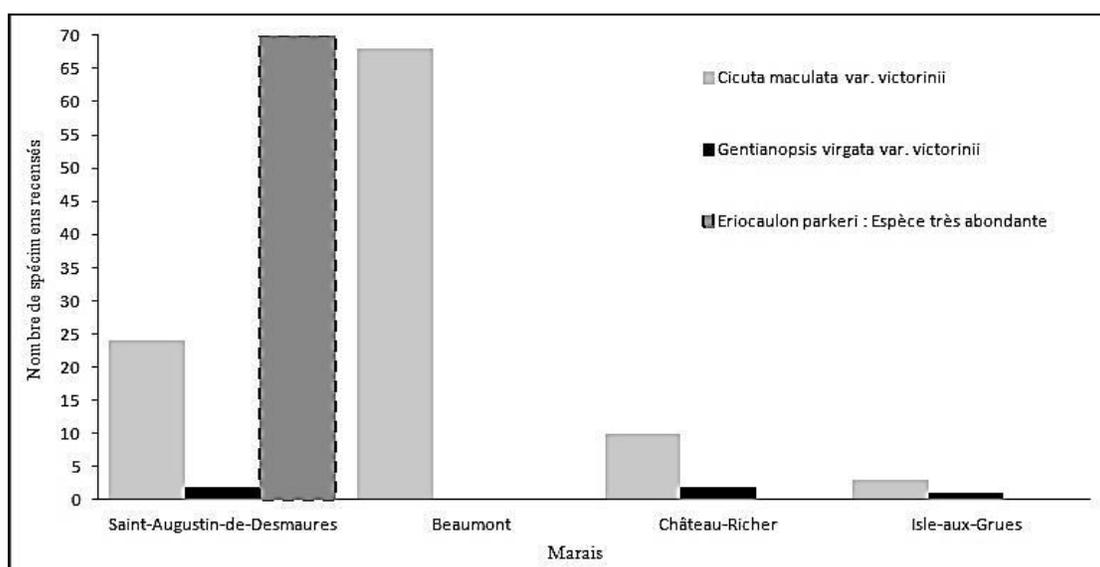


Figure 60 : Dénombrement des espèces désignées menacées ou vulnérables, par marais, 2011.

5.7 Les espèces compagnes des espèces désignées menacées ou vulnérables

5.7.1. Les espèces compagnes de *Cicuta maculata* var. *victorinii*

Au total, 17 espèces différentes accompagnent *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) (Tableau 13). C'est dans le marais de Château-Richer que l'on trouve la plus grande diversité alors qu'elle est la plus faible dans le marais de L'Isle-aux-Grues. En effet, dans ce dernier, l'on ne trouve qu'une seule espèce compagne. Certaines espèces, telles *Lythrum salicaria* (L.) et *Spartina pectinata* (Link.), sont associées à *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) dans trois des quatre sites.

Spartina pectinata (Link.) et *Lythrum salicaria* (L.) sont les deux espèces qui accompagnent le plus souvent *Cicuta maculata* var. *victorinii* (Fern.) ce qui est habituel. En effet, la première est une espèce très abondante sur les rives du fleuve Saint-Laurent (Marie-Victorin, 1995) alors que la seconde est une espèce envahissante qui colonise pratiquement tous les milieux humides québécois. Selon Brouillet *et al.* (1996), *Cicuta*

maculata var. *victorinii* (Fern.) est souvent associée à *Eupatorium perfoliatum* (L.). Ceci a été constaté dans les sites Saint-Augustin-de-Desmaures et de Château-Richer. Par ailleurs, il faut noter que ces deux espèces sont abondantes dans le haut marais des quatre sites étudiés.

Tableau 13: Espèces compagnes de *Cicuta maculata* var. *victorinii*, par marais.

Saint-Augustin-de-Desmaures	Beaumont	Château-Richer	Ile-aux-Grues
<i>Eupatorium perfoliatum</i>	<i>Caltha palustris</i>	<i>Aster longifolius</i>	<i>Spartina pectinata</i>
<i>Lycopus americanus</i>	<i>Eupatorium maculatum</i>	<i>Euthamia graminifolia</i>	
<i>Lythrum salicaria</i>	<i>Gallium palustre</i>	<i>Helenium autumnale</i>	
<i>Salix discolor</i>	<i>Juncus brevicaudatus</i>	<i>Iris versicolor</i>	
<i>Schoenoplectus pungens</i>	<i>Juncus dudleyi</i>	<i>Lythrum salicaria</i>	
<i>Spartina pectinata</i>	<i>Lythrum salicaria</i>	<i>Salix eriocephala</i>	
	<i>Schoenoplectus pungens</i>	<i>Spartina pectinata</i>	

5.7.2 Les espèces compagnes de *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii*

On trouve 13 espèces différentes qui colonisent l'environnement immédiat de *Gentianopsis virgata* ssp. *victorinii* (Fern.) (Tableau 14). Le marais de Château-Richer présente la plus forte diversité avec neuf espèces différentes alors que le marais de l'Isle-aux-Grues n'accueille qu'une seule espèce compagne. Dans les trois sites où *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* (Fern.) a été recensé, *Spartina pectinata* (Link.) constitue une espèce compagne récurrente, ce qui confirme le constat de Brouillet et *al.* (1996). Quant aux autres espèces compagnes, ce sont également toutes des espèces que l'on retrouve dans le haut marais.

Tableau 14 : Espèces compagnes de *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii*, par marais, 2011

Saint-Augustin-de-Desmaures	Château-Richer	Ile-aux-Grues
<i>Caltha palustris</i>	<i>Aster longifolius</i>	<i>Spartina pectinata</i>
<i>Cicuta maculata</i> var. <i>victorinii</i>	<i>Caltha palustris</i>	
<i>Eupatorium perfoliatum</i>	<i>Euthamia graminifolia</i>	
<i>Helenium autumnale</i>	<i>Galium palustre</i>	
<i>Mentha arvensis</i>	<i>Helenium autumnale</i>	
<i>Schoenoplectus pungens</i>	<i>Iris versicolor</i>	
<i>Spartina pectinata</i>	<i>Salix eriocephala</i>	
	<i>Spartina pectinata</i>	
	<i>Viola sp.</i>	

5.7.3 Les espèces compagnes de *Eriocaulon parkeri*

On trouve cinq espèces qui colonisent l'aire de recensement de *Eriocaulon parkeri* (Robinson) (Tableau 15). Cette aire de recensement se trouve uniquement au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures. Parmi celles-ci, deux espèces sont dominantes, soit *Juncus brevicaudatus* (Engelm.) et *Schoenoplectus pungens* (Vahl.).

Tableau 15 : Espèces compagnes d'*Eriocaulon parkeri*, 2011

<i>Espèces</i>	<i>Cote</i>
<i>Caltha palustris</i>	1
<i>Juncus brevicaudatus</i>	3
<i>Lythrum salicaria</i>	1
<i>Schoenoplectus pungens</i>	3
<i>Sium suave</i>	2

Les espèces compagnes de *Eriocaulon parkeri* (Robinson) sont des espèces typiques des milieux humides adjacents au fleuve Saint-Laurent notamment *Schoenoplectus pungens* (Vahl.) et *Juncus brevicaudatus* (Engelm.) qui colonisent abondamment les marais (Marie-Victorin, 1995).

5.8 Profils topographiques

5.8.1 Marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Dix profils topographiques ont été réalisés sur le marais Saint-Augustin-de-Desmaures (Figure 61), de 1 à 10, d'ouest en est. L'emplacement des profils correspond à celui des transects effectués pour le suivi de l'érosion du talus (l'emplacement approximatif du talus est indiqué par une flèche). D'une longueur d'au plus 280 m, les profils montrent une pente relativement faible variant entre 2,1 et 1,3 % d'est en ouest. Le schorre supérieur est situé à une altitude de 4,5 m alors que la slikke est à environ 1,5 m d'altitude. Les profils sont d'allure similaire à l'exception de la portion ouest du marais (transect #1 et 2) où la présence de blocs glaciels sur une distance de 80 m accentue le profil.

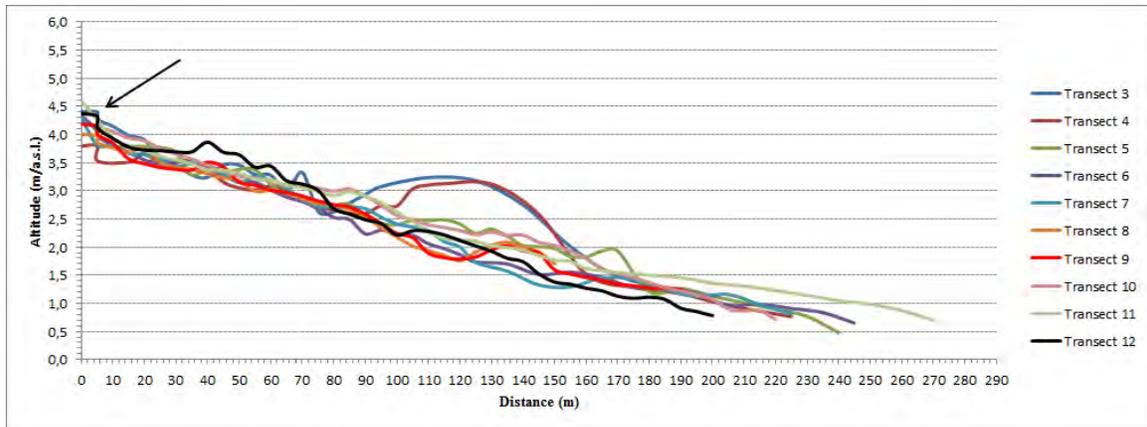


Figure 61: Profils topographiques du marais, réalisés en automne 2012, marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

Les variations altitudinales mesurées sur le marais de St-Augustin-de-Desmaures ont été superposées à la photographie aérienne du secteur (Figure 62). On note les faibles variations sur le profil notamment causées par la présence de blocs glaciels sur la slikke.

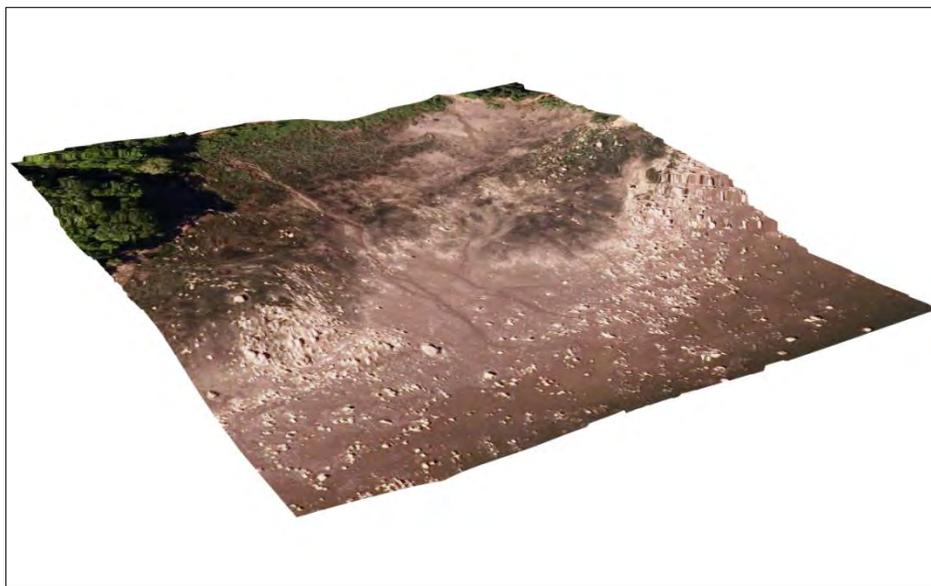


Figure 62: Topographie du marais de Saint-Augustin-de-Desmaures

5.8.2 Marais de Beaumont

Dix profils topographiques d'une longueur d'au plus 185 m ont également été faits au marais de Beaumont. Les profils sont aussi localisés sur les transects effectués pour le suivi de l'érosion du talus et sont numérotés de 1 à 10 (d'est en ouest). On remarque que la pente est plus accentuée (6,5%) sur les premiers 50 m dans la portion est, ce qui correspond au schorre. La pente sur la slikke est de près de 0,5% sur près de 120 m. Le schorre supérieur est situé à une altitude de 4,8 m alors que la slikke est à environ à une

altitude inférieure à 1,0 m. Les profils sont d'allure similaire à l'exception de la portion ouest du marais (transect #8) due à la présence d'un escarpement rocheux (Figure 63).

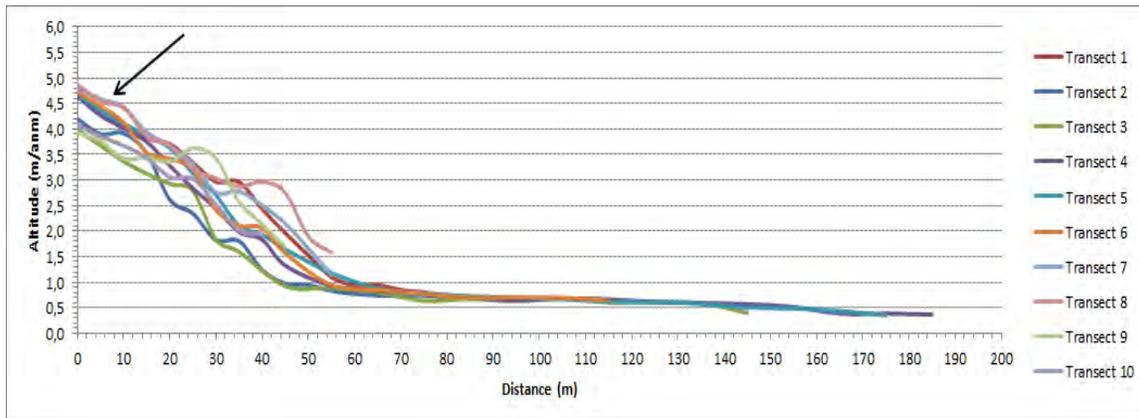


Figure 63 : Profils topographiques réalisés en 2013, marais de Beaumont

Les variations altitudinales mesurées sur le marais de Beaumont ont été superposées à la photographie aérienne du secteur (Figure 64). On note la présence d'un escarpement rocheux et de la slikke qui occupe une portion importante sur le profil.

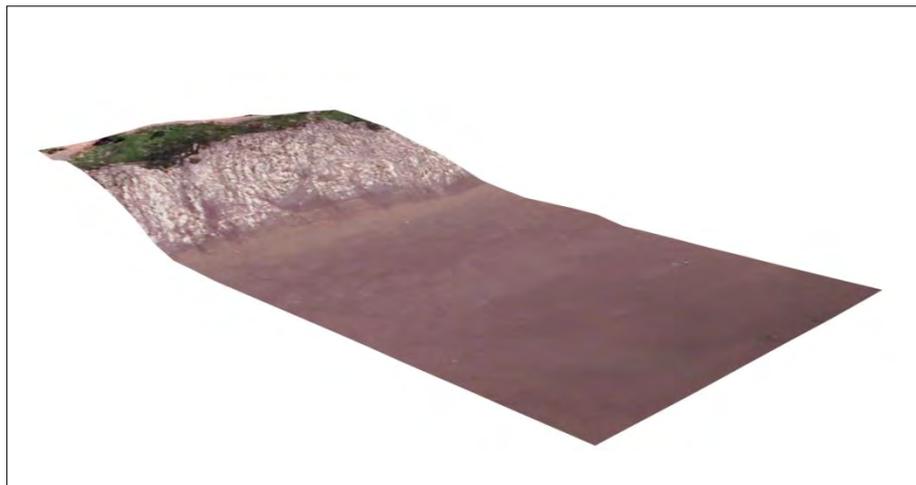


Figure 64: Topographie du marais de Beaumont

5.8.3 Marais de Château-Richer

Huit profils topographiques d'une longueur d'au plus 150 m ont également été faits au marais de Château-Richer. Les profils localisés sur les transects effectués pour le suivi de l'érosion du talus sont numérotés de 1 à 8 (d'est en ouest). On remarque très peu de variations altitudinales sur le marais, la pente varie de 3,0 à 3,3% (Figure 65).

Le schorre supérieur est situé à une altitude de 5,2 m et la slikke s'étend jusqu'à environ 0,5 m d'altitude. Le talus est bien visible à une distance variant de 10 à 15 m sur l'ensemble de profils.

