

**MESURES PRÉCISES ET APPROCHES INNOVANTES EN MODÉLISATION DE LA DYNAMIQUE
DES NUTRIMENTS EN BASSIN ET EN PLAN D'EAU CONTRIBUANT AUX FLEURS DES
CYANOBACTÉRIES**

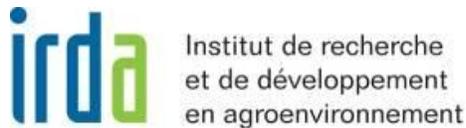
**PROGRAMME DE RECHERCHE EN PARTENARIAT
SUR LES CYANOBACTÉRIES.**

**FONDS QUÉBÉCOIS DE LA RECHERCHE SUR LA NATURE ET LES TECHNOLOGIES
ET FONDS DE LA RECHERCHE EN SANTÉ DU QUÉBEC**

**RAPPORT FINAL
2009-CY-130646**

Québec

Décembre 2012 (Ed. 2014)



McGill



Développement durable,
Environnement
et Parcs

Québec

Agriculture, Pêcheries
et Alimentation

Québec



Composition de l'équipe:

Madramootoo, Chandra Alastair
Bioresource Engineering
McGill University

Bird, David F.
Sciences biologiques
UQUAM

Michaud, Aubert
IRDA et Université de Sherbrooke

Whalen, Joann Karen
Natural Resource Sciences
McGill University

Étudiants gradués :

Boluwade, Alaba, PhD, McGill
Chikhaoui, Mohamed, Post doctoral, McGill
Gombault, Colline, MSc, McGill
Ngwa, Felexce, PhD, McGill
Poirier, Simon-Claude, PhD, McGill
Poon, David, MSc, McGill
Rasouli, Sogol, PhD, McGill

Collaborations :

Coopérative de solidarité du bassin versant de la Rivière Au brochet
Dura-Club
Corporation Bassin versant Baie Missisquoi
Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec
Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs

Le rapport peut être cité comme suit :

Madramootoo, C.A., A.R. Michaud, J. Whalen et S.-C. Poirier. 2012 Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin et en plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries. Rapport final de recherche. No. 2009-CY-130646. Programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries. Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies et Fonds de la recherche en santé du Québec. 30 pages.

Table des matières

	<u>Page</u>	
1.0	Introduction	6
2.0	Monitoring des transferts et de la spéciation des nutriments dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets	7
2.1	Gradients spatiaux des flux de P liés à l'occupation du territoire	8
2.2	Réponse des exportations de P aux actions agroenvironnementales concertées : Études de gradients temporels	10
2.3	Retracer les cheminements hydrologiques du P: Étude à l'échelle parcellaire et du bassin versant	13
2.4	Monitoring des sources et de la spéciation de l'azote	17
3.0	Modélisation hydrologique	19
4.0	Monitoring et modélisation des cyanobactéries dans la baie Missisquoi	21
4.1	Caractérisation des cyanobactéries	21
4.2	Modélisation des cyanobactéries à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNAs)	22
5.0	Résumés des travaux publiés	24

Liste des figures

		<u>Page</u>
Figure 1	Localisation et utilisation du sol des bassins versants expérimentaux de la rivière aux Brochets	7
Figure 2	Exemple typique de segmentation entre les écoulements de base et de crue des bassins versants suivi basé sur l'effet de dilution observé pour les concentrations en P ortho. Ici, concentration de P ortho en fonction de la décharge pour le ruisseau Ewing	8
Figure 3	Charges annuelles de phosphore total pour la strate d'écoulement de base en fonction de la population (a) et pour la strate d'écoulement de crue (b) en fonction de la superficie agricole aux exutoires des sous-bassins des ruisseaux aux Morpions, au Castor et Ewing	9
Figure 4	Modèle d'analyse de covariance (ANCOVA) utilisant le débit instantané en covariable pour le paramètre de concentration en P biodisponible observé à l'exutoire du Ruisseau Aux Castors pour la période de référence 1997-199 et les six périodes biannuelles successives	14
Figure 5	Séparation des hydrogrammes du ruisseau Ewing en composantes de ruissellement de surface, écoulement matriciel au drain écoulement préférentiel au drain, et résurgence de la nappe. (Adapté de Poirier, 2012a)	14
Figure 6	Résultats de modélisation des traceurs de cheminement d'eau dans le bassin Ewing suite à la séparation des hydrogrammes	14
Figure 7	Contribution aux exportations en P total et P réactif dissous des écoulements de résurgence (base), de drains matriciel, de drain préférentiel (macropore) et de ruissellement de surface pour les périodes de l'automne 2008 et printemps 2009 dans le bassin	15
Figure 8	Composition en 15N du profil de champs à texture loam argileux et loam sableux et de l'azote organique particulaire (PON) des eaux de drainage souterrain	15
Figure 9	Débit et flux prédit de P total résultant de la modélisation par SWAT-Qc à l'exutoire du ruisseau Wallbridge (Montérégie Est) en fonction des valeurs mensuelles observées au cours de la période de référence 2005-2007	17
Figure 10	Concentrations en cellule d'espèce Microcystis déterminées par le comptage au microscope et la méthode qPCR en temps réel pour 7 sites d'échantillonnage localisés dans la baie Missisquoi, Qc. Le compte total obtenu par comptage au microscope est donné en cellule par microlitre	19

Liste des tableaux

		<u>Page</u>
Tableau 1	Flux spécifiques annuels de phosphore total et biodisponible aux exutoires des sous-bassins expérimentaux des ruisseaux aux Morpions, au Castor et Ewing	9
Tableau 2	Charges annuelles moyennes de matières en suspension, phosphore total, biodisponible, dissous, et réactif soluble, ammoniac, nitrates et calcium aux exutoires des bassins expérimentaux au Castor et Ewing pour la période de référence 2009-2011	11
Tableau 3	Concentrations moyennes biannuelles en matières en suspension, phosphore total et phosphore biodisponible ajustées au modèle d'analyse de covariance utilisant le débit en covariable et écart par rapport à la période de référence 1997-1999 à l'exutoire du bassin versant expérimental du Ruisseau aux Castors	12
Tableau 4	Indicateurs d'ajustement du modèle SWAT-Qc, incluant le coefficient de régression (R ²), l'indice Nash-Sutcliffe (NS) et la déviation de la charge prédite par rapport à la charge totale observée pour les bassins versants Walbridge pour la période de validation (2004-2006)	20
Tableau 5	Coefficients d'exportation de P total pour différentes utilisations du sol dérivés de la modélisation hydrologique des flux de P à l'échelle du bassin versant de la Rivière Au Brochet dans le cadre de la présente étude, comparés aux coefficients dérivés d'une étude précédente sur le même bassin et à ceux estimés pour la portion américaine du bassin versant de la rivière Missisquoi	20

1.0 Introduction

Les activités scientifiques réalisées dans le cadre du programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries s'inscrivent dans la continuité de quinze années de recherche-action menées dans la région-laboratoire du bassin versant de la baie Missisquoi par une large coalition d'intervenants communautaires et scientifiques. Dans une perspective d'appui aux actions concertées et ciblées sur la qualité de l'eau, ces investissements ont permis i) de quantifier et décrire les processus de transferts de sédiments et de nutriments dans les systèmes de production agricole, les sols et les cours d'eau de la région; ii) la mise au point d'outils tactiques de diagnostic et de gestion de l'eau à l'échelle de la ferme appuyés par la télédétection; iii) le calage et la validation d'outils stratégiques d'analyse agroenvironnementale appuyés par la modélisation hydrologique; iv) la mesure des retombées environnementales d'actions concertées d'entreprises agricoles à l'échelle du bassin versant et v) le développement d'indicateurs de développement des cyanobactéries dans la baie et de leur toxicité.

Les activités de monitoring et de modélisation hydrologique réalisées par l'équipe scientifique et rapportées dans le présent rapport ont porté principalement sur la description des transferts de nutriments vers l'écosystème aquatique, tels qu'influencés par l'occupation du territoire, les actions agroenvironnementales concertées du milieu agricole, de même que les cheminements hydrologiques de surface et souterrain. Cette étude s'est appuyée sur une perspective multi-échelle, combinant les observations et les simulations aux échelles de la parcelle, du micro-bassin instrumenté et du bassin versant de la rivière Au Brochet. Le volet d'étude sur la Baie Missisquoi a pour sa part ciblé l'évaluation du potentiel de toxicité des différentes populations de cyanobactéries.

2.0 Monitoring des transferts et de la spéciation des nutriments dans le bassin versant de la Rivière aux Brochets

L'hydrologie, les flux et la spéciation des sédiments et des nutriments de trois tributaires aval de la rivière aux Brochets ont été décrits au moyen d'un monitoring hydrométrique incluant la mesure du débit, l'enregistrement du signal géochimique (sondes multi-paramètres) de même que le dosage des sédiments et nutriments. Les dispositifs imbriqués au plan spatial ont permis i) de documenter les coefficients d'exportation du phosphore (P) en fonction de l'occupation du territoire (section 2.1); ii) d'évaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions concertées en aménagement riverain (section 2.2); iii) de distinguer les cheminements hydrologiques de surface et souterrain du P (section 2.3) et N (section 2.4) iv) et de valider la modélisation de ces transferts à l'échelle du bassin versant (section 3.0). Ces différents volets d'étude ont mis à profit les dispositifs de monitoring du milieu aquatique implantés en 2007 à l'exutoire du ruisseau Ewing (32 km²) et en 1997 au Ruisseau aux Castors (11 km²) (figure 1), complétés par les données historiques relatives aux systèmes culturaux et une description hydro-pédologique détaillée des paysages des sites à l'étude. Les protocoles de suivi hydrométrique et de qualité de l'eau maintenus en service sans interruption jusqu'en 2011 ont été décrits par Michaud *et al.*, (2007), incluant le tarage des stations hydrométriques, le suivi en continu des signaux de conductivité électrique et de turbidité au moyen de sondes multi-paramètres (YSI 6600) de même que l'échantillonnage des crues et leur dosage en matières en suspension (MES) et nutriments. Les flux de MES et la spéciation des nutriments ont été estimés pour chaque bassin expérimental sur la base de relations statistiques individuelles établies entre les concentrations et les débits pour une strate de débit définie (base, crue) et une saison donnée (dormance, croissance). La séparation des hydrogrammes des bassins en ses composantes de surface et souterraine a pour sa part été supportée par l'analyse du signal de la conductivité électrique de l'eau en relation avec le débit (section 2.3).

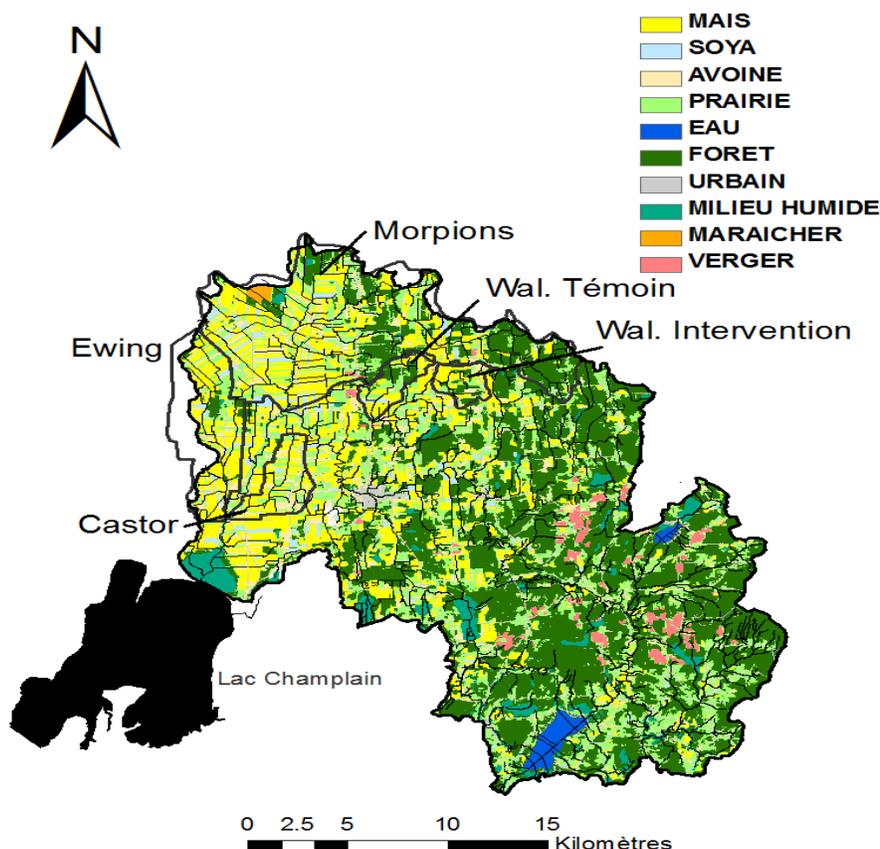


Figure 1. Localisation et utilisation du sol des bassins versants expérimentaux de la rivière aux Brochets.

Références

Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2007. Canadian Journal of Soil Science 87(3) 329-344.

2.1 Gradients spatiaux des flux de P liés à l'occupation du territoire

Les études antérieures réalisées dans le bassin versant de la rivière aux Brochets et ailleurs au Québec ont permis le développement et la validation d'un outil d'indexation des coefficients d'exportation diffuse de P en milieu agricole (ODEP, (Michaud *et al.*, 2009). Dans la perspective de générer des coefficients d'exportation propres à d'autres occupations du territoire, les transferts de P de cinq sous-bassins versants du ruisseau aux Morpions, de même que ceux des bassins du Ruisseau aux Castors et Ewing ont été déterminés et mis en relation avec l'occupation des sols (figure 1). Les flux de sédiments et de nutriments des sept bassins à l'étude ont d'abord été séparés en composantes d'écoulement de base et de crue sur la base de la variation de leur concentration en fonction du débit des ruisseaux.. Conceptuellement, les flux de P estimés dans la strate d'écoulement de base ont été associés aux sources ponctuelles (pente C/Q négative), alors que les flux de la strate de débit de crue (pente C/Q positive) ont été associés aux sources diffuses d'apports de P. Cette procédure s'inspire des travaux de Dorioz *et al.* (1989) qui caractérise les sources de P exportés vers le cours d'eau sur la base de la progression des concentrations en fonction du débit du cours d'eau. En écoulement de base, l'augmentation du débit tend à diluer les apports ponctuels. À l'inverse, la concentration en P tend à augmenter avec le débit lors des crues, reflétant une activité croissante du ruissellement de surface et des transferts diffus. Le flux limite représente, conceptuellement, la limite entre les deux strates de débits (figure 2).

