

Association de la protection de l'environnement du lac à l'Anguille inc.



## Résultats du projet pilote de restauration du lac à l'Anguille

### Volet 2 : Expérimentation d'un marais filtrant pour réduire les apports de phosphore au lac

#### Rapport final

Présenté au ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques

2016

ISBN 978-2-9815799-1-1



*Développement durable,  
Environnement et Lutte  
contre les changements  
climatiques*

Québec 



## **Résultats du projet pilote de restauration du lac à l'Anguille**

### **Volet 2 : Expérimentation d'un marais filtrant pour réduire les apports de phosphore au lac**

**Rapport préparé pour**  
l'Association de la protection de l'environnement du  
lac à l'Anguille inc.  
**par le Groupe d'aménagement intégré multiresources inc.**

Dans le cadre de l'action 1.4 du Plan d'intervention sur les algues  
bleu-vert 2007-2017  
Avec le soutien du ministère du Développement durable, de l'Environnement et  
de la Lutte contre les changements climatiques

Janvier 2016 Préparé par : Alexandre Roy, biologiste, TEA, T.P. 10292  
Chargé de projet

## Équipe de réalisation

### **Responsable de projet**

Alexandre Roy

Biologiste, TEA, T.P., Groupe AIM inc.

### **Rédaction**

Alexandre Roy

Biologiste, TEA, T.P., Groupe AIM inc.

### **Équipe terrain**

Alexandre Roy

Biologiste, TEA, T.P., Groupe AIM inc.

Annick Dumouchel

Biologiste, TEA, Groupe AIM inc.

Éric Manseau

Biologiste, TACH, Groupe AIM inc.

Geneviève Faille

M. Sc., Biologiste, Groupe AIM inc.

Étienne Bachand

M. Sc., Géographe, Groupe AIM inc.

Eliot Roy

Aide terrain, Groupe AIM inc.

André Lévesque

Bénévole, APELA inc.

### **Traitement des données**

Alexandre Roy

Biologiste, TEA, T.P., Groupe AIM inc.

Annick Dumouchel

Biologiste, TEA, Groupe AIM inc.

### **Analyses statistiques**

Bruno Vincent

Statisticien, Ph. D., Université du Québec  
à Rimouski (UQAR)

Adéline Piot

Ph. D., auxiliaire d'enseignement, UQAR

### **Correction du texte**

Maggie Lia-Durette

Biologiste, Groupe AIM inc.

Francesca Roy

M.Sc., linguistique, Groupe AIM inc.

### **Sites web**

*Association de la protection de l'environnement du lac à l'Anguille inc.*

[www.apelast-anaclet.org](http://www.apelast-anaclet.org)

*Groupe AIM inc.*

[www.groupeaim.com](http://www.groupeaim.com)

Référence à citer :

Roy, A. 2016. *Résultats du projet pilote de restauration du lac à l'Anguille, volet 2 :*

*expérimentation d'un marais filtrant pour réduire les apports de phosphore au lac.*

Groupe AIM inc. Rimouski (Québec) Canada. 50 p. et annexes. ISBN 978-2-9815799-1-1.

## Préambule

Ce projet est l'un des quatre projets pilotes qui s'inscrivent dans l'action 1.4 du *Plan d'intervention sur les algues bleu-vert 2007-2017*. Entre 2008 et 2012, grâce à ce plan et à l'appui financier d'organismes du milieu (Conférence régionale des éluEs du Bas-Saint-Laurent, Organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent), deux biotechnologies vertes à l'échelle expérimentale ont été adaptées au milieu naturel afin de valider leur capacité à retirer du milieu le phosphore, élément clé dans l'évolution du phénomène d'eutrophisation et dans l'occurrence des explosions algales de cyanobactéries en milieu aquatique.

Le site ayant servi de laboratoire naturel est le lac à l'Anguille. Plan d'eau de taille moyenne (98 ha), il est situé dans la municipalité de Saint-Anaclet-de-Lessard au Bas-Saint-Laurent, Québec (Canada). En bordure de ce lac habité depuis plus de 100 ans, on dénombre 82 résidences permanentes ainsi qu'une entreprise agricole de type laitière comptant quelque 300 têtes. Seuls trois petits tributaires de faibles débits l'alimentent et sa masse d'eau est relativement stagnante. Les conditions favorables pour une accumulation progressive et excessive de phosphore sont donc réunies.

L'Association de protection de l'environnement du lac à l'Anguille est l'organisme communautaire responsable de veiller à la sauvegarde de l'intégrité des écosystèmes présents. Des épisodes d'efflorescences algales (*algal blooms*) y sont observés périodiquement depuis environ 30 ans et, depuis le début des années 2000, le phénomène s'avère récurrent et d'intensité accrue. Les deux innovations mises à l'essai au lac à l'Anguille sont l'îlot végétal flottant (IVF) (volet 1) et le marais filtrant horizontal à écoulement surfacique libre (MFHES) (volet 2). Ces biotechnologies vertes, quoiqu'employées de par le monde à des fins de traitement des eaux usées de diverses sources (villages écologiques, rejets agricoles, aquaculture, sites miniers, aéroports, etc.), n'ont pour le moment pas été appliquées et intégrées pour restaurer des habitats naturels pollués et perturbés par l'homme.

Le but de ce suivi expérimental est de statuer sur la pertinence et le potentiel qu'offrent ces deux approches en tant que méthodes curatives pour les plans d'eau québécois aux prises avec la problématique d'eutrophisation reliée aux surplus de phosphore. Ainsi, l'objectif du projet consiste à quantifier le phosphore pouvant être retiré du milieu par ces deux biotechnologies au cours d'une saison ou d'une année. À cet objectif principal s'est greffée une multitude de paramètres connexes pour lesquels un suivi venait de pair. Ce document présente la méthodologie, les objectifs et les résultats obtenus pour le volet 2 du projet pilote de restauration du lac à l'Anguille, soit le suivi du MFHES durant les deux années suivant son aménagement (2011 et 2012). Pour sa part, le volet 1 du projet pilote de restauration du lac à l'Anguille traite des résultats de l'expérimentation d'un îlot végétal flottant pour capter le phosphore présent dans le lac (Roy, 2016).

## REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier particulièrement et chaleureusement le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC), la Conférence régionale des éluEs du Bas-Saint-Laurent (CREBSL), de même que l'Organisme des bassins versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent (OBVNEBSL). D'une part, ce projet n'aurait pas été possible sans leur intérêt profond dans le développement de méthodes curatives avant-gardistes et durables. D'autre part, sa réalisation repose en grande partie sur les contributions financières accordées à diverses étapes de son élaboration.

Outre le promoteur et les membres du comité, qui ont fait un travail exceptionnel d'orientation et de support-conseil pour la bonne marche du projet, de nombreux collaborateurs ont contribué à ce projet, tant sur le terrain que pour les analyses statistiques ou le traitement des données.

J'exprime ainsi toute ma gratitude envers monsieur André Lévesque (président de l'APELA inc.), ainsi qu'envers monsieur Bruno Vincent (UQAR), madame Adeline Piot (UQAR), monsieur Éric Manseau (biologiste, Groupe AIM inc.), mesdames Annick Dumouchel et Geneviève Faille (biologistes, Groupe AIM inc.) et monsieur Paul Pelletier (graphiste, Groupe AIM inc.).

À ma sœur, Francesca, et à ma bonne amie Maggie, merci pour votre disponibilité, votre rigueur et vos commentaires.

Merci également à tous ceux et celles qui ont contribué de manière moins marquée, mais dont l'apport a été aussi important et apprécié.

Enfin, un merci spécial à madame Lise Boudreau (biologiste, MDDELCC), coordonnatrice des projets pilotes au MDDELCC, tant pour son professionnalisme que pour sa passion, sa patience, sa diplomatie, son empathie et son soutien constamment renouvelé.

## RÉSUMÉ

Un marais filtrant horizontal à écoulement surfacique libre (MFHES) a été aménagé à même un tributaire agricole du lac à l'Anguille, au Bas-Saint-Laurent. Ce MFHES, aménagé sur une période de deux années (2009 et 2010), totalise actuellement 1 100 m<sup>2</sup> (0,11 ha) ou l'équivalent de 0,08 % de la superficie drainée. La totalité du débit de ce petit cours d'eau agricole transite désormais par le marais filtrant. Au cours des deux années de suivi (2011-2012), des prélèvements d'eau hebdomadaires ont été effectués afin d'analyser la teneur en phosphore total [PT] et en phosphore dissout total [PDT], et ce, à l'entrée et à la sortie du marais. Les paramètres physico-chimiques (oxygène, pH, turbidité, conductivité, température) étaient aussi notés de façon hebdomadaire. Une station de mesure et d'enregistrement en continu des débits entrants a été mise en opération. Les débits sortants ont été estimés *in situ* lors des prélèvements à l'aide d'un courantomètre positionné sur un déversoir à orifice rectangulaire ( $Q = V * H * L$ ). Les variations de concentrations entrée vs sortie du marais, de même que l'estimation des charges massiques et du taux d'enlèvement du PT et du PDT ont été déterminées. Les résultats notés confirment le potentiel du MFHES comme méthode préventive de réduction des apports en phosphore vers les lacs et cours d'eau eutrophes. En 2011, on a noté une réduction saisonnière moyenne entrée-sortie de 38 % de la [PT] et des moyennes mensuelles de réduction de 41, 59, 47 et 68 % respectivement en juillet, août, septembre et octobre. On a observé une réduction moyenne saisonnière de 44 % de la [PDT], ainsi que des réductions moyennes mensuelles de 39, 49, 46, 35, 59 et 45 % respectivement en juin, juillet, août, septembre, octobre et novembre. En 2012, la réduction moyenne saisonnière de la [PT] a été de 18 %, et on a observé des réductions moyennes mensuelles de 41 % en juin et de 36 % en juillet. Des pics de 50 % et plus de réduction ont été notés pour certaines semaines en juin, en juillet et en octobre. On a noté une réduction moyenne saisonnière de 17 % de la [PDT], et des réductions moyennes mensuelles de 44 % en juin et de 37 % en juillet, ainsi que des réductions maximales journalières de plus de 50 % en juin, en juillet, en août et en octobre. En 2011 et 2012, le MFHES a retenu respectivement 1,92 et 0,81 kg de PT ainsi que 1,33 et 0,84 kg de PDT. Le taux de rétention a affiché des moyennes respectives de PT et PDT de 1,75 et 1,21 g/m<sup>2</sup>/saison en 2011, et de 0,80 et 0,76 g/m<sup>2</sup>/saison en 2012. En 2011, le marais a retenu respectivement 18 et 25 % des charges massiques entrantes en PT et PDT. Pour 2012, 9 % et 14 % des charges massiques en PT et PDT entrantes ont été séquestrées par le marais. La baisse du rendement du marais en 2012 est probablement attribuable aux conditions climatiques extrêmes qui ont prévalu durant la dernière moitié de cette saison : canicule et sécheresse de longue durée ayant réduit ostensiblement le débit, augmenté la température et diminué de façon critique la quantité d'oxygène dissout disponible dans le marais. À cet égard, et bien que de multiples autres processus puissent en être la cause, la diminution de l'oxygène dans l'eau en 2012 est le seul paramètre physico-chimique statistiquement lié à l'augmentation des [PT] et [PDT] à la sortie du marais (coefficient de régression = -0,89, r<sup>2</sup> ajusté = 78,5 %, p < 0,0001).

## Table des matières

	Page
Équipe de réalisation .....	i
Préambule.....	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
RÉSUMÉ.....	iv
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures .....	viii
Liste des annexes .....	ix
1.0 Introduction .....	1
1.1 Mise en situation .....	1
1.2 La rétention du phosphore dans le marais filtrant.....	2
1.3 Mesure de l'efficacité du marais filtrant .....	3
2.0 Matériel et méthodes .....	5
2.1 Site d'étude.....	5
2.1.1 Prise en compte de deux canaux de drainage .....	9
2.2 Caractéristiques du marais filtrant implanté en amont du lac à l'Anguille .....	9
2.3 Mesure des concentrations en PT, PDT à l'entrée et à la sortie .....	11
2.4 Mesure des débits, volumes, charges massiques et rendements.....	12
2.5 Mesure des paramètres physico-chimiques.....	16
2.6 Mesure du temps de rétention de l'eau dans le marais.....	16
2.7 Périodes d'échantillonnage .....	17
2.8 Mesure du taux de sédimentation du marais.....	17
2.9 Entretien du marais filtrant à écoulement horizontal de surface .....	18
2.10 Suivi de la libre circulation du poisson dans le marais .....	19
3.0 Résultats.....	20
3.1 Croissance des plantes.....	20
3.2 Concentration en phosphore.....	21
3.2.1 [PT] entrée vs sortie du marais (an 1, 2011).....	21
3.2.2 [PDT] entrée vs sortie du marais (an 1, 2011) .....	21
3.2.3 [PT] entrée vs sortie du marais (an 2, 2012).....	22
3.2.4 [PDT] entrée vs sortie du marais (an 2, 2012) .....	23
3.2.5 Réduction mensuelle moyenne de la [PT] et de la [PDT] en 2011 et en 2012 .....	24
3.2.6 Biais dans deux périodes d'échantillonnage.....	25
3.3 Charges massiques et retraits de PT et PDT .....	26
3.3.1 Débits, charges et performances du marais .....	26
3.3.2 Bilan des saisons 2011 et 2012 .....	29
3.3.3 Performances mensuelles.....	30

3.4 Les conditions physico-chimiques : 2011 vs 2012 .....	31
3.5 Sédimentation et accumulation.....	33
3.6 Temps de rétention.....	34
3.7 Suivi de la libre circulation du poisson dans le marais .....	35
4.0 Discussion.....	36
4.1 Efficacité du marais.....	36
4.2 Variabilité saisonnière de la rétention du phosphore .....	37
4.3 Influence des conditions physico-chimiques .....	37
4.4 Mobilité du phosphore .....	38
5.0 Conclusion.....	40
6.0 Références, ouvrages et sites consultés .....	44
Annexe 1 : Tableaux des données par saison .....	51
Annexe 2 : Paramètres physico-chimiques.....	54
Annexe 3 : Exemple des calculs du cumul des débits et des charges entrantes dans le marais pour une journée type .....	59
Annexe 4 : Liste des espèces d'oiseaux fréquentant le marais filtrant du lac à l'Anguille.	61

## Liste des tableaux

	Page
Tableau 1. Paramètres mesurés, calculés et estimés, méthodes utilisées, unités et fréquence des mesures.....	15
Tableau 2. Distribution des débits, charges entrantes et efficacité relative de la rétention mensuelle et saisonnière pour les périodes printanière, estivale et automnale en 2011.....	27
Tableau 3. Distribution des débits, charges entrantes et efficacité relative de la rétention mensuelle et saisonnière pour les périodes printanière, estivale et automnale en 2012.....	27
Tableau 4. Bilan des performances du marais filtrant en 2011 et en 2012.....	29
Tableau 5. Taux de retrait journalier et rétention relative saisonnière de PT et PDT.....	30
Tableau 6. Taux de retraits journaliers mensuels moyens en PT et PDT en 2011 et 2012.....	30
Tableau 7. Temps de rétention du marais filtrant.....	34

## Liste des figures

	Page
Figure 1. Localisation géographique du lac à l'Anguille et du MFHES.....	6
Figure 2. Occupation agricole du bassin versant du lac à l'Anguille.....	7
Figure 3. Bassin hydrographique de la rivière Germain-Roy.....	7
Figure 4. Croquis général du marais filtrant à écoulement horizontal de surface et des sites de prélèvements.....	10
Figure 5. Variations saisonnières des [PT] et [PDT] à l'entrée et à la sortie du marais en 2011.....	22
Figure 6. Variations saisonnières des [PT] et [PDT] à l'entrée et à la sortie du marais en 2012.....	23
Figure. 7. Moyennes mensuelles et saisonnières de réduction (%) des [PT] et [PDT] en 2011.....	24
Figure 8. Moyennes mensuelles et saisonnières de réduction (%) des [PT] et [PDT] en 2012.....	25
Figure 9. Courbes des débits journaliers entrant dans le marais filtrant en 2011 et 2012 .....	28
Figure 10. Taux de retrait mensuels moyens ( $\text{mg}/\text{m}^2/\text{j}$ ) du PT et PDT en 2011 et 2012.....	31
Figure 11 a). P total en fonction de l'O <sub>2</sub> (%) à la sortie.....	32
Figure 11 b). P dissout total en fonction de l'O <sub>2</sub> (%) à la sortie.....	33

## Liste des annexes

	Page
Annexe 1. Tableaux des données par saison.....	51
Annexe 2. Paramètres physico-chimiques.....	54
Annexe 3. Exemple des calculs du cumul des débits et des charges entrantes dans le marais pour une journée type.....	59
Annexe 4. Liste des espèces d'oiseaux fréquentant le marais filtrant du lac à l'Anguille...	61

## 1.0 Introduction

### 1.1 Mise en situation

La première expérience visant à vérifier les capacités épuratoires des plantes d'un marais filtrant dans le but d'améliorer la qualité de l'eau des cours d'eau surfertilisés a été conduite en Allemagne au début des années 1950 par la Dre Käthe Seidel (Vymazal, 2008). En 1960, l'opération d'un premier marais filtrant à grande échelle a eu lieu et, depuis, cette technologie s'est répandue et est largement employée de par le monde (Vymazal, 2008).

Au Québec, la fertilisation des sols, la perturbation et l'anthropisation du milieu naturel entraînent l'eutrophisation ou un vieillissement accéléré des milieux aquatiques. Ce processus engendre des coûts sociaux, environnementaux et économiques majeurs. Cette situation critique justifie l'expérimentation de nouvelles biotechnologies pouvant porter secours à l'une de nos plus grandes richesses : les lacs et les cours d'eau.

L'aide financière accordée a permis l'aménagement et le suivi des performances épuratoires d'un marais filtrant horizontal à écoulement surfacique libre (MFHES) aménagé à même le principal tributaire agricole d'un plan d'eau québécois de type mésotrophe.

L'objectif était de suivre et de quantifier les rendements du MFHES relativement aux retraits et à la captation du phosphore en provenance de ce sous-bassin versant du lac à l'Anguille.

D'un point de vue technique, le défi était de taille, car il fallait concevoir et dimensionner un marais filtrant à même le milieu naturel, soumis à une gamme de débits extrêmement variables, passant de très élevés au printemps à minimales lors des périodes d'étiages sévères.

Les travaux de construction se sont déroulés sur une période de deux années et ont été répartis en deux phases. De 2009 à 2010, tout près de 10 000 macrophytes ont étéensemencés dans le MFHES du lac à l'Anguille, pour une surface de traitement finale de 0,11 ha. Le suivi des performances filtrantes du marais a commencé au printemps 2011, alors que les plantesensemencées étaient bien établies, et s'est poursuivi en 2012. Les données ont été récoltées au printemps, dès que le site était accessible (fonte des glaces/neiges) et jusqu'à l'apparition du couvert de glace automnal.

## 1.2 La rétention du phosphore dans le marais filtrant

La fraction dominante du phosphore dans un marais est emmagasinée dans le sol et les sédiments. Les plantes et la litière comprennent la presque totalité de la balance du phosphore du marais, et une très faible part est contenue dans les bactéries, les algues et l'eau.

Les marais filtrants fournissent un environnement favorable à l'interconversion et à l'accumulation de toutes les formes de phosphore. Le phosphore réactif soluble est capté par les plantes et converti en phosphore tissulaire où il peut être adsorbé au sol et aux sédiments. Le phosphore organique structural peut être relargué sous sa forme soluble si la matrice devient oxydée. Des précipités insolubles se forment sous certaines conditions, mais peuvent être redissous lorsque les conditions du milieu sont altérées (Kadlec et Knight, 1996, cités par Vymazal, 2007).

Les principales transformations du phosphore dans le marais sont : accumulation de matière organique dans la matrice (*peat-soil accretion*), adsorption/désorption dans la matrice, précipitation et dissolution, absorption par les plantes et les bactéries, fragmentation et relargage, minéralisation et enfouissement.

L'accumulation de matière organique (*peat-soil accretion*) dans un marais naturel est un processus relativement lent. Toutefois, dans un marais filtrant enrichi, l'accumulation de P sous forme de matière organique non dissoute peut être significative et atteindre jusqu'à  $75 \text{ g m}^{-2} \text{ an}^{-1}$  (Vymazal, 2007).

L'adsorption réfère à l'accumulation de phosphore inorganique soluble à la surface des particules du sol. La capacité d'adsorption de la matrice augmente généralement avec sa teneur en argile ou composés argileux dans le sol (Rhue and Harris, 1999, cités par Vymazal, 2007). Dans les sols organiques, la capacité d'adsorption du phosphore a été reliée à la teneur en fer, en aluminium et en calcium (Richardson, 1985, cité par Vymazal, 2007). Il se crée un équilibre entre le P adsorbé dans le sol et celui disponible dans le milieu aqueux, de telle sorte que lorsque le sol est saturé et le milieu déficient, il peut y avoir relargage du P des sédiments vers la colonne d'eau. Lorsque l'équilibre est atteint et stable, il y a absorption du P dans les sédiments et accumulation. Par contre, si le milieu devient anaérobie, une fraction du P adsorbé peut être relargué dans le milieu aqueux.

Il peut aussi y avoir précipitation et accumulation des ions phosphates lorsque ceux-ci se lient aux cations Fe, Al, Ca ou Mg, et forment des cristaux amorphes et peu solides. Une grande variété de ces cations peut précipiter sous certaines conditions dans le marais. Certains précipités sont parfois abondants : Apatite  $\text{Ca}_5(\text{Cl},\text{F})(\text{PO}_4)_3$ , Hydroxyapatite  $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ , Variscite  $\text{Al}(\text{PO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Strengite  $\text{Fe}(\text{PO}_4)\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , Vivianite  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$  et Wavellite  $\text{Al}_3(\text{OH})_3(\text{PO}_4)_2\cdot 5\text{H}_2\text{O}$  (Reddy et D'Angelo, 1994, cités par Vymazal, 2007). De plus, le phosphore peut co-précipiter avec d'autres minéraux tels l'oxyhydroxyde de fer et les minéraux carbonés comme la calcite (carbonate de calcium)  $\text{CaCO}_3$ .

Les bactéries, champignons, algues et micro-invertébrés présents dans le marais assimilent aussi le phosphore. Il s'agit d'un processus très rapide, mais d'ampleur plutôt faible (petites quantités emmagasinées). Le processus est rapide, car les bactéries et autres micro-organismes se développent et se multiplient très vite. Il semblerait que la quantité de P emmagasiné, ou l'importance du P emmagasiné, soit dépendante du stade trophique du marais. Dans les milieux moins enrichis, les bactéries semblent emmagasiner plus de phosphore qu'en conditions de milieux plus eutrophes (Richardson et coll., 1997, cités par Vymazal, 2007). Les bactéries sont habituellement considérées comme des décomposeurs et minéralisateurs de P. Cependant, il a été démontré qu'elles interagissent avec le flux de P et le régulent à l'interface sédiment-eau (Kleeberg et Schlungbaum, 1993, cités par Vymazal, 2007), en plus de participer à la formation et à l'enfouissement dans les sédiments de composés organiques contenant du phosphore (Gächter et Meyer, 1993, cités par Vymazal, 2007).