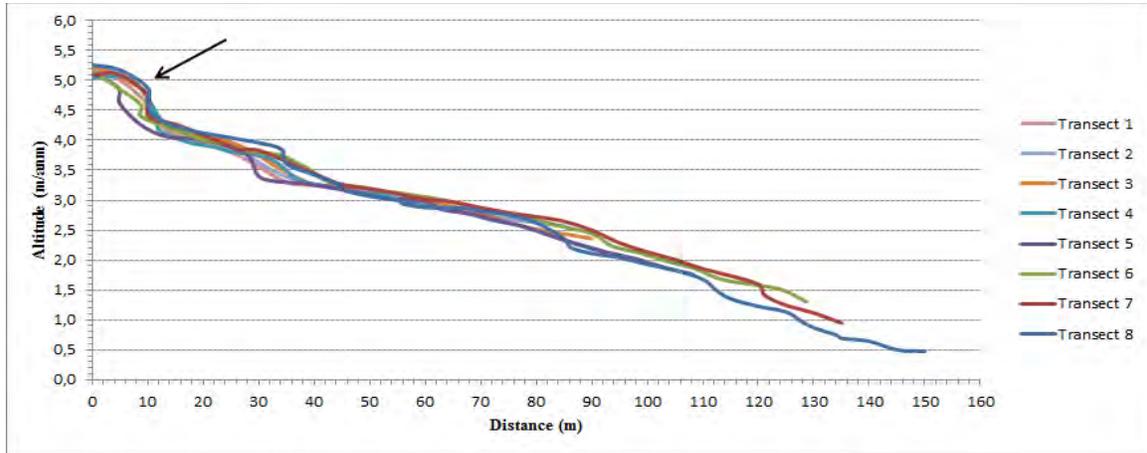


Figure 65 : Profils topographiques réalisés en 2013, marais de Château-Richer

Les variations altitudinales mesurées sur le marais de Château-Richer ont été superposées à la photographie aérienne du secteur (Figure 66). On note que la slikke occupe une portion importante sur le profil.

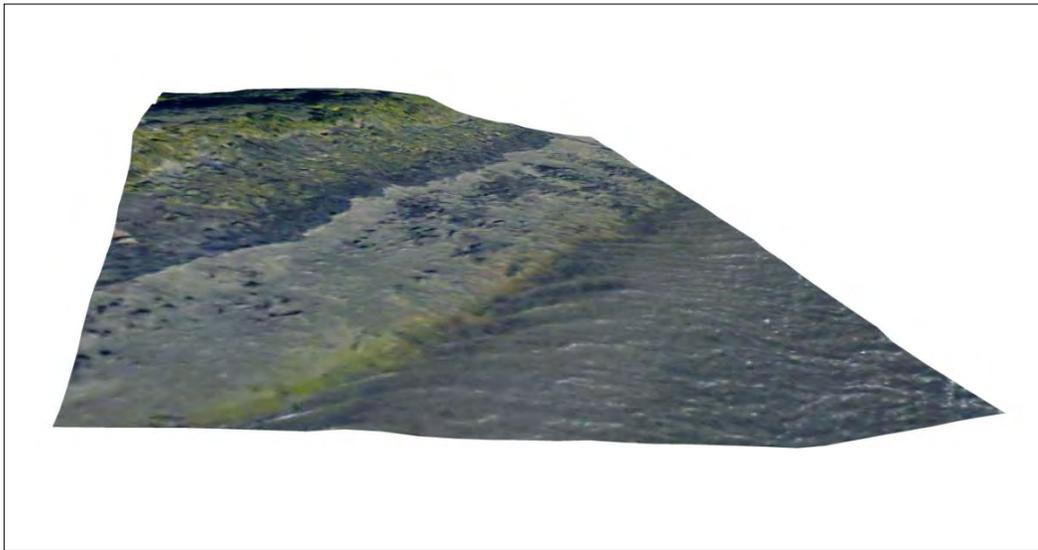


Figure 66: Topographie du marais de de Château-Richer

5.8.4 Marais de l'Isle-aux-Grues

Les profils topographiques d'une longueur dépassant 200 m réalisés en 2013 au marais de l'Isle-aux-Grues sont présentés à la figure suivante (Figure 67). Les profils localisés sur les transects effectués pour le suivi de l'érosion du talus sont numérotés de 1 à 10, d'ouest en est. Le schorre supérieur est à une altitude de 6,2m; le talus, omniprésent, est

surtout visible dans la portion est (transects # 8 et # 10) du marais. La pente des trois profils varie peu et est plus accentuée dans la portion est (3,7%) que dans la portion ouest (2,5%) du marais. Le profil est également caractérisé par des affleurements rocheux présents sur toute la surface du marais entre 60 et 120 m.

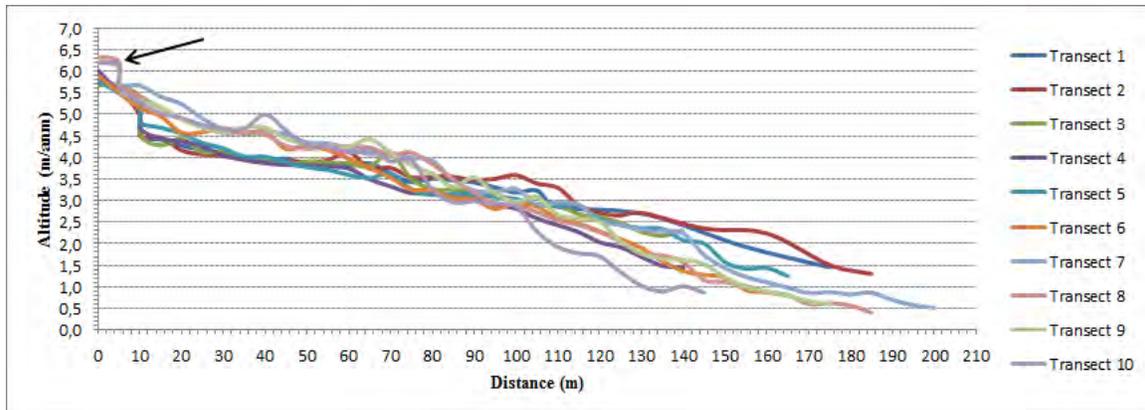


Figure 67 : Profils topographiques réalisés en 2013, marais de l'Isle-aux-Grues

Les variations altitudinales mesurées sur le marais de l'Isle-aux-Grues ont été superposées à la photographie aérienne du secteur (Figure 68). On note que la slikke, caractérisée par des affleurements rocheux, occupe une portion importante sur le profil.

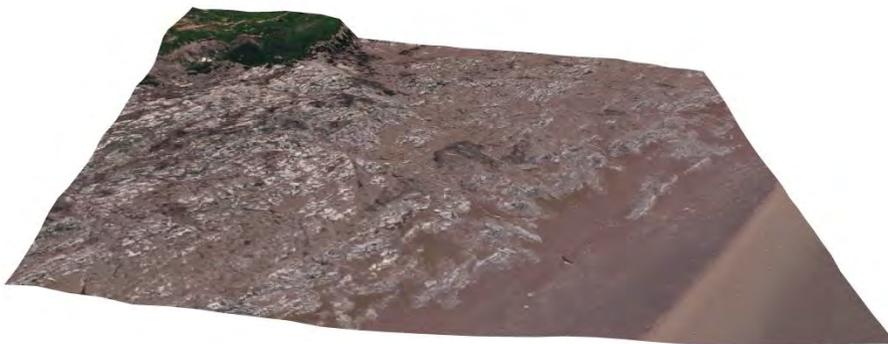


Figure 68: Topographie du marais de de l'Isle-aux-Grues

En résumé, l'altitude du schorre supérieur au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures est inférieure et de plus faible pente que les autres marais. Le profil topographique général y est plus irrégulier due à la présence de blocs glaciels. Le marais de Beaumont présente la plus forte inclinaison due à la présence des affleurements rocheux. La topographie du marais de Château-Richer est particulièrement homogène. La pente de ce marais et de celui de l'Isle-aux-Grues est intermédiaire aux deux autres marais.

5.9 Analyse des variations de niveaux d'eau

Les variations de niveaux d'eau enregistrées à chacun des sites d'étude en 2011 et en 2012 ont été analysées :

- À l'aide d'une moyenne mobile (voir Annexe A);
- En comparant les niveaux mesurés à Château-Richer à ceux d'un port de référence (St-François I.O.) (voir Figure 15 - Annexe A);
- En superposant aux profils topographiques, les niveaux mesurés (max., moy., min.) lors de la dépression tropicale Irène (voir Figures xx à xx);
- En calculant les fréquences de submersion du milieu et du bord du talus d'érosion de chaque marais (voir Tableau 16).

Les variations de niveaux enregistrées à chacun des sites d'études en 2011 et en 2012 sont présentées après correction au zéro marégraphique (Annexe A). Chaque courbe de marée a été analysée de façon à faire ressortir les niveaux maximum, moyens et minimum. Les niveaux maximum ont ensuite été comparés aux mesures d'érosion correspondantes (Tableau 16). L'analyse des données montrent que les plus hauts niveaux d'eau (hauteur max) recensés concordent à des mesures d'érosion élevées relativement à ce qui a été mesurée en 2011. En 2012, les valeurs d'érosion plus élevées sont mesurées en mai (premières mesures faites après le départ des glaces). On note également qu'à ces hauts niveaux d'eau (Hmax) correspondent des événements météorologiques particuliers dont le passage de la tempère Irène le 29 août 2011.

Tableau 16 : Statistiques sur les variations des niveaux d'eau et l'érosion à chacun des sites d'étude, en 2011 et 2012

Bas marais (2011)	Hauteur min. (m)	Hauteur moy. (m)	Hauteur max (m)	Date Hauteur max. jj-mm	Érosion max du talus (cm)
Beaumont	0,10	2,50	5,62	29-août	33
Château-Richer	0,16	2,52	5,84	29-août	36
Ile-aux-Grues	0,14	1,69	6,70	29-août	40
Saint-Augustin-de-Desmaures	0,29	2,65	5,56	29-août	58
Bas marais (2012)	Hauteur min. (m)	Hauteur moy. (m)	Hauteur max (m)	Date Hauteur max. jj-mm	Érosion max du talus (cm)
Beaumont	0,47	2,63	5,67	15-nov	18
Château-Richer	0,10	2,30	5,44	05-juil	49
Ile-aux-Grues	ND	ND	ND	ND	ND
Saint-Augustin-de-Desmaures	0,52	2,96	5,39	05-juil	15
Haut marais (2011)	Hauteur min. (m)	Hauteur moy. (m)	Hauteur max (m)	Date Hauteur max. jj-mm	Érosion max du talus (cm)
Beaumont	0	0,93	4,28	14-août	ND
Château-Richer	0,13	0,51	2,77	29-août	36
Ile-aux-Grues	-0,04	0,49	2,49	29-août	40
Saint-Augustin-de-Desmaures	0,08	0,65	2,54	29-août	58
Haut marais (2012)	Hauteur min. (m)	Hauteur moy. (m)	Hauteur max (m)	Date Hauteur max. jj-mm	Érosion max du talus (cm)
Beaumont	ND	ND	ND	ND	ND
Château-Richer	0,01	0,49	2,52	05-juil	46
Ile-aux-Grues	0,05	0,41	1,78	16-oct	49
Saint-Augustin-de-Desmaures	0,17	0,6	2,15	15 nov.	12

NB : la différence d'amplitude du signal entre le haut et le bas marais est due au dénivelé sur chacun des sites.
 ND : indique une donnée non disponible

Les hauts niveaux d'eau (max., moy et min.) mesurés lors du passage de la dépression tropicale Irène ont été reportés sur les profils topographiques réalisés à chacun des sites d'études (Figures 69-72). Pour tous les sites d'études, on note que la hauteur maximale du niveau d'eau a dépassé de près de 1 m, la hauteur du talus.

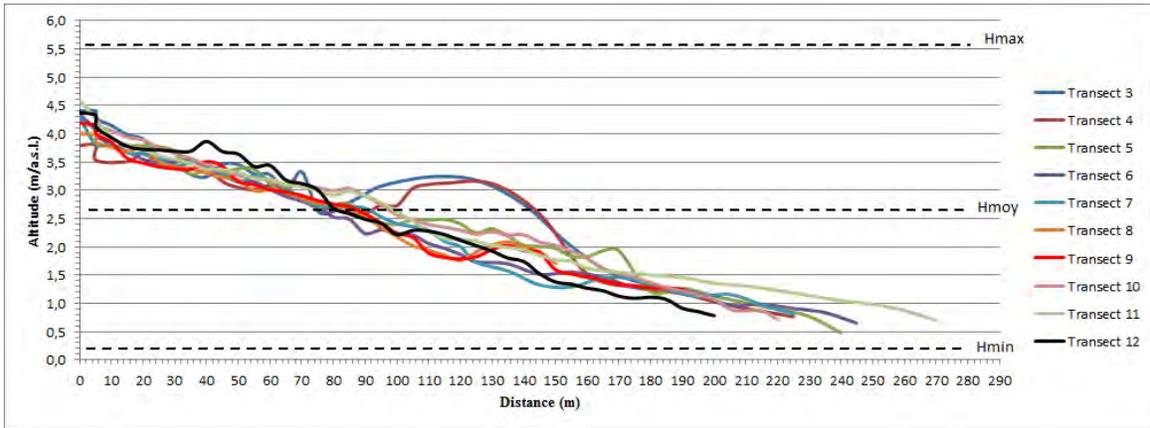


Figure 69 : Niveaux d'eau enregistrés au marais de Saint-Augustin-de-Desmaures le 29 août 2011 lors de la dépression tropicale Irène

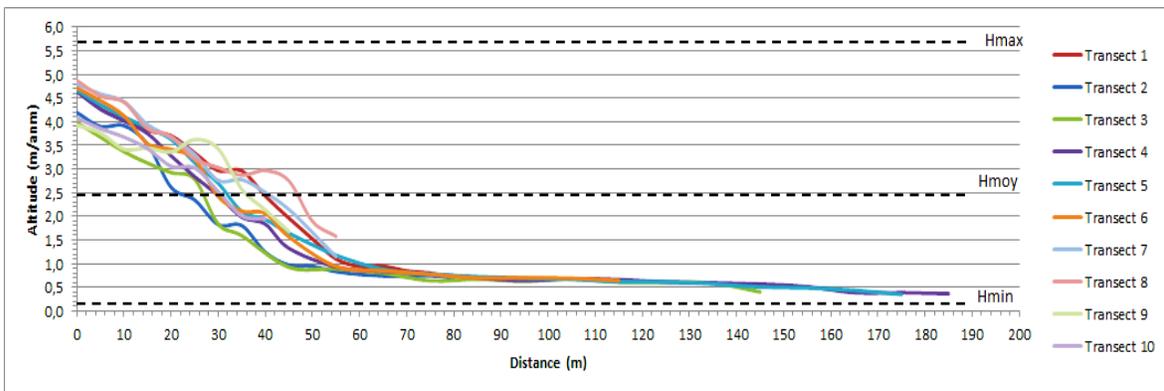


Figure 70 : Niveaux d'eau enregistrés au marais de Beaumont le 29 août 2011 lors de la dépression tropicale Irène

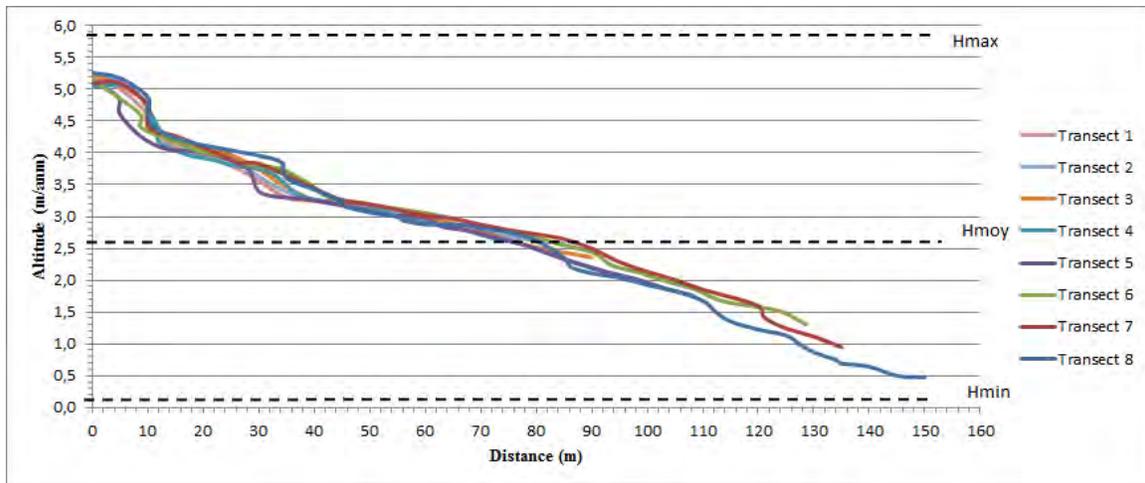


Figure 71 : Niveaux d'eau enregistrés au marais de Château-Richer le 29 août 2011 lors de la dépression tropicale Irène

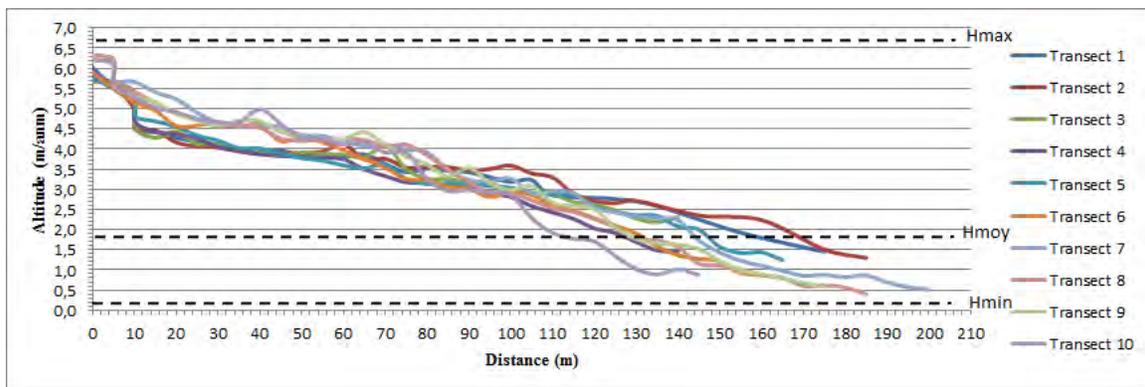


Figure 72 : Niveaux d'eau enregistrés au marais de de l'Isle-aux-Grues le 29 août 2011 lors de la dépression tropicale Irène

Les images présentées ci-dessous ont prises lors du passage de la tempête Irène. Cet évènement s'est traduit donc par de hauts niveaux d'eau et par la présence de vagues notamment à Beaumont et à l'Isle-aux-Grues (Figure 73). De fortes précipitations ont aussi été enregistrées lors du passage de cet événement (voir section 5.10). Il est intéressant de noter qu'au début de la tempête, le niveau d'eau était plus bas ce qui occasionnait le déferlement des vagues directement sur le talus (Beaumont et Isle-aux-Grues) pendant une bonne partie de la tempête. La première image en haut à gauche montre effectivement qu'à l'Isle-aux-Grues le niveau d'eau ne recouvre pas le haut marais et les vagues d'une hauteur estimée à plus de 1 m frappent le talus directement. Après le passage de la tempête les images montrent les hauts niveaux d'eau atteints sur chaque site, l'absence de vagues et la présence de débris (Figure 74).



