

Memphrémagog
MRC



SMi

AMÉNATECH INC.





SMⁱ

AMÉNATECH INC.

Rapport final

Modélisation du transport du phosphore sur l'ensemble du bassin versant du lac Memphrémagog

Présenté à :

Madame Christine Labelle
MRC de Memphrémagog
455, rue MacDonald, bureau 200
Magog (Québec) J1X 1M2

Karine Vézina, géo., M. Env.
Chargée de projet

Jacques Désilets, géo., M. Sc.
Directeur de projet

N/Réf. : F0910384-001
Décembre 2009



Table des matières

AVANT-PROPOS.....	1
SOMMAIRE EXÉCUTIF	3
INTRODUCTION	7
1. MISE EN CONTEXTE MÉTHODOLOGIQUE	9
1.1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE MODÉLISATION.....	9
1.2 CRITÈRES ET NORMES DE QUALITÉ DE L'EAU.....	9
1.3 BASE DE DONNÉES GÉOMATIQUE.....	10
1.3.1 <i>Utilisation du sol</i>	12
1.3.2 <i>Pédologie</i>	15
1.3.3 <i>Topographie et hydrographie</i>	17
1.3.4 <i>Sources ponctuelles</i>	17
1.4 REVUE DE LA LITTÉRATURE	18
1.4.1 <i>Modèles existants pour l'estimation des charges en P</i>	18
1.4.2 <i>Équations de bilan de masse</i>	22
2. MÉTHODOLOGIE	25
2.1 APERÇU GÉNÉRAL.....	25
2.2 ESTIMATION DES CHARGES DE P ENTRANTES DANS LE LAC.....	26
2.2.1 <i>Structuration topologique du réseau hydrographique</i>	26
2.2.2 <i>Attribution des coefficients d'exportation et des charges moyennes de P</i>	27
2.2.3 <i>Attribution d'un coefficient de rétention (R_p) du P pour les lacs</i>	30
2.3 CALCUL D'UN BILAN DE MASSE	32
3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	35
3.1 CHARGES DE P ENTRANTES DANS LE LAC MEMPHRÉMAGOG	35
3.2 SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES EXPORTATIONS.....	39



3.3 BILAN DE MASSE	41
DISCUSSION	45
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	49
RÉFÉRENCES	51

Liste des annexes

- Annexe 1 : Carte d'utilisation du sol
- Annexe 2 : Carte pédologique
- Annexe 3 : Carte des pentes
- Annexe 4 : Carte des sources ponctuelles
- Annexe 5 : Sommaire des calculs des charges de P aux exutoires des quatre principaux affluents aux États-Unis
- Annexe 6 : Carte des charges de P exportées (kg/an) par unité de drainage : scénario de modélisation retenu (CE3-MR3)
- Annexe 7 : Carte des charges de P exportées pondérées (kg/km²/an) selon la superficie des unités de drainage: scénario de modélisation retenu (CE3-MR3)



Liste des figures

Figure 1 : Bassin versant du lac Memphrémagog.....	11
Figure 2 : Matrices pour l'assignation d'un groupe hydrologique de sol.....	16
Figure 3 : Exemple d'une approche par bilan de masse.....	23
Figure 4 : Découpage du bassin en unités de drainage (extrait).....	27
Figure 5 : Charges de P modélisées (T de P/an) à l'exutoire des bassins principaux...	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Utilisation du sol à l'échelle du bassin.....	14
Tableau 2 : Principales caractéristiques des modèles recensés	19
Tableau 3 : Grille d'analyse des modèles de simulation des apports en P recensés....	21
Tableau 4 : Coefficients d'exportation de P (kg/km ² /an) retenus.....	28
Tableau 5 : Charges de P exportées pour chacune des stations d'épuration des eaux usées	30
Tableau 6 : Coefficients de rétention des lacs canadiens estimés selon les deux méthodes de calcul.....	32
Tableau 7 : Exportations potentielles de P (T/an) par les unités spatiales d'utilisation du sol	35
Tableau 8 : Bilan global des charges (T/an) de P modélisées.....	36



Tableau 9 : Comparaison des charges de P (T/an) modélisées et estimées à l'exutoire des quatre principaux affluents en territoire américain	37
Tableau 10: Charges de P (T/an) modélisées entrantes dans le lac en territoire américain et canadien	38
Tableau 11: Scénarios de réduction des exportations	40
Tableau 12 : Concentrations calculées selon l'équation de bilan de masse.....	41



Équipe de travail

Directeur de projet :	Jacques Désilets, géo., M. Sc.
Chargée de projet :	Karine Vézina, géo., M. Env.
Équipe de soutien :	Simon Perron, géomatique. Maude Sundborg, géomatique.
Collaboration scientifique :	Isabelle Beaudin, IRDA, Professionnelle de recherche - Conservation des sols et de l'eau.



AVANT-PROPOS

Cette version révisée du rapport final « Modélisation du transport du phosphore sur l'ensemble du bassin versant du lac Memphrémagog » qui a été déposé à la MRC en septembre 2009 intègre les réponses aux questions et commentaires transmis par écrit en novembre 2009 par le Memphrémagog Conservation Inc. (MCI), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) ainsi que le Vermont Agency of Natural Resources (VANR).

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Au cours des dernières années, les différents inventaires, campagnes d'échantillonnage et études réalisés ainsi que les récents épisodes de floraison de cyanobactéries démontrent que des apports excessifs de nutriments et de sédiments dégradent la qualité de l'eau du lac Memphrémagog.

De manière générale, le mandat confié par la MRC de Memphrémagog à Aménatech inc, une division du Groupe S.M., consistait, dans un premier temps, à réaliser un travail de concertation entre les différents partenaires, gestionnaires du territoire, acteurs du milieu et instances gouvernementales afin de regrouper les données essentielles à la modélisation. Dans un second temps, à modéliser le transport du phosphore (P) total sur l'ensemble du bassin versant du lac dans le but d'identifier et de quantifier les apports en P dans le lac ainsi que d'établir le bilan de masse du P.

La méthodologie utilisée reposait sur trois (3) grandes étapes méthodologiques successives, soit :

- l'estimation des charges annuelles de P entrantes dans le lac Memphrémagog par l'utilisation de coefficients d'exportation de P ($\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$) pour les sources diffuses et de charges moyennes de P (kg/an) pour les sources ponctuelles présentes sur le territoire;
- l'évaluation de l'impact de différents scénarios de réduction des exportations sur les charges de P entrantes dans le lac ainsi que l'estimation de la contribution des activités humaines dans les apports en P dans le lac par la modélisation d'un scénario d'utilisation du sol dit « état de référence » (sans action anthropique); et
- l'application d'un modèle de bilan de masse pour la transformation des charges entrantes de P en concentrations ambiantes dans le lac selon la dynamique interne de ce dernier.

De par son importante superficie ($1\,782\text{ km}^2$) et son caractère international (71 % en territoire canadien et 29 % en territoire américain), le bassin versant du lac Memphrémagog représentait un défi de taille pour l'élaboration d'une base de données (B.D.) numériques uniques (comparables d'un bout à l'autre du territoire) nécessaire à la caractérisation des composantes physique et humaine qui régissent la dynamique du P. La participation de plusieurs intervenants dans le cadre de ce mandat a favorisé la mise en commun d'information géographique pertinente nécessaire à la création de la B.D. géomatique. La mise en commun d'information spatiale dans certains cas très différente, notamment, dans la nomenclature utilisée ainsi que dans le niveau de détails a nécessité de nombreux efforts pour l'agrégation et la mise à jour des données.

Les bâtiments potentiellement desservis par une fosse septique et six (6) stations d'épuration des eaux usées représentent les sources ponctuelles de P répertoriées dans la B.D. auxquelles des charges moyennes de P (kg/an) ont été attribuées. Quant aux sources diffuses, elles sont représentées par quatorze (14) classes d'utilisation du sol (ex. : terre en culture, prairie et pâturage, milieu humide) auxquelles des coefficients d'exportation de phosphore ($\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$) ont été associés.

La création dans le SIG d'un environnement de modélisation unique pour ce mandat a permis une plus grande flexibilité quant aux variables pouvant être considérées lors de la modélisation et conséquemment, a nécessité la contribution technique et scientifique de plusieurs intervenants dans le cadre du projet. La collaboration scientifique de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) a permis de raffiner les coefficients d'exportation de P associés à la classe d'utilisation du sol « terre en culture » en considérant non seulement une variété de cultures, mais aussi la pédologie comme seconde variable. La contribution technique du MDDEP dans le cadre du projet a permis de tenir compte du rôle des lacs, dans ce cas-ci, de plus de 2 ha comme milieux de rétention lors du transport du P de l'amont vers l'aval du bassin. Considérant que la plupart des études de modélisation du P à l'échelle d'un bassin versant ne tiennent pas compte de cette composante importante dans la dynamique du P, il importe de mentionner la plus value de cette approche sur la représentativité des charges de P modélisées. Par ailleurs, la souplesse de l'environnement de modélisation créé a permis de tester différents scénarios de modélisation (selon différents coefficients d'exportation et modèles de rétention pour les lacs) et conséquemment, d'identifier le scénario le plus représentatif de la situation actuelle.

Bien qu'aucune validation des charges modélisées n'ait été possible en territoire canadien, les résultats de comparaison des charges modélisées avec les charges estimées à l'exutoire des quatre principaux affluents échantillonnés en territoire américain (rivières Black, Clyde, Barton et Johns) nous permettent de confirmer la représentativité des résultats obtenus. Précisons que ces affluents drainent à eux seuls 66 % de l'ensemble du bassin versant du lac Memphrémagog. La validation indique que peu importe le scénario de modélisation utilisé, l'ordre de grandeur des charges modélisées versus celles estimées est conservé. De manière absolue, le scénario CE3-MR3 modélise, dans tous les cas, des charges de P qui se situent à l'intérieur des intervalles de confiance des valeurs estimées, soit généralement près de la limite inférieure de l'intervalle. Précisons qu'il est fort probable que la modélisation sous-estime les charges de P entrantes en raison, d'une part, de l'attribution de charges moyennes de P trop faibles pour les fosses septiques présentes dans le bassin. D'autre part, du niveau de généralisation de la classification de l'utilisation du sol qui ne permet pas de représenter toutes les subtilités dans l'utilisation du territoire qui modulent les exportations de P. Finalement, de la présence de sources ponctuelles de P non inventoriées dans la base de données géomatique.

Par ailleurs, il est possible qu'une partie des plans d'eau ayant une superficie entre 2 ha et 4 ha et identifiés dans le cadre de cette étude n'agissent pas comme décanteurs du P, mais plutôt comme sources de P tels des milieux humides. L'utilisation du seul critère de superficie pour attribuer une rétention au plan d'eau peut

être une source de biais dans l'exportation totale. Considérant que la rétention des lacs, selon le scénario retenu, diminue de 31 % les exportations potentielles de P entrantes dans le lac, il est fort probable que les charges de P entrantes dans le lac soient sous-estimées.

Nonobstant le scénario de modélisation utilisé, le portrait global des exportations de P sur l'ensemble du bassin est le même : le P arrivant au lac Memphrémagog provient à environ 72 % du territoire américain et à environ 28 % du territoire canadien. Si l'on considère la proportion du bassin versant situé aux États-Unis (71 %) et au Canada (29 %), les territoires américain et canadien contribuent de façon équivalente dans les apports en P au lac.

Globalement, près de 20 % du territoire serait responsable de l'exportation d'environ 40 % des charges vers le lac Memphrémagog. L'utilisation du sol est un facteur prépondérant dans les apports de P dans les cours d'eau, tout comme la position hydrologique des unités à l'intérieur du bassin qui module de manière importante les apports en P vers l'aval. Au total, 11 % des charges entrantes dans le lac proviennent des unités dont l'écoulement dirigé directement vers le lac Memphrémagog est susceptible d'avoir un impact plus grand dans la zone littorale.

Les unités de drainage occupées principalement par de la forêt et situées en tête de bassin, et pour lesquelles quelques lacs se trouvent à l'intérieur du parcours hydrologique du P exporté vers l'aval, contribuent pour une part moins importante dans les apports en P au lac. Tandis que les unités occupées principalement par des terres en culture, des milieux humides et/ou des zones résidentielles (incluant la présence de bâtiments avec une fosse septique) et qui sont situées en bordure du lac ou qui n'ont pas de lac sur leur parcours hydrologique contribuent de manière significative aux apports en P.

Plus particulièrement, les unités qui ont une charge pondérée plus importante sont, notamment, celles à l'intérieur desquelles on retrouve les villes de Newport, de Magog et de Barton. Bien que contrairement aux villes de Magog et de Newport, la ville de Barton ne soit pas située en bordure du lac Memphrémagog, aucun lac n'est présent sur son parcours hydrologique vers l'aval. De plus, les unités fortement occupées par des terres en culture et/ou des prairies/pâturages du côté américain et situées le long des rivières Black et Barton exportent une quantité importante de P vers le lac Memphrémagog. Par ailleurs, la présence importante de milieux humides auxquels des coefficients élevés d'exportation de P sont associés, selon les études récentes, contribuent de manière significative aux exportations de P dans les cours d'eau, notamment au niveau des unités situées à l'embouchure des rivières Black et Barton du côté américain.

