

Rapport Scientifique RS-103

**Modélisation de la végétation
émergente du lac Saint-Pierre**

Olivier Champoux, Jean Morin et Martin
Jean

Février 2002

Pour fin de citation :

Champoux O., J. Morin, et M. Jean (2002). Modélisation de la végétation émergente du lac Saint-Pierre. Rapport scientifique SMC Québec – Section Hydrologie RS-103, Environnement Canada, Sainte-Foy. 37 pages.

Ministère des Approvisionnements et Services Canada 2002.

N° de catalogue En57-39/103F
ISBN : 0-662-86937-0

ÉQUIPE DE RECHERCHE

Environnement Canada - Service météorologique du Canada - Hydrologie

Rédaction

Jean Morin, Ph.D

Olivier Champoux, M.Sc

Réalisation des travaux

Jean Morin, Ph.D

Olivier Champoux, M.Sc

Programmation

Nicolas Fortin, B.Sc

Révision

Jean-Philippe Côté, M.Sc.

Daniel Rioux, M.Sc

Environnement Canada - Centre Saint-Laurent

Rédaction

Martin Jean, Ph.D

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX	VI
1 INTRODUCTION.....	1
2 MÉTHODOLOGIE.....	3
2.1 MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN DE LA PLAINE INONDABLE	4
2.2 SÉRIE TEMPORELLE DE NIVEAU D'EAU	6
2.3 DONNÉES BIOTIQUES	7
2.4 SIMULATION HYDRODYNAMIQUE.....	11
<i>Modèle hydrodynamique</i>	11
2.5 ÉCHANTILLONNAGE DES DONNÉES BIOTIQUES.....	18
<i>Projection des valeurs de topographie et de niveaux aux points d'échantillonnage</i>	20
2.6 DONNÉES ABIOTIQUES ET INDICATEURS HYDROLOGIQUES	23
<i>Variables indépendantes</i>	23
2.7 MODÈLE STATISTIQUE	25
3 RÉSULTATS.....	27
3.1 HYDRODYNAMIQUE	27
3.2 RÉGRESSIONS LOGISTIQUES	27
<i>Marais profond</i>	27
<i>Marais peu profond</i>	28
<i>Marécage arbustif</i>	28
<i>Marécage arborescent</i>	29
<i>Prairies humides</i>	29
4. DISCUSSION	34
5. CONCLUSION	35
RÉFÉRENCES.....	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schématisation de la méthodologie employée.....	4
Figure 2 : Modèle numérique de terrain de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre.....	6
Figure 3 : Niveau d'eau hebdomadaire durant la saison de croissance (période de 1960 à 1999)	7
Figure 4. Exemple de la carte de Jacques (1986) embouchure de la rivière Saint-François, île de la Grande Commune.....	8
Figure 5 : A. Classes de milieux humides retenues. B. Position des classes retenues dans l'étagement des milieux humides selon Gauthier (1997).	10
Figure 6 : Équation des ondes longues (forme conservatrice) en régime permanent résolues par HYDROSIM (Modèle de Saint-Venant).	12
Figure 7 : Maillage hydrodynamique utilisé.	13
Figure 8 : Frottement (n de manning) utilisé dans les simulations hydrodynamiques.	14
Figure 9 : Conditions limites en débits des entrées et de la sortie d'eau pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières.	15
Figure 10 : Conditions limites en débits des entrées et de la sortie d'eau pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières.	15
Figure 11 : Résultats de calibration du modèle hydrodynamique.	17
Figure 12 : Sous-aire d'étude, classe de végétation et points d'échantillonnage.....	19
Figure 13 : Exemple de distribution des points d'échantillonnage à l'intérieur des polygones de végétation.	20
Figure 14 : Modèle de terrain utilisé pour la projection de la topographie sur les points d'échantillonnage.	21
Figure 15 Interpolation des niveaux hebdomadaires à partir des scénarios simulés.	22
Figure 16 : Profondeur simulée pour chacun des scénarios de références.....	31
Figure 17 : Niveau de surface pour les huit scénarios de références.....	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Hydropériodes des milieux humides non-tidaux (d'après Mitsch et Gosselink 1993).	2
Tableau 2 : Seuils de probabilité pour la prédiction des absences et des présences employés avec les modèles de régression et tels que calculés à l'aide du ratio des présences observées et du nombre total d'échantillons (5325) dans la base de données de calibration.....	25
Tableau 3 : Description synoptique des 37 facteurs abiotiques utilisés dans le modèle de régression logistique.....	26
Tableau 4 : Résultats des régressions logistiques entre les variables biotiques et les variables abiotiques.	33

1 INTRODUCTION

Depuis quelques années, nous observons un changement dans les conditions hydrologiques du système Saint-Laurent-Grands-Lacs. Les écosystèmes ripariens sont fortement influencés par ces changements. La distribution spatiale des plantes émergentes est intimement liée à la distribution de facteurs abiotiques ou à leurs effets. Les impacts des fluctuations de niveau d'eau sur les milieux humides ont déjà été observés au lac Saint-François (Jean et Bouchard, 1991) et au lac Saint-Louis (Jean et al. 1992). Par contre, les relations quantitatives entre les fluctuations de niveau d'eau et les milieux humides sont encore mal connues.

Niveau d'eau et végétation des milieux humides

La saturation du sol représente le critère fondamental d'identification des milieux humides. Comme la distribution et la qualité de l'eau dans ces écosystèmes sont tributaires des spécificités régionales du climat, de la physiographie et de la géologie des lieux (Devito et al. 2000), les appellations désignant les milieux humides sont nombreuses et varient selon les lieux (*bogs, fens, peatlands, mires, moors, marais, etc*). Cette diversité d'un même type d'écosystème fait que nous ne connaissons pas de définition unanime (Vyzamal 1995). Toutefois, pour les besoins de précision que commande cette étude, nous retiendrons la définition suivante, issue de la synthèse des travaux de Zoltai (1988), de Cowardin et al. (1979) et de Couillard et Grondin (1986) telle qu'effectuée par Guay et Morin (2002):

Les milieux humides constituent des zones terrestres saturées en eau durant une période suffisamment longue pour influencer leurs composantes abiotique et biotique favorisant l'apparition de sols hydromorphes, d'une végétation hydrophile ou hygrophile, d'une variété d'activités et de processus biologiques adaptés aux environnements humides et dans certains cas, d'un taux de production de biomasse excédent celui de la décomposition.

Le niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent constitue l'élément principal de l'hydropériode des milieux humides du littoral de cet écosystème. Par conséquent, les changements à long terme des niveaux du fleuve, donc de l'hydropériode locale, devraient entraîner des changements dans les milieux humides. Le concept d'hydropériode a été défini par Mitsch et Gosselink (1993). Le Tableau 1 en présente les différents types. Dans le cadre de cette étude, la classification des grandes classes de milieux humides de Jacques (1986) et de Gauthier (1997) (marais profond,

marais peu profond, marécage arborescent, marécage arbustif et prairie humide) est utilisée. Nous considérons comme hypothèse de travail que ces classes représentent différentes hydropériodes.

Tableau 1: Hydropériodes des milieux humides non-tidaux (d'après Mitsch et Gosselink 1993).

Hydropériode	Définition
Inondation permanente	Milieu humide inondé en tout temps
Exposition intermittente	Milieu humide inondé tout au long de l'année sauf en période de sécheresse extrême.
Inondation semi-permanente	Milieu humide inondé la plupart des années, durant la saison de croissance végétative.
Inondation saisonnière	Milieu humide inondé durant de longues périodes au cours de la saison de croissance végétative; mais non inondé à la fin de celle-ci.
Saturé	Substrat du milieu humide est saturé durant de longues périodes au cours de la saison de croissance végétative; eau libre rarement présente.
Inondation temporaire	Milieu humide inondé durant de courtes périodes au cours de la saison de croissance; nappe phréatique située loin sous la surface.
Inondation intermittente	Surface du milieu humide généralement exposée; eau de surface quelquefois présente durant des périodes variables, sans patron saisonnier.

Dans ce contexte, l'objectif principal de cette étude est d'examiner la possibilité d'établir des relations bidimensionnelles et prédictives entre la distribution et l'évolution des grandes classes de milieux humides du lac Saint-Pierre (1964 à 1997) et des variables hydrologiques. Le présent rapport constitue une première approche de la modélisation de l'habitat des milieux humides du fleuve. La modélisation est abordée en combinant la puissance de la régression logistique, un modèle numérique de terrain de la plaine inondable du lac Saint-Pierre ainsi que la modélisation hydrodynamique du fleuve et de sa plaine inondable.

2 MÉTHODOLOGIE

Afin de répondre aux objectifs de l'étude et d'identifier les relations qui existent entre la végétation des milieux humides et les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent, une méthode relativement complexe a été mise en place. L'idée générale est de reconstruire les niveaux locaux atteints par l'eau afin de générer une série de variables abiotiques représentant l'effet des inondations et des exondations sur la distribution des plantes. Les données biotiques sur la distribution des types de milieux humides proviennent d'une cartographie détaillée de la plaine inondable du lac Saint-Pierre, tandis que les données de niveau d'eau locaux sont reconstituées en moyenne hebdomadaire à l'aide de la modélisation hydrodynamique. La Figure 1 montre en détail les étapes de cette méthodologie.

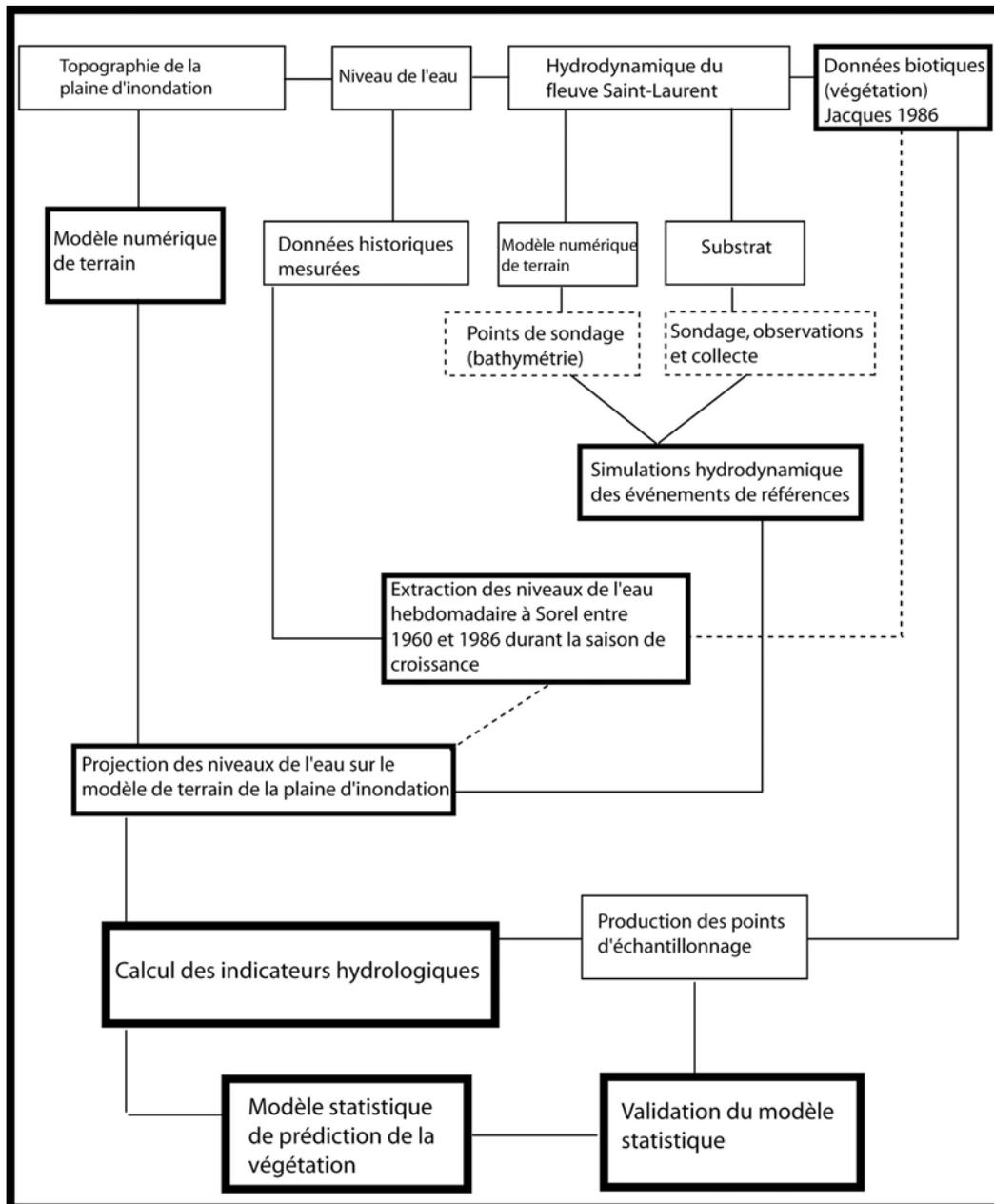


Figure 1 : Schématisation de la méthodologie employée.

