

Mesures précises et approches innovantes en modélisation de la dynamique des nutriments en bassin et en plan d'eau contribuant aux fleurs des cyanobactéries

### **Équipe de recherche**

**MADRAMOOTOO, Chandra Alastair**, Université McGill

Bird, David F., Université du Québec à Montréal

Michaud, Aubert, Université de Sherbrooke

Whalen, Joann Karen, Université McGill

### **Partenaires**

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement

Corporation bassin versant baie Missisquoi

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs

Lake Champlain Research Consortium

### **Étudiants**

Boluwade, Alaba, doctorat, Université McGill

Chikhaoui, Mohamed, post doctoral fellow, Université McGill

Gombault, Colline, maîtrise, Université McGill

Ngwa, Felexce, doctorat, Université McGill

Poirier, Simon-Claude, doctorat, Université McGill

Poon, David, maîtrise, Université McGill

Rasouli, Sogol, doctorat, Université McGill

Les activités scientifiques réalisées dans le cadre du programme de recherche en partenariat sur les cyanobactéries s'inscrivent en complémentarité et 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 efforts des partenaires scientifiques et communautaires dans le cadre du récent programme de recherche sur les cyanobactéries, alliant les activités de monitoring et de modélisation aux échelles de la parcelle, du petit bassin versant et de la baie Missisquoi, ont porté principalement sur la mesure des taux de transferts de nutriments vers l'écosystème aquatique, tels qu'influencés par l'occupation du territoire, l'action concertée en aménagement riverain, les cheminements hydrologiques de surface et souterrain. Les impacts des apports de nutriments à la baie ont pour leur part été investigués quant au potentiel de toxicité des populations de cyanobactéries.

## **1. Monitoring des transferts et de la spéciation des nutriments dans le bassin versant de la rivière aux Brochets**

**1.1 Études à l'échelle du petit bassin hydrographique: Quantification des gradients spatiaux.** L'hydrologie, les flux et la spéciation des sédiments et des nutriments de trois tributaires avals de la rivière aux Brochets ont été décrits au moyen d'un monitoring hydrométrique, géochimique (sondes multi-paramètres) et de la qualité de l'eau (échantillonnage/dosage ponctuel). 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 (1.1.1); ii) d'évaluer la réponse de la qualité de l'eau aux actions concertées en matière d'aménagement riverain (1.1.2); iii) de distinguer les cheminements hydrologiques de surface et souterrain du P (1.1.3) et N (1.1.4) et iv) de valider la modélisation de ces transferts à l'échelle du bassin versant (2.0). 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 km<sup>2</sup>) et du ruisseau au Castor (11 km<sup>2</sup>) implanté en 1997, complétés par les données historiques au plan des systèmes culturaux et une description hydro-pédologique détaillée de leurs paysages. Les protocoles de suivi hydrométrique et de qualité de l'eau maintenus en opération 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 conductivité et du débit.

**1.1.1 Gradient spatial lié à l'occupation du territoire: Étude par échantillonnage spatial.** Les études antécédentes 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, le gradient spatial dans les transferts de P de cinq sous-bassin versants du ruisseau aux Morpions ont été déterminés et combinés aux observations des bassins du ruisseau au Castor et Ewing (figure 1). Les flux de sédiments et de nutriments des sept bassins expérimentaux ont été séparés en leurs composantes d'écoulement de base et de crue sur la base d'analyses de modèles concentration:débit (C/Q). 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. Le tableau 1 rapporte les statistiques d'occupation du territoire et de population (Statistiques Canada, 2006) pour les sept bassins, de même que les coefficients 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 du P total varient de 67 kg P/km<sup>2</sup>-an dans le secteur amont du ruisseau aux Morpions, dominé par une occupation du sol forestière, à 253 kg P/km<sup>2</sup> 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, alors que les occupations forestières et urbaines n'ont pu générer de paramètres de régression significatifs (figure 2). Des observations 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/km<sup>2</sup> 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 2a). 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 assumant 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 disséminées à travers le territoire. La nature empirique de cette approche limite cependant l'application des coefficients estimés à la zone d'étude, mais demeure aisément transférable à d'autres régions.