De façon dynamique (captage et relargage), une certaine quantité de P peut être séquestrée par la communauté algale du marais (ex. phytoplancton), spécialement lorsque celui-ci contient des espaces d'eau libre (Vymazal, 1995, cité par Vymazal, 2007). Enfin, le phosphore est capté par les parties racinaires et aériennes des plantes aquatiques. Une fraction du phosphore emmagasiné dans la partie aérienne est transférée aux racines à l'automne. Le phosphore résiduel présent dans la partie aérienne est décomposé et retourné dans le milieu aquatique. La récolte de la partie aérienne permet d'éviter ce retour. Évidemment, une partie du phosphore absorbé par les racines des plantes pour leur croissance est retournée dans le milieu lors de la sénescence et la mort du plant. Ainsi, la décomposition de la partie aérienne retourne le phosphore dans milieu aquatique, tandis que la partie racinaire retourne ou conserve le phosphore dans le sous-sol (matrice) (Reddy et coll., 1999, cités par Vymazal, 2007).

### **1.3 Mesure de l'efficacité du marais filtrant**

L'objectif du suivi est de vérifier l'efficacité épuratrice d'un marais filtrant à écoulement surfacique libre comme méthode de biotraitement pour la réduction des apports en nutriments des plans d'eau souffrant d'eutrophisation. L'efficacité épuratrice du marais a été évaluée par la quantification des concentrations de phosphore entrantes et sortantes, ainsi que par la quantification des charges de phosphore retenues par le marais filtrant aménagé à même le tributaire du lac à l'Anguille. Le calcul des charges retenues a nécessité le suivi des débits entrants et sortants du marais.

Le phosphore total (PT) et le phosphore dissout total (PDT) sont les deux paramètres qui ont servi à déterminer l'efficacité du marais filtrant. Le phosphore total inclut les deux principales formes de phosphore, soit le phosphore dissout et le phosphore particulaire.

Le phosphore total comprend la somme de toutes les formes de phosphore dans le milieu, lesquelles peuvent éventuellement être transformées et rendues disponibles pour les plantes et les algues. Ceci inclut l'orthophosphate, les phosphates combinés (pyrophosphates, métaphosphates et autres polyphosphates) et le phosphore lié à la matière organique (CEAEQ, 2014). Cette dernière fraction peut être oxydée et rendue disponible sous forme d'orthophosphate. La présence excessive du phosphore dans les eaux naturelles vient principalement de l'utilisation des détergents ainsi que du drainage des terres agricoles fertilisées. En général, le phosphore n'est pas toxique pour l'homme, les animaux et les poissons. C'est principalement pour ralentir la prolifération des algues en milieu aquatique que la concentration du phosphore doit être limitée. Les critères de qualité de l'eau des rivières et des lacs pour la vie aquatique peuvent être aussi faibles que 0,03 mg/l PT et 0,02 mg/l PT (MDDEFP, 2013, cité par CEAEQ, 2014).

La fraction dissoute du phosphore comprend les ions orthophosphates des molécules organiques et le phosphore lié aux petites molécules organiques, ainsi que ses formes inorganiques facilement hydrolysables. Le phosphore dissout est souvent référé au phosphore biodisponible, puisque c'est sous sa forme dissoute (orthophosphate libre  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  et  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) qu'il devient facilement assimilable par les végétaux et micro-organismes, d'où l'importance d'en déterminer la quantité présente dans le milieu aquatique.

La fraction particulaire regroupe le phosphore combiné aux oxydes de fer et aux argiles, le phosphore associé aux débris organiques grossiers, le phosphore sestonique et le phosphore constitutif des minéraux phosphatés. Il s'agit de la fraction du phosphore absorbé ou adsorbé à des particules de sols ou de sédiments, incluant le phosphore organique et inorganique (minéral). Pour devenir disponible, le phosphore particulaire doit être solubilisé. Sa biodisponibilité est donc variable. La présence de cette forme du phosphore dans le milieu est souvent associée aux apports exogènes découlant des processus d'érosion des rives et de lessivage des terres agricoles. Il n'est pas considéré dans cette étude. En milieu aquatique, le phosphore particulaire est aussi produit dans l'eau. Il est associé au plancton et au seston en général. Les algues phytoplanctoniques captent le PD et celui-ci devient alors sous forme particulaire; le PD peut être adsorbé par les particules sestoniques. Il est possible de déduire le phosphore particulaire en soustrayant au phosphore total le phosphore dissout total.

## 2.0 Matériel et méthodes

### 2.1 Site d'étude

Le site du MFHES est localisé dans un tributaire agricole se déversant dans le lac à l'Anguille, municipalité de Saint-Anaclet-de-Lessard, Bas-Saint-Laurent, Québec (photos n<sup>os</sup> 1a et 1b, figure 1). D'une longueur de 4 km, ce ruisseau draine une superficie de 155 ha, dont 138,5 ha transitent dans le marais aménagé. En outre, 70 ha (45 %) constituent des terres en cultures fourragères. Le site d'installation du MFHES est localisé à environ 300 m de l'embouchure du cours d'eau dans le plan d'eau. Le lac à l'Anguille affiche une superficie de 588,7 ha et fait partie du bassin hydrographique de la rivière Germain-Roy, dont la surface totale est de 5 734 ha (figures 2 et 3).

L'homme *habite* le lac à l'Anguille depuis plus de 100 ans. Environ 13 % de la superficie de son bassin versant est en culture fourragère destinée à l'élevage de bovins laitiers ( $\pm$  300 têtes). Environ 80 résidences permanentes bordent le plan d'eau. Près de 75 % de sa rive nord est totalement anthropisée et a subi de nombreuses perturbations menant à la dénaturaion même d'une bonne partie de ses habitats (Roy, 2016, PDE, en rédaction). Le réseau sanitaire est de type résidence isolée (fosses septiques et puits). Le renouvellement de la masse d'eau du lac est essentiellement assuré par trois petits tributaires, comprenant le tributaire à l'étude, ainsi que par quelques très petites résurgences riveraines. Jusqu'à récemment, le plan d'eau servait de réservoir d'eau potable pour la ville de Rimouski. Son barrage a d'ailleurs été rehaussé à quelques reprises afin d'en augmenter la capacité de rétention, ce qui, en retour, a amplifié la problématique d'érosion des rives. L'empreinte écologique humaine est lourde de conséquences. Les deux principales sources de contamination en phosphore sont les pratiques agricoles non durables ainsi qu'un réseau sanitaire non performant dans le traitement du phosphore. Les charges principales en phosphore sont la charge sud-ouest (site d'implantation du marais filtrant expérimental) ainsi que la charge ferme (plus petite et située sur la rive nord). Enfin, les mauvaises pratiques de certains riverains (coupe et dénaturaion de la bande riveraine, remblai et remplissage, engazonnement et engrais, etc.) complètent ce triste portrait.

Des trois tributaires, celui retenu pour l'expérimentation affichait les meilleures caractéristiques pour l'implantation d'un marais filtrant expérimental en matière de dimensions, de débit moyen ( $\pm$  0,02 m<sup>3</sup>/s), d'accessibilité et de topographie. De plus, le suivi exhaustif de la qualité de l'eau des tributaires du lac à l'Anguille (Roy, 2005) indique qu'il représente une source potentielle d'apports importants de phosphore (P total variant de 0,5 à 3,8 mg/l selon la station d'échantillonnage). L'eutrophisation et les explosions algales sont présentes depuis le début des années 1980, avec amplification et mentions de cas graves et à risque pour la santé des écosystèmes. C'est pourquoi le site retenu était tout indiqué pour réaliser cette expérimentation.

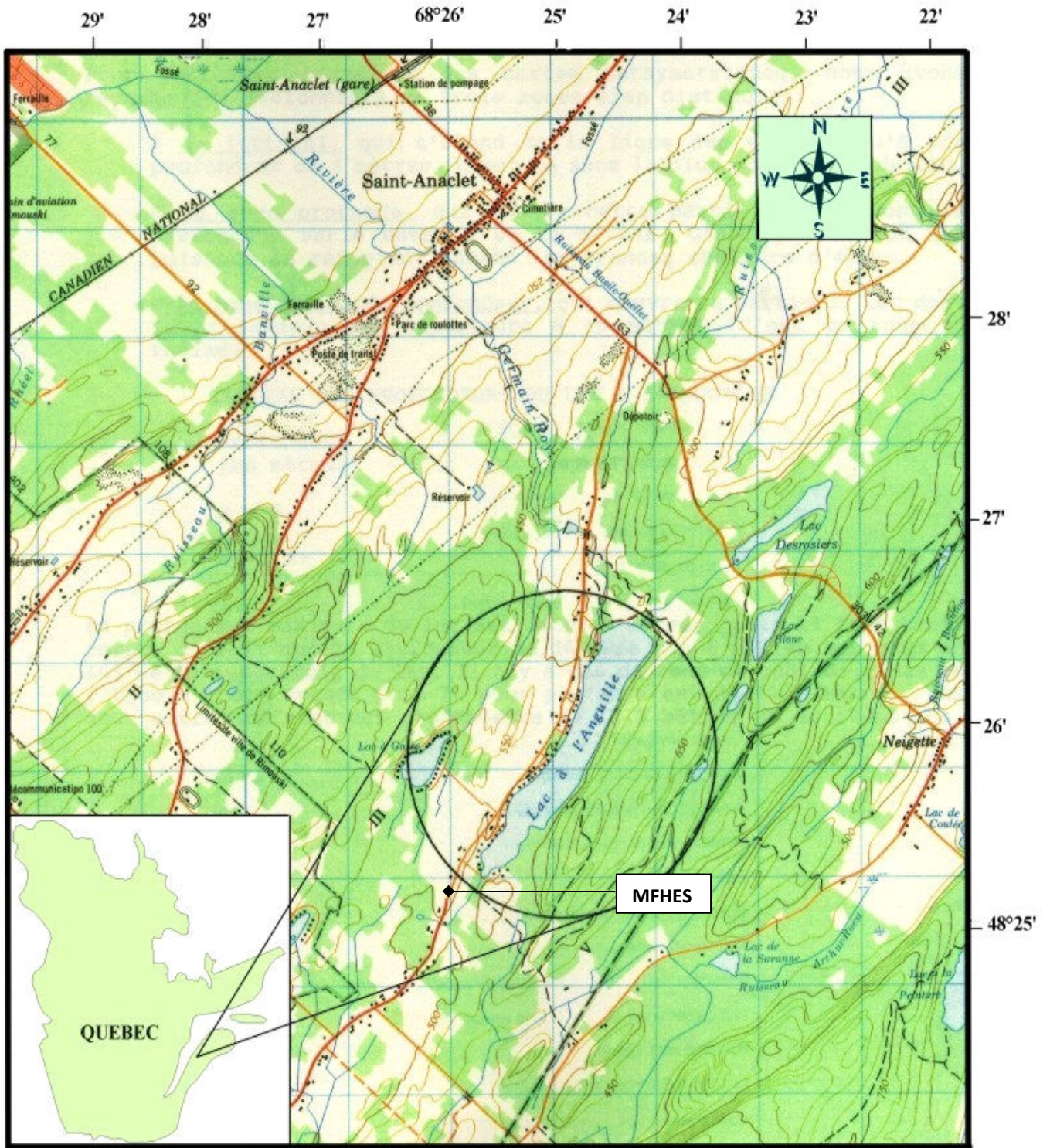


Figure 1. Localisation géographique du lac à l'Anguille et du MFHES

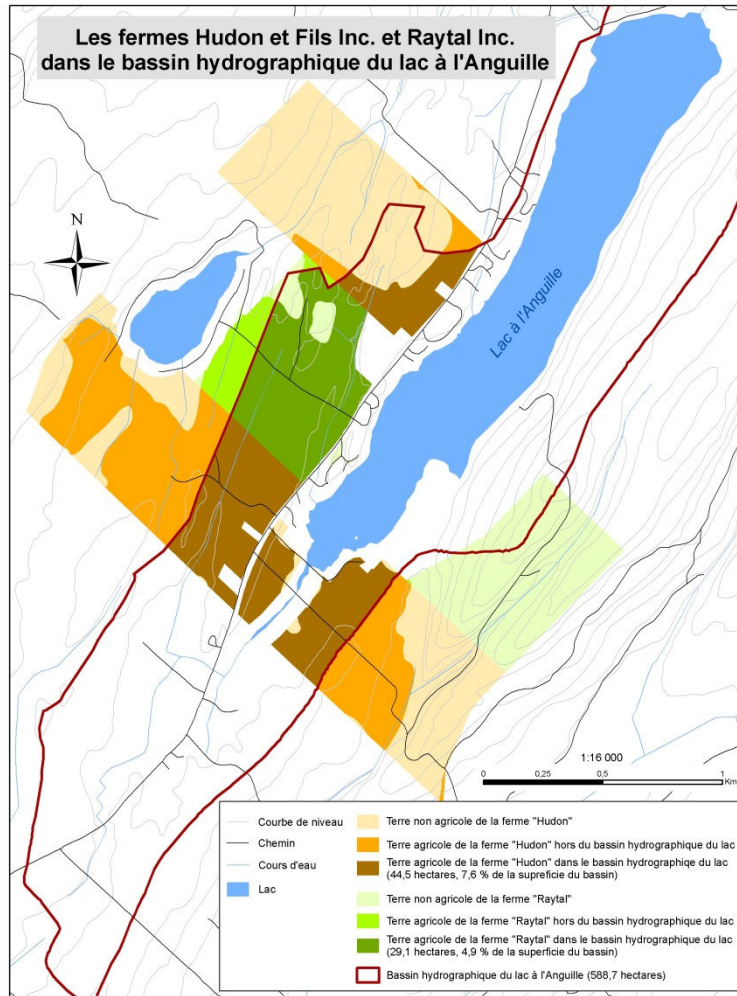


Figure 2. Occupation agricole du bassin versant du lac à l'Anguille

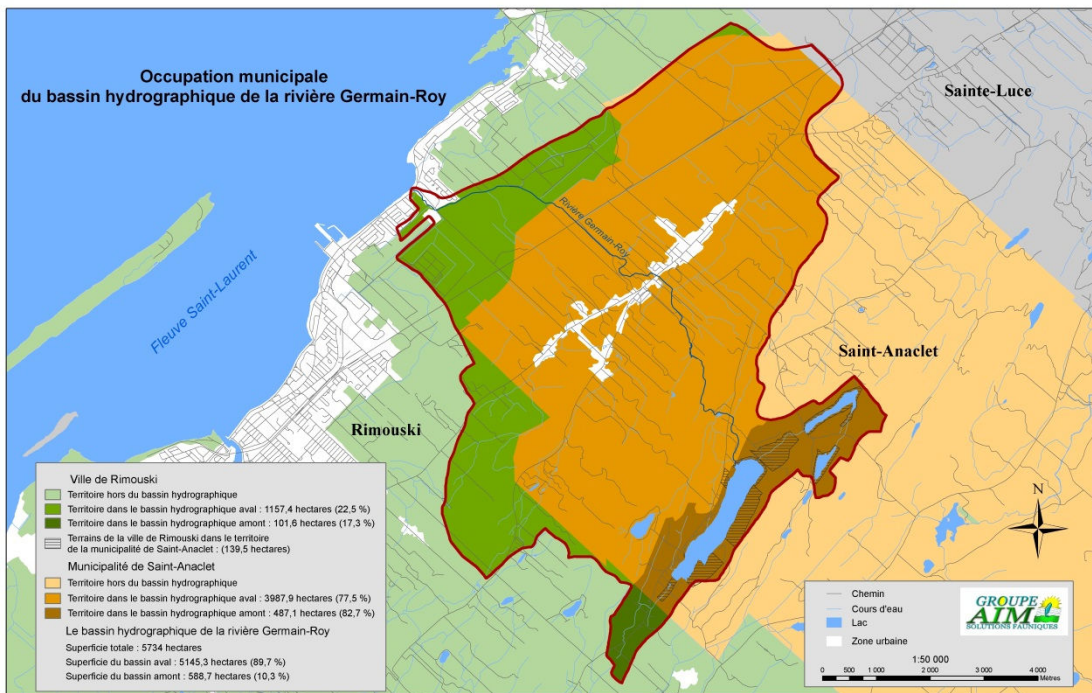


Figure 3. Bassin hydrographique de la rivière Germain-Roy



Photo 1a. Seuil à la sortie du marais, site de mesure hebdomadaire des débits



Photo 1b. Marais filtrant au printemps 2010  
(Photos n<sup>os</sup> 1a et 1b, Groupe AIM inc.)

### 2.1.1 Prise en compte de deux canaux de drainage

L'influence de la présence de deux petits canaux de drainage se déversant au centre du marais a été examinée en cours d'expérience (Roy, 2010). Les analyses statistiques ont démontré que les concentrations en PT et PTD dans ces canaux sont non significativement différentes de celles observées dans le tributaire principal (Roy, 2010, données internes). Dès la fin mai, ces canaux deviennent secs. Pour évaluer leur impact dans le système, nous avons comparé leur superficie respective. On suppose que leur effet correspond à un ajout proportionnel en ce qui a trait à la quantité de phosphore entrant dans le marais. En effet, leur superficie de drainage respective, évaluée à l'aide du logiciel Arc GIS, indique que le canal situé au sud a une superficie de bassin versant de moins de 3 ha, tandis que celui au nord draine moins de 1 ha. Leur effet sur la dynamique du marais, dont la superficie totale drainée est de 138,5 ha, est donc négligeable. En matière de représentativité, le canal au nord draine 1,8 % du total de la superficie du bassin versant du marais, tandis que celui au sud compte pour 0,46 %. Ainsi, leur faible taille et superficie comptent pour très peu sur le total du système. De fait, leur apport en phosphore a été jugé négligeable (2 %) et n'a pas été considéré.

### 2.2 Caractéristiques du marais filtrant implanté en amont du lac à l'Anguille

Dans la mesure du possible, l'aménagement du marais en milieu naturel a été fait en fonction des normes de conception recommandées dans Kadlec et Wallace (2009). Les principales caractéristiques du marais filtrant sont les suivantes :

- Superficie avoisinant 1 100 mètres carrés (0,11 ha);
- Ratio longueur : largeur de 2,5 : 1, rectangulaire trapézoïdale arrondie;
- Fond imperméable (couche d'argile);
- Pente inférieure à 0,5 %;
- Couche ou matrice de gravier/sable d'une épaisseur de 100 à 200 mm;
- Matrice composée de :
  - 30 % de gravier (diamètre de 5 à 25 mm)
  - 30 % de sable
  - 30 % de sol organique (sol sur place)
  - 10 % de galet;
- Colonne d'eau en surface de 0,1 m à 0,4 m;
- Ensemencement de ± 10 000 macrophytes;
- Plantes aquatiques : *Typha spp.*, *Scirpus spp.*, *Juncus spp.*, *Pontederia spp.*, *Sagittaria sp.*, *Eleocharis sp.*, *Iris spp.*, *Caltha sp.*, *Alisma sp.*;
- Plantes disposées en bandes latérales espacées;
- Zone profonde latérale de mélange au centre du marais;
- Fosse de sédimentation en amont du marais;
- Seuil au centre du marais pour l'oxygénation de l'eau et l'optimisation des réactions de captation du phosphore (processus aérobie);
- Seuil de maintien de niveau à la sortie avec déversoir rectangulaire.

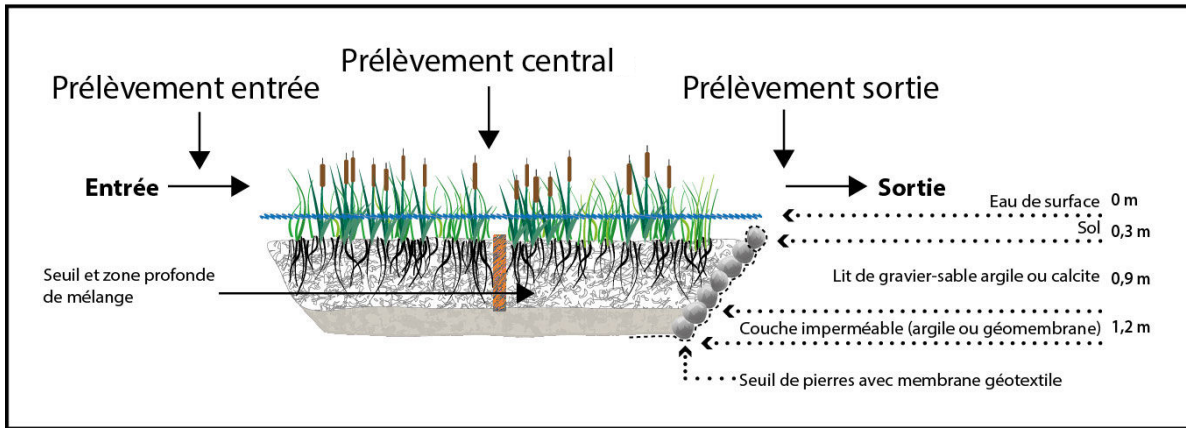


Figure 4. Croquis général du marais filtrant à écoulement horizontal de surface et des sites de prélèvements

La construction du marais filtrant expérimental a débuté à l'été 2009. La surface aménagée était alors de 600 m<sup>2</sup>. En 2010, afin de faire face à des débits plus importants que prévu initialement, l'unité de traitement a été agrandie à environ 1 100 m<sup>2</sup>. Le seuil situé à l'aval du marais assure le maintien du niveau d'eau (photo n° 1a).

Il est muni d'un déversoir rectangulaire servant à la prise des mesures des débits hebdomadaires à la sortie du marais. Le rôle du seuil central (photos n° 1b, 2 et 3) est double : il assure le maintien d'un niveau et d'une profondeur d'eau adéquats et constants, tout en favorisant l'oxygénation de l'eau grâce à ses échancrures ou petits déversoirs en V. Au pied du seuil se trouve une zone plus profonde, laquelle permet la redistribution et le mélange uniforme des nutriments dans la colonne d'eau (photos n° 1b, 2 et 3).



Photos 2 et 3. Vues des sections amont et aval du marais, complétées respectivement en 2009 et 2010



Photo 4. Marais en 2011



Photo 5. Marais en 2012



Photo 6. Vue générale du site du marais filtrant



Photo 7. Vue rapprochée du marais filtrant

(Photos n<sup>os</sup> 2 à 5, Groupe AIM inc. Photos n<sup>os</sup> 6 et 7, APELA inc.)

### 2.3 Mesure des concentrations en PT et en PDT, à l'entrée et à la sortie

Afin de déterminer l'effet épurateur du marais filtrant, on a comparé les variations de concentrations des éléments nutritifs à partir de leur point d'entrée jusqu'à leur point de sortie du marais filtrant. Le prélèvement des échantillons pour l'analyse du PT et du PDT a été réalisé à l'entrée et à la sortie du marais filtrant à raison d'une fois par semaine, ou environ une fois par période de 7 à 9 jours (période ciblée). C'est à partir de cette valeur de concentration que l'on a calculé les charges entrantes et sortantes pour ladite période de  $\pm 7$  jours.

Les prélèvements ont été faits lors des journées de précipitations ou suivant une journée de précipitations. Les échantillons d'eau ont été prélevés au centre du cours d'eau et sur toute la colonne d'eau à l'aide de l'échantillonneur de marque *Open Water grab sampler*. Le suivi annuel débutait avec la fonte des glaces et se poursuivait jusqu'à la reprise des glaces.