Figure 73 : Images de la tempête Irène captées par les caméras fixes à chacun des sites, le 28 et 29 août 2011 (en haut à gauche Isle-aux-Grues –la flèche indique l'emplacement du talus), à droite Château-Richer; en bas : à gauche : Saint-Augustin-de-Desmaures et à droite Beaumont).



Figure 74 : Hauts niveaux d'eau captés après le passage de la tempête Images de la tempête Irène, en août 2011 (en haut à gauche Isle-aux-Grues et à droite Château-Richer; en bas : à gauche : Saint-Augustin-de-Desmaures et à droite Beaumont). On note la présence de débris et l'absence de vagues.

Les enregistrements marégraphiques effectués en 2011 et e 2012 à chaque site d'étude ont été utilisés pour calculer la fréquence de submersion du talus d'érosion à mi-hauteur. Comme on a pu le voir précédemment pour l'Isle-aux-Grues notamment, le niveau d'eau peut exercer une influence directe (recul) sur le talus lorsque les vagues y déferlent.

Cette donnée est importante compte tenu de l'emplacement de certaines espèces végétales qui peuvent ou non être tolérantes à certaines fréquences de submersion. Par exemple, la gentiane de Victorin, une espèce menacée, s'établit préférentiellement en bordure du talus.

Ainsi, la fréquence de submersion peut exercer un effet sur le recul du talus. Il nous apparaît d'autant plus important de documenter ce paramètre dans un contexte de changement climatique et de rehaussement du niveau marin relatif. Ce dernier processus entraînerait une augmentation de la fréquence de submersion du talus ce qui, en retour,

conduirait une diminution de l'attaque directe des vagues sur le talus. Les fréquences de submersion aux différents sites sont présentées au tableau 17. La fréquence moyenne de submersion du talus (à mi-hauteur sur le talus) en 2011 était de 25,5% alors qu'en 2012, elle était de 22,3%. Le marais de Saint-Augustin présente la plus importante fréquence de submersion en 2011 et 2012. Les données de fréquence de submersion ont été utilisées afin de vérifier la corrélation entre ce paramètre et les données d'érosion les résultats sont présentés plus loin (voir section 6).

Tableau 17 : Fréquences de submersion à mi-hauteur sur le talus d'érosion, à chacun des sites d'études, en 2011 et 2012

Marais	Mois - Année 2011					Mois - Année 2012					
	août	septembre	octobre	novembre	décembre	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre
Château-Richer	24,9	23,8	26,6	23,4	19	22,4	22,1	22,3	21,3	22,1	22,1
Saint-Augustin	30,2	28,9	31,83	28,70	26,60	37,8	21,1	21,4	20,20	23,90	30,5
Beaumont	26,6	28,1	25,5	22,5	23,8	26,5	23,4	22,2	24,1	24,1	24,4
Ile-aux-Grues	25,3	23,7	26,1	20,8	23,9	17,5	15,9	18,4	17,6	16,3	17,5

5.10 Analyse des conditions météorologiques en 2011 et en 2012

Les conditions météorologiques prévalant pendant la période d'études ont été analysées à partir des données fournies par le service Info-climat du MDDEFP (2012), et ce, pour les quatre sites d'étude. Les données des stations de Saint-Augustin-de-Desmaures, de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, de Château-Richer et de Montmagny ont été utilisées pour les sites de Saint-Augustin-de-Desmaures, Beaumont, de Château-Richer et de l'Isle-aux-Grues respectivement. L'emplacement des stations est donc à prendre en considération dans cette analyse, et en particulier pour le site de l'Isle-aux-Grues, compte tenu que les données de la station météorologique de Montmagny ont été utilisées et qu'il est probable que les températures n'y soient pas toujours représentatives de celles de l'île qui subit un effet marin important. Toutefois, la station de météorologique de Montmagny est celle qui est la plus proche du fleuve.

Les analyses faites portent principalement sur les précipitations quotidiennes totales, les vents violents, les précipitations neigeuses et l'intensité des précipitations (pluie) pendant différentes périodes de temps. Ultérieurement ces données sont analysées en relation avec l'érosion mesurée aux quatre sites d'étude. Les données de vitesse et direction des vents de chacune des stations météorologiques sont analysées seulement dans la section portant sur les analyses statistiques. Ces données ne sont pas disponibles pour Château-Richer.

5.10.1 Pluies quotidiennes totales

Les analyses montrent qu'à tous les sites d'études, les pluies quotidiennes sont généralement inférieures à 50 mm en 2011 et en 2012 (Figures 75-78). En 2011, un seul événement se dissocie nettement de l'ensemble des valeurs; cet événement correspond à la dépression tropicale Irène où des participations de 75 mm à 81 mm de pluie ont été mesurées à trois des quatre sites d'étude. La seule exception est observée à Château-Richer où les précipitations mesurées le même jour étaient de 55 mm⁴ (Figure xx). Ces résultats suggèrent que des différences importantes sur le plan des précipitations peuvent être observées localement.

5.10.2 Vents violents

Les conditions de vent violent (> 62 Km/h) prévalant pendant la période d'études ont été analysées à partir des données fournies par le service Info-climat du MDDEFP (2012), et ce, pour les quatre sites d'étude (Figures 75-78). Les mêmes stations de mesures que précédemment ont été utilisées. Ces données sont ultérieurement analysées en relation avec l'érosion mesurée aux quatre sites d'étude. L'analyse montre que plusieurs événements de vents > 62 km/h se produisent à la majorité des sites à l'exception du site de Saint-Augustin-de-Desmaures où on n'observe pas ces vents pendant les deux années d'études. Aucun épisode de vent > 62km/h n'a été mesuré à ce site, possiblement dû à l'exposition de la côte (face au sud) qui protège le marais des vents de tempête. À Beaumont, Château-Richer et l'Isle-aux-Grues ce sont 5, 6 et 7 épisodes de vents violents qui ont été recensés respectivement. Il est intéressant de noter que la tempête Irène compte parmi ces événements. Cela signifie que bien que d'autres tempêtes tropicales n'aient pas été recensées, des épisodes de forts vents peuvent avoir lieu tout de même.

⁴ Les intensités des précipitations ne sont pas disponibles pour cette station.

5.10.3 Précipitations neigeuses

Les précipitations neigeuses quotidiennes demeurent mesurées à chacun des sites d'étude sont présentées aux figures 75-78. Les précipitations de neige au quotidien sont à tous les sites < 25 cm en 2011 et < 15 cm en 2012. Les précipitations quotidiennes de neige les plus élevées ont été mesurées à Montmagny.

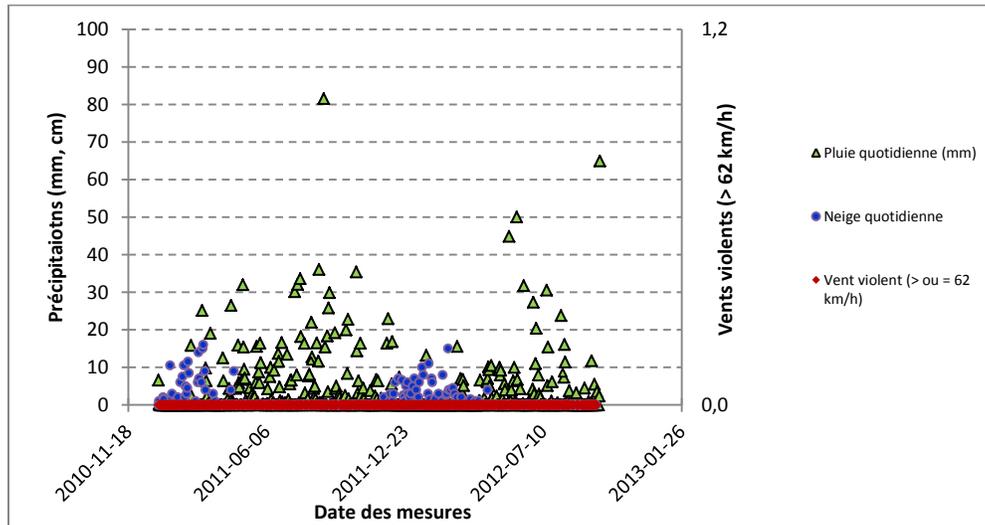


Figure 75 : Précipitations (pluie – neige) et vents violents mesurés à la station météorologique de St-Augustin-de-Desmaures en 2011 et 2012

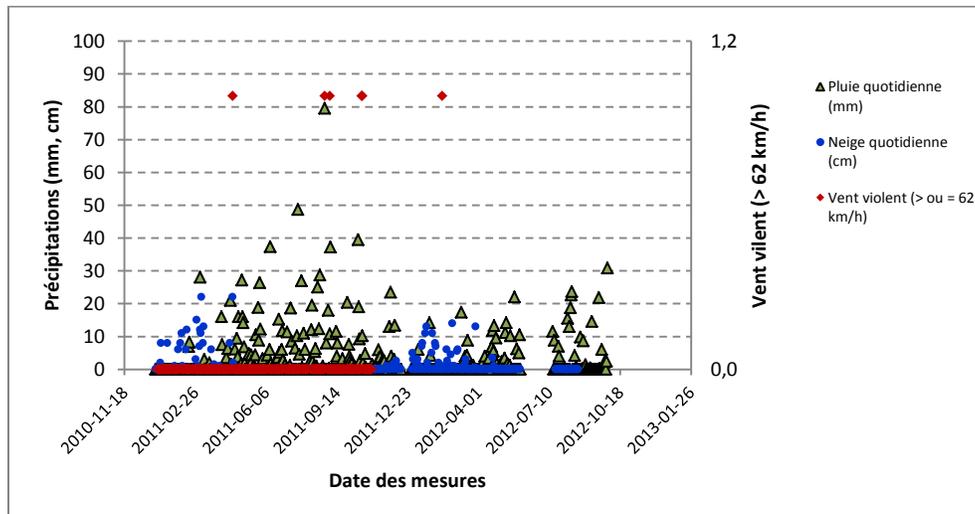


Figure 76 : Précipitations (pluie – neige) et vents violents mesurés à la station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans en 2011 et 2012 (Beaumont)

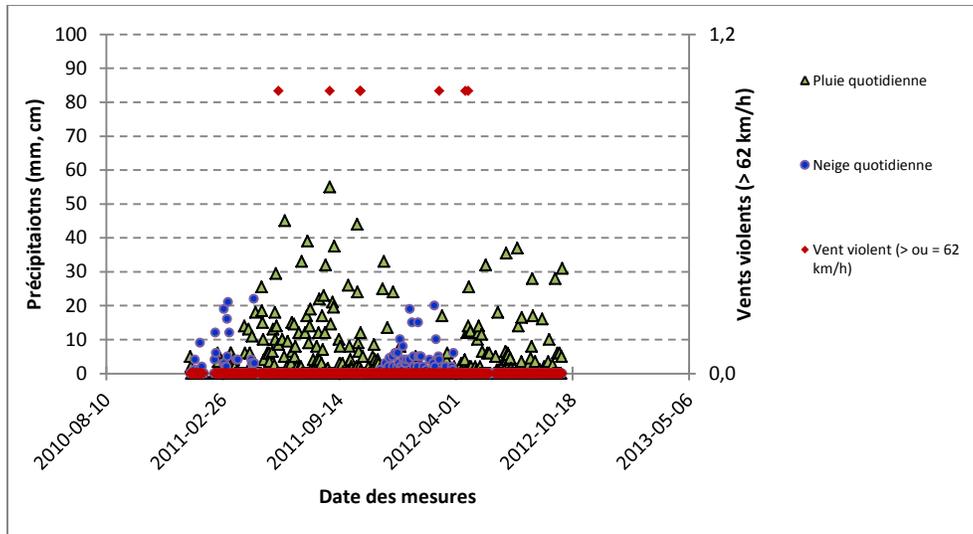


Figure 77 : Précipitations (pluie – neige) et vents violents mesurés à la station météorologique de Château Richer en 2011 et 2012 (Château Richer)

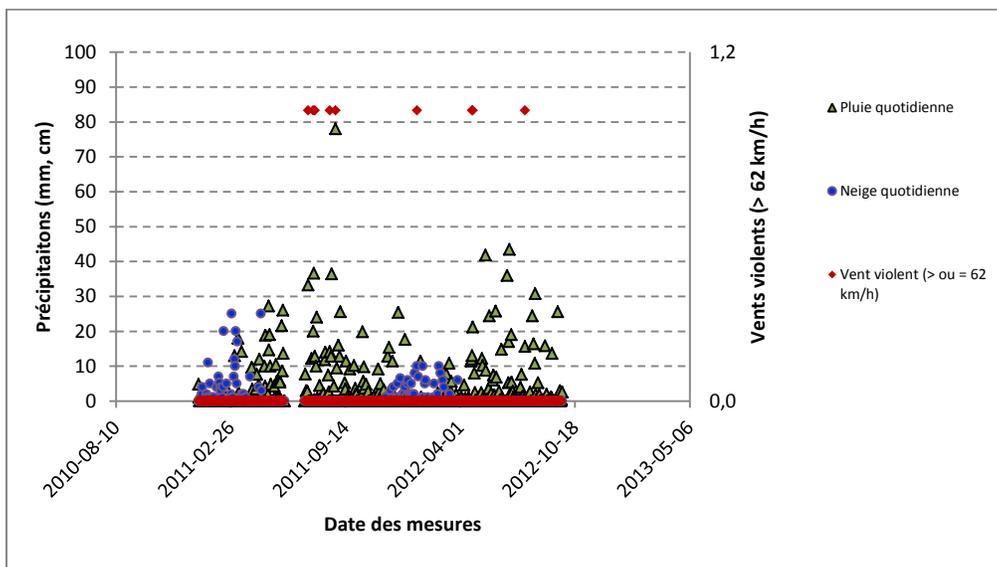


Figure 78 : Précipitations (pluie – neige) et vents violents mesurés à la station météorologique de Montmagny en 2011 et 2012 (Isle-aux-Grues)

5.10.4 Intensité des précipitations

Les données d'intensité de précipitations sont disponibles pour les stations météorologiques de St-Augustin, de Montmagny et de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans. Ces données ne sont pas disponibles pour la station de Château-Richer. Les résultats graphiques sont présentés aux figures suivantes (Figures 79-81). De manière générale on

note que les intensités de précipitations sur une période de 15 et 30 minutes sont relativement similaires à tous les sites et < à 20 mm en 2011 et en 2012. On note aussi que les précipitations sur une durée de 12 heures montre des intensités des valeurs de plus de 70 mm, notamment à la station de de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans, lors du passage de la tempête Irène le 28 août 2011. En 2012, quelques événements de précipitations intenses sur 12 heures sont observés, notamment le 30 septembre où des précipitations de 52 mm sont tombées en 12 heures à St-Augustin-de-Desmaures notamment. Cette station, de même que celle Montmagny sont d'ailleurs caractérisées par des épisodes récurrents de précipitations de près de 20 mm en 15 et 30 minutes.