### **1.1.2 Réponse des exportations de P aux actions agroenvironnementales concertées: Études de 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 au Castor 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 Castor (11 km<sup>2</sup>). L'aménagement du ruisseau Ewing (32 km<sup>2</sup>) a aussi été initié par la COOP en 2007, dans le cadre du projet pilote sur les biens et services environnementaux *Lisière Verte* (CSBVRB, 2009). Plus de 80 km de bandes riveraines de 10 m de largeurensemencées en panic érigé ou en prairie ont été aménagés 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 au Castor et Ewing pour la plus récente campagne de monitoring (2009-2011). Pour cette plus récente période d'étude, les coefficients d'exportation en P total ont ainsi été évalués à 248 et 229 kg/km<sup>2</sup>, respectivement, avec une biodisponibilité de l'ordre de 50%. Ces estimations relativement plus élevées que les taux d'exportation précédents 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.*, 2007), ce gradient temporel s'est traduit en une augmentation théorique de 11 % des exportations annuelles de P.

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. 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 ont été 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 concentration 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 (figure 3) n'a malheureusement pas pu profiter d'une période de référence précédent 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 pas significatif pour les MES, alors que les concentrations en P-total ont été significativement réduites que pour le 25<sup>e</sup> 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 au Castor, 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<sup>e</sup> 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 au Castor et Ewing. Dans une perspective opérationnelle, ce volet du projet a démontré une efficacité significative, mais limitée des aménagements hydro-agricoles sur l'exportation 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 culturales 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.

### **1.1.3 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 eaux provenant du ruissellement de surface et de drains artificiels de 8 champs en culture de maïs et de 2 champs en prairies 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 des eaux de ruissellement provenant des champs de maïs a été expliquée par la teneur en P extractible par la méthode Mehlich-3 (M3P) et la teneur des sols en argile. 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). Pour les deux champs en prairie sur sol des type loam argileux, la fraction en P soluble (DRP) a été dominante avec des concentrations égales et même supérieures aux champs avec cultures de maïs, plus enrichis en 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 résultats d'analyse pourront dans un prochain temps permettre de mieux comprendre la dynamique du P avec les sédiments ainsi que l'impact des différentes méthodes de gestion des champs sur la biodisponibilité du PP. La relation spécifique entre les concentrations en P et Ca, ainsi que de la conductivité électrique de l'eau a permis de projeter les données de champs à l'échelle du bassin versant Ewing suite au suivi décrit dans la section 1.1. Les résultats à l'échelle du champs ont été utilisés pour estimer les exportations en P provenant des écoulements de résurgence, des drains

(matriciel et préférentiel) et du ruissellement de surface (figure 4). L'importance du ruissellement de surface et de l'écoulement préférentiel des drains aux exportations de P total a démontré l'intérêt qui doit être porté à la gestion des nutriments dans la couche superficielle des sols.

#### **1.1.4 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. Pour cela 23 échantillons d'eau ponctuels ont été collectés 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: 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% du TN, sous forme de  $\text{N-NO}_3$ , a été exporté dans les drains du sol sableux et argileux, respectivement 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 avec une nouvelle technique analytique qui utilise l'enrichissement en isotope stable  $^{15}\text{N}$  ( $\delta^{15}\text{N}$ ). Les résultats préliminaires ont montré que la composition en TN des eaux était de +6,22 ‰ ( $\pm 0,35$ ) dans les sols sableux et de +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 PN 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 ‰).

## **2.0 Modélisation hydrologique**

Dans cette composante 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 5), les coefficients d'exportation de P ont été dérivés pour les différents types d'utilisation du sol, systèmes cultureux et paysages, caractéristiques de la région à l'étude. 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. Les coefficients d'exportation annuel moyen en P total pour le maïs, soya, et le foin ont été estimés à partir des simulations SWAT à 1,74, 1,10 et 0,44 kg P ha<sup>-1</sup> 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). Un autre projet de modélisation en coopération avec

OURANOS a utilisé SWAT-Qc afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le transport des sédiments et des nutriments dans le bassin de la rivière aux Brochets (Gombault *et al.*, 2010). Les résultats de la modélisation avec DRAINMOD ont montré que l'exportation annuelle de l'eau par les drains variait entre 7 et 58 % des précipitations. Ces variations dépendaient de l'espacement des drains allant de 5 à 70 m. Les pertes de phosphore par drainage souterrain correspondantes ont été estimées entre 0,51 et 0,21 kg ha<sup>-1</sup>.