2.1 Modèle numérique de terrain de la plaine inondable

Un modèle numérique de terrain couvrant la plaine inondable a été produit afin de projeter adéquatement les niveaux d'eau simulés sur le domaine à l'intérieur de la plaine inondable (Figure 2). Les données de topographie ont été produites à partir de cotes d'inondation au lac Saint-Pierre établies par Norman (1987) à l'aide de nombreux survols des limites d'inondation

atteintes à diverses périodes de la crue de 1983. Sachant que l'extension maximale de l'inondation correspond à une pente de la surface de l'eau, ce niveau peut être converti en valeur de topographie. Les photographies aériennes ont permis de délimiter la surface couverte par les eaux du lac Saint-Pierre pour des niveaux d'eau de 5.17m, 5.45m, 5.68m, 6.09m, 6.37m et 6.66m, enregistrés à une station près de Nicolet. Des simulations hydrodynamiques ont permis de déterminer la pente du niveau de surface pour chacun de ces événements et ainsi d'attribuer une valeur de topographie aux points délimitant les limites de la crue sur la plaine inondable. Les points ont ensuite été intégrés à la base de données de topographie du secteur. La Figure 2 montre le résultat final de l'assemblage du modèle de terrain. La précision générale de ce modèle de terrain est grossièrement estimée à ± 1 m dans la vertical. Les erreurs sont principalement liées à la difficulté à identifier la limite d'inondation dans plusieurs secteurs. La méthodologie employée ainsi que les résultats sont présentés en détail dans Falardeau et *al.* (2000).

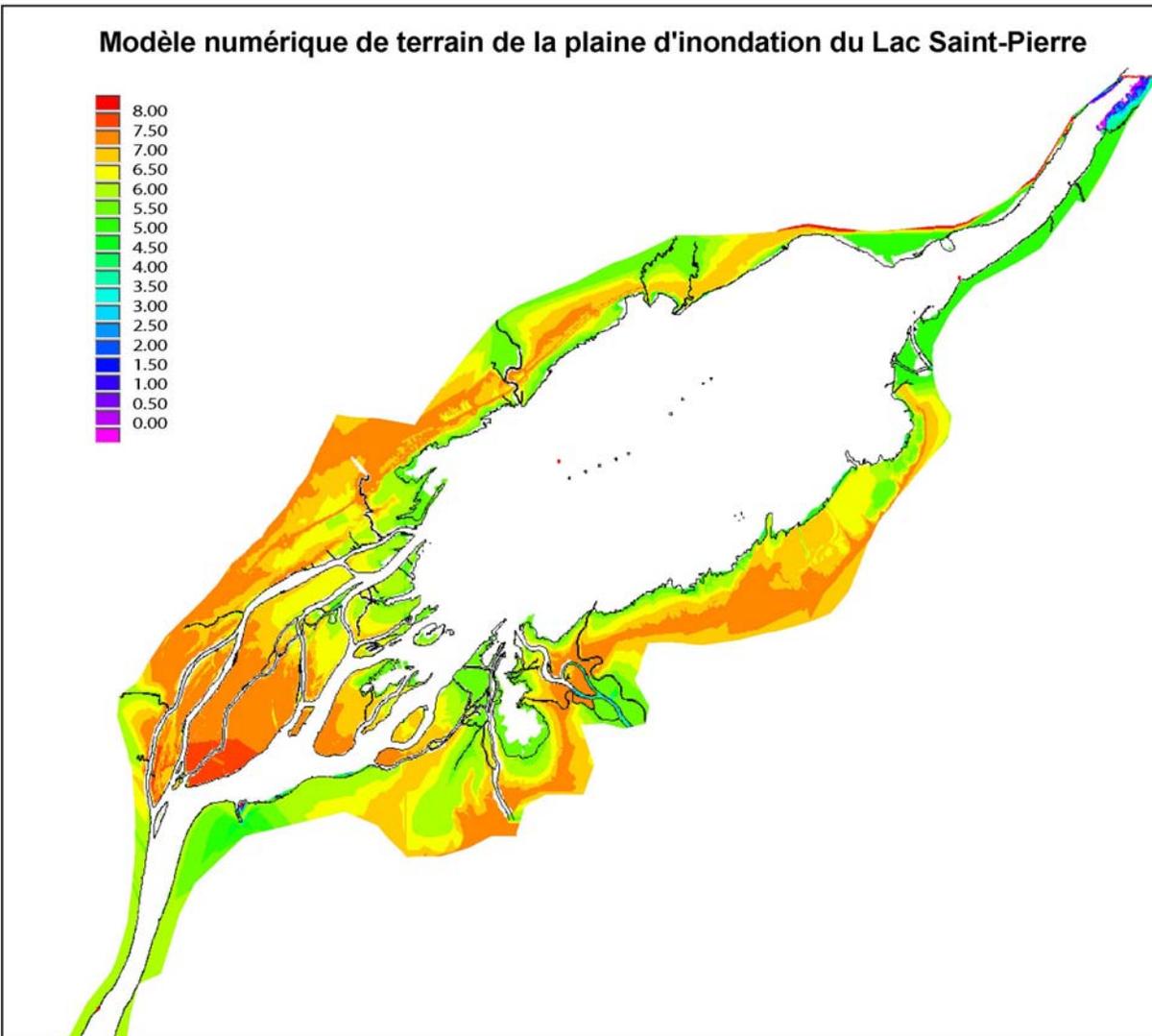


Figure 2 : Modèle numérique de terrain de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre.

2.2 Série temporelle de niveau d'eau

La série temporelle de niveau d'eau utilisée a été enregistrée à la station de Sorel entre 1960 et 1998. Cette période correspond à la période de post-régularisation. Les données de niveau d'eau utilisées ont été traitées afin de conserver uniquement celles correspondant à la période de croissance de la végétation dans la région du lac Saint-Pierre. La règle utilisée pour définir la saison de croissance est celle du 5.5°C, c'est-à-dire que les températures de l'air doivent être supérieures à 5.5°C durant 5 à 7 jours afin de déterminer le début de la saison de croissance et être inférieures à 5.5°C durant 5 à 7 jours afin de déterminer la fin de la période de croissance. La série temporelle des niveaux hebdomadaires pour la période de croissance est présentée à la

Figure 3.

Durant la période 1960 à 1998, les niveaux d'eau à la station de Sorel ont variés entre 3.63m et 7.87m (datum =IGLD85), soit présente une variation totale de 4.24m. À cause de la complexité du milieu et du temps de calcul nécessaire à la simulation de l'hydrodynamique, nous avons utilisé les scénarios d'événements hydrologiques définis par Morin et Bouchard (2000) et couvrant l'ensemble des conditions de 1960 à 1998.

Pour éviter de simuler l'ensemble des conditions qui ont prévalu depuis 1960, les niveaux correspondants à chacune des moyennes hebdomadaires ont été interpolés linéairement par rapport aux huit scénarios définis par Morin et Bouchard (2000). Ainsi, les niveaux d'eau obtenus pour chacune des semaines ont été projetés sur le modèle numérique de terrain de la plaine inondable du lac Saint-Pierre afin de connaître la condition hydrologique (inondé ou non) de la plaine inondable lors de chacune des semaines de la période à l'étude.

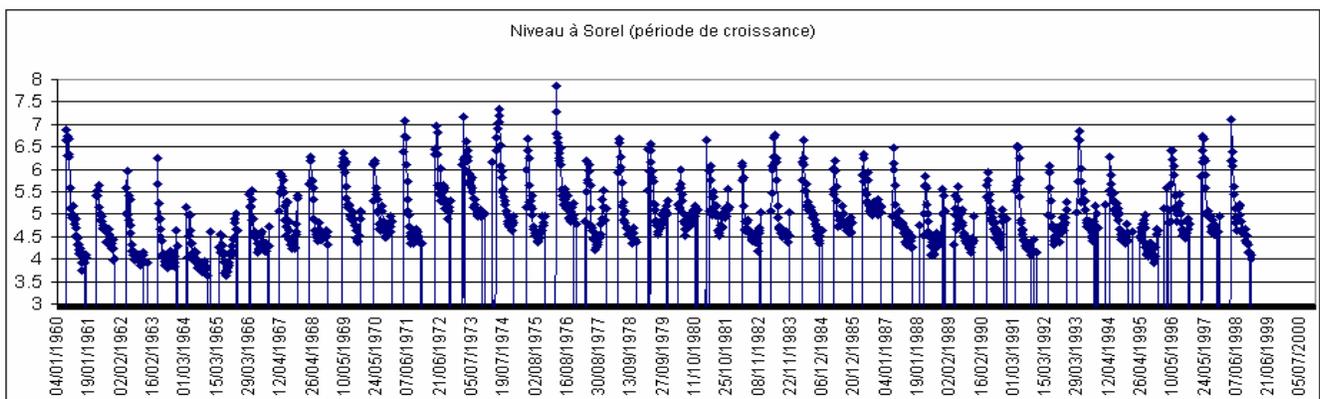
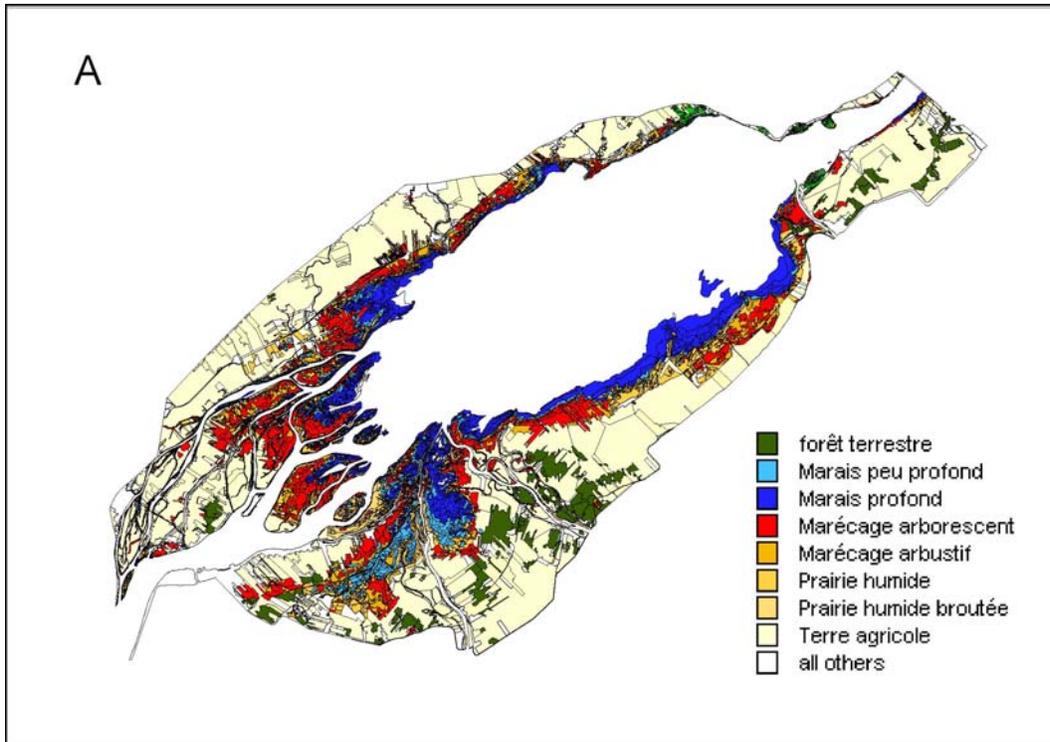


Figure 3 : Niveau d'eau hebdomadaire durant la saison de croissance (période de 1960 à 1999)