Le tableau 1 rapporte les statistiques d'occupation du territoire et de population (Statistiques Canada, 2006) pour les sept sous-bassins à l'étude, de même que les taux d'exportation de P total et P biodisponible estimés pour les strates de débits en écoulement de base et en crue pour la période d'étude 2009-2011. Les taux d'exportation estimés pour la strate de débits de crue du P total varient de 67 kg P/km²-an dans le secteur amont du ruisseau aux Morpions, dominé par une occupation du sol forestière, à 253 kg P/km² au sous-bassin M4 où 97% du territoire est en culture. Les régressions linéaires mettant en relation les charges de P avec l'occupation agricole se sont avérées significatives, avec un coefficient d'exportation de l'ordre de 303 kg P/km² en superficie agricole (figure 3b). Les occupations forestières et urbaines n'ont pu générer des paramètres de régression significatifs. Des résultats similaires ont été rapportées pour les tributaires du lac Champlain au Vermont et au Québec par Hegman *et al.* (1999) and Try *et al.* (2007) qui ont attribué un coefficient d'exportation du P total de l'ordre de 4 kg P/km² à l'occupation forestière du territoire sur la base de revues de littérature.

Les contributions des écoulements de base aux charges totales de P estimées ont varié entre 6% (Ewing) et 14% (M4) et ont été reliées linéairement aux densités de populations des bassins l'étude, révélant un coefficient de régression significatif de l'ordre 1,72 kg P/hab-an. (figure 3a). Conceptuellement, ce coefficient d'exportation traduit l'ensemble des contributions ponctuelles liées aux secteurs urbanisés du territoire, aux résidences isolées et aux activités industrielles et agricoles, en présumant que les contributions diffuses ne sont pas actives dans cette strate de débit. Cette approche robuste appliquée à l'estimation globale des sources ponctuelles permet de contourner le difficile exercice de documenter et quantifier les multiples sources de contamination ponctuelles disséminées à travers le territoire. La nature empirique de cette approche limite cependant l'application des coefficients estimés à la zone d'étude et aux territoires ayant des sols et une topographie semblable, telle que la zone des Basses-Terres du St-Laurent. Ce protocole demeure toutefois transférable à d'autres régions.

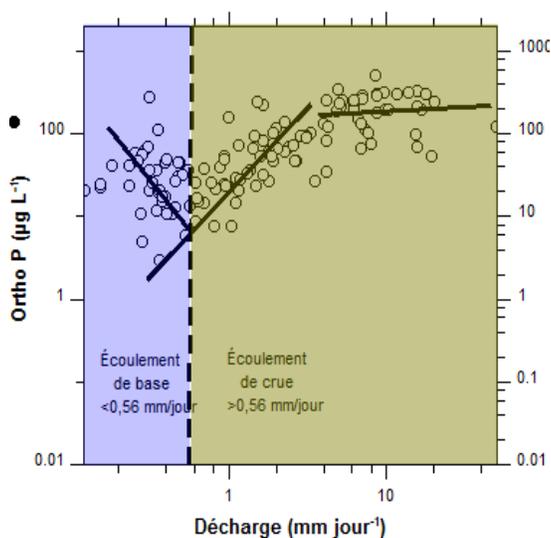


Figure 2. Segmentation entre les écoulements de base et de crue sur la base du concept du flux limite appliqué aux observations de concentrations en ortho-phosphates à l'exutoire du ruisseau Ewing.

Tableau 1. Flux spécifiques annuels de phosphore total et biodisponible aux exutoires des sous-bassins expérimentaux des ruisseaux aux Morpions, au Castor et Ewing.

Sous-bassin	Flux annuel de P (kg P/km ² -an)				Sup. (km ²)	Utilisation du sol (% total)			Densité Population (hab/km ²)
	Strate d'écoulement de base		Strate d'écoulement de crue			Agric.	Forêt	Urbain	
	P-Total	P-Bio	P-Total	P-Bio					
M1	9,0	6,0	67,4	34,7	16,0	25,0	74,5	0,5	6,0
M2	37,2	22,3	179,3	103,7	15,0	58,8	32,7	8,4	34,4
M3	23,5	13,0	170,3	94,0	6,7	64,3	34,9	0,8	13,9
M4	42,5	22,9	253,2	119,2	8,5	97,0	2,8	0,2	18,2
M5	34,7	16,7	227,1	112,1	110,9	70,1	27,7	2,2	18,7
Castor	22,5	11,8	189,3	100,0	11,2	98,6	1,3	0,1	21,8
Ewing	13,9	5,6	167,9	91,2	32,2	92,5	7,2	0,3	19,4

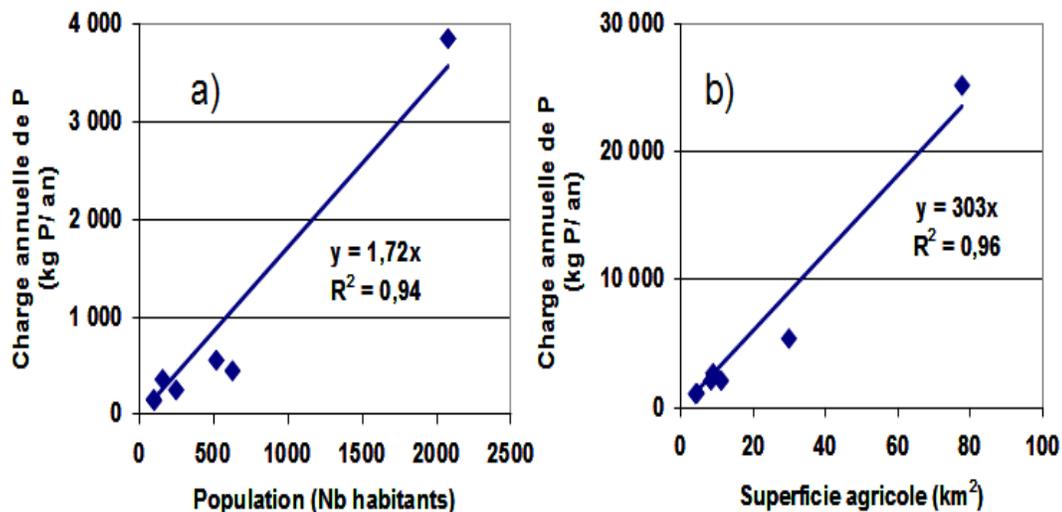


Figure 3. Charges annuelles de phosphore total pour la strate d'écoulement de base en fonction de la population (a) et pour la strate d'écoulement de crue (b) en fonction de la superficie agricole aux exutoires des sous-bassins des ruisseaux aux Morpions, au Castor et Ewing.

Références :

- Dorioz, J.-M., E. Pilleboue et A. Ferhi. 1989. *Dynamique du phosphore dans les bassins versants : Importance des phénomènes de rétention dans les sédiments*. Wat. Res, Vol. 23, No. 2, pp. 147-158.
- Hegman, W., D. Wang et C. Borer. 1999. Technical Report No. 31. Lake Champlain Basin Program. Grand Isle, VT, 69 p.
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beaudet et J. Lagacé. 2009. ODEP rapport final. http://www.irda.qc.ca/ftbFiles/Nouvelles/ODEP_Manuel_utilisateur2009.pdf
- Try, A., D. Wang et D. Capen. 2007. Lake Champlain Basin Program Technical Report No. 54. http://www.lcbp.org/techreportPDF/54_LULC-phosphorus_2007.pdf

2.2 Réponse des exportations de P aux actions agroenvironnementales concertées : Étude des gradients temporels.

Depuis plus d'une dizaine d'années, le bassin versant de rivière aux Brochets est l'hôte d'actions agroenvironnementales concertées du milieu agricole. Les activités de monitoring du milieu aquatique associées au projet FQRNT sur les cyanobactéries ont permis l'étude de la réponse de la qualité de l'eau aux aménagements riverains historiques déployés par la Coopérative de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets. Ce monitoring a été réalisé dans les bassins versants expérimentaux du Ruisseau aux Castors et du ruisseau Ewing. Depuis 1999, des bandes riveraines arbustives et des fossés-avaloirs ont été systématiquement installés dans le bas de versant du bassin du Ruisseau aux Castors (11 km²). L'aménagement du ruisseau Ewing (32 km²) a aussi été initié par la COOP en 2007, dans le cadre du projet pilote sur les biens et services environnementaux *Lisière Verte* (CSBVVB, 2009). Plus de 80 km de bandes riveraines de 10 m de largeur ensemencées en panic érigé ou en prairie ont été aménagées sur les rives des cours d'eau du bassin, alors que plus de 650 embouchures de fossés étaient comblées et aménagées au moyen de fossés-avaloirs. Le tableau 2 rapporte les taux d'exportations de sédiments et de nutriments estimés aux exutoires des bassins Aux Castors et Ewing pour la plus récente campagne de monitoring (2009-2011). Les coefficients d'exportation annuelle en P total étaient évalués à 248 et 229 kg/km², respectivement, avec une biodisponibilité de l'ordre de 50%. Ces estimations de flux relativement plus élevées que les taux d'exportation estimés antérieurement témoignent de conditions hydrologiques particulièrement favorables à l'émission de ruissellement, de même que de l'évolution des systèmes culturaux dans la région d'étude. En effet, entre 1997 et 2010, les superficies en fourrages pérennes et en céréales à paille ont diminué de 25% dans le comté de Brome-Missisquoi, alors que la culture du soya a connu une augmentation de 289%. Considérant les coefficients d'exportation de P modélisés de ces cultures pour le bassin de la rivière aux Brochets (Michaud *et al.*, 2008), ce gradient temporel s'est traduit en une augmentation théorique de 11 % des exportations annuelles de P.

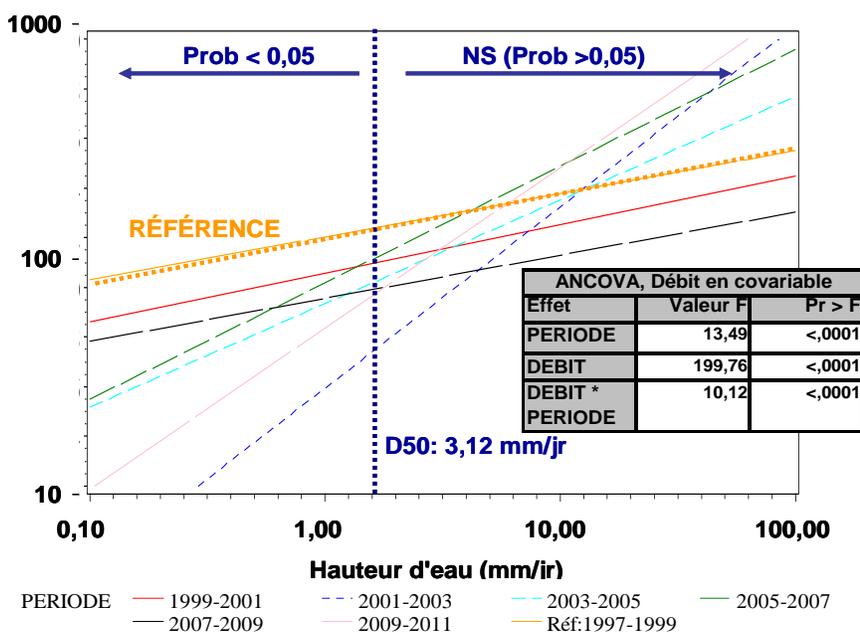


Figure 4. Modèle d'analyse de covariance (ANCOVA) utilisant le débit instantané en covariable pour le paramètre de concentration en P biodisponible observé à l'exutoire du Ruisseau Aux Castors pour la période de référence 1997-1999 et les six périodes biennales successives.

Les réponses de la qualité de l'eau aux aménagements historiques des bassins au Castor et Ewing ont été estimées au moyen d'analyses de covariance des paramètres de qualité d'eau utilisant le débit des ruisseaux en covariable (figure 4). Le tableau 3 présente un sommaire des résultats pour les paramètres de MES et de P du bassin au Castor. Jusqu'en 2003, une réduction significative a été détectée pour les paramètres de MES, P-total et P-biodisponible par rapport à la période de référence 1997-1999. Ces observations ont été attribuées aux atténuations de débits de crue et au bris de connectivité hydrologique entre les champs et le cours d'eau, de même qu'à la mise à niveau des plans de fertilisation des cultures (Michaud, 2004). Pour la période 2005-2007, la réduction de la concentration en P total n'a plus été significative. L'accroissement des superficies en cultures annuelles et le stockage de P dans les bandes riveraines et les structures de contrôle du ruissellement sont les deux facteurs les plus plausibles pouvant expliquer ce phénomène. Cependant, pour la période 2009-2011, la

concentration moyenne pondérée en P biodisponible a démontré de nouveau une réduction significative contrairement aux concentrations en MES et P total. L'évolution des systèmes culturaux en faveur de la culture du soya pourrait expliquer ces résultats. La culture du soya laisse le sol relativement vulnérable aux processus érosifs en raison d'une faible couverture de résidus. En contre-partie, cette culture reçoit beaucoup moins de fertilisants organiques ou minéraux. L'effet en apparence durable des réductions des exportations de P biodisponible serait donc expliqué par la combinaison des aménagements hydro-agricoles dans les parcelles agricoles, qui auraient réduit le processus d'érosion, avec diminution des MES, et d'une diminution des apports d'engrais par l'augmentation des superficies cultivées en soya.