Les analyses de phosphore ont été réalisées au laboratoire du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ), selon les protocoles expérimentaux standards en vigueur. Les échantillons ont été maintenus et conservés à environ 4 °C lors de la récolte et du transport. L'analyse a été faite à l'intérieur d'un délai de 48 heures. Lorsqu'il était impossible de respecter ces conditions, les échantillons ont été annulés (perdus). La quantification du phosphore total a été réalisée selon la méthode en trace au persulfate (LDM 02 µg/l) (méthode MA. 303 - P 5.0) (CEAEQ, 2005). Le phosphore total dissout a également été analysé selon la méthode en trace au persulfate (méthode MA. 303 - P 5.0) (CEAEQ, 2005).

## 2.4 Mesure des débits, volumes, charges massiques et rendements

Les débits à l'entrée du marais ont été mesurés à l'aide d'une station de jaugeage calibrée munie d'un enregistreur de niveau en continu et d'une sonde à ultra-sons (photos n<sup>os</sup> 8, 9 et 10). À l'aide d'un programme, la station notait et enregistrait automatiquement les niveaux, et calculait les débits correspondants à intervalle de 30 minutes, et ce, tout au long du suivi (annexe 3). Chaque donnée de débit entrant (m<sup>3</sup>/s) a servi à déterminer le volume d'eau entrant dans le marais pendant un intervalle de 30 minutes (m<sup>3</sup>/s x 1 800 s). L'addition des volumes par tranches de 30 minutes a permis de faire le cumul des volumes d'eau entrants pour la période ciblée de ± 7 jours (tableau 1). De fait, tous les débits entrants, soit plus de 11 000 données de débits pour les deux saisons de suivi, sont mesurés avec un haut niveau de précision (± 0,0005 m<sup>3</sup>/s).



Photos 8, 9 et 10. Station ultra-sons d'enregistrement en continu des débits entrants  
(Photos n<sup>os</sup> 8, 9 et 10, Groupe AIM inc.)

Les débits sortants ont été mesurés hebdomadairement, lors de la prise des échantillons de PT et PDT, à l'aide d'un courantomètre de marque *Global Water FP 201* (précision ± 0,05 m/s) (tableau 1). Les mesures ont été prises au niveau du déversoir rectangulaire du seuil aval, situé à la sortie du marais. Le débit était ensuite estimé à l'aide de la formule :  $Q = V * H * L$  où

Q est le débit (m<sup>3</sup>/s)

V est la vitesse du courant (m/s)

H est la hauteur du niveau d'eau (m) sur le déversoir rectangulaire

L est la largeur de la colonne d'eau sur le déversoir rectangulaire (m) (valeur fixe).

Puisque les débits sortants étaient mesurés et notés uniquement lors des journées de prélèvements/échantillonnage d'eau à des fins d'analyses en [PT] et [PDT], les débits sortants ont été estimés à partir des débits entrants, auxquels on a additionné les précipitations et soustrait l'évapotranspiration à la surface du marais de 1 100 m<sup>2</sup>.

La comparaison des valeurs hebdomadaires des débits entrants et sortants mesurés a démontré une similitude constante. Ainsi, les débits mesurés à l'entrée du marais lors des jours de prélèvement sont constamment similaires à ceux mesurés à l'aide du courantomètre à la sortie du marais pour les mêmes jours et approximativement les mêmes heures. La très faible variabilité entre les débits entrants et sortants est potentiellement attribuable aux méthodes d'estimation distinctes (sonde versus courantomètre) et dont le niveau de précision diverge légèrement, ou encore à l'effet des apports et pertes d'eau respectivement par précipitations et évaporation à la surface du marais.

Les valeurs de précipitations, servant dans le calcul de l'estimation des volumes sortants pour une période ciblée, ont été obtenues à l'aide d'un pluviomètre installé à proximité du site, soit dans un rayon de moins de 2 km du marais filtrant. Lorsque non disponibles, les données ont été recueillies à la station hydrologique Rimouski (7056480) d'Environnement Canada, laquelle est située à 12 km au nord du site d'étude. Pour l'ajout de l'effet de l'évapotranspiration à l'équation du calcul des volumes sortants, des valeurs de référence oscillant entre 1 et 4 mm/j, selon le mois et la température moyenne mensuelle, ont été employées. Ces valeurs sont notées dans diverses études pour des marais à écoulement de surface de même composition floristique (Snyder et Boyd, 1987; Goulden et coll., 2006; Kadlec et Wallace, 2009).

Ainsi, une évapotranspiration de 1 mm/j et de 4 mm/j respectivement correspond à une évapotranspiration de 1,1 m<sup>3</sup>/j et 4,4 m<sup>3</sup>/j pour notre marais filtrant de 1 100 m<sup>2</sup>. Cela a été réalisé pour raffiner les résultats, mais a très peu d'impact sur les débits au final puisqu'à titre comparatif, une perte par évapotranspiration de 4,4 m<sup>3</sup>/j correspond à un débit de 0,00005 m<sup>3</sup>/s, soit 60 fois plus petit qu'un débit de 0,0030 m<sup>3</sup>/s et 300 fois moins élevé que le débit moyen de 0,017 m<sup>3</sup>/s noté pour la saison 2012, ce qui, somme toute, a peu ou pas d'influence par rapport aux débits et volumes enregistrés lors de ce suivi.

Les valeurs de concentration en phosphore total [PT] et phosphore dissout total [PDT] enregistrées pour la semaine à l'entrée et à la sortie du marais ont servi à calculer les charges massiques et les taux d'enlèvement pour la semaine correspondante. Pour ce faire, les volumes d'eau entrants et sortants totaux (cumulés) pour la période ciblée ( $\pm 7$  jours) ont été multipliés à la valeur de concentration en PT et PDT de la semaine ou période correspondante (entrée, sortie), afin de calculer les charges massiques entrantes et sortantes pour ladite période (Volumes m<sup>3</sup>/s cumulés  $\pm 7$  jours \* [P mg/m<sup>3</sup> hebdomadaire]).

Les différentiels entre les charges entrantes et les charges sortantes ( $g\ PT_{entrant} - g\ de\ PT_{sortant}$  et  $g\ PDT_{entrant} - g\ PDT_{sortant}$ ) ont ensuite été calculés pour obtenir les charges massiques de PT et de PDT retenues ou relarguées par le marais pour la période ciblée.

Ainsi, le calcul des charges massique est :

Charges massiques à l'entrée :

$$\sum_{\text{intervalle de temps de } \pm 7 \text{ jours}} \text{Volumés}_{\text{entrée}} \times [P_{\text{hebdomadaire entrée}}]$$

Charges massiques à la sortie :

$$\sum_{\text{intervalle de temps de } \pm 7 \text{ jours}} \text{Volumés}_{\text{entrée} + \text{précipitations} - \text{éapotranspiration}} \times [P_{\text{hebdomadaire sortie}}]$$

Le retrait total est obtenu en soustrayant les charges sorties des charges entrées:

$$\sum_{\text{intervalle de temps}} (\text{Volume}_{\text{entrée}} \times [P_{\text{entrée}}]) - ((\text{Volume}_{\text{entrée} + \text{précipitations} - \text{éapotranspiration}}) \times [P_{\text{sortie}}])$$

Le bilan saisonnier de retrait en kilogrammes (kg) de P par année est obtenu en soustrayant la sommation des charges à l'entrée à la sommation des charges à la sortie pour les années respectives. Les taux d'enlèvement ou de retrait par  $m^2$  sont déduits en divisant la charge nette par la surface du marais. Ceci est exprimé usuellement dans la littérature scientifique en termes de  $g\ de\ P\ retiré/m^2/saison$  ou période de  $n$  jours. À des fins de comparaison avec l'approche de l'îlot filtrant, on calcule également le taux de retrait journalier en divisant la valeur de  $P/m^2/saison$  par le nombre de jours dans la saison ou la période de suivi effectué. Le taux de retrait journalier est alors présenté en  $g$  ou  $mg$  de P retiré  $m^2/jour$ .

L'approche méthodologique employée constitue un biais quant à la précision des valeurs quantitatives de P (kg) estimées à la sortie du marais dans le cadre de cette étude. Dans un premier temps, pour y remédier, une mesure précise et en continu des débits sortants aurait été souhaitable. Par contre, en raison de la topographie du terrain et des coûts de ce type d'équipement, l'ajout d'une seconde station de jaugeage automatisée aurait nécessité des travaux et des investissements supplémentaires notables.

De plus, afin de capter la variabilité intrasite, au moins trois échantillons auraient dû être prélevés (entrée et sortie). De même, la prise de données et l'analyse journalière des concentrations de PT et PDT auraient été souhaitables afin de préciser les charges massiques en jeu. Conséquemment, les valeurs des charges massiques totales retenues ou relarguées par le marais constituent une vue d'ensemble du portrait potentiel de la dynamique du P dans ce petit sous-bassin versant. Bien que ce portrait ne présente pas la situation d'une façon complète et détaillée, il en offre toutefois un excellent aperçu.

Tableau 1. Description des paramètres mesurés, calculés et estimés, méthodes, unités et fréquence des mesures

Paramètre	Méthode	Unité	Fréquence
[Pt entrée]	Prélèvements <i>in situ</i> et analyses en laboratoires (CEAEQ). Notez que les unités ont été converties en mg/m <sup>3</sup> pour effectuer les calculs des charges.	mg/l ou mg/m <sup>3</sup>	Hebdomadaire
[Pd entrée]	Prélèvements <i>in situ</i> et analyses en laboratoires (CEAEQ).	mg/l ou mg/m <sup>3</sup>	Hebdomadaire
[Pt sortie]	Prélèvements <i>in situ</i> et analyses en laboratoires (CEAEQ).	mg/l ou mg/m <sup>3</sup>	Hebdomadaire
[Pd sortie]	Prélèvements <i>in situ</i> et analyses en laboratoires (CEAEQ).	mg/l ou mg/m <sup>3</sup>	Hebdomadaire
Débits entrée	Station de jaugeage munie d'une sonde ultra-sonic et d'un enregistreur de niveau avec mémoire et programme de calcul des débits.	m <sup>3</sup> /s	Mesures en continu
Débits sortie	À l'aide d'un courantomètre sur le déversoir rectangulaire à la sortie du marais (Q=V*H*L).	m <sup>3</sup> /s	Hebdomadaire
Débit sortie	Estimation à partir des débits entrants (pour lesquels, dans le calcul du volume, on prend en considération les précipitations et l'évaporation pour la période ciblée).	m <sup>3</sup> /s	Autres jours de la période
Précipitation	Pluviomètre <i>in situ</i> ou station météorologique d'Environnement Canada à Rimouski. Obtenue en multipliant la surface du marais (1 100 m <sup>2</sup> ) par la quantité d'eau précipitée (mm/m <sup>2</sup> ) (convertie en m/m <sup>2</sup> ). Par exemple, une précipitation journalière de 20 mm sur une surface de 1 100 m <sup>2</sup> donne 22 m <sup>3</sup> d'eau précipitée à la surface du marais pour cette journée. Volume précipité : 0,02 m/m <sup>2</sup> * 1 100 m <sup>2</sup> = 22 m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	Tous les jours de la période ciblée
Évaporation	À partir des données de références d'études faites dans un contexte environnemental similaire, on a attribué des valeurs d'évaporation (taux de 1 à 4 mm/m <sup>2</sup> selon le mois). Tout comme pour les précipitations, on convertit les unités de la valeur d'évaporation (m/m <sup>2</sup> ) et on les multiplie à la surface du marais (1 100 m <sup>2</sup> ).	m <sup>3</sup>	Tous les jours de la période ciblée
Volumes entrants	Obtenus en multipliant les débits entrants par l'intervalle de temps de 30 minutes. Par exemple, débit de 0,03 m <sup>3</sup> /s durant 30 minutes : V = 0,03 m <sup>3</sup> /s * 1 800 s = 54 m <sup>3</sup> d'eau entrés dans le marais durant cet intervalle de 30 minutes. Cette opération est répétée de manière à cumuler les volumes pour la période de temps qui nous intéresse (semaine, mois, saison).	m <sup>3</sup>	s.o.
Volumes sortants	Idem au volume entrant; on y ajoute les précipitations et on en soustrait l'évaporation à la surface du marais (pour la période ciblée). Cette opération est répétée de manière à cumuler les volumes pour la période de temps qui nous intéresse (semaine, mois, saison).	m <sup>3</sup>	s.o.
Charges entrantes	Obtenues en multipliant le volume entrant (m <sup>3</sup> ) par la concentration hebdomadaire (mg/m <sup>3</sup> ) en PT et en PDT à l'entrée du marais. On cumule ensuite les charges en fonction de la période ou du nombre de jours ciblés.	mg ou kg de PT ou PDT	
Charges sortantes	Obtenues en multipliant le volume sortant (m <sup>3</sup> ) par la concentration hebdomadaire (mg/m <sup>3</sup> ) en PT et en PDT à la sortie du marais. On cumule ensuite les charges en fonction du nombre de jours ou de la période ciblée.	mg ou kg de PT ou de PDT	
Charges retenues	Obtenues en soustrayant des charges entrantes les charges sortantes pour la période de temps désirée.	mg, g ou kg de PT ou PDT/jour, semaine, mois, saison	
Taux d'enlèvement	Obtenu en divisant la charge retenue durant la saison par la surface du marais.	g/m <sup>2</sup> /saison	
Taux de retrait journalier	Obtenu en divisant le taux d'enlèvement par le nombre de jours de l'étude pour chacune des deux saisons.	g ou mg de PT ou de PDT/m <sup>2</sup> /j	

## 2.5 Mesure des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques sont des facteurs pouvant influencer les performances épuratrices du marais filtrant. La température, le pH et l'oxygène dissout figurent parmi les principaux paramètres d'intérêt. Ces paramètres affectent physiologiquement tant la matrice microbienne que végétale. Le suivi temporel de ces paramètres a pour objectif de vérifier leurs effets sur les performances du marais.

La turbidité (NTU), la température (°C), l'oxygène (mg/l et % de sat.) et la conductivité (µS) ont été notés tout au long du suivi, et ce, à l'entrée, au centre et à la sortie du marais lors des journées d'échantillonnage. Les analyses des conditions physico-chimiques du marais filtrant (2011-2012) ont eu lieu en même temps et au même rythme que les prélèvements de phosphore. Voici la liste des appareils employés pour mesurer les divers paramètres physico-chimiques :

<b>Paramètres</b>	<b>sonde / appareil</b>
pH	pH-mètre VWR modèle 2000 (précision ± 0,05 unité)
Turbidité	turbidimètre Hanna modèle Hi98703 (précision ± 0,01 ntu)
Transparence	disque de Secchi (précision ± 0,5 m)
Conductivité	sonde multi paramètres YSI modèle 85 (précision ± 0,05 µS)
Oxygène	sonde multi paramètres YSI modèle 85 (précision ± 0,05 mg / l)
Température	sonde multi paramètres YSI modèle 85 (précision ± 0,05 °C)

Afin de cibler si un ou des paramètres physico-chimiques étaient en cause dans la baisse de rendement du marais observée en 2012, une régression linéaire simple a été utilisée pour corréler l'effet des divers paramètres sur la concentration de phosphore total à la sortie du marais en 2012. De même, une régression linéaire simple a été utilisée afin d'évaluer l'effet du pourcentage d'oxygène dans l'eau sur la concentration de phosphore dissout à l'entrée et à la sortie du marais en 2012. L'homogénéité a été vérifiée visuellement et la normalité a été testée en utilisant le test de Shapiro-Wilk. Les données ont subi une transformation logarithmique afin de respecter ces conditions.

## 2.6 Mesure du temps de rétention de l'eau dans le marais

Le temps de rétention et le panache d'écoulement dans le marais ont été évalués à l'aide d'un traceur colorimétrique et d'un fluorimètre (10-AU Fluorometer, Turner Design). Par la suite, l'optimisation de l'écoulement de l'eau a été effectuée par la mise en place de pierres et de substrat (galet/gravier) aux endroits appropriés, afin d'empêcher la formation de canaux d'écoulement préférentiels et de bien distribuer la masse d'eau dans le marais. L'emploi d'un traceur colorimétrique a permis d'évaluer le débit, le temps de transit ainsi que le panache de distribution ou d'écoulement dans le milieu (marais). Le traceur employé est la rhodamine WT, un colorant fluorescent couramment utilisé pour les études

de SEE (c.-à-d. étude de Suivi des Effets sur l'Environnement - de la Direction des activités de protection de l'environnement d'Environnement Canada). La méthodologie a consisté à injecter, en amont de l'entrée du système, une quantité de traceur connue (dont la quantité est déterminée en fonction du débit présent en tributaire). Ensuite, on a effectué des prélèvements d'eau à intervalles réguliers (10 minutes) à la sortie du système afin de tracer la courbe concentration vs temps (méthodes de Wilson (1968), Kilpatrick (1970) et Hubbard et coll. (1981), cités par Chimney, 2006). Le temps de rétention correspond au pic de concentration noté sur la courbe du graphique (Chimney, 2006).

Dans le cas présent, cet exercice a permis de déterminer les temps de transit de la masse d'eau dans le marais afin de procéder adéquatement aux prélèvements des échantillons correspondants à la sortie. Évidemment, le temps de transit est affecté par le débit entrant. À partir des relevés, on a obtenu une courbe théorique constituant une modélisation du temps de rétention dans le marais en fonction des débits et, ainsi, réalisé l'échantillonnage au moment opportun. Avec cette approche, on a voulu prélever des échantillons d'eau à la sortie qui correspondaient le plus possible à la même eau échantillonnée à l'entrée du marais.



Photo 11. Fluorimètre



Photo 12. Entrée de la rhodamine



Photo 13. Rhodamine à la sortie

(Photos n<sup>os</sup> 11, 12 et 13, Groupe AIM inc.)

## 2.7 Périodes d'échantillonnage

Un pluviomètre a été installé dans un rayon de 2 km du site afin de mieux cibler les périodes de prélèvement des échantillons d'eau devant avoir lieu environ tous les 7 jours et, si possible, lors des événements de pluies. Ainsi, l'échantillonnage hebdomadaire a aussi été irrégulier, car il a été réalisé en concordance avec les épisodes de pluies rencontrés à chaque période de  $\pm 7$  jours.

## 2.8 Mesure du taux de sédimentation du marais

Afin de déterminer le rythme d'accumulation des sédiments fins dans le marais, 24 sites représentatifs de sa topographie générale ont servi de points de repère au suivi temporel de l'évolution de l'épaisseur de sa couche de sédiments. Ces points ont été prédéterminés

par quadrillage et identifiés à l'aide de tiges d'acier implantées profondément. Un relevé des niveaux d'accumulation des sédiments a été réalisé aux 24 points / sites en fin de saison.



Photo 14. Tige repère pour la mesure de la couche de sédiments dans le marais  
(Photo n° 14, Groupe AIM inc.)

## 2.9 Entretien du marais filtrant à écoulement horizontal de surface

Pour les systèmes de marais à faible charge en nutriments, le faucardage et la récolte de la végétation peuvent compter pour une part significative de l'enlèvement des nutriments du système (Browning, 2003). Pour un système à écoulement de surface à faible charge, Greenway et Woolley (2001, cités par Browning, 2003) rapportent que la récolte des tissus végétaux permet le retrait respectif de 65 et 47 % du phosphore et de l'azote retirés au total par le système. Ainsi, la fraction de P enlevé (65 % du P total retiré) en effectuant la récolte des tissus dans un système à faible charge peut s'avérer significative et importante. On considère que le tributaire du lac à l'Anguille entre dans la catégorie des affluents à faibles charges et concentrations.

La méthode de récolte des tissus proposée est la suivante : coupe de la tige à environ 5 à 10 cm en haut du niveau de l'eau ou du sol (Greenway and Woolley 2001, cités par Browning, 2003). Ceci favorise le retrait des nutriments accumulés dans les parties aériennes des plantes et empêche leur retour vers le sol et l'eau par décomposition de la matière organique présente dans les tissus (feuilles, tiges, inflorescence). La récolte a eu lieu à la fin de l'automne pour les besoins du suivi, mais en temps normal, elle doit avoir lieu l'été alors que la quantité de nutriments contenus dans la partie aérienne est à son maximum (Breen, 1990 cité par Browning, 2003) et de façon à maintenir une croissance optimale si l'on désire procéder à un second ou un troisième faucardage durant une même saison. Dans le cas présent, la coupe s'est faite à l'aide d'une grande cisaille. Les tiges étaient déposées dans des contenants et les résidus envoyés au compostage. Un entretien et un désherbage des espèces non souhaitées ont été effectués parallèlement. Deux journées ont été requises pour réaliser un faucardage et l'entretien du marais de 1 100 m<sup>2</sup>.

## **2.10 Suivi de la libre circulation du poisson dans le marais**

Tout au long du projet, la vérification visuelle de la hauteur de chute au niveau des deux seuils, de même que du niveau d'eau dans le marais, a servi à évaluer la libre circulation du poisson.

(Pour complément, consultez le protocole de projet, version finale, avril 2010 (Roy, 2010).)

### 3.0 Résultats

#### 3.1 Croissance des plantes

En tout, approximativement 10 000 spécimens des espèces suivantes ont été implantés dans le marais filtrant durant les saisons de construction 2009 et 2010 : *Typha latifolia*, *Iris pseudacorus*, *Iris versicolor*, *Juncus effusus*, *Sagittaria latifolia*, *Scirpus validus*, *Caltha palustris*, *Eleocharis smallii*, *Glyceria canadensis* et *Spartina pectinata*. La plupart des espèces ensemencées dans le marais filtrant ont connu une croissance exceptionnelle. Rapidement, les plantes ont atteint des tailles maximales dépassant la norme en milieu naturel. Seuls *Iris versicolor* et la *Pontederia cordata* ont éprouvé des difficultés d'implantation.



Colonies de *Scirpus validus*



Feuillage de l'*Iris pseudacorus*



*Sagittaria latifolia*



Tige de *Scirpus validus*



*Typha latifolia*



*Glyceria canadensis*

Photo 15. Photos démontrant l'excellente croissance des plantes du marais filtrant  
(Série photos n° 15, Groupe AIM inc.)

## **3.2 Concentration en phosphore**

Dans cette section sont présentées les différences entre les concentrations en PT et PDT mesurées à l'entrée et celles mesurées à la sortie du marais. Le lecteur est appelé à garder à l'esprit qu'il s'agit de valeurs ponctuelles (une fois par semaine environ) correspondant à un portrait éclair et qu'entre les points de la courbe, les concentrations ont pu varier différemment, à l'entrée et à la sortie du marais.

### **3.2.1 [PT] entrée vs sortie du marais (an 1, 2011)**

En 2011, les concentrations observées en PT ([PT]) à l'entrée et à la sortie du marais sont demeurées similaires durant le mois de mai (figure 3). À compter du 16 juin et jusqu'au 30 novembre, la concentration en PT à la sortie était constamment inférieure à celle enregistrée à l'entrée du marais (figure 3). Les maximums de réduction de la [PT] ont été enregistrés durant les mois de septembre (77 %) et d'octobre (79 %) (figure 5). Les maximums de réduction sont calculés en fonction du pourcentage de réduction de la concentration en phosphore, de son point d'entrée à son point de sortie. Par exemple, si l'on observe une concentration de 0,050 mg/l à l'entrée et de 0,025 mg/l à la sortie, le taux de réduction est de 50 %. Il s'agit ici, comme il est mentionné au point 3.2, d'une valeur faisant référence à une journée durant le mois. À l'exception du mois de mai, des taux de réduction en [PT] de 50 % et plus sont notés durant au moins une semaine pour tous les mois, incluant la dernière semaine du mois de juin (figure 5). Enfin, durant les deux dernières semaines du mois de novembre, le marais a démontré de faibles taux de réduction de la [PT].