2.3 Données biotiques

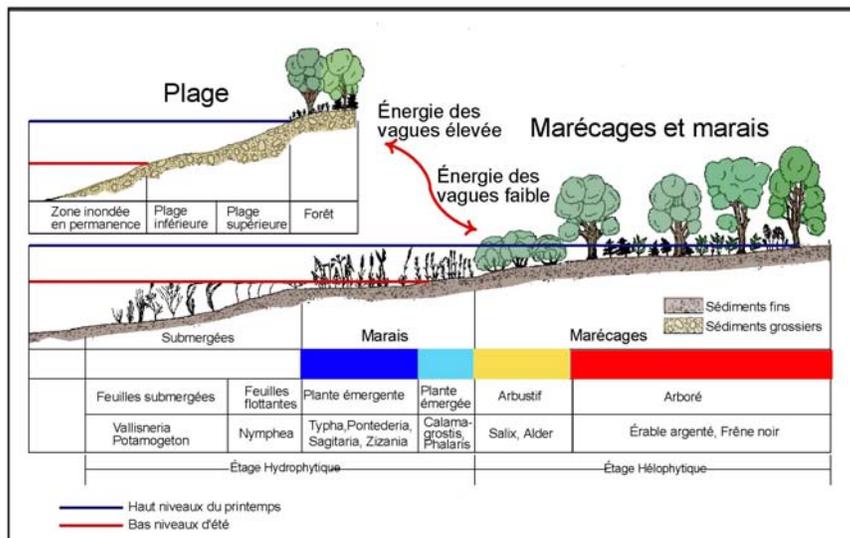
Durant les années 80, des efforts intensifs de cartographie des milieux humides du fleuve Saint-Laurent ont été réalisés. Un travail exhaustif a été produit par Jacques (1986). Ce travail compte 23 cartes à l'échelle 1:10 000, couvrant une superficie totale de 550 km² de milieux humides au

Les données de Jacques (1986) ont été utilisées afin de produire des classes de milieux humides. Ces classes sont le résultat de la combinaison de la catégorie *Classe et sous-classe* dans la base de données de Jacques (1986). Ainsi, six classes de milieux humides ont été retenues : le marais profond, le marais peu profond, le marécage arbustif, le marécage arborescent, la prairie humide et la prairie humide broutée. La Figure 5 présente la distribution spatiale des classes de milieux humides et leur position dans l'étagement de Gauthier (1997).



Distribution spatiale des classes de milieux humides retenues

B



Étagement des milieux humides selon Gauthier (1982)

Figure 5 : A. Classes de milieux humides retenues. B. Position des classes retenues dans l'étagement des milieux humides selon Gauthier (1997).

2.4 Simulation hydrodynamique

Modèle hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique est effectuée à l'aide du modèle HYDROSIM développé à l'INRS-Eau. Il s'agit d'un modèle bidimensionnel qui résout les équations des eaux peu profondes par la méthode des éléments finis. Le modèle mathématique est représenté par le système d'équation de la Figure 6. Ce modèle utilise la forme conservatrice des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement des équations de Saint-Venant et prend en compte localement les paramètres de frottement dus aux substrats, aux plantes aquatiques et à la glace. Il procure en sortie les composantes (x , y) de la vitesse moyenne et le niveau d'eau (intégrées dans la verticale) sur tous les nœuds de calcul. Tout le domaine de simulation est décrit soit directement aux nœuds de calcul, ou encore par interpolation entre ces nœuds. Le modèle prend en compte le recouvrement et le découvrement des berges en fonction du débit et du niveau d'eau.

Grille éléments finis

Le tronçon simulé est subdivisé en éléments triangulaires qui forment le maillage d'éléments finis. La forme et la taille de ces éléments peuvent être adaptées pour représenter la forme et la complexité du terrain, du substrat, des plantes aquatiques ou de toute autre variable. Plus le terrain est complexe, plus le maillage est raffiné et plus le nombre d'éléments est important. Le maillage du tronçon à l'étude est composé de 25 594 éléments et de 49 701 nœuds (Figure 7). La taille des éléments varie de 10 m à 400 m de côté.

Frottement

Le frottement par le substrat est introduit localement dans le calcul de l'hydrodynamique à l'aide d'un coefficient (le « n » de Manning) qui varie ici en fonction de la granulométrie et du type de plantes dans la plaine inondable. La carte de substrat préalablement assemblée et la carte de Jacques (1986) a été utilisée afin d'estimer les coefficients de frottement locaux. Pour les plaines inondables, les frottements utilisés sont inspirés de Chow (1961), tandis que pour le substrat la

méthode définie dans Morin et al (2000) est employée. La Figure 8 montre la distribution spatiale des frottements pour les simulations hydrodynamiques.

Équation de conservation de la masse

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

Équation de conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{xy}) - \tau_x^b - \tau_x^s \right) - f_c q_y = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_y q_x}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y q_y}{H} \right) + c^2 \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial}{\partial x} (H \tau_{yx}) + \frac{\partial}{\partial y} (H \tau_{yy}) - \tau_y^b - \tau_y^s \right) + f_c q_x = 0$$

$x(x,y)$	= Coordonnées (x vers l'est et y vers le nord)	f_c	= force de Coriolis ($f_c=2\omega \sin\phi$) (s^{-1})
q_x, q_y	= débit spécifique selon x et y (m^2/s)	τ_{ij}	= contraintes de Reynolds (kg/s^2m)
h	= hauteur d'eau (niveau)	τ_x^b, τ_y^b	= friction au fond en x et en y (kg/s^2m)
H	= profondeur de la colonne d'eau ($=h-z$) (m)	τ_x^s, τ_y^s	= friction en surface en x et en y (kg/s^2m)
c	= célérité des vagues ($c = \sqrt{gH}$) (m/s)		
ρ	= masse spécifique de l'eau ($10^3 kg/m^3$)		
$u(u,v)$	= composant de la vitesse (m/s) où;		
	$u = q_x / H$ (m/s)		
	$v = q_y / H$ (m/s)		

Figure 6 : Équation des ondes longues (forme conservatrice) en régime permanent résolues par HYDROSIM (Modèle de Saint-Venant).

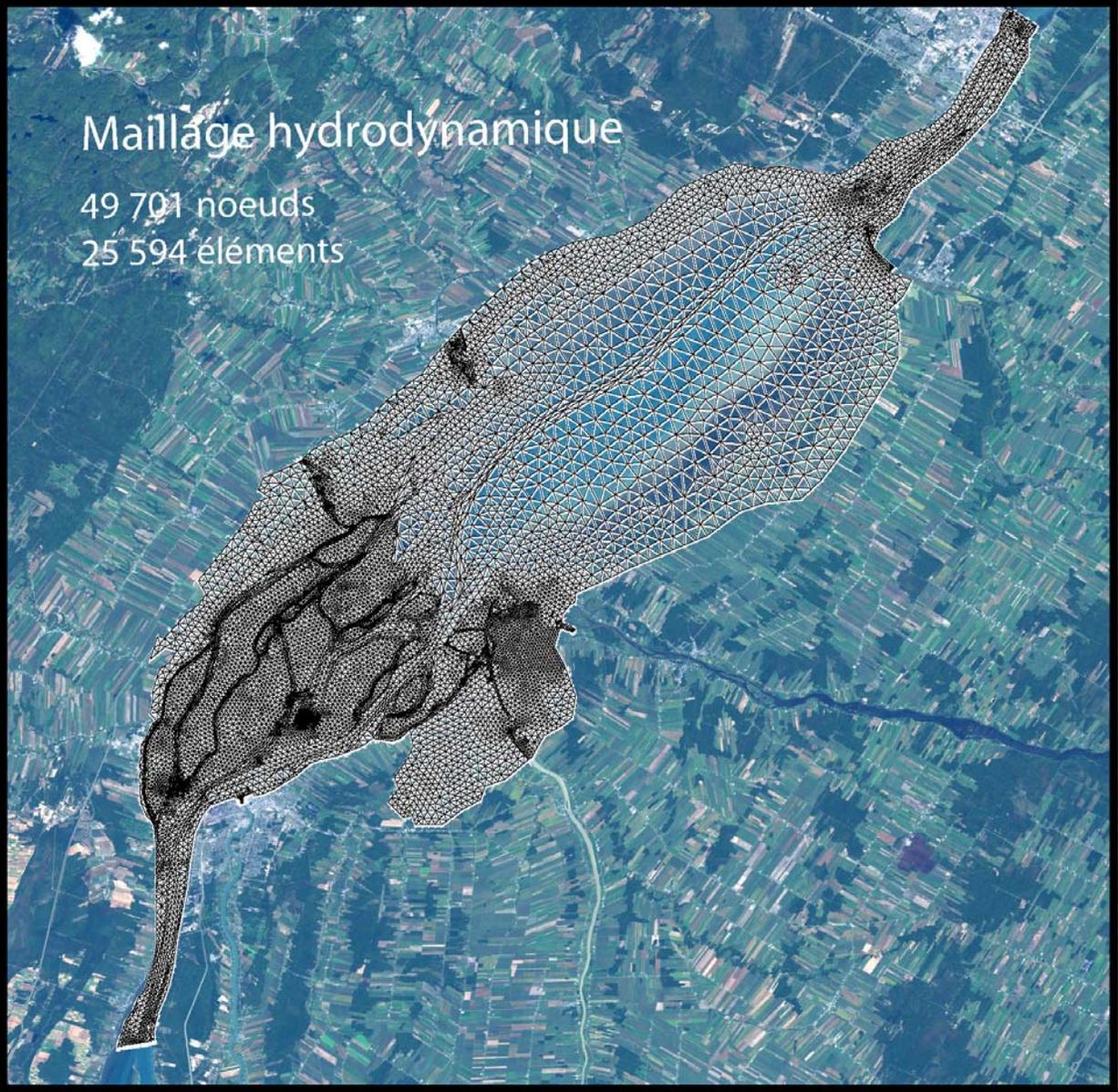


Figure 7 : Maillage hydrodynamique utilisé.

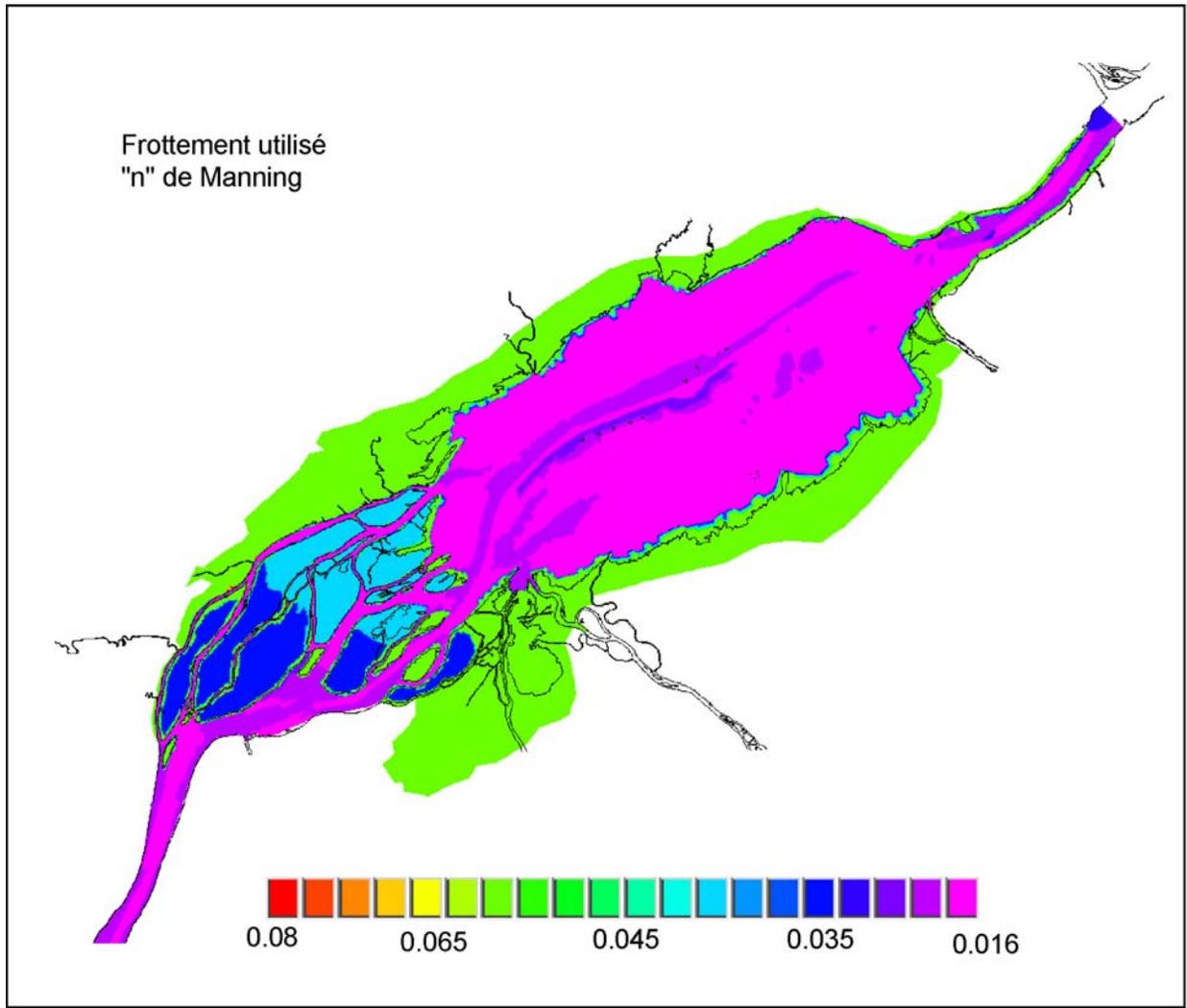
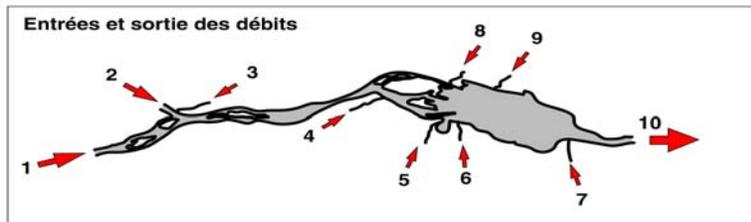