Bien que d'ordre très général, les résultats des scénarios de réduction des exportations indiquent que pour réduire de manière significative les apports en P dans le lac, il importe de cibler les principaux exportateurs sur le territoire et ce, considérant les charges exportées associées ainsi que leur position hydrologique dans le bassin. La réduction des charges de P exportées par une source diffuse ou ponctuelle est modulée non seulement par la superficie du territoire occupée par cette dernière, mais

aussi par sa position dans le bassin. En agissant sur le territoire de façon ciblée, il sera possible de diminuer davantage les apports en P dans le lac tout en intervenant sur une fraction du territoire.

Les concentrations ambiantes de P dans le lac Memphrémagog calculées selon l'application de l'équation de bilan de masse aux charges entrantes modélisées sont sujettes à certains biais, notamment, en raison du manque de données permettant de caractériser avec exactitude la dynamique interne du lac Memphrémagog ainsi que de la sous-estimation des charges entrantes. Il importe de préciser qu'il est peu probable que le lac Memphrémagog, de par sa superficie importante et sa morphologie hétérogène, ait une dynamique interne du P similaire en tout point.

La modélisation du scénario dit « état de référence » (sans action anthropique) a permis de démontrer l'augmentation des apports en P dans le lac associée au développement du territoire. Il est important de mentionner que la concentration ambiante de P dans le lac calculée à partir des charges de référence modélisées ne peut être utilisée de façon absolue considérant, notamment, la sous-estimation probable des charges entrantes modélisées ainsi que les biais dans la méthode de calcul du coefficient de rétention des eaux du lac Memphrémagog.

En conclusion, la présente étude a permis de dresser un portrait global de la situation du transport du P sur l'ensemble du bassin versant du lac Memphrémagog, soit par l'identification des principaux contributeurs et zones génératrices de P sur le territoire.

De façon prioritaire, les résultats obtenus constituent un outil de discussion essentiel pour la prise de décision éclairée par les gestionnaires du territoire tant au niveau municipal que dans le cadre des activités du Comité directeur Québec/Vermont. Les zones contributrices identifiées dans le cadre de ce mandat doivent être considérées de façon prioritaire. La réduction des concentrations ambiantes de P dans le lac nécessitera une action concertée entre tous les utilisateurs du territoire.

Dans un second temps, plusieurs possibilités méthodologiques, notamment en ce qui concerne le raffinement de la modélisation, de la validation des charges de P entrantes et de l'estimation des concentrations ambiantes de P dans le lac, pourront être abordées au niveau du comité technique du Comité directeur Québec/Vermont afin d'évaluer leur applicabilité ainsi que leur plus value pour la suite des choses. Parallèlement, il serait intéressant de réaliser un suivi des charges de P aux principaux exutoires canadiens afin de valider les charges modélisées en territoire canadien.

Précisons que la modélisation de la dynamique interne du lac devra être la plus juste possible si l'on veut cibler des charges de P entrantes maximales pour atteindre les critères de qualité qui auront été fixés par le Comité directeur Québec/Vermont.

Par ailleurs, afin de permettre aux gestionnaires du territoire d'utiliser la B.D. géomatique créée dans le cadre du présent mandat, il est recommandé de créer une interface qui faciliterait, notamment, la mise à jour et l'ajout de données, la modification des coefficients d'exportation, la réalisation de scénarios de changements dans l'utilisation du sol, etc.

INTRODUCTION

Pour la majorité des 33 bassins versants prioritaires ciblés par la Politique nationale de l'eau de la province de Québec, la contamination des eaux de surface par des sources diffuses constitue le principal enjeu environnemental. À l'échelle provinciale, le problème de prolifération des cyanobactéries (algues bleu-vert) prend de l'ampleur alors que le nombre de lacs touchés est passé de 50 en 2005 à 71 en 2006.

Au cours des dernières années, les différents inventaires, campagnes d'échantillonnage et études réalisés ainsi que les récents épisodes de floraison de cyanobactéries démontrent que des apports excessifs de nutriments et de sédiments dégradent la qualité de l'eau du lac Memphrémagog.

De ce fait, la MRC de Memphrémagog a mandaté Aménatech inc, une division du Groupe S.M., afin de modéliser le transport du phosphore (P) total sur l'ensemble du bassin versant du lac dans le but d'identifier et de quantifier les apports en P dans le lac ainsi que d'établir le bilan de masse du P.

Le présent mandat s'inscrit dans le cadre d'un projet déposé par la MRC de Memphrémagog à la Conférence régionale des élus de l'Estrie et correspond aux orientations du Plan d'action de développement de l'Estrie 2007-2012. De plus, ce type de projet a fait l'objet d'une recommandation par le Comité directeur Québec/Vermont. Outre la MRC, les partenaires impliqués sont, notamment, le Comité directeur Québec/Vermont, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), le Comité de gestion du bassin versant de la rivière Saint-François (COGESAF), le Memphrémagog Conservation inc. (MCI) ainsi que le Vermont Agency of Natural Resources (VANR). Précisons qu'une représentante de l'équipe de travail de l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) a agité comme collaboratrice scientifique pour le développement de la méthodologie proposée.

De manière générale, le mandat confié consistait, dans un premier temps, à réaliser un travail de concertation entre les différents partenaires, les gestionnaires du territoire, les acteurs du milieu et les instances gouvernementales afin de regrouper les données essentielles à la modélisation. Dans un second temps, à modéliser la situation actuelle et à établir des scénarios de gestion du territoire.

Afin de bien cerner les contextes théorique et technique dans lesquels s'insèrent l'approche méthodologique utilisée, sont présentés dans le chapitre 1 la problématique et les objectifs principaux du mandat, les critères et normes de qualité de l'eau en territoire américain et canadien ainsi que les principales étapes de travail qui ont mené à la création de la base de données géomatique.

Les chapitres 2 et 3 présentent succinctement, et ce pour chacun des objectifs du présent mandat, les outils et les méthodes d'analyse utilisées ainsi que les résultats obtenus. Le chapitre 4 reprend sous forme de discussion les principaux résultats obtenus ainsi que les limites de la méthodologie utilisée.



Finalement, le chapitre 5 expose les conclusions et les recommandations qui découlent de l'approche méthodologique utilisée ainsi que des résultats obtenus. Quelques possibilités méthodologiques, notamment en ce qui concerne le raffinement de la modélisation des charges de P entrantes et des concentrations ambiantes de P dans le lac, sont présentées afin que le comité technique du Comité directeur Québec/Vermont puisse discuter de leur applicabilité ainsi que de leur plus value pour la suite des choses.

1. MISE EN CONTEXTE MÉTHODOLOGIQUE

1.1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE MODÉLISATION

Bien que les épisodes de prolifération de cyanobactéries découlent d'interactions complexes entre plusieurs facteurs, notamment, les précipitations, la température de l'eau, l'ensoleillement, le pH, la disponibilité des nutriments ainsi que les courants dans le plan d'eau, l'apport en P demeure un facteur prépondérant.

Les apports en P dans les plans d'eau influencent le stade d'eutrophisation de ces derniers. L'eutrophisation est un processus de transformation et de vieillissement des lacs se caractérisant par une augmentation de la productivité d'un lac, notamment, par un accroissement des plantes aquatiques et des algues. Bien que l'eutrophisation soit un phénomène naturel à l'échelle géologique, elle est fortement accélérée par les activités humaines qui représentent des sources ponctuelles (ex. : rejets des stations d'épuration des eaux usées) et diffuses (ex. : activités agricoles) de P pour un territoire donné.

À l'échelle d'un bassin versant ayant comme exutoire un lac comme celui du Memphrémagog, la pollution de l'eau par le P est liée au bilan de masse établi entre les apports de P entrants au lac et la dynamique interne du plan d'eau (ex. : rétention du P dans les sédiments, temps de renouvellement des eaux).

Les objectifs de modélisation dans le cadre du présent projet sont :

1. Quantifier les charges de phosphore (P) total pour les différents affluents du lac Memphrémagog afin de cibler les zones contributrices à l'intérieur du bassin;
2. établir le bilan de masse du P dans le lac Memphrémagog selon la dynamique interne de ce dernier dans le but de réaliser des scénarios d'intervention permettant de diminuer les concentrations de P; et
3. identifier objectivement des pistes de solution.

1.2 CRITÈRES ET NORMES DE QUALITÉ DE L'EAU

Lors de certaines discussions entre les intervenants impliqués dans le projet, la possibilité d'établir un objectif commun de réduction de la concentration de P dans le lac Memphrémagog a été abordée. Un point important issu de ces échanges réside dans le fait que, de part et d'autre de la frontière, les concentrations ambiantes de P et les normes diffèrent.

Actuellement, les concentrations de P mesurées au lac Memphrémagog varient entre 8 mg/m³ dans la baie de Magog à plus de 20 mg/m³ dans la partie nord-est de la baie Fitch (Simoneau, 2004).

Au Vermont, selon une communication personnelle avec Neil C. Kamman du VANR (Department of Environmental Conservation - Water Quality Division), la concentration maximale permise de P est de 14 mg/m^3 dans la partie américaine du lac Memphrémagog.

Au Québec, il n'existe aucune norme à ce sujet, mais seulement des critères de qualité de l'eau de surface établis par le MDDEP en ce qui concerne la protection de la vie aquatique ainsi que de la protection des activités récréatives et de l'esthétique. Basés sur la valeur de concentration naturelle (mg/m^3) en P d'un plan d'eau, ces critères sont les suivants :

- Critère de qualité s'appliquant en période sans glace pour les lacs dont la concentration naturelle est ou était inférieure à 10 mg/m^3 . Il est défini par une augmentation maximale de 50 % par rapport à la concentration naturelle, sans dépasser un maximum de 10 mg/m^3 . Il vise à éviter l'eutrophisation des lacs oligotrophes¹.
- Critère de qualité s'appliquant en période sans glace pour des lacs dont la concentration naturelle se trouve ou se trouvait entre 10 mg/m^3 et 20 mg/m^3 . Il est défini par une augmentation maximale de 50 % par rapport à la concentration naturelle, sans dépasser un maximum de 20 mg/m^3 .

À ce sujet, les intervenants canadiens considèrent pertinents les critères établis par le MDDEP et confirment la nécessité d'estimer avec le plus de justesse possible la concentration naturelle en P du lac Memphrémagog afin d'évaluer l'applicabilité de ces critères quant à la protection des usages. Certains intervenants s'interrogent sur l'efficacité de ces critères de qualité quant à la protection adéquate des lacs. Une étude présentée lors du Forum national sur les lacs (Carignan, R. 2006) suggérait un critère alternatif plus limitant basé sur la concentration naturelle de phosphore + 10 %. Les intervenants croient qu'il est essentiel de s'appuyer sur des études réalisées dans le domaine afin de statuer sur la valeur cible qui permettra de maintenir l'intégrité du milieu et, conséquemment, d'établir des objectifs de réduction adéquats.

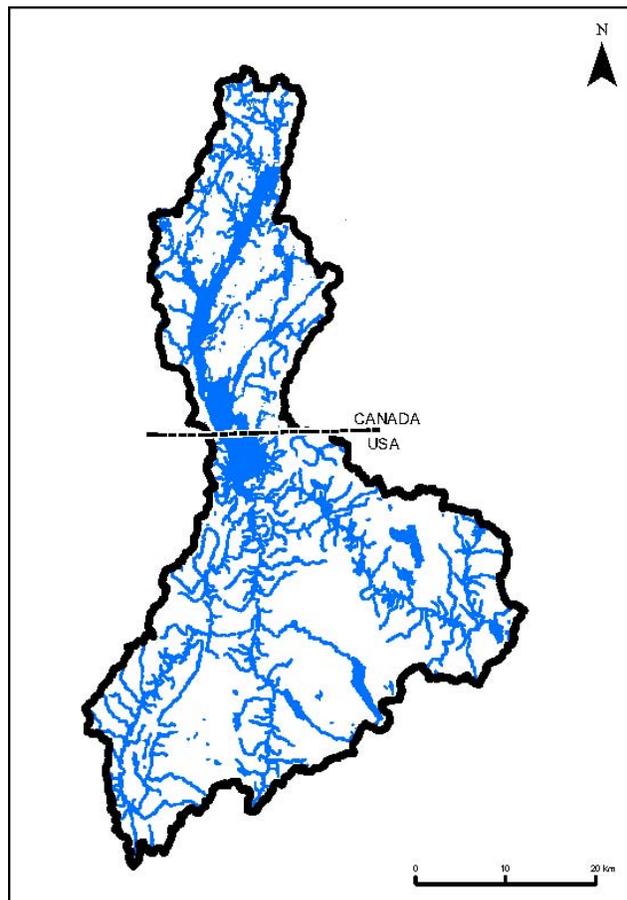
1.3 BASE DE DONNÉES GÉOMATIQUE

La base de données (B.D.) géomatique ainsi que les principales étapes qui ont mené à sa création ont fait l'objet d'une présentation tenue à la MRC et à laquelle tous les intervenants du projet ont assisté.