Le monitoring de la réponse de la qualité de l'eau du bassin Ewing (tableau 3) n'a malheureusement pas pu profiter d'une période de référence précédant la mise en œuvre du vaste chantier d'aménagement hydro-agricole du bassin. La première année de monitoring (2007-2008) a coïncidé avec l'implantation d'environ 100 structures de contrôle de ruissellement et l'implantation de bandes riveraines. L'année suivante (2008-2009), ce sont plus de 550 structures, principalement des fossés-avaloirs, qui ont été implantées. L'analyse de covariance des observations de qualité d'eau, utilisant le débit du ruisseau en covariable et l'année 2007-2008 en période de référence, a témoigné cependant de gradients temporels à la baisse. L'effet de la période n'est pas apparu significatif pour les MES, alors que les concentrations en P-total ont été significativement réduites que pour le 25^e centile des débits de crue (1,1 mm/jour) pour les années 2008-2009 et 2009-2010. Les hauteurs exceptionnelles de précipitations du printemps 2011 expliquent probablement l'absence de réponse significative. Les concentrations en P biodisponible, à l'instar du Ruisseau aux Castors, ont présenté une diminution marquée à l'instar du P total et des MES en comparaison de l'année de référence 1997-1999. Une réduction significative de l'ordre de 35% a été détectée en 2009-2010 pour le débit de crue moyen de 2,6 mm/jour, alors qu'une réduction de l'ordre de 61% a été détectée pour le 25^e centile du débit de crue (1,1 mm/jour).

Les résultats de l'analyse de covariance (ANCOVA) des concentrations de sédiments et de P en fonction des débits de crue pour les deux bassins expérimentaux ont témoigné des limitations fonctionnelles des structures de contrôle du ruissellement. Les pentes C/Q significativement distinctes des modèles ANCOVA ont indiqué que l'efficacité des structures variait en fonction des conditions hydrologiques. Durant les épisodes de ruissellement les plus intenses, la capacité des structures a été dépassée (ex : l'ouragan Katrina en 2005) et la rétention au fossé n'a plus eu d'effet significatif sur le taux de ruissellement, d'érosion et de transport de sédiments. Les résultats de l'ANCOVA du P biodisponible ont situé le seuil critique d'efficacité à environ 3 mm/jour pour les deux bassins expérimentaux Aux Castors (figure 4) et Ewing. Dans une perspective opérationnelle, ce volet du projet a démontré une efficacité significative mais limitée des aménagements hydro-agricoles sur la réduction des exportations de P. Considérant la forte tendance à l'augmentation des cultures annuelles dans la région à l'étude, ces observations militent pour l'adhésion aux pratiques culturelles de conservation en complément à des aménagements anti-érosifs aux champs afin d'atteindre des résultats tangibles du point de vue des exportations de P. Le contrôle à long terme de l'enrichissement des sols, l'incorporation des engrais ferme et la préservation de la qualité physique des sols demeurent néanmoins les premières lignes de défense agroenvironnementale.

Tableau 2. Charges annuelles moyennes de matières en suspension, phosphore total, biodisponible, dissous, et réactif soluble, ammoniac, nitrates et calcium aux exutoires des bassins expérimentaux au Castor et Ewing pour la période de référence 2009-2011.

Paramètre	Ruisseau au Castor			Ruisseau Ewing		
	Charge (kg ha ⁻¹)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV ¹	Charge (kg ha ⁻¹)	Conc. (ug L ⁻¹)	CV ¹
MES	1 056	205 667	0,18	1 078	229 011	0,13
P Total	2,48	483	0,08	2,29	486	0,09
P Biod.	1,15	224	0,07	1,04	220	0,10
P dissous	0,78	151	0,06	0,56	118	0,10
P réactif dis.	0,67	130	0,06	0,50	107	0,11
Ammoniac	1,71	333	0,25	0,68	144	0,16
Nitrates	31	6 057	0,12	28	5 920	0,09
Calcium	315	61 250	0,02	255	54 098	0,02
Hauteur d'eau	514 mm			471 mm		

⁽¹⁾ Coefficients de variation estimés par validation croisée.

Tableau 3. Concentrations moyennes bi-annuelles en matières en suspension, phosphore total et phosphore biodisponible ajustées au modèle d'analyse de covariance utilisant le débit en covariable et écart par rapport à la période de référence 1997-1999 à l'exutoire du bassin versant expérimental du Ruisseau aux Castors.

Période	MES		P total		P biod.	
	Conc. ¹ (mg/l)	Écart ² (%)	Conc. ¹ (ug/l)	Écart ² (%)	Conc. ¹ (ug/l)	Écart ² (%)
1997-1999	134	Référence	299	Référence	195	Référence
1999-2001	93	- 0,31**	211	- 0,29***	143	-0,27*
2001-2003	55	- 0,59***	211	- 0,29**	90	-0,54***
2003-2005	61	- 0,54***	268	- 0,10ns	138	-0,29**
2005-2007	130	+ 0,03ns	368	+ 0,23ns	178	-0,09ns
2007-2009	92	- 0,31**	286	- 0,04ns	ND	ND
2009-2011	115	- 0,14ns	320	+ 0,07ns	143	-0,28**

1 Concentration moyenne pondérée pour la crue journalière moyenne de 3,1 mm.
 ***, **, *: Respectivement significatif au taux de 0,001, 0,01 et 0,05.
 2 Écart par rapport à la période de référence 1997-1999.

Références

- Michaud, A.R. 2004, Thèse PhD. Université Laval. <http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/22180/22180.html>
 Coop de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets. 2009. Projet Lisière verte. Programme PAASCA, Agriculture et agroalimentaire Canada.
 Michaud, A. R., S. Seydoux, I. Beaudin, et C. Gombault. 2008. *National Agri-Environmental Standards Initiative Technical Series Report No. 4-65*. 129 p.

Publications des travaux

- Michaud, A.R., I. Beaudin, M. Giroux, J. Desjardins, M. Duchemin, G. Gagné, C. Landry et al. 2010. *Using PEDIT to Target Source Areas of Agricultural Diffuse.P Export. An example in southern Quebec. 14th International Conference, IWA Diffuse Pollution Specialist Group: Diffuse Pollution and Eutrophication*, DIPCON. Beaufort, Qc., 12-17 septembre. (Oral)
 Michaud, A.R., M. Giroux, C., J. Deslandes, I. Beaudin et R. Lauzier. 2007. *Prévention des transferts diffus de phosphore en bassins-versants agricoles : perspectives québécoises et de l'État du Vermont*. Océanis, vol. 33 pp. 285-320. ISSN 0182-0745.
 Michaud, A.R., J. Deslandes, I. Beaudin, J. et al. 2009. *Hydrogeological and management controls on nonpoint source phosphorus transfers. CWRA 62nd Annual Conference – Water quantity and quality*. Québec, Qc. 12 juin. (Oral)
 Michaud, A.R., J. Desjardins, J. Deslandes et al. 2009. *Gradients spatio-temporels dans la mobilité des sédiments et des nutriments en bassins versants agricoles. 23e Congrès annuel de l'AQSSS – La rivière reflète de la gestion des terres*. Saint-Paulin (Mauricie), Qc. 19-22 mai. (Oral)
 Beaudin, I., A.R. Michaud, J. Deslandes, I. et al. 2008. *Identifying critical source areas (CSA) in agricultural areas: the role of hydrological modelling, aerial imagery, Lidar and Geomatics in general*. Workshop on approaches to identifying critical source areas. Lake Champlain Basin Program. Commission mixte internationale. Doubletree Hotel. Burlington, Vermont, USA. Mars.

2.3 Retracer les cheminements hydrologiques du P: Étude à l'échelle parcellaire et du bassin versant

L'objectif de cette partie du projet était d'utiliser de nouveaux outils et méthodes pour documenter l'effet de différentes propriétés de sols sur les cheminements d'exportation et la spéciation du P. Les caractéristiques des sites localisés dans le sous-bassin Ewing (figure 5) et des protocoles d'échantillonnage ont été décrits par Poirier (2012a,b). Les eaux provenant du ruissellement de surface et de drains artificiels de 8 champs en culture de maïs (5 loam sableux et 3 loams argileux) et de 2 champs en prairies (loams argileux) ont été échantillonnées entre octobre 2008 et juin 2009 et analysées pour leur composition en nutriments (P, N, Ca et K) et leur composition physico-chimique (pH, MES, et conductivité électrique). La composition en P total moyen des eaux de ruissellement provenant des champs de maïs a été expliquée par le teneur en P extractible par la méthode Mehlich-3 (M3P, mg kg⁻¹) et la teneur des sols en argile (Clay, mg kg⁻¹) dans l'horizon 0-20 cm (équation 1).

$$TP_{\text{moyen}} = 4.1 + 2.2 \times 10^{-2} M3P + 7.5 \times 10^{-3} \text{Clay} + (M3P - 77) (2.8 \times 10^{-4} \text{Clay} - 0.71) \quad R^2 = 0.86, \quad P = 0.03 \text{ équation 1}$$

Le phosphore particulaire (PP) associé aux matières en suspension, est apparu comme la fraction dominante du ruissellement de surface sous maïs provenant des particules les plus fines du sol (<100 µm) tel qu'analysé par diffraction laser (Poirier *et al.*, 2012c). Pour les deux champs en prairie sur un sol de texture loam argileux, la fraction en P soluble (DRP) a été dominante, présentant des concentrations égales et même supérieures aux champs en cultures de maïs, pourtant plus riches en P extractible par la méthode Mehlich-3 (M3P). La spéciation du P était similaire dans les eaux de drainage avec cependant des concentrations de 8 et 4 fois inférieures au ruissellement de surface, respectivement, pour les champs de maïs loam-sableux et loam-argileux. Alors que la composition en P total était proportionnelle à la teneur des sols en M3P, la biodisponibilité du PP a été surtout expliquée par la teneur du sol en fer (M3Fe). À l'opposé, la composition du PP non-biodisponible a été corrélée au niveau de saturation en P du sol. De manière générale, plus les sols sont devenus saturés en P, plus ils ont eu tendance à accumuler le PP sous forme non-biodisponible. La modélisation du PP en fonction de la taille des sédiments a démontré que la fraction la plus fine (<1 µm) contribuait davantage à la charge en P que la fraction la plus grosse (1-100 µm). Ces observations de spéciation du P contribuent à la compréhension de la dynamique du P avec les sédiments et pourront s'avérer utiles dans l'évaluation des effets des différentes méthodes de gestion des champs sur la biodisponibilité du PP.

Les cheminements hydrologiques souterrains et de surface du P à l'échelle du bassin versant ont été décrits suivant une méthode de séparation des hydrogrammes colligés à l'exutoire du bassin versant (Poirier *et al.*, 2012d). L'approche multi-échelle développée exploite les relations spécifiques entre les concentrations en P, Ca et la conductivité électrique de l'eau observées aux échelles du champ (10 sites, écoulement au drain et au fossé) et du bassin versant Ewing (section 2.2). L'utilisation du sol du bassin versant est utilisée comme facteur de projection des charges de nutriments provenant des parcelles, permettant de séparer les flux de P en fonction de quatre voies de transfert, soit la résurgence au cours d'eau, les écoulements matriciel et préférentiel au drain, de même le ruissellement de surface (figure 6).

Pour la période du 21 septembre 2008 au 21 juin 2009, soixante et onze échantillons d'eau ont été recueillis à l'exutoire du ruisseau Ewing, dont 19 comportaient un échantillonnage simultané du ruissellement de surface (fossé-avaloir) et des drains (collecteur) des 10 parcelles en amont décrites précédemment. Il est à noter que les sols étaient dégelés à ces occasions, permettant un drainage souterrain maximal.

La séparation des hydrographes a permis de déterminer avec précision la composition des divers types d'écoulements présents dans le bassin Ewing. La validation de la procédure a été réalisée en comparant les prédictions des charges instantanées des traceurs Ca, N-NO₃ et CE avec les observations de flux ponctuels mesurés à l'exutoire (figure 7). La prédiction des traceurs s'est avérée très bonne, présentant des coefficients de Nash-Sutcliffe variant entre 0.96 et 0.82, un pourcentage de biais entre -1,8% et -7,6% et un rapport de la racine des moindres carrés entre 0.21 et 0.42. Compte tenu que les charges prédites en P représentaient bien les exportations instantanées mesurées à l'exutoire du bassin, le bilan des exportations pouvait ainsi être établi. La figure 8 rapporte les résultats des flux modélisés de P pour chacun des cheminements hydrologiques. L'écoulement par les drains est associé au tiers des charges en P exportés lors de la période étudiée, alors que la majeure partie des transferts de P empruntent la voie du ruissellement de surface. L'importance des flux des flux de P associés au ruissellement de surface et à l'écoulement préférentiel des drains a mis en relief toute la pertinence de bien gérer les nutriments dans la couche superficielle des sols.