Figure 8 : Frottement (n de manning) utilisé dans les simulations hydrodynamiques.

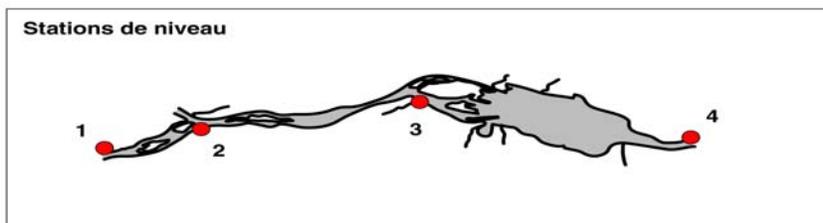
Conditions limites

Les scénarios choisis ont été caractérisés par le débit à Sorel et couvrent le spectre des conditions possibles (Morin et Bouchard 2001). La position des entrées d'eau du modèle hydrodynamique est présentée à la Figure 9. Pour chacun des scénarios, les conditions de débits de tous les tributaires y sont présentées. Les stations de niveau sont présentées à la Figure 10.



Scénario	Tributaires amont de Sorel			Tributaires aval de Sorel						Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Sorel	Lasalle	MIP	Assomption	Richelieu	Yamaska	Saint-François	Nicolet	Maskinongé	duLoup	Trois-Rivières	
m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s	
8	20 500	14 531	5 374	550	1 100	410	980	380	122	107	23 554
7	17 500	13 174	3 824	502	1 044	345	850	233	119	97	20 188
6	14 500	11 396	2 772	332	898	220	572	130	105	92	16 517
5	12 000	10 102	1 750	148	615	126	330	76	43	37	13 227
4	9 500	8 304	1 142	54	326	52	155	30	16	14	10 093
3	8 000	6 997	960	43	240	38	139	24	14	14	8 469
2	6 500	5 740	728	32	148	29	128	19	8	11	6 843
1	5 000	4 572	398	30	137	28	120	17	7	10	5 319

Figure 9 : Conditions limites en débits des entrées et de la sortie d'eau pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières.



Scénario	Jetée #1	Varenes	Sorel	Trois-Rivières
	1	2	3	4
	zc = 5.564	zc = 4.836	zc = 3.775	zc = 2.942
8	9.82	9.06	8.01	7.24
7	8.80	7.98	6.92	6.16
6	7.99	7.20	6.22	5.53
5	7.19	6.37	5.42	4.69
4	6.30	5.57	4.74	4.06
3	5.61	4.95	4.17	3.55
2	4.95	4.20	3.56	2.75
1	4.29	3.48	2.96	2.52

Figure 10 : Conditions limites en débits des entrées et de la sortie d'eau pour le tronçon Montréal/Trois-Rivières.

Validation des simulations

La validation du modèle hydrodynamique a été effectuée avec les niveaux d'eau mesurés lors d'un événement de bas débit au printemps 1999 et lors d'un événement de haut débit au printemps 1996. Dans tous les cas, la vérification du débit simulé aux frontières du modèle et de sa conservation sur l'ensemble du domaine est une condition *sine qua non* de la validité de la simulation. Une quarantaine de simulations ont été effectuées afin de moduler les coefficients de frottement offrant les meilleurs résultats sur les niveaux et les vitesses. La Figure 11 montre la correspondance entre les niveaux d'eau mesurés aux stations de Lanoraie, Sorel, Courbe #2 (lac Saint-Pierre), Port Saint-François et Trois-Rivières. Pour l'événement du printemps 1999, les niveaux d'eau obtenus sont près des niveaux observés. L'écart maximum est de 3 cm à la station de Sorel. Pour l'événement de 1996, l'écart maximum est de 4 cm pour la station de Sorel. Les simulations surestiment les niveaux d'eau de moins de 5 cm (Figure 11).

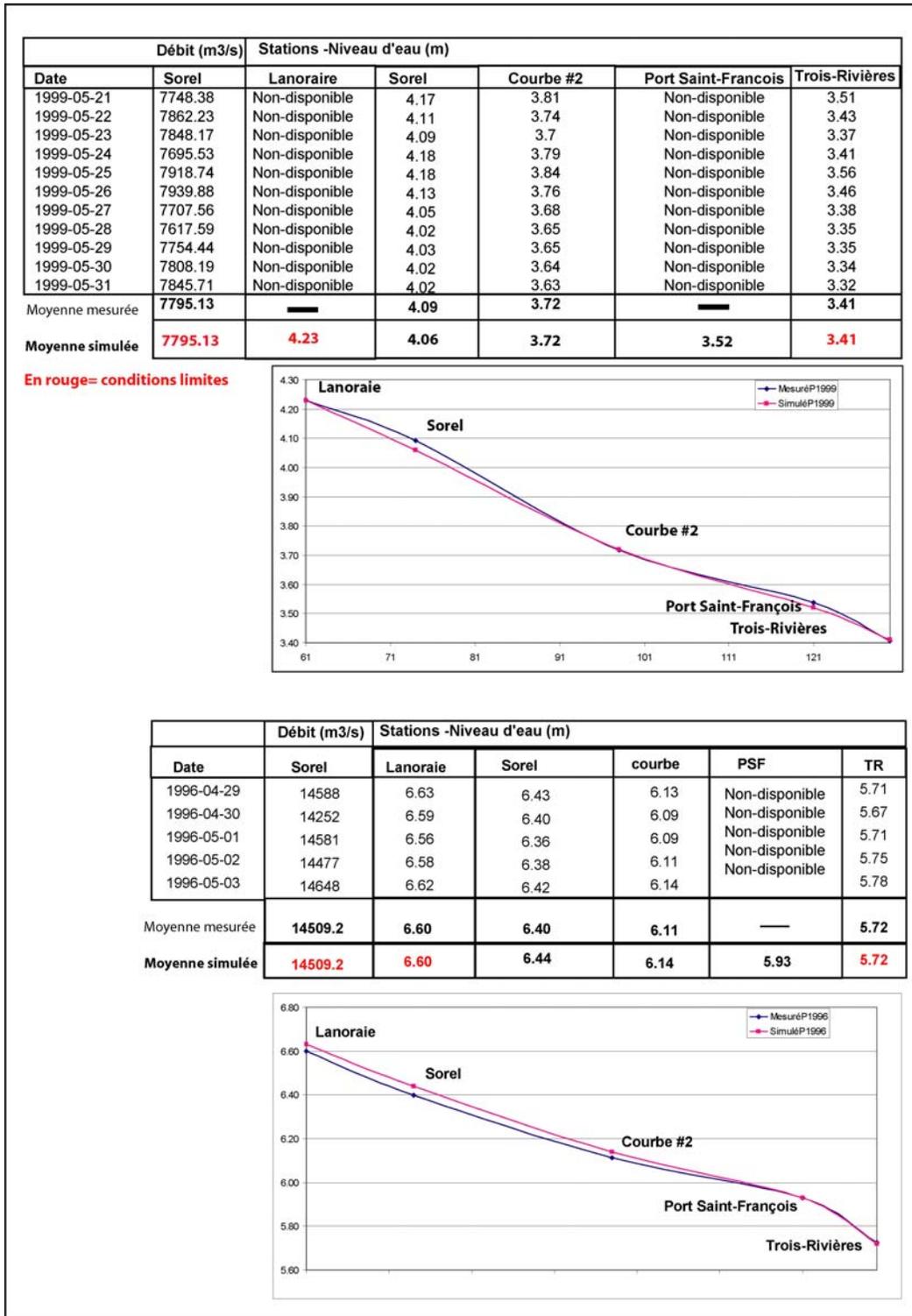


Figure 11 : Résultats de calibration du modèle hydrodynamique.

2.5 Échantillonnage des données biotiques

La partie amont du lac Saint-Pierre, soit l'aval des îles de Sorel et de la baie de Maskinongé a été sélectionnée pour l'analyse (Figure 12). Cette région a été choisie puisqu'elle est moins soumise aux pressions anthropiques et son développement est plus naturel que d'autres régions du lac Saint-Pierre. Ce choix permet de conserver hors du processus de calibration une partie importante de la base de données qui servira pour la validation éventuelle des relations physiques et abiotiques.

Des stations d'échantillonnage ont été placées dans chacun des polygones de végétation de la section choisie (Figure 13). Les points ont été sélectionnés de manière à occuper une surface régulière tout en demeurant relativement loin d'une limite de polygone. Ceci a comme objectif d'éviter les zones de transition et les erreurs de délimitation dans l'échantillonnage des données concernant les plantes. Tous les points placés ont pris l'attribut de la classe de végétation de la base de données de plante. Les valeurs attribuées aux points d'échantillonnage sont binaires, c'est-à-dire que lorsqu'il y a présence au point d'une des cinq classes de milieux humides, cette classe se voit attribuer la valeur 1 et les autres classes la valeur 0. Ainsi, pour chacun des 5950 points, la présence et l'absence de chacune des classes est connue.

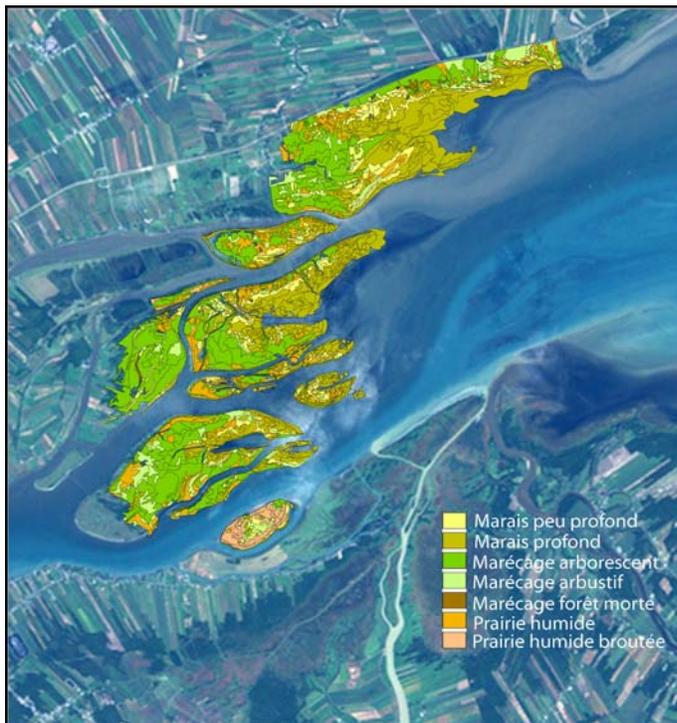


Figure 12 : Sous-aire d'étude, classe de végétation et points d'échantillonnage.