¹ Selon le MDDEP, une concentration de 10 mg/m^3 représente la valeur seuil qui détermine la limite entre un lac oligotrophe et un lac mésotrophe.

D'une longueur d'environ 38 km et d'une largeur variant entre 1,3 et 4,0 km, le lac Memphrémagog est situé à 74 % en territoire canadien et à 26 % en territoire américain. Le bassin du lac Memphrémagog, d'une superficie d'environ 1 782 km², est quant à lui situé à 29 % au Canada et à 71 % aux États-Unis (figure 1).

Figure 1 : Bassin versant du lac Memphrémagog



De ce fait, la création de la B.D. géomatique pour la caractérisation du bassin a impliqué la mise en commun d'information spatiale dans certains cas très différente, notamment, dans la nomenclature utilisée (ex. : données pédologiques) ainsi que dans le degré de précision et le niveau de détails (ex. : classification de l'utilisation du sol). Afin de pouvoir créer une B.D. dont les données sont comparables d'un bout à l'autre du bassin, certaines données ont dû être agrégées et d'autres mises à jour.

Les principales couches d'information thématiques qui constituent la B.D. géomatique utilisée dans le cadre du présent projet ainsi que les principales étapes de traitement et/ou de validation des données sont présentées brièvement dans les sous-sections suivantes.

1.3.1 UTILISATION DU SOL

Les données américaines d'utilisation du sol fournies par le U.S Geological Survey (USGS) comportant vingt-deux (22) classes et les données canadiennes fournies par la MRC de Memphrémagog en possédant quinze (15), une agrégation selon le plus bas niveau de détails pour chacune des classes a été effectuée. L'agrégation de certaines classes a été réalisée en fonction des objectifs de modélisation. Chacune des classes d'utilisation du sol définies devait pouvoir être associée à un seul coefficient d'exportation de P. De ce fait, les classes agrégées devaient avoir une exportation considérée fortement similaire.

De plus, puisque les classifications réalisées par le USGS ainsi que par la MRC de Memphrémagog ont été réalisées à partir de données de base ayant des précisions différentes (ex. : images satellites vs orthophotographies), la discrimination de certaines classes n'était pas possible de part et d'autre de la frontière.

Au total, l'utilisation du sol actuelle dans la B.D. contient quatorze (14) classes, soit :

- Terre en culture², groupe hydrologique de sol A
- Terre en culture, groupe hydrologique de sol B
- Terre en culture, groupe hydrologique de sol C
- Terre en culture, groupe hydrologique de sol D
- Prairie et pâturage
- Forêt
- Milieu humide
- Friche
- Zone développée mixte
- Résidentielle
- Carrière/sablière/gravière
- Eau
- Terrain de golf
- Centre de ski

² Bien que les données d'utilisation du sol disponibles ne permettent pas de distinguer la répartition des différents types de cultures à l'échelle du bassin, les coefficients d'exportation de P des classes « Terre en culture » ont été attribués selon le groupe hydrologique de sol qui y prévaut ainsi qu'une gamme type de cultures (voir les sections 1.3.2 Pédologie et 2.2.2 Attribution des coefficients d'exportation et des charges moyennes de P).



Précisons que la classe « zone développée mixte » est une agrégation des classes « urbain », « industriel », « lieu d'enfouissement », « dépotoir » et « aéroport » de la classification d'origine de la MRC afin de correspondre à la classe « developed, high intensity » de la classification du USGS qui inclut, notamment, les zones industrielles/commerciales, les blocs appartements et les maisons en rangées pour lesquelles les surfaces imperméables occupent entre 80 % et 100 % de la surface du sol. Par ailleurs, les 43 fermes commerciales présentes dans le bassin ne sont pas considérées comme sources ponctuelles, car aucun coefficient d'exportation de P ne pouvait y être rattaché.

Puisque les données américaines dataient de 2001 comparativement aux données canadiennes de 2007, une mise à jour a été réalisée à partir d'images multitudes du satellite d'observation de la terre Landsat TM5, soit de juin 2007 et 2008 ainsi que d'avril et d'août 2007. La validation des classes a été réalisée par inspection visuelle à partir des bandes 5, 4, 3 et 3, 2, 1 (couleurs naturelles) de l'image de juin et d'août 2007. Précisons que la classification des images satellites a permis l'ajout de deux (2) classes d'utilisation du sol, soit celle de terrain de golf et de centre de ski.

Le tableau 1 présente la répartition de l'utilisation du sol à l'échelle du bassin.

Tableau 1 : Utilisation du sol à l'échelle du bassin

Unités spatiales	Superficie	
	km ²	%
Forêt	1 140,9	64,0
Prairie et pâturage	211,9	11,9
Terre en culture, groupe hydrologique de sol A	12,7	0,7
Terre en culture, groupe hydrologique de sol B	15,6	0,9
Terre en culture, groupe hydrologique de sol C	51,3	2,9
Terre en culture, groupe hydrologique de sol D	24,4	1,4
Milieu humide	66,2	3,7
Résidentielle	41,1	2,3
Friche	30,9	1,7
Zone développée mixte	5,1	0,3
Carrière/Sablière/Gravière	3,3	0,2
Terrain de golf	2,7	0,2
Centre de ski	1,4	0,1
Lacs (CAN)	10,0	0,6
Lacs (USA)	141,3	7,9
Sous-total	1 759	98,7
Réseau routier	23	1,3
Total	1 782	100

Selon les résultats, la forêt occupe 64 % du bassin, les prairies et les pâturages 12 %, les terres en culture (groupes A, B, C et D) 6 % et les milieux humides près de 4 %. La partie amont du bassin est principalement occupée par la forêt. Les principales zones résidentielles et zones développées mixtes sont associées aux agglomérations de Magog et de Cherry River (Orford) en territoire canadien ainsi que de Newport et de Derby aux États-Unis. Ces zones occupent près de 2,5 % du bassin et sont situées à proximité du réseau hydrographique (lacs et cours d'eau) ainsi que, dans la majorité des cas, dans la partie aval du bassin.



Précisons que la superficie occupée par le réseau routier est présentée à titre indicatif seulement, car il n'y a pas de coefficient d'exportation de P dans la littérature pouvant y être associé. Cependant, il est important de mentionner que la présence de routes augmente le ruissellement de surface en raison des surfaces pavées, ce qui contribue au transport du P vers l'aval.

La carte d'utilisation du sol résultante est présentée à l'annexe 1 du présent rapport.

1.3.2 PÉDOLOGIE

Les données pédologiques américaine fournies par le Vermont Center for Geographic Information (VCGI) et les données canadiennes du ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) comportaient respectivement 33³ et 27 classes définies selon une nomenclature bien différente.

Afin de rendre possible et de faciliter la comparaison des données, ces dernières ont été agrégées selon la classification développée par le United States Department of Agriculture (USDA, 2007). Ce système de classification regroupe les sols selon quatre (4) groupes hydrologiques, soit A, B, C et D en fonction, notamment, de la couche de sol ayant la plus faible conductivité hydraulique saturée, de la profondeur d'une couche de sol plus ou moins imperméable à l'eau ainsi que de la profondeur de la nappe (si présente). Les matrices de décision utilisées pour l'attribution d'un groupe hydrologique pour un sol donné sont présentées à la figure 2.

³ Précisons que les données pédologiques du district Essex (environ 98 km²) dans l'état du Vermont n'étant pas disponibles puisque en cours de validation, ces dernières ont été dérivées pour les besoins de la présente étude à partir de la correspondance établie entre l'utilisation du sol et le groupe hydrologique de sol pour la partie américaine (ex. : terre en culture = groupe C).

Figure 2 : Matrices pour l'assignation d'un groupe hydrologique de sol

Table 7-1 Criteria for assignment of hydrologic soil groups when a water impermeable layer exists at a depth between 50 and 100 centimeters [20 and 40 inches]

Soil property	Hydrologic soil group A	Hydrologic soil group B	Hydrologic soil group C	Hydrologic soil group D
Saturated hydraulic conductivity of the least transmissive layer	>40.0 $\mu\text{m/s}$ (>5.67 in/h)	≤ 40.0 to >10.0 $\mu\text{m/s}$ (≤ 5.67 to >1.42 in/h)	≤ 10.0 to >1.0 $\mu\text{m/s}$ (≤ 1.42 to >0.14 in/h)	≤ 1.0 $\mu\text{m/s}$ (≤ 0.14 in/h)
	and	and	and	and/or
Depth to water impermeable layer	50 to 100 cm [20 to 40 in]	50 to 100 cm [20 to 40 in]	50 to 100 cm [20 to 40 in]	<50 cm [<20 in]
	and	and	and	and/or
Depth to high water table	60 to 100 cm [24 to 40 in]	60 to 100 cm [24 to 40 in]	60 to 100 cm [24 to 40 in]	<60 cm [<24 in]

Table 7-2 Criteria for assignment of hydrologic soil groups when any water impermeable layer exists at a depth greater than 100 centimeters [40 inches]

Soil property	Hydrologic soil group A	Hydrologic soil group B	Hydrologic soil group C	Hydrologic soil group D
Saturated hydraulic conductivity of the least transmissive layer	>10 $\mu\text{m/s}$ (>1.42 in/h)	≤ 10.0 to >4.0 $\mu\text{m/s}$ (≤ 1.42 to >0.57 in/h)	≤ 4.0 to >0.40 $\mu\text{m/s}$ (≤ 0.57 to >0.06 in/h)	≤ 0.40 $\mu\text{m/s}$ (≤ 0.06 in/h)
	and	and	and	and/or
Depth to water impermeable layer	>100 cm [>40 in]	>100 cm [>40 in]	>100 cm [>40 in]	>100 cm [>40 in]
	and	and	and	and/or
Depth to high water table	>100 cm [>40 in]	>100 cm [>40 in]	>100 cm [>40 in]	>100 cm [>40 in]

Source: Tiré de : USDA (2007) Hydrologic Soil Groups.

En territoire canadien, la correspondance entre les données pédologiques du MRNF et les groupes hydrologiques de sols du VCGI a été établie, dans un premier temps, selon la méthode développée par Transports Québec. Toutefois, l'application de cette méthode de correspondance a engendré des incongruités (discontinuités et coupures drastiques) dans l'information pédologique considérées peu probables dans la réalité, notamment, aux abords de la frontière.

Agissant à titre de conseiller scientifique pour le présent mandat, l'IRDA a mis à notre disposition la correspondance entre les groupes hydrologiques de sols et les séries de

sols établie par ses experts pédologues dans le cadre du développement d'un outil de diagnostic des exportations de phosphore (ODEP) en milieu agricole (IRDA, 2008).

La carte pédologique résultante est présentée à l'annexe 2. Précisons que la classe « autre » inclut, notamment, les sols organiques et les surfaces pavées.

1.3.3 TOPOGRAPHIE ET HYDROGRAPHIE

Les courbes de niveau et le réseau hydrographique de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ) au 1 : 20 000 du côté canadien et les courbes de niveau et le réseau hydrographique du VCGI au 1 : 50 000 du côté américain ont été utilisés. Ces données ont servi pour la délimitation des unités de drainage et des bassins principaux (voir section 2.2.1 Structuration topologique du réseau hydrographie), une étape nécessaire à la structuration topologique du réseau hydrographique.

Bien que la présente étude ne tienne pas compte de la topographie, mais uniquement de l'utilisation du sol et de la pédologie comme variables qui modulent les exportations de P, une carte des pentes a été intégrée à la B.D. géomatique. Les classes de pentes utilisées, soit 0 à 2 %, 2 à 6 % et 6 % et plus, sont considérées comme étant significatives quant à la dynamique hydrologique de surface (McCuen, 2002). Ainsi, advenant que de nouvelles recherches permettent la détermination de coefficients d'exportation de P considérant à la fois la topographie et l'utilisation du sol, il sera possible d'intégrer ces nouvelles informations au modèle.

La carte des pentes est présentée à l'annexe 3.

1.3.4 SOURCES PONCTUELLES

Actuellement et selon les données disponibles, les sources ponctuelles considérées sont la présence de bâtiments avec une fosse septique ainsi que les rejets de six (6) stations d'épuration des eaux usées réparties sur le territoire, soit Barton, Newport, Orleans, Georgeville (Canton de Stanstead), Fitch Bay (Canton de Stanstead) et Saint-Benoît-du-Lac (Abbaye).

Du côté canadien, les bâtiments potentiellement desservis par une fosse septique sur le territoire ont été identifiés à partir des réseaux d'égouts municipaux fournis par la MRC ainsi que du rôle d'évaluation foncière. Du côté américain, les données disponibles sur le site du VCGI ont été utilisées afin de repérer les bâtiments ainsi que les quatre (4) zones desservies par les réseaux municipaux qui ont été numérisées à partir des informations fournies par le VANR.

