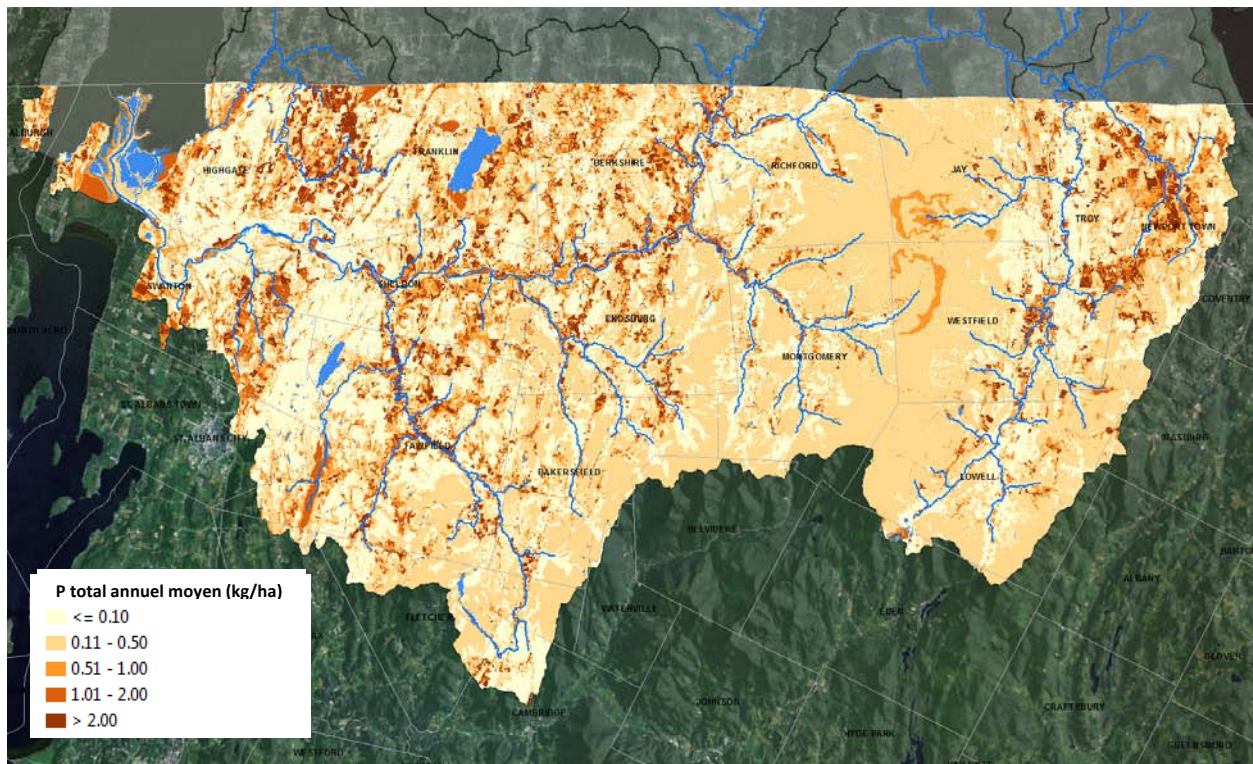


Modélisation et détermination des sources critiques de phosphore dans le secteur vermontois du bassin de la baie Missisquoi



Rapport final rédigé par le Programme de mise en valeur du bassin du lac Champlain à l'intention de la Commission mixte internationale

21 décembre 2011

Préparé par :

Eric Howe, PMVBLC, coordonnateur technique
William Howland, PMVBLC, directeur général du programme
Stephanie Strouse, PMVBLC, assistante technique

Aperçu

En 2008, la Commission mixte internationale (CMI) a signé une entente avec le Programme de mise en valeur du bassin du lac Champlain (PMVBLC) visant à mettre sur pied un projet de détermination des sources critiques (SC) de phosphore dans le bassin versant de la baie Missisquoi, situé dans le lac Champlain. La baie Missisquoi, un segment transfrontalier du lac Champlain (É.-U. et Canada), présente les concentrations de phosphore les plus élevées de tous les bassins versants composant le lac Champlain. Les charges et les concentrations de phosphore dans la baie Missisquoi excèdent largement les concentrations cibles établies en fonction des critères de qualité de l'eau approuvés par le gouvernement du Québec et l'État du Vermont. Les charges totales de sédiments et le taux d'azote observés soulèvent également des craintes. La charge moyenne de phosphore estimée se déversant dans la baie Missisquoi est de 188 tonnes métriques par année, dont 63 % provient du Vermont et 37 % provient du Québec. Le débit moyen combiné des trois affluents principaux de la baie Missisquoi, soit les rivières aux Brochets, de la Roche et Missisquoi, est de 2 500 pieds cubes par seconde (pi^3/s). La rivière Missisquoi présente un débit annuel moyen de 1 700 pieds cubes par seconde (pi^3/s), soit le débit le plus élevé des trois affluents, et elle s'étend sur approximativement 154 km. Le territoire total du bassin versant Missisquoi couvre une superficie de 310 527 hectares (ha); environ 60 % de cette superficie est située sur le territoire du Vermont et 40 %, au Québec. En 2008, les gouvernements des États-Unis et du Canada ont demandé l'aide de la CMI pour déterminer les sources critiques de phosphore dans le bassin versant afin d'aider aux efforts de gestion de la qualité de l'eau. Le Québec a accompli de récents progrès dans le domaine de la recherche sur son territoire, lesquels ont permis d'établir un modèle qui s'est avéré utile au PMVBLC pour la formulation des tâches de recherche des sources critiques sur le territoire des États-Unis. Une série d'ateliers a été tenue à la fin de 2008 et au début de 2009 afin d'analyser et d'élaborer les composantes de recherche du projet, dont la surveillance additionnelle des affluents en vue de soutenir les efforts de modélisation, laquelle constitue le principal élément livrable, les délimitations des sources critiques de pollution par le phosphore, les approches permettant de comprendre ce type de pollution, dont la détermination de modèles pertinents pour déterminer les sources critiques. Finalement, un dernier atelier visait à déterminer les données nécessaires pour le projet de modélisation des sources critiques dans le bassin de la baie Missisquoi. Pour obtenir davantage de renseignements sur les projets financés par la CMI (rapports, livrables approuvés et jeux de données pertinents), veuillez consulter le site Web du PMVBLC à l'adresse suivante : <http://www.lcbp.org/ijc.htm>.