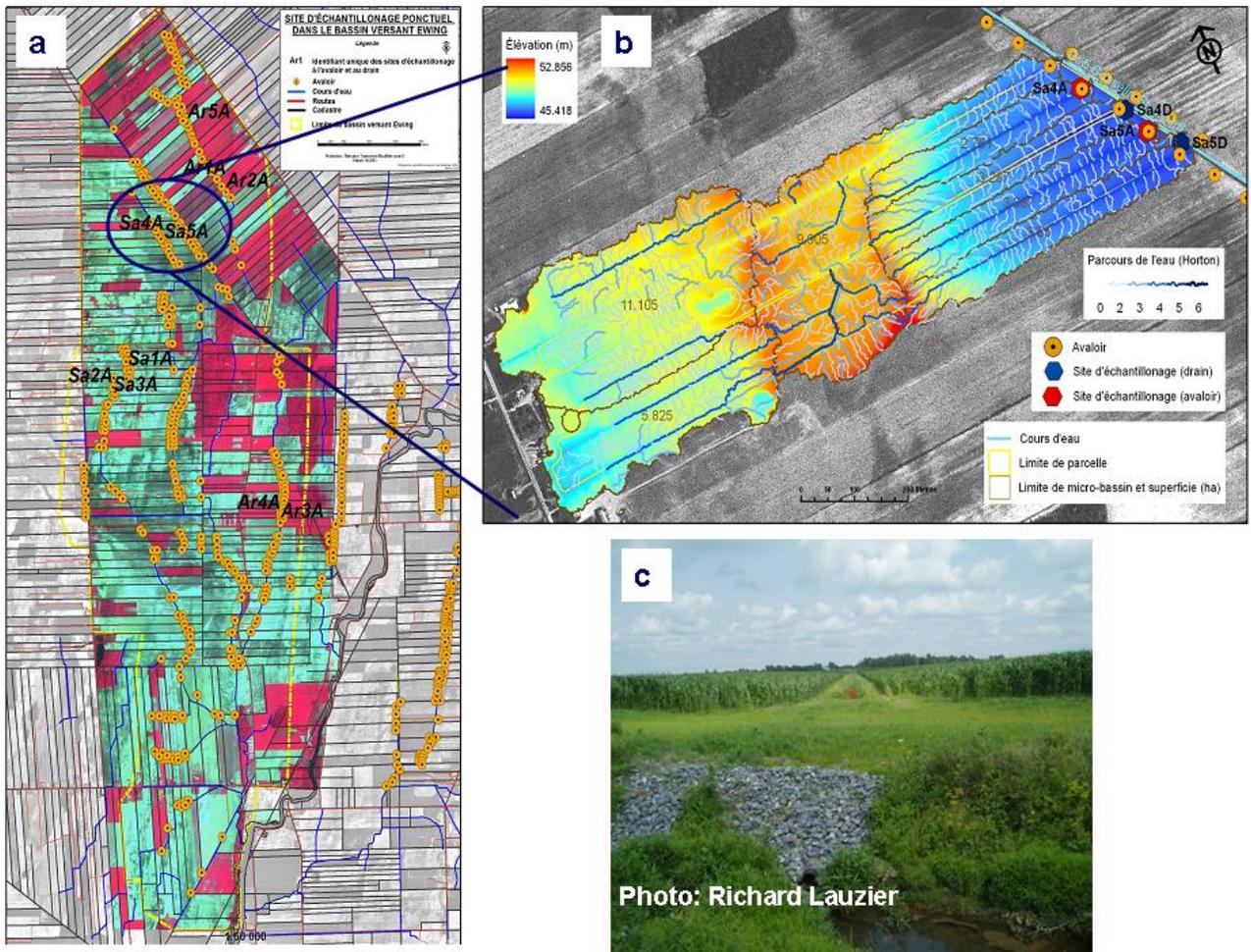


Figure 5. Localisation des 10 sites expérimentaux à l'étude dans le bassin versant du ruisseau Ewing (image multi-spectrale) (a), relief de précision (LiDAR), parcours de l'eau et localisation des sites d'échantillonnage à l'avaloir et au collecteur des drains aux sites no. 4 et 5 (b) et fossé avaloir en amont de la bande riveraine de 10 m aménagés en bordure du ruisseau Ewing (c).

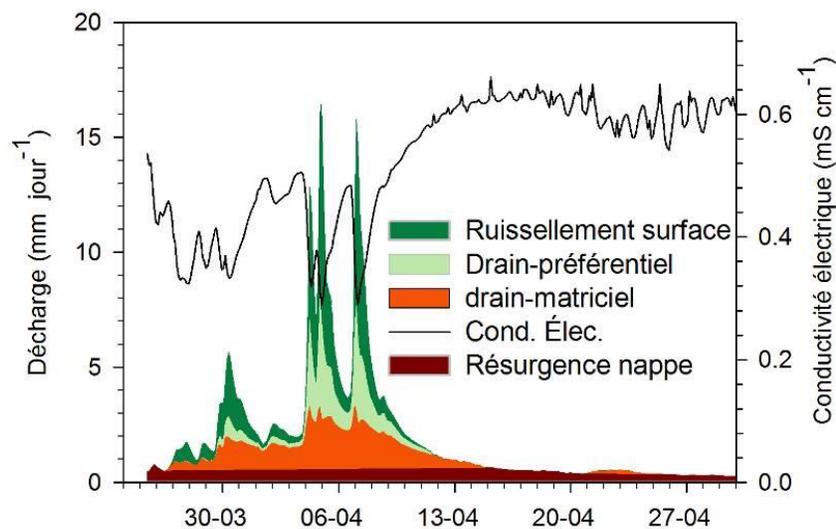


Figure 6. Séparation des hydrogrammes du ruisseau Ewing en composantes de ruissellement de surface, écoulement matriciel au drain, écoulement préférentiel au drain, et résurgence de la nappe (Adapté de Poirier, 2012a).

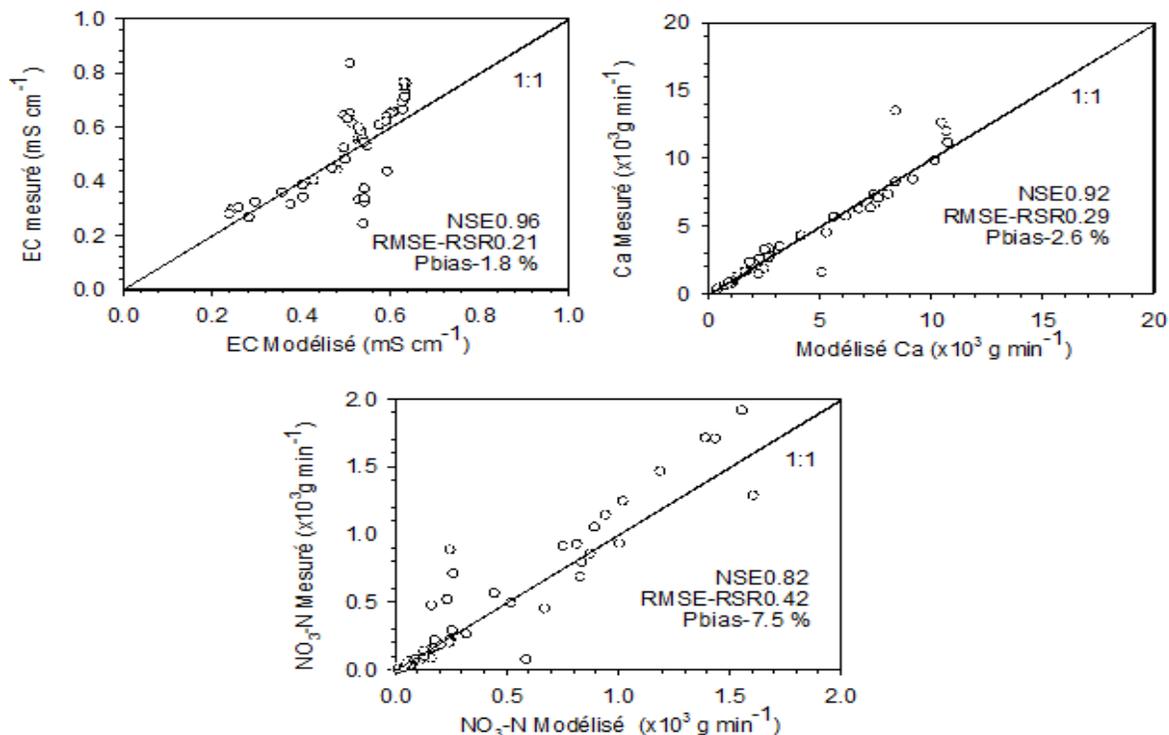


Figure 7. Résultats de modélisation des traceurs de cheminement d'eau dans le bassin Ewing suite à la séparation des hydrogrammes.

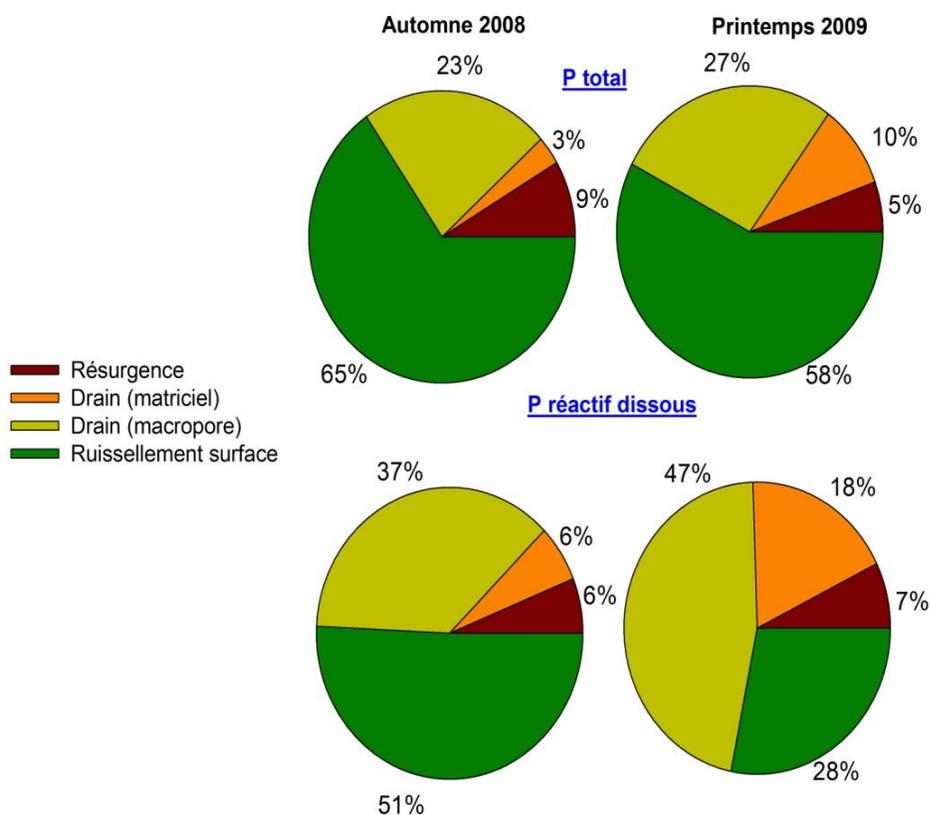


Figure 8. Contribution aux exportations en P total et P réactif dissous des écoulements de résurgence (base), de drains matriciel, de drain préférentiel (macropore) et de ruissellement de surface pour les périodes de l'automne 2008 et printemps 2009 dans le bassin.

Publications des travaux

- Simon-C. Poirier. 2012a. *Phosphorus composition in relation to the physico-chemical parameters of surface and tile- drain water in agricultural watershed of the Monteregie-East, QC, Canada*. thèse doctorat, Université McGill, en préparation
- S.-C. Poirier, A. Michaud et J.K. Whalen. 2012b. Surface and subsurface water quality from sandy and clayey soils in the Ewing watershed. Water Research, en préparation.
- S.-C. Poirier, A. Michaud et J.K. Whalen. 2012c. *Bioavailable Phosphorus in Fine-Sized Sediments Transported from Agricultural Fields*. Soil Science Society of America Journal, 76(1), pp.258-267.
- S.-C. Poirier, A. Michaud et J.K. Whalen. 2012d. *Four-component hydrograph separation of an agricultural subwatershed and nutrients export modeling*. Water Research, en préparation.
- S.-C. Poirier, A. Michaud, J. Desjardins, C. Lussier et J. K. Whalen. 2010. *Détermination du phosphore particulaire et biodisponible dans les eaux de ruissellement agricoles selon la taille des particules*. Association québécoise des spécialistes en science du sol, 23^e Congrès annuel, OKA, Qc, 1-3 juin. (Affiche)
- S.-C. Poirier, A. Michaud, J. K. Whalen et J. Desjardins. 2010. *P modeling at the Ewing watershed outlet using the water electrical conductivity as an indicator of the surface and subsurface flow contribution* - Lake Champlain 2010 Conference, Burlington (Vermont) 8 juin. (Affiche)
- S.-C. Poirier, A. Michaud, J. Desjardins, M. Grenier, J. K. Whalen. 2009. *Spéciation du P dans les eaux de drainage et de ruissellement dans un bassin versant agricole de la Montérégie*, Association québécoise des spécialistes en science du sol, 23^e Congrès annuel, St-Paulin, Qc, 19-22 mai. (Affiche)
- S.-C. Poirier, A. Michaud, J. Desjardins, M. Grenier et J. K. Whalen. 2009. *Phosphorus speciation in agricultural runoff and drainage water in the Pike River watershed*, Association canadienne des ressources hydriques, 62^e Congrès annuel, Québec, Qc, 9-12 juin. (Affiche)

2.4 Monitoring des sources et de la spéciation de l'azote

Cette partie du projet visait à i) départager les formes de N dans les eaux de drainage artificiel de parcelles agricoles localisées dans le bassin versant de la rivière aux Brochets; et ii) à déterminer les sources d'azote exportées vers les eaux de surface avoisinantes. Un total de 23 échantillons d'eau ont été collectés sur une base ponctuelle au cours de l'automne 2010 (7 échantillons) et du printemps 2011 (16 échantillons) provenant de deux champs instrumentés ayant des propriétés de texture de sol différentes, soit les sites Gagnon (loam argileux) et Marchand (loam sableux). Les échantillons ont été analysés pour l'azote total (TN), l'azote total dissous (TDN), l'azote organique dissous (DON), l'azote organique particulaire (PON) et l'azote inorganique dissous ($\text{NH}_4\text{-N}$ et $\text{NO}_3\text{-N}$). Les résultats ont démontré que 62% et 73%, respectivement, de l'azote total a été exporté sous forme de N-NO_3 dans les drains du sol sableux et argileux, avec une contribution mineure des formes PON et DON. La moyenne du TN exportée par les drains des sols sableux était 1,32 fois supérieure à celle des sols argileux au cours de l'automne 2010 et du printemps 2011. À l'opposé, les exportations du PON étaient 2,5 fois plus élevées dans les sols argileux que sableux, dues probablement à la contribution de l'écoulement préférentiel.

L'identification des sources de N exporté a été réalisée suivant la technique d'enrichissement en isotope stable ^{15}N ($\delta^{15}\text{N}$) (figure 9). Les résultats préliminaires ont montré que la composition isotopique de l'azote totale dans les eaux drainées atteignait +6,22 ‰ ($\pm 0,35$) dans les sols sableux et +3,70 ‰ ($\pm 0,44$) dans les sols argileux, sans différence significative entre les eaux de ruissellement de surface et de drains. L'analyse de sous-échantillons de PON a révélé que la moyenne en $\delta^{15}\text{N}$ pour les deux types de sol était près des valeurs d'enrichissement des lisiers (+5‰) et de celui du N organique du sol (+2 à +8 ‰) et non des fertilisants inorganiques (-3 à +2‰, moyenne 0 ‰).