Afin d'être identifiés comme étant potentiellement desservis par une fosse septique, les bâtiments devaient répondre aux deux (2) critères suivants :

- est situé à l'extérieur de la zone desservie par le réseau municipal (réseau municipal linéaire considérant une zone tampon de 50 m du côté canadien et polygones des zones desservies du côté américain);
- est situé dans une zone tampon de 300 m d'un cours d'eau ou d'un lac.

Au total, 13 727 bâtiments sont considérés comme étant à risque, soit 7 793 (57 %) du côté américain et 5 934 (43 %) du côté canadien.

Les bâtiments identifiés comme étant à risque et les stations d'épuration des eaux usées constituent la couche d'information dans la B.D. qui caractérise les sources ponctuelles à l'échelle du bassin.

La carte des sources ponctuelles est présentée à l'annexe 4 du présent document.

1.4 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Une revue de la littérature sur le sujet s'imposait afin de prendre une décision éclairée quant aux méthodes et aux outils les plus appropriés pour répondre, à partir des données disponibles, aux objectifs de modélisation établis dans le cadre du présent mandat.

1.4.1 MODÈLES EXISTANTS POUR L'ESTIMATION DES CHARGES EN P

Dans un premier temps, plusieurs modèles existants développés, notamment, pour la modélisation des apports en P ont été recensés. La majorité des documents de référence consultés sont des mémoires de maîtrise à l'intérieur desquels une revue de la littérature sur le sujet a été réalisée; les références sont présentées à la fin du présent document. Le tableau 2 présente sommairement les principales caractéristiques des modèles recensés. Les points verts indiquent l'applicabilité au projet pour une caractéristique donnée tandis que les points rouges indiquent la non applicabilité.

L'utilisation d'une grille d'analyse multicritères a permis d'évaluer l'applicabilité au projet de chacun des modèles recensés selon les critères suivants :

- permet de répondre aux objectifs de modélisation;
- permet de modéliser les apports annuels en P à l'échelle des unités de drainage qui composent le bassin;
- utilise des données spatiales disponibles dans le cadre de ce projet;
- possède une interface de système d'information géographique (SIG) qui facilite le stockage, la gestion, le traitement et la représentation cartographique des données; et
- ne nécessite aucune calibration des résultats.

Précisons que l'atteinte des objectifs de modélisation ainsi que les échelles spatiale (unité de drainage) et temporelle (annuelle) de simulation représentaient des conditions essentielles à l'applicabilité du modèle. Les résultats de l'analyse multicritères des modèles recensés sont présentés au tableau 3.

Tableau 2 : Principales caractéristiques des modèles recensés

MODÈLE	ÉCHELLE		SPÉCIFICITÉS/LIMITES DU MODÈLE
	SPATIALE	TEMPORELLE	
DRAINMOD	<ul style="list-style-type: none"> ● Parcelle (champ) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simulation sur une base quotidienne, mensuelle ou annuelle. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simule le ruissellement de surface, les pratiques de gestion des eaux (ex : drainage contrôlé) qui influencent l'écoulement de surface et souterrain, l'infiltration, l'évapotranspiration, la profondeur de la nappe d'eau, le stress hydrique des cultures, le lessivage de l'azote (sous module DRAINMOD-N), etc. ● Applicable à des sols faiblement drainés caractérisés par une nappe d'eau de faible profondeur. ● Portée limitée pour la simulation de scénarios sur la gestion des nutriments. ● Utilisé principalement pour évaluer les pratiques de gestion de l'eau à l'échelle de la parcelle.
Annualized Agricultural Non-Point Source pollution Model AnnAGNPS	<ul style="list-style-type: none"> ● Bassin versant agricole 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simulation annuelle en continue (conditions d'événements multiples). 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simule le ruissellement de surface, le mouvement des sédiments, les nutriments (bilan de masse) et les pesticides. ● Considère la variabilité spatiale des types de sols, de l'utilisation du sol ainsi que des pratiques de gestion par le découpage d'unité de réponse hydrologique homogène (HRU). ● Permet l'évaluation des pratiques de gestion (ex : fertilisation, résidus de culture). ● Calibration du modèle nécessaire.
Watershed Ecosystem Nutrient Dynamics WEND	<ul style="list-style-type: none"> ● Bassin versant 	<ul style="list-style-type: none"> ● Continue (long terme) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simule les processus et transformations du P pour les occupations agricole, forestière et urbaine. ● Simule les bilans de masse sous-jacents aux processus du cycle du P incluant les importations, les exportations, le stockage, etc. ● Simule les stratégies de gestion à long terme requises pour réduire les pertes de P. ● Requiert un nombre important d'intrants. ● Calibration intensive nécessaire ou procédure de personnalisation du modèle.
Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation ANSWERS-2000	<ul style="list-style-type: none"> ● Bassin versant ● Parcelle (champ) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Court et long terme (paramètres distribués) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simule l'interception, l'infiltration, la capacité de rétention de l'eau de surface, le ruissellement, les pertes de P dans les eaux de ruissellement, le lessivage, les sédiments, etc. ● Simule l'efficacité des pratiques de gestion. ● Interface ArcInfo GIS facilite la gestion et le traitement des données. ● Connaissance approfondie des processus hydrologique, des sols et des cultures est essentielle.
Arc View Soil and Water Assessment Tool 2000 AVSWAT 2000	<ul style="list-style-type: none"> ● Grands bassins versants et sous bassins 	<ul style="list-style-type: none"> ● Continue 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simule l'effet des pratiques de gestion sur le ruissellement, les apports en contaminants (ex : P total et particulaire) et en sédiments. ● Possède une interface Arcview 3.2 qui facilite la gestion et le traitement des données. ● Permet la simulation de scénarios de pratiques de gestion complexes (semence, récolte, labour, fertilisation, rotation des cultures, etc.). ● Nécessite un nombre important d'intrants (ex : précipitations, température de l'air, vitesse des vents, humidité relative, radiation solaire, propriétés des sols, utilisation du sol, pratiques de gestion).
Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems CREAMS	<ul style="list-style-type: none"> ● Parcelle (champ agricole) 	<ul style="list-style-type: none"> ● Annuelle 	<ul style="list-style-type: none"> ● Simule le ruissellement de surface, le transport des sédiments (avec un ratio d'enrichissement en P et en N), les pertes de sols (équation RUSLE), etc. ● Non convivial.
Outil de diagnostic des exportations de phosphore ODEP	<ul style="list-style-type: none"> ● Parcelle (champ) ou ensemble de parcelles 	<ul style="list-style-type: none"> ● Annuelle 	<ul style="list-style-type: none"> ● Nécessite un nombre important d'intrants. ● Utilitaire informatique destiné aux conseillers agricoles. ● Simulation des exportations de P selon différents scénarios de régie des sols, des cultures et d'aménagement des terres. ● Simulation de scénarios alternatifs de gestion du territoire agricole uniquement.
Wisconsin Lake Modeling Suite WILMS	<ul style="list-style-type: none"> ● Bassin versant 	<ul style="list-style-type: none"> ● Annuelle 	<ul style="list-style-type: none"> ● Prédit la concentration annuelle moyenne de phosphore total (PT) dans les lacs. ● Permet l'intégration de sources ponctuelles ainsi que la contribution des systèmes de fosses septiques. ● Permet l'évaluation de scénarios par le changement des pourcentages relatifs pour l'utilisation du sol ou des apports des sources ponctuelles. ● Utilise des coefficients d'exportation (P) pouvant être adaptés au contexte régional. ● Ne possède aucune interface SIG.

Tableau 3 : Grille d'analyse des modèles de simulation des apports en P recensés

Modèle	Objectifs de modélisation		Échelle		Intrants	Interface SIG I/E	Calibration non requise	Total
	Apports en P	Scénarios	Spatiale	Temporelle				
DRAINMOD		√		√				2
AnnAGNPS	√	√		√		√		4
WEND	√	√	√	√				4
ANSWERS-2000	√	√	√	√		√	√	6
AVSWAT 2000	√	√	√	√		√		5
CREAMS	√	√		√	√		√	5
ODEP	√	√		√			√	4
WILMS	√	√	√	√	√		√	6

Les résultats obtenus ont fait l'objet de discussions avec tous les intervenants du projet lors d'une réunion tenue à la MRC. Les conclusions sont présentées brièvement ci-après.

Selon la grille d'analyse, deux (2) modèles, soit ANSWERS-2000 et WILMS, répondent à 6 des 7 critères préétablis. Bien qu'ANSWERS-2000 ait une interface de SIG qui facilite la gestion, le traitement et la représentation cartographique des données, les intrants requis pour alimenter le modèle sont beaucoup trop nombreux et détaillés compte tenu des données disponibles ainsi que de la taille du bassin à l'étude. Quant à WILMS, bien qu'il nécessite moins d'intrants et que ceux-ci soient disponibles pour la totalité du bassin à l'étude, ce modèle ne possède aucune interface SIG ce qui le rend beaucoup moins convivial pour le passage des résultats du modèle vers le SIG. De plus, puisqu'il est impossible (à court terme) de travailler en lots (batch) dans WILMS, la modélisation des apports en P pour toutes les unités spatiales d'analyse du bassin nécessiterait un temps de traitement trop important considérant le calendrier du projet et les ressources financières disponibles.

Bien que plusieurs des modèles recensés offrent des possibilités intéressantes et applicables dans le cadre du projet, aucun ne permet de répondre à tous les besoins et ce, à l'intérieur de l'échéancier et du cadre financier définis. Les modèles étant pour la plupart basés sur l'utilisation de coefficients d'exportation (ex. : kg/km²/an) pour

l'estimation des charges de P provenant du territoire, il nous apparaissait envisageable et pertinent de créer notre propre environnement de modélisation dans le SIG.

Les rencontres techniques tenues avec certains intervenants tels que madame Isabelle Beaudin de l'IRDA, messieurs Louis Roy du MDDEP, François Bélanger du MCI et Neil Kamman du VANR, ainsi que les discussions lors de la rencontre à la MRC ont permis de confirmer la pertinence de réaliser la modélisation dans le SIG sans l'utilisation d'un modèle spécifique pour le calcul des charges de P entrantes dans le lac.

La création de notre propre environnement de travail pour la modélisation des charges de P à partir de coefficients d'exportation a permis une plus grande flexibilité, notamment, à l'égard des variables pouvant être considérées dans la modélisation (ex. : la rétention des lacs présents dans le bassin), de la possibilité de considérer le réseau hydrographique comme un réseau « topologique » ainsi que de la représentation cartographique des résultats.

1.4.2 ÉQUATIONS DE BILAN DE MASSE

Selon la littérature, l'application d'une équation de bilan de masse permet de prédire convenablement les teneurs moyennes en P sur une gamme s'échelonnant de 3 à 40 mg/m³ (Carignan *et al.*, en cours de publication). D'après les données de qualité des eaux du lac Memphrémagog pour la période de 1996-2002 (Simoneau, 2004), les concentrations mesurées au lac Memphrémagog varient entre 8 mg/m³ dans la baie de Magog à plus de 20 mg/m³ dans la partie nord-est de la baie Fitch. L'application d'une équation de bilan de masse dans le cadre de ce projet était donc envisageable.

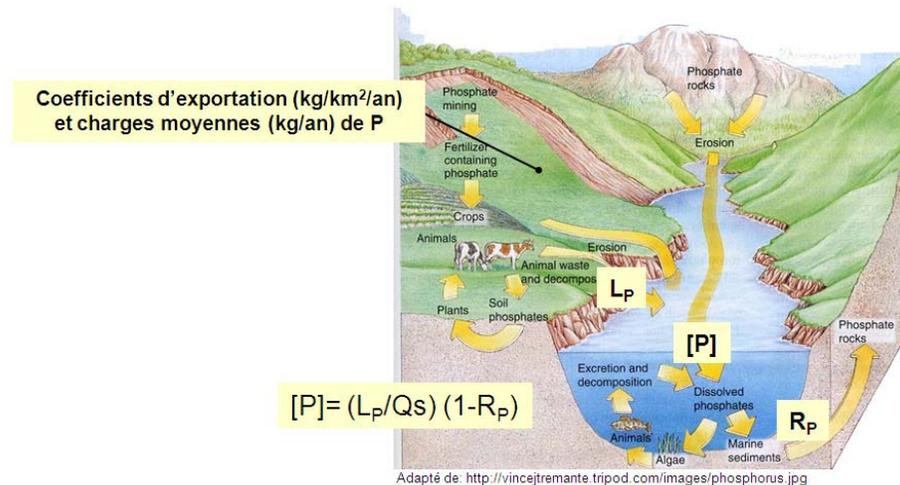
Tel qu'illustré à la figure 3, la plupart des modèles de bilan de masse qui permettent d'évaluer les concentrations de P dans un plan d'eau prennent la forme de :

$$[P] = (L_P / Q_s) (1 - R_P)$$

Où :

[P]	=	Concentration de P (mg/m ³)
LP	=	Charge de P entrante par unité de surface du lac (mg/m ² /an)
Qs	=	Débit annuel par unité de surface du lac (m ³ /an)
RP	=	Coefficient de rétention lacustre

Figure 3 : Exemple d'une approche par bilan de masse



L'approche générale est basée sur l'attribution d'un coefficient d'exportation de phosphore (ex. : kg/km²/an) pour chacune des sources diffuses ainsi que d'une charge moyenne de P (kg/an) pour chacune des sources ponctuelles présentes dans le bassin afin d'estimer les charges de P entrantes par unité de surface du lac (L_p) (mg/m²/an). La dynamique interne du plan d'eau est caractérisée selon le coefficient de rétention lacustre (R_p) et le débit annuel par unité de surface du lac (Q_s) (m³/an). Pour un lac donné, le coefficient de rétention (R_p) du P est défini comme étant la perte annuelle nette en P vers les sédiments exprimée en fraction des apports annuels totaux. Le coefficient de rétention dépend des caractéristiques hydrologiques propres à chaque écosystème lacustre. Bien que la rétention soit un processus temporaire, elle représente une étape clé dans la dynamique du P à l'échelle d'un bassin versant et ce, principalement, lorsque le réseau hydrographique de ce dernier est constitué de plusieurs plans d'eau.