Travaux de modélisation passés et actuels dans le bassin de la baie Missisquoi

Québec

En 2004, l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a réalisé une étude visant à élaborer un modèle de simulation du transport du phosphore hors des champs par le drainage souterrain vers le bassin de la baie Missisquoi (Simard et coll., 2004). L'étude a permis de conclure que malgré le fait que le drainage souterrain représentait moins de 10 % des eaux de ruissellement totales transportant du phosphore dans un bassin versant donné, une quantité d'eau et de phosphore considérable provenant de sources en amont passaient par les drains avant d'entrer dans les voies d'eau. L'étude a également fourni des interprétations déterminantes quant au déplacement du phosphore dans les réseaux de drainage souterrain.

En 2004, une autre étude a été menée sur l'effet de l'utilisation des sols sur l'exportation du phosphore dans le bassin versant de la baie Missisquoi (Michaud et Laverdière, 2004). L'étude permettait de

simuler les précipitations dans les zones de ruissellement, en fonction d'un éventail d'utilisation des sols, de cultures de protection, d'épandage du fumier et de types de sols. Les chercheurs ont conclu que le type de sol était responsable de 70 % de la variabilité de l'exportation du phosphore total. Les cultures associées à différents types de sols interviennent également de façon considérable dans l'exportation de phosphore. Par ailleurs, il a été aussi observé que l'épandage du fumier compte pour 35 % de la variabilité de l'exportation de phosphore.

En 2010, des chercheurs de l'Université McGill ont examiné les charges de phosphore quotidiennes dans la baie Missisquoi et ont constaté que les terres dénudées, après les récoltes, contribuaient à 82 % de la quantité de phosphore rejetée annuellement dans le bassin versant (Adhikari, Madramootoo et Sarangi, 2010). L'étude était axée sur les indicateurs de sources diffuses de pollution par le phosphore dans le bassin de la rivière aux Brochets, un affluent de la baie Missisquoi. L'étude, ayant recours principalement à la télédétection, et pouvant également utiliser des paramètres du modèle SWAT, a permis de conclure que 73 % du phosphore trouvé dans le bassin versant pouvait être expliqué par les bilans de phosphore des terres agricoles. Ces conclusions ont permis aux chercheurs d'établir les caractéristiques spécifiques des sols agricoles et de l'utilisation de ces sols qui augmentaient les charges de phosphore dans le réseau hydrographique. Une étude plus concluante portant sur l'utilisation des sols en détail, y compris les zones de drainage souterrain et les scénarios de meilleures pratiques de gestion, était essentielle pour créer un modèle exhaustif des charges de phosphore.

En 2007, l'IRDA a appliqué le modèle SWAT au bassin versant de la rivière aux Brochets, un bassin de 600 km², afin de caractériser le paysage et de reproduire le ruissellement de l'eau. Ce modèle a également été utilisé pour évaluer l'écoulement de phosphore de source diffuse et pour cibler et prédire l'efficacité des scénarios de meilleures pratiques de gestion. Les données de surveillance provenant du bassin versant ont permis de calibrer et de valider le modèle. Les résultats obtenus par le modèle démontrent qu'il existe une variabilité spatiale élevée dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, et que 10 % des zones agricoles contribuent à 50 % de l'exportation du phosphore total. Les scénarios des meilleures pratiques de gestion ont été analysés pour optimiser les réductions de phosphore et pour étudier la faisabilité de leur mise en œuvre. Même si la modélisation a pu déterminer les pratiques faisables, l'exercice n'a pas pu démontrer à quel endroit les meilleures pratiques de gestion devraient être mises en œuvre à l'échelle des champs.

La télédétection a été utilisée afin de déterminer l'emplacement de la végétation, des zones humides, des drains souterrains et des zones tampons. L'imagerie multispectrale a été utilisée afin de créer un indice d'hydratation superficielle dans le but de cerner les zones qui sont sujettes au ruissellement. Des techniques qui permettent de préciser la microtopographie, dont le système de localisation GPS, la télédétection LiDAR et le Correlator3D, ont été utiles pour déterminer les sources critiques. L'outil de diagnostic des exportations de phosphore (P-EDIT), un indice quantitatif du phosphore pour le Québec, continue d'être appliqué et d'être peaufiné au moyen de renseignements aisément accessibles.

Vermont

Deux approches de modélisation pour le bassin versant de la rivière de la Roche ont récemment été adoptées par les chercheurs de l'université du Vermont : un modèle à l'échelle de la ferme (IFMS) et un modèle à l'échelle du bassin versant (SWAT). Le modèle à l'échelle de la ferme a été utilisé afin de déterminer les déséquilibres en phosphore sur les fermes, lesquels pourraient occasionner des concentrations de phosphore élevées dans le sol. Le modèle du bassin versant a été utilisé pour déterminer les sources critiques de phosphore. Pour obtenir davantage de renseignements à ce sujet, veuillez consulter le rapport d'achèvement du projet sur le site Web du PMVBLC, à l'adresse suivante : <http://www.lcbp.org/techreportPDF/60%20P%20Accounting%202010.pdf>.

Le modèle d'agriculture intégrée (Integrated Farm System Model [IFMS]) (Rotz et Coiner, 2006) a été utilisé pour comptabiliser les apports et les rejets de phosphore dans les milieux agricoles sur trois fermes laitières du Vermont utilisant des méthodes agricoles différentes (une ferme biologique fondée sur les graminées, une ferme d'élevage intensif et une ferme mixte qui compte des vaches laitières matures en confinement et des génisses au pâturage). Les résultats de la modélisation ont démontré l'étendue du déséquilibre en phosphore pour chaque ferme et les stratégies de recharge possibles qui pourraient répondre aux problèmes soulevés. Le fait de se pencher sur les problèmes de déséquilibre en phosphore permet de cibler directement la cause profonde à la source de l'accumulation de phosphore dans le sol des exploitations agricoles et, ultimement, de réduire les charges de phosphore dans les cours d'eau se jetant dans le lac Champlain.