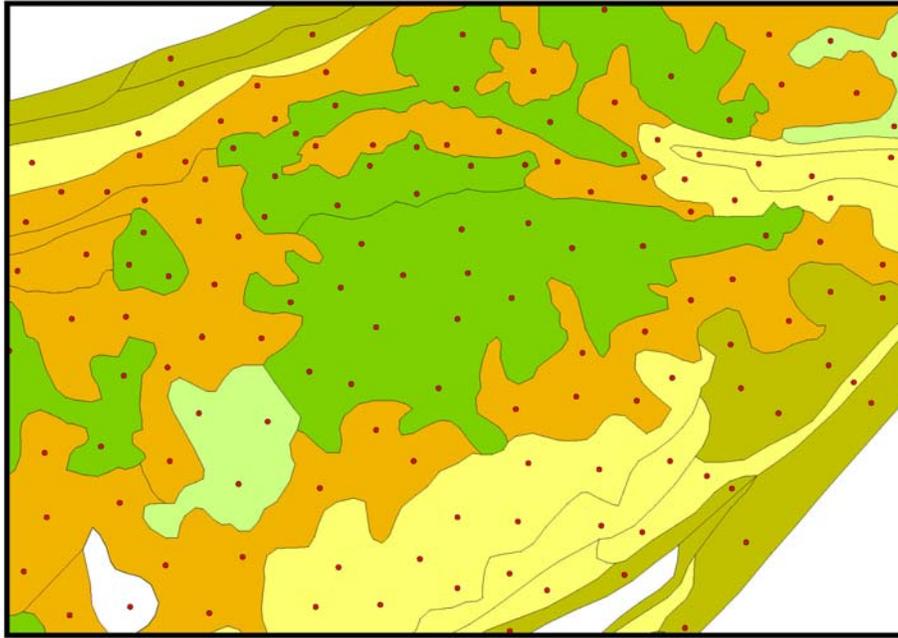


Figure 13 : Exemple de distribution des points d'échantillonnage à l'intérieur des polygones de végétation.

Projection des valeurs de topographie et de niveaux aux points d'échantillonnage

Projection de la topographie

La référence spatiale de toutes les données utilisées dans la modélisation de la végétation émergente du lac Saint-Pierre permet d'attribuer aux points d'échantillonnage des valeurs nodales simulées ou mesurées. Deux types de valeurs nodales ont été projetés sur les points d'échantillonnage, soit la topographie, à partir du modèle de terrain du lit et de la plaine d'inondation (Figure 14) et les niveaux d'eau simulés. La projection des niveaux d'eau a été faite de manière à obtenir, aux points d'échantillonnage, le niveau de l'eau hebdomadaire durant la période de croissance entre 1967 et 1998. Les niveaux hebdomadaires projetés ont été calculés à partir des huit simulations hydrodynamiques.

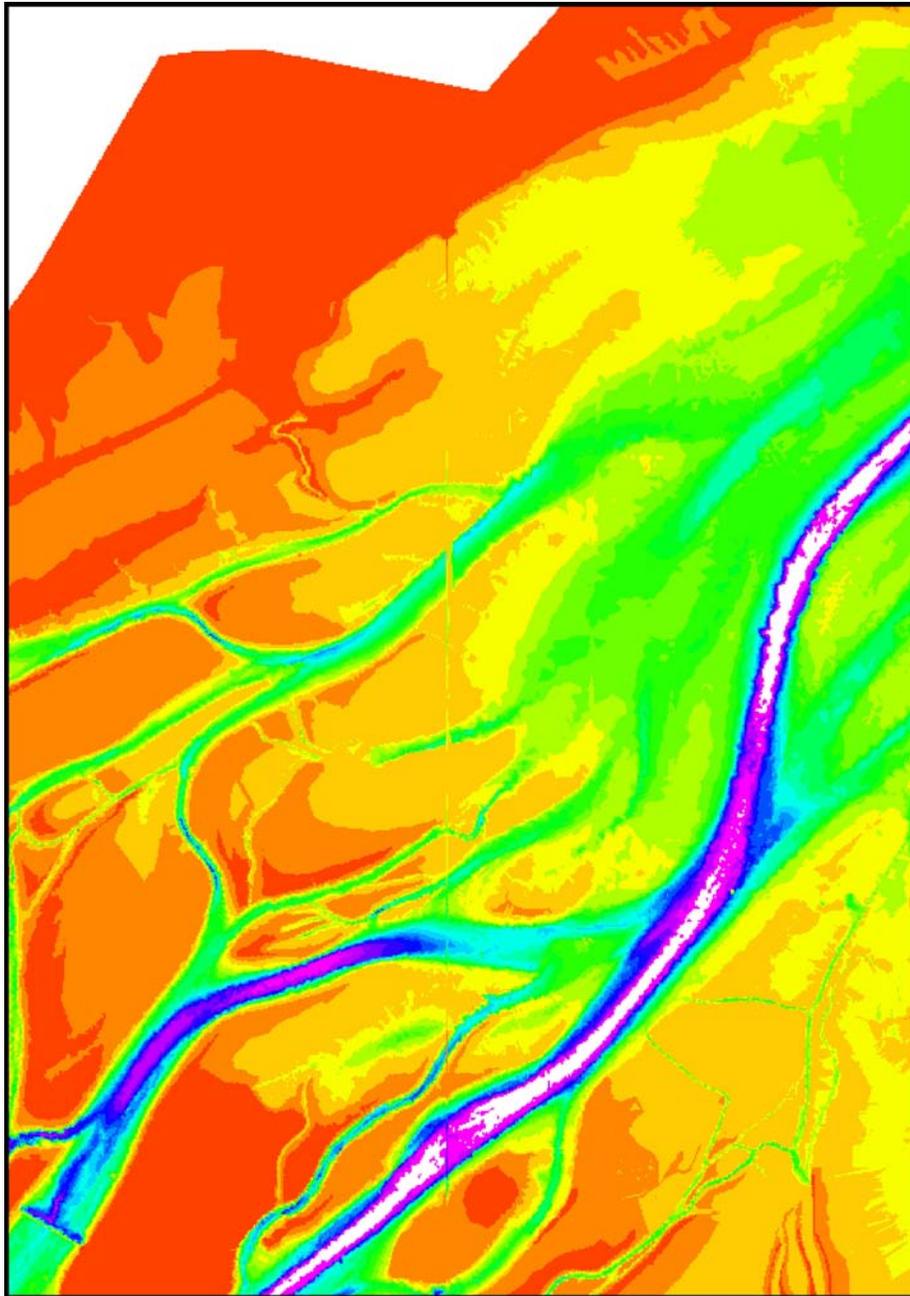


Figure 14 : Modèle de terrain utilisé pour la projection de la topographie sur les points d'échantillonnage.

Projection des niveaux d'eau

Les niveaux d'eau qui ont été projetés sont ceux correspondant aux moyennes hebdomadaires durant la saison de croissance pour la période de 1960 à 1998 mesurés à la station de Sorel. Afin de distribuer les valeurs de niveau sur l'ensemble des points d'échantillonnage, les simulations hydrodynamiques ont été utilisées. Pour ne pas avoir à effectuer plus de 600 simulations (une

simulation par niveau hebdomadaire), les niveaux des scénarios simulés ont été interpolés linéairement en fonction de leur position relative par rapport à ces scénarios. Comme chacun des scénarios correspond à une valeur de niveau à Sorel, il devient possible de comparer et d'utiliser ces valeurs sur la série de valeurs mesurées. La méthode utilisée pour interpoler les valeurs des simulations en fonction des moyennes hebdomadaires est présentée à la Figure 15.

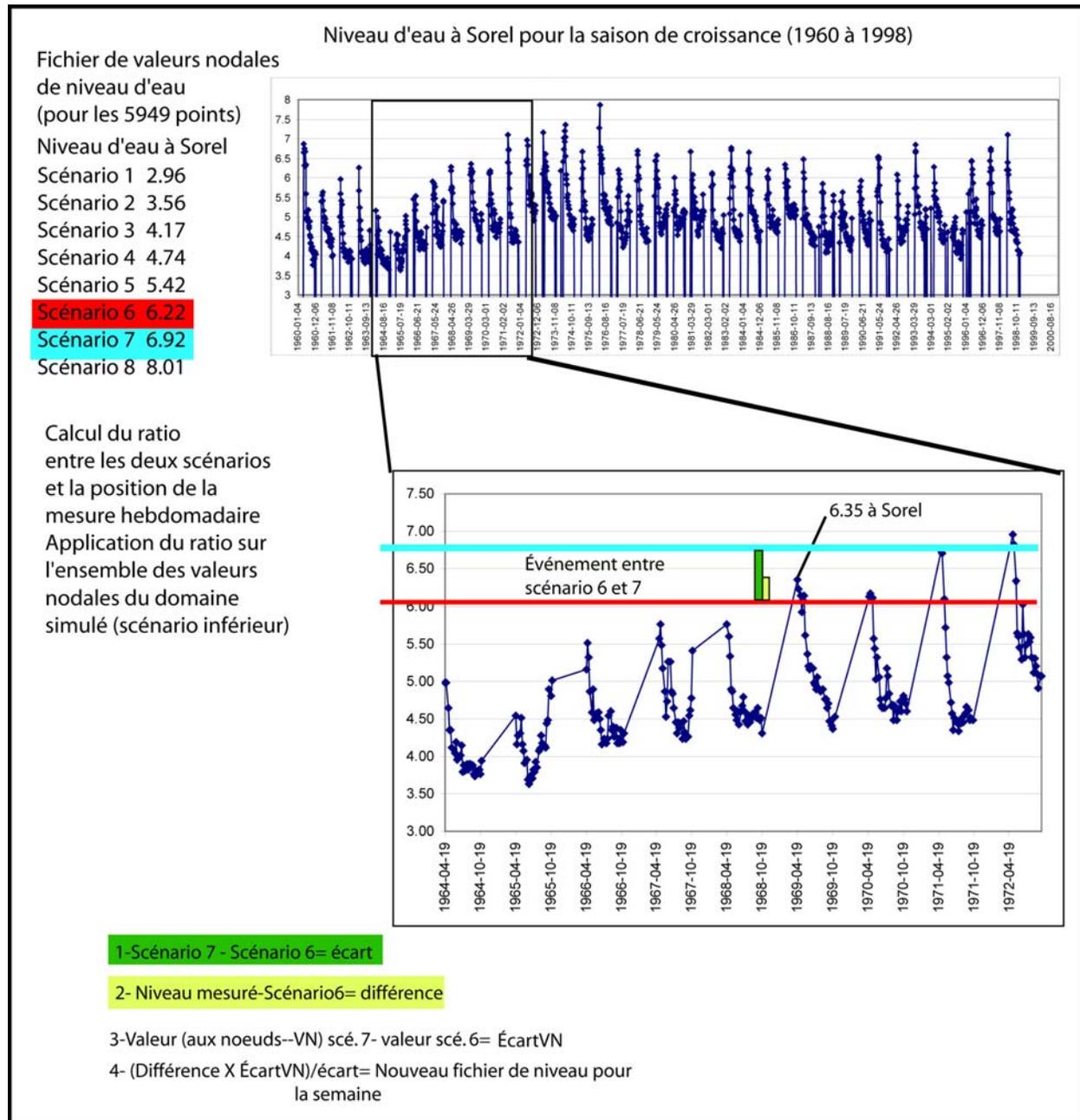


Figure 15 Interpolation des niveaux hebdomadaires à partir des scénarios simulés.

2.6 Données abiotiques et indicateurs hydrologiques

L'approche utilisée dans la production des variables abiotiques a été inspirée de Toner et Keddy (1997). Ces derniers utilisent divers pas de temps pour des indicateurs liés à l'hydrologie. Le temps écoulé depuis un certain nombre d'évènements hydrologiques joue un rôle important dans l'évolution des milieux humides. Ainsi, Toner et Keddy (1997) ont développé des variables pour les milieux humides qui tiennent compte du temps et des conditions hydrologiques importantes pour la végétation des milieux humides. Dans leur étude, ils ont utilisé sept variables hydrologiques : 1) La fraction de la saison de croissance durant laquelle l'inondation arrive; 2) le dernier jour de la première crue; 3) la durée de la deuxième crue; 4) la profondeur moyenne d'inondation; 5) le nombre de crues par saison de croissance; 6) le nombre de jours exondés précédant la deuxième crue; 7) le temps (premier jour) de la deuxième crue. Chacune de ces variables hydrologiques ont été calculées selon quatre intervalles temporelles: 3 ans, 7 ans, 12 ans et 18 ans (ans = saison de croissance). Les résultats obtenus par régressions logistiques montrent que les variables de Toner et Keddy (1997) expliquent jusqu'à 80% de la présence ou de l'absence des herbacés ou des marécages arborés.