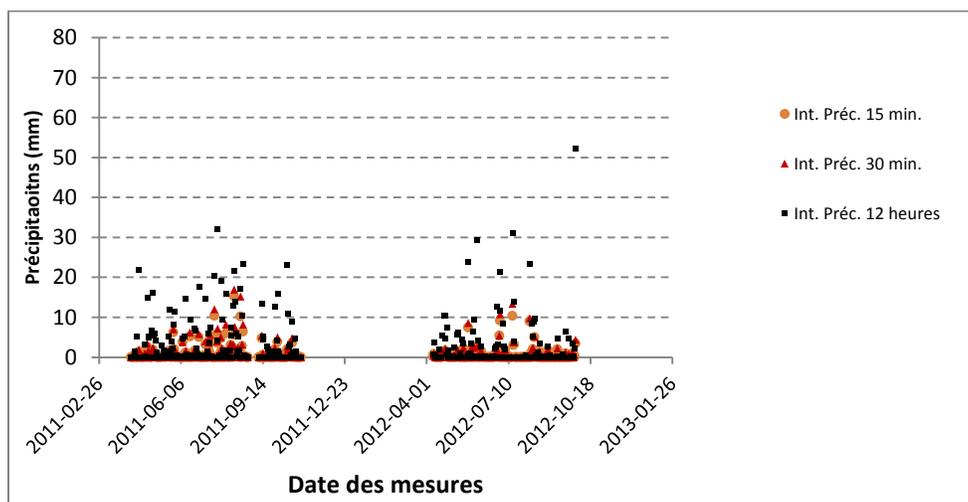


Figure 79 : Précipitations et intensités des précipitations mesurées à la station météorologique de St-Augustin-de-Desmaures en 2011 et 2012

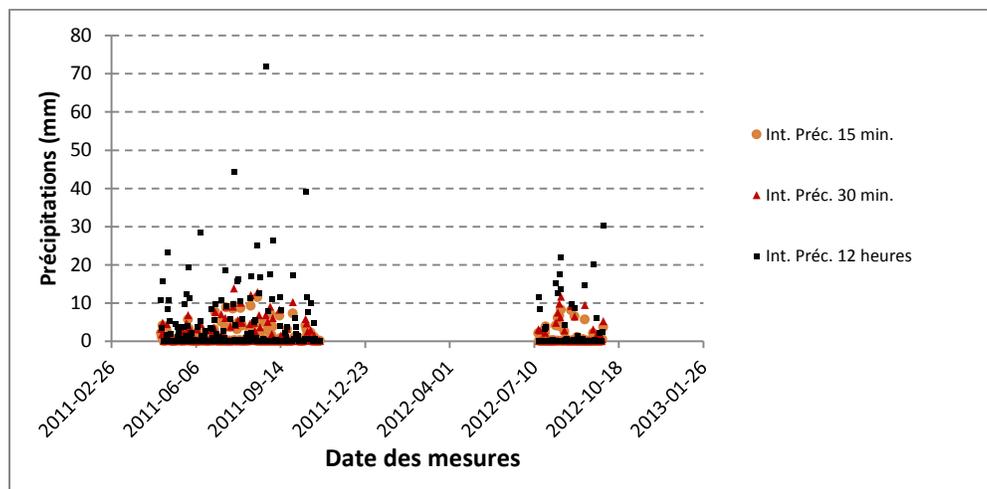


Figure 80 : Précipitations et intensités des précipitations mesurées à la station météorologique de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans en 2011 et 2012 (Beaumont)

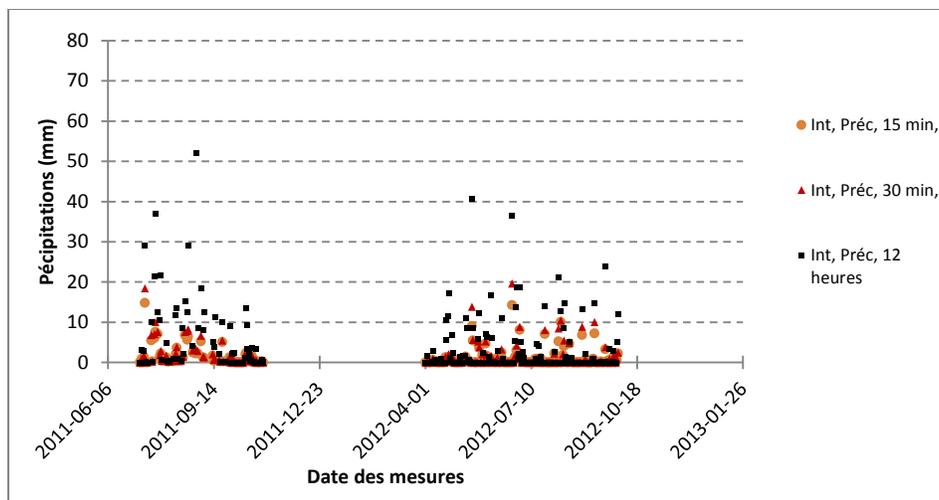


Figure 81 : Précipitations et intensités des précipitations mesurées à la station météorologique de Montmagny en 2011 et 2012 (Isle-aux-Grues)

5.10.5 Synthèse des données météorologiques analysées

Une synthèse des données météorologiques observées aux quatre sites pendant la période d'étude, est présentée au tableau ci-dessous (Tableau 18). À titre d'exemple, trois de ces événements font l'objet de fiches synthèse présentée plus loin (Fiches 1 et 2). On remarque que 14 épisodes de vents violents et 9 épisodes de pluie ≥ 40 mm sont survenus pendant la période d'étude. On remarque également que les épisodes de vents violents ne sont pas systématiquement accompagnés de fortes précipitations et qu'ils se produisent majoritairement en dehors de la période hivernale où le couvert de glace est présent. La fréquence des vents violents au cours de ces deux années est estimée à 1,9% et des fortes précipitations à 1,2% ce qui est très faible.

Tableau 18 : Épisodes de vents violents et de fortes précipitations⁵ observés à chacun des sites d'étude, 2011 et 2012

Date	Marais			
	Saint-Augustin de-Desmaures	Château-Richer	Beaumont	Isle-aux-Grues
20 avril 2011			V	
22 mai 2011	P			
01 juin 2011		V		
02 juin 2011	P			
12 juin 2011		P		
11 juillet 2011				V
20 juillet 2011				V
21 juillet 2011			P	
18 août 2011				V
28 août 2011	P	VP	VP	VP
04 septembre 2011			V	
30 septembre 2011	P			
14 octobre 2011		P		
19 octobre 2011		V	V	
17 janvier 2012				V
10 février 2012			V	
03 mars 2012		V		
17 avril 2012		V		
22 avril 2012		V		V
15 mai 2011				P
26 juin 2012				P
23 juillet 2012				V

⁵ Précipitations pluvieuses ≥ 40 mm.



Fiche synthèse 1 : Événement du 28-29 août 2011 dépression tropicale Irène (en vives-eaux)

De gauche à droite : En haut: marais de l'Isle-aux-Grues et marais de Château-Richer. En bas : marais de Saint-Augustin-de-Desmaures et de Beaumont. À Beaumont et à Isle-aux-Grues, les vagues déferlantes ont été observées pendant plus de 24 heures. À Château-Richer, les vagues déferlaient au large. À Saint-Augustin, les conditions sont demeurées calmes. Aux quatre sites les niveaux d'eau ont demeurés hauts pendant plus de 24 heures.

Paramètres	Isle-aux-Grues	Château-Richer	Saint-Augustin-de-Desmaures	Beaumont
Précipitations totales (mm)	78	55	81,6	79,5
Provenance des vents (degrés)	NE	NE	NE	NE
Température (° C)	13	14	13	15
Vagues (H _{estimée} - m)	1,5 m	0,4-0,5	0	1
Niveaux d'eau max. (m)	4,55	5,7	5,6	5,4
Recul / avancée max. talus (cm)	-40	-36	-58	-33



Fiche synthèse 2 : Événement du 19 octobre 2011 vents violents (> 62 km/h) (en mortes-eaux)

De gauche à droite en haut: marais de Beaumont et marais de Château-Richer. À Château-Richer, les vagues se sont formées au large en période de morte-eau et n'ont pas atteint le haut marais. À Beaumont, les vents ont poussé la masse d'eau sur la côte et occasionné la formation de vagues déferlantes. À noter la différence de température entre les deux sites, le même jour et le recul du talus à Château-Richer alors qu'à Beaumont cela se traduit par une accumulation de sédiments devant les piquets.

Paramètres	Château-Richer	Beaumont
Précipitations totales (mm)	55	79,5
Provenance des vents (degrés)	ENE	ENE
Température (° C)	19	8
Vagues ($H_{\text{estimée}}$ - m)	1	nul
Niveaux d'eau max. (m)	4,6	ND
Recul / avancée max. du talus (cm)	-38	+91

5.11 Analyse de la période d'englacement et de départ des glaces aux quatre marais

La présence de glace aux quatre sites d'étude a été documentée à l'aide des photographies automatisées de 2011 et 2012. Les informations qui ont pu être retirées des photographies portent sur la période d'englacement et de départ des glaces de la côte sont :

- date de formation de la glace et date d'englacement définitive;
- date de départ des glaces;
- nombre de jours total de glace;
- température de l'air au moment de la formation des glaces ;
- précipitations ;
- caractéristiques générales du couvert de glace pendant l'hiver aux quatre sites.

Les analyses portant sur ces informations sont présentées ci-après.

Englacement et déglacement des marais à l'étude

L'analyse des images automatisées a permis de voir qu'à tous les sites d'étude, les premières glaces qui se forment sur la côte n'y demeurent pas de façon définitive et que quelques épisodes de gel – dégel se produisent avant la formation définitive de la glace de rives (Tableau 19). La date d'englacement définitive aux quatre sites d'étude a été définie comme la date où la glace qui se forme sur la côte y demeure définitivement pendant tout l'hiver. Quant à la date de départ des glaces, elle a été déterminée par la disparition complète des imposants blocs de glace visibles sur l'estran.

Pour la première année d'étude, il a été observé que les premières glaces apparaissent sur la côte en fin novembre-début décembre 2011, et ce, à tous les sites (Tableau 19). De deux à quatre épisodes de redoux successifs sont observés avant l'englacement définitif à la mi-décembre. En 2012, l'apparition de la glace et l'englacement définitif se font pratiquement simultanément (seulement 1-2 épisodes de redoux observés) à trois des quatre sites dont Beaumont, Saint-Augustin-de-Desmaures et l'Isle-aux-Grues⁶⁶. Pendant l'hiver, le couvert de glace demeure stable sans ruptures apparentes, comme cela se produit notamment dans le golfe du Saint-Laurent en hiver (Ouranos, 2010).

Par ailleurs, l'analyse des images a montré que l'apparition des premières glaces de rives se fait systématiquement de pair avec les précipitations neigeuses. En effet, bien que les températures de l'air soient régulièrement $< 0^{\circ}\text{C}$ la nuit, la glace se forme, à tous les sites, seulement avec l'occurrence des précipitations neigeuses. Aussi, la glace demeure de façon définitive lorsque la température de l'air est inférieure à -10°C le jour. Des images de l'englacement sont présentées à différentes étapes pour deux sites dont l'Isle-aux-Grues et Beaumont (Figure 82).

Quant au départ des glaces il s'effectue globalement sur une période d'un mois. La fonte de la glace étant initiée entre le 8 et le 19 mars 2012, et entre le 9 et le 17 mars 2013, à tous les sites d'étude, par l'augmentation des températures de l'air et les hautes marées du printemps. Cette période est caractérisée par les étapes suivantes :

- la rupture du couvert de glace et la formation de blocs de glaces ;
- le départ successif des blocs de glace à chaque marée ;
- l'amoncellement des blocs sur le haut marais notamment à Château-Richer, Saint-Augustin-de-Desmaures et Isle-aux-Grues
- disparition définitive des glaces.

⁶⁶ Les images pour le site de Château-Richer à cette date ne sont pas disponibles.

Le nombre total de jours où la glace est présente sur chaque site a aussi été relevé. En 2011, ce nombre varie de 110 à 131 jours, alors qu'en 2012, cela varie de 125 à 144 jours, la fonte de la glace étant toutefois initiée aux mêmes périodes. C'est difficile d'expliquer ces différences toutefois, la formation hâtive de première glace à Beaumont et son départ tardif peuvent être expliqués par la présence de la haute falaise rocheuse qui délimite le marais dans sa partie sud ainsi, contrairement aux autres le marais de Beaumont n'est pas exposé aux conditions d'ensoleillement.

Un résumé des principales informations obtenues sur l'englacement est présenté au tableau suivant (Tableau 19).

La présence de glaces de rives en hiver assure une protection contre l'érosion (Dionne et *al.*, 1989). La glace peut toutefois causer l'érosion lorsqu'entraînée par le balancement des marées et les vagues. Avec un réchauffement des températures, on peut penser que la disparition progressive des glaces causerait indirectement une augmentation de l'impact des vagues sur la côte favorisant ainsi une érosion accrue (Savard *et al.*, 2008). Les données d'englacement obtenues dans la présente étude ont été intégrées à la base de données et analysées de façon à déterminer l'influence de ce paramètre sur l'érosion mesurée aux différents sites d'étude. Ces résultats sont présentés à la section 6.

Tableau 19 : Caractéristiques d’englacement et de fonte de la glace sur les marais à l’étude, 2011, 2012 et 2013

Site d’étude	2011-2012						
	Date formation première glace	Nombre épisodes de redoux	Date englacement définitif	Début de la fonte des glaces	Date de départ des glaces	Nombre de jour pour la fonte définitive	Nombre total de jour d’englacement
Saint-Augustin-de-Desmaures	02 déc.2011	4	17 déc. 2011	13 mars 2012	05 avril 2012	24	111
Beaumont	23 nov. 2011	2	08 déc. 2011	19 mars 2012	16 avril 2012	29	131
Château-Richer	02 déc.2011	3	15 déc. 2011	08 mars 2012	05 avril 2012	29	113
Isle-aux-Grues	02 déc.2011	3	17 déc. 2011	13 mars 2012	04 avril 2013	23	110
2012-2013							
Saint-Augustin-de-Desmaures	25 nov.2012	1	26 nov. 2012	17 mars 2013	17 avril 2013	32	144
Beaumont	28 nov. 2012	1	09 déc. 2012	13 mars 2013	26 avril 2013	45	141
Château-Richer	ND	ND	ND	10 mars 2013	12 avril 2013	34	125*
Isle-aux-Grues	26 nov.2012	1-2	09 déc. 2012	09 mars 2013	20 avril 2013	43	133

ND : images non disponibles

* En assumant un englacement le 9 décembre 2012.



Figure 82 : Période d'englacement (en haut); couvert de glace bien établi en février (au milieu) et départ des glaces au printemps (en bas), à gauche à l'Isle-aux-Grues et à droite, à Beaumont.

6. Analyse et discussion

6.1 Intégration des données : principaux facteurs responsables de l'évolution des marais

Pour répondre à l'objectif principal de l'étude qui consiste à identifier les principaux facteurs responsables de l'évolution des marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent nous avons, dans cette section, intégré tous les résultats obtenus sur le terrain ou suite à l'analyse des données météorologiques et d'englacement. Plus précisément, nous avons procédé à des analyses statistiques en considérant le taux moyen d'érosion du talus comme variable réponse et chacune des variables géomorphologies, végétales, hydrodynamiques ou météorologiques comme variables explicatives (Tableau 20). Seules des analyses bivariées ont été effectuées.

Le lien entre les variables retenues a été étudié à l'aide de deux tests statistiques différents. Le test de corrélation non paramétrique de Spearman consiste à trouver une corrélation entre deux variables continues. Le test de Kruskal est une analyse de la variance non paramétrique utilisée pour évaluer la relation entre l'érosion (recul du talus) et un facteur. Ces tests ont été privilégiés du fait du non-respect des postulats de normalité, d'homoscédasticité et d'indépendances des observations. Cette observation est probablement liée, entres autres, à la taille de l'échantillon.

Nonobstant l'obtention de résultats non significatifs pour la plupart des variables, plusieurs tendances ont été relevées. Les variables englacement et hauteur du talus ressortent néanmoins comme étant des variables significatives ($p < 0.05$). Ces variables semblent agir sur l'érosion du schorre supérieur. Pour l'englacement, l'analyse limitée au mois de mai, montre que les longues durées d'englacement occasionnent un recul plus marqué du talus, augmentant ainsi le taux d'érosion. Ceci peut être expliqué par le fait qu'une période longue d'englacement favorise un épaissement de la banquise au niveau du schorre inférieur, qui devient fermement « soudé » au talus. Au printemps, lors du morcellement de la banquise, les glaces en mouvement arrachent une partie du talus causant ainsi son recul, ce qui est clairement démontré par les mesures de terrain. Le mouvement de ces glaces qui s'opère par leur évacuation, se fait généralement, sous l'effet combiné des courants et des vents (Troude et Sérodes, 1988).

La hauteur du talus se révèle aussi une variable qui semble jouer un rôle important dans le processus de l'érosion; il apparaît que plus la hauteur moyenne du talus est élevée, plus l'érosion moyenne est élevée. En effet, un talus atteignant un mètre est plus exposé aux vagues et aux courants, qui, lorsqu'ils sont suffisamment forts, créent des encoches et prélèvent des sédiments du talus ou même, extraient des radeaux de végétation, contrairement à un talus de quelques centimètres de hauteur qui est, pour la plupart du temps, submergé et donc peu sapé par les vagues et les courants.