Chacune des trois fermes qui a fait l'objet de l'étude présentait des déséquilibres en phosphore, lesquels allaient, selon la ferme à l'étude, de 4,9 lb/acre à 16,7 lb/acre. Même si chaque ferme à l'étude était différente, les déséquilibres courants observés dans les sources critiques de phosphore étaient les suivants : 1) quantité des suppléments alimentaires de phosphore minéral, 2) sources et types des protéines et des compléments énergétiques, et 3) niveaux de productivité et utilisation des cultures locales dans le régime alimentaire des animaux. La suralimentation en compléments de minéraux phosphorés et la faible productivité des cultures locales (dont les pâturages), combinées à la faible utilisation des cultures locales dans les régimes alimentaires des animaux et à l'emploi accru de protéines et de compléments énergétiques du commerce pour répondre aux exigences relatives à la croissance et à la production du bétail (lait, viande et autres), sont tous des facteurs qui ont contribué aux déséquilibres sur les fermes faisant l'objet de l'étude. Les résultats de la modélisation ont prouvé qu'en mettant sur pied d'autres stratégies de gestion pour chaque ferme, il était possible de résoudre les problèmes de déséquilibre observés, tout en conservant la rentabilité des fermes. Cette approche fondée sur un modèle peut être appliquée sur une grande échelle, à l'instar de la méthodologie visant à représenter les stratégies de gestion des systèmes agro-globaux actuels et de remplacement, afin d'évaluer et de quantifier les répercussions de la mise en œuvre de ces stratégies sur l'apport en phosphore à l'échelle des fermes et sur la rentabilité de celles-ci.

L'outil d'évaluation des terres et de l'eau (*Soil and Water Assessment Tool* - SWAT; Neitch et. coll., 2008) a été utilisé afin de modéliser l'hydrologie et le transport des sédiments et du phosphore dans le bassin versant de la rivière de la Roche. Les proportions de perte de phosphore à partir des sous-bassins du

bassin versant de la rivière de la Roche et les différentes utilisations des sols dans chacun des sous-bassins ont été estimées. Une des conclusions de l'étude menée démontrait qu'en raison de la variabilité des facteurs liés à la topographie, à l'hydrologie, au sol et à la gestion, les sources diffuses de phosphore ne contribuent pas de façon équivalente à la dégradation des eaux. Certaines sources diffuses (SC) entraînent des pertes de phosphore disproportionnellement plus élevées que d'autres. Cette étude fondée sur le modèle SWAT a permis de déterminer et de quantifier les pertes de phosphore dans les sources critiques du bassin versant de la rivière de la Roche, et a présenté l'étendue et les caractéristiques géographiques de ces SC en ce qui a trait à la perte de phosphore.

En fonction des résultats de la modélisation, il a été déterminé qu'environ 24 % de la partie amont du bassin versant produisait plus de 1,4 kg/ha du phosphore total et environ 80 % des charges de phosphore total. Ce même 24 % de la partie en amont du bassin versant était également responsable d'environ 91 % des charges de sédiments totaux. Les sources critiques en ce qui a trait à la perte de phosphore présentaient les caractéristiques géographiques suivantes : couvert végétal moindre, types de sol qui s'érodent facilement, fortes pentes et disponibilité en phosphore. Selon la réduction en phosphore prévue et la disponibilité des ressources requises, d'autres seuils liés à la perte de phosphore peuvent être utilisés pour définir les sources critiques, qui cibleraient des segments (%) différents du bassin versant présentant un risque élevé de pertes de phosphore.

En 2007, le PMVBLC accordait à Bourdeaus & Bushey Inc. un projet financé par la CMI afin de préparer des plans de gestion des nutriments (PGN) qui répondent à la norme 590 du NRCS pour trente petites exploitations agricoles situées dans le bassin de la baie Missisquoi. Le projet englobait 400 champs et environ 4 500 acres. Les données recueillies dans le cadre de ce projet ont aidé les agriculteurs à prendre de meilleures décisions de gestion. Le projet comprenait des données provenant de 30 exploitations agricoles pour 385 champs de culture distincts englobant 4 286 acres de terres cultivables. Les réductions des pertes de phosphore possibles qui auraient pu être réalisées par la mise en œuvre des PGN ont été calculées comme la différence entre les résultats de P total de 2008, de P lié aux sédiments, et l'indice P dissous et les résultats calculés de l'indice P 2008 provenant des pratiques décrites dans les plans 2008. Les registres de données réelles compilées des exploitations agricoles de 2007 et 2008 ont été utilisés afin de comparer les changements antérieurs et ultérieurs aux pratiques de gestion et qui ont été présentés comme une modification aux résultats de l'indice P pour l'ensemble des champs. Les plans de 2007, 2008 et 2009 ont été présentés à chaque agriculteur afin qu'ils puissent les utiliser dans le cadre de leur processus décisionnel concernant la gestion.