Toutefois, ces modèles reposent sur trois (3) hypothèses importantes concernant le fonctionnement du lac, soit que :

1. le lac est en équilibre avec ses apports en P (ce qui entre dans le lac est égal à au P retenu par les sédiments + le P qui sort à l'exutoire);
2. le lac est considéré comme un réacteur homogène à flux constant (la concentration en P est similaire pour toute la masse d'eau);
3. la concentration moyenne en P du lac est la même que la concentration à son exutoire.

Ces suppositions représentent les limites d'utilisation d'un modèle de bilan de masse. L'application d'une équation de bilan de masse à la situation du lac Memphrémagog permettra d'évaluer de façon préliminaire les limites d'utilisation.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 APERÇU GÉNÉRAL

La méthodologie utilisée dans le cadre du présent projet repose sur trois (3) grandes étapes méthodologiques successives auxquelles sont associées plusieurs activités de réalisation, soit :

1. Estimation des charges annuelles de P entrantes dans le lac Memphrémagog
 - Structuration topologique du réseau hydrographique (unités de drainage et bassins principaux) pour la modélisation du transport du P de l'amont vers l'aval du bassin.
 - Attribution des coefficients d'exportation de P ($\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$) pour les sources diffuses (unités spatiales d'utilisation du sol) et des charges moyennes (kg/an) pour les sources ponctuelles de P présentes dans le bassin.
 - Attribution d'un coefficient de rétention du P (R_P) pour les lacs présents dans le bassin et ayant une superficie de plus de 2 ha.
 - Modélisation du transport du P à l'échelle du bassin.
 - Identification des unités spatiales et unités de drainage génératrices de P.
2. Évaluation de scénarios de réduction des exportations
 - Estimation de la contribution des activités humaines dans les apports en P dans le lac par la modélisation d'un scénario d'utilisation du sol dit « état de référence » (sans action anthropique).
 - Évaluation de l'impact de différents scénarios de réduction des exportations sur les charges de P entrantes dans le lac.
3. Calcul d'un bilan de masse
 - Application d'un modèle de bilan de masse pour la transformation des charges entrantes de P modélisées en concentrations ambiantes dans le lac.

Les sections suivantes décrivent brièvement les activités méthodologiques des étapes 1 et 3 de la modélisation du transport du P à l'échelle du bassin versant du lac Memphrémagog. Précisons que l'évaluation de scénarios, soit l'étape 2, est présentée en détail dans la section 3.0.

2.2 ESTIMATION DES CHARGES DE P ENTRANTES DANS LE LAC

2.2.1 STRUCTURATION TOPOLOGIQUE DU RÉSEAU HYDROGRAPHIQUE

Afin de modéliser le transport de l'amont vers l'aval du P, le réseau hydrographique et les unités de drainage qui constituent le bassin du lac Memphrémagog ont été structurés de manière topologique dans la B.D. selon la méthode développée par la Direction du patrimoine écologique et des Parcs du MDDEP (Daniel Blais, communication personnelle).

En d'autres termes, les unités de drainage qui composent le bassin ont été découpées manuellement selon le réseau hydrographique et la topographie. Les cours d'eau et les lacs de plus de 2 ha (soit 87 lacs du côté américain et 29 lacs du côté canadien) ont été considérés pour la délimitation des unités.

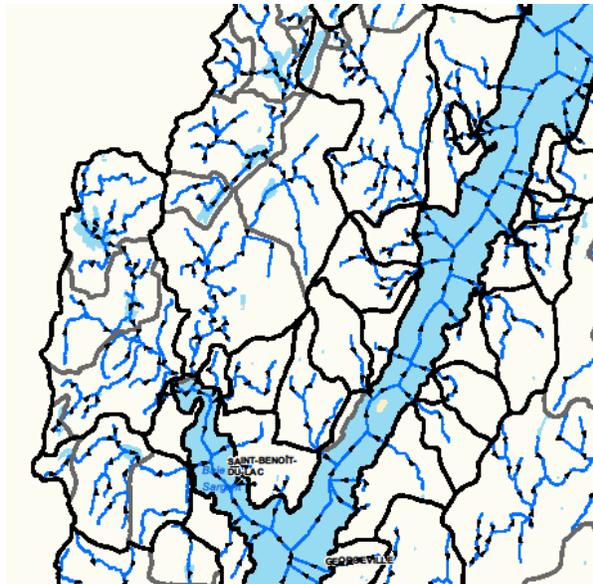
La délimitation des unités de drainage des lacs de plus de 2 ha a permis de tenir compte du rôle de ces plans d'eau comme milieux de rétention du P lors de son parcours vers le lac Memphrémagog.

De ce fait, chacune des unités de drainage (avec ou sans lac comme exutoire) comporte un identifiant qui précise sa position hydrologique (unités en amont et unités en aval) dans le bassin.

Au total, 322 unités de drainage ont été délimitées, soit 221 du côté américain et 101 du côté canadien. Ces unités de drainage sont regroupées en 74 bassins principaux, soit des bassins ayant le lac Memphrémagog comme exutoire.

La figure 4 schématise la structuration du bassin en unités de drainage (lignes grises) et en bassins principaux (lignes noires). Les petites flèches noires indiquent le sens de l'écoulement des eaux de surface.

Figure 4 : Découpage du bassin en unités de drainage (extrait)



2.2.2 ATTRIBUTION DES COEFFICIENTS D'EXPORTATION ET DES CHARGES MOYENNES DE P

Une revue de la littérature a permis de recenser différents coefficients d'exportation de P ($\text{kg}/\text{km}^2/\text{an}$) pour les sources diffuses ainsi que des charges moyennes (kg/an) pour les sources ponctuelles présentes sur le territoire.

En ce qui concerne les sources diffuses, un coefficient d'exportation a été attribué à chacune des quatorze (14) classes d'utilisation du sol, un facteur important dans la modulation des apports en P dans les cours d'eau à l'échelle d'un bassin. Les valeurs d'exportation de P pour une même classe d'utilisation du sol étant très variables dans la littérature, plusieurs scénarios d'exportation ont été testés (CE1, CE2 et CE3).

Le tableau 4 présente les coefficients d'exportation retenus pour chacune des classes d'utilisation du sol et ce, pour chacun des scénarios d'exportation. Les références de chacun des coefficients utilisés sont mentionnées ci-après. Bien que ces valeurs soient empiriques, et donc propres à un milieu donné, elles permettent de donner un ordre de grandeur quant aux exportations de P selon les différentes classes d'utilisation du sol.

Tableau 4 : Coefficients d'exportation de P (kg/km²/an) retenus

Unité spatiale d'utilisation du sol	Superficie (%)	CE1 (faible)	CE2 (moyen)	CE3 (élevé)
Carrière/Sablière/Gravière	0,2	305*	305*	305*
Centre de ski alpin	0,1	20*	20*	20*
Forêt	64,0	2 ¹	5 ²	7*
Friche	1,7	20 ³	20 ³	20 ³
Lacs (CAN)	0,6	3 ⁴	6 ⁴	9 ⁴
Lacs (USA)	7,9	3 ⁴	6 ⁴	9 ⁴
Zone développée mixte	0,3	305*	305*	305*
Milieu humide	3,7	125 ⁵	170*	214 ⁶
Prairie et pâturage	11,9	36 ¹	52 ⁶	56*
Résidentielle	2,3	50*	106*	195 ¹
Terrain de golf	0,2	105 ⁷	105 ⁷	105 ⁷
Terre en culture, groupe hydrologique de sol A	0,7	39 ¹	56 ¹	108 ¹
Terre en culture, groupe hydrologique de sol B	0,9	87 ¹	139 ¹	277 ¹
Terre en culture, groupe hydrologique de sol C	2,9	59 ¹	107 ¹	213 ¹
Terre en culture, groupe hydrologique de sol D	1,4	107 ¹	110 ¹	318 ¹
Total	98,8			

*Coefficient moyen calculé selon les valeurs recensées dans la littérature.

- 1) Michaud *et al.* 2006 : travaux de modélisation en Montérégie.
- 2) Carignan *et al.*, (en cours de publication): régression multiple entre les apports annuels et la superficie; mesuré en Estrie et dans les Laurentides ainsi que utilisé pour le sud de l'Ontario (Dillon *et al.* (1994) dans Carignan *et al.* (en cours de publication)).
- 3) Carignan (2003) dans Hemispheres (2008) : suivi limnologique du lac Heney et des lacs de son bassin; région similaire à l'Outaouais.
- 4) Carignan *et al.*, (en cours de publication).
- 5) Carignan *et al.*, (en cours de publication): adapté pour les Laurentides selon les données mesurées.
- 6) Carignan *et al.*, (en cours de publication): régression multiple entre apports annuels et superficie; mesuré en Estrie.
- 7) Néron et Corbeil (2002) dans Hemispheres (2008).

Les travaux menés par l'IRDA dans le secteur de la Baie Missisquoi en Montérégie ont permis de raffiner l'attribution des coefficients d'exportation pour la classe « Terre en culture » en considérant non seulement différents types de cultures, mais aussi le groupe hydrologique de sol présent. Les coefficients d'exportation utilisés proviennent des résultats de modélisation des exportations de P pour trois (3) types de cultures, soit le maïs, les céréales à paille et le soja, sur des sols de groupes hydrologiques A, B, C et D (Michaud *et al.*, 2006). Bien que ces types de cultures ne soient pas une représentation exhaustive des cultures présentes sur le bassin à l'étude, les coefficients d'exportation associés donnent une idée générale des coefficients d'exportation relatifs aux terres en cultures, soit des valeurs d'exportation de P entre 39 et 318 kg/km²/an.

Par ailleurs, comparativement à la majorité des études de modélisation recensées dans la littérature, les coefficients d'exportation attribués aux milieux humides dans le cadre de ce projet ont de très fortes valeurs. En effet, selon des études récentes réalisées dans les Laurentides et en Estrie, les milieux humides contribuent de manière significative aux apports en P dans les lacs (Carignan *et al.*, en cours de publication).

Quant aux sources ponctuelles, chacun des bâtiments considérés à risque (présence potentielle d'une installation septique) s'est vu attribuer une charge moyenne de P (kg/an/personne). Cette charge a été pondérée selon le nombre moyen d'habitants par bâtiment considéré, soit 3 habitants. Ainsi, une charge annuelle de 0,192 kg/an (soit 0,064 kg/personne/an) a été attribuée pour chacun des 13 727 bâtiments considérés à risque (Crago (2004) dans Carignan *et al.* (en cours de publication). Puisque ce coefficient provient de travaux de recherche réalisés dans les Laurentides, il est probable que ce dernier sous-estime la contribution des résidences isolées à l'eutrophisation du lac Memphrémagog. Selon le MDDEP, cette charge annuelle est très faible et semble être le résultat d'un contexte favorable à la rétention du P notamment due à la présence d'un sol acide, épais et riche en fer. Ces conditions propices à l'atténuation de l'exportation du P ont aussi été observées en Ontario (Louis Roy, communication personnelle).

De plus, les exportations de P mesurées pour les six (6) stations d'épuration des eaux usées ont été ajoutées aux charges exportées par les sources ponctuelles présentes dans le bassin (tableau 5).

Tableau 5 : Charges de P exportées pour chacune des stations d'épuration des eaux usées

Stations d'épuration	(Kg P/an)
Georgeville (Canton de Stanstead)	3,6
Fitch Bay (Canton de Stanstead)	11,0
Saint-Benoît-du-Lac (Abbaye)	11,0
Orleans (VT)	36,7
Newport (VT)	509,5
Barton (VT)	166,3
Total	738,1

Techniquement parlant, les unités spatiales auxquelles ont été attribués les coefficients d'exportation de P ont été découpées à partir de la couche numérique d'utilisation du sol (ainsi que de la couche pédologique pour la classe « Terre en culture »), elle-même découpée selon les limites des unités de drainage.