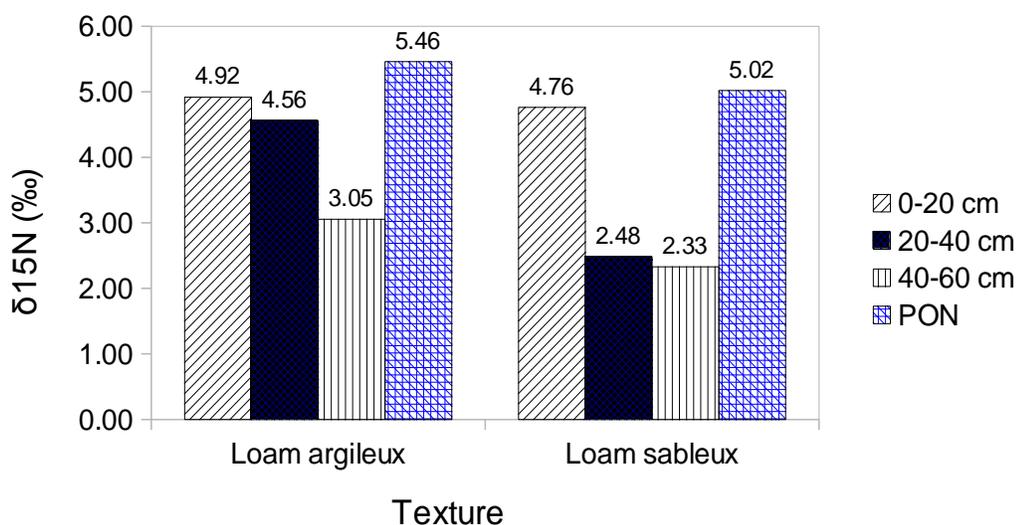


Figure 9. Composition en ^{15}N ses sols à texture loam argileux et loam sableux, de même que de l'azote organique particulaire (PON) des eaux de drainage souterrain.

Publications des travaux

Raouli, S. 2012. *Soluble and particulate nitrogen losses from tile drained agricultural fields in southern Quebec, Canada*. Ph.D. thesis, McGill University (submitted December 14, 2012).

Rasouli, S., Whalen, J.K., Michaud, A.R. and Madramootoo, C.A. 2012a. *Stable isotopes of nitrogen and oxygen to pinpoint the sources of nitrogen loss through tile drains in Pike River watershed, Southern Quebec*. Journal of Environmental Quality (submitted November 16, 2012).

Rasouli, S., Whalen, J.K., Michaud, A.R. and Madramootoo, C.A. 2012b. *Determining the source of erodible particulate organic nitrogen in agricultural tile drainage water with ^{15}N stable isotopes*. Journal of Environmental Quality (en

préparation)

Rasouli, S., Whalen, J. K., Madramootoo, C. A. 2012c. *Will reducing residual soil nitrogen control soluble and particulate nitrogen losses from agroecosystems in Quebec and Ontario? Best management practices, policies and perspective*. Canadian Journal of Soil Science (en préparation).

Rasouli, S., Whalen, J. K., Michaud A. R., Madramootoo, C. A. 2012d. *Forms and pathways of nitrogen loss from agricultural fields into the tile drains in southern Quebec, Canada*. Canadian Journal of Soil Science (en préparation).

Rasouli S., Whalen J. K., Michaud A. R. et Madramootoo C. A. 2012. *Source of erodible particulate organic nitrogen in agricultural tile drainage water determined with ^{15}N and ^{13}C stable isotopes*. Joint meeting of the Association québécoise de spécialistes en sciences du sol (AQSSS) and Canadian Society of Soil Science (CSSS), Lac Beauport Quebec, Canada. 3-8 juin, 2012.

Rasouli S., Whalen J.K., Michaud A. R., Madramootoo C. A. 2012. *Stable isotopes of nitrogen and oxygen to pinpoint the source of soluble and particulate nitrogen losses from agricultural fields*. Brace Center day Symposium, McGill University, QC, Canada. 29 mars, 2012. (Orale)

Rasouli S., Whalen K. J., Michaud A. A., Madramootoo C. A. 2011. *^{15}N Stable Isotopes to Pinpoint the Source and Quantity of Particulate Nitrogen Exported From Agricultural Fields*. ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings, "Fundamental for Life: Soil, Crop, & Environmental Sciences," San Antonio, TX, USA. Oct. 16-19, 2011. (Affiche)

Rasouli S., Poirier S. C., Michaud A., Whalen J. K., Madramootoo C. A. 2011. *Quantifying nitrogen export from tile drained agricultural fields in the Pike River watershed during fall rainfall events*. 25e CONGRÈS ANNUEL DE L'AQSSS: Les sciences du sol au 21e siècle : Défis à relever pour une ressource à préserver. Québec, Canada. 25-27 mai, 2011. (Affiche)

Rasouli S., Whalen J. K., Michaud A. R., Madramootoo C. A. 2011. *Quantifying nitrogen export from artificially drained agricultural Fields in the Pike River Watershed during Fall Rainfall Events*. Brace Center day Symposium, McGill University, QC, Canada. 24 mars, 2011. (orale)

3.0 Modélisation hydrologique

Dans ce volet du projet, une nouvelle version du modèle SWAT-Qc adaptée aux conditions agro-climatiques du Québec (Michaud *et al.*, 2008) et le modèle DRAINMOD (Skaggs, 1978) ont permis de modéliser les processus d'érosion et de perte de nutriments dans le bassin de la rivière aux Brochets. À partir des résultats de modélisation (figure 9), les coefficients d'exportation de P ont été dérivés pour les différents types d'utilisation du sol, systèmes culturaux et paysages, caractéristiques de la région à l'étude (Tableau 5). Après calibration et validation, SWAT-Qc a démontré son aptitude à reproduire de façon satisfaisante le bilan hydrologique annuel, la séparation entre le ruissellement de surface et les écoulements souterrains (dans les drains) des eaux écoulées, le débit mensuel de la rivière ainsi que les exportations de sédiments, P et N totaux. La plupart des coefficients de performance du modèle ont atteint ainsi les critères d'acceptabilité pour la période de calibration (2001-2003) et la période de validation (2004-2006). En général, les coefficients de Pearson entre les valeurs prédites et modélisées (R^2) ont varié entre 0,59 et 0,87 et les coefficients de Nash-Sutcliffe (NS) entre 0,43 et 0,85 (Tableau 4). Les coefficients d'exportation annuel moyen en P total simulés pour le maïs, soya, et le foin ont été estimés à 1,74, 1,10 et 0,44 kg P ha⁻¹ respectivement lors de la période de calibration. Il est à noter que le code de SWAT-Qc fut aussi utilisé par des collègues du Vermont pour supporter la modélisation des exportations de P des bassins des rivières Missisquoi et Roche, les deux autres bassins transfrontaliers de la baie Missisquoi (Winchell et Meals, 2011). Les résultats de la modélisation avec DRAINMOD ont pour leur part démontré que l'exportation annuelle de l'eau par les drains variait entre 7 et 58 % des précipitations, dépendamment de l'espacement entre les drains (5-70 m). Les pertes de phosphore par drainage souterrain correspondantes ont été estimées entre 0,21 et 0,51 kg ha⁻¹.

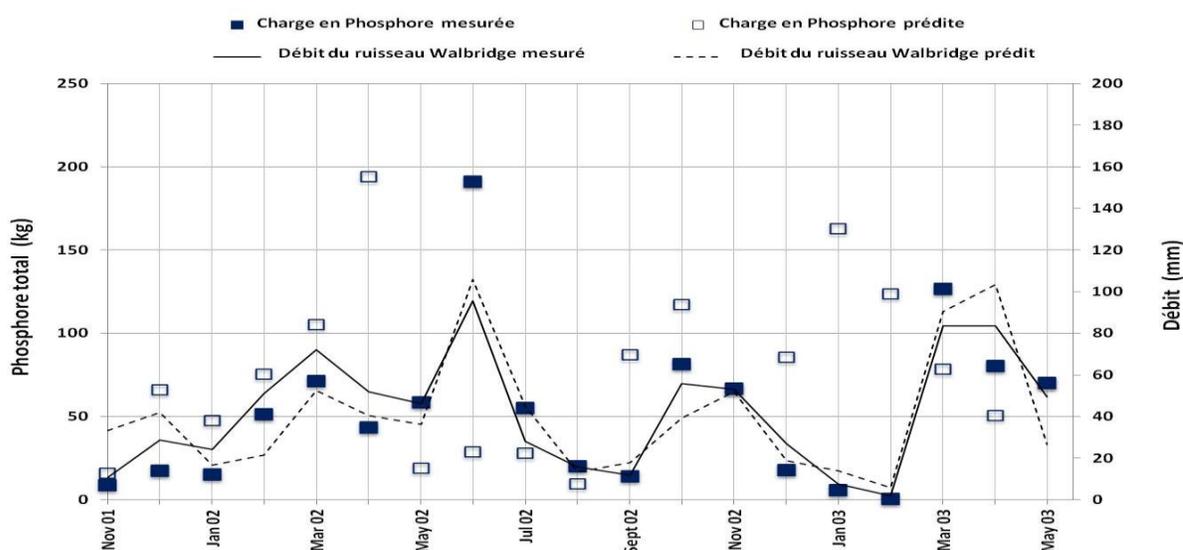


Figure 10. Débit et flux prédit de P total résultant de la modélisation par SWAT-Qc à l'exutoire du ruisseau Wallbridge (Montérégie Est) en fonction des valeurs mensuelles observées au cours de la période de référence 2005-2007.

Tableau 4. Indicateurs d’ajustement du modèle SWAT-Qc, incluant le coefficient de régression (R²), l’indice Nash-Sutcliffe (NS) et la déviation de la charge prédite par rapport à la charge totale observée pour les bassins versants Walbridge pour la période de validation (2004-2006).

Échelle Mensuelle	Walbridge amont (#3)			Walbridge aval (#4)		
	Coefficient Performance	R ²	NS	% Dev	R ²	NS
Débits	0.87	0.85	-6	0.75	0.71	-3
Sédiments	0.70	0.64	-2	0.59	0.44	-18
Phosphore	0.75	0.71	-16	0.67	0.61	1
Azote	0.78	0.69	-6	0.74	0.68	-10

Tableau 5. Coefficients d’exportation de P total pour différentes utilisations du sol dérivés de la modélisation hydrologique des flux de P à l’échelle du bassin versant de la Rivière Au Brochet dans le cadre de la présente étude, comparés aux coefficients dérivés d’une étude précédente sur le même bassin et à ceux estimés pour la portion américaine du bassin versant de la rivière Missisquoi.

Occupation du sol	Coefficient d’exportation P tot kg/ha/an			
	Cette étude		Étude précédente Deslandes et al., (2000-2003)	Bassin Missisquoi (VT) Stone Env. (2011) (1980-2009)
	2001-2003	1980-2000		
Mais	1.74	2.5	2.48	2.10 (1.99, maïs-foin)
Soya	1.10	1.32	1.12	3.78 (soya-maïs)
Céréales	1.26	1.70	0.75	-
Prairie	0.58	0.82	0.39	0.88
Jachère	0.44	0.48	-	0.18
Pommes	0.4	0.4	0.09	-
Forêt	0.2	0.2	0.02	0.14
Urbain	0.39	0.4	1.95	1.17-0.61
Milieu Humide	0.3	0.29	-	0.72
Exploitations agr	-	-	-	3.05-3.12
Bassin entier	0.69	0.91	0.74	0.43

Publications des travaux

Colline Gombault. 2012. Modelling water quality of the Pike River watershed under four climate change scenarios. Mémoire de maîtrise, Université McGill.

Gombault, C., C.A. Madramootoo, A. R. Michaud, M-F. Sotille, and I. Beaudin. 2012. Modelling the impact of climate change scenarios on the hydrology of an intensively cultivated watershed in southern Quebec. Submitted to the Journal of the American Water Resources Association.

Gombault, C., C.A. Madramootoo, A. R. Michaud, M-F. Sotille, and I. Beaudin. 2012. Impacts of climate change on nutrient losses from the Pike River watershed of southern Quebec. 2012. Submitted to Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Madramootoo, C.A., J. Morrison and M. Chikhaoui. 2012. Modeling the impact of tile drain spacing on phosphorus losses from two agricultural fields in southern Québec, Canada. (submitted to Canadian Water Quality Journal).

Madramootoo, C.A., J. Morrison and M. Chikhaoui. 2012. Evaluation of DRAINMOD and SWAT for modeling agricultural land drainage under spring snowmelt conditions (in preparation - to be submitted to Canadian Journal of Civil Engineering).