Pour les autres variables, excepté les variables précipitations totales et températures moyennes minimales des mois de décembre à avril (Tableau 20), on constate une tendance pour 3 sur 4 sites. C'est le marais de Beaumont qui, dans la plupart des cas, s'en écarte et décrit un patron à lui seul. À titre d'exemple, pour l'orientation du talus, pour trois marais (Saint-Augustin-de-Desmaures, Château-Richer et Isle-aux-Grues), plus le marais est exposé à la direction Nord, plus l'érosion moyenne est élevée. Le même cas s'applique aux variables suivantes : ratio superficie schorre inférieur/schorre supérieur, ratio sédiments grossiers/sédiments fins, recouvrement total de la végétation de toutes les zones, recouvrement moyen de la végétation du schorre supérieur, recouvrement moyen de la végétation du schorre inférieur, fréquence des vents forts (> 38 km/h) de direction N, NE, NO et la fréquence de submersion. Cette dernière montre cependant que les fréquences élevées sont associées à un recul faible du talus. En l'absence de vents, la

submersion ne semble donc pas engendrer l'érosion du talus. Ce sont plutôt les vagues et les courants, quand ils sont assez puissants, qui peuvent engendrer de l'érosion en frappant à répétition le talus.

Par ailleurs, les quantités de précipitations aux 15 minutes (ou intensité) ont été corrélées aux valeurs d'érosion (voir annexe B). L'intervalle de 15 mn semblait refléter au mieux l'intensité des précipitations sur les 4 marais. Lorsque la plage de temps est trop grande, la valeur peut être diluée. Les données d'intensité de précipitations sur 15 minutes ont été subdivisées en classes de fréquence de 0.2, 5 et 20 mm. Les fréquences pour les classes supérieures à 5 mm ont permis de déterminer celles susceptibles d'affecter le talus d'érosion. Même si la relation entre cette intensité et l'érosion ne semble pas significative, on relève une tendance pour deux sites sur trois. À noter que cette donnée n'est pas disponible pour le site de Château-Richer.

La corrélation entre la fréquence des vents en provenance du N, NE, NO et l'érosion a été évaluée. Les vents de vitesse supérieure à 38 km/h ont été utilisés pour l'analyse statistique. Encore une fois, il y a une tendance entre ces paramètres, mais le lien ne semble pas significatif ($P > 0.05$). Enfin, l'évaluation de l'effet de la température minimale a été testée afin de vérifier si d'une manière indirecte, elle pourrait influencer l'érosion par le biais de l'englacement : plus il fait froid, plus la glace prend de l'ampleur et plus le talus est soumis à l'érosion. Ce test n'a pas été concluant.

Il ressort de cette analyse que le marais de Beaumont se comporte toujours différemment des autres marais. Ceci est peut-être lié à la géomorphologie du site, en l'occurrence la présence d'une falaise limitant le marais au sud, et la pente forte principalement des schorres supérieur et inférieur. Prenons par exemple la variable de l'orientation du talus qui se trouve dans ce cas-ci exposé aux vents forts et fréquents du Nord qui génèrent des fortes vagues et des courants. Alors que l'on s'attendait à une plus forte érosion du talus, nous avons observé le contraire : une accumulation sédimentaire. Le visionnement des photos prises par la caméra nous a permis d'expliquer cette « anomalie ». Lors des forts vents, les vagues puissantes déferlent sur le schorre supérieur et parfois au pied de la falaise, prélevant ainsi les sédiments lesquels sont déposés un peu partout dans le marais y compris près du talus. Par la suite, ces sédiments, généralement grossiers, offriraient une protection au talus en amortissant l'effet des facteurs d'érosion et en étant érodés avant que celui-ci ne soit à nouveau attaqué. En contrepartie, la falaise située à proximité favoriserait l'accumulation de la neige, la formation d'une couche de glace plus épaisse ainsi qu'un dégel plus tardif en raison des conditions d'ensoleillement plus faibles. Le départ des glaces plus « portantes » créerait alors une érosion du talus plus importante.

Tableau 20. Sommaire des analyses bivariées entre les principales variables documentées et le taux moyen d'érosion par site d'étude

VARIABLES	VALEUR de p à $\alpha > 0,05$	COMMENTAIRE
Géomorphologiques		
Orientation du marais	0,75 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus l'exposition au nord est élevée plus le taux moyen d'érosion est élevé, sauf à Beaumont
Pente du marais	0,75 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus la pente est forte plus le taux moyen d'érosion est faible, sauf à Saint-Augustin
Ratio superficie schorre inférieur/schorre supérieur	0,75 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus le schorre inférieur est important (ratio faible), plus le taux moyen d'érosion est élevé, sauf à l'Isle-aux-Grues
Hauteur moyenne du talus	0,05 ^S	Tendance pour les 4 sites : plus la hauteur moyenne du talus d'érosion est élevée, plus le taux moyen d'érosion est élevé
Ratio sédiments grossiers/sédiments fins	0,3 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus le ratio sédiments grossiers/sédiments fin est élevé, plus l'érosion est faible, sauf pour Château-Richer
Végétales		
Recouvrement total de la végétation de toutes les zones	0,9 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus le recouvrement de la végétation de toutes les zones du marais est élevé, plus le taux moyen d'érosion est faible, sauf à Beaumont
Recouvrement moyen de la végétation du schorre supérieur	0,75 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus le recouvrement de la végétation du schorre supérieur est élevé, plus le taux moyen d'érosion est faible, sauf à Beaumont
Recouvrement moyen de la végétation du schorre inférieur	0,9 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus le recouvrement de la végétation du schorre inférieur est élevé, plus le taux moyen d'érosion est faible, sauf à Beaumont
Hydrodynamiques		
Fréquence de submersion au bord du talus	0,3 ^S	Tendance pour les 4 sites : plus la fréquence de submersion est élevée, plus le taux d'érosion est faible
Fréquence de submersion au milieu du talus	0,3 ^S	Tendance pour les 4 sites : plus la fréquence de submersion est élevée, plus le taux d'érosion est faible
Météorologiques		
Nombre total de jours d'englacement	0,04 ^S	Tendance pour les 4 sites : plus le nombre de jours d'englacement est élevé, plus le recul du talus mesuré en mai est élevé
Précipitations totales annuelles	0,99 ^S	Aucune tendance
Fréquence des événements de précipitations intenses (> 5 mm) sur une période de 15 minutes	0,89 ^K	Tendance observée pour 2/3 sites (Saint-Augustin et l'Isle-aux-Grues) : plus la fréquence des événements de précipitation est élevée, plus le taux d'érosion augmente, sauf à Beaumont
Fréquence des vents forts (> 38 km/h) de direction N, NE, NO	0,9 ^S	Tendance observée pour 3/4 sites : plus la fréquence des vents forts venant du nord est élevée plus le taux moyen d'érosion est élevé, sauf à Beaumont
Température moyenne minimale des mois de décembre à avril pour les deux années	0,95 ^S	Aucune tendance

^S Test de corrélation non paramétrique de Spearman

^K Test de Kruskal-Wallis (analyse de la variance non paramétrique)

Bien que certaines variables semblent avoir un impact sur l'érosion moyenne du talus, c'est la combinaison et simultan  t   de certains variables clés qui peuvent générer une forte érosion du talus. Ce fut le cas lors de la tempête « Irène » durant laquelle le niveau d'eau était haut au même moment que les vents et les précipitations étaient très forts. Toutefois, à elle seule, le nombre total de jours d'englacement semble une variable à considérer dans les scénarios de changement climatique.

Dans un tel contexte, si on tenait compte des projections climatiques concernant le sud Québec à l'horizon 2050, révélant une diminution de l'accumulation de la neige au sol (Ouranos 2010), il s'avère que la disparition de la banquise en hiver pourrait avoir un impact positif sur le maintien des hauts marais puisqu'ils ne seraient plus soumis à ce facteur qui semble constituer dans l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent un facteur d'érosion important. D'un autre côté, ces milieux pourraient être soumis pendant la période hivernale à des événements de tempête plus fréquents, ce qui pourrait annuler cet effet positif. Le recul du talus pourrait être encore plus important qu'en été en raison de l'absence de couvert végétal en hiver. Par ailleurs, si la fréquence de submersion augmentait à la suite de la hausse du niveau marin, il en résulterait probablement des modifications dans la composition de la végétation, toutes les espèces ne présentant pas le même seuil de tolérance à l'inondation. Nos observations suggèrent que la végétation du haut marais ou schorre supérieur aurait la capacité de s'installer plus haut sur la rive, là où les milieux naturels subsistent encore. Ce déplacement latéral se ferait alors au détriment des arbustaies et des forêts humides qui sont actuellement en place.

6.2 Modèle conceptuel : facteurs pouvant avoir une sur l'érosion des hauts de l'estuaire d'eau douce

Le schéma conceptuel (Figure 83) illustre les paramètres qui, selon nos observations, semblent les plus actifs dans l'érosion des marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent. On aurait pu, certes, y ajouter d'autres facteurs qui ont été évoqués par des chercheurs travaillant sur d'autres marais intertidaux tels l'indice de sécheresse, l'impact des oies et les vagues de batillage, ou encore certains phénomènes qui nous ont semblé importants lors de nos travaux sur le terrain comme le ruissellement de l'eau dans les fractures du schorre supérieur. Cependant, nous avons préféré nous limiter pour le moment aux facteurs que nous avons pu mesurer et dont l'influence sur l'érosion des marais apparaît plus directe (ex. exposition, hauteur du talus, durée de l'englacement, fréquence de submersion, etc.).

Les résultats obtenus suggèrent que tous les paramètres présentés ont une influence plus ou moins importante sur l'érosion des talus, mais deux d'entre eux se sont révélés plus significatifs, à savoir la hauteur du talus d'érosion et le nombre de jours d'englacement.

Dans ce schéma conceptuel, chaque ensemble de variables est considéré comme un « sous-  tat » (Billon *et al.* 2013). Au final, nous avons quatre sous-  tats (variables géomorphologiques, variables végétales, variables météorologiques et variables hydrodynamiques) placés à l'intérieur d'un «   tat englobant ». Cette présentation et les flèches les plus discernables illustrent le fait que la concomitance et la simultan  t   de certaines variables peuvent générer lors d'événements épisodiques une érosion soudaine et plus marquée des hauts marais.

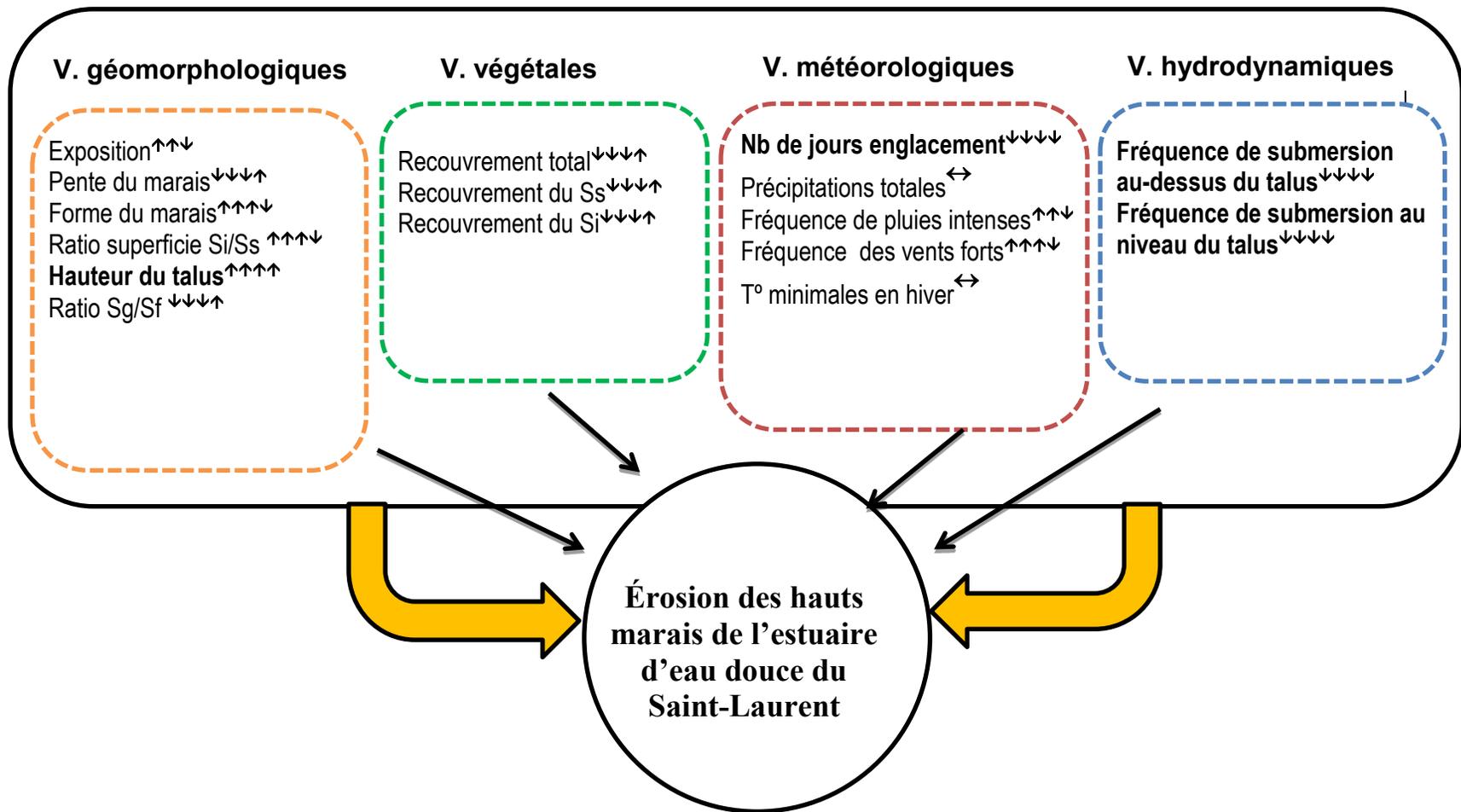


Figure 83. Modèle conceptuel mettant en évidence les principaux facteurs géomorphologiques, végétaux, météorologiques et hydrodynamiques documentés pouvant avoir une influence sur l'érosion des hauts marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent.

Si/Ss : Schorre inférieur/schorre supérieur; Sg/sf : Sédiments grossiers/sédiments fins;

Les variables en gras ont été identifiées comme les principales variables exacerbant l'érosion du talus du haut marais. Les flèches qui les accompagnent et leur nombre indiquent les tendances observées : ↑ augmentation de l'érosion, ↓ diminution de l'érosion et ↔ aucune tendance.

Les flèches jaunes épaisses illustrent que la concomitance et la simultanéité de certaines variables peuvent engendrer l'érosion du talus

7. Conclusion, recommandations et perspectives de recherche

Les marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent abritent une biodiversité exceptionnelle, en l'occurrence plusieurs espèces floristiques menacées ou vulnérables. Parmi ces espèces, trois sont officiellement reconnues comme étant menacées au Québec et ont fait l'objet de plans de conservation produits par le MDDEFP. Dans ces plans, l'érosion de la portion supérieure de ces marais est évoquée comme une menace à la survie de ces espèces, surtout si ce processus s'accélère en réponse aux changements climatiques. Ce projet a été réalisé pour répondre à cette préoccupation du MDDEFP en déterminant, d'une part, si tous les marais situés dans cette portion du Saint-Laurent subissent actuellement des taux d'érosion similaires et d'autre part, en identifiant certaines caractéristiques permettant d'identifier les sites les moins vulnérables à l'érosion et présentant une meilleure capacité de s'ajuster aux modifications causées par le réchauffement du climat, comme la disparition du couvert de glace en hiver.

Malgré le nombre très limité de marais étudiés et surtout la courte période de suivi de l'évolution de la limite entre les schorres supérieur et inférieur (talus), les résultats obtenus dans le cadre de ce projet répondent de façon très satisfaisante aux attentes du MDDEFP. L'étude détaillée des quatre sites d'étude sur les plans de la géomorphologie et de la végétation a confirmé leur caractère distinct et la pertinence de leur choix pour une analyse comparative des taux d'érosion. Il ressort notamment que les deux sites situés le plus en amont, Saint-Augustin-de-Desmaures et Beaumont, présentent des taux moyen d'érosion plus faibles que les sites situés en aval, Château-Richer et l'Isle-aux-Grues. Bien que l'analyse des différents facteurs (géomorphologiques, végétaux, hydrodynamiques et météorologiques) responsables de cette érosion n'ait pas donné de résultats vraiment significatifs sur le plan statistique, elle a néanmoins permis de faire ressortir une combinaison de facteurs, qui selon les caractéristiques intrinsèques des sites, agissent de façon positive ou négative sur le taux d'érosion. Par exemple, pour le marais de l'Isle-aux-Grues, la forte exposition aux vents forts du nord, la hauteur élevée du talus d'érosion et le faible recouvrement de la végétation du schorre inférieur semblent les principaux facteurs responsables du taux d'érosion plus élevé qui y a été observé pendant la durée du projet, comparativement à celui du marais de Château-Richer qui est moins exposé à ces vents et présente un talus d'érosion moins élevé ainsi qu'un couvert végétal plus dense au niveau du schorre inférieur. Pour sa part, l'examen de l'évolution historique des sites sur une cinquantaine d'années apporte également une information fort utile, puisqu'elle a mis en évidence la capacité de la végétation du schorre supérieur de s'ajuster et de migrer vers le haut de la rive, permettant ainsi, dans certaines conditions, le maintien d'un habitat essentiel à la survie de plusieurs espèces en situation précaire.