Le résultat de la moyenne de l'indice P total obtenu dans l'ensemble des exploitations agricoles a diminué de 8 %, passant de 54,6 en 2007 à 50,3 en 2008. Le résultat de l'indice P lié aux sédiments compris dans le résultat de l'indice P total a été réduit de 10 %, passant de 17,0 à 15,3, tandis que l'indice P dissous a été réduit de 7 %, passant de 37,6 à 34,9. La réduction globale du résultat de l'indice P total a été moindre que la réduction possible de 18 % qui aurait pu être réalisée si le plan de gestion des nutriments de 2008 avait été suivi rigoureusement par les agriculteurs. Le défaut d'adopter des pratiques précises ayant trait, entre autres, aux bandes riveraines végétalisées, à la distance d'épandage de fumier et à la réduction des applications de phosphore total provenant du fumier, a contribué à des

réductions inférieures à ce qui avait été prévu. Des réductions similaires des résultats de l'indice P ont été présentées dans le plan de 2009, lequel a été fourni à tous les agriculteurs participant à l'étude afin qu'ils soient mieux en mesure de poursuivre le processus lié au plan de gestion des nutriments. Pour obtenir davantage de renseignements à ce sujet, veuillez consulter le rapport d'achèvement du projet sur le site Web du PMVBLC, à l'adresse suivante :

http://www.lcbp.org/techreportPDF/58_Phos_Runoff_missisquoi_2009.pdf

En 2009, la Vermont Agency of Natural Resources et le PMVBLC ont conjointement conclu une entente avec le USDA National Sedimentation Laboratory en vue de mener une étude visant à déterminer les taux et les charges de sédiments et de phosphore découlant de l'érosion des rives bordant le cours principal de la rivière Missisquoi et quatre affluents secondaires, soit Hungerford Brook, Trout Brook, Tyler Branch et Black Creek. Ce travail a été accompli au moyen du *Bank-Stability and Toe-Erosion Model* (BSTEM). Le rapport final pour ce projet sera terminé au début de 2012.

Les conclusions préliminaires découlant de cette étude, publiées à l'automne 2011, indiquent que l'érosion des rives semble contribuer considérablement à l'apport de sédiments dans la rivière Missisquoi. En effet, ce phénomène est responsable, au moins, de 29 % et 42 % des charges de sédiments en suspension trouvées dans la rivière. En outre, l'érosion des rives semblent contribuer de manière importante aux concentrations de phosphore total dans la rivière Missisquoi, puisqu'elle contribue à environ 50 % (73,4 tm/an) des charges de phosphore total et des charges moyennes annuelles sur les rives (peut être supérieure à 41 000 m³/année). L'apport de sédiments fins au lac Champlain varie de 14 500 (limon/argile) à 21 500 m³/an (limon/argile plus sablon). Il a été établi que la végétation est essentielle dans la réduction des taux d'érosion des rives. Les scénarios de réduction des charges ont démontré des résultats hétérogènes : la réduction de la pente des rives à 2:1 a généré une réduction de 2 à 3 % des charges de phosphore; la réduction de la pente des rives à 2:1, combinée à une végétation établie depuis cinq ans, a généré une réduction de 90 % à 91 % des charges de phosphore; le fait de permettre à la végétation de prendre de la maturité, sans modifier les pentes des rives, a permis une réduction de 9 % des charges de phosphore. Toutefois, l'entrepreneur a souligné qu'une réduction de 90 % à 91 % des charges de phosphore a peu de chance d'être atteinte sans que des mesures supplémentaires soient prises.

En 2009, le PMVBLC a accordé un contrat à LimmoTech, Inc. pour qu'il conçoive un modèle de prévision de réaction du phosphore aux changements des charges externes dans le bassin versant de la baie Missisquoi. Les données découlant de cette modélisation permettront à l'entrepreneur de mener une étude sur les dynamiques temporelles et l'interaction des sédiments internes sur une base saisonnière. Cette étude examine l'importance des apports antérieurs de sédiments et des cycles internes des éléments nutritifs pour déterminer le point critique à partir duquel la réduction de la charge d'éléments nutritifs externes ne constituera plus un facteur déterminant quant à la qualité de l'eau dans la baie Missisquoi. Ce projet devrait être terminé au début de 2012. Les résultats préliminaires n'ont pas encore été communiqués.

Demande de propositions

À la lumière des résultats des ateliers, les sources critiques de phosphore ont été définies comme l'intersection d'une source d'accumulation de phosphore en quantité excessive et d'un mécanisme de transport, généralement un cours d'eau. Une demande de propositions a été élaborée conjointement par le Groupe d'étude international sur la baie Missisquoi de la CMI et le Groupe de travail de la baie Missisquoi du PMVBLC. Le résultat de la proposition choisie serait la détermination des sources critiques de pollution par le phosphore dans le bassin de la baie Missisquoi, permettant ensuite aux gestionnaires de ressources de réduire les charges de phosphore dans le bassin versant de la baie Missisquoi. Pour ce faire, il fallait procéder à l'identification et à la délimitation des parties vermontaises du bassin qui polluent de façon considérablement disproportionnée la baie Missisquoi, afin de cibler efficacement les ressources limitées pour réduire les charges de phosphore. La demande de propositions a été soumise le 25 janvier 2010. Les soumissionnaires avaient jusqu'au 5 mars 2010 pour présenter leurs propositions. Au terme d'un processus de sélection concurrentiel, le projet a été attribué à Stone Environmental, Inc. au printemps 2010.

Projet de détermination des sources critiques

Stone Environmental a proposé d'établir les paramètres d'une version mise à jour de l'outil SWAT, et d'y ajouter une fonction de source variable (VSA), ce qui permettrait au modèle SWAT d'identifier plus précisément les sources critiques dans le bassin versant de la baie Missisquoi. Une fois la modélisation SWAT-VSA terminée, Stone Environmental a proposé d'appliquer le modèle à un niveau stratégique pour identifier les secteurs de sources critiques du bassin versant de la baie Missisquoi. Les objectifs subséquents au niveau stratégique étaient les suivants : évaluer la réduction possible des charges de phosphore pour élaborer une série de meilleures pratiques de gestion qui pourraient être mises en œuvre dans le bassin versant de la baie Missisquoi; comparer des meilleures pratiques de gestion prises au hasard visant la réduction des charges de phosphore avec des meilleures pratiques de gestion mises en application spécifiquement dans les sources critiques; comparer les résultats obtenus par la modélisation SWAT-VSA avec des techniques SIG multidimensionnelles simplifiées qui pourraient être appliquées à d'autres secteurs du bassin du lac Champlain; évaluer les changements liés aux charges de phosphore par rapport aux changements liés aux précipitations et à la température prévus par les principaux modèles de changements climatiques. Sur le plan tactique, Stone Environmental a proposé d'explorer la possibilité d'utiliser des données d'entrée précises et propres aux sites et une résolution spatiale accrue afin de mieux déterminer et classer les sources critiques à l'échelle de la ferme.