Certains concepts de Toner et Keddy (1997) ne peuvent être appliqués directement à l'aire d'étude, comme par exemple celui lié à la deuxième crue qui ne semble pas être aussi important que dans leur site d'étude. Par contre, à cause des nombreuses variations de niveau d'eau nombreuses dans le fleuve Saint-Laurent durant une saison de croissance, des indicateurs hydrologiques similaires ont été développés.

Variables indépendantes

Variables hydrologiques

Les variables indépendantes (hydrologiques) ont été calculées à partir des données de niveau d'eau hebdomadaires simulées et interpolées à chacun des points d'échantillonnage. Afin de tenir compte de l'effet du temps, cinq pas temporels ont été choisis : 18 ans (1967 à 1985), 12 ans (1973 à 1985), 7 ans (1978 à 1985), 3 ans (1982 à 1985) et 1 ans (1985).

1- Nombre de semaines inondées (NbSI) : Somme du nombre des semaines (par saison de croissance) dont la valeur de niveau d'eau aux points d'échantillonnage était supérieure à la valeur de la topographie.

NbSI18 (18 ans) : Somme de NbSI de 1967 à 1985

NbSI12 (12 ans) : Somme de NbSI de 1973 à 1985

NbSI7 (7 ans) : Somme de NbSI de 1978 à 1985

NbSI3 (3 ans) : Somme de NbSI de 1982 à 1985

NbSI1 (1 ans) : Somme de NbSI de 1985

2- Nombre de semaines exondées (NbSE) : Somme du nombre des semaines (par saison de croissance) dont la valeur de niveau d'eau aux points d'échantillonnage était inférieure à la valeur de topographie.

NbSE18 (18 ans) : Somme de NbSE de 1967 à 1985

NbSE12 (12 ans) : Somme de NbSE de 1973 à 1985

NbSE7 (7 ans) : Somme de NbSE de 1978 à 1985

NbSE3 (3 ans) : Somme de NbSE de 1982 à 1985

NbSE1 (1 ans) : Somme de NbSE de 1985

3- Nombre total de variations (cycle inondation/exondation :NbTVA) : Somme du nombre de cycles (minimum une semaine) par saison de croissance

NbTVA18 (18 ans) : Somme de NbTVA de 1967 à 1985

NbTVA12 (12 ans) : Somme de NbTVA de 1973 à 1985

NbTVA7 (7 ans) : Somme de NbTVA de 1978 à 1985

NbTVA3 (3 ans) : Somme de NbTVA de 1982 à 1985

NbTVA1 (1 ans) : Somme de NbTVA de 1985

4- Profondeur moyenne (PFM) : Moyenne de la profondeur de la colonne d'eau aux points d'échantillonnage par saison de croissance.

PFM18 (18 ans) : Moyenne de PFM de 1967 à 1985

PFM12 (12 ans) : Moyenne de PFM de 1973 à 1985

PFM7 (7 ans) : Moyenne de PFM de 1978 à 1985

PFM3 (3 ans) : Moyenne de PFM de 1982 à 1985

PFM1 (1 ans) : Moyenne de PFM de 1985

5- Profondeur moyenne d'inondation (MoyIN) : Moyenne de la profondeur lorsque la valeur de niveau d'eau est supérieure à la valeur de topographie aux points d'échantillonnage

MoyIN18 (18 ans) : Moyenne de MoyIN de 1967 à 1985

MoyIN12 (12 ans) : Moyenne de MoyIN de 1973 à 1985

MoyIN7 (7 ans) : Moyenne de MoyIN de 1978 à 1985

MoyIN3 (3 ans) : Moyenne de MoyIN de 1982 à 1985

MoyIN1 (1 ans) : Moyenne de MoyIN de 1985

6- Profondeur moyenne d'exondation (MoyEX) : Moyenne de la profondeur lorsque la valeur de niveau d'eau est inférieure à la valeur de topographie au point d'échantillonnage (exprime la profondeur de la nappe phréatique)

MoyEX18 (18 ans) : Moyenne de MoyEX de 1967 à 1985

MoyEX12 (12 ans) : Moyenne de MoyEX de 1973 à 1985

MoyEX7 (7 ans) : Moyenne de MoyEX de 1978 à 1985

MoyEX3 (3 ans) : Moyenne de MoyEX de 1982 à 1985

MoyEX1 (1 ans) : Moyenne de MoyEX de 1985

Une seule variable physique *In situ*, provenant d'une description du site a été calculée, soit la pente du terrain. La pente a été dérivée de la topographie du terrain. Cette variable permet de donner une information caractéristique du drainage local.

2.7 Modèle statistique

La capacité des variables simulées à représenter la distribution des plantes émergentes a été testée en utilisant une méthode de régression logistique multivariée avec une technique pas à pas régressive (*backwards stepwise*). Cette méthode a été utilisée avec succès dans la prédiction de la présence des macrophytes submergés au lac Saint-François (Morin 2001). Les indices de probabilité de présence peuvent être représentés de la façon suivante:

$$IPH = 1 / (1 + e^{-\lambda})$$

où $\lambda = P_0 + (P_1 V_1 + P_2 V_1^2) + (P_3 V_2 + P_4 V_2^2) + \dots + (P_{2n-1} V_n + P_{2n} V_n^2)$

où V_n sont les variables d'habitat et P_{2n} sont les paramètres ajustés par la régression logistique multivariée. Les modèles logistiques ont été ajustés avec le module VGLZ de STATISTICA (StatSoft 2000). Les résultats sont donnés en termes de probabilité de présence ; une présence observée est prédite correctement si la probabilité calculée est plus grande qu'un certain seuil, tandis que des valeurs plus faibles prédisent une absence. Le seuil de probabilité de présence et d'absence correspond au ratio des présences observées pour chacune des classes de milieux humides dans la base de données de calibration (Tableau 2). Les régressions logistiques des six classes de milieux humides sont basées sur sept variables qui sont présentées de façon synoptique dans le

Tableau 3. Des 5950 points d'échantillonnage, 625 points ont été retirés de la base de données de calibration par tirage au hasard afin de servir de validation aux modèles de régressions logistiques.

Tableau 2 : Seuils de probabilité pour la prédiction des absences et des présences employés avec les modèles de régression et tels que calculés à l'aide du ratio des présences observées et du nombre total d'échantillons (5325) dans la base de données de calibration.

Espèce (Total N=5325)	Présences (N)	Ratio
MP (<i>Marais profond</i>)	1513	0.28
MPP (<i>Marais peu profond</i>)	753	0.14
MARBU (<i>Marécage arbustif.</i>)	438	0.08
MARBO (<i>Marécage arborescent</i>)	370	0.26
PH (<i>Prairie humide</i>)	743	0.14

Tableau 3 : Description synoptique des 37 facteurs abiotiques utilisés dans le modèle de régression logistique.

Variables		Étendue		Moyenne
		Min	Max	
NbSI18	Nombre de semaines inondées en 18 ans	4.00	601.00	252.22
NbSI12	Nombre de semaines inondées en 12 ans	4.00	415.00	176.93
NbSI7	Nombre de semaines inondées en 7 ans	0.00	256.00	98.95
NbSI3	Nombre de semaines inondées en 3ans	0.00	129.00	48.68
NbSI1	Nombre de semaines inondées en 1 ans	0.00	33.00	12.05
NbSe18	Nombre de semaines exondées en 18 ans	0.00	597.00	348.78
NbSe12	Nombre de semaines exondées en 12 ans	0.00	411.00	238.07
NbSe7	Nombre de semaines exondées en 7 ans	0.00	256.00	157.05
NbSe3	Nombre de semaines exondées en 3 ans	0.00	129.00	80.32
NbSe1	Nombre de semaines exondées en 1 ans	0.00	33.00	20.95
NbTVA18	Nombre total de variations (in-ex) en 18 ans	18.00	90.00	56.58
NbTVA12	Nombre total de variations (in-ex) en 12 ans	14.00	68.00	44.34
NbTVA7	Nombre total de variations (in-ex) en 7 ans	7.00	42.00	23.32
NbTVA3	Nombre total de variations (in-ex) en 3 ans	3.00	25.00	11.26
NbTVA1	Nombre total de variations (in-ex) en 1 ans	1.00	14.00	2.83
PFM18	Profondeur moyenne en 18 ans	-1.85	7.40	0.08
PFM12	Profondeur moyenne en 12 ans	-1.84	7.43	0.09
PFM7	Profondeur moyenne en 7ans	-2.08	7.31	0.00
PFM3	Profondeur moyenne en 3 ans	-2.12	7.28	0.00
PFM1	Profondeur moyenne en 1 ans	-2.13	7.40	0.63
MoyIN18	Profondeur moyenne d'inondation en 18 ans	0.03	7.26	0.64
MoyIN12	Profondeur moyenne d'inondation en 12 ans	0.05	7.43	7.26
MoyIN7	Profondeur moyenne d'inondation en 7ans	0.00	7.31	0.56
MoyIN3	Profondeur moyenne d'inondation en 3 ans	0.00	7.28	0.59
MoyIN1	Profondeur moyenne d'inondation en 1 ans	0.00	0.00	-0.57
MoyEX18	Profondeur moyenne d'exondation en 18 ans	-2.01	7.26	-0.56
MoyEX12	Profondeur moyenne d'exondation en 12 ans	-1.99	0.00	7.26
MoyEX7	Profondeur moyenne d'exondation en 7ans	-2.08	0.00	-0.59
MoyEX3	Profondeur moyenne d'exondation en 3 ans	-2.12	0.00	-0.63
MoyEX1	Profondeur moyenne d'exondation en 1 ans	-1.83	0.00	0.00
Pentetopo	Pente locale du fond	0.0000	0.0786	0.0034

3 Résultats

3.1 Hydrodynamique

Les Figure 16 et Figure 17 présentent les résultats des simulations hydrodynamiques des scénarios de référence. Les résultats présentés sont : la profondeur et les niveaux de surface de l'eau pour les huit scénarios.

3.2 Régressions logistiques

Les paramètres ajustés des équations polynomiales obtenues par régression logistique sont présentés au Tableau 4. Tous les modèles de régression obtenus sont significatifs, tel qu'indiqué par la signifiante statistique des variables sélectionnées ($p < 0.05$) et par le résultat global de prédictions correctes (63.5%). Le modèle statistique donne de bons résultats de probabilité de présence et d'absence. Le modèle prévoit correctement de 69% (marécage arborescent) à 58% (marais profond) les présences et les absences des grandes classes de milieux humides.

Les variables abiotiques les plus importantes sont : la pente du terrain qui est significative pour les cinq classes de milieux humides, le nombre de semaines inondées en 7 ans (NbSI7) qui est significative pour quatre classes de milieux humides et la profondeur moyenne en 7 ans (PFM7) qui est significative pour trois classes. Les autres variables significatives répondent à deux des cinq classes de milieux humides (NbSI 18 et 12, NTVA 18 et 7, PFM 12, MoyIN 18, 12 et 7 et MoyEX 18 et 3). Quelques variables n'ont pas été sélectionnées comme significatives par la régression : le nombre de semaines exondées, et ce, pour tous les pas de temps ainsi que la majorité des variables lorsqu'exprimée sur un an.

Marais profond

Le modèle représentant la classe des marais profonds a été calibré à partir de 1513 présences. Il s'agit de la classe la plus abondante de l'échantillonnage total. Le modèle de régression logistique a retenu sept variables comme étant significatives : NBI7, NBTVA18, PFM7, PFI3, MoyEX7, MoyEX3 et la pente de la topographie. Toutes ces variables ont une signifiante statistique forte ($p = 0.018$ à > 0.0000). L'ordonnée à l'origine (intercept) a une signifiante relativement faible en comparaison avec les autres classes de milieux humides ($p = 0.0187$). Les

rendements des prédictions de présence et d'absence varient entre 53.2% et 64.8% et ce tant pour les données de calibration que pour celles de validation.