Gombault, C., M. Chikhaoui, C. Madramootoo, A. Michaud, I. Beaudin, M.F Sottile et S. Blais. 2010. Symposium Ouranos, 17-18 Novembre, Québec, QC. (Affiche)

Chikhaoui, M., Gombault, C., Madramootoo, C.A., Michaud, A. et Beaudin, I. 2010. *Assessment of climate change impact on the subsurface drainage flow in the Pike river watershed using the SWAT model*. CIGR 2010, ASABE'S 9th International Drainage Symposium, Québec, Qc. (Oral)

Gombault, M.F Sottile, I. Beaudin, M. Chikhaoui, A. R. Michaud, C. A Madramootoo. *Potential Impact of Climate Change on the Water Quality of Pike River Watershed*. 2010. LCBP Conference, Lake Champlain: Our Lake, our Future Burlington, Vermont, 7-8 juin 2010 et rencontre annuelle de NABEC 2010, Vermont, 21 juil. (Affiche)

Gombault, C., Beaudin, I, Madramootoo, C. et al. 2008. *Réponse du bassin versant de la rivière aux Brochets en termes d'érosion et de perte de nutriments modélisés à l'aide de SWAT : le calibrage*. CAWQ, 24th Eastern Canadian Symposium on Water Quality Research et 8e Symposium du Centre Brace, Montréal, Québec. (Affiche)

C. Gombault, C. Madramootoo, M. Chikhaoui. et al. 2009. *Modélisation de l'impact des changements climatiques sur la qualité de l'eau dans le bassin de la rivière aux Brochets, à l'aide de SWAT*. 23ième congrès annuel de l'AQSSS, mai. et 62ième Congrès Annuel de l'Association Canadienne des Ressources Hydriques (ACRH), Saint-Paulin, Qc. juin (Affiche)

4.0 Monitoring et modélisation des cyanobactéries dans la baie Missisquoi

Ce volet du projet visait à: i) développer un nouvel outil pour permettre le suivi de cyanobactéries toxigènes dans la baie Missisquoi; et ii) établir une relation empirique entre les efflorescences de cyanobactéries et les variables environnementales notamment la concentration en P et N de l'eau. A cette fin, plusieurs études ont été réalisées en laboratoire et sur les sites expérimentaux entre 2009 et 2011. Les expériences de laboratoires ont utilisé une approche innovante pour étudier à la fois, l'influence des nutriments (P et N) et les facteurs climatiques (température et intensité lumineuse) sur la croissance de cyanobactéries à risque de toxicité retrouvées dans la baie Missisquoi. Une sonde multi-paramètre a par ailleurs été acquise, calibrée et utilisée sur les sites expérimentaux dans la mesure de la biomasse de cyanobactéries (compte de la chlorophylle-a et cyanobactéries) en plus des paramètres physico-chimiques de l'eau.

4.1 Caractérisation des cyanobactéries

Les résultats en laboratoires ont démontré que la croissance de *Microcystis* et *Anabaena* était plus importante dans une eau riche en nutriments (N et P). La croissance de *Microcystis* et *Anabaena* a davantage été limitée par la concentration en P que celle en N. La limitation de N sur l'espèce *Anabaena* a toutefois été moindre que sur l'espèce *Microcystis*. probablement en raison de sa capacité à fixer le N. Une augmentation de la température (de 20 à 25°C) et de l'intensité lumineuse (30 à 60 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) ont aussi démontré une croissance significative ($P < 0.05$) de la biomasse de *Microcystis* et *Anabaena*.

Les échantillons d'eau provenant de la baie Missisquoi en 2009 (21 échantillons), 2010 (100 échantillons) et 2011 (50 échantillons) ont été analysés par une méthode conventionnelle d'estimation de la biomasse de cyanobactéries (comptage au microscope et teneur en chlorophylle-a) et comparé à une nouvelle méthodologie de réaction en chaîne par polymérase (PCR). Trois PCR en temps réel, quantitatives et indépendantes (qPCR), ont été développées et utilisées pour cibler trois gènes vitaux à la biosynthèse de la microcystine (toxine de cyanobactéries), soit les gènes microcystine synthétase (*mcy*) *A*, *E* et *G*. Les résultats en laboratoires sur des échantillons standardisés ont démontré que ces trois réactions qPCR étaient hautement spécifiques et sensibles avec une efficacité de réaction respective de 91,0%, 95,8% et 92,7%. Dans tous les sites expérimentaux, la concentration de cellules *Microcystis* déterminée par décompte au microscope était un ordre de grandeur plus grand que la concentration en cellules toxigènes déterminée par les méthodes qPCR (figure 10). Malgré tout, les coefficients de Pearson entre la concentration en *Microcystis* et celle en cellules toxigènes déterminée par les trois méthodes a présenté une très haute corrélation avec des coefficients de détermination (R^2) respectif de 0.999, 0.985 et 0.994 pour les méthodes *mcyA*, *mcyE* et *mcyG*. L'importante corrélation entre ces deux méthodes suggère que l'analyse qPCR sur les gènes *mcy* permet de mesurer quantitativement les cyanobactéries toxigènes avec fiabilité. Toutefois, il est à noter que l'analyse des échantillons de la baie Missisquoi, collectés en 2009, a révélé, par une méthode PCR traditionnelle, la présence de cyanobactéries toxigènes telles que les espèces *Anabaena* et *Planktothrix*.

Par conséquent, la seconde étape à cette étude impliquait l'optimisation des essais qPCR *mcy* pour l'analyse simultanée des

cyanobactéries à potentiellement toxigènes des espèces *Anabaena*, *Microcystis* et *Planktothrix*. Ces essais ont été réalisés en ciblant le gène *mcyE* d'échantillons d'eau provenant de sites d'échantillonnage de la baie Missisquoi récoltés au cours des étés 2010 et 2011. Les résultats préliminaires ont démontré la présence des trois espèces avec une dominance de *Microcystis* tout au long de la saison. De plus, il a été possible de détecter de manière fiable (avec un intervalle de confiance de 95% et une limite de 40 cycles) 2, 3 et 1 copies de gènes par μL^{-1} d'*Anabaena*, de *Microcystis* et de *Planktothrix*. Cette très faible limite de détection ainsi que d'autres méthodes de quantification par PCR suggèrent que cette technique pourrait être introduite dans un programme de suivi des algues bleu-vert afin de minimiser les risques à la santé publique provenant des efflorescences de cyanobactéries.

4.2 Modélisation des cyanobactéries à l'aide de réseaux de neurones artificiels (RNAs)

Cette partie du projet avait pour objectif de sélectionner, calibrer, et valider un modèle de croissance de cyanobactéries afin de prédire les fleurs d'eau de cyanobactéries de la Baie Missisquoi. Suite à une revue de littérature approfondie sur les modèles de croissance de cyanobactéries, l'approche des réseaux de neurones artificiels (RNAs) a été adoptée.

Le RNA développé pour la Baie Missisquoi comprend une couche de sortie constituée de deux nœuds représentant la quantité totale de cyanobactéries et celles potentiellement toxiques. Afin de simuler des prévisions en temps réel ainsi que pour utiliser le maximum de données disponibles, 80% des données du MDDEP, collectées pour trois stations d'échantillonnage dans la Baie Missisquoi entre 2000 et 2009, ont été utilisées pour la calibration du modèle. Les 20 autres pourcents ont été retenues pour la validation du modèle via la méthode de validation croisée.

Les résultats ont montré de fortes corrélations entre les concentrations de cyanobactéries modélisées et celles prédites pour les périodes de calibration et de validation. Alors que les concentrations totales de cyanobactéries mesurées et modélisées donnaient des coefficients de détermination (R^2) de 90% et 94% pour les périodes de calibration et validation respectivement, le modèle a aussi été en mesure de rendre compte de 92% et 89% de la variabilité entre les concentrations de cyanobactéries toxigènes mesurées et modélisées pour les périodes de calibration et validation respectivement. Une analyse chronologique des concentrations modélisées et observées des cyanobactéries a montré que les résultats du modèle reproduisaient fidèlement les données observées, bien que le nombre de cellules de cyanobactéries était toujours sous-estimé. Malgré cela, le nombre de cellules de cyanobactéries modélisées était toujours en dessous de la valeur seuil de 1.0×10^5 cellules/ml fixé pour les eaux récréatives par l'*Institut national de santé publique du Québec (INSPQ)*, à l'exception du mois d'Octobre 2006 dont la quantité totale de cyanobactéries et celles potentiellement toxiques dépassait la valeur seuil du INSPQ.

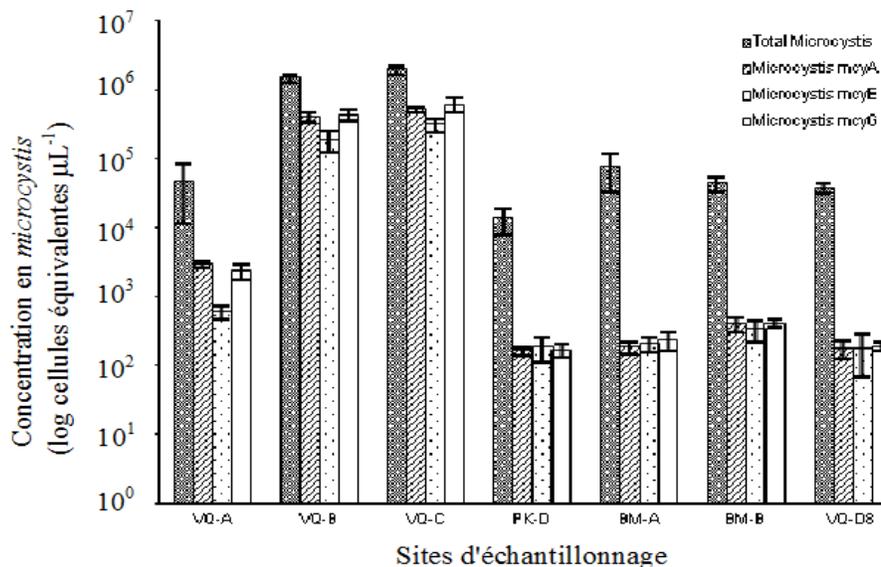


Figure 10. Concentrations en cellule d'espèce *Microcystis* déterminées par le comptage au microscope et la méthode qPCR en temps réel pour 7 sites d'échantillonnage localisés dans la baie Missisquoi, Qc. Le compte total obtenu par comptage au microscope est donné en cellule par microlitre.

Travaux publiés

Ngwa, F. C.A. Madramootoo and S. Jabaji. 2012. A Multiplex qPCR Approach for Differential Monitoring of Multiple Microcystin-producing Cyanobacteria Genera in Freshwater Bodies. Environmental Toxicology (submitted).

Ngwa, F. C.A. Madramootoo and S. Jabaji. 2012. Monitoring Toxicogenic Microcystis Strains in the Missisquoi Bay, Quebec, by PCR Targeting Multiple Toxic Gene Loci (Accepted: Environmental Toxicology DOI 10.1002/tox)

Chikhaoui, M. et C. Madramootoo. 2010. *Développement d'un outil de risque de prolifération des cyanobactéries: Application à la baie Missisquoi*, Québec, Atelier Ouranos, Montréal, Qc, 25 janv. (Oral)

Ngwa, F.F., Madramootoo, C.A. et Jabaji, S. 2010. *Quantification of Toxicogenic Microcystis sp. in the Missisquoi Bay by Quantitative Real-Time PCR*. 14th International Conference, IWA Diffuse Pollution Specialist Group: Diffuse Pollution and Eutrophication, Beaupré, Quebec. September 12-17th. (Oral)

Chikhaoui, M., Gombault, G., Ngwa, F., et al. (2009). *Estimation des apports de nutriments vers la Baie Missisquoi: rôle du phosphore, de l'azote et de la température sur la prolifération des cyanobactéries*, Atelier international de Toxicologie Aquatique, La MalBaie, Qc, 27 sept. (Oral)

Ngwa, F.F. et Madramootoo, C.A. 2009. *Preventing Cyanobacterial Blooms in Freshwater Bodies through Nutrient Load Reduction: Challenges and Constrains*. 62nd CWRA Annual Conference, Quebec City, 11 juin. (Oral)

5.0 Résumé des travaux publiés

S.-C. Poirier, A. Michaud et J.K. Whalen. 2012. Surface and subsurface water quality from sandy and clayey soils in the Ewing watershed. *Water Research*, en préparation.

Surface and tile-drained subsurface water from the St. Lawrence Lowlands fields were collected simultaneously and analyzed in order to relate the variability of P composition to simple physico-chemical parameters (electrical conductivity (EC), pH, total suspended solids (TSS) and soluble Ca concentration) for fall 2008 (n=10) and spring 2009 (n=9). Drainage water of three clayey soils ($\geq 30\%$ clay) and five sandy soils ($< 30\%$ clay) with a corn-soybean rotation were compared. The drainage water of two grasslands on clay soils were collected to assess the effect of permanent cover crop on P forms in tile drains. Specific relationship between TP and EC by season showed that EC is a good predictor of $\log_{10}TP$ for clay-corn and clay-grasslands in the tile-drainage water. For sandy-corn fields grouped together, the relationship was not significant but taken individually, these fields had a significant negative relationship for each seasons ($P < 0.05$). Minimal EC values in tile drains corresponded to maximum PP/TP ratios and with the maximum TP concentrations. At the lowest TP concentrations, drainage-water EC were strongly correlated with soil-calcareous-C-horizon EC (depth 90-110 cm). During these conditions, TP was dominated by DRP with the lowest concentrations of TSS. Surface runoff EC showed a modest trend between TP and EC and mean EC didn't varied significantly between fields with a mean value of 0.28 mS cm^{-1} . EC appeared as good indicator of the P composition of drainage water. These trends between extreme TP concentration and EC, make the latter physico-chemical parameter an interesting TP descriptor for tile-drainage characterization.

S.-C. Poirier, A. Michaud et J.K. Whalen. 2012. *Four-component hydrograph separation of an agricultural subwatershed and nutrients export modeling*. *Water Research*, en préparation.

Agricultural phosphorus (P) diffuse pollution is a major threat to water quality in north-eastern Canada. Water quality monitored from an agricultural stream subwatershed (32.20 km^2) located in the Lake Champlain Basin showed that water electrical conductivity (EC) was linearly correlated with calcium (Ca) and magnesium (Mg) concentration ($r > 0.95$, $P < 0.001$). Ca and Mg concentration were used as tracers of the water from the calcareous subsoil, characteristic of the subwatershed. The stream discharge was then separated based on a mass balance equation using the EC as a simple and cheap method to differentiate the surface from the subsurface/tile drain contribution during peak flow. Within the subsurface/tile drain contribution, the preferential flow was discriminated from the matrix flow based on a computed EC-discharge relationship from sampled upstream field locations. The 4-component model was then used to predict P instantaneous load according to the water quality of agricultural fields located upstream during the Fall 2008 and Spring 2009. 46-67% of the total P (TP) loads exported at the watershed outlet originated from surface water runoff that occurred during peak flow. Subsurface tile-drained water accounted for 27-29% TP loads and the groundwater resurgence for 4-9% TP. Streambank erosion was defined as a potential source ranging between 0-20% of the total exported TP and a significant source of PP and TSS that had a sorption capacity of dissolved reactive phosphorus (DRP) of approximately 30% of the field exported DRP. The separation of hydrograph peaks showed to be a reliable and simple method to differentiate sources of P in agricultural St. Lawrence Lowlands streams.