La première tâche entreprise par Stone Environmental a été d'élaborer un Plan d'assurance de la qualité (PAQ) en vertu duquel la qualité de tous les travaux menés dans le cadre du projet mentionné pourrait être assurée. Une fois le PAQ approuvé par les maîtres d'ouvrage, Stone Environmental a commencé à recueillir les données liées au modèle et à procéder au paramétrage de ce dernier. Stone Environmental a formé un comité consultatif de projet en recrutant des experts provenant d'institutions fédérales, étatiques, privées et académiques de la région qui connaissent les pratiques d'utilisation des sols appliquées dans le bassin versant de la baie Missisquoi, les règlements régissant ces pratiques, et le problème principal que constitue la qualité de l'eau dans la baie. Ce comité consultatif s'est entretenu

avec Stone Environmental à trois reprises afin de lui fournir des conseils concernant des aspects spécifiques du projet, tels que l'acquisition et la disponibilité des données, l'interprétation des données disponibles, les hypothèses de paramétrage pour le modèle et la calibration et la validation du modèle.

Paramétrage du modèle SWAT

Pour le paramétrage du modèle, Stone Environmental a recueilli des données provenant de diverses sources. Ces données ont été obtenues principalement auprès d'organismes fédéraux et étatiques, de ministères provinciaux, d'institutions académiques locales et de la communauté agronomique œuvrant dans le bassin versant de la baie Missisquoi, afin d'aiguiller les modèles, à la fois sur le plan stratégique et tactique.

Données topographiques

Les données LiDAR obtenues récemment (cartographie par balayage au moyen d'un laser aéroporté), combinées au modèle d'élévation hydrographique, ont permis d'obtenir les modèles numériques DEM (digital elevation model) nécessaires aux fins d'analyse topographique de la partie vermontoise du bassin versant. Les données numériques d'élévation du Canada (DNEC) ont permis d'obtenir des données topographiques de la partie québécoise du bassin. Une couche de données relatives à l'indice topographique du bassin versant a alors été créée à partir des modèles numériques DEM à une résolution de 10-m, permettant ainsi de déterminer les trajets d'écoulement des eaux pour délimiter les unités de réponse hydrologiques (URH). La couche de données relatives à l'indice topographique indique les zones de saturation accrue et l'écoulement de surface excédentaire possible. Les données topographiques LiDAR ont également été utilisées dans les zones sélectionnées dans le cadre des analyses tactiques.

Données météorologiques et climatiques

Les données météorologiques et climatiques proviennent de projets portant sur les données climatiques, tels que PRISM, le National Climatic Data Center (NCDC) et l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Ces données ont été compilées dans le modèle SWAT en vue d'établir des données historiques climatiques propres au bassin versant de la baie Missisquoi, afin de calibrer le modèle aux fins d'exécution des simulations de ruissellement quotidien.

Données sur l'utilisation des sols

Les données sur l'utilisation des sols au Vermont ont été obtenues principalement auprès du Spatial Analysis Laboratory de l'université du Vermont et du National Land Cover Dataset; les deux jeux de données datent de 2001. Les données sur l'utilisation des sols au Québec datent de 2001 et ont été obtenues auprès de l'IRDA. Stone Environmental a procédé à la fusion de ces jeux de données pour créer une couche hybride d'utilisation des sols afin de tirer profit des forces de l'ensemble des jeux de données et des nouvelles améliorations apportées. Des jeux de données supplémentaires ont été obtenus pour mieux classer les champs agricoles, les fermes, les routes, les plans d'eau et les cours d'eau, de même que les zones humides.

Données sur les sols

Il est extrêmement important de disposer de données exactes sur les sols afin d'identifier correctement les URH dans le modèle SWAT. Le jeu de données provenant du Soil Survey Geographic database (SSURGO), créé par la USDA-NRCS en 2009, a été obtenu en tant que couche de données de base sur les sols au Vermont. Des données supplémentaires ont été obtenues de la part de l'IRDA pour le Québec. Ces deux jeux de données principaux ont été fusionnés en une couche de données hybrides sur les sols pour le bassin versant de la baie Missisquoi et intégrées au modèle SWAT.

Teneurs en phosphore du sol

Ce type de données est un des types de données difficiles à obtenir et essentielles au modèle SWAT. La disponibilité de ces données pour le bassin versant Missisquoi est très limitée. Les données disponibles proviennent principalement des municipalités, ce qui fait qu'il est très difficile d'établir une référence spatiale pour les teneurs en phosphore du sol dans le bassin versant. Les teneurs en phosphore du sol disponibles ont été évaluées et mises en concordance avec les utilisations des sols connues pour les régions à l'étude. Une série de valeurs par défaut pour les teneurs en phosphore du sol a alors été attribuée à chacune des catégories d'utilisation des sols identifiées dans le modèle SWAT.

Données agronomiques

Le paramétrage du modèle pour des pratiques agronomiques spécifiques s'est avéré très ardu, puisque la plupart des données qui existent sont confidentielles et non accessibles, et ne peuvent donc pas être intégrées dans la modélisation SWAT-VSA. Pour remédier à ce problème, Stone Environmental s'est principalement fié sur les valeurs par défaut de la modélisation SWAT-VSA et a modifié ces valeurs en fonction des données obtenues des spécialistes dans le domaine et des renseignements obtenus de la part des communautés agricoles du bassin versant. Finalement, compte tenu de la rareté des données disponibles, des hypothèses éclairées ont été formulées concernant les pratiques de rotation des cultures et les taux d'épandage du fumier.