Si nous excluons la pente (qui représente une caractéristique du terrain) les marais profonds sont généralement liés à des variables définies sur 3 et 7 ans. Seul le nombre de cycles d'inondation et d'exondation sur 18 ans ressort significatif. Cette variable possède un signe positif qui signifie que plus le nombre de cycle d'inondation et d'exondation à long terme est grand, plus la probabilité de retrouver un marais profond est importante.

Les marais profonds apparaissent liés aux inondations durant la saison de croissance mais aussi à la profondeur moyenne de l'eau durant cette même période. La profondeur de la nappe phréatique semble également jouer un rôle important lors des périodes d'exondation.

Marais peu profond

Le modèle représentant la classe des marais peu profonds a été calibré à partir de 753 présences. Il s'agit de la troisième classe la plus abondante de l'échantillonnage total. Le modèle de régression logistique a retenu sept variables comme étant significatives : NbTVA 18, PFM7, PFM3, MoyIN18, MoyEX 18, MoyEX12 et la pente de la topographie. Toutes les variables ont une signification statistique forte ($p= 0.02$ à 0.00000). L'ordonnée à l'origine (*intercept*) a une signification relativement forte comparativement aux autres classes de milieux humides. Les rendements des prédictions de présence et d'absence varient entre 49.4% et 70.3% et ce, tant pour les données de calibration que pour celle de validation.

La caractéristique la plus frappante dans les résultats de la classe des marais peu profonds est l'absence de relations significatives pour les variables *nombre de semaines inondées* et *nombre de semaines exondées*. Ce sont les variables qui font directement référence au temps d'un ou des événements. Les variables d'intensité (PFM, MoyIN et MoyEX) d'événements ressortent significativement fortes pour la classe des marais peu profonds. Celle-ci semblent liés aux intensités des inondations et non pas à leur durée.

Marécage arbustif

Le modèle des marais peu profonds a été calibré à partir de 438 présences. Il s'agit de la classe la moins abondante de l'échantillonnage total. Le modèle de régression logistique a retenu un nombre très important (14) de variables comme étant significatives : NbSI 12,7,3 et 1, NbTVA 12, 7 et 3, PFM 7 et 3, MoyIn 18 et 7, MoyEx18, 3 et la pente du terrain. L'intervalle de temps

dominant pour les variables significatives est de 3 à 12 ans. Toutes les variables ont une signifiante forte ($p=0.0095$ et 0.000000) sauf les variables NbTVA 12,7 et 3 qui ont des significances un peu plus faibles ($p=0.0195$ à 0.029). L'ordonnée à l'origine (*intercept*) a une signifiante très forte (la plus forte relativement à toutes les autres classes de milieux humides). Les rendements des prédictions de présence et d'absence varient entre 47.6% et 70.3% et ce, tant pour les données de calibration que pour celles de validation. Le fait que le modèle statistique ait retenu 14 variables soulève des interrogations quant à sa validité pour cette classe de milieux humides et limite considérablement les interprétations. La seule interprétation valable actuellement est que ces milieux semblent être difficiles à interpréter. Il est possible que ce type de marécage représente un état temporaire dans une succession végétale. Des analyses détaillées avec un modèle de terrain précis seront nécessaires afin de tirer des conclusions quant à l'écologie de ces milieux au lac Saint-Pierre.

Marécage arborescent

Le modèle de marécage arborescent a été calibré à partir de 1370 présences. Il s'agit de la deuxième classe la plus abondante de l'échantillonnage total. Le modèle de régression logistique a retenu sept variables comme étant significatives : NbSI 18, 12 et 7, NbTVA 7, MoyIN 12 et 7 et la pente du terrain. Toutes ces variables sont fortement significatives ($p= 0.018$ à 0.00000). L'ordonnée à l'origine (*intercept*) est aussi fortement significative ($p=0.000000$). Les rendements des prédictions de présence et d'absence varient entre 48.4% et 72.5% et ce, tant pour les données de calibration que pour celles de validation. Les marécages arborescents n'ont pas de relations significatives avec les variables liées aux périodes d'exondation (nombre de semaines exondées et profondeur de la nappe phréatique) et avec la profondeur moyenne. En comparaison avec les autres classes de milieux humides, les marécages arborescents ont des pas de temps relativement grands (18, 12 et 7 ans).

Prairies humides

Le modèle statistique représentant la classe de prairie humide a été calibré à partir de 743 présences. Le modèle de régression logistique a retenu sept variables comme étant significatives : NbSI 18, 7 et 3, PFM 12 et 7, MoyIN12 et la pente. Toutes ces variables sont fortement significatives ($p= 0.03$ à 0.00000). L'ordonnée à l'origine (*intercept*) est très faiblement significative ($p=0.836$) par rapport aux autres classes de l'étude. Les rendements des

prédictions de présence et d'absence varient entre 51.5% et 68.8% et ce, tant pour les données de calibration que pour celles de validation.

La faible signifiante de l'ordonnée à l'origine suggère une zone grise dans la prédiction qui n'est pas liée aux variables abiotiques utilisées (leur signifiante est très forte). Même si les prairies humides apparaissent liées aux variables hydrologiques retenues avec une forte signifiante, la présence des prairies humides serait possiblement liée à des perturbations naturelles ou anthropiques.

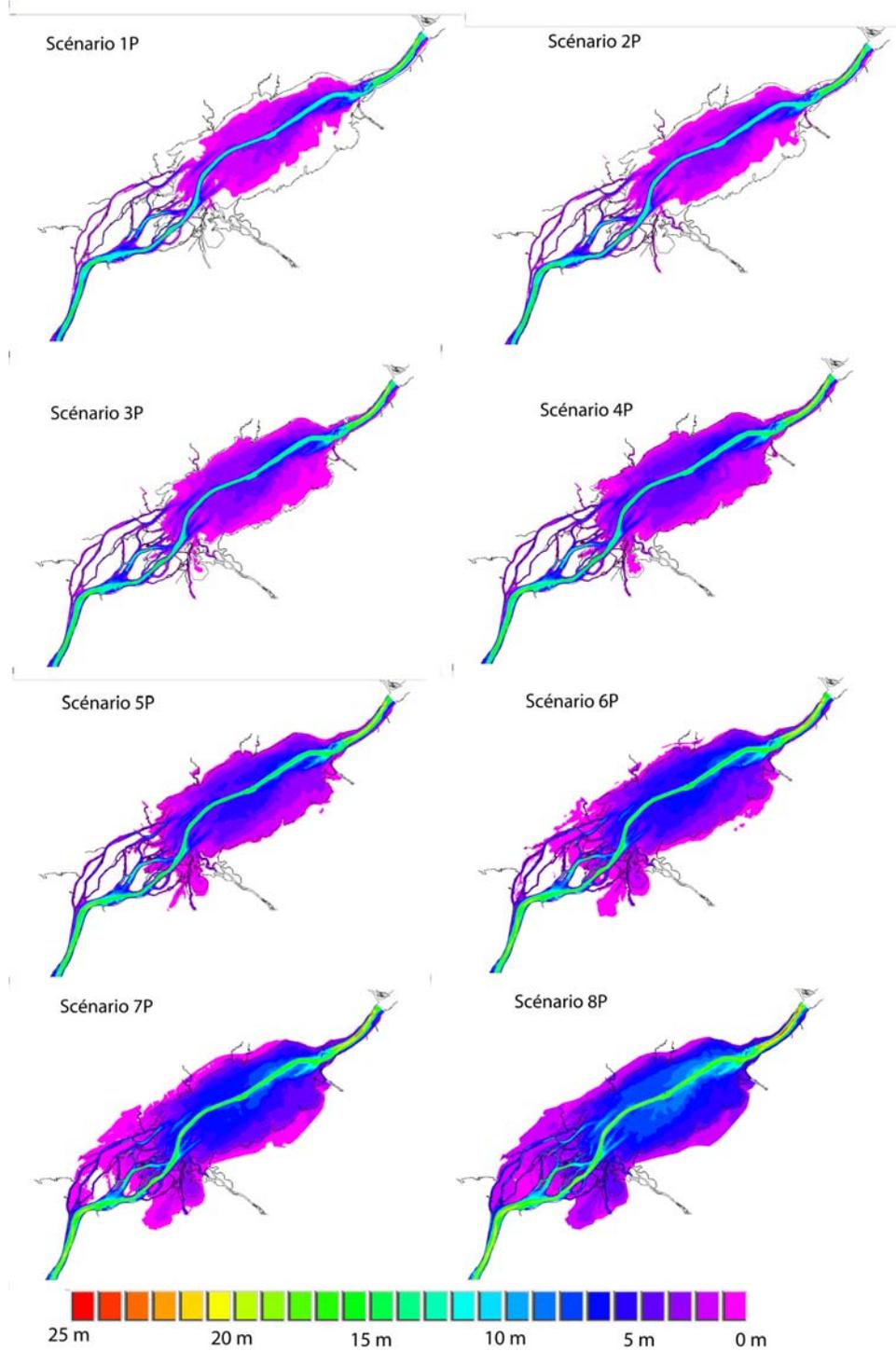


Figure 16 : Profondeur simulée pour chacun des scénarios de références.

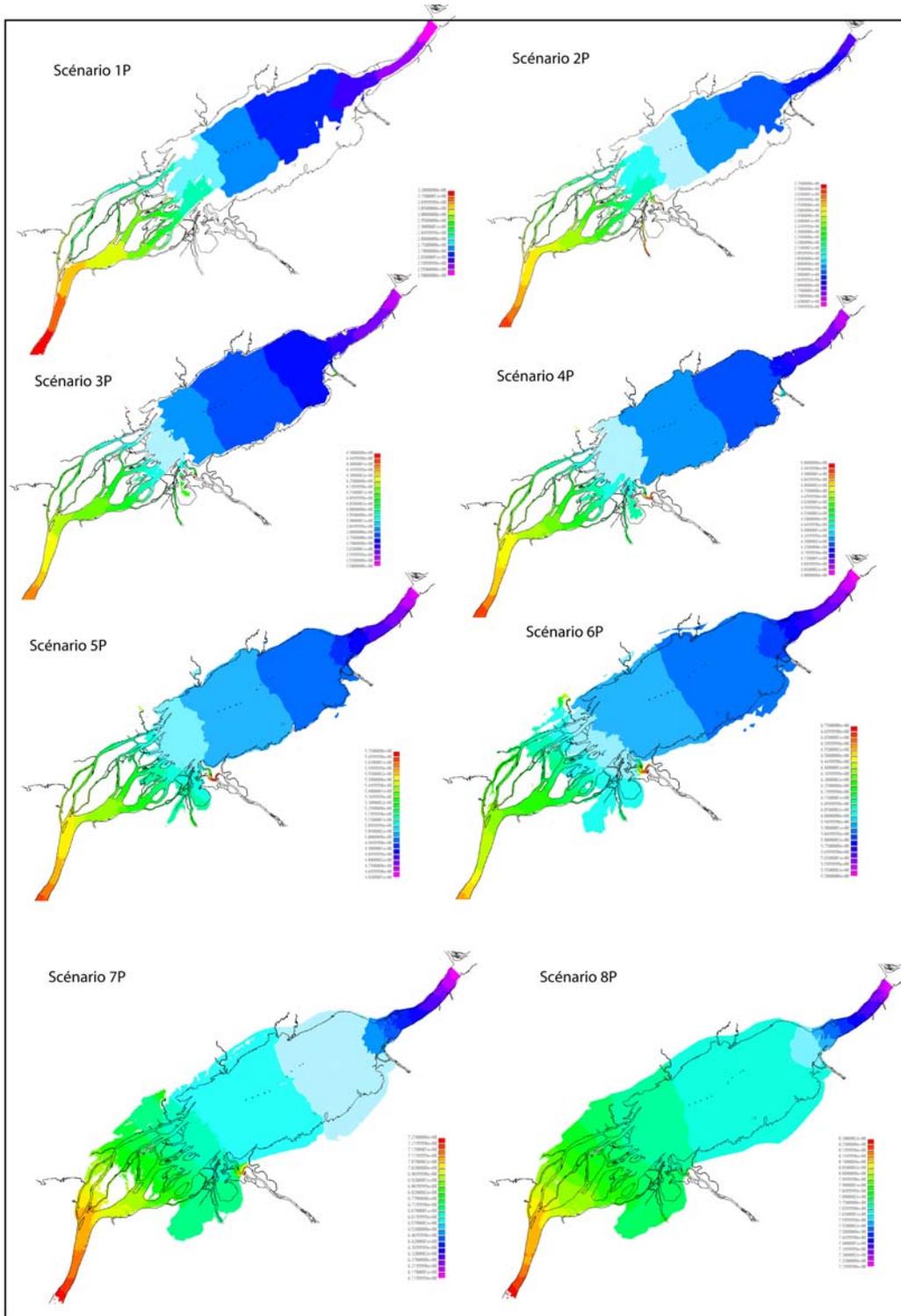


Figure 17 : Niveau de surface pour les huit scénarios de références.