### **3.2.2 [PDT] entrée vs sortie du marais (an 1, 2011)**

En 2011, des réductions substantielles de la [PDT] sont observables dès le 1<sup>er</sup> juin, et ce, jusqu'au 21 novembre (figure 5). Durant cette période, les [PDT] observées à l'entrée et à la sortie du marais ont été réduites en moyenne de 39 % (figure 5). Les valeurs enregistrées le 7 novembre (78 %), le 3 octobre (76 %), le 25 août (74 %) et le 29 juin (74 %) constituent les taux de réduction hebdomadaires maximaux de la [PDT] pour la saison 2011 (figure 5). Ici aussi, les plus faibles valeurs de réduction de la [PDT] sont observées en début et en fin de saison, soit de 0 % au mois de mai et de 4 % le 30 novembre.

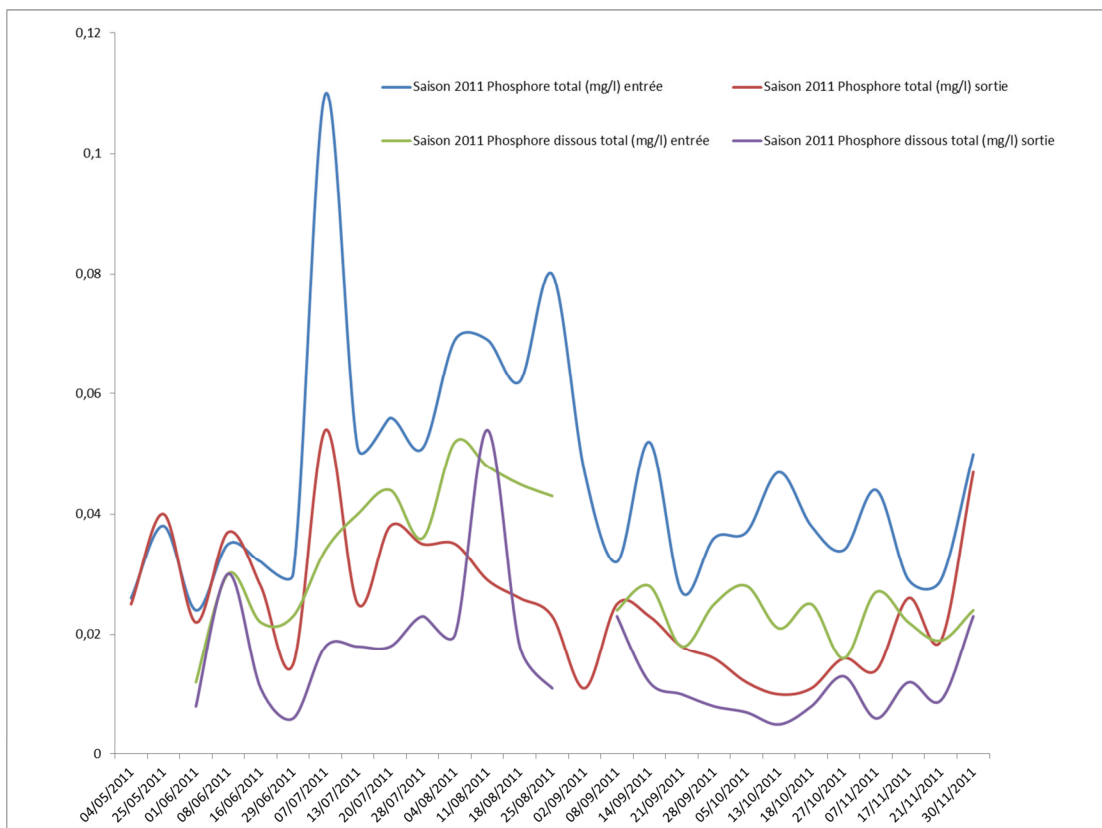


Figure 5. Variations saisonnières de la [PT] et [PDT] à l'entrée et à la sortie du marais en 2011

Note : La coupure dans les courbes du PDT indique un manque de données pour la période concernée.

### 3.2.3 [PT] entrée vs sortie du marais (an 2, 2012)

À la saison 2012, la réduction de la [PT] à la sortie du marais apparaît à partir du 29 mai et se poursuit jusqu'au début du mois d'août (figure 6). En août, on a constaté un effet inverse, c'est-à-dire une augmentation de la [PT] à la sortie du marais (figure 6). La réduction de la [PT] a repris au mois de septembre et s'est poursuivie, dans une moindre mesure, au mois d'octobre. On a noté des taux de réduction maximaux lors des semaines du 19 juin (62 %), du 27 août et du 31 octobre (55 %), ainsi que durant celles du 17 (53 %) et du 11 (52 %) juillet. Durant le mois de mai jusqu'à la mi-juin, il y a peu de différences entre les [PT] notées à l'entrée et à la sortie du marais (figure 6).

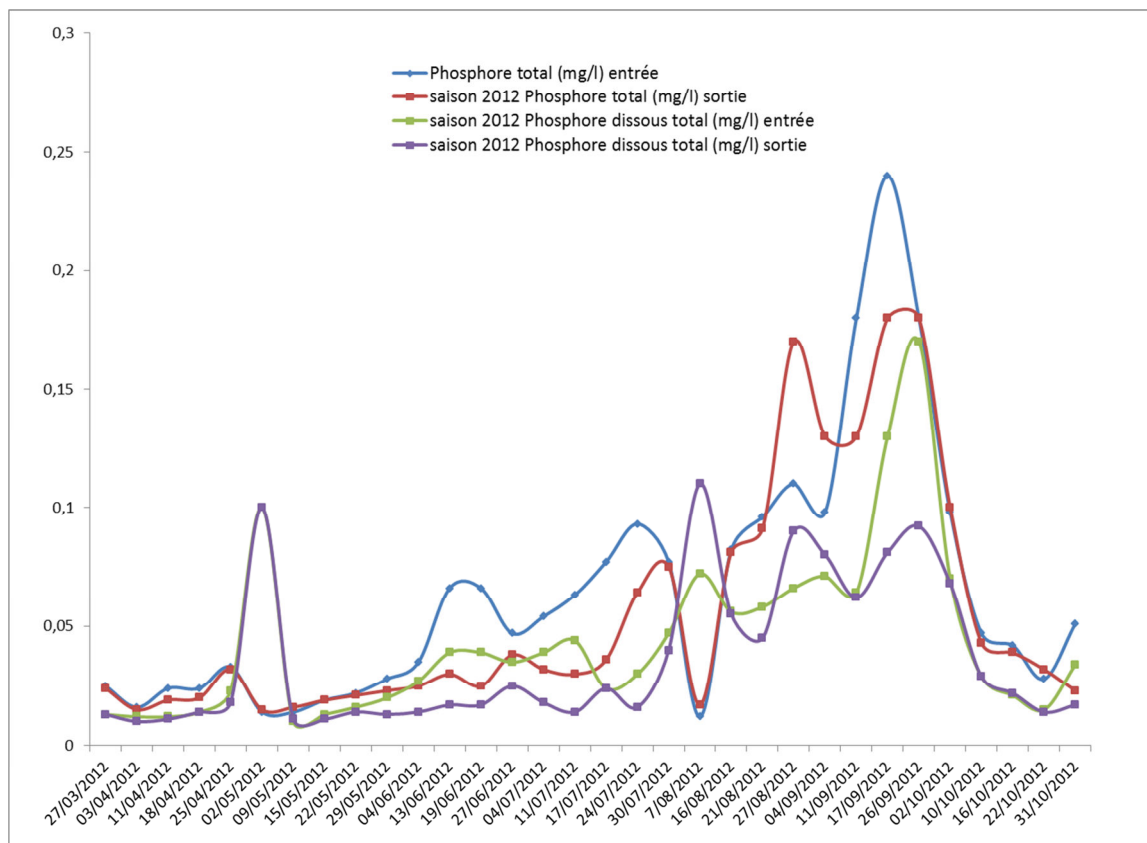


Figure 6. Variations saisonnières de la [PT] et [PDT] à l'entrée et à la sortie du marais en 2012

### 3.2.4 [PDT] entrée vs sortie du marais (an 2, 2012)

Tout comme la [PT], les courbes de la [PDT] démontrent que la réduction à la sortie du marais a commencé dès la mi-mai. La réduction de la [PDT] entrée-sortie du marais est plus importante durant les mois de juin et juillet alors que l'on a observé des baisses respectives de 48, 56 et 28 % durant trois semaines consécutives au mois de juin et de 54, 68 et 47 % en juillet (figure 6). Par ailleurs, on a enregistré une baisse de la [PDT] à la sortie du marais de 53 % pour la première semaine d'août, et de 46 % et 50 % respectivement pour les dernières semaines des mois de septembre et octobre (figure 6).

Des fluctuations inverses se sont produites durant le mois d'août 2012 (figure 6). Durant cette période, la [PDT] notée a été généralement plus élevée à la sortie qu'à l'entrée du marais. Des hausses de la [PDT] à la sortie du marais de 53, 36 et 13 % ont été constatées respectivement les 7 et 27 août, et le 4 septembre. De même, aucune réduction de la [PDT] à la sortie du marais n'est notée durant les trois (3) premières semaines du mois d'octobre (figure 6). La situation est revenue à la normale au début du mois de novembre.

### 3.2.5 Réduction mensuelle moyenne de la [PT] et de la [PDT] en 2011 et 2012

Considérant que chaque période ( $\pm 7$  jours) a environ le même poids, la moyenne de réduction mensuelle est calculée en faisant la moyenne des moyennes hebdomadaires de réduction des concentrations en PT et PDT pour le mois en cours.

La réduction de la concentration entrée versus sortie des deux formes de P suit une tendance générale similaire pour les deux années du suivi (figures 7 et 8). En tout début de saison, on observe peu de différence entre les concentrations à l'entrée et celles à la sortie du marais pour les deux formes de P. De la fin mai à la fin juillet, la réduction de la [PDT] a été légèrement supérieure à celle enregistrée pour le PT en juillet, et la réduction de la [PT] est tout de même importante (figures 7 et 8).

Les diminutions moyennes de la [PT] et de la [PDT] enregistrées pour l'ensemble de la saison 2011 ont été respectivement de 38 et 44 % (figure 7). Les mois d'août (59 %) et d'octobre (68 %) ont affiché les moyennes mensuelles de réduction de la [PT] les plus élevées en 2011 (figure 7). Viennent ensuite les mois de septembre (49 %), juillet (41 %) et novembre (30 %) (figure 7). Le bilan de réduction de la [PT] au mois de mai a montré une légère diminution de 1 % à la sortie du marais (figure 7). En ce qui a trait à la réduction moyenne mensuelle de la [PDT], les taux les plus élevés ont été notés pour les mois d'octobre (59 %), septembre et juillet (49 %), et août (46 %) (figure 7). Le mois de mai a présenté un bilan nul au chapitre de la réduction des (PDT) (figure 7). Il faut toutefois noter que nous avons retiré deux semaines de résultats au mois de mai en raison des valeurs contradictoires observées, lesquelles présentaient des teneurs plus élevées en PDT qu'en PT à l'entrée du marais.

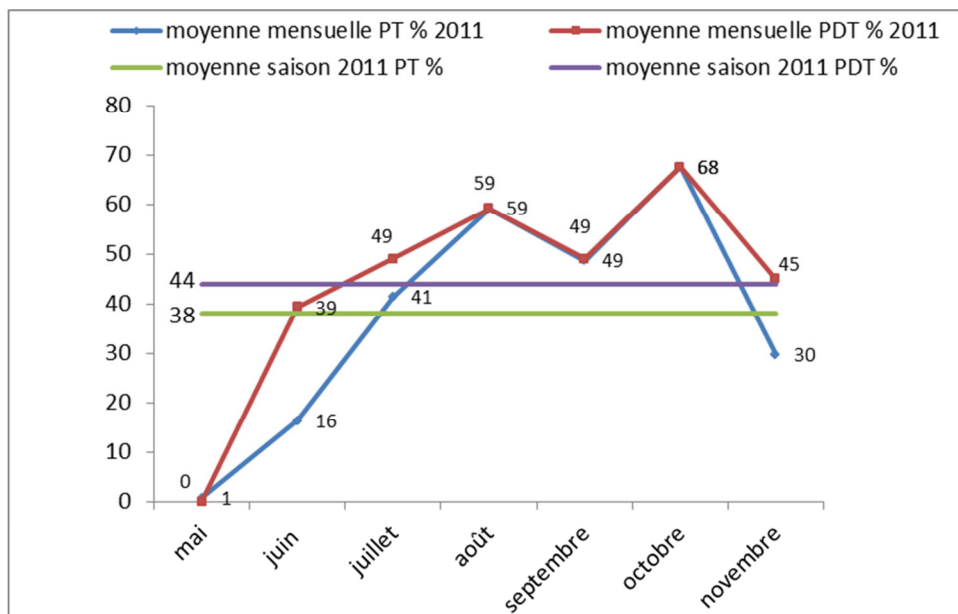


Figure 7. Moyennes mensuelles et saisonnières de réduction (%) des [PT] et [PDT] en 2011

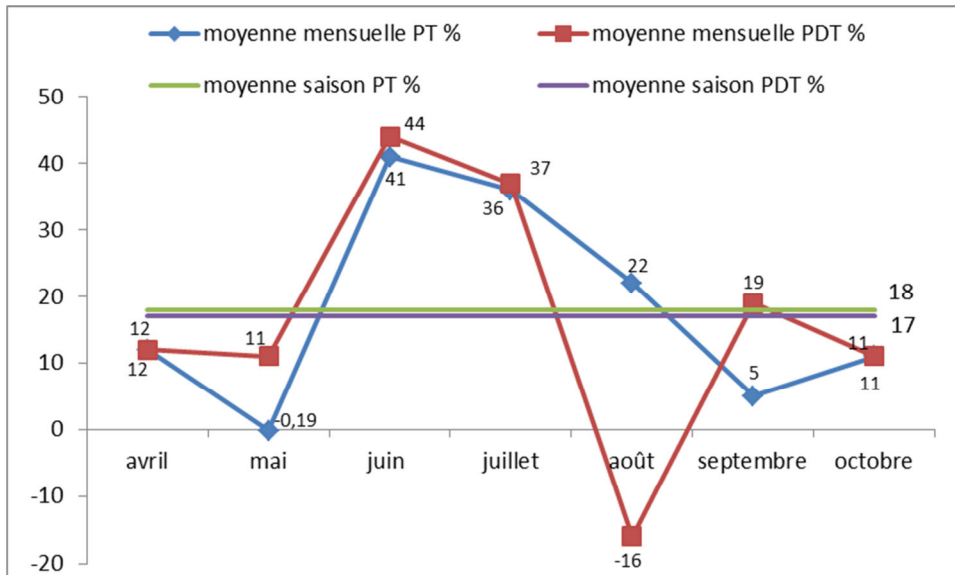


Figure 8. Moyennes mensuelles et saisonnières de réduction (%) des [PT] et [PDT] en 2012

Les mois de juin et juillet ont présenté les meilleurs rendements de réduction des [PT] et [PDT] en 2012, soit, dans l'ordre, 41 et 36 % et 44 et 37 % (figure 8). Les faibles rendements observés aux mois de mai, août, septembre et octobre ont affecté les performances et fait chuter les moyennes saisonnières de réduction du phosphore. La moyenne saisonnière a été de 18 % et de 17 % de réduction des [PT] et [PDT] (figure 8).

Ainsi, comparativement à 2011, la saison 2012 a été caractérisée par une baisse importante des niveaux de réduction durant une partie des mois de mai, août, septembre et octobre. Par exemple, au mois d'août 2012, on a enregistré une hausse moyenne de la [PDT] à la sortie du marais de 16 % (-16 sur la figure 8). Les mois d'avril et mai ont présenté des réductions de 12 et 11 % des [PDT] et de 12 et 0,19 % des [PT]. Les mois de septembre et octobre ont affiché des niveaux mensuels de réductions des [PDT] et [PT] sensiblement supérieurs avec respectivement 19 et 11 % et 5 et 11 % (figure 8). Ces diminutions mensuelles moyennes des [PDT] et [PT] à la sortie du marais sont nettement inférieures à celles constatées en 2011 pour les mois de septembre (35, 47 %), octobre (59, 68 %) et novembre (45, 30 %) (figure 7).

### 3.2.6 Biais dans deux périodes d'échantillonnage

Pour les semaines du 11 au 18 et du 19 au 24 mai 2011, on note des valeurs en phosphore total (PT) à l'entrée et à la sortie inférieures aux valeurs totales de phosphore dissout total (PDT) à l'entrée et à la sortie, ce qui est chimiquement impossible. À notre avis, une erreur de manipulation et d'identification des bouteilles entrée-sortie a été commise. L'inversion des bouteilles entrée-sortie en début de campagne terrain permettrait d'expliquer cette anomalie, mais l'on ne peut malheureusement pas en être tout à fait certain. Une erreur dans la transmission et l'identification des résultats d'analyses en laboratoire est aussi plausible, mais peu probable.

### 3.3 Charges massiques et retraits de PT et PDT

Les charges entrantes et sortantes en phosphore servent à évaluer et à quantifier l'efficacité du marais à retenir le phosphore contenu dans la masse d'eau, de son point d'entrée à son point de sortie. Beaucoup plus que le simple différentiel en concentration entrée-sortie des paramètres à l'étude, les charges massiques indiquent la quantité en poids de phosphore retenu par le marais.

Pour les deux années de suivi, les débits entrants et sortants ainsi que les concentrations hebdomadaires en PT et PDT notées à l'entrée et à la sortie du marais filtrant ont servi à calculer et à estimer les charges massiques entrantes et sortantes. L'annexe 1 présente les charges entrantes et sortantes pour chaque semaine ainsi que la charge nette, soit la différence entre la charge entrante et la charge sortante. Lorsque le différentiel est négatif, cela signifie qu'il y a plus de phosphore dans l'eau à la sortie du marais qu'à son entrée et vice-versa (annexe 1). Il importe de conserver à l'esprit qu'il s'agit essentiellement d'un portrait ou estimé global de la situation, puisque le calcul des charges est fait à partir d'une seule série de données hebdomadaires de [PT] et [PDT] à l'entrée et à la sortie du marais, laquelle série est appliquée à l'ensemble des débits de tous les jours de la semaine (ou période de  $\pm 7$  jours).

#### 3.3.1 Débits, charges et performances du marais

##### Printemps

En 2011, les débits entrants cumulés au mois de mai ont totalisé 62 % des débits de la saison et respectivement 54 et 57 % des charges massiques entrantes en PT et PDT (annexe 1, tableau 2, figure 9). Environ 2 % et 5 % des charges entrantes en PT et PDT sont retenues par le marais durant ce mois critique. Au final, le mois de mai 2011 représente, dans l'ordre, 1 et 3 % de la fraction totale annuelle de retrait du PT et du PDT par le marais (annexe 1, tableau 2).

Pour 2012, le portrait printanier est d'autant plus complet avec le mois d'avril qui a cumulé 65 % du débit saisonnier entrant, correspondant à 66 et 64 % des charges massiques en PT et PDT entrantes dans le marais (annexe 1, tableau 3, figure 9). Le mois de mai 2012 a généré 26 % des débits saisonniers totaux et 15 et 16 % des charges entrantes en PT et PDT. Combinés, les mois d'avril et mai 2012 ont réuni 90 % des débits entrants et 82 et 81 % des charges entrantes en PT et PDT (tableau 3, figure 9). Pour une efficacité relative de rétention du PT et PDT entrant durant ces deux mois de 5 % et 12 %; proportionnellement, 4,3 et 9,5 % de la charge totale annuelle entrante en PT et PDT a été retenue par le marais. Enfin, en dépit de ces performances plutôt faibles, ces mois ont compté pour 44 et 68 % de la quantité totale (charge nette) de PT et PDT retirée ou séquestrée par le marais durant la saison 2012.

Tableau 2. Distribution des débits, charges entrantes et efficacité relative de la rétention mensuelle et saisonnière pour la période printanière, estivale et automnale en 2011

Mois	Débit (m <sup>3</sup> )	Répartition du débit annuel (%)	Charge PT (kg)	Charge PDT (kg)	Répartition de la charge entrante annuelle (%)		Rétention de la charge entrante saisonnière (%)		Rétention de la charge entrante annuelle (%)	
					PT	PDT	PT	PDT	PT	PDT
<sup>1</sup> Mai	199 377	62	5,6	3,01	54	57	2	5	1	3
Juin à août	75 405	24	2,4	1,32	29	31	29	52	8	16
Sept. à nov.	44 658	14	2,4	1,02	17	12	56	48	9	6
Total	319 440	100	10,4	5,4	100	100			18	25

<sup>1</sup>Au mois de mai, deux semaines ou périodes ont été retirées des analyses (11 au 24 mai), ce qui explique la différence entre les débits présentés dans le tableau 3, qui inclut toutes les périodes du mois de mai, et ce tableau.

Tableau 3. Distribution des débits, charges entrantes et efficacité relative de la rétention mensuelle et saisonnière pour la période printanière, estivale et automnale en 2012

Mois	Débit (m <sup>3</sup> )	Répartition du débit annuel (%)	Charge PT (kg)	Charge PDT (kg)	Répartition de la charge entrante annuelle (%)		Rétention de la charge entrante saisonnière (%)		Rétention de la charge entrante annuelle (%)	
					PT	PDT	PT	PDT	PT	PDT
Avril-mai	300 504	90	7,34	4,77	82	81	5	12	4	10
Juin à août	14 598	5	0,73	0,59	9	10	28	18	3	2
Sept. à nov.	18 265	5	0,92	0,56	9	10	23	22	2	2
Total	333 367	100	8,99	5,92	100	100			9	14

### Été-automne

Les débits estivaux et automnaux se sont avérés très faibles (figure 9). Parallèlement à la baisse des débits, on a observé une hausse dans la concentration du PT dans l'eau, probablement en raison d'une quantité de P plus ou moins constante pour un volume d'eau moins important (dilution moindre). Cette hausse de la teneur en PT et PDT est d'autant plus importante à la saison 2012, alors qu'une période d'étiage sévère s'étend sur la région du Bas-Saint-Laurent (juillet à septembre inclusivement).

Ainsi, entre le 4 juillet et le 9 octobre 2012, on a enregistré une seule période de 7 jours cumulant plus de 1 000 m<sup>3</sup> pour un débit moyen de 471 m<sup>3</sup> par période de 7 jours alors qu'en 2011, pour les mêmes mois et périodes, la situation est tout le contraire avec seulement deux périodes de 7 jours légèrement sous le 1 000 m<sup>3</sup> et un débit moyen de 3 366 m<sup>3</sup>/7 jours. En bref, la saison estivale 2012 a présenté des débits 7 fois moins élevés que ceux enregistrés en 2011 (figure 9). Cette situation a occasionné d'importantes répercussions dont nous discuterons plus bas.