Autres sources de données

Les données concernant les terres urbaines et les terres aménagées, les chaussées revêtues en dur et non revêtues en dur et les applications d'engrais en milieu résidentiel ont été traduites en modifiant les valeurs par défaut de la modélisation SWAT-VSA pour ces paramètres, à la lumière des renseignements anecdotiques sur la région Missisquoi. Les caractéristiques du chenal des cours d'eau ont été paramétrées au moyen de données d'évaluation géomorphologique fournies par la Vermont Agency of Natural Resources, une étude sur l'érosion des rives de la rivière Missisquoi menée parallèlement par le USDA National Sedimentation Laboratory, et de données sur les sols recueillies par le NRCS et la University of Vermont.

Réseau hydrologique amélioré

Les données LiDAR disponibles pour pratiquement toute la partie vermontoise du bassin versant Missisquoi ont permis d'élaborer un réseau hydrologique amélioré pour cette portion du bassin. Ainsi, il a été possible de procéder à la délimitation des eaux secondaires dans le bassin (fossés, criques, voies d'écoulement de surface) et à la connexion de ces éléments aux affluents principaux pour, finalement, délimiter l'apport des sédiments et des éléments nutritifs au réseau des affluents principaux. À partir de ces renseignements, la proximité hydrologique des sources de phosphore au réseau hydrologique a pu être calculée. Les sources de données appliquées dans cet exercice sont décrites ci-dessus, dans la section portant sur les données topographiques.

Calibration et validation du modèle

Les exercices concernant la calibration et la validation du modèle ont été menés au moyen des sources de données décrites ci-dessus. La période de calibration a commencé le 1^{er} octobre 2005 et s'est terminée le 30 septembre 2010, et la période de validation a débuté le 1^{er} octobre 2001 et a pris fin le 30 octobre 2005. Les activités de calibration et de validation ont fait l'objet d'examen portant sur l'hydrologie, les charges de sédiments et les charges de phosphore. Une fois que le modèle a été calibré et validé relativement aux composantes hydrologiques, les composantes liées aux sédiments et au phosphore ont elles aussi été calibrées, puisque ces activités sont fonction d'une composante hydrologique exacte. Dans l'ensemble, le modèle a atteint ou dépassé toutes les cibles préétablies. Les simulations du modèle ont semblé ne pas prendre en compte, dans la composante hydrologique, certaines périodes de forts débits durant lesquelles des événements majeurs sont survenus. Cette modeste erreur a été reprise ultérieurement et a eu une incidence sur les composantes liées aux sédiments et au phosphore. Toutefois, l'erreur d'estimation entre les données observées et simulées est bien inférieure aux seuils types, ce qui démontre que le modèle a été calibré de façon précise, en fonction des données disponibles.

Résultats du modèle

Analyse stratégique

Selon l'analyse effectuée au moyen de la modélisation SWAT-VSA, environ 59 % des charges moyennes annuelles de sédiments et 61 % des charges annuelles de phosphore proviennent des parties en amont du bassin versant; le restant des charges, tant pour les sédiments que pour le phosphore, provient des chenaux des cours d'eau. Ces conclusions cadrent avec celles d'une étude concomitante effectuée par le National Sedimentation Laboratory de la USDA Agricultural Research Station, qui portait sur les charges de sédiments et de phosphore provenant des rives du cours principal de la rivière Missisquoi et de cinq de ses affluents secondaires (le rapport sera publié au début de 2012; veuillez consulter le projet BSTEM mentionné ci-dessus pour obtenir davantage de renseignements). L'analyse effectuée au moyen de la modélisation SWAT-VSA a aussi estimé qu'environ 20 % du bassin versant génère possiblement près de 74 % du phosphore total exporté dans la zone à l'étude. Cette charge de phosphore provient des parties en amont du bassin versant.

Les renseignements sur les sources critiques fournis au moyen de la modélisation SWAT-VSA seront extrêmement utiles pour l'optimisation des ressources en gestion afin de cibler les sources critiques de phosphore dans le bassin versant de la baie Missisquoi. Une analyse de l'utilisation des terres représentative dans le bassin versant démontre que les champs en rotation maïs-foin et maïs-soya sont ceux qui contribuent le plus à l'apport annuel de phosphore dans le bassin, suivi par les terres forestières et les cultures de foin. Les terres forestières sont d'importants contributeurs parce qu'elles occupent une partie considérable de la superficie du bassin; toutefois, acre pour acre, les terres forestières ne contribuent que très peu à l'apport de phosphore dans le bassin. Pour obtenir des renseignements plus précis, veuillez consulter le tableau 3.4 qui se trouve dans le rapport ci-joint.

Les facteurs qui, selon l'analyse, influent le plus sur les exportations de phosphore incluent une combinaison des éléments suivants : les sols hydrologiques (sols dans lesquels on trouve davantage de sable ou d'argile), les pentes et la proximité aux voies d'eau. Selon l'analyse, les sous-bassins versants dont le pourcentage de terres agricoles est le plus élevé (c.-à-d. les rivières de la Roche, Mud Creek et les autres) affichent les charges de phosphore les plus importantes dans le bassin versant de la baie Missisquoi. Les sous-bassins versants fortement boisés (c.-à-d. la rivière Trout et Tyler Branch) présentent les charges de phosphore les plus faibles. Une analyse des 109 811 unités de réponse hydrologiques (URH) recensées dans le modèle a permis de démontrer que 6 145 d'entre elles pouvaient être incluses dans la catégorie des sources critiques (les 103 666 unités restantes n'étaient pas situées près d'une voie d'eau). Les URH affichant les charges de phosphore les plus élevées étaient supérieures à 2 kg de P/hectare et comportaient des champs agricoles et des fermes.