De façon plus précise, les informations recueillies sur les trois espèces floristiques menacées ciblées par le projet révèlent que deux d'entre elles, le *Gentianopsis virgata* subsp. *victorinii* et le *Cicuta maculata* var. *victorinii* sont plus susceptibles d'être affectées par l'érosion des hauts marais en raison de leur position au-dessus ou à proximité du talus d'érosion. La situation de l'*Eriocaulon parkeri*, est moins préoccupante, puisque cette espèce est limitée au schorre inférieur qui semble plutôt en expansion. Par ailleurs, plusieurs des données prises sur ces espèces menacées sont inédites et complètent les connaissances du MDDEFP à leur sujet, à l'exemple des fréquences de submersions. La présence d'espèces envahissantes observée dans les marais à l'étude s'avère préoccupante même si elles ne sont pas actuellement en situation de dominance.

À partir des résultats obtenus dans le cadre de ce projet, le MDDEFP pourra, lors de la révision de ses plans de conservation, se doter de critères supplémentaires pour la sélection des sites prioritaires à protéger. Jusqu'à présent, la détermination de ces sites

s'est principalement appuyée sur la taille des populations de ces espèces et sur la qualité de leur habitat. Lors de la réévaluation des sites, un critère de résilience à l'érosion sera ajouté. Ainsi, les sites présentant des caractéristiques qui les rendent moins vulnérables à ce phénomène seront privilégiés.

Bien qu'ils soient fort intéressants, les résultats obtenus dans le cadre de ce projet sur la contribution relative des différents facteurs analysés au taux d'érosion du schorre supérieur ou haut marais présentent des limites. La principale provient du petit nombre de sites couverts qui restreint énormément la portée des analyses statistiques. De plus, bien que les sites d'étude aient été sélectionnés de façon à représenter différentes conditions biophysiques, il n'a sans doute pas été possible d'en capter toute la diversité. La courte durée ne permet pas non plus d'affirmer avec certitude que les tendances observées sont valables à plus long terme.

Néanmoins, les observations qui ont été faites dans le cadre de cette étude ouvrent des pistes de recherche à explorer davantage dans l'avenir. Elles démontrent notamment l'utilité, voire la nécessité d'une approche multidisciplinaire, comme celle préconisée dans ce projet, pour aborder la complexité des processus d'érosion. Il va de soi que les tendances mises en évidence dans ce projet ne pourront être confirmées qu'après plusieurs années subséquentes de mesures et d'observation. Le modèle conceptuel élaboré présente à cet effet les paramètres qui semblent les plus actifs dans l'érosion des marais de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent. Des observations sur un plus grand nombre de sites ainsi qu'une étude plus approfondie des paramètres qui semblent les plus significatifs et de d'autres facteurs non documentés à ce jour, devraient permettre d'obtenir un portrait global de l'évolution de ces marais à plus long terme et d'étendre ces résultats à l'ensemble de l'estuaire d'eau douce. Les images Lidar des rives du Saint-Laurent qui ont été produites au cours de la dernière année font partie des outils qui pourraient grandement faciliter la poursuite du projet en permettant, par exemple, d'appliquer différents scénarios de modifications des niveaux d'eau pour en évaluer l'impact sur la végétation et les espèces en situation précaire de ces marais.

Références

- Allard, M., 1981. L'anse aux Canards, île d'Orléans, Québec : évolution holocène et dynamique actuelle. *Géographie physique et Quaternaire*, 35: 133-154.
- Bernatchez, P., 2003. Les impacts des changements climatiques sur les littoraux de l'estuaire et du golfe du Saint-Laurent. *Bulletin de l'AQQUA (Association québécoise pour l'Étude du Quaternaire)*, 29 : p. 8-9.
- Bernatchez, P. et Dionne, J.-C., 1999. Observations sur les processus cryogéniques dans l'érosion des falaises meubles : l'exemple de la Haute Côte-Nord, p. 29-30. In *Programme et résumés : 20^e Colloque du Centre d'études nordiques (Québec, 9 et 10 décembre 1999)*.
- Bernatchez, P. et Dubois, J.M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, 58 : 45-71.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Friesinger, S., Jolivet, Y., Dugas, S., Drejza, S., Morissette, A., 2008. Sensibilité des côtes et vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 256 pages.
- Brouillet, L, D. Bouchard et F.Coursol. 1996. Les plantes susceptibles d'être désignées menacées ou vulnérables et autres plantes rares de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent entre Grondines et Saint-Jean-Port-Joli. Rapport préliminaire préparé pour le gouvernement du Québec, ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction de la conservation et du patrimoine écologique, Québec. 67 p. + annexes.
- Blott, S.J. et Pye, K., 2001. *Adaptation de la classification de Wenworth*. Dans Cyr, D. (2009). *Comparaisons d'échelles et classifications granulométriques*. Association québécoise pour l'étude du Quaternaire, Université du Québec à Montréal, Montréal, 2 p.
- Cayer, D. (2010). *Manuel d'analyse granulométrique : méthode combinant les techniques de la granulométrie laser et les tamis*. 1^{ère} édition, Laboratoire de sédimentologie et de géomorphologie, Université Laval, Québec, 21 p.
- Crowley, T.E., II, 2003. Great Lakes climate change hydrologic impact assessment. International Joint Commission. Technical memorandum GLERL-126. Washington.
- Dionne, J. C., 1981. Données préliminaires sur la charge sédimentaire du couvert de glace dans la baie de Montmagny, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 35: 277-282.
- Dionne, J.-C., 1986. Érosion récente des marais intertidaux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 40 : 307-323.
- Dionne, J.-C., 1989. The role of ice and frost in tidal marsh development – A review with particular reference to Quebec, Canada. *Essener Geographische Arbeiten*, 18 :

- Dionne, J.-C., 1993. Influence glacielle dans le façonnement d'une plate-forme rocheuse intertidale, estuaire du Saint-Laurent. *Revue de géomorphologie dynamique*, 43 : 1-10.
- Dionne, J.-C., 2000. Érosion récente du schorre supérieur à Sainte-Anne-de-Beaupré, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 54 (1) : 208-218.
- Dionne, J.-C. et Bouchard., M.-C. 2000. Nouvelles données sur l'érosion du schorre supérieur à Montmagny, moyen estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 54 : 219-230.
- Gauthier, B. 2000. L'estuaire du Saint-Laurent : synthèse phytogéographique. Gouvernement du Québec, ministère de l'Environnement, Direction du patrimoine écologique et du développement durable, Québec. 33 p.
- Gilbert, H., 2009. Développement d'une méthodologie et évaluation en 2008 (an zéro) du suivi des populations de trois espèces en situation précaire dans l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent. Rapport final préparé pour Parcs Canada dans le cadre des travaux de l'Équipe de rétablissement de la flore menacée de l'estuaire d'eau douce du Saint-Laurent. 87 pages et 2 annexes.
- Gilbert, H., 2010. *Relevés de végétation : Saint-Augustin-de-Desmaures, Château-Richer, Isle-aux-Grues*. Bureau d'écologie appliquée, Québec. Dans Lamarre, P. (2012). *Caractérisation de la végétation de quatre marais de l'estuaire d'eau douce du fleuve Saint-Laurent*. Essai de maîtrise, Université Laval, Québec, 73 p.
- Hadjouis, A., 1987. *Granulométrie des fractions sableuses*. Dans Miskovski, J.C. (éd.). *Géologie de la Préhistoire*, Paris: Géopré, p. :413-426.
- Jean M., Létourneau G., 2011. Changements dans les milieux humides du fleuve Saint-Laurent de 1970 à 2002. Rapport technique no 511. Environnement Canada, Direction générale des sciences et de la technologie, Monitoring et surveillance de la qualité de l'eau au Québec, 302 p.
- Jolicoeur, G. et Couillard, L., 2007a. *Plan de conservation de la cicutaire maculée variété de Victorin (Cicuta maculata var. victorinii) : Espèce menacée au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère de Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec, 16p.
- Jolicoeur, G. et Couillard, L., 2007b. *Plan de conservation du gentianopsis élancé variété de Victorin (Gentianopsis procera subsp. macounii var. victorinii) : Espèce menacée au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère de Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec, 16p.
- Jolicoeur, G. et Couillard, L., 2008. *Plan de conservation de l'ériocaulon de Parker (Eriocaulon parkeri) : Espèce menacée au Québec*. Gouvernement du Québec, ministère de Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, Direction du patrimoine écologique et des parcs, Québec, 12p.
- Keller, B.E.M., 2000. Plant diversity in *Lythrum*, *Phragmites*, and *Typha* marshes, Massachusetts, U.S.A. *Wetlands Ecology and Management* 8: 391 – 401.
- Lavoie, C., 2008. Le roseau commun (*Phragmites australis*): une menace pour les milieux humides du Québec ? Comité interministériel du Gouvernement du Québec sur le roseau commun et Canards Illimités Canada. Québec.

- Lavoie, C., Jean, M., Delisle, F. et Létourneau, G., 2003. Exotic plant species of St. Lawrence River wetlands: a spatial and historical analysis. *Journal of Biogeography* 30: 537 – 549.
- Marie-Victorin, frère, F.É.C., et Rouleau, E., 1995. *Flore laurentienne*. 3^{ème} édition, Presses de l'Université de Montréal, Montréal, 1083 p.
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 2007. *Rapport d'analyse environnementale pour le projet d'aménagement d'un terminal au quai de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans sur le territoire de la Municipalité de Saint-Laurent-de-l'Île-d'Orléans par le ministère des Transports*. Gouvernement du Québec, 44 p.
- Morin, J., Turgeon, K., Martin, S., Champoux, O., 2006. Modelling changes in aquatic plant communities and wetlands of the St. Lawrence River. Pages 40 – 52 *In* Tabot, A. (edit.) *Water availability issues for the St. Lawrence River: an environmental synthesis*. Environnement Canada. Montréal..
- Nature Québec, 2011a. *Cicutaire de Victorin*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, 2 p.
- Nature Québec, 2011b. *Gentianopsis de Victorin*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, 2 p.
- Nature Québec, 2011c. *Ériocaulon de Parker* Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, 2 p.
- Quintin, C., Bernatchez, P., Buffin-Bélanger, T., 2006. Géomorphologie et diversité végétale des marais du Cap Marteau et de l'Isle-Verte, estuaire du Saint-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 60: 149-164.
- Savard J-P., Bernatchez P., Morneau F., Saucier F., Gachon P., Senneville S., Fraser C., Jolivet Y., Étude de la sensibilité des côtes et de la vulnérabilité des communautés du golfe du Saint-Laurent aux impacts des changements climatiques - Synthèse des résultats. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS et au FACC, 48 pages
- Tougas-Tellier M.-A., Morin J., Hatin D., Lavoie C., 2013. Impacts des changements climatiques sur l'expansion du roseau envahisseur dans les frayères à grand brochet et à perchaude du fleuve Saint-Laurent. Rapport de recherche remis au Consortium OURANOS, 53 pages
- Troude, J.P., 1986. Étude du cycle sédimentaire annuel d'un estran à forte sédimentation de l'estuaire du Saint-Laurent. Thèse de doctorat (Ph.D.), Département de génie civil, Université Laval, Québec, 168 p.
- Troude, J. P., Sérodes, J. B., 1988. Le rôle des glaces dans le régime morpho-sédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. *Revue canadienne de génie civil*, 15 : 348-354.

Ressources Internet

- Billon, R., Fasse, I, Zoller, J. Tonarelli, P., Boulekbache, H. Duriez, S. Quelques exemples d'élaboration de modèles conceptuels <http://stockage.univ-valenciennes.fr/slide/files/orioai/TonarelliInteroperabilite20070601/coursPDF/unite5.pdf>
- Environnement Canada, 2010. *Les milieux humides riverains du Saint-Laurent : des écosystèmes au contact de la terre et de l'eau*. In Gouvernement du Canada. Environnement Canada. <http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fre&n=4710F858-1> (Page consultée le 21 juillet 2012).
- Environnement Canada, 2011a. *Le Saint-Laurent et le réchauffement climatique*. In Gouvernement du Canada. Environnement Canada. <https://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fre&n=4BF0EF0C-1> (Page consultée le 12 février 2013).
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), 2001c. *Ériocaulon de Parker*. In Gouvernement du Québec. Développement durable, Environnement, Faune et Parcs. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/biodiversite/especes/ericaulon/ericaulon.htm> (Page consultée le 4 août 2012).
- Pêches et Océans Canada, 2012. *Prédictions des marées pour 7 jours*. In Gouvernement du Canada. Pêches et Océans Canada. <http://www.marees.gc.ca/fra/station/> (Page consultée le 28 septembre 2012).
- Plan Saint-Laurent (s.d.). *Le Saint-Laurent*. In Gouvernement du Canada, Gouvernement du Québec. Plan d'action Saint-Laurent 2011-2026. http://planstlaurent.qc.ca/fr/le_saint_laurent.html (Page consultée le 31 août 2012).
- Service de l'information sur le milieu atmosphérique, Direction du suivi de l'état de l'environnement du MDDEFP, Service Info-Climat, <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/climat/surveillance/produits.htm>

Annexe A

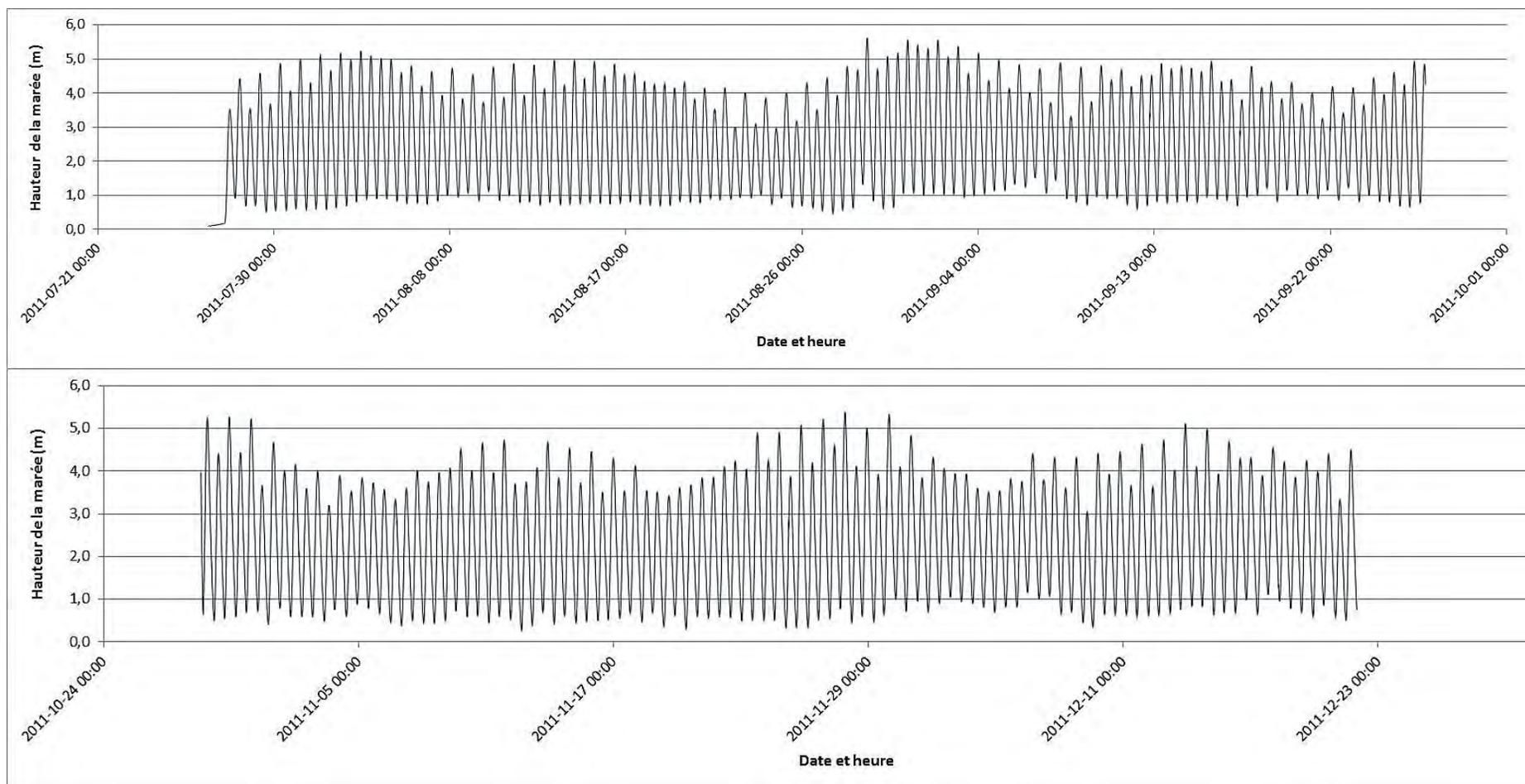


Figure 1 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais à Beaumont en 2011 (en haut et bas)