Les mois de juin à la fin août 2011 ont représenté 24 % de la charge hydraulique et 29 et 31 % des charges saisonnières entrantes en PT et PDT (tableau 2). Durant ces mois, 29 et 52 % des charges entrantes en PT et PDT ont été retenues par le marais pour cette même période (tableau 2). Du total de la charge massique annuelle entrante, les mois de juin à août (inclusivement) ont retiré respectivement 8 et 16 % du PT et du PDT (tableau 2). Les

mois de septembre à novembre ont cumulé 14 % des débits pour des charges entrantes en PT et PDT respectives de 17 et 12 % (tableau 2). En ce qui concerne l'efficacité relative, 56 et 48 % des charges entrantes en PT et PDT ont été mobilisées par le marais durant ces mois (tableau 2). Les mois de septembre à novembre 2011 ont permis le retrait de 9 et 6 % du total de la charge annuelle entrante en PT et PDT dans le marais (tableau 2).

Les mois de juin à août 2012 ont cumulé 5 % de la charge hydraulique et généré 9 et 10 % du total des charges massiques saisonnières entrantes en PT et PDT (tableau 3). De ces charges en PT et PDT, 28 et 18 % ont été séquestrées par le marais durant cette période, correspondant respectivement à 3 et 2,0 % de la charge massique totale annuelle entrante en PT et PDT (tableau 3). Les mois de septembre à novembre ont également cumulé 5 % du débit annuel pour des charges entrantes en PT et PDT respectives de 9 et 10 % (tableau 3). Quant à l'efficacité relative, 23 et 22 % du total des charges entrantes en PT et PDT pour ces mois a été mobilisé par le marais, équivalent à 2 % du total des charges massiques annuelles entrantes en PT et PDT (tableau 3).

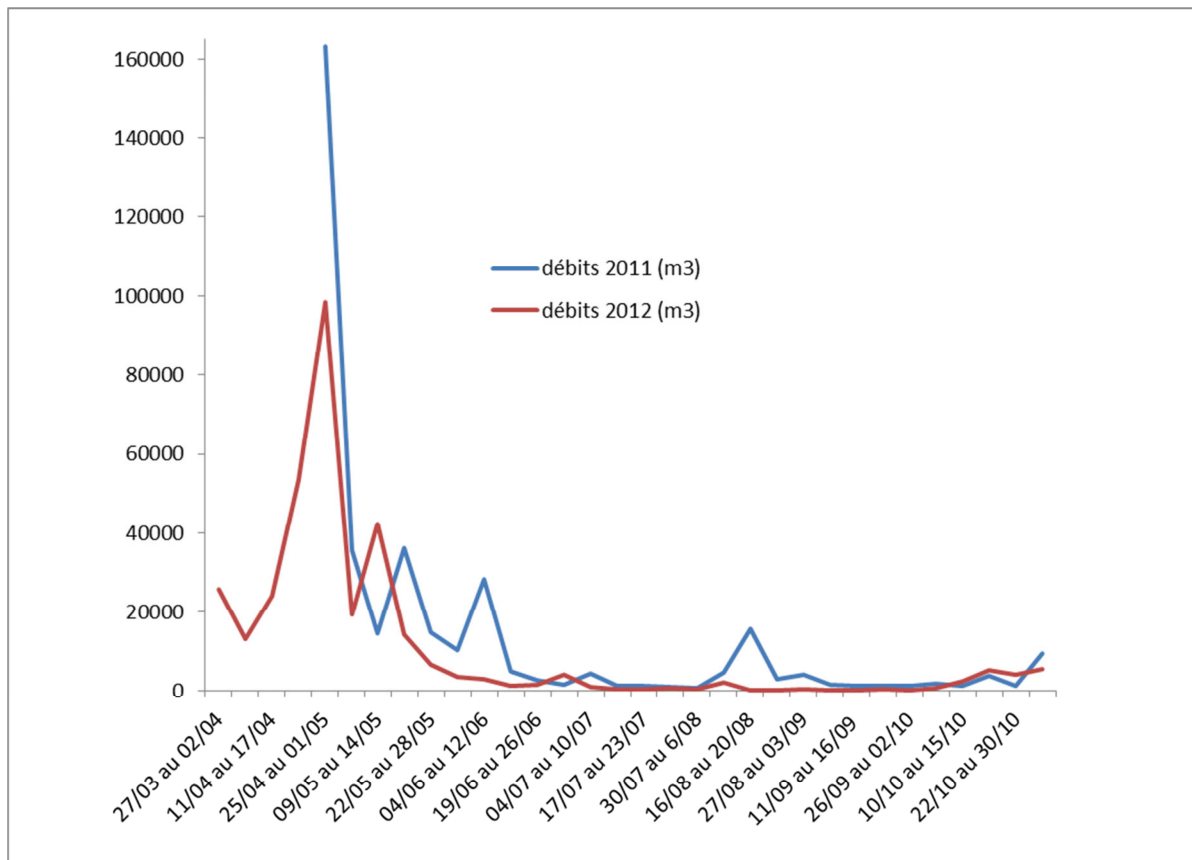


Figure 9. Courbes des débits journaliers entrants dans le marais filtrant en 2011 et 2012

### 3.3.2 Bilan des saisons 2011 et 2012

Pour l'année 2011, deux périodes de  $\pm 7$  jours ont présenté des concentrations et des charges entrantes en PDT plus élevées que celles en PT, ce qui est chimiquement impossible. Ces irrégularités surviennent consécutivement durant les semaines du 11 au 18 et du 19 au 24 mai 2011. Conséquemment, ces deux périodes d'échantillonnage ont été retirées de l'analyse du bilan des charges massiques de la saison 2011. Pour 2011 et 2012, les débits totaux entrants dans le marais ont été, aux cumuls, inférieurs aux débits sortants. De plus, en 2011 et 2012, les débits entrants et sortants indiquent un différentiel ou une baisse des débits en 2012 par rapport à 2011 de 36 224 et 36 234 m<sup>3</sup> respectivement, à l'entrée et à la sortie du marais (tableau 4).

Tableau 4. Bilan des performances du marais filtrant en 2011 et 2012

Saison (aaaa)	Q <sub>entrée</sub> (m <sup>3</sup> )	Q <sub>sortie</sub> (m <sup>3</sup> )	PT <sub>entrée</sub> (kg)	PDT <sub>entrée</sub> (kg)	PT <sub>sortie</sub> (kg)	PDT <sub>sortie</sub> (kg)	Retrait PT (kg)	Retrait PDT (kg)
<sup>1</sup> 2011	369591	369697	10,4	5,4	8,47	4,06	1,92	1,33
<sup>2</sup> 2012	333367	333463	8,99	5,92	8,17	5,13	0,81	0,84

<sup>1</sup>Période de 199 jours pour le PT et de 192 jours pour le PDT en 2011.

<sup>2</sup>Période de 226 jours en 2012 pour le PT et le PDT.

Les précipitations enregistrées pour cette période à la station climatologique de Rimouski confirment cette tendance (Gouv. Canada, <http://climat.meteo.gc.ca/>). En effet, la saison 2012, et tout particulièrement les mois de juillet, août et septembre (42, 67,8, 49 mm), a présenté des moyennes mensuelles de précipitation largement inférieures à l'année précédente (74,6, 89, 84,6 mm) et bien en dessous des normales saisonnières pour ces mois (91,3, 85,5, 87,9 mm) (Gouv. Can., <http://climat.meteo.gc.ca/>). De même, en 2012, les températures journalières se sont avérées au-dessus des normales saisonnières d'avril à octobre, réunissant ainsi des conditions favorables d'étiages sévères observables dans le marais dès la fin du mois de juillet (Gouv. Can., <http://climat.meteo.gc.ca/>).

Cette situation s'est aussi reflétée dans le bilan hydrique du marais pour les mois de juillet, août et septembre. On a observé un débit inférieur à la sortie (versus l'entrée) pour les périodes du 4 au 16 juillet, du 24 juillet au 6 août, ainsi que du 16 août au 30 octobre 2012. Pour sa part, la saison 2011 a présenté des précipitations et températures moyennes mensuelles similaires aux valeurs moyennes notées par Environnement Canada pour la série temporelle des années 1981 à 2010 à Rimouski (Gouv. Can., <http://climat.meteo.gc.ca/>).

En 2011, les charges entrantes en PT ont été légèrement supérieures à celles enregistrées en 2012 (tableau 4). Pour le PDT, les charges annuelles sont similaires en 2011 et 2012 (tableau 4). Les retraits, ou quantités en kg de PT et PDT retenues par le marais, ont été supérieures en 2011 (tableau 4). Il en va de même pour la rétention moyenne (g de PT et PDT par m<sup>2</sup>) ainsi que pour les taux de retraits journaliers (mg/m<sup>2</sup>/j de PT et de PDT), lesquels affichent des valeurs légèrement plus élevées en 2011 qu'en 2012 (tableau 5). On observe la même tendance dans l'efficacité relative de retrait de PT et PDT pour 2011 et

2012, qui affiche une baisse de 9 % entre 2011 et 2012 pour le PT (de 18 à 9 %) et de 11 % pour le PDT (de 25 à 14 %) (tableau 5).

Tableau 5. Taux de retrait journalier et rétention relative saisonnière de PT et PDT

Saison	g PT/m <sup>2</sup> /an	g PDT/m <sup>2</sup> /an	mg PT/m <sup>2</sup> /j	mg PDT/m <sup>2</sup> /j	Rétention PT (%)	Rétention PDT (%)
<sup>1</sup> 2011	1,75	1,21	8,85	5,42	18	25
<sup>2</sup> 2012	0,80	0,76	3,47	3,36	9	14

<sup>1</sup>Période de 199 jours pour le PT et de 192 jours pour le PDT en 2011.

<sup>2</sup>Période de 226 jours en 2012 pour le PT et le PDT.

### 3.3.3 Performances mensuelles

À la saison 2011, les mois de juillet (9,60), août (10,48) et septembre (16,48) ont affiché les plus hauts taux de retraits journaliers mensuels du PT (mg/m<sup>2</sup>/j), tandis que les mois de mai (9,31), juin (9,34) et juillet (7,0) ont présenté les meilleurs taux de retraits du PDT (mg/m<sup>2</sup>/j) (tableau 6). Les mois de mai (2,49) et de juin (3,12) ont enregistré de faibles taux de retrait de PT (mg/m<sup>2</sup>/j), tandis que le taux de retrait de PDT (mg/m<sup>2</sup>/j) a été à son plus bas durant les mois de septembre (2,56) et octobre (2,11) (tableau 6).

En 2012, les taux de retraits de PT et de PDT (mg/m<sup>2</sup>/j) ont été optimaux durant les mois d'avril (12,17 et 14,01) et juin (5,18 et 4,11) (tableau 6, figure 10). Des taux de retraits de faibles valeurs, et parfois négatifs, ont été notés pour le PT et le PDT (mg/m<sup>2</sup>/j) pour les mois de mai (-0,42 et 1,79), août (-0,31 et -1,45) septembre (1,62 et 1,0) et octobre (0,34 et -0,14) 2012 (tableau 6, figure 10).

Globalement, la courbe du taux de retraits du PT (mg/m<sup>2</sup>/j) en 2011 a connu une hausse de mai à septembre pour ensuite diminuer en octobre et novembre. La courbe du PDT de 2011 a suivi une tendance inverse. Elle a commencé avec un pic de retrait en mai, suivi par une baisse modérée en juin, juillet et août, pour ensuite afficher un creux en septembre et octobre et, finalement, remonter en novembre et atteindre un taux de retrait similaire à celui observé en juillet (figure 10).

Tableau 6. Taux de retraits journaliers mensuels moyens en PT et PDT en 2011 et 2012

Saison	P	Taux de retrait journalier (mg/m <sup>2</sup> /j), moyennes mensuelles							
		avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre
2011	PT	n.d.	5,83	3,12	9,60	10,48	16,92	4,26	5,85
	PDT	n.d.	9,31	9,34	7,00	5,58	2,56	2,11	5,24
2012	PT	12,17	-0,42	5,18	2,51	-0,31	1,62	0,34	<sup>1</sup> 15,26
	PDT	14,01	1,79	4,11	1,68	-1,45	1,00	-0,14	<sup>1</sup> 9,26

<sup>1</sup> Les moyennes du mois de novembre 2012 ont été établies à partir d'une seule période (9 jours). Elles ne sont donc pas représentatives de l'ensemble du mois.

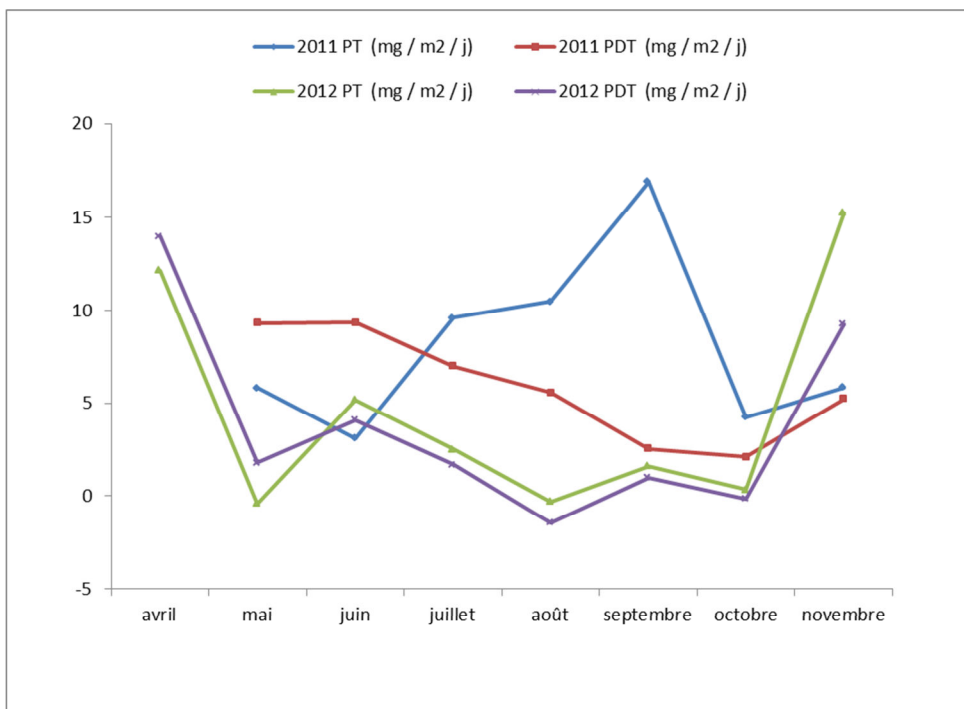


Figure 10. Taux de retrait mensuels moyens (mg/m<sup>2</sup>/j) du PT et PDT en 2011 et 2012

En 2012, les courbes des taux de retraits en PT et PDT ont suivi une tendance similaire entre elles. De plus, quoiqu'elles aient présenté des valeurs de retrait largement inférieures, l'allure des deux courbes issues de la saison 2012 affiche une certaine ressemblance avec la courbe du retrait du PDT en 2011. Deux pics sont observés au mois d'avril et novembre, alors qu'une baisse survient en mai et une légère hausse en juin, suivie d'une seconde baisse en juillet et d'une période creuse s'étendant d'août à la fin du mois d'octobre, avec un creux plus important au mois d'août (figure 10).

### 3.4 Les conditions physico-chimiques : 2011 vs 2012

Le suivi des paramètres physico-chimiques avait pour objectif principal de noter l'évolution des paramètres du milieu afin de pouvoir vérifier leur influence sur le fonctionnement et les performances du marais. C'est pourquoi nous ne nous attarderons pas en détail sur la variabilité des paramètres à l'entrée et à la sortie du marais, mais plutôt sur l'occurrence de valeurs extrêmes ou irrégulières pouvant être liées aux performances observées durant le suivi.

Mis à part quelques épisodes affichant de fortes valeurs de turbidité à l'entrée (39, 16, 4, 36,7 et 6,35 ntu) du marais et pour lesquelles on a observé une baisse importante à la sortie (14,7, 3,58, 29,7, 1,57 ntu), l'ensemble des paramètres physico-chimiques du marais sont demeurés à l'intérieur des gammes de valeurs normales au cours de la saison 2011 (annexe 2).

Les épisodes de hauts niveaux de turbidité sont associés à des événements de pluies plus ou moins intenses survenus durant la saison 2011. La conductivité moyenne pour 2011 et 2012 a été respectivement de 299,5 ( $\pm 67,4$ ) et 313,9 ( $\pm 69,5$ )  $\mu\text{S}$ . Le pH moyen a été, dans l'ordre, de 7,54 ( $\pm 0,49$ ) et de 7,43 ( $\pm 0,54$ ) en 2011 et 2012 (annexe 2).

La saison 2012 a connu un régime thermique substantiellement plus élevé que celui observé en 2011. Plus spécifiquement, la température moyenne de l'eau durant l'ensemble de la saison 2012 a été de 2,4 °C supérieure à celle notée en 2011 (12,1  $\pm$  5,5 vs 13,5  $\pm$  4,9°C) (annexe 2). Rappelons que la hausse générale des températures de 2012 a été accompagnée d'une baisse importante des débits estivaux et automnaux, lesquels ont été 7 fois moins élevés qu'en 2011. Ces conditions d'étiages se sont répercutées sur la quantité d'oxygène disponible dans la masse d'eau.

Pour l'ensemble de la saison 2011, le taux d'oxygène dissout moyen a été de 8,62  $\pm$  2,0 mg/l (82,1  $\pm$  22,1 % de saturation), tandis qu'il a été de 6,5  $\pm$  3,05 mg/l en 2012 (62  $\pm$  27,5 % de saturation). En 2011, la teneur en oxygène n'a jamais chuté en bas de 5,01 mg/l. En 2012, de la mi-juillet à la fin septembre, la moyenne a été de 2,4 mg/l et plusieurs périodes de  $\pm 7$  jours (9) ont affiché des taux inférieurs à 3 mg/l, atteignant même durant trois périodes des taux aussi bas que 1,5 mg/l d'oxygène dissout. La valeur minimale de 1,42 mg/l a été enregistrée le 4 septembre 2012 (annexe 2).

Une régression linéaire simple a été utilisée afin d'évaluer l'effet ou l'interrelation entre les paramètres physico-chimiques et la concentration de phosphore totale à la sortie du marais en 2012. Ces analyses démontrent que la baisse de la teneur en oxygène dans l'eau est corrélée à la variation de la concentration de phosphore totale à la sortie du marais en 2012. Durant cette période, la concentration de phosphore totale à la sortie du marais était significativement et négativement corrélée au pourcentage d'oxygène dans l'eau (coefficient de régression = -0,89,  $r^2$  ajusté = 78,5 %,  $p < 0,0001$ ) (figure 11 a). De plus, en 2012, la concentration de phosphore dissout total à l'entrée du marais était significativement et négativement corrélée au pourcentage d'oxygène dans l'eau (coefficient de régression = -0,75,  $r^2$  ajusté = 52,90 %,  $p = 0,004$ ). Le même constat est observé à la sortie du marais, mais de façon amplifiée (coefficient de régression = -0,90,  $r^2$  ajusté = 79,59 %,  $p < 0,0001$ ) (figure 11 b).

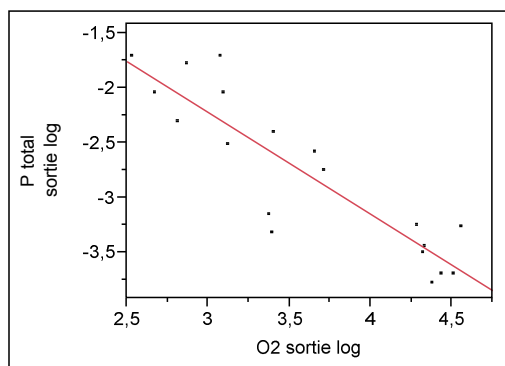


Figure 11 a). P total en fonction de l'O<sub>2</sub> (%) à la sortie

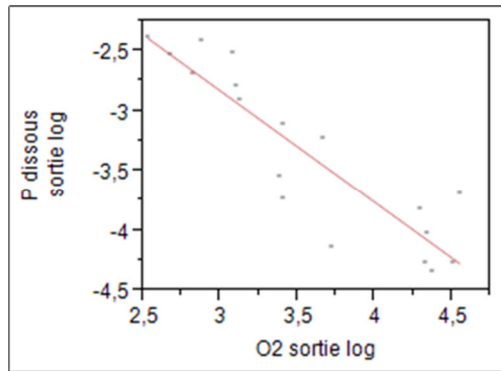


Figure 11 b). P dissout en fonction de l'O<sub>2</sub> (%) à la sortie

Toutefois, ceci ne confirme pas que ce phénomène est le seul responsable de la baisse de performance du marais. Tel que vu à la section 2.2.1, il s'y déroule diverses interactions et processus non mesurés dans le cadre de ce suivi, lesquels peuvent aussi avoir influencé la rétention ou le relargage du P dans le marais en 2012. Ainsi, il est possible que la teneur en oxygène dissout exprime simplement une condition dans le marais, sans nécessairement être directement responsable de la concentration élevée de PT et P dissout total à la sortie. Par exemple, lorsqu'il y a une forte décomposition de la matière organique (m.o.) dans un marais, le phosphore contenu dans cette matière organique peut contribuer à l'augmentation des concentrations en phosphore mesurées dans l'eau. En même temps, la décomposition de la matière organique entraîne une augmentation de la demande biologique en oxygène (DBO) et, éventuellement, une baisse de l'oxygène dissout (% saturation) dans le milieu. Conséquemment, la hausse de la concentration en phosphore mesurée à la sortie peut aussi être potentiellement liée au fait que la décomposition de la matière organique n'a pas été accompagnée par une rétention aussi grande de cette matière dans le système par adsorption, minéralisation et sédimentation. Avec les informations et données dont nous disposons, il est difficile de distinguer lesquels de ces processus - solubilisation du phosphore déjà minéralisé, en conditions de réduction **ou** décomposition non accompagnée par une rétention du P- sont les plus impliqués dans l'augmentation du phosphore total à la sortie du marais en 2012.

### 3.5 Sédimentation et accumulation

La majeure partie des apports sédimentaires est visible à l'œil nu et survient essentiellement lors des mois d'avril et mai. Les mesures effectuées indiquent un taux moyen d'accumulation en matières organiques d'environ 3 cm/an. Toutefois, si l'on exclut une zone d'accumulation élevée, la moyenne se situe plutôt autour de 1 cm/an. Cette zone, où l'accumulation de sédiments est élevée, est liée à la présence d'un fossé agricole qui a été canalisé et enfoui à l'aide de drains agricoles à l'automne 2011 par les propriétaires exploitants (ferme). Ce fossé parcourt le champ nord et, ultimement, se déverse dans le marais. On pense que les travaux de canalisation et de drainage ont favorisé l'érosion du sol et entraîné une quantité anormalement élevée de sédiments en suspension qui se sont déposés en un point précis du marais. La situation s'est toutefois

stabilisée avec le temps. Des travaux d'enlèvement de ce banc de sédiments sont prévus pour la saison 2015, dans le cadre des activités d'entretien annuel du marais.

La présence de rats musqués en 2012 peut également avoir occasionné un apport exogène de matières organiques (nidification) non désiré. Le contrôle de la déprédation par capture vivante et déportation est souhaitable. De plus, on a remarqué que des canaux d'écoulement préférentiels ont tendance à se former suite au phénomène de sédimentation. À notre avis, la formation de canaux préférentiels peut être liée, d'une part, à la résistance variable des tiges de diverses espèces face à l'écoulement et à la formation correspondante de zones préférentielles de dépôt et d'accumulation de sédiments, et, d'autre part, au fait que la pente transversale du marais n'est pas parfaitement égale, ce qui peut avoir concouru à la création de petits chenaux d'écoulement préférentiels. L'ajout de substrat dans ces canaux a été réalisé afin de maintenir une distribution uniforme du courant et de la masse d'eau.