### 3.0 Monitoring des cyanobactéries dans la baie Missisquoi

Cette partie 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. Sur les sites expérimentaux, une sonde multi-paramètre de qualité d'eau a été acquise, calibrée et utilisée pour la mesure de la biomasse de cyanobactéries (compte de la chlorophylle-a et cyanobactéries) en plus des paramètres physico-chimiques de l'eau. 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 µmol/m<sup>2</sup>/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 comparer 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 6). 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  $\mu\text{L}^{-1}$  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.

## Références

- Gombault, C., M. Chikhaoui, C. Madramootoo, A. Michaud, I. Beaudin, M.F Sottile et S. Blais.** 2010. Symposium Ouranos, 17-18 novembre, Québec,
- Hegman, W., D. Wang et C. Borer.** 1999. Technical Report No. 31. Lake Champlain Basin Program. Grand Isle, VT, 69 p.
- Coop de solidarité du bassin versant de la rivière aux Brochets.** 2009. Projet Lisière verte. Programme PAASCA, Agriculture et agroalimentaire Canada.
- Michaud, A.R.** 2004, Thèse PhD. Université Laval.  
<http://archimede.bibl.ulaval.ca/archimede/fichiers/22180/22180.html>
- Michaud, A. R., S. Seydoux, I. Beaudin, et C. Gombault.** 2008. National Agri-Environmental Standards Initiative Technical Series Report No. 4-65. 129 p.
- Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo.** 2007. Canadian journal of soil science 87(3) 329-344.
- 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](http://www.irda.qc.ca/ftbFiles/Nouvelles/ODEP_Manuel_utilisateur2009.pdf)
- Skaggs R. W.** 1978. Technical report No: 134 of the water Resources Research Institute of the University of North Carolina
- 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](http://www.lcbp.org/techreportPDF/54_LULC-phosphorus_2007.pdf)
- Winchell, M. et D. Meals.** 2011. Identification of CSA of Phosphorus Pollution within the Vermont Sector of the Missisquoi Bay. Lake Champlain basin program.

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 <sup>2</sup> -an)				Sup. (km <sup>2</sup> )	Utilisation du sol (% total)			Densité Population (hab/km <sup>2</sup> )
	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

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 <sup>-1</sup> )	Conc. (ug L <sup>-1</sup> )	CV <sup>1</sup>	Charge (kg ha <sup>-1</sup> )	Conc. (ug L <sup>-1</sup> )	CV <sup>1</sup>
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		

<sup>(1)</sup> 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 au Castor.

Période	MES		P total		P biod.	
	Conc. <sup>1</sup> (mg/l)	Écart <sup>2</sup> (%)	Conc. <sup>1</sup> (ug/l)	Écart <sup>2</sup> (%)	Conc. <sup>1</sup> (ug/l)	Écart <sup>2</sup> (%)
1997-1999	134	Référence	299	Référence	195	Référence
1999-2001	93	- 0,17**	211	- 0,47***	143	-0,45*
2001-2003	55	- 0,48***	211	- 0,47**	90	-0,79***
2003-2005	61	- 0,43***	268	- 0,17NS	138	-0,49**
2005-2007	130	+ 0,11NS	368	+ 0,43NS	178	-0,16NS
2007-2009	92	- 0,18**	286	- 0,07NS	ND	ND
2009-2011	115	- 0,06NS	320	+ 0,13NS	143	-0,45**

<sup>1</sup> Concentration moyenne pondérée pour la crue journalière moyenne de 3,1 mm.

\*\*\*, \*\*, \*: Respectivement significatif au taux de 0,001, 0,01 et 0,05.

<sup>2</sup> Écart par rapport à la période de référence 1997-1999.

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

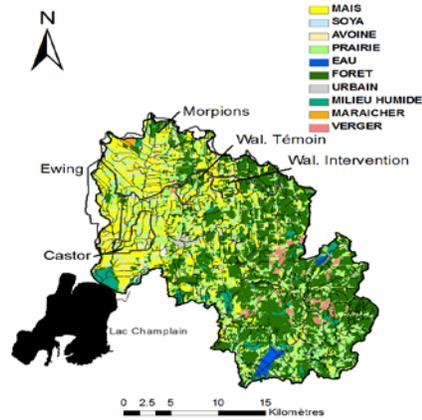


Figure 2. Charges annuelles de phosphore total pour la strate d'écoulement de base en fonction de la population (a) et pour la strate d'écoulement de crue (b) en fonction de la superficie agricole aux exutoires des sous-bassins des ruisseaux aux Morpions, au Castor et Ewing.