Meilleures pratiques de gestion et ciblage

Une analyse a été effectuée afin de déterminer l'utilité de cibler des zones spécifiques du bassin versant (sources critiques) afin d'y mettre en œuvre des meilleures pratiques de gestion, comparativement à une application aléatoire des meilleures pratiques de gestion dans une région donnée, comme c'est le cas généralement dans la pratique actuelle. La culture de protection, la gestion des éléments nutritifs et la rotation des cultures ont été sélectionnées en raison de la disponibilité des données et de leur compatibilité avec la modélisation SWAT-VSA. Les simulations du modèle ont permis d'estimer que la mise en œuvre de ces trois meilleures pratiques de gestion dans les sources critiques ciblées donnerait lieu à des améliorations par facteurs de 1,8, de 2,1 et de 2,9 pour la gestion des éléments nutritifs, la culture de protection et la rotation des cultures, respectivement, comparativement à ce que pourrait permettre la mise en œuvre aléatoire des meilleures pratiques. Ces résultats représenteraient une diminution estimée de plus de 11 000 kg de phosphore annuellement, si les trois meilleures pratiques de gestion étaient mises en œuvre dans les zones critiques ciblées (20 %) présentant les charges de phosphore les plus élevées.

Comparaison de l'identification des SC au moyen de la modélisation SWAT et de l'identification des SC au moyen des outils SIG

Une analyse SIG simplifiée et comportant moins de données a été effectuée pour déterminer les sources critiques dans le bassin versant de la baie Missisquoi au moyen de l'imagerie télédétection disponible et des types d'utilisations des sols connus dans le bassin versant. Les résultats obtenus ont ensuite été

comparés aux SC déterminées dans l'analyse des SC effectuée avec la modélisation SWAT-VSA. Dans l'ensemble, les résultats étaient similaires pour les zones agricoles, les zones urbaines denses et les zones boisées du bassin versant. Les résultats découlant de l'analyse effectuée avec la modélisation SWAT-VSA pourraient servir plus efficacement pour mettre à jour le modèle SIG utilisé pour les classes comprenant les zones humides, les zones broussailleuses, et les zones urbaines non aménagées aux fins d'analyses ultérieures, et particulièrement pour effectuer une analyse des SC dont la portée s'étendrait à d'autres segments du bassin versant du lac Champlain.

Analyse des changements climatiques

Compte tenu des récentes préoccupations concernant les répercussions possibles que pourraient avoir les changements climatiques, deux scénarios climatiques ont été évalués pour prévoir les changements possibles auxquels pourraient être sujets les charges de phosphore dans le bassin versant de la baie Missisquoi. Les deux scénarios ont été sélectionnés pour représenter les limites supérieures et inférieures des répercussions climatiques prévues sur le bassin versant. Ces modèles ont également été sélectionnés en fonction de l'étude récemment menée dans le bassin versant de la rivière LaPlatte du lac Champlain (Perkins 2011). Dans l'ensemble, on prévoyait que la charge des sédiments augmenterait de 21 % à 57 %, de 2041 à 2070, par rapport à la base de référence générée pour les besoins de cette analyse, et que la charge de phosphore passerait, quant à elle, de 13 % à 46 %. Ces augmentations ne surviendraient pas de façon uniforme dans la zone ciblée. En effet, ce sont les cultures de foin et les pâturages qui présenteraient les plus importantes augmentations de sédiments et de phosphore. Pour leur part, les fermes, les routes et les zones humides afficheraient les augmentations les plus faibles.

Analyse tactique

Le réseau hydrologique amélioré a été utilisé pour cerner les caractéristiques hydrologiques dans la partie vermontoise du bassin versant de la baie Missisquoi qui pourraient connecter des sources de phosphore au réseau d'affluents. Ces données s'ajoutent aux évaluations effectuées avec la modélisation SWAT-VSA visant à déterminer les charges de phosphore total correspondant à chaque unité de paysage. La classification selon la proximité des points d'eau et par charge de phosphore total a été désignée pour l'ensemble des données. Un barème de pondération a été élaboré pour ensuite procéder au classement des SC dans l'ensemble du bassin versant en fonction des deux mesures susmentionnées. Des employés de terrain formés ont visité 19 sites relevés par le modèle et ils ont convenu que 17 des évaluations effectuées par le modèle étaient pertinentes (s'il s'agit d'une source critique ou non).

À l'échelle de la ferme, une exploitation laitière conventionnelle, située à Franklin et comptant 100 vaches, a été sélectionnée aux fins d'une analyse tactique des sources critiques. Il y a également un affluent secondaire tout près de l'enclos de la ferme. Le fermier avait mis en œuvre plusieurs meilleures pratiques de gestion sur la ferme; elles ont d'ailleurs été intégrées dans l'analyse tactique. Le modèle APEX (*Agricultural Policy Environmental Extender Model*) a été utilisé pour identifier les sources critiques de phosphore au niveau de la ferme et pour évaluer l'efficacité des meilleures pratiques de gestion qu'une ferme peut avoir et qui ont été conçues spécifiquement pour elle. De concert avec l'agriculteur, de nouvelles pratiques de gestion ont été explorées et intégrées au modèle APEX pour la ferme en

question. De plus, à l'aide des nouvelles pratiques de gestion, des réductions du ruissellement de phosphore en provenance de la ferme ont été simulées. On a estimé que les zones tampons, situées le long des voies d'eau, pouvaient réduire jusqu'à 55 % l'apport en phosphore provenant des champs, et que les voies d'eau engazonnées pouvaient réduire jusqu'à 30 % l'apport en phosphore. Une zone tampon mise en place récemment entre l'enclos de l'exploitation agricole et l'affluent peut réduire, selon les estimations, jusqu'à 60 % du ruissellement de phosphore provenant de l'enclos. Les autres meilleures pratiques de gestion qui pourraient être mises en place sur la ferme comprennent des cultures en courbes de niveau, l'ajout de voies d'eau engazonnées et la conversion de certains champs qui étaient réservés à la culture du maïs en des champs dans lesquels une rotation de culture (maïs-foin) pourrait être exercée. Ces pratiques pourraient réduire de 8 % à 40 % le ruissellement de phosphore, selon l'endroit où chaque pratique serait mise en place. Cet exercice a démontré que pour les fermes possédant des registres agronomiques détaillés, le modèle APEX peut être utilisé aux fins d'estimation tactique des réductions des charges de phosphore actuelles et futures provenant d'une ferme donnée.