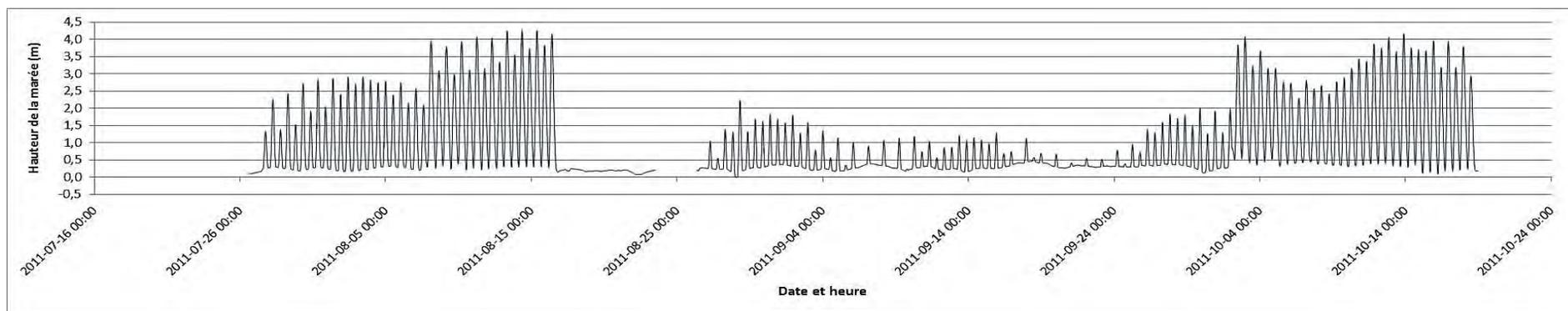


Figure 2 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais à Beaumont en 2011

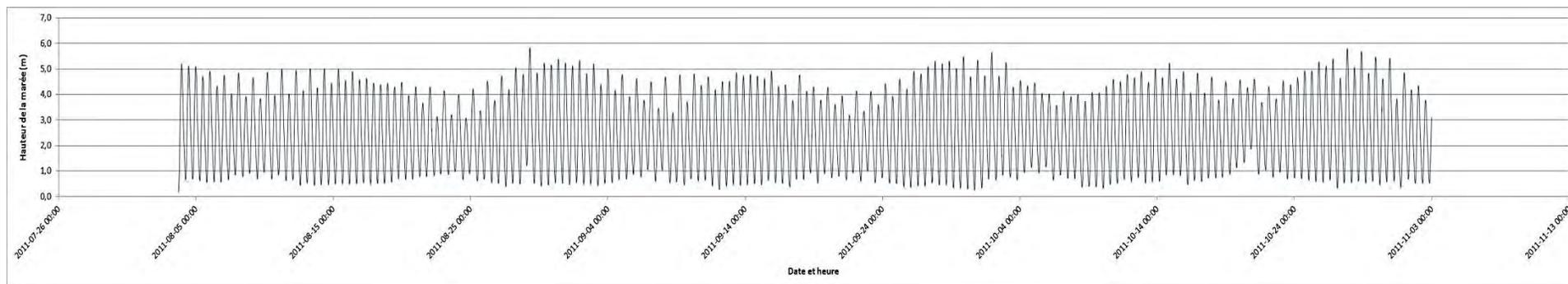


Figure 3 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais, Château-Richer, 2011

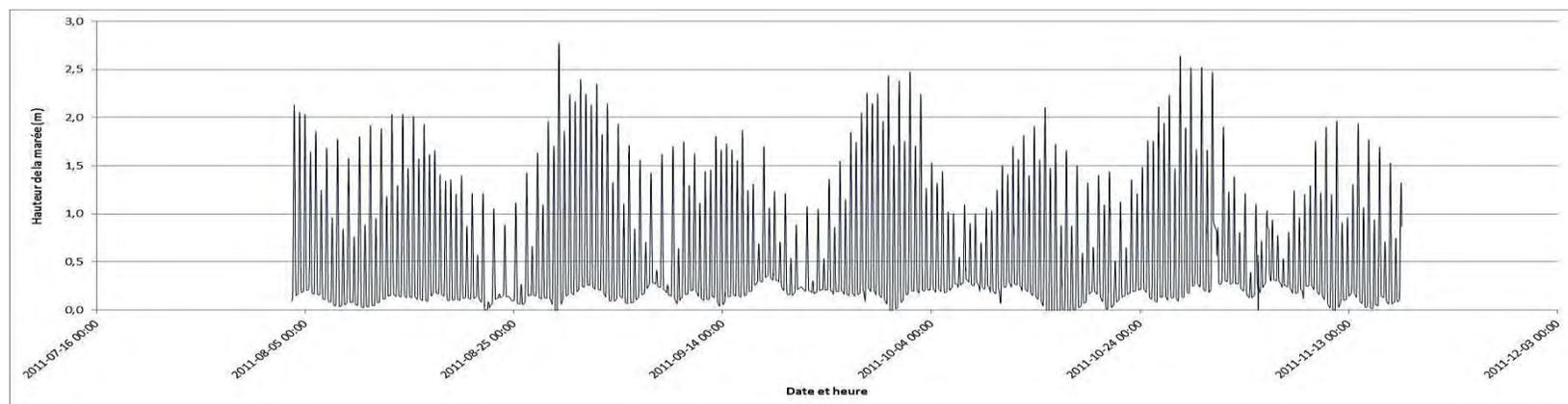


Figure 4 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais, Château-Richer, 2011

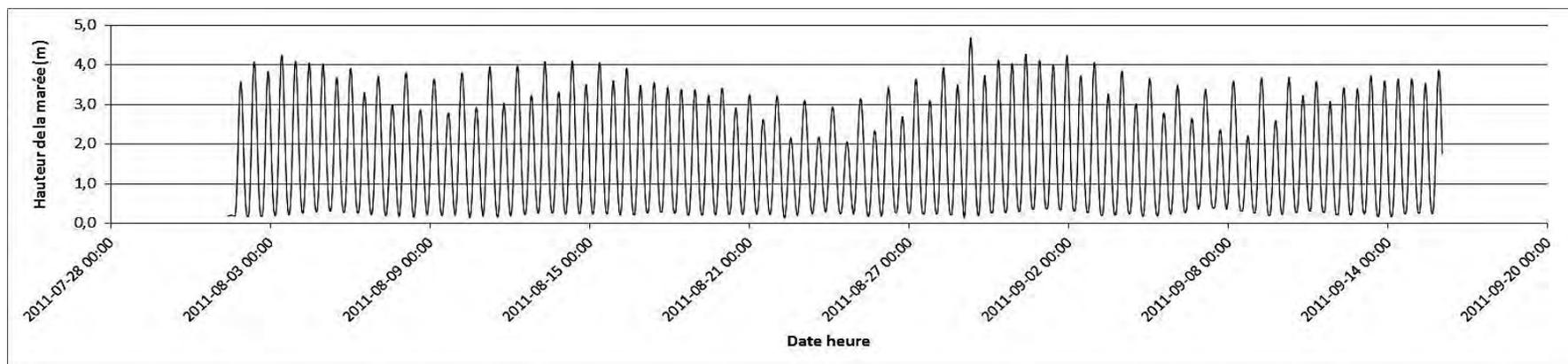


Figure 5 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais, Ile-aux-Grues, 2011

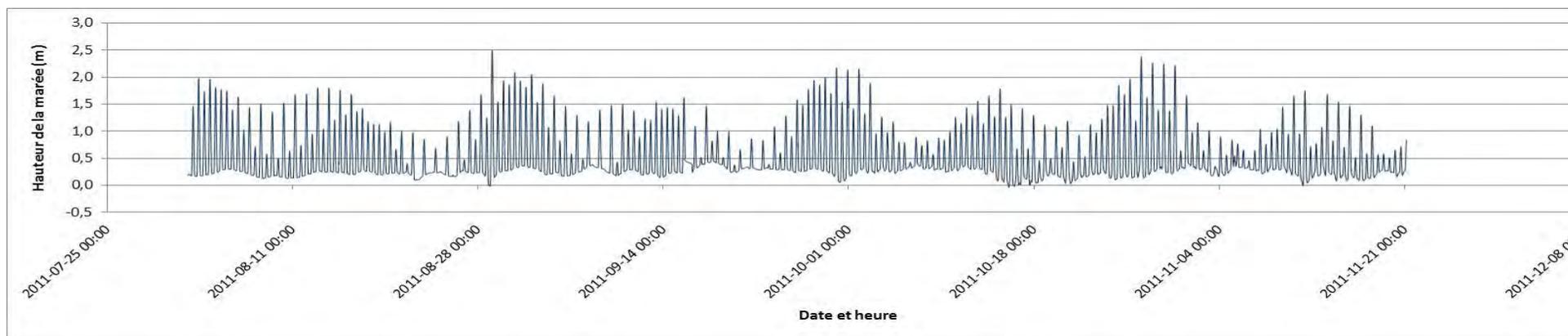


Figure 6 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais, Ile-aux-Grues, 2011

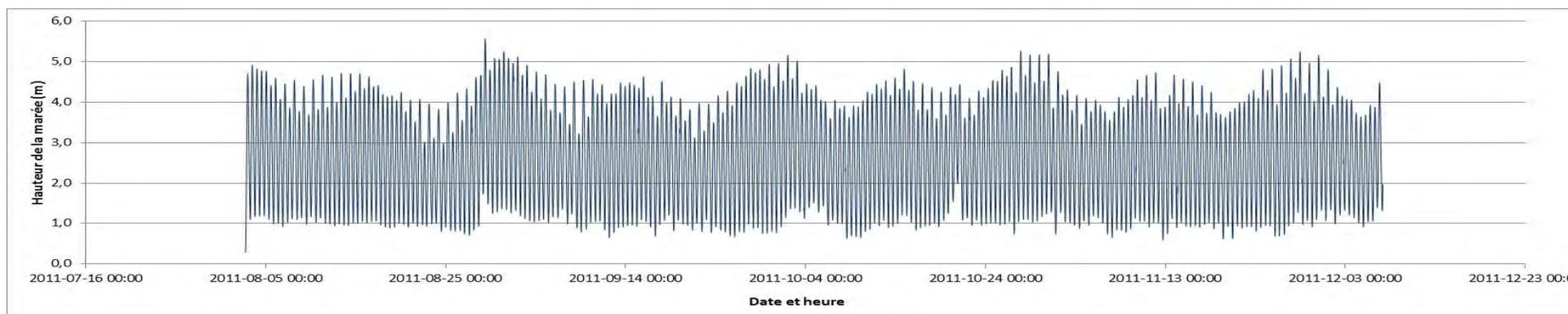


Figure 7 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais, Saint-Augustin-de-Desmaures, 2011

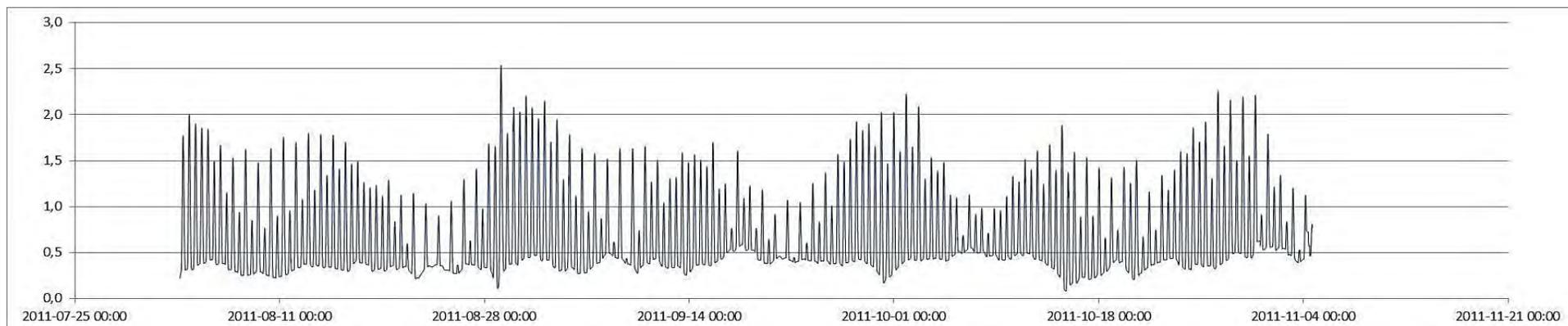
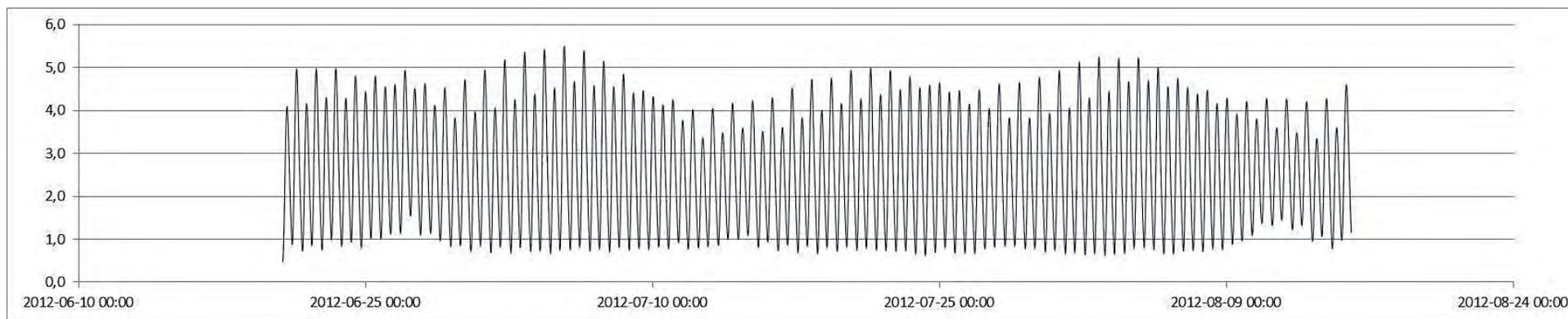


Figure 8 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais, Saint-Augustin-de-Desmaures, 2011



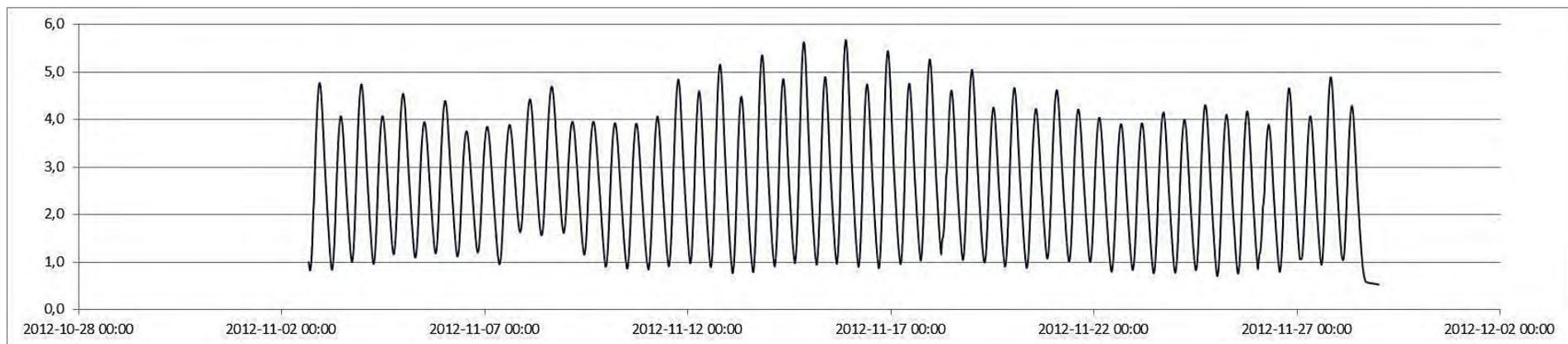


Figure 9 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais à Beaumont en 2012 (en haut en en bas)