La déposition et l'accumulation d'une couche de sédiments contenant de la matière non décomposée impliquent qu'une part du phosphore particulaire lié aux sédiments non décomposés est retenue dans le marais (Kadlec et Wallace, 2009). Des taux d'accumulation/sédimentation de 0,14 à 1,8 cm/an sont notés dans Kadlec et Wallace (2009). La matière non décomposée et séquestrée compte pour environ 10 à 20 % du phosphore contenu dans l'ensemble des sédiments accumulés. Cette fraction du phosphore est enfouie de manière permanente dans la nouvelle couche de sol (Kadlec et Wallace, 2009). Selon les études présentées (n = 11), l'accumulation de P par sédimentation et accumulation peut varier de 0,06 jusqu'à 13,7 g de P/m<sup>2</sup>/an (Kadlec et Wallace, 2009).

### 3.6 Temps de rétention

Trois plages de temps de rétention ont été déterminées. Ces plages correspondent aux principaux modes de débits retrouvés dans le cours d'eau et le marais (tableau 2). Le suivi du traceur colorimétrique en date du 10 octobre 2010, en conditions de débit moyen, indique un temps de rétention variant de 29 (apparition du traceur à la sortie) à 60 minutes (pic du traceur à la sortie du marais). Pour la période de crue printanière, nous avons donc un temps de rétention inférieur à 28 minutes alors qu'en période d'étiage, le temps de rétention a été considéré supérieur à 60 minutes. Ainsi, un délai de plus de 60 minutes était respecté avant d'effectuer le prélèvement aval en période d'étiage (tableau 7).

Tableau 7. Temps de rétention du marais filtrant.

Catégorie et débits (m <sup>3</sup> /s)	Période correspondante	Temps de rétention (minutes)
<b>Moyen</b> (≥ 0,001 et ≤ 0,099)	Été, automne, pluies abondantes	29 à 60
<b>Élevé</b> (≥ 0,1)	Crue printanière	≤ 28
<b>Faible</b> (< 0,001)	Étiage et sécheresse sévère	> 60

### **3.7 Suivi de la libre circulation du poisson dans le marais**

Seule la période d'étiage sévère de 2012 a limité la libre circulation du poisson, tant au chapitre du niveau d'eau (débit) restreint qu'en regard de la disponibilité d'oxygène dissout, qui se situait sous le seuil prescrit de 5 mg/l. Cela a peu d'impact, car durant cette période, les déplacements des poissons ont été limités aux refuges thermiques du cours d'eau, telles les zones profondes et ombragées qui abondent en amont et en aval du marais. L'accès et la libre circulation ont été rétablis dès le retour des pluies automnales.

## 4.0 Discussion

### 4.1 Efficacité du marais

Bien que le fonctionnement du marais filtrant à la saison 2012 ait été affecté par des conditions d'étiages sévères réduisant substantiellement son rendement, le bilan global d'efficacité du marais demeure positif. En dépit des faibles rendements printaniers, une part significative du retrait global du phosphore dissout total se produit durant les deux premiers mois du printemps. De plus, pour les deux saisons suivies, mais de manière plus marquée en 2011, le marais filtrant a bien performé en périodes estivales et automnales.

En effet, dès l'année suivant sa construction (2011), d'excellentes performances ont été obtenues au chapitre de la réduction des concentrations entrée versus sortie en PT et PDT de 37 et 44 %. Des valeurs moyennes de réduction des concentrations entrée-sortie de l'ordre de 40 à 60 % sont habituellement notées dans les revues littéraires pour des systèmes de traitement de type marais à écoulement libre surfacique (Brix, 1995; Kadlec et Wallace, 2009; Boisvert et Babineau, 2009). La majeure partie des débits entrants échantillonnés présentaient des valeurs en PT et PDT dépassant la norme minimale de 0,03 mg/l (MDDEFP, 2013) à l'entrée du marais pour en ressortir à des valeurs inférieures à la norme prescrite à l'exutoire du marais.

Pour la même année, la réduction des charges massiques en PT et PDT a aussi été appréciable (18 et 25 %). Tanner (2012) observe des taux de rétention de l'ordre de 14 et 17 % en PT pour un marais filtrant de 200 ha de superficie et traitant les bassins versants de 2 cours d'eau en milieu agricole. En 2010 et 2011, Kynkäänniemi et coll. (2013) notent des rétentions relatives de l'ordre de 36 % pour le PT et de 9 % pour le PD d'un nouveau marais recevant les eaux de drainage d'une surface agricole de 26 ha. Les taux de retrait annuels en 2011 ont affiché des rendements respectifs de l'ordre de 1,75 et 1,21 g de PT et de PDT/m<sup>2</sup>/saison. Des valeurs de rendements similaires sont notées dans la littérature pour des marais filtrants de même type et situés en régions tempérées ou nordiques (Kroeger et coll., 2009; Kadlec et Wallace, 2009).

De manière globale, la rétention du phosphore dissout a été plus efficace que la rétention du phosphore total, indiquant que le marais a retenu davantage le phosphore dissout que le phosphore particulaire. La dynamique hydrologique, la configuration du marais ainsi que la disponibilité des deux principales formes de P en sont potentiellement responsables. La présence de champs agricoles et d'un régime d'amendement contribue à hausser la fraction du P dissout disponible dans la balance du P total. On constate également que la fraction de phosphore dissout présente lors des analyses est importante et représente souvent plus de 50 % de la valeur du PT. Ceci suggère une grande disponibilité de ce type de P transitant par le marais. Selon Kadlec et Wallace (2009), la période de croissance printanière des plantes est associée à l'observation des plus forts taux de rétention-captation de phosphore dissout durant une saison. Les meilleurs rendements du marais sur

le plan de la rétention du PDT sont d'ailleurs observables durant les premiers mois de la saison. La forte croissance observée, les densités élevées et une bonne diversité de plantes dans le marais filtrant aménagé ont probablement aussi contribué à favoriser la retenue du phosphore dissout dans une plus forte proportion que le phosphore particulaire. De plus, les débits relativement élevés et les temps de rétention plutôt courts du marais aménagé offrent des conditions moins favorables à la déposition et à la rétention des particules et sédiments auxquels est lié le P particulaire. Ainsi, l'hydrodynamisme en place dans le marais semble plus favorable aux processus physiques et physiologiques associés à la rétention du phosphore dissout.

#### **4.2 Variabilité saisonnière de la rétention du phosphore**

D'après Kadlec et Wallace (2009), les pics de rétention relativement à la quantité nette de PT et PDT sont observables durant les mois printaniers et automnaux, et de façon plus marquée pour le PDT durant la période printanière. Cette tendance est typique des marais filtrants en milieu froid ou tempéré, laquelle exhibe deux pics majeurs de retrait du P entrecoupés d'une période estivale plus calme (Kadlec et Wallace, 2009). La saison printanière constitue le premier pic de retrait de P (Boyd, 1969; Vymazal, 1995, cités par Vymazal, 2007). Elle est associée en bonne partie aux besoins élevés en P des plantes du marais en début de croissance (Kadlec et Wallace, 2009). Le second pic d'activité, moins évident, survient habituellement à l'automne (Kadlec et Wallace, 2009). Il apparaît être relié aux besoins automnaux élevés en P requis pour l'emmagasinement des réserves de P rhizomales et racinaires nécessaires pour redémarrer le cycle de croissance printanière suivant (Kadlec et Wallace, 2009). L'accumulation de P à la base des plantes (bourgeons) se poursuivrait même en décembre (Prentki et coll., 1978, cités par Kadlec et Wallace, 2009).

#### **4.3 Influence des conditions physico-chimiques**

Il est intéressant de constater que, tant au chapitre des conditions climatiques que des paramètres physico-chimiques, la saison 2011 a offert au marais filtrant un environnement relativement stable où l'apparition de conditions extrêmes (sécheresse, inondations, etc.) s'est avérée peu fréquente, et, lorsque présente, de courte durée. Cette stabilité s'est reflétée dans les paramètres physico-chimiques enregistrés tout au long de la saison 2011, lesquels n'ont pratiquement pas connu de hausses ou de baisses drastiques.

Comparativement à 2011, le marais a été moins performant en 2012, et ce, particulièrement durant les mois estivaux et automnaux, périodes qui ont affiché une importante diminution de leurs débits. La réduction des débits a été accompagnée d'une baisse estivale d'efficacité relative de 1 % pour le retrait du PT et de 34 % pour le PDT. À l'automne 2012, la baisse du rendement relatif est encore plus significative, avec des pertes d'efficacité de 22 % pour le PT et de 26 % pour le PDT. La période d'étiage sévère de

2012 a occasionné des variations importantes pour certains paramètres physico-chimiques du marais, dont la hausse de la température et la baisse de l'oxygène dissout disponible. L'analyse statistique effectuée indique que la diminution de l'oxygène dans l'eau en 2012 est un paramètre physico-chimique corrélé à l'augmentation du phosphore total et du phosphore dissout à la sortie du marais.

Plusieurs facteurs en relation avec la teneur en oxygène dans l'eau peuvent avoir nui au fonctionnement du marais à l'été 2012 (températures, débits, plantes, communauté bactérienne, etc.). La baisse de la teneur en oxygène peut n'être qu'une condition subie par le marais et non constituer la cause (directe ou indirecte) de la baisse des performances filtrantes. Néanmoins, lorsque l'oxygène est abondant et disponible dans le marais, on n'observe pas ce phénomène, et, lorsque pris indépendamment, les autres paramètres physico-chimiques mesurés ne semblent pas reliés (aucune tendance) à la baisse de rendement observée en 2012. Il est difficile de cibler la cause précise de cette baisse de rendements à partir de deux saisons de référencement et un nombre limité de paramètres et de critères mesurés. La baisse de la teneur en oxygène et l'anoxie subséquente est une hypothèse parmi plusieurs autres processus pouvant affecter la mobilité du phosphore à l'intérieur du marais filtrant.

#### **4.4 Mobilité du phosphore**

Selon Kadlec et Wallace (2009), il est possible que, lors de conditions d'eau très chaudes, les processus d'assimilation microbiens biologiques soient élevés et rapides, mais également que les processus de lessivage / libération et de décomposition le soient tout autant. Des retours élevés de phosphore des compartiments statiques peuvent réduire le taux net d'assimilation et contribuer à créer une baisse des performances lors des mois très chauds de la mi-saison (Kadlec et Wallace, 2009). La décomposition peut générer un haut taux de minéralisation et de libération de phosphore, selon la disponibilité d'éléments oxydants comme l'oxygène ou les nitrates (Prairie et coll., 2001; Sondergaard et coll., 2003). De plus, en eaux oxygénées, le phosphore, sous forme d'orthophosphate, se lie aux composés de fer(III) et est sédimenté alors que dans des conditions anoxiques, le fer(III) (ou le calcium et le magnésium en situation alcaline) est réduit en fer(II) et l'orthophosphate est subséquemment remobilisé dans la colonne d'eau (Watson et coll., 1989; Prairie et coll., 2001; Sondergaard et coll., 2003; Kadlec, 2005).

Le marais filtrant du lac à l'Anguille a connu des épisodes s'apparentant fortement à une situation d'anoxie. D'après Sondergaard et coll. (2003), la présence de macrophytes aquatiques influence également le cycle du phosphore. À faible densité, les macrophytes favorisent la précipitation du phosphore en oxygénant l'interface eau-sédiment; or, à forte densité, elles diminuent l'apport en oxygène en réduisant sa diffusion ou en augmentant le pH, et favorisent ainsi la remobilisation du phosphore réactif soluble (PRS) dans l'eau. Ainsi, dans des conditions anormalement basses de débits et d'oxygène disponible, la densité des

tiges du marais pourrait en avoir influencé les performances. D'après Danesh et Oleszkiewicz (1997, cité par Mulkerrins et coll., 2004), un temps de rétention hydraulique long dans une zone anaérobie, couplé à un manque d'apports en composés carbonés dans les eaux usées et à une activité bactérienne insuffisante, peut mener au relargage du P.

Nombre d'interrelations entre les conditions du milieu (T, pH, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, etc.), son substrat, les plantes et la communauté bactérienne et algale régissent le bon fonctionnement d'un marais filtrant. La stabilité des paramètres du milieu, à l'intérieur des besoins physiologiques des nombreux organismes qui interagissent et composent l'écosystème du marais, semble essentielle à son bon fonctionnement. L'apparition soudaine ou prolongée de conditions extrêmes peut être la source d'un déséquilibre et d'un relargage temporaire de P dans le milieu. Néanmoins, la communauté scientifique s'accorde pour dire que le bilan, au final, se traduit par une accumulation et un retrait positif et significatif de P (Kadlec et Wallace, 2009).

Les conditions climatiques arides prolongées et l'étiage sévère de 2012 ont entraîné la réduction du débit, le réchauffement de la masse d'eau, la hausse de l'évapotranspiration, l'anoxie et, **hypothétiquement**, la baisse du potentiel redox et un stress au niveau de la flore bactérienne, ce qui, en retour, a pu engendrer la hausse des concentrations et des charges massiques en P à la sortie du marais. La part de responsabilité de chaque paramètre et processus dans le relargage de P ne peut malheureusement être quantifiée. Cependant, un seul paramètre physico-chimique, la disponibilité de l'oxygène dans le milieu, ressort statistiquement comme un élément lié aux variations des performances du marais filtrant du lac à l'Anguille à la saison 2012.

## 5.0 Conclusion

Cette étude a permis de confirmer le potentiel des marais filtrants à écoulement surfacique comme moyen de réduction des charges en P vers les plans d'eau. Les résultats obtenus, notamment à la saison 2011, sont comparables à d'autres sites exploités dans des conditions similaires. En 2011 et 2012, respectivement 1,92 et 0,81 kg de PT ainsi que 1,33 et 0,84 kg de PDT ont été retenus. Le taux de rétention a affiché une moyenne de PT et PDT respective de 1,75 et 1,21 g/m<sup>2</sup>/an en 2011, ainsi que de 0,80 et 0,76 g/m<sup>2</sup>/an en 2012. L'efficacité relative de retrait du PT et PDT en 2011 a été, dans l'ordre, de 18 et 25 %, tandis que le retrait relatif de PT et PDT s'est chiffré à 9 et 14,1 % à la saison 2012 (tableau 2).

Globalement, le portrait suivant se dégage : les débits printaniers élevés ont généré approximativement entre 50 % et 80 % des charges massiques entrantes en PT et PDT. De ces charges printanières, de 2 à 5 % et de 4 à 12 % en PT et PDT ont été captés par le marais. Les rendements printaniers du marais sont qualifiés de faibles. Ils représentent le retrait de 2 à 12 % de la totalité des charges massiques entrantes en PT et PDT au cours de la saison. Cependant, cette faible performance constitue tout de même une bonne part de la fraction totale du retrait saisonnier net du P. À titre d'exemple, bien que le marais n'ait eu, au printemps 2012, qu'une faible efficacité de rétention des charges entrantes (PT 5,03 % et PDT 11,84 %), cela a représenté 44 et 68 % de la quantité totale de PT et PDT retirée ou séquestrée par le marais au terme de la saison 2012.

En 2011, même si les débits estivaux et automnaux ont fourni une charge hydraulique moins importante que le débit printanier, la hausse constante de rendement dans l'efficacité du retrait de P a permis de retirer une fraction importante du P pendant ces mois. Sur le bilan du retrait des charges entrantes en P, les mois estivaux et automnaux ont été productifs et, même s'ils ne comptent que pour environ 20 à 35 % des charges massiques totales, leur importance dans le retrait du P ne doit pas être sous-estimée. En effet, ce retrait se produit durant des mois critiques où l'abondance et la disponibilité du P dans le milieu peuvent avoir une influence sur le déclenchement du phénomène d'explosion algale.

Les bilans hydrauliques des saisons 2011 et 2012, de même que les performances globales du marais pour l'ensemble de la saison, sont fortement influencés par les mois qui se partagent l'effet de la débâcle printanière (avril-mai). Durant ces deux mois de forts débits et charges, une grande part de la charge annuelle de phosphore est charriée au travers du marais sans pouvoir être traitée de manière tout à fait satisfaisante. Ainsi, l'efficacité relative de rétention des charges entrantes pour ces mois compte beaucoup dans la balance finale des performances saisonnières du marais. Contrairement à la saison 2011, cette situation est amplifiée par l'occurrence d'un étiage sévère en 2012 (débits estivaux et automnaux 7 fois moins élevés), qui a fait en sorte de majorer l'importance de l'efficacité relative du marais pour ces mois dans la balance saisonnière.

Le fait d'avoir aménagé le marais à même le lit naturel du cours d'eau et d'accueillir la totalité de son débit occasionne une surcharge hydraulique et est en grande partie responsable des rendements moins élevés notés pour cette période.

Cette problématique est connue pour ce type de système intégré au milieu naturel (Kadlec et Wallace, 2009) et où d'extrêmes et rapides changements hydrauliques surviennent. Les débits et vitesses de courant élevés limitent les dépôts des particules ou sédiments fins auxquels est lié le phosphore particulaire. Le marais filtrant du lac à l'Anguille s'est avéré sous-dimensionné pour pouvoir offrir des rendements et retraits printaniers élevés et satisfaisants.

Évidemment, dans de telles conditions hydrauliques, le temps de rétention est court et ne favorise pas la sédimentation du phosphore (Kadlec et Wallace, 2009). Par ailleurs, la repousse des tiges des plantes n'étant pas complétée, la résistance à l'écoulement offerte par les tiges est minimale au printemps et la vitesse de courant et le transport sédimentaire sont très peu ralentis (Kadlec et Wallace, 2009). Conséquemment, en rehaussant le rendement printanier de retrait de P, cela permettrait de capter une plus grande proportion des apports annuels en P. La solution réside donc en partie dans la confection de systèmes offrant de meilleures performances et permettant de traiter la totalité de la charge hydraulique durant cette période critique.

La solution envisagée serait d'augmenter la capacité hydraulique du marais afin de ralentir les vitesses d'écoulement et de rehausser le temps de rétention en période de crue. Il importe toutefois de ne pas accroître la superficie du marais existant en l'augmentant, puisque cette superficie est très bien adaptée aux débits estivaux et automnaux (normales saisonnières) et permet de traiter adéquatement le phosphore. De fait, en rehaussant la taille du marais existant, on risque plutôt de stimuler la formation de conditions d'anoxie dans le marais, telles que celles constatées lors de l'étiage sévère de l'été 2012.

La problématique printanière pourrait être résolue en aménageant un marais filtrant supplémentaire en parallèle afin de partager le débit de crue dans deux unités filtrantes distinctes et de dimensions adéquates. L'unité secondaire serait conçue spécifiquement pour recevoir les événements de crues. Puisque les débits printaniers du cours d'eau sont désormais documentés, il serait aisé de déterminer les dimensions précises de cette nouvelle unité. Un système de contrôle du débit entrant situé en amont permettrait de clore progressivement l'apport d'eau dirigé dans l'unité supplémentaire une fois la crue printanière complétée. Cette approche permettrait de bien gérer l'extrême variabilité dans les débits en milieu naturel. Elle offrirait également l'avantage de pouvoir ouvrir une seconde unité de traitement lors des événements de précipitations extrêmes qui surviennent occasionnellement durant les saisons estivales et automnales.

À notre avis, cette solution permettrait de faire face au plus grand défi rencontré lors de l'aménagement d'un marais filtrant à même un cours d'eau, soit une très grande variabilité de débits et des écarts majeurs entre le débit de crue printanière et le débit d'étiage.

En termes de gain au chapitre de la biodiversité (annexe 4) et des habitats, l'ajout des unités secondaires de traitement favoriserait la création d'habitats riches et diversifiés de grande valeur écologique (type étang temporaire), dans lesquels pourrait s'établir un écosystème complexe.

La relation entre le faible taux d'oxygène noté à la saison 2012 et son rôle potentiel dans la baisse des rendements observés nous incite à penser que l'ajout d'un procédé d'aération à la masse d'eau serait favorable au maintien des performances de traitement du P par le marais lors de conditions climatiques extrêmes (Brdjanovic et coll., 1998; Tanner et coll., 1995; Ekama et Wentzel, 1999 (a,b); Morse et coll., 1998, cités par Mulkerin et coll., 2004).

Enfin, pour assurer son bon fonctionnement, il ne faut pas oublier l'importance de la mise en place d'un programme de suivi visuel et d'entretien du marais. Le suivi visuel consiste à vérifier des problématiques telles que:

- La formation de canaux d'écoulement préférentiels;
- L'accumulation de sédiments suite à un événement particulier;
- La présence d'espèces non désirées (rats musqués, castors, etc.);
- L'érosion des rives et toute autre intervention réalisée dans l'environnement du marais et pouvant en altérer le bon fonctionnement (drainage et reprofilage de cours d'eau, déversement en amont, etc.).

L'entretien du marais est garant de son efficacité filtrante et de sa durée de vie (Newman et coll., 2015). Il est relativement simple et peu coûteux. Il comprend :

- La densification des plantations, au besoin, lors de la seconde année d'opération;
- La récolte des tiges par faucardage ainsi que le désherbage des espèces compétitrices. Deux paires de grandes cisailles ou un taille haie (à essence) ainsi que des bacs de type poissonnerie et de grandes bottes sont requis. Les tiges sont ensuite déposées dans une remorque pour être livrées au site de compostage. On compte environ 2 jours à 5 personnes pour assurer l'entretien annuel d'une superficie de marais de 0,1 ha;
- Le colmatage des canaux préférentiels par ajout de substrat adéquat (ex. : loam argileux ou graviers);
- L'enlèvement des surcharges en sédiments reliées à des événements particuliers (ex. : travaux de dragage ou présence d'érosion en amont ayant mis en suspension une quantité élevée de sédiments qui se sont déposés dans le marais filtrant);
- La capture vivante et la déportation des espèces nuisibles.

Les coûts d'aménagement d'un marais peuvent être variables d'un site à l'autre. L'accessibilité du site pour la machinerie, la nature du sol (socle rocheux, argileux, organique, sablonneux, etc.) et la topographie du site (pente et relief) influent toutes sur le prix. Si l'on prend en compte toutes les étapes requises pour l'aménagement d'un marais

filtrant similaire à celui du lac à l'Anguille, on devra investir environ 45 000 \$ par unité de 0,1 ha. Parmi les étapes et les coûts associés figurent :

- La conception technique du marais (plans et devis), le choix des espèces, les relevés terrain et les calculs de dimensionnement,  $\pm 15$  % des coûts du projet;
- La préparation des études environnementales et demandes de permis ainsi que les frais reliés à l'émission desdits permis,  $\pm 10$  % des coûts du projet;
- L'achat des matériaux (membrane imperméable, argile, substrat de plantation, pierre, bois ou béton pour les seuils),  $\pm 25$  % du budget;
- L'achat des plantes filtrantes (de forte taille et de qualité),  $\pm 30$  % des coûts totaux;
- La construction du marais filtrant (machinerie lourde et main d'œuvre),  $\pm 20$  % des dépenses du projet.

Dans le cadre de l'application d'un programme intégré d'interventions, le marais filtrant à écoulement surfacique aménagé en milieu naturel représente une biotechnologie verte complémentaire efficace pour combattre l'eutrophisation des plans d'eau. Évidemment, comme cette expérience le démontre, le marais doit être conçu de manière à pouvoir faire face aux grandes variations de débits et de charges massiques enregistrées (P) en milieu naturel, sans toutefois nuire aux conditions écologiques et à la stabilité physico-chimique du milieu (température et oxygène). Un seul grand marais ne semble pas garantir la conservation de cette stabilité écosystémique. L'aménagement d'un complexe d'unités filtrantes de tailles adaptées et réparties en parallèle est recommandé. En amont, le complexe d'unités devrait être muni d'un dispositif de distribution des débits permettant de tenir compte des diverses charges hydrauliques saisonnières.