S.-C. Poirier, A. Michaud et J.K. Whalen. 2012. Bioavailable Phosphorus in Fine-Sized Sediments Transported from Agricultural Fields. *Soil Science Society of America Journal*, 76(1), pp.258-267

Sediments transported from agricultural fields by surface and subsurface waters contribute to the phosphorus (P) load in aquatic systems. This particulate P (PP) could be partitioned into two pools – one available for cyanobacteria and other aquatic organisms, namely bioavailable particulate P (BAPP, determined by 0.1 N NaOH extraction), and the remainder not bioavailable (nonBAPP). The objective of this study was to quantify the PP and BAPP concentration in surface runoff and tile drainage waters and sediments transported from eight agricultural fields with contrasting soil texture in the Missisquoi Bay region of Quebec, Canada. Particulate P in surface and drainage water varied spatially (among fields) and temporally. Particulate P concentrations were as high as $3181 \mu\text{g P L}^{-1}$ in surface runoff and $1346 \mu\text{g P L}^{-1}$ in tile drainage. About 30% of PP was BAPP, regardless of the drainage pathway. Particle size distribution of total suspended sediments (TSS) showed a bimodal distribution with the first peak between $0.05 \mu\text{m}$ and $1 \mu\text{m}$ and a second peak between 1 and $100 \mu\text{m}$. The PP, BAPP and nonBAPP concentrations were linearly related ($R^2 \geq 0.86$) to TSS in these size fractions, which allowed estimation of the particle-associated P concentration ($\text{g P kg}^{-1} \text{ TSS}$). About 68% PP in clay soils and 50% PP in sandy soils were associated with the 0.05 - $1 \mu\text{m}$ size particles. These particles accounted for more BAPP, on average 0.46 g P kg^{-1} , than the coarser 1 - $100 \mu\text{m}$ fraction (0.22 g P kg^{-1}) in clay and sandy soils. The PP concentration in TSS and sediment fractions was related to the Mehlich-3 extractable (M3) P concentration and the degree of soil P saturation (DPS), whereas the M3Fe concentration was a strong explanatory variable for the BAPP concentration in TSS and the 0.05 - $1 \mu\text{m}$ fraction. We conclude that sediments with particle size less than $1 \mu\text{m}$ contribute the most to BAPP and their loss from agricultural land

could contribute to the eutrophication observed downstream.

S.-C. Poirier, A. Michaud, J. Desjardins, C. Lussier et J. K. Whalen. 2010. Détermination du phosphore particulaire et biodisponible dans les eaux de ruissellement agricoles selon la taille des particules. Association québécoise des spécialistes en science du sol, 23^e Congrès annuel, OKA, Qc, 1-3 juin. (Affiche)

La charge en phosphore (P) provenant du bassin versant de la rivière aux Brochets contribue à l'eutrophisation de la Baie Missisquoi (lac Champlain) en lien avec des épisodes majeurs de prolifération de fleurs d'eau de cyanobactéries. La majeure partie de cette charge en P a été associée à la pollution diffuse agricole (Mimeau 2002) transportée sous forme particulaire (Michaud *et al.* 2006). Différentes mesures pour réduire le transfert du P du champ vers le cours d'eau essentiellement basées sur un processus de sédimentation (avaloirs, bassins de sédimentation, marais filtrants...) ont été proposées et implantées. Mais dans quelle mesure ces techniques peuvent-elles être efficaces? L'évaluation de la composition en taille de la matière en suspension et de leur biodisponibilité en P est donc nécessaire.

L'objectif de cette étude a été de développer une méthode pour quantifier la composition des eaux de ruissellement en phosphore particulaire (PP) selon la taille de la matière en suspension et de déterminer la contribution à la biodisponibilité du PP. Les échantillons analysés proviennent d'eaux de drains et de surface de sites contrastés par leur texture (loams sableux vs loam argileux), situés dans le bassin du ruisseau Ewing, un sous-bassin de la rivière aux Brochets. Dix sites (5 loams sableux and 5 loams argileux) ont été échantillonnés d'octobre 2008 à mai 2009 pour un total de 19 campagnes d'échantillonnage. Le phosphore particulaire biodisponible (BAPP) a été déterminé suivant une extraction avec 0,1 N NaOH. Pour chacun des sites, les résultats d'analyse de la distribution des particules en suspension (PSD) (n=5), par diffraction laser, démontre une grande similarité entre la composition des eaux de drains et de surface avec un facteur d'enrichissement en P comparable. Les matières en suspension présentent une distribution bimodale entre 0.05 µm et 70 µm avec un minimum à 1 µm. Une méthode statistique a permis de déterminer la composition la plus probable ($\alpha \leq 0.05$) en PP, BAPP et nonBAPP des deux classes de sédiment observées. L'enrichissement en PP de la fraction inférieure à 1µm a présenté une plus faible biodisponibilité que la classe supérieure (1-70 µm). Toutefois, la fraction plus fine (< 1µm) a constitué une masse plus importante des sédiments exportés. Les implications de ce travail dans la sélection d'une méthode appropriée pour la ségrégation du P provenant de champs agricole seront discutées.

S.-C. Poirier, A. Michaud, J. K. Whalen et J. Desjardins. 2010. P modeling at the Ewing watershed outlet using the water electrical conductivity as an indicator of the surface and subsurface flow contribution - Lake Champlain 2010 Conference, Burlington (Vermont) 8 juin. (Affiche)

The majority (87%) of P exported from Quebec to the Missisquoi Bay was estimated to originate from agricultural non-point source pollution (Mimeault 2002). Surface and subsurface (tile drain) runoffs are the major flow pathway that contribute to the P transfer to surface water body from agricultural fields. The water quality efforts to reduce P loads following the implementation of best management practices (BMPs) in a watershed needs to be validated at the outlet. The use of the electrical conductivity (EC) to predict source (surface vs subsurface) of P transfer was readily used by Michaud *et al.* (2009). Although, no validation of this procedure was realised in relation to the runoff water quality from agricultural plots.

Runoff water quality was measured from sandy loam soils (5 fields) and clay loam soils (5 fields) in the Ewing watershed, a subwatershed of the Pike River. The sites were sampled (19 discrete sampling) from October 2008 to May 2009. Drainage and runoff water samples were sampled simultaneously. At the same moment, the water quality of the Ewing Stream (P speciation, conductivity, pH, turbidity, water flow rate and height) was monitored at the watershed exit.

Hydrographs from the Ewing watershed were plotted in relation to the P composition (ortho, bioavailable, particulate and total P forms). Predicted P concentration at the Ewing outlet using fields' water quality and a segmentation procedure using water EC gave a satisfying model. This approach confirmed our ability to estimate the impact of BMPs on the surface and subsurface water quality over a large agricultural watershed.

S.-C. Poirier, A. Michaud, J. Desjardins, M. Grenier, J. K. Whalen. 2009. Spéciation du P dans les eaux de drainage et de ruissellement dans un bassin versant agricole de la Montérégie, Association québécoise des spécialistes en science du sol, 23^e Congrès annuel, St-Paulin, Qc, 19-22 mai. (Affiche)

La charge en phosphore (P) provenant du bassin versant de la rivière aux Brochets contribue à l'eutrophisation de la baie Missisquoi (lac Champlain) en lien avec des épisodes majeurs de prolifération de fleurs d'eau de cyanobactéries. La charge

en P y a été majoritairement associée à la pollution diffuse provenant des champs agricoles (Mimeault 2002). Le transport du P est principalement en lien avec les événements hydrologiques. Pour deux parcelles situées dans le bassin versant de la rivière aux Brochets suivies en continu entre 2000 et 2002, Enright et Madramootoo (2004) ont rapporté une contribution des eaux de drains variant entre 52% et 93% du volume d'eau total exporté annuellement et entre 31% et 63% de la charge exportée en P. Des concentrations aux drains entre 0.06 et 0.37 mg/l en P total ont été mesurées, excédant la norme québécoise de 0.030 mg/l des eaux de surface. Le drainage artificiel est alors apparu contribuer de manière importante à la charge en P des eaux de surface. Dans une étude des eaux de drains, Chikhaoui et al. (2008) ont démontré en utilisant la concentration en Ca, que l'écoulement préférentiel (via les macropores de sol) pouvait constituer jusqu'à 70% de l'écoulement totale dans une parcelle à texture loam argileux et seulement que 20% dans une parcelle à texture loam sableux.

L'objectif de cette étude a été de comparer la qualité des eaux de drains de sites fortement contrastés par leur texture (sableuse vs argileuse), situés dans le bassin du ruisseau Ewing, un sous-bassin de la rivière aux Brochets. Dix sites (5 sableux and 5 argileux) ont été échantillonnés d'octobre à décembre 2008 pour un total de 10 campagnes d'échantillonnage. Les échantillons ont été dosés pour les différentes formes de P (total, total dissous, ortho, particulaire et biodisponible). La conductivité électrique a aussi été mesurée comme indicateur d'écoulement préférentiel. Les résultats ont présenté une grande variabilité des concentrations en P total pour les eaux de drains (de 9 à 2393 $\mu\text{g/l}$). La concentration moyenne des eaux de drains des champs à dominance argileuse a été de 3,4 fois la concentration en P total des sols à texture sableuse. Une plus grande proportion de P particulaire a été mesurée aux drains en période de crue du cours d'eau, alors qu'en période d'écoulement de base le P total dissous a été la forme dominante. La diminution observée du P total en fonction de la conductivité pour chacun des sites à texture fine a démontré l'importance de la contribution de l'écoulement préférentiel pour ceux-ci. Les sols à dominance argileuse apparaissent donc constituer un plus grand risque au transfert de P vers les cours d'eau comparativement aux parcelles à textures plus grossières.

S.-C. Poirier, A. Michaud, J. Desjardins, M. Grenier et J. K. Whalen. 2009. *Phosphorus speciation in agricultural runoff and drainage water in the Pike River watershed*, Association canadienne des ressources hydriques, 62^e Congrès annuel, Québec, Qc, 9-12 juin. (Affiche)

The phosphorus (P) load coming from rivers and streams in southern Quebec is a contributing factor in the eutrophication of Lake Champlain, linked to numerous cyanobacteria blooms observed in this lake during the past decade.

In the waterways that drain into Lake Champlain, the highest P concentrations are observed during heavy rainfalls and snowmelt events, mostly during spring and winter periods. Transport of P from fields to watercourses occurs through surface runoff and through the drains by leaching or preferential flow. At the field scale, agricultural practices such as manure applications have an important influence on the quantity of P exported from terrestrial to aquatic system, while soil texture affects the pathway of P movement.

The objective of this study was to assess the effect of soil texture (sandy, clayey) under corn production to P export through Ewing Stream watershed, a contributor to the Pike River. Ten sites (5 sandy and 5 clayey soils) were sampled from October to December 2008. Drainage and runoff water were sampled simultaneously during 5 rainfalls events (11 discrete sampling points). At the same time, the water quality of the Ewing Stream (P speciation, conductivity, pH, turbidity, water flow rate and height) was monitored at the watershed exit.

Hydrographs from the Ewing watershed were plotted in relation to their P speciation (ortho, bioavailable, particulate and total P forms) and related to the P composition of field water samples. Results suggest that particulate P was the major form exported, although the concentration of particulate P varied among soil textures, with rainfall intensity and between sampling points.

Rasouli S., Poirier S. C., Michaud A., Whalen J. K., Madramootoo C. A. 2011. *Quantifying nitrogen export from tile drained agricultural fields in the Pike River watershed during fall rainfall events*. 25e CONGRÈS ANNUEL DE L'AQSSS: Les sciences du sol au 21e siècle : Défis à relever pour une ressource à préserver. Québec, Canada. 25-27 mai, 2011. (Affiche)

In southern Quebec, the Missisquoi Bay of Lake Champlain has become progressively eutrophic, as evidenced by frequent cyanobacteria blooms during summer months since 2001. Elevated nitrogen (N) concentration in the water is partially responsible for eutrophication in the Missisquoi Bay. Agricultural lands are the major source of N and other nutrients in the Pike River watershed, which drains into the Missisquoi Bay. Nutrient export occurs mainly through subsurface drainage during fall rainfall events. The objective of this study was to evaluate the N source: organic vs. mineral N fertilizer, and the N forms: nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$), dissolved organic N (DON) and particulate organic N (PON) in the subsurface drainage from agricultural fields (sandy and clayey soils) under annual crop production in the Pike River watershed, Quebec. Water

samples were collected from tile drains at seven dates, between October to December 2010, and analysed for the natural abundance of $\delta^{15}\text{N}$ and N forms. The $\delta^{15}\text{N}$ values revealed organic residue as the major source of N exported in tile drainage, and greater organic N losses were found in sandy than clayey soils. The dominant form of N lost was $\text{NO}_3\text{-N}$ (85% of total N), with smaller contributions from PON (10 % of total N) and DON (5 % of total N). In conclusion, manure N is susceptible to loss through subsurface drainage in fall, and the contribution of PON and DON to total N export is substantial after fall rainfall events.