Variables abiotiques		Marais profond (MP)		Marais peu profond (MPP)		Marécage arbustif (MARBU)		Marécage arborescent (MARBO)		Prairie humide (PH)			
		p		p		p		p		p			
Intercept		2.14416655	0.01873	1.87545704	0.00191225	14.3934084	0.00000001	2.06280016	0.000000	-0.15640093	0.83615537		
Nbr semaine inondée 18		2						-0.026	0.018492	0.030	0.000609		
Nbr semaine inondée 12		2				-0.191	0.000042	0.097	0.000030				
Nbr semaine inondée 7		4	-0.016	0.000003		0.419	0.000002	-0.074	0.000929	-0.078	0.000139		
Nbr semaine inondée 3		1				-0.283	0.000001			0.047	0.030918		
Nbr semaine inondée 1		1				0.200	0.009529						
Nbr semaine exondé 18													
Nbr semaine exondé 12													
Nbr semaine exondé 7													
Nbr semaine exondé 3													
Nbr semaine exondé 1													
Nbr de variations 18		2	0.022	0.000003	-0.031	0.000000							
Nbr de variations 12		1				-0.061	0.029231						
Nbr de variations 7		2				0.112	0.019548	-0.053	0.000000				
Nbr de variations 3		1				-0.140	0.022896						
Nbr de variations 1													
Profondeur moyenne 18		1				20.715	0.000293						
Profondeur moyenne 12		2				-11.788	0.009919			21.573	0.000000		
Profondeur moyenne 7		3	2.651	0.001938	3.469	0.023324				-17.699	0.000000		
Profondeur moyenne 3		1			6.109	0.001712							
Profondeur moyenne 1													
Profondeur moyenne d'inondation 18		2			-8.662	0.000000	-56.208	0.000000					
Profondeur moyenne d'inondation 12		2						-13.394	0.000000	-4.169	0.000000		
Profondeur moyenne d'inondation 7		2					46.637	0.000001	12.620	0.000000			
Profondeur moyenne d'inondation 3		1	-2.605	0.002699									
Profondeur moyenne d'inondation 1													
Profondeur moyenne de la nappe phréatique 18		2			-52.660	0.000008	42.865	0.000003					
Profondeur moyenne de la nappe phréatique 12		1			50.960	0.000017							
Profondeur moyenne de la nappe phréatique 7		1	-40.350	0.000000									
Profondeur moyenne de la nappe phréatique 3		2	35.872	0.000002			-43.694	0.000005					
Profondeur moyenne de la nappe phréatique 1													
Pente		5	27.362	0.000764	-23.168	0.005142	47.514	0.002156	28.749	0.001409	-1.785	0.009785	
				7		7		14		7	7		
Deviance			0.777		0.737		0.503		0.503		0.729		
Calibration		Présence		59.2% (895/1513)		65.1% (490/753)		70.3% (308/438)		72.5% (993/1370)		68.8% (511/743)	
		Absence		57.1% (2178/3812)		70.3% (2986/4572)		68.4% (3119/4887)		68.4% (2705/3955)		55.2% (2529/4582)	
Validation		Présence		53.2% (83/156)		49.4% (43/87)		48.8% (20/41)		67.5% (104/154)		51.5% (50/97)	
		Absence		64.8% (304/469)		54.6% (294/538)		47.6% (278/584)		48.4% (228/471)		52.3% (276/528)	
Total		Présence		58.6% (978/1669)		63.5% (533/840)		68.5% (328/479)		72.0% (1097/1524)		66.8% (561/840)	
		Absence		58.0% (2482/4281)		64.2% (3280/5110)		62.1% (3397/5471)		66.3% (2933/4426)		54.9% (2805/5110)	
Total				58.3%		63.8%		65.3%		69.1%		60.8%	

Tableau 4 : Résultats des régressions logistiques entre les variables biotiques et les variables abiotiques.

4. Discussion

Les résultats de cette étude permettent de mettre en relief certaines variables expliquant la présence ou l'absence des grandes classes de milieux humides au lac Saint-Pierre. Les résultats montrent des liens temporels existant entre les niveaux d'eau du fleuve Saint-Laurent et la distribution spatiale des milieux humides. Ces relations sont encore préliminaires mais nous permettent déjà d'affirmer que la distribution des classes de milieux humides est fortement liée aux fluctuations de l'hydrologie locale et ce, même si plusieurs incertitudes sont présentes dans les données utilisées.

Malgré les efforts investis dans la création du modèle numérique de terrain des plaines d'inondation du lac Saint-Pierre, sa précision reste faible (± 1 m) et limite la capacité de prédiction du modèle statistique. Toutes les variables utilisées sont produites en combinant les niveaux d'eau et la topographie locale ou encore sont dérivées directement de la topographie. Ainsi, l'amélioration des données de topographie permettrait sans aucun doute d'augmenter la capacité du modèle à prédire la présence des classes de milieux humides. L'intégration de données de topographie LIDAR (précision verticale de près de 15 cm) acquises lors de l'automne 2001 permettra d'améliorer les résultats actuels.

La principale contrainte des variables hydrologiques provient de leur pas temporel. Une variable significative pour un pas temporel de 7 ans et 12 ans ne permet pas de savoir à quel moment dans le temps le ou les événements hydrologiques ont été un facteurs déterminants de changements. Les pas temporels utilisés permettent seulement de définir des liens à court ou long terme. L'utilisation des pas annuels pourraient permettre d'identifier des événements ponctuels qui sont responsables de la présence d'une classe de milieu humide quelconque à un endroit donné. Certaines classes de milieux humides utilisées sont peut-être le résultat de perturbations anthropiques (prairies humides). Malgré le fait que l'aire d'étude a été choisie en fonction de son caractère peu perturbé, il ne faut pas oublier que le territoire des Îles de Sorel et du lac Saint-Pierre a été utilisé pour l'agriculture. Il est donc possible que des traces de ces activités soient encore perceptibles et influencent les résultats.

5. Conclusion

La méthode développée dans cette étude et les résultats obtenus montrent des liens significatifs entre la distribution spatiale des grandes classes de milieux humides et les variables hydrologiques. Les résultats montrent des capacités de prédictions correctes variant de 58 % à 69 % pour les grandes classes de milieux humides : marais profond, marais peu profond, marécage arbustif, marécage arborescent et prairie humide. Il semble possible de pouvoir prédire à moyen terme l'impact des changements dans l'hydropériode du fleuve sur la distribution des milieux humides.

L'utilisation d'un modèle de terrain plus précis de la plaine d'inondation du lac Saint-Pierre combiné à une analyse statistique plus raffinée permettra sans doute l'amélioration du modèle. Parmi les autres améliorations à apporter, des variables représentant l'impact de chacune des années (sans moyenne à long terme) devront être produites afin d'identifier des événements hydrologiques clés. Par exemple, la profondeur moyenne il y a trois ans, il y a deux ans et il y a un an. De plus, les successions végétales et la résilience des plantes devront être prises en compte dans le futur. Enfin, le concept de la modélisation de la distribution spatiale sera éventuellement testé à un niveau de perception plus raffiné, soit à l'échelle des communautés de plantes.

Références

- Braun-Blanquet, J., 1972. Plant sociology, the study of plant communities, New-York, Hafner publishing company, 439p.
- Chow, Ven T. (1961) Open channel Flow, in: Streeter, V.L. (1961), Streeter, V.L. (1961), Handbook of Fluid Dynamics, McGraw-Hill Book Co., N.Y.
- Couillard, L. et P. Grondin 1986. « La végétation des milieux humides du Québec » Les Publication du Québec, 399 pages.
- Cowardin, L. M., F. C. Golet et E. T. LaRoe 1979. « Classification of wetlands and deep-water habitats of the United States» Document en-ligne du U.S. Fish and Wildlife Service Northern Prairie Wildlife Research Center Jamestown, North Dakota
<http://www.nwi.fws.gov/classman.html>
- Devito, K.J; Ferone, J.; Creed, I.F.; Pollard, B.; Foote, L.; and Bayley, S. 2000. «Climate, hydrogeology, and water chemistry relationships in wetland-pond complexes of the Western Boreal Forest: Preliminary results » Annual Scientific Meeting, Canadian Geophysical Union, Banff, Alberta, May 23-27, 2000, Résumé en-ligne :<http://cgrg.geog.uvic.ca/abstracts/DevitoClimateThe.html>
- Falardeau, I., Fortin, P., Morin, J. et Rioux, D. 2000. Raffinement du modèle numérique d'élévation du lac Saint-Pierre. Rapport technique RT-108, Service Météorologique du Canada-Hydrologie, Environnement Canada, Sainte-Foy. 38 p.
- Gauthier, B., 1997. Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables; notes explicatives sur la ligne naturelle des hautes eaux, Direction de la conservation et du patrimoine écologique, Ministère de l'environnement et de la faune, 23p.
- Guay J.-F et J.Morin 2001. Aspects abiotiques et biotiques de l'écologie des milieux humides Éléments de modélisation de l'habitat des macrophytes émergentes. Rapport scientifique SMC-Hydrologie RS-102. Environnement Canada, Sainte-Foy, 48 pages
- Létourneau, G. Répertoire des activités de télédétection au Centre Saint-Laurent - Marais, marécages et herbiers le long du Saint-Laurent 1-44 (Environnement Canada - Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Montréal, 1996).
- Létourneau, G. & Jean, M. Cartographie des marais, marécages et herbiers aquatiques le long du Saint-Laurent par télédétection aéroportée 1-114 (Environnement Canada - Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent, Montréal, 1996).
- Jacques, D., 1986. Corporation pour la mise en valeur du lac Saint-Pierre. - Cartographie des

- terres humides et des milieux environnants du lac Saint-Pierre, Denis Jacques Enr, - vi, 70 f. ; 6 réf., 69 p.
- Jean, M., Champoux, O. & Morin, J. 2002. Impacts of water level fluctuations on wetlands: Repentigny to Trois-Rivières. Rapport remis à la Commission mixte internationale. Montréal.
- Jean, M. & Bouchard, A. (1991) Temporal changes in wetland landscapes of a section of the St. Lawrence River, Canada. *Environmental Management*, 15, 241-250
- Jean, M., D'Aoust, M., Gratton, L. & Bouchard, A. (1992) Impacts of water level fluctuations on wetlands : Lake Saint-Louis case study. Institut de recherche en biologie végétale, presented to The International Joint Commission, Water levels reference Study, Montréal.
- Mitsch, W.J. et J.G. Gosselink 1993. « Wetlands » 2^{ème} édition, Van Nostrand Reinhold, New-York, 725p.
- Morin, J. 2001 Modélisation des facteurs abiotiques de l'écosystème fluvial du lac Saint-François, fleuve Saint-Laurent. Thèse de doctorat, Université du Québec, Institut National de la Recherche Scientifique- EAU, Québec, 71 pages.
- Morin, J., P. Boudreau, Y. Secretan et M. Leclerc 2000. Pristine Lake Saint-François, St. Lawrence river : Hydrodynamic Simulation & Cumulative Impact. *J. Great Lakes Res.*, 26:384-401.
- Morin, J. et A. Bouchard 2000. Les bases de la modélisation du tronçon Montréal / Trois-Rivières. Rapport scientifique SMC-Hydrométrie RS-100. Environnement Canada, Sainte-Foy, 56 p.
- Toner, M. et Keddy, P. 1997 River hydrology and riparian wetlands: A predictive model for ecological assembly. *Ecological Applications*, 7 (1), pp.236-246
- Vyzamal, J. 1995. « Algae and Element cycling in Wetlands » Lewis, Ann Arbor, 689 pages.
- Zoltai, S.C. 1988. « Wetlands environments and classification » In Mitsch W.J. et Gosselink J.G., *Wetlands*, 2^{ème} édition, 1993 p.26