## 6.0 Références, ouvrages et sites consultés

- APHA, AWWA, WEF., 1998. *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 20<sup>e</sup> éd., American Public Health Association, Washington, D.C.
- Baskerud, B. C., 2002. Factors affecting phosphorous retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution. *Ecological Engineering* 19 : 41-61.
- Boisvert, A. et L. Babineau, 2009. *Suivi et performance du marais épurateur riverain du lac Saint-Charles à Québec*. Ville de Québec, Service de l'environnement. Présentation faite au colloque de la Société québécoise des phytotechnologies. Jardin botanique, Montréal (Qc) Canada.
- Brdjanovic, D. Van Loosdrecht, MCM., Alaerts, G.J., and J.J., Heijnen, 1998. *Impact of excessive aeration on biological phosphorous removal from wastewater*. *Water Res*, 32 (1) : 200-208.
- Brdjanovic D., van Loosdrecht, Hooijmans C.M., Alaerts G.J., and J.J. Heijnen, 1997. *Temperature effects on physiology of biological phosphorus removal*. *J Environ Eng* 1997; 123(2) : 144– 53.
- Brdjanovic D., Hooijmans C.M., van Loosdrecht M.C.M., Alaerts G.J., and J.J. Heijnen, 1996. *The dynamic effects of potassium limitation on biological phosphorus removal*. *Water Res*; 30(10) : 303– 13.
- Brix, H., 1995. *Treatment Wetlands: an overview*. In: Toczyłowska, I. & Mierzejewski, M., Editors : *Proceedings Conference on Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, p. 167-176. Technical University of Gdansk, Poland.
- Brix, H., 1994. *Function of macrophytes in constructed wetlands*. *Water Science and Technology*, Vol. 29, No 4, p. 71-78.
- Brix, H., 1993. *Macrophyte-mediated oxygen transfer in wetlands: Transport mechanism and rates*. *Constructed Wetlands for Water Quality Improvements*, Moshiri G.A. (ed.). Lewis Publisher: Boca Raton, Florida, p.; 391-398.
- Carleton, J. N., Grizzard, T. J., Godrej, A. N. & H. E., 2001. *Post. Factors affecting the performance of stormwater treatment wetlands*. *Wat. Res*. Vol. 35, No. 6 : 1552-1562.

- CEAEQ, 2014. *Détermination du phosphore total dans les eaux naturelles par minéralisation au persulfate : méthode colorimétrique automatisée et procédures adaptées pour le phosphore de faible concentration et à l'état de trace*, MA. 303 – P 5.2, Rév. 2, ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 16 p.
- CEAEQ, 2005. *Méthode d'analyse – Détermination du phosphore total dans les eaux naturelles : minéralisation au persulfate; méthode calorimétrique automatisée; procédures adaptées pour le phosphore en teneur élevée et à l'état de trace* ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec, Méthode MA. 303-P5.0, édition 2003-10-08, révision 2005-04-20, (1) 29 p.
- Chimney, M. J., 2006. Technical Publication ERA #435. *Everglades Nutrient Removal Project Dye Tracer Study* - October 1994. Everglades Division, Watershed Management Department, South Florida Water Management District, 3301 Gun Club Road, West Palm Beach, FL 33416. 10 p.
- Comeau, Y., Brisson, J., et F. Chazarenc, 2006. *Traitement de boues piscicoles par marais artificiel et lit filtrant de déphosphatation*. Document de transfert de technologie. Société de recherche et de développement en aquaculture continentale (SORDAC) inc. Québec (Qc), Canada. 90 p.
- Consultants RSA, 1993. *Étude de techniques de remplacement applicables à l'assainissement des eaux usées de petites agglomérations : système de traitement des eaux usées par marais artificiels*, V 3.1.
- Environnement Canada, 2003. *Guide technique révisé pour la réalisation d'études de délimitation du panache des effluents*. Bureau national du suivi des effets sur l'environnement, Institut national de recherche sur les eaux, Environnement Canada. 42 p.
- Ekama G.A., and M.C. Wentzel, 1999(a). *Difficulties and developments in biological nutrient removal technology and modeling*. Water Sci. Technol.; 39(6) : 1–11.
- Ekama G.A., and M.C. Wentzel, 1999(b). *Denitrification kinetics in biological N and P removal activated sludge systems treating municipal wastewaters*. Water Sci. Technol.; 39(6) : 69– 77.

- Gagnon, V., 2012. *Effet de l'espèce de plante en marais filtrants artificiels selon la saison, le type de marais filtrant et la nature des polluants*. Thèse en vue de l'obtention du grade de *Philosophiae Doctor* (Ph. D.) en sciences biologiques. Université de Montréal, Faculté des études supérieures. 86 p.
- Gagnon, V., 2007. *Influence de l'espèce de macrophyte sur la densité et l'activité microbienne en marais filtrant artificiel*, Université de Montréal.
- Grace, J. B. and J.S. Harrisson, 1986. *The biology of Canadian weeds*. 73. *Typha latifolia* L., *Typha angustifolia* L. and *Typha xglauca* Godr. Can J. Plant Sci. 66 : 361-379.
- Goulden, M.L., Litvak M. and S.D. Miller, 2006. *Factors that control Typha marsh evapotranspiration*. Aquatic Botany 86 (2007) 97–106.
- Gomçmez, S., Kayam Y. and Z. L. Bilir, 2010. *Constructed wetlands for municipal waste water treatment, case study of Çakirbeyli village*. International Sustainable Water and Wastewater Management Symposium. 26-28 October 2010. 9 p.
- Greenway, M., 2010. *Wetlands and Ponds for Stormwater Treatment in Subtropical Australia: Their Effectiveness in Enhancing Biodiversity and Improving Water Quality?* Universities Council on Water Resources Journal of Contemporary Water Research & Education, Issue 146, p. 22-38.
- Greenway, E., 2005. *The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical and arid Australia*. Ecological Engineering 25 (2005) 501–509.
- Hatano, K., Douglas. F. J., and J. A. Moore, 1994. *Microbial ecology of constructed wetlands used for treating pulp mill wastewater*. Water Science Technology. Vol. 29, No 4, p. 233-239.
- Hogg, E.H. and R.W. Wein, 1987. *Growth dynamics of floating Typha mats: Seasonal translocation and internal deposition of organic material*. Oikos, 50, 197-205.
- Hosoi, Y., Kido, Y., Miki, M., and M. Sumida, 1998. *Field examination on reed growth, harvest and regeneration for nutrient removal*. Water Science and Technology, 38 (1) : 351-359.
- House, C.H., Broome, S.W. and M.T. Hoover, 1994. *Treatment of nitrogen and phosphorous by a constructed upland-wetland wastewater treatment system*. Water Science Technology. Vol. 29, No 4, p. 177-184.

- Jansson, M., 1988. *Phosphate uptake and utilization by bacteria and algae*. Hydrobiologia, Vol.170, no.1, p.177-189.
- Kadlec, R.H. and S. Wallace, 2009. *Treatment wetlands (2<sup>nd</sup> ed.)*. Boca Raton, FL :CRC Press. 943 p. + Appendix and Tables.
- Kadlec, R.H. and D.L. Hey, 1994. *Constructed wetlands for river water quality improvement*. Water Science Technology. Vol. 29, No 4, p. 159-168.
- Kerr-Upal, M., Seasons, M. and G. Mulamoottil, 2000. *Retrofitting a stormwater management facility with a wetland component*. Journal of Environmental Science and Health, Vol. 35, No 8, p. 1289-1307.
- Kroeger, A. C., Madramootoo, C. A., Enright, P. & C. Laflamme, 2005. *Efficiency of a small constructed wetland in southern Québec for treatment of agricultural runoff waters*. Departement of Bioresource Engineering, McGill University Article soumis pour publication. AMEC Earth & Environmental. Article soumis pour publication au comité de révision de la revue Agrosolutions.
- Kyambadde, J., Kansiime, F., and G. Dalhaar, 2005. *Nitrogen and phosphorous removal in substrat free pilot constructed wetlands with horizontal surface flow in Uganda*. Water Research, 38, 475-485.
- Kynkäänniemi, P., Ulén, B., Torstensson, G., and Karin S. Tonderski, 2013. *Phosphorus retention in a newly constructed wetland receiving agricultural tile drainage water*. J. Environ. Qual. 42 : 596–605.
- LaFlamme, C. 2005. *Nutrient removal using a constructed wetland in Southern Québec*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Science. Department of Bioresource Engineering, McGill University, Montréal. 84 p. + appendices.
- Mino, T., M.C.M., van Loodsdrecht and J.J. Heijnen, 1998. *Microbiology and biochemistry of the enhanced biological phosphate removal process*. Water Res : 32 (11), 3193-3207.
- Morse, GK., Brett, S.W., Guy, J.A., and J.N. Lester, 1998. *Review: phosphorus removal and recovery technologies*. Sci. Total Environ; 212 : 69–81.
- Mulkerrins, Dobson, A.W.D., and E. Collieran, 2004. *Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters*. Environment International 30 : 249-259.

- Newman, J.R., Duenas-Lopez, M.A., Acreman, M.C., Palmer-Felgate, E.J., Verhoeven, J.T.A., Scholz, M. and E. Maltby, 2015. *Do on-farm natural, restored, managed and constructed wetlands mitigate agricultural pollution in Great Britain and Ireland? A systematic review*. Final Report WT0989. Department for Environment, Food and Rural Affairs, U.K. 2015. 81 p.
- Prairie, Y., de Montigny, C. et P. A. Del Giorgio, 2001. *Anaerobic phosphorus release from sediments: a paradigm revisited*. Verhandlungen der Internationale Vereinigung Limnologie, vol. 27, p. 1-8.
- Raisin, G.W., Michell, D.S., & R.L. Croome, 1997. *The effectiveness of a small constructed wetland in ameliorating diffuse nutrient loadings from an Australian rural catchment*. Ecological Engineering 9 : 19-35.
- Reddy, K.R., Kadlec, R.H., Flaig, E., and P.M. Gale, 1999. *Phosphorus retention in streams and wetlands: a review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 29, 83-146.
- Roy, A. 2016. *Résultats du projet pilote de restauration du lac à l'Anguille : Volet 1; expérimentation d'un îlot végétal flottant pour capter le phosphore présent dans le lac*. Groupe AIM inc. Rimouski (QC), Canada. 64 p. et annexes.
- Roy, A., 2008. *Proposition d'un projet pilote comme modèle pour la restauration des lacs eutrophes avec épisodes d'explosions de fleurs d'eau (cyanobactéries): Approche concertée de lutte intégrée pour la restauration du lac à l'Anguille (municipalité de Saint-Anaclet-de-Lessard, Québec)*. Groupe AIM inc. et Association de la protection de l'environnement du lac à l'Anguille inc. Rimouski (Québec) Canada. 39 p.
- Roy, A., 2005. *Suivi de la qualité de l'eau du lac à l'Anguille, été 2005*. Groupe AIM inc., Rimouski (Québec) Canada. 45 p. et annexes.
- Roy, A., 1999. *Plan de mise en valeur du lac à l'Anguille visant à contrer le vieillissement accéléré du lac et à régénérer la qualité aquatique et multifauunique de ses habitats*. Groupe AIM inc., Rimouski (Québec) Canada. 42 p. et annexes.
- Roy, A., Morissette, A., Vincent, B., Chabot, R., Nozais, C. et A. Illinca, 2010. *Protocole expérimental de suivi de l'îlot végétal flottant filtrant (IVFF) et du marais filtrant à écoulement horizontal de surface pour le biotraitement des lacs eutrophes – Version finale*. Groupe AIM inc. Rimouski (Québec) Canada, pour l'Association de protection de l'environnement du lac à l'Anguille inc. (APELA), 59 p.

- Snyder, R.L. and C.E. Boyd, 1987. *Evapotranspiration of Eichhornia crassipes (Mart.) and Typha latifolia L.* Aquatic Botany 27 : 217:227.
- Société québécoise de phytotechnologie 2014. Fiches techniques de la SQP. 1. *LES MARAIS FILTRANTS*. Dernière mise à jour le 28 mai 2014. [www.phytotechno.com](http://www.phytotechno.com)
- Sondergaard, M., Jensen, P. et E. Jeppensen, 2003. *Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes.* Hydrobiologia, Vol. 506-509, p.135-145.
- Tanner, C. 2012. *Potential of wetlands to reduce nutrient loads from the Lowry Peaks and St-Leonards drains. Proposed Hurunui and Waiau River.* Regional Plan And Proposed Plan Change to the Canterbury Natural Resources Regional. Plan Section 42A Report. National Institute of Water and Atmospheric Research. 17 p.
- Tanner, C.C., et J.P.S. Sukias, 2011. *Multi-year nutrient removal performance of three constructed wetlands intercepting drainage flows from intensively grazed pastures.* Journal of Environmental Quality 40, 620-633.
- Tanner, C.C., Caldwell, K., Ray, D., and J. McIntosh, 2007. *Constructing wetlands to treat nutrient-rich inflows to Lake Okaro, Rotorua.* 5th South Pacific Stormwater Conference, Auckland, NZ.
- Tanner, C. C. et J. Sukias. 2002. *Status of wastewater treatment wetlands in New Zealand.* 2002. EcoEng. Newsletter 1/2002. 5 p.
- Tanner, C.C., Clayton, J.S. and M.P. Upsdell, 1995. *Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands - II. Removal of nitrogen and phosphorus.* Water Research 29(1), 27-34.
- Tanner, C.C., Clayton, J.S. and M.P. Upsdell, 1995. *Effect of loading rate and planting on treatment of dairy farm wastewaters in constructed wetlands - I. Removal of oxygen demand, suspended solids, and faecal coliforms.* Water Research 29(1), 17-26.
- Tian, Z., Zheng, B., Liu, M., & Z. Zhang, 2009. *Phragmites australis and Typha orientalis in removal of pollutant in Taihu Lake, China.* Journal of Environmental Sciences 21 : 440-446.
- Vymazal, J., 2007. *Removal nutrients in various types of constructed wetlands.* Science of Total Environment, 380 (1-3), 48-65.

Vymazal, J., 2004. *Removal of phosphorous via harvesting of emergent vegetation in constructed wetlands for wastewater treatment*. Linéard, A., Burnett H. (eds). Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Wetlands Systems for Water Pollution Control, 26-30 September 2004. Association technique et scientifique pour l'eau et l'environnement (ASTEE), Cemagref and IWA: Avignon (France) p. 415-422.

Vymazal, J., Kansiime, F., and G. Dalhammar, 2005. *Nitrogen and phosphorous removal in substrate free pilot-constructed wetlands with horizontal subsurface flow in Uganda*. *Water, Air, and Soil Pollution* (2005) 165 : 37–59.

Wagner, M. and A. Loy, 2002. *Bacterial community composition and function in sewage treatment systems*. *Curr Opin Biotechnol*, 13 (3) : 218-227.

Wang, N. and W.J. Mitsch, 2000. *A detailed ecosystem model of phosphorous dynamics in created riparian wetlands*. *Ecological modelling*, 126 : 101-130.

Watson, J.T., Sherwood, S.C., Kadlec, R.H., Knight, R.L. and A.E. Whitehouse, 1989. *Performance expectations and loading rates for constructed wetlands*". In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*. Lewis, Chelsea, p. 319–351.

## **Webographie**

Environnement Canada. Station Rimouski. [En ligne], URL : <http://climat.meteo.gc.ca/>

Villes vertes, Eau bleue. Guide d'introduction à la gestion écologique des eaux de pluie. Union Saint-Laurent – Grands Lacs, 31 mars 2010, [Document pdf], URL : [http://www.grobec.org/pdf/projets/Guide\\_villes\\_vertes\\_eau\\_bleue.pdf](http://www.grobec.org/pdf/projets/Guide_villes_vertes_eau_bleue.pdf)

## **Annexe 1 : Tableaux des données par saison**

Tableau 1. Données brutes des débits, charges et taux de retraits en PT et PDT dans le marais filtrant à la saison 2011

<sup>1</sup>Données retirées de l'analyse en raison des valeurs erronées, c'est-à-dire des teneurs et quantités en PDT à l'entrée plus élevées que celles en PT,

<sup>3</sup> Date (2011)	PT (mg/l)		PDT (mg/l)		<sup>2</sup> Q entrée (m <sup>3</sup> )	<sup>2</sup> Q sortie (m <sup>3</sup> )	Entrée PT (mg)	Entrée PDT (mg)	Sortie PT (mg)	Sortie PDT (mg)	Charge retenue PT (mg)	Charge retenue PDT (mg)	Retrait mg PT/m <sup>2</sup>	Retrait mg PDT/m <sup>2</sup>	Durée (jours)
	Entrée-sortie	Entrée-sortie	Entrée-sortie	Entrée-sortie											
4 au 10 mai	0,025	0,026	0,016	0,016	163 403	163 422	4 248471	2 614444	4085544	2 614748	162 928	-304	21,16	-0,04	7
<sup>1</sup> -11 au 18 mai	0,012	0,013	0,016	0,013	35 597	35 593	427 168	569 557	462709	462 709	-35 541	106 848	-4,04	12,14	8
<sup>1</sup> -19 au 24 mai	0,016	0,015	0,061	0,018	14 554	14 533	232 862	887 788	217994	261 592	14 869	626 196	2,25	94,88	6
25 au 31 mai	0,038	0,040	0,012	0,008	35 974	35 990	1 367001	431 685	1439600	287 920	-72 599	143 765	-9,43	18,67	7
1 au 7 juin	0,024	0,022	0,012	0,008	14 848	14 820	356 348	178 174	326036	118 559	30 312	59 615	3,94	7,74	7
8 au 16 juin	0,035	0,037	0,030	0,030	10 237	10 211	358 294	30 711	377807	30 633	-19 513	78	-1,97	0,01	9
16 au 29 juin	0,032	0,028	0,022	0,011	28 357	28 347	907 430	623 858	793722	311 819	113 709	312 039	7,38	20,26	14
29 au 6 juillet	0,030	0,015	0,023	0,006	4 776	4 750	143 289	109 855	71255	28 502	72 035	81 353	8,19	9,24	8
7 au 12 juillet	0,110	0,054	0,034	0,018	2 570	2 406	282 645	87 363	129940	43 313	152 705	44 050	23,14	6,67	6
13 au 19 juillet	0,051	0,025	0,040	0,018	1 553	1 525	79 182	62 104	38115	27 443	41 067	34 661	5,33	4,50	7
20 au 27 juillet	0,056	0,038	0,044	0,018	4 194	4 145	234 874	184 544	157509	74 610	77 365	109 934	8,79	12,49	8
28 juillet au 3 août	0,051	0,035	0,036	0,023	1 216	1 206	62 011	43 772	42194	27 727	19 817	16 045	2,57	2,08	7
4 au 10 août	0,069	0,035	0,052	0,020	1 267	1 281	87 424	65 885	44846	25 626	42 579	40 259	5,53	5,23	7
11 au 16 août	0,069	0,029	0,048	0,054	945	932	65 230	45 377	27024	50 320	38 206	-4 943	5,79	-0,75	6
17 au 23 août	0,062	0,026	0,045	0,018	724	700	44 863	32 562	18190	12 593	26 674	19 969	3,46	2,59	7
24 août au 1 <sup>er</sup> sept.	0,080	0,023	0,043	0,011	4 719	4 740	377 496	202 904	109020	52 140	268 476	150 764	27,12	15,23	9
2 au 8 sept.	0,047	0,011	nd	nd	15 562	15 602	731 409	nd	171621	nd	559 788		72,70	0,00	7
9 au 13 sept.	0,032	0,025	0,024	0,023	2 935	2 928	93 923	70442	73202	67 346	20 721	3 096	3,77	0,56	5
14 au 20 sept.	0,052	0,023	0,028	0,012	3 939	4 027	126 052	110 295	100665	48 319	25 387	61 976	3,30	8,05	7
21 au 27 sept.	0,027	0,018	0,018	0,010	1 600	1 594	43 205,4	28 804	28692	15 940	14 513	12 864	1,88	1,67	7
28 sept. au 4 oct.	0,037	0,012	0,028	0,007	1 123	1 100	40 442	28 085	17598	8 799	22 843	19 285	2,97	2,50	7
5 au 12 octobre	0,047	0,010	0,021	0,005	1 005	1 116	37 197	25 133	13397	8 931	23 800	16 202	2,70	1,84	8
13 au 17 octobre	0,038	0,011	0,025	0,008	1 163	1 191	54 652	24 419	11905	5 953	42 746	18 466	7,77	3,36	5
18 au 26 octobre	0,034	0,016	0,016	0,013	1 768	1 816	67 182	44 199	19980	14 531	47 202	29 668	4,77	3,00	9
27 au 6 octobre	0,044	0,014	0,027	0,006	1 280	1 348	43 519	20 480	21568	17 524	21 952	2 956	1,81	0,24	11
7 au 16 octobre	0,029	0,026	0,022	0,012	3 844	3 887	169 155	103 800	54424	23 325	114 731	80 475	10,43	7,32	10
17 au 20 octobre	0,029	0,019	0,019	0,009	1 103	1 112	31 983	24 263	28908	13 342	3 075	10 921	0,70	2,48	4
21 au 30 octobre	0,050	0,047	0,024	0,023	9 335	9 375	334 729	192 606	263981	127 303	70 748	65 303	6,43	5,94	10

ce qui est chimiquement impossible puisque le phosphore dissout total est une fraction du phosphore total (PT = PDT + PP).

<sup>2</sup> : Débit entrant, débit sortant pour la période.<sup>3</sup> : La date de prélèvement d'eau et d'échantillonnage correspond au premier jour de chaque période.