Au total, 20 912 unités spatiales d'utilisation du sol se sont vu attribuer un coefficient d'exportation (kg P/km²/an) transformé en charges annuelles de P (kg/an) selon la superficie de ces dernières.

Selon la structuration de la B.D. chacune des unités d'utilisation du sol et chacune des sources ponctuelles sont associées à une unité de drainage ainsi qu'à un bassin principal.

2.2.3 ATTRIBUTION D'UN COEFFICIENT DE RÉTENTION (R_p) DU P POUR LES LACS

Le coefficient de rétention (R_p) du P d'un lac est défini comme étant la perte annuelle nette en P vers les sédiments exprimée en fraction des apports annuels totaux. Bien qu'elle soit un processus temporaire, car il peut y avoir relargage du P, la rétention représente une étape clé dans la dynamique du P à l'échelle d'un bassin.

La méthodologie utilisée tient compte du rôle des lacs de plus de 2 ha comme milieux de rétention lors du transport du P de l'amont vers l'aval du bassin. La rétention varie selon les caractéristiques hydrologiques de l'écosystème lacustre telles que la profondeur, le temps de résidence des eaux, etc.

Les trois (3) modèles de rétention (MR) utilisés pour le calcul du coefficient de rétention (R_p) sont basés sur le temps de résidence des eaux (t) dans les lacs, une variable estimée pour la totalité des lacs américains (données provenant du VNAR) ainsi que pour 7 (sur un total de 29) des lacs canadiens (Prairie et Wild, 2000; Rivard-Sirois et Pouet, 2006).

Les modèles de rétention (MR) utilisés sont basés sur les équations suivantes :

$MR1 = 1/(1+1/t^{0.5})$ Larsen et Mercier (1976) dans Carignan *et al.* (en cours de publication).

$MR2 = (0,25+0,18t)/(1+0,18t)$ Prairie (1989) dans Carignan *et al.* (en cours de publication).

$MR3 = 0,20+0,031t$ Carignan *et al.* (en cours de publication).

Selon l'étude menée par Carignan *et al.* (en cours de publication), le MR1 explique 81 % de la variation totale des taux de rétention mesurés dans l'ensemble des lacs des Laurentides. Tandis que le MR3 représente le meilleur modèle empirique s'ajustant aux données de l'Estrie quoiqu'il explique 30 % seulement de la variabilité observée.

Pour chacun des modèles de rétention (MR1, MR2 et MR3), la relation linéaire (équation) entre les superficies des lacs et les coefficients de rétention (Rp) calculés a été établie (EQ1, EQ2 et EQ3). À partir de ces équations, il a été possible de calculer les coefficients de rétention pour les 22 lacs canadiens pour lesquels le temps de résidence des eaux (t) était inconnu.

La représentativité des Rp calculés pour les 22 lacs canadiens par l'application des équations de régression (EQ1, EQ2 et EQ3) à leur superficie respective a été évaluée en comparant les Rp obtenus pour les 7 lacs canadiens selon les deux méthodes de calcul du Rp (soit l'application des MR et des EQ).

Selon les résultats de comparaison présentés au tableau 6, les coefficients de rétention (Rp) obtenus avec les équations EQ2 et EQ3 et les modèles de rétention MR2 et MR3 ont un différentiel moyen moins élevé lorsque comparés entre eux. De plus, les équations EQ2 et EQ3 ont des coefficients de détermination (R^2) plus élevés, soit 0,67 et 0,70 respectivement; le R^2 mesure la qualité de l'ajustement des estimations de l'équation de régression.

De ce fait, les scénarios de diminution des exportations présentés à la section 3.2 du présent rapport utilisent le modèle de rétention MR3 (tous les lacs américains et 7 des lacs canadiens) et l'équation de régression EQ3 (les 22 lacs canadiens restants) pour le calcul des coefficients de rétention des lacs présents à l'intérieur du bassin.

Tableau 6 : Coefficients de rétention des lacs canadiens estimés selon les deux méthodes de calcul

Lacs canadiens	Sup. (ha)	Temps de résidence (t)	Modèle de rétention			Équation de régression			Différentiel		
			MR1	MR2	MR3	EQ1	EQ2	EQ3	1	2	3
Lac à la Truite	34,2	0,72	0,30	0,34	0,22	0,21	0,31	0,21	0,09	0,03	0,01
Étang O'Malley	17,5	1,11	0,40	0,37	0,23	0,20	0,30	0,20	0,20	0,08	0,03
Lac Nick et Lac Sperling	52,9	0,317	0,16	0,29	0,21	0,23	0,32	0,21	-0,07	0,03	0,00
Lac Malaga	22,3	1,77	0,52	0,43	0,25	0,20	0,30	0,21	0,31	0,13	0,05
Lac Webster	5,6	0,13	0,07	0,27	0,20	0,19	0,29	0,20	-0,12	0,03	0,00
Lac Lovering	486,6	1,59	0,49	0,42	0,25	0,58	0,53	0,30	-0,09	0,12	0,05
Moyenne									0,06	0,01	0,01

2.3 CALCUL D'UN BILAN DE MASSE

Plusieurs modèles de bilan de masse sont présentés dans la littérature. Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude a été choisi, notamment, en raison de la disponibilité des intrants nécessaires à son bon fonctionnement.

L'équation de bilan de masse utilisée (Dillon-Rigler-Kirchner Model (1975) dans Wisconsin Department of Natural Resources (2003)) est la suivante :

$$P = (L(1-R)) / zp$$

Où :

P = concentration ambiante en phosphore total prédite pour le lac (mg/m^3)

L = charge totale surfacique de P ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{an}$)

R = coefficient de rétention du lac (précédemment appelé R_p)

z = profondeur moyenne (m)

p = taux de vidange (flushing rate), soit 1/temps de résidence des eaux

Précisons que le temps de résidence des eaux du lac Memphrémagog est de 1,7 an (International Lake Environment Committee (ILEC)). Le coefficient de rétention du P du lac Memphrémagog a été calculé par l'application des trois (3) modèles de rétention retenus, soit MR1, MR2 et MR3.



La représentativité de la concentration ambiante de P (mg/m^3) calculée pour le lac Memphrémagog par l'application de l'équation de bilan de masse a été évaluée en comparant les valeurs obtenues selon les différents scénarios de modélisation des charges entrantes actuelles (ex. : CE1-MR1) aux concentrations mesurées en différents points dans le lac lors des campagnes d'échantillonnage menées par le MDDEP et le MCI.

3. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

3.1 CHARGES DE P ENTRANTES DANS LE LAC MEMPHRÉMAGOG

Préalablement à la modélisation des charges de P entrantes dans le lac Memphrémagog, il nous apparaissait intéressant d'évaluer le potentiel d'exportation de P des différentes classes d'utilisation du sol selon les trois scénarios d'exportation testés (voir tableau 4 : CE1, CE2 et CE3) et la superficie du bassin occupée par chacune d'elles. Le potentiel d'exportation considère aussi les rejets de P associés aux sources ponctuelles (tableau 7).

Tableau 7 : Exportations potentielles de P (T/an) par les unités spatiales d'utilisation du sol

Classe d'utilisation du sol	Superficie		Exportation potentielle de P (T/an)					
	km ²	%	CE1 (faible)	CE2 (moyen)	CE3 (élevé)			
Carrière/Sablière/ Gravière	3	0,2%	1,0	2,8 %	1,0	1,9%	1,0	1,3%
Centre de ski alpin	1	0,1%	0,0	0%	0,0	0 %	0,0	0%
Forêt	1141	64,0%	2,3	6,6%	5,7	11,1%	8,0	10,7%
Friche	31	1,7%	0,6	1,7 %	0,6	1,2%	0,6	0,8%
Lacs (CAN)	10	0,6%	0,0	0%	0,1	0,2%	0,1	0,1%
Lacs (USA)	141	7,9%	0,4	1,0 %	0,8	1,5%	1,3	1,7%
Zone développée mixte	5	0,3%	1,6	4,6 %	1,6	3,1%	1,6	2,1%
Milieu humide	66	3,7%	8,3	23,7 %	11,3	22,1%	14,2	19,0%
Prairie et pâturage	212	11,9%	7,6	21,7 %	11,0	21,5%	11,9	15,9%
Résidentielle	41	2,3%	2,1	6,0 %	4,4	8,6%	8,0	10,7%
Terrain de golf	3	0,2%	0,3	0,8 %	0,3	0,6%	0,3	0,4%
Terre en culture, groupe A	13	0,7%	0,5	1,4 %	0,7	1,4%	1,4	1,9%
Terre en culture, groupe B	16	0,9%	1,4	4,0 %	2,2	4,3%	4,3	5,8%
Terre en culture, groupe C	51	2,9%	3,0	8,6 %	5,5	10,7%	10,9	14,6%
Terre en culture, groupe D	24	1,4%	2,6	7,4 %	2,7	5,3%	7,8	10,4%
Total sources diffuses			31,6	90,3 %	47,8	93,4 %	71,3	95,4 %
Présence de fosses septiques			2,6					
Usine de traitement des eaux usées			0,8					
Total sources ponctuelles			3,4	9,7 %	3,4	6,6 %	3,4	4,6 %
Total			35,0	100 %	51,2	100 %	74,7	100 %

Selon les résultats présentés au tableau 7, les charges potentielles exportées par les sources diffuses présentes sur le bassin varient entre 31,6 et 71,3 T/an. Les sources ponctuelles ont quant à elles un potentiel d'exportation d'environ 3,4 T/an (2,6 T/an pour les rejets des fosses septiques et 0,8 T/an pour les usines de traitement des eaux usées).

Les principaux exportateurs potentiels de P à l'échelle du bassin sont les terres en culture, les milieux humides et les prairies et pâturages. Toutefois, l'exportation potentielle est différente de l'exportation réelle puisqu'elle ne tient pas compte de la répartition spatiale à l'intérieur du bassin des classes d'utilisation du sol. De ce fait, l'exportation potentielle ne considère pas la présence de lacs dans le parcours hydrologique du P exporté vers l'aval par les classes d'utilisation du sol et les rejets ponctuels. Par exemple, pour des coefficients d'exportation similaires, une terre en culture située en bordure du lac Memphrémagog contribuera davantage aux apports en P dans le lac qu'une terre en culture située un peu plus en amont dans le bassin et pour laquelle les lacs présents sur son parcours hydrologique retiendront une fraction du P exporté.

Le tableau 8 présente le bilan global des charges de P entrantes dans le lac qui ont été modélisées selon les neuf (9) scénarios de modélisation. Précisons que les charges modélisées considèrent à la fois les sources diffuses et ponctuelles de P ainsi que la rétention des lacs présents sur le parcours hydrologique du P. Selon les résultats obtenus, les charges de P entrantes dans le lac Memphrémagog, varient entre 24,8 T/an et 59,7 T/an en fonction des différents scénarios de modélisation. Si l'on compare les potentiels d'exportation présentés au tableau 7 avec les charges entrantes modélisées indiquées au tableau 8, on note que, selon le scénario, la rétention du P dans les lacs présents dans le bassin diminue de 25 % à 43 % le P exporté vers l'aval.

Tableau 8 : Bilan global des charges (T/an) de P modélisées

Scénarios	MR1	MR2	MR3
CE1 (faible)	28,4	24,8	27,1
CE2 (moyen)	41,0	35,7	39,1
CE3 (élevé)	59,7	52,1	57,1

La vraisemblance des charges entrantes de P modélisées a été validée au niveau des quatre (4) principaux affluents qui ont été échantillonnés en territoire américain, soit les rivières Black, Barton, Clyde et Johns, et pour lesquels des charges de P estimées nous ont été transmises par le VNAR. L'annexe 5 présente sommairement les calculs à la base de ces estimations. Faute de données, l'exercice de validation n'a pu être réalisé pour les principaux affluents en territoire canadien. Néanmoins, les quatre (4) affluents américains qui ont été considérés dans l'exercice de validation drainent à eux seuls 66 % de l'ensemble du bassin versant du lac Memphrémagog. Le tableau 9

permet de comparer les charges modélisées et les charges estimées à l'exutoire de ces quatre (4) affluents américains.

Tableau 9 : Comparaison des charges de P (T/an) modélisées et estimées à l'exutoire des quatre principaux affluents en territoire américain

Rivière	Charge de P estimée (T/an)	Charge de P modélisée (T/an)								
		CE1-MR1	CE2-MR1	CE3-MR1	CE1-MR2	CE2-MR2	CE3-MR2	CE1-MR3	CE2-MR3	CE3-MR3
Barton	19,5	6,4	9,0	13,9	5,8	8,2	12,6	6,6	9,3	14,3
Black	19,0	6,2	8,9	13,4	5,7	8,1	12,1	6,2	8,8	13,3
Clyde	6,0	5,3	7,7	10,8	2,9	4,2	5,9	3,7	5,2	7,4
Johns	1,2	0,8	1,1	1,6	0,8	1,1	1,6	0,8	1,1	1,6
Total	45,7	18,7	26,7	39,7	15,2	21,6	32,2	17,3	24,4	36,6

Selon le tableau 9, peu importe le scénario de modélisation utilisé, l'ordre de grandeur des charges modélisées versus celles estimées est conservé. Les rivières Barton et Black ont des exportations quasi similaires et nettement plus élevées que la rivière Johns, qui exporte une plus faible charge de P.