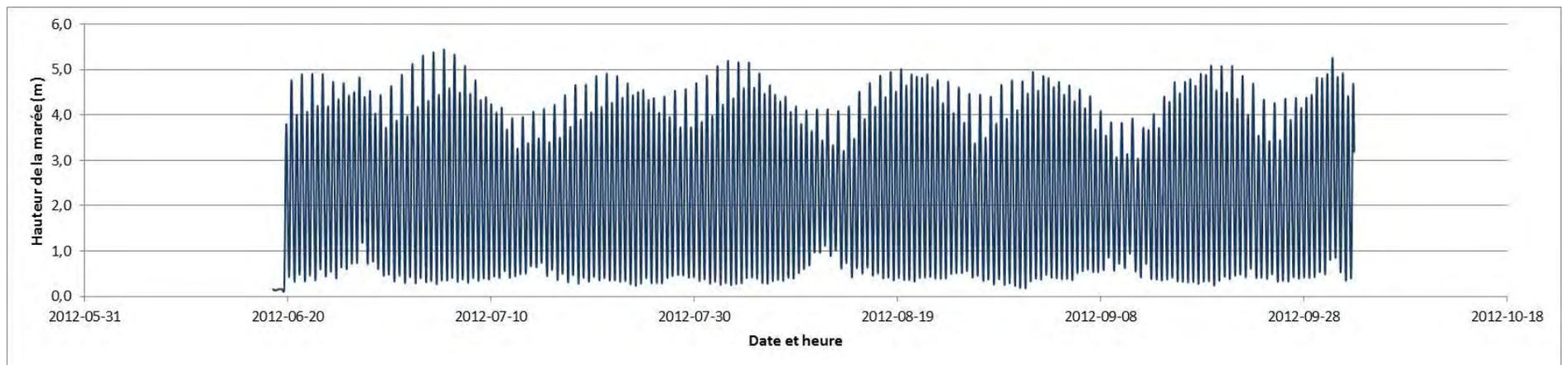


Figure 10 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais à Château-Richer, en 2012

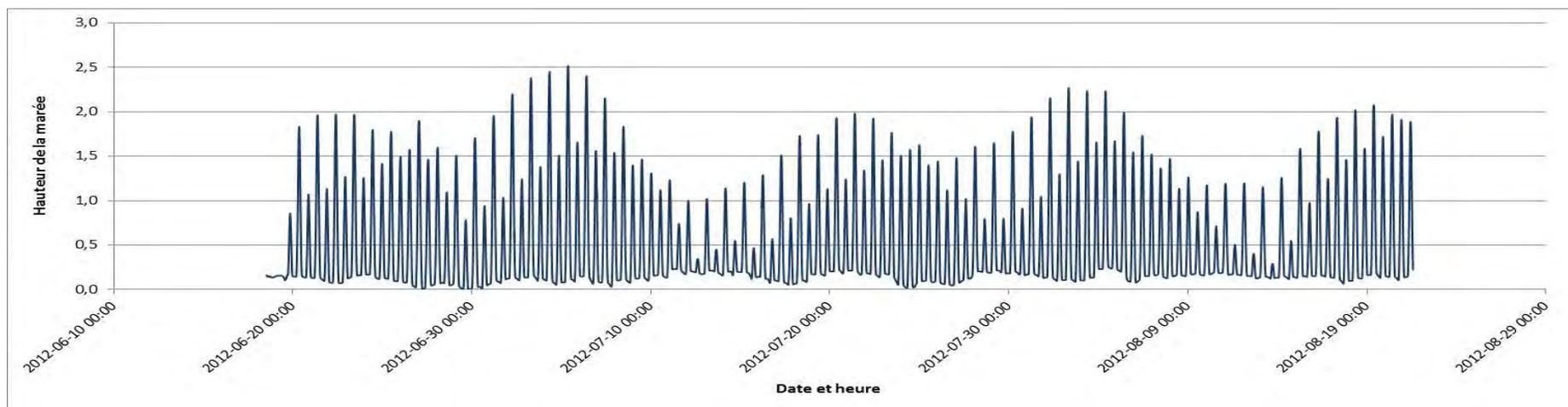


Figure 11 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais à Château-Richer, en 2012

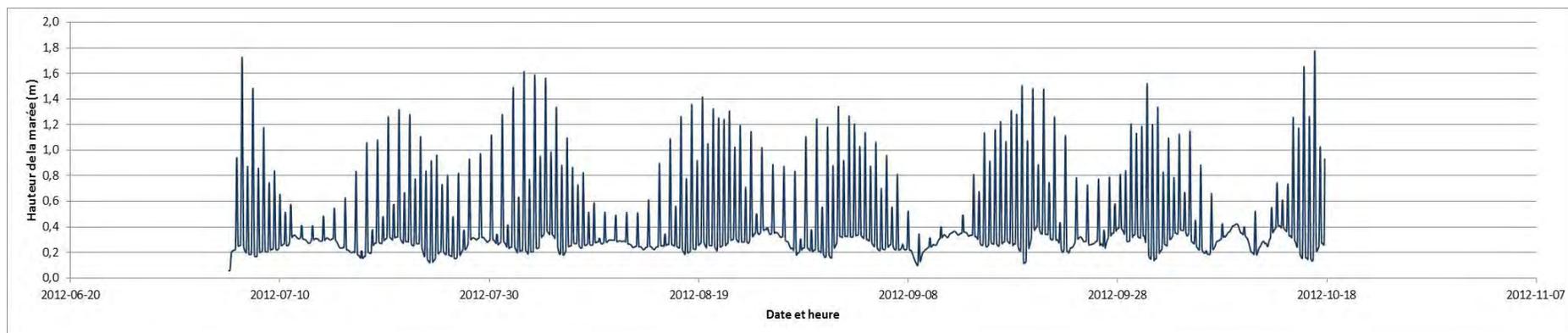


Figure 12 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais à l'île-aux-Grues, en 2012

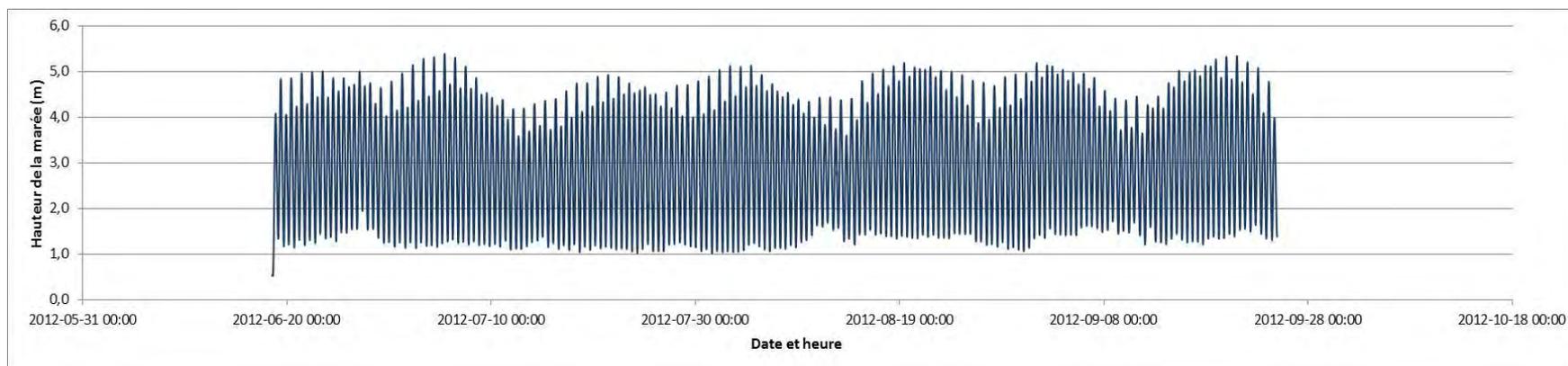


Figure 13 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le bas marais à Saint-Augustin-d- Desmaures, en 2012

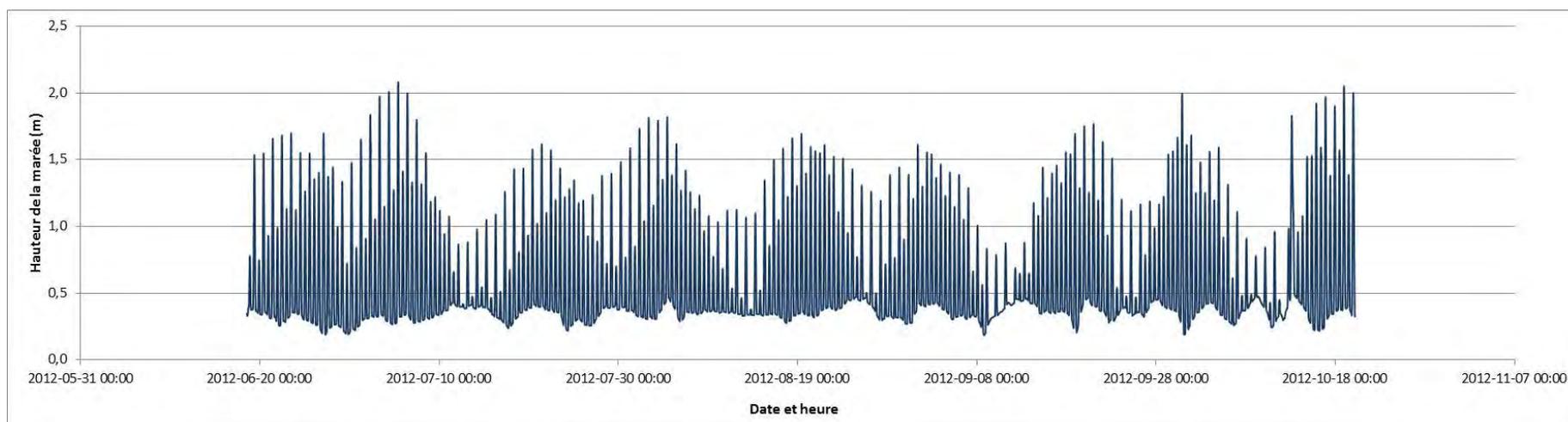


Figure 14 : Enregistrements des niveaux d'eau sur le haut marais à Saint-Augustin-de-Desmaures, en 2012

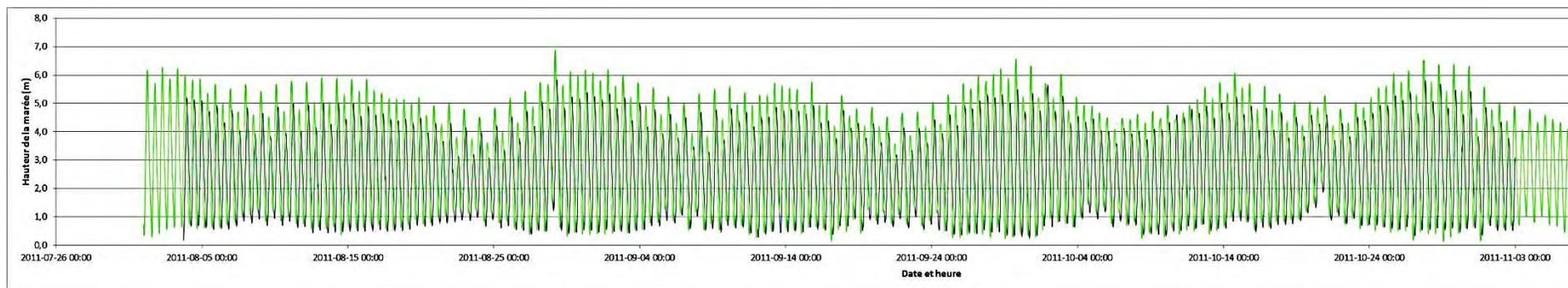


Figure 15 : Enregistrements (en noir) des niveaux d'eau sur le bas marais de Château-Richer, entre août et novembre 2011. En vert, les données sont celles du Service hydrographique du Canada (SHC) qui ont été enregistrées dans le port de St-François, Île d'Orléans.

Annexe B. Liste et valeurs des variables utilisées pour les analyses bivariées

1. Variables géomorphologiques

1.1 Orientation du talus

Site	Exposition	Érosion moyenne *
Beaumont	360°	-6,97 cm
Saint-Augustin	178°	-10,14 cm
Château-Richer	140°	-18,21 cm
Isle-aux-Grues	322°	-20,29 cm

* moyenne des valeurs cumulées négatives seulement pour toute la période de suivi

1.2 Pente du marais

Site	Pente (%)	Érosion moyenne
Beaumont	4,33	-6,97 cm
Saint-Augustin	1,56	-10,14 cm
Château-Richer	3,16	-18,21 cm
Isle-aux-Grues	2,93	-20,29 cm

1.3 Ratio superficie schorre inférieur/schorre supérieur (m²)

Site	Ratio	Érosion moyenne
Beaumont	0,47	-6,97 cm
Saint-Augustin	0,25	-10,14 cm
Château-Richer	0,2	-18,21 cm
Isle-aux-Grues	0,4	-20,29 cm

1.4 Hauteur moyenne du talus d'érosion

Site	Hauteur du talus	Érosion moyenne
Beaumont	15 cm	-6,97 cm
Saint-Augustin	15 cm	-10,14 cm
Château-Richer	34 cm	-18,21 cm
Isle-Aux-Grues	58 cm	-20,29 cm

1.5 Ratio proportion sédiments grossiers/proportion de sédiments fins

Site	Fins*	Grossiers*	Ratio
Beaumont	7,25 %	42,75 %	5,90
Château-Richer	39,25 %	10,75 %	0,27
Isle-aux-Grues	32,50 %	17,75 %	0,55
Saint-Augustin	17,00 %	33,00 %	1,94

* Fins (argile et silt); Grossiers (sable et gravier)

2. Variables sur la végétation

2.1 Recouvrement total de la végétation de toutes les zones

Site	Recouvrement*	Érosion moyenne
Beaumont	560 %	-6,97 cm
Saint-Augustin	953 %	-10,14 cm
Château-Richer	820 %	-18,21 cm
Isle-aux-Grues	664 %	-20,29 cm

* Comme il y a plusieurs zones de végétation, il est normal que les % soient plus élevés que 100 %. Cette valeur a été utilisée pour exprimer à la fois la densité de la végétation et son étendue (plus il y a de zones, plus elle occupe une superficie importante).

2.2 Recouvrement moyen* de la végétation du schorre supérieur

Site	Recouvrement	Érosion moyenne
Beaumont	178,3 %	-6,97 cm
Saint-Augustin	225,5 %	-10,14 cm
Château-Richer	205,0 %	-18,21 cm
Isle-Aux-Grues	147,2 %	-20,29 cm

* Comme le recouvrement des espèces a été noté sur le terrain à partir des codes de Braun-Blanquet et que ce sont les valeurs médianes qui ont été utilisées, il arrive que le total des valeurs médianes puissent excéder 100 % pour un même relevé. Il faut aussi tenir compte du chevauchement des strates arbustives, herbacées et muscinales dans les zones de végétation. Cette valeur a été retenue pour apprécier l'abondance de la végétation dans chaque zone et calculer une moyenne par étage (schorre inférieur et schorre supérieur).

2.3 Recouvrement moyen de la végétation du schorre inférieur

Site	Recouvrement	Érosion moyenne
Beaumont	25,0 %	-6,97 cm
Saint-Augustin	145,5 %	-10,14 cm
Château-Richer	123,0 %	-18,21 cm
Isle-Aux-Grues	111,2 %	-20,29 cm

3. Variables hydrodynamiques

3.1 Fréquence de submersion au-dessus du talus

Site	Fréquence (%)	Érosion moyenne
Beaumont	20,59	-6,97 cm
Saint-Augustin	22,10	-10,14 cm
Château-Richer	18,49	-18,21 cm
Isle-aux-Grues	16,27	-20,29 cm

3.2 Fréquence de submersion au niveau du talus

Site	Fréquence (%)	Érosion moyenne
Beaumont	24,65	-6,97 cm
Saint-Augustin	27,38	-10,14 cm
Château-Richer	22,73	-18,21 cm
Isle-aux-Grues	20,27	-20,29 cm

4. Variables météorologiques

4.1 Nombre total de jours d'englacement pour la saison 2011-2012

Site	Nombre de jours	Recul du talus mai 2012
Château-Richer	215	-4,74
Saint-Augustin	254	-20,39
Isle-aux-Grues	243	-23,05
Beaumont	270	-34,60

4.2 Précipitations totales

Site	2011	2012	2011-2012	Érosion moyenne
Beaumont	903 mm	105,9 mm	1008,9 mm	-6,97 cm
Saint-Augustin	915,1 mm	504,6 mm	1419,7 mm	-10,14 cm
Isle-aux-Grues	516,7 mm	602,8 mm	1119,5 mm	-20,29 cm

4.3 Fréquences des événements de précipitations intenses sur une période de 15 minutes pour les classes de précipitations > 5 mm

Site	Fréquence absolue	Érosion moyenne
Beaumont	26	-6,97 cm
Saint-Augustin	18	-10,14 cm
Château-Richer	NA	-18,21 cm
Isle-Aux-Grues	22	-20,29 cm

4.4 Fréquences des vents forts (> 38 km/hr) de direction N, NE et NO

Site	Fréquence	Erosion moyenne
Beaumont	8	-6,97 cm
Saint-Augustin	1	-10,14 cm
Château-Richer	3	-18,21 cm
Isle-Aux-Grues	7	-20,29 cm

4.5 Température moyenne minimale pour les mois de décembre à avril

Site	Température °C	Érosion moyenne
Beaumont	-7,91	-6,97 cm
Saint-Augustin	-8,57	-10,14 cm
Château-Richer	-8,15	-18,21 cm
Isle-Aux-Grues	-7,85	-20,29 cm