Conclusions, synopsis des examens techniques et prochaines étapes

L'analyse du bassin versant Missisquoi effectuée au moyen de la modélisation SWAT-VSA fournit des renseignements très utiles sur l'optimisation des ressources de gestion en vue de réduire les charges de phosphore dans la baie Missisquoi du lac Champlain. Les parties en amont du bassin versant apportent jusqu'à 60 % du phosphore total dans la rivière Missisquoi, le 40 % restant est largement attribuable à l'érosion des rives. Cette estimation a été validée, à titre provisoire, par un projet de modélisation distinct (BSTEM) dont l'achèvement est prévu pour le début de 2012. Environ 20 % de la partie en amont du bassin versant apporte jusqu'à 75 % du phosphore dans le réseau d'affluents. L'analyse des diverses utilisations des terres dans le bassin versant illustre les contributions disproportionnées de chacune de ces classes d'utilisations des terres. Par exemple, les terres agricoles représentent approximativement 17 % des zones composant le bassin versant Missisquoi, mais 65 % des charges de phosphore dans la baie Missisquoi peut être attribuable à l'agriculture dans le bassin versant.

Le fait de cibler des zones de sources critiques de phosphore dans le bassin versant afin d'y mettre en œuvre des meilleures pratiques de gestion plutôt qu'une application aléatoire des meilleures pratiques de gestion peut doubler, voire tripler, la réduction de phosphore. Une évaluation des scénarios liés aux changements climatiques a démontré que les charges de sédiments et de phosphore pourraient augmenter de 21 à 57 % et de 13 à 46 %, respectivement, et que ces augmentations proviendront majoritairement des cultures de foin et des pâturages. L'analyse effectuée, de façon tactique, à l'échelle de la ferme, a permis de cerner les réductions possibles de phosphore grâce aux meilleures pratiques de gestion qui ont déjà été mises en place, et aux meilleures pratiques de gestion qui pourraient être mises en application ultérieurement. Cette façon de procéder peut être très utile aux fermes qui disposent de registres agronomiques détaillés et précis.

Des examens techniques du rapport final, publié par Stone Environmental, ont été effectués par dix membres du Comité consultatif technique du PMVBLC et par quatre autres experts indépendants dont l'identité est demeurée confidentielle. Tous possédaient une connaissance approfondie des travaux liés à la modélisation SWAT. Dans l'ensemble, les résultats des examens se sont avérés très

positifs. Tous les experts ont fait part de leur opinion positive concernant les travaux qu'a réalisés Stone Environmental durant la courte durée du projet. En tant qu'auteurs, ils ont eux-mêmes indiqués dans leur rapport que l'un des plus grands défis qu'a présenté ce projet avait été d'obtenir des données actuelles et précises pour alimenter le modèle. Pour plusieurs paramètres du modèle (notamment les teneurs de phosphore dans le sol), les fermiers et les organismes fédéraux ont obtenu des données qui pourraient être utiles d'inclure dans le modèle pour ce projet. Cependant, elles n'ont pas pu être communiquées au consultant parce qu'elles étaient protégées par des ententes de confidentialité.

Bien que le processus d'évaluation par les pairs ne soit pas encore terminé, et que certaines corrections d'ordre rédactionnel doivent être apportées par le consultant, le PMVBLC est très satisfait des efforts déployés. Nous prévoyons utiliser les précieux renseignements contenus dans le rapport final sur l'analyse des zones critiques rédigé par Stone Environmental afin d'optimiser les efforts de mise en œuvre éventuelle.

Remerciements

Le PMVBLC aimerait remercier la Commission mixte internationale et le Groupe d'étude international sur la baie Missisquoi de la CMI pour leur appui au projet. Nous aimerions également remercier les membres du comité consultatif technique du PMVBLC, en particulier Eric Smeltzer (VT ANR), Kip Potter (USDA NRCS-VT), Laura DiPietro (VT AAFM), et Mike Winslow (comité du lac Champlain), ainsi que tous ceux qui ont fait partie du comité consultatif du projet pour leurs conseils judicieux et leurs instructions du début du projet jusqu'à la révision du rapport final. Nous souhaitons aussi remercier les résidents du bassin versant de la baie Missisquoi pour avoir collaboré avec nos consultants et fourni des données et des commentaires sur leurs pratiques agronomiques afin d'aider à améliorer la précision de la modélisation SWAT-VSA. Ce projet sera d'une aide considérable dans l'orientation de nos efforts de gestion pour atteindre notre objectif commun, soit l'amélioration de la qualité de l'eau dans le bassin versant de la baie Missisquoi et dans le lac Champlain.

Références

Adhikari, B.K., C.A. Madramootoo, A. Sarangi. 2010. *Temporal variability of phosphorus flux from Pike River watershed to the Missisquoi Bay of Quebec*. Current Science 98 (1), p. 58 à 64.

Michaud, A.R., M.R. Laverdiere, 2004. *Cropping, soil type and manure application effects on phosphorus export and bioavailability*. Revue canadienne de la science du sol, 84 (3), p. 295 à 305. DOI : 0.4141/S03-014.

Michaud, A.R., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn, et C.A. Madramootoo. 2007. *SWAT- predicted influence of different landscape and cropping system alterations on phosphorus mobility within the Pike River watershed of south-western Québec*. Revue canadienne de la science du sol, 87 (3), p. 329 à 344.

Neitsch, S. L., J. G. Arnold, T. R. Kiniry, et J. R. Williams. 2002a. *Soil and Water Assessment Tool:Users Manual Version 2000*. Rapport N° TR-192. College Station,Texas: Texas Water Resources Institute.

Perkins, E. 2011. *Recommendations on climate change scenarios representing the range in projected P loading*. Communication personnelle.

Rotz, C.A., et C.U. Coiner. 2006. *Integrated Farm System Model (IFSM): Reference Manual Version 2.0*. Agricultural Research Service, USDA.
<http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=8519>

Simard, G., P. Enright, C. Madramootoo, 2004. *Comparison of experimental and simulated results for nutrients transport on agricultural fields in Quebec*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. Numéro de publication 042156.