Les scénarios de modélisation CE3-MR1 et CE3-MR3 obtiennent des charges modélisées plus élevées qui sont plus près des valeurs estimées. Considérant les intervalles de confiance de 95 % des valeurs de P estimées (annexe 5), le scénario CE3-MR3 modélise, dans tous les cas, des charges de P qui se situent à l'intérieur de ces intervalles de confiance, soit généralement près de la limite inférieure de l'intervalle. De ce fait et considérant les résultats présentés au tableau 6, le scénario de modélisation retenu est le CE3-MR3.

Selon les résultats présentés au tableau 10, les apports en P arrivant au lac Memphrémagog proviennent à 72 % du territoire américain et à 28 % du territoire canadien. Si l'on considère la proportion du bassin versant située aux États-Unis (71 %) et au Canada (29 %), les territoires américain et canadien contribuent de façon équivalente dans les apports en P au lac.

Tableau 10: Charges de P (T/an) modélisées entrantes dans le lac en territoire américain et canadien

Scénarios	États-Unis			Canada		
	MR1	MR2	MR3	MR1	MR2	MR3
CE1 (faible)	20,9	17,3	19,4	7,5	7,5	7,7
	74 %	70 %	72 %	26 %	30 %	28 %
CE2 (moyen)	29,9	24,7	27,7	11,2	11,0	11,4
	73 %	69 %	71 %	27 %	31 %	29 %
CE3 (élevé)	44,5	37,0	41,4	15,2	15,1	15,7
	74 %	71 %	72 %	26 %	29 %	28 %

Selon la carte présentée à l'annexe 6, près de 20 % du territoire serait responsable d'environ 40 % des charges exportées vers le lac Memphrémagog. La représentation cartographique des charges de P modélisées selon le scénario retenu (CE3-MR3) pour chacune des unités de drainage et pondérées selon la superficie de ces dernières a permis d'identifier les principales unités génératrices dans le bassin (annexe 7). Il est également intéressant de noter que, peu importe le scénario de modélisation utilisé, les principales unités de drainage génératrices de P sont similaires.

Selon les résultats obtenus à l'échelle des unités de drainage, l'utilisation du sol est un facteur prépondérant dans les apports de P dans les cours d'eau, tout comme la position hydrologique des unités à l'intérieur du bassin qui module de manière importante les apports en P vers l'aval. Sur une charge totale entrante de 57,1 T/an, environ 6,5 T/an, soit 11 %, proviennent des unités dont l'écoulement est dirigé directement vers le lac Memphrémagog. Ces unités qui représentent une superficie de 104,4 km² (environ 6 % de la superficie totale du bassin) incluent les petits affluents à faible débit. Ainsi, environ 11 % de la charge de P entrante dans le lac est susceptible d'avoir un impact plus grand dans la zone littorale.

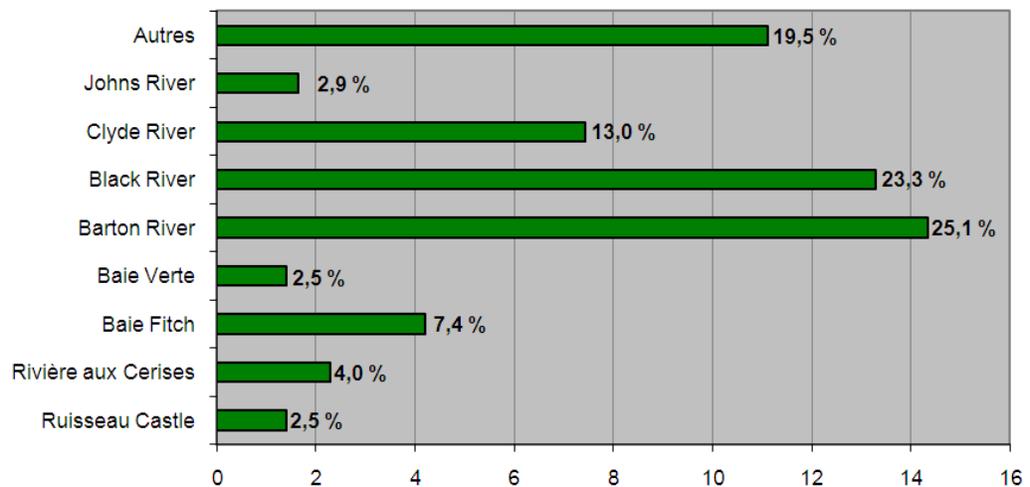
Globalement, les unités occupées principalement par de la forêt et situées en tête de bassin, et pour lesquelles quelques lacs se trouvent à l'intérieur du parcours hydrologique du P exporté vers l'aval, contribuent pour une part moins importante dans les apports en P au lac. Tandis que les unités occupées principalement par des terres en culture, des milieux humides et/ou des zones résidentielles (incluant la présence de bâtiments avec une fosse septique) et qui sont situées en bordure du lac ou qui n'ont pas de lac sur leur parcours hydrologique contribuent de manière significative aux apports en P.

Plus particulièrement, les unités qui ont une charge pondérée plus importante sont, principalement, celles à l'intérieur desquelles on retrouve les villes de Newport, de Magog et de Barton (annexe 7). Bien que contrairement aux villes de Magog et de Newport, la ville de Barton ne soit pas située en bordure du lac Memphrémagog, aucun lac n'est présent sur son parcours hydrologique vers l'aval. Donc, aucune rétention de P ne peut avoir lieu, ce qui explique les apports importants associés à cette unité. Les unités fortement occupées par des terres en culture et/ou des prairies/pâturages du côté américain et situées le long des rivières Black et Barton exportent également une quantité importante de P vers le lac Memphrémagog.

Par ailleurs, la présence importante de milieux humides auxquels des coefficients élevés d'exportation de P sont associés, selon les études récentes, contribuent de manière significative aux exportations de P dans les cours d'eau, notamment au niveau des unités situées à l'embouchure des rivières Black et Barton du côté américain.

À l'échelle des bassins principaux, les bassins des rivières Barton et Black, qui occupent respectivement 24 % et 20 % du territoire, contribuent à 48 % des apports totaux en P dans le lac (figure 5). Du côté canadien, le bassin versant de la baie Fitch contribue de manière significative (7,4 %).

Figure 5 : Charges de P modélisées (T de P/an) à l'exutoire des bassins principaux



3.2 SCÉNARIOS DE RÉDUCTION DES EXPORTATIONS

Afin d'évaluer la contribution des activités humaines dans les apports en P dans le lac, un scénario dit « état de référence » (sans action anthropique) a été modélisé. Ce scénario considère le bassin recouvert uniquement de forêt (88 %), de milieux humides (4 %) actuels et de plans d'eau (8 %).

Selon ce scénario de référence, les charges annuelles de P entrantes dans le lac Memphrémagog seraient d'environ 18,3 T, soit 300 % de moins que le scénario de modélisation retenu (57,1 T/an). On peut donc supposer que les activités anthropiques ont une grande influence sur les charges en P. Le scénario de référence établit que 13,4 T (73 %) proviendraient du territoire américain et 4,9 T (27 %) du territoire canadien, ce qui est semblable au scénario de modélisation retenu.

Il importe de préciser que ce scénario de référence sous-estime possiblement les charges de P puisqu'il est fort probable qu'une proportion importante de milieux humides qu'on retrouvait à l'origine dans le bassin versant ait été remplacée par une autre utilisation du sol. Or, seuls les milieux humides actuels ont été utilisés pour la modélisation du scénario de référence. De plus, d'autres éléments peuvent différer, comme les lacs réservoirs qui ont été créés artificiellement.

Les scénarios de réduction des exportations de P ainsi que de changement dans l'utilisation du sol ont été réalisés selon le scénario de modélisation des charges retenu précédemment, soit le CE3-MR3. La charge entrante modélisée est donc de 57,1 T/an.

Tableau 11: Scénarios de réduction des exportations

Scénarios de changement	Diminution des charges par rapport à la charge entrante modélisée
Diminution de 30 % des exportations des zones développées mixtes (0,3 % du territoire)	1,0 % (-0,6 T/an)
Diminution de 30 % des exportations des zones résidentielles (2,3 % du territoire)	4,0 % (-2,3 T/an)
Diminution de 30 % des exportations des terres en culture (6 % du territoire)	11,4 % (-6,5 T/an)
Diminution de 30 % des exportations des terres en culture contigües au réseau hydrographique (3 % du territoire et 50 % des terres agricoles)	6,3 % (-3,6 T/an)
Diminution de 30 % des exportations associées aux bâtiments considérés à risque (soit 13 370 bâtiments).	1,2 % (-0,7 T/an)

Les résultats des scénarios de réduction des exportations indiquent que pour réduire de manière significative les apports en P dans le lac, il importe de cibler les principaux exportateurs sur le territoire, mais aussi de considérer leur position hydrologique dans le bassin. La réduction des charges de P exportées par une source diffuse ou ponctuelle est modulée non seulement par la superficie du territoire occupée par cette

dernière, mais aussi par sa position hydrologique dans le bassin. La réduction des charges exportées par des sources diffuses situées en bordure du réseau hydrographique et dans la partie aval du bassin, telles que les zones résidentielles et les terres en culture, diminue de façon plus significative les apports en P dans le lac.

3.3 BILAN DE MASSE

L'équation de bilan de masse de Dillon-Rigler-Kirchner (General Lake model, 1975) a été appliquée afin de transformer les charges entrantes dans le lac Memphrémagog en concentrations ambiantes de P dans le lac selon certaines caractéristiques hydrologiques de ce dernier et ainsi, d'établir un bilan de masse du P à l'échelle du bassin.

L'équation et les paramètres utilisés sont :

$$P = (L(1-R)) / zp$$

Où :

P = concentration ambiante en phosphore totale prédite pour le lac (mg/m³)

L = charge de P entrante modélisée par unité de surface du lac (mg/m²/an)

R = coefficient de rétention du lac, soit MR1 :0,51, MR2 : 0,43 et MR3 :0,25

z = profondeur moyenne (m), soit 15,5 m

p = taux de vidange (flushing rate), soit 1/temps de résidence donc 1/1,7 an

Les tableaux 12 a, b et c présentent les concentrations calculées par l'application de l'équation de bilan de masse pour chacun des scénarios de modélisation, incluant le scénario d'état de référence. Au total, trois (3) coefficients de rétention (R) pour le lac Memphrémagog, calculés à partir des modèles de rétention retenus, ont été testés.

Tableau 12 : Concentrations calculées selon l'équation de bilan de masse

a) Rétention du lac Memphrémagog selon le MR1 : 0,51

Scénarios de modélisation	Concentration de P (mg/m ³)		
	MR1	MR2	MR3
État de référence	4,9	4,0	10,0
CE1	15,6	13,6	14,9
CE2	22,5	19,6	21,5
CE3	32,8	28,6	31,3

b) Rétention du lac Memphrémagog selon le MR2 : 0,43

Scénarios de modélisation	Concentration de P (mg/m ³)		
	MR1	MR2	MR3
État de référence	5,7	4,7	11,7
CE1	18,1	15,8	17,3
CE2	26,2	22,8	25,0
CE3	38,1	33,2	36,5

c) Rétention du lac Memphrémagog selon le MR3 : 0,25

Scénarios de modélisation	Concentration de P (mg/ m ³)		
	MR1	MR2	MR3
État de référence	7,6	6,2	15,4
CE1	23,9	20,8	22,7
CE2	34,4	30,0	32,9
CE3	50,1	43,7	48,0

Selon les concentrations mesurées en différents points dans le lac lors des campagnes d'échantillonnage menées par le MDDEP et le MCI, les concentrations au lac Memphrémagog varient entre 8 mg/m³ dans la baie de Magog et 20 mg/m³ dans la partie nord-est de la baie Fitch.

Les concentrations ambiantes calculées pour le lac Memphrémagog qui sont le plus près des concentrations mesurées, sont celles obtenues lors de l'utilisation d'un coefficient de rétention de 0,51 pour le lac, soit entre 13,6 mg/m³ et 32,8 mg/m³.

Ainsi, considérant le scénario retenu (CE3-MR3) et une rétention de 0,51 pour le lac Memphrémagog, la concentration ambiante de P à l'état de référence serait d'environ 10 mg/m³ tandis que la concentration ambiante selon les charges entrantes modélisées serait de 31,3 mg/m³.