Rasoul S., Whalen K. J., Michaud A. A., Madramootoo C. A. 2012. *Stable isotopes of nitrogen and oxygen to pinpoint the source of soluble and particulate nitrogen losses from agricultural fields.* Brace Center day Symposium, McGill University, QC, Canada. 29 mars. (Oral

The Missisquoi Bay of Lake Champlain, located in southern Quebec, has become progressively eutrophic since 1999, as evidenced by frequent cyanobacteria blooms during summer months. Eutrophication in Missisquoi Bay is attributed partially to elevated concentrations of nitrogen (N) from agricultural activities in Pike River watershed, which drains into Missisquoi Bay. Isotopic analysis of total N forms, nitrate (NO_3) and particulate organic nitrogen (PON), provides valuable information on N sources contributing to eutrophication of the Bay. The objective of this study was to detect the source of N lost by subsurface tile drainage using the stable isotopes of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ for NO_3 and $\delta^{15}\text{N}$ for PON. Water samples were taken from subsurface tile drainage of two agricultural fields with contrasting soil texture at discrete events during fall 2010, spring and fall 2011. Subsamples were selected and analyzed for natural isotopes of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of NO_3 . Sediment as well as soil samples were analyzed for $\delta^{15}\text{N}$ of PON. Results showed that $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of NO_3 were closer to the values of soil NO_3 than the values of mineral N fertilizer and manure. The $\delta^{15}\text{N}$ values of PON were close to the $\delta^{15}\text{N}$ values of stable soil N from the top soil layer. In conclusion, the source of NO_3 in tile drainage was microbially-derived NO_3 produced from the nitrification of mineral fertilizers and manure, and the source of PON was soil organic N, a byproduct of microbial decomposition.

Rasoul S., Whalen K. J., Michaud A. A. et Madramootoo C. A. 2012. *Source of erodible particulate organic nitrogen in agricultural tile drainage water determined with ^{15}N and ^{13}C stable isotopes.* [2012: CSSS-AQSSS Joint Meeting, Quebec, Canada. 3-8 juin, 2012.](#)

Particulate organic nitrogen (PON) represents 10 to 60% of N lost via subsurface tile drainage from agricultural fields into the Missisquoi Bay in Southern Quebec. If we wish to reduce PON loading in waterways, we need to know the source of the erodible PON found in subsurface tile drainage. In this study, we characterized the natural abundance of stable isotopes in organic matter with density fractionation and compared those values to the stable isotope signal in PON. The assumption is that materials with similar stable isotope values have the same origin. Sequential density fractionation was done on soil from three layers (0-20, 20-40, 40-60 cm) collected from two agricultural fields with contrasting texture (clayey vs. sandy) located in the Pike River watershed, Southern Quebec. Whole soils were separated into 2 light fractions: non occluded light fraction (NOLF, $\rho < 1.9 \text{ g cm}^{-3}$), occluded light fraction (OLF, $\rho < 1.9 \text{ g cm}^{-3}$) and 3 dense fractions ($\rho = 1.9\text{-}2.1, 2.1\text{-}2.3, 2.3\text{-}2.5 \text{ g cm}^{-3}$). Stable isotopes of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ were measured in each fraction. Tile drainage water samples taken from the same agricultural fields at 18 discrete events during spring 2011 were filtered ($0.45 \mu\text{m}$) and the sediments collected on filter paper were analyzed for $\delta^{15}\text{N}$ and PON concentration. Values of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in soil fractions were in the same range as stabilized soil organic matter (2 to 8‰ for $\delta^{15}\text{N}$ and -10 to -30‰ for $\delta^{13}\text{C}$). The $\delta^{15}\text{N}$ of soil organic matter fractions were consistently greater in topsoil than subsoil layers (5.96 ‰ in 0-20 cm vs 5.22 ‰ and 3.94 ‰ in 20-40 cm and 40-60 cm layers of clayey soil; 4.49‰ in 0-20 cm vs 1.90‰ and 1.70 ‰ in 20-40 cm and 40-60 cm layers of sandy soil). In clayey soil, the $\delta^{15}\text{N}$ of PON was similar to the $\delta^{15}\text{N}$ values of the 2.1-2.3 g cm^{-3} fraction of topsoil, as well as the $\delta^{15}\text{N}$ values of the 2.1-2.3 g cm^{-3} and NOLF fractions in the 40-60 cm layer. There was little similarity between $\delta^{15}\text{N}$ of PON and $\delta^{15}\text{N}$ of soil organic matter fractions in the sandy soil. We concluded the erodible PON fractions entering the Bay originated mainly from the dense 2.1-2.3 g cm^{-3} fraction in clayey soils, but need further research to determine the source of erodible PON coming from sandy soils.

Rasoul S., Whalen K. J., Michaud A. A., Madramootoo C. A. 2011. *15N Stable Isotopes to Pinpoint the Source and Quantity of Particulate Nitrogen Exported From Agricultural Fields*. ASA. CSSA. SSSA International Annual Meetings, "Fundamental for Life: Soil, Crop, & Environmental Sciences," Oct. 16-19, 2011, San Antonio, TX. (Affiche)

The Missisquoi Bay of Lake Champlain, located in southern Quebec, Canada has become progressively eutrophic and experiences periodic cyanobacteria blooms during summer. Although phosphorous is considered to be the trigger for cyanobacteria blooms, elevated nitrogen (N) concentrations may be partially responsible for eutrophication in the Missisquoi Bay. Surrounding agricultural lands are the major source of N and other nutrients entering the Pike River, which drains into the Missisquoi Bay, due to the fact that they receive organic and mineral fertilizers. Subsurface tile drainage accounts for at least half of the water transmitted from agricultural fields to streams each year, and is likely an important pathway for nutrient export as well. Soil texture affects nutrient transport through the profile, thereby impacting the N concentration and forms in tile drains. The objective of this study was to evaluate the N source: organic vs. mineral N fertilizer, and quantify the particulate organic N (PON) in the subsurface tile drains of annually-cropped agricultural fields with contrasting soil texture (sandy vs. clayey soils) in the Pike River watershed, Quebec. Water samples were collected from tile drains in fall 2009, 2010 and spring 2011 and analysed for the natural abundance of $\delta^{15}\text{N}$ and N forms. The $\delta^{15}\text{N}$ values showed soil organic N as the major source of PON exported in tile drainage. Generally, the N concentration was greater in tile drains under sandy than clayey soils. $\text{NO}_3\text{-N}$ was the dominant form of N in tile drainage water, with a smaller contribution from PON. However, PON concentration was greater in clayey than sandy soils (15% vs. 10% and 22% vs. 7% of total N found in water samples collected following fall and spring rainfall events, respectively) due to more preferential flow pathways in clayey soils. In conclusion, soil organic N attached to particles is susceptible to loss through subsurface tile drainage, and the contribution of PON to total N concentration was greater after intense rainfall events (more than 5 mm of rain) that occurred in spring 2011.

Madramootoo, C.A., J. Morrison and M. Chikhaoui. 2012. *Modeling the impact of tile drain spacing on phosphorus losses from two agricultural fields in southern Québec, Canada. (submitted to Canadian Water Quality Journal)*

Tile drainage is a widely adopted water management practice in eastern Canadian provinces, Québec and Ontario. Tile drainage aims to improve the productivity of poorly drained agricultural fields. Nevertheless, studies have also shown that subsurface drainage is a significant pollution pathway to surface water. This study was undertaken to evaluate the effect of tile drain spacing on surface runoff, subsurface drainage, and phosphorus (P) loss from two tile-drained agricultural fields located near Bedford, Québec. Field data was used with the DRAINMOD model and in developed regression models in order to perform the simulations. Both DRAINMOD and the regression models showed good performance. Simulation results indicated that when lateral drain spacing is increased, the volume of subsurface drain flow decreases, and the volume of surface runoff increases, at sites with sandy and clay loam soils. Furthermore, when drain spacing increases, P loads decrease significantly in the subsurface drainage of the field with clay loam soil. The impact of drain spacing on P losses was less pronounced in the field with sandy loam soil. P loads in surface runoff increase as a result of increased drain spacing.

Madramootoo, C.A., J. Morrison and M. Chikhaoui. 2012. *Evaluation of DRAINMOD and SWAT for modeling agricultural land drainage under spring snowmelt conditions (in preparation - to be submitted to Canadian Journal of Civil Engineering)*

The hydrologic performance of DRAINMOD and the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was compared and evaluated at seasonal and monthly time scales. Three years (2002/04) of field data served to calibrate and validate the model. The comparison of two models was established based on their prediction accuracy. Both models performed well at predicting the annual water yields. DRAINMOD was better at simulating monthly subsurface drainage with R^2 greater than 0.76 and mean square error from 0.14 to 0.24 for both sites. SWAT's performance in simulating total monthly surface runoff was better than DRAINMOD during the validation period, with R^2 greater than 0.81. However, SWAT tended to overestimate surface runoff by 60% during the latter part of the growing season. The results of this study revealed that DRAINMOD was better than SWAT at simulating hydrology for tile-drained agricultural regions. Additionally, the calibration of SWAT required more effort and input data.

Ngwa, F. C.A. Madramootoo and S. Jabaji. 2012. *A Multiplex qPCR Approach for Differential Monitoring of Multiple Microcystin-producing Cyanobacteria Genera in Freshwater Bodies. Environmental Toxicology (submitted)*

The emergence and persistence of complex blooms of cyanobacteria (blue-green algae) in freshwater bodies pose significant challenges for water quality management in Canada and globally. The co-occurrence of morphologically

indistinguishable toxic and non-toxic strains makes monitoring and control of these noxious organisms particularly challenging. Conventional monitoring approaches are not only incapable of discriminating toxic from non-toxic strains, but have proven to be less sensitive and specific. This has necessitated the development of more robust tools for discriminating toxic from non-toxic cyanobacterial genotypes.

In this study, a multiplex real-time quantitative polymerase chain reaction (qPCR) approach was developed and tested for its sensitivity and specificity at detecting, differentiating, and estimating potentially toxic *Anabaena*, *Microcystis* and *Planktothrix* genotype compositions in complex environmental samples. The oligonucleotide primers and probes utilized were designed to target portions of the microcystin synthetase gene E (*mcyE*) that encode the synthesis of the unique Adda moiety of microcystins in the three target genera.

Laboratory evaluation showed the developed assay to be highly sensitive and specific at detecting and quantifying targeted species. Indeed, the assay standards for the *Anabaena*, *Microcystis* and *Planktothrix* reactions attained efficiencies above 90%, with coefficients of determination consistently above 0.99. Analysis of environmental water samples resulted in detection and estimation of target toxigenic cyanobacterial genera in water samples even when cell numbers were still below the limit of detection for most conventional detection methods. Thus, this robust technique provides simultaneous detection, differentiation, and quantification of toxigenic cyanobacteria that otherwise cannot be accomplished by other currently used monitoring approaches.

Ngwa, F. C.A. Madramootoo and S. Jabaji. 2012. *Monitoring Toxigenic Microcystis Strains in the Missisquoi Bay, Quebec, by PCR Targeting Multiple Toxic Gene Loci (Accepted: Environmental Toxicology DOI 10.1002/tox)*

The increasing incidence of mixed assemblages of toxic and non-toxic cyanobacterial blooms in Quebec's freshwater bodies over the last decade, coupled with inherent inadequacies of current monitoring approaches, warrants development of sensitive and reliable tools for assessing the toxigenic potential of these water blooms. In this study, we applied three independent PCR assays that simultaneously target the microcystin synthetase (*mcy*) genes A, E and G to rapidly and reliably detect and quantify potentially toxic *Microcystis* genotypes in the Missisquoi bay, Quebec, Canada.

Linear regressions of quantitative PCR threshold cycles (C_t) against the logarithm of their respective *Microcystis* cell number equivalents resulted in highly significant linear curves with coefficients of determination (R^2) greater than 0.99 ($p < 0.0001$, $n = 6$) and reaction efficiencies of 91.0, 95.8, and 92.7 percent respectively for the *mcyA*, *mcyE* and *mcyG*-based qPCR assays. The three assays successfully estimated potential microcystin-producing *Microcystis* genotypes from all field samples. The proportions of *Microcystis mcyA*, *mcyE* and *mcyG* genotypes to total *Microcystis* cell counts showed substantial spatial variability ranging between 1.7-21.6%, 1.9-11.2% and 2.2-22.6% respectively. Correlation of microscopically determined total *Microcystis* counts to qPCR-based *Microcystis mcyA*, *mcyE* or *mcyG* cell number equivalents resulted in highly significant associations with $R^2 > 0.90$.

Thus, PCR-based assays targeting the *mcyA*, *mcyG* and/or *mcyE* genes can serve as powerful screening tools for rapid and sensitive estimation of microcystin-producing *Microcystis* genotypes in freshwater water bodies.

Gombault, C., C.A. Madramootoo, A. R. Michaud, M-F. Sotille, and I. Beaudin. 2012. *Modelling the impact of climate change scenarios on the hydrology of an intensively cultivated watershed in southern Quebec. Submitted to the Journal of the American Water Resources Association.*

The impacts of climate change on the hydrology of the Pike River watershed were predicted for the time horizon 2041-2070. Possible changes were simulated using a version of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modified to suit Québec's agroclimatic conditions which took as inputs four climate scenarios produced by the CRCM4 (fourth version of the Canadian Regional Climate Model) and Arpège regional climate models. Potential mean changes predicted by these scenarios were analysed for their effects on evapotranspiration, surface and subsurface runoff and streamflow. Only one scenario predicted a significant increase in mean annual streamflow. However, when considering shorter time spans, simulations predicted significant changes, including a winter streamflow two to three times greater than current streamflow and earlier spring floods. In contrast, peak flows in April, as well as summer streamflow, appear to decrease but not always significantly. A three- to four-fold increase in subsurface flow was also observed in winter.

Gombault, C., C.A. Madramootoo, A. R. Michaud, M-F. Sotille, and I. Beaudin. 2012. *Impacts of climate change on nutrient losses from the Pike River watershed of southern Quebec. 2012. Submitted to Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers.*

The impacts of climate change on water quality of the Pike River watershed, an important contributor of nutrient loads to northern Lake Champlain, were predicted for the time horizon 2041-2070. Four water quality scenarios were simulated using a calibrated version of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Three of the scenarios were generated using climates simulated with the Fourth Canadian Regional Climate Model (CRCM4). The fourth scenario was generated using

the climate simulated with the Arpege Regional Climate Model. Potential mean changes predicted by these scenarios were then analysed for sediment yields, and total phosphorus and nitrogen.

Only one climate scenario predicted a significant increase in mean annual nutrient loadings. However, when considering shorter time spans (seasonal and monthly scales), simulations predicted significant changes especially in winter where sediment and nutrient loadings were predicted to become two to three times greater than current nutrient levels. Reasons include the early onset of spring snowmelt, a greater number of rainfall events, and snowmelt episodes caused by higher winter and spring temperatures.