Tableau 2. Données brutes des concentrations, débits et charges en PT et PDT transitant dans le marais filtrant à la saison 2012

<sup>3</sup> Date (2012)	PT (mg/l)		PDT (mg/l)		<sup>2</sup> Q entrée (m <sup>3</sup> )	<sup>2</sup> Q sortie (m <sup>3</sup> )	Entrée PT (mg)	Entrée PDT (mg)	Sortie PT (mg)	Sortie PDT (mg)	Charge nette PT (mg)	Charge nette PDT (mg)	Retrait (mg PT/m <sup>2</sup> /j)	Retrait (mg PDT/m <sup>2</sup> /j)
	Entrée-sortie	Entrée-sortie	Entrée-sortie	Entrée-sortie										
27 mars au 2 avril	0,025	0,024	0,013	0,013	25 639	25 631	640 971	333 305	615 147	333 205	25 824	100	3,35	0,01
3 au 10 avril	0,016	0,015	0,012	0,01	13 118	13 120	209 880	157 410	196 805	131 204	13 075	26 206	1,49	2,98
11 au 17 avril	0,024	0,019	0,012	0,011	23 976	23 971	575 420	287 710	455 454	263 684	119 966	24 026	15,58	3,12
18 au 24 avril	0,024	0,02	0,014	0,014	53 528	53 565	1 284 660	749 385	1 071 307	749 915	213 353	-530	27,71	-0,07
25 avril au 1 <sup>er</sup> mai	0,033	0,032	0,023	0,018	98 624	98 644	3 254 585	2 268 347	3 156 623	1 775 601	97 962	492 747	12,72	63,99
2 au 8 mai	0,014	0,015	0,1	0,1	19 184	191 86	268 569	191 835	287 786	191 857	-1 9217	-22	-2,50	0,00
9 au 14 mai	0,014	0,016	0,01	0,011	42 150	42 186	590 098	421 499	674 972	464 043	-1 9217	-22	-2,91	0,00
15 au 21 mai	0,019	0,019	0,013	0,011	14 247	14 255	270 700	185 216	270 842	156 803	-142	28 412	-0,02	3,69
22 au 28 mai	0,022	0,021	0,016	0,014	6 635	6 648	145 962	106 154	139 609	93 073	6 353	13 081	0,83	1,70
29 mai au 3 juin	0,028	0,023	0,02	0,013	3 405	3 422	95 347	68 105	78 705	44 485	16 642	23 619	2,52	3,58
4 au 12 juin	0,035	0,025	0,027	0,014	2 799	2 807	97 952	75 563	70 186	39 304	27 766	36 259	2,80	3,66
13 au 18 juin	0,066	0,03	0,039	0,017	1 290	1 295	85 132	50 305	38 835	22 007	46 297	28 299	7,01	4,29
19 au 26 juin	0,066	0,025	0,039	0,017	1 406	1 448	92 783	54 826	36 201	24 617	56 582	30 210	6,43	3,43
27 juin au 3 juillet	0,047	0,038	0,035	0,025	3 985	4 024	187 279	139 463	152 931	10 0612	34 348	38 851	4,46	5,05
4 au 10 juillet	0,054	0,032	0,039	0,018	915	893	49 407	35 683	28 574	16 073	20 833	19 610	2,71	2,55
11 au 16 juillet	0,063	0,03	0,044	0,014	367	348	23 145	16 165	10 427	4 866	20 833	19 610	3,16	2,97
17 au 23 juillet	0,077	0,036	0,024	0,024	300	308	23 063	7 188	11 092	7 394	119 71	-206	1,55	-0,03
24 au 29 juillet	0,093	0,064	0,03	0,016	558	539	51 911	16 745	34 527	8 632	17 384	8 114	2,63	1,23
30 juil. au 6 août	0,077	0,075	0,047	0,04	306	279	23 590	13 786	20 948	11 172	2 642	2614	0,30	0,30
7 au 15 août	0,012	0,017	0,072	0,11	1 985	1 992	23 822	142 931	33 860	219 092	-10 038	-76 162	-1,01	-7,69
16 au 20 août	0,082	0,081	0,056	0,055	216	197	17 744	12 118	15 960	10 837	1 785	1 281	0,32	0,23
21 au 26 août	0,096	0,091	0,058	0,045	184	162	17 665	10 673	14 703	7 271	2 962	3 402	0,45	0,52
27 août au 3 sept.	0,11	0,17	0,066	0,09	287	269	31 583	18 950	45 706	24 197	-14 123	-5 247	-1,60	-0,60
4 au 10 sept.	0,098	0,13	0,071	0,08	176	154	17 287	12 524	20 072	12 352	-2 785	172	-0,36	0,02
11 au 16 sept.	0,18	0,13	0,064	0,062	106	84	19 129	6 801	10 955	5 225	8 174	1 577	1,24	0,24
18 au 25 sept.	0,24	0,18	0,13	0,081	281	272	67 530	36 579	20 072	22 007	47 458	14 572	5,39	1,66
26 sept. au 2 oct.	0,18	0,18	0,17	0,092	194	185	34 892	32 953	33 308	17 024	1 584	15 929	0,21	2,07
3 au 9 octobre	0,098	0,1	0,07	0,068	716	735	70 151	50 108	73 452	49 948	-3 302	160	-0,43	0,02
10 au 15 octobre	0,047	0,043	0,029	0,029	2 200	2 240	103 390	63 794	96 312	64 955	7 077	-1 161	1,07	-0,18
16 au 21 octobre	0,042	0,039	0,021	0,022	5 210	5 222	218 824	109 412	203 640	114 874	15 184	-5 462	2,30	-0,83
22 au 30 octobre	0,028	0,032	0,015	0,014	3 985	3 982	111 570	59 770	127 432	55 751	-15 861	4 019	-1,60	0,41
31 oct. au 7 nov.	0,051	0,023	0,034	0,017	5 397	5 399	275 226	183 484	124 182	91 787	151 044	91 697	15,26	9,26

## **Annexe 2 : Paramètres physico-chimiques**

Tableau 3. Paramètres physico-chimiques à l'entrée, au centre et à la sortie du marais en 2011

Date	Sites	T (°C)	Conductivité (us)	Conductivité <sup>-1</sup> (us)	Oxygène saturation (%)	Oxygène dissout (mg/l)	Turbidité (ntu)	pH
2011-05-10	Entrée	9,8	205,6	287,5	90,4	10,24	2,13	7,27
	Centre	10	206,3	286	90,2	10,67	2,62	7,5
	Sortie	10,2	210,5	239,4	90	10,29	2,42	6,92
2011-05-11	Entrée	6,7	152,2	291,7	93,2	10,67	1,95	7,5
	Centre	6,5	150,5	235,2	84,5	10,65	2,92	7,05
	Sortie	6,7	154	235,8	84,9	10,07	2,58	7,03
2011-05-25	Entrée	8,5	220,2	321,5	92	9,58	2,15	7,21
	Centre	9,7	224,3	319	97,4	10,62	1,5	7,28
	Sortie	9,8	219,8	308,9	97,4	10,43	1,52	7,07
2011-06-01	Entrée	10,4	305,1	220,3	81,3	8,81	3,7	7,61
	Centre	10,4	214,8	305,3	83,3	8,65	2,44	7,58
	Sortie	11,7	221,6	307,6	84,8	9,67	4,23	7,41
2011-06-16	Entrée	17,7	322,7	377,5	91	8,97	4,18	7,59
	Centre	18,9	327,5	371,6	97,1	9,38	1,86	7,88
	Sortie	19,9	329,5	352,8	104,5	10,57	1,73	7,45
2011-06-29	Entrée	14,7	314,4	392,3	81	7,9	1,71	7,63
	Centre	15,3	313,7	385,1	110	11,81	1,77	7,9
	Sortie	16,2	313,2	376,1	118	11,58	1,32	7,3
2011-07-08	Entrée	13,7	275,8	352	80,5	7,6	39	7,15
	Centre	14,3	262,5	330,8	103,4	10,24	15,9	7,19
	Sortie	14,4	250,4	313,8	80,3	7,8	14,7	7,21
2011-07-13	Entrée	15,8	338,8	413,2	79,5	7,88	1,94	7,21
	Centre	17,4	331,7	388	127,5	10,95	1,65	7,58
	Sortie	17,9	338,4	393,4	80	9,24	1,43	7,18
2011-07-20	Entrée	14,3	334,8	420,4	98,70	7,21	1,69	7,49
	Centre	15,2	324,7	400,5	102,1	9,44	2,75	7,47
	Sortie	15,3	323	398,2	93	8,37	3,94	7,43
2011-07-28	Entrée	16,2	182,3	224,1	74,2	7,27	2,9	7,69
	Centre	19,7	360,2	401,2	137,7	12,1	3,28	8,25
	Sortie	21,8	376,9	405,3	141	12,61	1,6	7,94
2011-08-03	Entrée	16,5	369,9	444,1	65	5,95	2,63	7,55
	Centre	18,6	376,1	427,6	100,9	9,05	1,85	7,8
	Sortie	18,9	376,1	426,5	98,8	8,74	1,61	7,35
2011-08-11	Entrée	15,3	322,1	397,9	62,1	6,87	6	7,73
	Centre	16,2	332,6	398,8	74,7	7,53	3,59	7,77
	Sortie	16,5	343,1	411,5	73,1	7,12	2,81	7,57
2011-08-17	Entrée	16,9	374,8	443,5	92,9	8,13	2,37	7,77
	Centre	21,2	393,3	425,5	85,4	9,76	2,51	7,7
	Sortie	20,3	370,1	406,7	133,6	11,07	1,46	7,56
2011-08-24	Entrée	16,5	375,2	447,7	64	6,16	6,35	7,70
	Centre	17,8	381,8	442,9	52,3	5,01	2,35	7,66
	Sortie	17,9	372,4	431,4	79,4	7,45	1,57	7,42

Date	Sites	T (°C)	Conductivité (us)	Conductivité <sup>1</sup> (us)	Oxygène saturation (%)	Oxygène dissout (mg/l)	Turbidité (ntu)	pH
2011-08-28	Entrée	16,2	182,3	224,1	74,2	7,27	2,9	7,69
	Centre	19,7	360,2	401,2	137,7	12,1	3,28	8,25
	Sortie	21,8	376,9	405,3	141	12,61	1,59	7,94
2011-09-02	Entrée	14	365,8	463	70,8	7,19	1,48	7,59
	Centre	14,8	372,5	462,1	67,5	6,14	1,78	7,68
	Sortie	14,6	362,9	454,6	70,6	7,04	1,04	7,45
2011-09-09	Entrée	16	352,1	426,6	80,1	8,06	2,23	7,63
	Centre	17	356,9	421,4	77,7	7,52	1,59	7,65
	Sortie	17,6	362,9	416,4	89,9	8,24	1,57	7,43
2011-09-14	Entrée	12,6	529	690	72,6	7,22	16,4	3,86
	Centre	12,9	306,7	398,8	74	7,64	10,8	6,98
	Sortie	13	306,3	397,3	65,1	6,7	3,58	7,52
2011-09-21	Entrée	11,9	339,5	453,1	83,1	8,96	1,22	7,51
	Centre	11,2	329,5	446,7	70	7,72	0,95	7,68
	Sortie	11,2	333,5	446,9	69,5	7,57	0,81	7,57
2011-09-28	Entrée	7,7	311,8	464,5	46,6	5,72	1,15	7,83
	Centre	8,2	305,4	450,4	50,9	6,12	1,54	7,69
	Sortie	7,1	300,4	456	48,4	6,03	1,18	7,64
2011-10-05	Entrée	7,6	301,2	452	65,7	7,50	1,93	7,79
	Centre	7,7	294,1	438,7	56,1	6,17	1,20	7,81
	Sortie	7,7	293,9	440,6	51,1	6,10	1,20	7,61
2011-10-13	Entrée	7,2	302,4	451,0	63,4	7,20	1,83	7,81
	Centre	7,2	292,1	437,6	56,4	6,71	1,24	7,69
	Sortie	7,3	294,1	441,4	51,6	6,20	1,18	7,59
2011-10-18	Entrée	7,3	298,1	450,2	53,5	6,12	2,48	7,83
	Centre	7,5	296,5	445,4	51,7	6,12	2,69	7,85
	Sortie	7,4	291,9	442,9	42,1	5,40	1,91	7,60
2011-10-27	Entrée	4,3	271,0	449,0	76,6	9,96	1,23	7,63
	Centre	4,2	268,5	445,9	69,5	9,39	1,98	7,77
	Sortie	3,9	265,1	444,0	68,2	8,37	2,21	7,70
2011-11-07	Entrée	4,0	272,5	453,9	68,8	8,44	2,28	7,56
	Centre	3,7	262,6	443,1	76,6	10,65	1,29	7,90
	Sortie	3,1	258,2	444,6	72,1	9,53	3,50	7,71
2011-11-11	Entrée	6,9	213,8	327,1	71,1	9,16	36,70	7,53
	Centre	6,8	221,2	338,6	77,1	9,25	34,10	7,94
	Sortie	6,9	219,5	335,4	69,6	8,67	29,70	7,80
2011-11-21	Entrée	0,5	254,0		87,1	12,15	2,53	7,94
	Centre	0,6	252,2		96,5	13,28	2,11	7,88
	Sortie	0,3	193,0		83,1	12,07	5,33	7,88

<sup>1</sup> Conductivité rapportée pour un échantillon à 25 °C.

Tableau 4. Paramètres physico-chimiques à l'entrée, au centre et à la sortie du marais en 2012

Site	Date	T (°C)	Conductivité (us)	Conductivité <sup>-1</sup> (us)	Oxygène saturation (%)	Oxygène dissout (mg/l)	Turbidité (ntu)	pH
Entrée		10,5	194,2	268,6	85,8	9,8	4,35	7,64
Centre	2012-04-18	10,8	194,3	267,3	87,2	9,01	3,99	7,73
<b>Sortie</b>		11,4	196,7	266,6	90,2	9,94	3,57	7,78
Entrée		8,5	153	223,7	80,8	9,2	6,24	7,67
Centre	2012-04-25	Présence d'un rat musqué au centre, brouillant la masse d'eau.						
<b>Sortie</b>		8,2	151	224,2	82,5	9,32	5,79	7,85
Entrée		6,1	197,1	307	88,2	10,85	2,53	7,58
Centre	2012-05-02	6,7	200,4	306,7	88,4	10,72	2,54	7,74
<b>Sortie</b>		6,7	200,3	306,4	89	10,74	2,61	7,73
Entrée		6,8	219,2	336,1	86,2	10,44	1,66	7,61
Centre	2012-05-09	7	223,6	341,8	85,9	10,35	2,6	7,85
<b>Sortie</b>		7,1	225,7	342,7	85,5	10,31	2,02	7,71
Entrée		10,4	241	334,1	86,7	9,61	2,29	7,49
Centre	2012-05-15	11,3	246,2	333,5	90,4	9,81	1,83	7,82
<b>Sortie</b>		11,5	247,4	333,2	91,3	9,82	2,49	7,72
Entrée		13,8	297,9	377,7	82,8	8,58	1,67	7,52
Centre	2012-05-22	15,3	301,9	371,2	95,7	9,62	nd	7,83
<b>Sortie</b>		16	302,4	365,4	99,4	9,75	2,08	7,62
Entrée		7,9	266,1	395,8	82,3	9,75	2,49	7,67
Centre	2012-05-29	8,3	267,1	392	83,1	9,74	14,9	7,89
<b>Sortie</b>		8,1	260,9	384,2	79,1	9,31	7,75	3,2
Entrée		11,2	298,6	406,3	77,5	8,51	1,78	7,48
Centre	2012-06-04	12,6	306,9	403,8	95,2	10,17	3,22	7,81
<b>Sortie</b>		12,6	299,1	392,1	90,3	9,57	3,26	7,61
Entrée		17,1	364,2	428,1	64	6,13	3,13	7,5
Centre	2012-06-19	20	378	415,8	97,7	9,25	2,95	7,76
<b>Sortie</b>		20,8	383,2	416,17	84,1	7,9	1,55	7,67
Entrée		15	280,6	348,5	80,2	8,07	5,85	7,52
Centre	2012-06-27							
<b>Sortie</b>		16,4	271,7	324,9	94,5	9,25	5,85	7,64
Entrée		14,9	361,4	448,9	72,4	7,25	2,18	7,47
Centre	2012-07-04	16,3	361,1	433,1	92	9,16	6,77	7,7
<b>Sortie</b>		17,2	365,7	429,8	76,1	7,28	3,22	7,7
Entrée		15,3	369,9	449,2	65,8	6,63	2,12	7,24
Centre	2012-07-11	17,2	366,6	429,1	92,4	8,39	2,99	7,55
<b>Sortie</b>		17,3	369,6	434,9	75,1	7,19	2,54	7,57
Entrée		16,5	376,7	448,1	44,3	4,47	3,26	7,49
Centre	2012-07-17	18,3	367,3	421,6	90,3	9,44	3,92	7,69
<b>Sortie</b>		18,1	377,7	435,9	29,8	2,8	1,73	7,5

Site	Date	T (°C)	Conductivité (us)	Conductivité <sup>1</sup> (us)	Oxygène saturation (%)	Oxygène dissout (mg/l)	Turbidité (ntu)	pH
Entrée		18,2	302,9	347,5	64,6	6,14	20,7	7,45
Centre	2012-07-24	18,6	320,2	363,5	59	5,54	9,56	7,53
<b>Sortie</b>		18,8	333,3	377,2	41	3,84	4,61	7,61
Entrée		19,2	394,6	446,7	56,3	5,26	3,12	7,12
Centre	2012-07-30	26,7	446,9	431,2	104,1	8,33	3,66	7,48
<b>Sortie</b>		23,8	440,1	437,2	38,7	3,05	2,28	7,41
Entrée		18	402,9	464,1	47,4	4,59	1,97	7,12
Centre	2012-08-16	18,7	400,9	454,6	48	4,53	3,64	7,42
<b>Sortie</b>		18,9	406,2	458,4	22,7	2,32	1,28	7,39
Entrée		16	361,9	436,3	48,6	4,87	2,18	7,12
Centre	2012-08-22	18,4	397,6	453,2	63,4	5,99	4,86	7,47
<b>Sortie</b>		17,8	397,6	460	29,9	2,65	4,35	7,32
Entrée		19,5	410,9	455,7	36,3	3,37	3,54	7,15
Centre	2012-08-27	22,1	425,9	448,8	49	4,3	4,42	7,26
<b>Sortie</b>		21,7	433,2	463	17,6	1,57	3,53	7,22
Entrée		14,3	342,5	428,7	39,1	4,01	2,52	7,33
Centre	2012-09-04	15,6	348,7	424,4	30,3	3,08	10,9	7,47
<b>Sortie</b>		15,8	354,4	430,9	14,4	1,42	3,8	7,38
Entrée		12,8	318,9	416,8	31,7	3,27	6,26	7,45
Centre	2012-09-11	10,7	299,2	413,9	16	1,76	12	7,52
<b>Sortie</b>		12,3	319,1	420,3	22	2,38	3,5	7,52
Entrée		13,6	327,2	415,5	33,6	3,56	4,54	7,1
Centre	2012-09-17	14,3	331,9	416,5	15,7	1,61	7,61	7,1
<b>Sortie</b>		15,1	330,8	407,3	21,6	2,23	6,32	7,17
Entrée		10	294,6	412,3	27	3,06	3,15	7,41
Centre	2012-09-26	9,9	292,1	410,4	15,9	1,69	6,3	7,4
<b>Sortie</b>		9,9	292	408,5	12,5	1,5	9,01	7,54
Entrée		11,1	286,5	390,1	44,3	4,87	1,86	7,5
Centre	2012-10-02	11,1	286,1	389,3	26	2,88	2,98	7,43
<b>Sortie</b>		12	293,9	383,1	16,6	1,83	2,99	7,42
Entrée		6,1	282,1	440,6	57,4	7,17	2,59	7,38
Centre	2012-10-10	5,3	274	440,1	35,4	4,5	3,55	7,19
<b>Sortie</b>		5,6	273,1	434,9	29,2	3,67	3,52	7,17
Entrée		10,1	365,9	510	60,6	6,97	1,8	7,23
Centre	2012-10-31	10,4	362	501	54,2	6,1	2,31	7,4
<b>Sortie</b>		10,7	361,5	495,8	51,9	5,82	2	7,43

<sup>1</sup>- Conductivité rapportée pour un échantillon à 25 °C.

**Annexe 3 : Exemple des calculs du cumul des débits et des charges entrantes dans le marais pour une journée type**

Tableau 5. Exemple du cumul des charges entrantes pour une journée de la période cible

Date et heure	Débit entrée (m <sup>3</sup> /s)	Total débit (m <sup>3</sup> )	Entrée [PT] 27 mg/m <sup>3</sup>	Charge entrée (mg) PT
21.09.2011 00:24:56	0,0027	4,86	27	131,22
21.09.2011 00:54:56	0,0035	6,3	27	170,1
21.09.2011 01:24:57	0,0031	5,58	27	150,66
21.09.2011 01:54:57	0,0058	10,44	27	281,88
21.09.2011 02:24:57	0,0057	10,26	27	277,02
21.09.2011 02:54:57	0,0029	5,22	27	140,94
21.09.2011 03:24:58	0,0052	9,36	27	252,72
21.09.2011 03:54:58	0,005	9	27	243
21.09.2011 04:24:58	0,0025	4,5	27	121,5
21.09.2011 04:54:58	0,0023	4,14	27	111,78
21.09.2011 05:24:59	0,0044	7,92	27	213,84
21.09.2011 05:54:59	0,0021	3,78	27	102,06
21.09.2011 06:24:59	0,0027	4,86	27	131,22
21.09.2011 06:54:59	0,0023	4,14	27	111,78
21.09.2011 07:24:59	0,0052	9,36	27	252,72
21.09.2011 07:54:59	0,0061	10,98	27	296,46
21.09.2011 08:24:59	0,0072	12,96	27	349,92
21.09.2011 08:54:59	0,0068	12,24	27	330,48
21.09.2011 09:25:01	0,0051	9,18	27	247,86
21.09.2011 09:55:01	0,0062	11,16	27	301,32
21.09.2011 10:25:01	0,0049	8,82	27	238,14
21.09.2011 10:55:01	0,0052	9,36	27	252,72
21.09.2011 11:25:02	0,0029	5,22	27	140,94
21.09.2011 11:55:02	0,0048	8,64	27	233,28
21.09.2011 12:25:02	0,0048	8,64	27	233,28
21.09.2011 12:55:02	0,0054	9,72	27	262,44
21.09.2011 13:25:02	0,0029	5,22	27	140,94
21.09.2011 13:55:03	0,0044	7,92	27	213,84
21.09.2011 14:25:03	0,0053	9,54	27	257,58
21.09.2011 14:55:03	0,0028	5,04	27	136,08
21.09.2011 15:25:03	0,0043	7,74	27	208,98
21.09.2011 15:55:04	0,0033	5,94	27	160,38
21.09.2011 16:25:04	0,0018	3,24	27	87,48
21.09.2011 16:55:04	0,0028	5,04	27	136,08
21.09.2011 17:25:04	0,0026	4,68	27	126,36
21.09.2011 17:55:05	0,0018	3,24	27	87,48
21.09.2011 18:25:05	0,0018	3,24	27	87,48
21.09.2011 18:55:05	0,0005	0,9	27	24,3
21.09.2011 19:25:05	0,0001	0,18	27	4,86
21.09.2011 19:55:06	0,0004	0,72	27	19,44
21.09.2011 20:25:06	0,0012	2,16	27	58,32
21.09.2011 20:55:06	0,0006	1,08	27	29,16
21.09.2011 21:25:06	0,0005	0,9	27	24,3
21.09.2011 21:55:07	0,0024	4,32	27	116,64
21.09.2011 22:25:07	0,0007	1,26	27	34,02
21.09.2011 22:55:07	0,0023	4,14	27	111,78
21.09.2011 23:25:07	0,0026	4,68	27	126,36
21.09.2011 23:55:08	0,0023	4,14	27	111,78
<b>Total de la journée</b>		291,96		7 882,92

**Annexe 4 : Liste des espèces d'oiseaux fréquentant le marais filtrant du lac à l'Anguille**

## Espèces d'oiseaux recensés dans le marais filtrant depuis sa création

Bruant chanteur

Bruant des marais

Butor d'Amérique

Canard colvert

Canard branchu

Crécérelle d'Amérique

Grand-duc d'Amérique

Harle couronné

Moucherolle des aulnes

Moucherolle des saules (1 mention, espèce inusitée au Bas-Saint-Laurent)

Petite nyctale

Râle de Virginie

Sarcelle d'hiver

*Source : Serge Rhéaume, biologiste, MTQ Bas-Saint-Laurent*



Marais filtrant expérimental du lac à l'Anguille, été 2014



Entretien du marais filtrant expérimental (faucardage), automne 2015