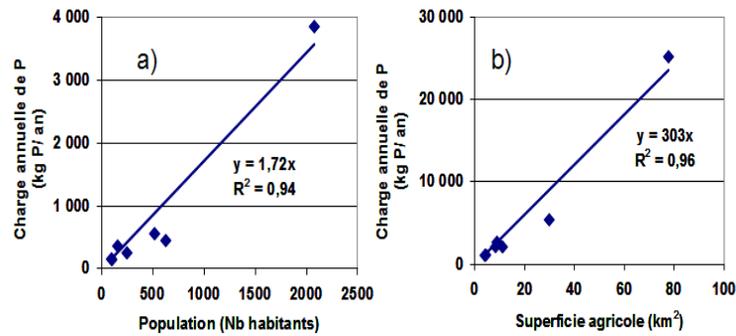


Figure 3. Charges hebdomadaires et spéciation du phosphore exporté à l'exutoire du bassin Ewing pour la période d'étude 2007-2011.

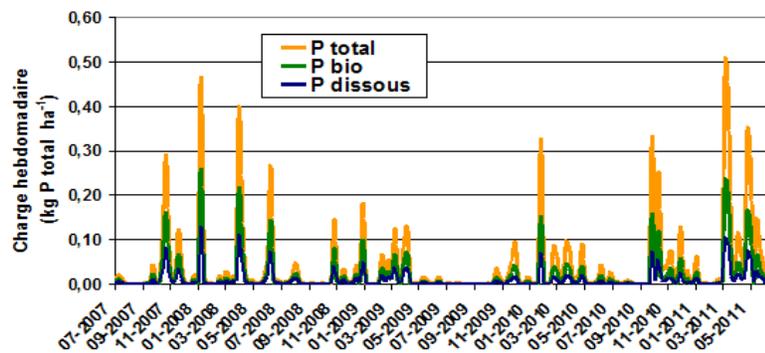


Figure 4. Contribution aux exportations en P total des écoulements de résurgence (base), de drains matriciel, de drain préférentiel (macropore) et de ruissellement de surface pour les périodes de l'automne 2008 et printemps 2009 dans le bassin.

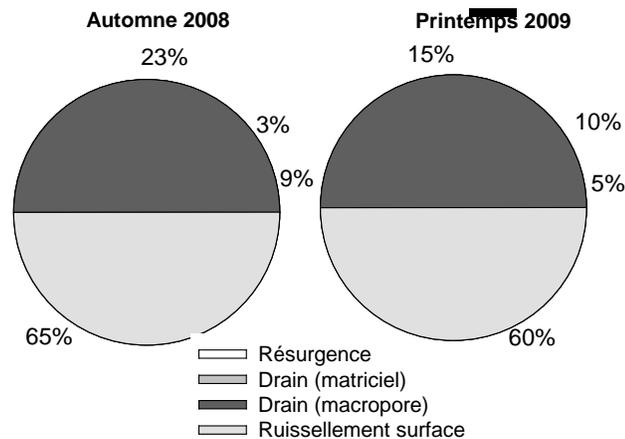


Figure 5. Résultats des données modélisées par SWAT-Qc du débit et du P total exporté dans le ruisseau Wallbridge (Montérégie Est) en fonction des valeurs mensuelles observées au cours de la période de référence 2001-2003.

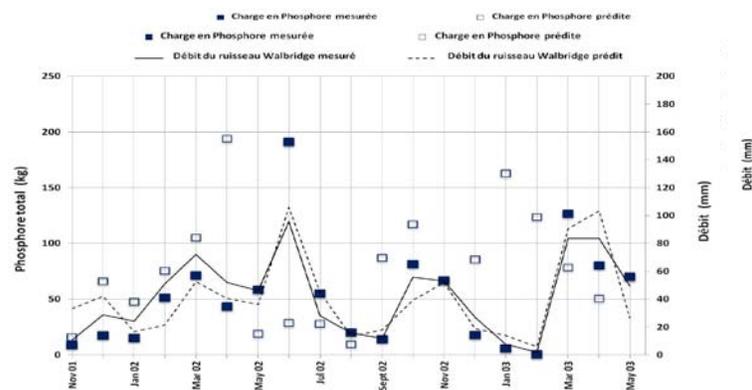


Figure 6. Concentrations en cellule d'espèce *Microcystis* déterminées par le comptage au microscope et la méthode qPCR en temps réel pour 7 sites d'échantillonnage localisés dans la baie Missisquoi, Qc. Le compte total obtenu par comptage au microscope est donné en cellule par microlitre.