Or, les concentrations mesurées en différents points dans le lac indiquent des valeurs fortement variables et qui sont nettement en dessous de la concentration ambiante estimée. Comme la partie centrale du lac est nettement plus profonde que les deux



autres parties⁴, on en conclut qu'il n'est pas approprié, dans le cadre de cette étude, d'utiliser un modèle de bilan de masse voulant que le lac soit un réacteur homogène à flux constant. Ainsi, utiliser une profondeur moyenne et une valeur de rétention uniforme pour tout le lac dans l'équation de bilan de masse laisse supposer l'introduction d'un important biais dans le calcul des concentrations. De plus, il est peu probable qu'en un point donné du lac la totalité des charges entrantes (soit 57,1 T/an) dans le lac puissent s'y retrouver.

⁴ À titre indicatif, les quatre (4) sections homogènes délimitées par le Dr. Kalf (Université de McGill) selon la morphologie du lac Memphrémagog ainsi que les unités de drainage associées sont illustrées en rouge sur les cartes présentées en annexe.

DISCUSSION

De par son importante superficie et son caractère international, le bassin versant du lac Memphrémagog représentait un défi de taille pour l'élaboration d'une base de données numériques uniques (comparables d'un bout à l'autre du territoire) nécessaire à la caractérisation des composantes physique et humaine qui régissent la dynamique du P. La participation de plusieurs intervenants dans le cadre de ce mandat a favorisé la mise en commun d'information géographique pertinente.

La création dans le système d'information géographique (SIG) d'un environnement de modélisation unique pour ce mandat a permis une plus grande flexibilité quant aux variables pouvant être considérées lors de la modélisation et, conséquemment, a nécessité la contribution technique et scientifique de plusieurs intervenants dans le cadre du projet. La collaboration scientifique de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) a permis de raffiner les coefficients d'exportation associés à la classe « terre en culture » en considérant non seulement une variété de cultures, mais aussi la pédologie comme seconde variable. La contribution technique du MDDEP a permis de tenir compte du rôle des lacs de plus de 2 ha comme milieux de rétention lors du transport du P de l'amont vers l'aval du bassin. Considérant que la plupart des études de modélisation du P à l'échelle d'un bassin versant ne tiennent pas compte de cette composante importante dans la dynamique du P, il importe de mentionner la plus value de cette approche sur la représentativité des charges de P modélisées. Par ailleurs, la souplesse de l'environnement de modélisation créé a permis de tester différents scénarios de modélisation (selon différents coefficients d'exportation et modèles de rétention) et d'identifier le scénario le plus représentatif de la situation actuelle.

Bien qu'aucune validation des charges modélisées n'ait été possible en territoire canadien, les résultats de comparaison des charges modélisées avec les charges estimées à l'exutoire des quatre principaux affluents américains nous permettent de confirmer la représentativité des résultats obtenus. La validation indique que peu importe le scénario de modélisation utilisé, l'ordre de grandeur des charges modélisées versus celles estimées est conservé. De manière absolue, le scénario CE3-MR3 modélise, dans tous les cas, des charges de P qui se situent à l'intérieur des intervalles de confiance des valeurs estimées, soit généralement près de la limite inférieure de l'intervalle. Précisons qu'il est fort probable que la modélisation sous-estime les charges de P entrantes en raison, d'une part, de l'attribution de charges moyennes de P trop faibles pour les fosses septiques présentes dans le bassin. D'autre part, du niveau de généralisation de la classification de l'utilisation du sol qui ne permet pas de représenter toutes les subtilités dans l'utilisation du territoire qui modulent les exportations de P. Finalement, de la présence de sources ponctuelles de P non inventoriées dans la base de données géomatique.

Par ailleurs, il est possible qu'une partie des plans d'eau ayant une superficie entre 2 ha et 4 ha n'agissent pas comme décanteurs du P, mais plutôt comme sources de P tels des milieux humides. L'utilisation du seul critère de superficie pour attribuer une rétention au plan d'eau peut être une source de biais dans l'exportation totale. Considérant que la rétention des lacs, selon le scénario retenu, diminue de 31 % les exportations potentielles de P entrantes dans le lac, il est possible que la sous-estimation des charges entrantes dans le lac y soit reliée.

Nonobstant le scénario de modélisation utilisé, le portrait global des exportations de P sur l'ensemble du bassin est le même : le P arrivant au lac Memphrémagog provient à 72 % du territoire américain et à 28 % du territoire canadien. Bien que les quantités exportées d'un bord et de l'autre de la frontière soient différentes, les territoires américain et canadien ont des taux d'exportation de P similaires puisque 29 % du bassin versant est situé au Canada et 71 % aux États-Unis.

Globalement, près de 20 % du territoire serait responsable de l'exportation d'environ 40 % des charges vers le lac Memphrémagog. L'utilisation du sol est un facteur prépondérant dans les apports de P dans les cours d'eau, tout comme la position hydrologique des unités à l'intérieur du bassin qui module de manière importante les apports en P vers l'aval. Sur une charge totale entrante de 57,1 T/an, environ 6,5 T/an, soit 11 %, proviennent des unités dont l'écoulement dirigé directement vers le lac Memphrémagog est susceptible d'avoir un impact plus grand dans la zone littorale.

Les unités de drainage occupées principalement par de la forêt et situées en tête de bassin, et pour lesquelles quelques lacs se trouvent à l'intérieur du parcours hydrologique du P exporté vers l'aval, contribuent pour une part moins importante dans les apports en P au lac.

Les unités occupées principalement par des terres en culture, des milieux humides et/ou des zones résidentielles (incluant la présence de bâtiments avec une fosse septique), qui sont situées en bordure du lac ou qui n'ont pas de lac sur leur parcours hydrologique contribuent de manière significative aux apports en P.

Plus particulièrement, les unités qui possèdent une charge pondérée plus importante sont, principalement, celles à l'intérieur desquelles on retrouve les villes de Newport, de Magog et de Barton. Bien que contrairement aux villes de Magog et de Newport, la ville de Barton ne soit pas située en bordure du lac Memphrémagog, aucun lac n'est présent sur son parcours hydrologique vers l'aval. Donc, aucune rétention de P ne peut avoir lieu, ce qui explique les apports importants associés à cette unité. Les unités fortement occupées par des terres en culture et/ou des prairies/pâturages du côté américain et situées le long des rivières Black et Barton exportent également une quantité importante de P vers le lac Memphrémagog.



Par ailleurs, la présence importante de milieux humides auxquels des coefficients élevés d'exportation de P sont associés, selon les études récentes, contribuent de manière significative aux exportations de P dans les cours d'eau, notamment au niveau des unités situées à l'embouchure des rivières Black et Barton du côté américain.

Bien que d'ordre très général, les résultats des scénarios de réduction des exportations indiquent que pour réduire de manière significative les apports en P dans le lac, il importe de cibler les principaux exportateurs sur le territoire et ce, considérant les charges exportées associées ainsi que leur position hydrologique dans le bassin. La réduction des charges de P exportées par une source diffuse ou ponctuelle est modulée non seulement par la superficie du territoire occupée par cette dernière (dans le cas des sources diffuses), mais aussi par sa position dans le bassin. En agissant sur le territoire de façon ciblée, il sera possible de diminuer davantage les apports en P dans le lac tout en intervenant sur une fraction du territoire.

Les concentrations ambiantes de P dans le lac Memphrémagog calculées selon l'application de l'équation de bilan de masse aux charges entrantes modélisées sont sujettes à certains biais, notamment, en raison du manque de données permettant de caractériser avec exactitude la dynamique interne du lac Memphrémagog ainsi que de la sous-estimation probable des charges entrantes. Il importe de préciser qu'il est peu probable que le lac Memphrémagog, de par sa superficie importante et sa morphologie hétérogène, ait une dynamique interne du P similaire en tout point.

La modélisation du scénario dit « état de référence » (sans action anthropique) a permis de démontrer l'augmentation des apports en P dans le lac associée au développement du territoire. La concentration ambiante de P calculée pour le scénario dit « état de référence » ne peut être utilisée de façon absolue considérant, notamment, la sous-estimation probable des charges entrantes modélisées ainsi que les biais dans la méthode de calcul du coefficient de rétention des eaux du lac Memphrémagog.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La présente étude a permis de dresser un portrait global de la situation du transport du P sur l'ensemble du bassin versant du lac Memphrémagog en identifiant les principaux contributeurs et zones génératrices de P sur le territoire.

De façon prioritaire, les résultats obtenus constituent un outil de discussion essentiel pour la prise de décision éclairée par les gestionnaires du territoire tant au niveau municipal que dans le cadre des activités du Comité directeur Québec/Vermont. Les zones contributrices identifiées dans le cadre de ce mandat doivent être considérées de façon prioritaire. La réduction des concentrations ambiantes de P dans le lac nécessitera une action concertée entre tous les utilisateurs du territoire.

Dans un second temps, plusieurs possibilités méthodologiques, notamment en ce qui concerne le raffinement de la modélisation, de la validation des charges de P entrantes et de l'estimation des concentrations ambiantes de P dans le lac, pourront être abordées au niveau du comité technique du Comité directeur Québec/Vermont afin d'évaluer leur applicabilité ainsi que leur plus value pour la suite des choses. En guise d'exemples, les possibilités méthodologiques suivantes pourront être évaluées :

- évaluer la possibilité de bonifier la B.D. géomatique par l'ajout de données de terrain plus détaillées (ex. : types de culture) afin de raffiner la caractérisation du territoire et, conséquemment, d'améliorer les charges de P estimées.
- Attribuer un coefficient d'exportation moyen aux installations septiques selon la démarche préconisée par le MDDEP qui considère une atténuation variable de l'exportation en fonction de la conformité ou non des installations, du type de sol ainsi que de la distance au plan d'eau.
- Identifier les lacs qui agissent réellement comme décanteurs (milieux de rétention du P).
- Estimer le coefficient de rétention des lacs à partir de modèles de rétention (MR) basés sur la charge en eau des lacs (Qs), ce qui permettrait une comparaison des valeurs modélisées et des valeurs mesurées sur un plus grand ensemble de lacs du bassin et offrirait plus de possibilités de modélisation des valeurs naturelles.



- Voir la possibilité de mandater le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) afin d'évaluer les données de débit à la centrale hydroélectrique de Magog, située à l'exutoire du lac Memphrémagog, ainsi que de données de niveau d'eau (ex. : station de mesure d'Environnement Canada) du lac Memphrémagog. Ces données pourraient permettre de calculer les charges sortantes en eau et en P à l'exutoire du lac et ainsi, être utilisées pour valider les résultats de modélisation selon les scénarios d'exportation et les modèles de rétention (MR).
- Évaluer l'applicabilité du modèle de bilan de masse développé pour le lac Champlain (Vermont Department of Environmental Conservation and New York State Department of Environmental Conservation, 1997) ainsi que la possibilité de considérer les quatre (4) sections homogènes du Dr. Kalff (Université de McGill) dans la modélisation de la dynamique interne du lac.
- Réaliser des campagnes d'échantillonnage supplémentaires afin de valider les concentrations ambiantes estimées en différents points sur le lac.

Parallèlement, il serait intéressant de réaliser un suivi des charges de P aux principaux exutoires canadiens afin de valider les charges modélisées en territoire canadien.

Précisons que la modélisation de la dynamique interne du lac devra être la plus juste possible si l'on veut cibler des charges de P entrantes maximales pour atteindre les critères de qualité qui auront été fixés par le Comité directeur Québec/Vermont.

Par ailleurs, afin de permettre aux gestionnaires du territoire d'utiliser la B.D. géomatique créée dans le cadre du présent mandat, il est recommandé de créer une interface qui faciliterait, notamment, la mise à jour et l'ajout de données, la modification des coefficients d'exportation, la réalisation de scénarios de changements dans l'utilisation du sol, etc.

RÉFÉRENCES

Modèles :

Choquette, C. 2005. Evaluating management practices to limit phosphorus losses from agricultural fields in the Castor watershed using the WEND model. McGill University, 113 pages.

Gollamudi, A. 2006. Hydrological and water quality modeling of agricultural fields in Québec. McGill University, 103 pages.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2008. Outil de diagnostic des exportations de phosphore (ODEP) : manuel de l'utilisateur version 1.1, 111 pages.

McCuen, R. 2002. Modeling hydrologic change, Richard H. McCuen, 433 pages, 2002, ed. Lewis Publisher.

White, S., Anderton, S., Ishemo, C., Worrall, F., Hollis, J. and Hallett, S. No date. Terrestrial Runoff modeling for Risk Assessment of Chemical Exposure (TERRACE). Year one report: Review of State of the Art: assessment of Modelling Software and Available Geodata. University of Durham, Department of Geological Science and Soil Survey and Land Research Centre.

Wisconsin Department of Natural Resources. 2003. Wisconsin Lake Modeling Suite (WILMS). Program Documentation and User's Manual.

Coefficients d'exportation :

Carignan, R., Perceval, O., Prairie, Y. et Parkes, A. En cours de publication. Résultats de travaux de recherche sur le développement d'un outil de prévention de l'eutrophisation des lacs des Laurentides et de l'Estrie.

Dorioz, J.-M., Quetin, P., Lazzarotto, J. et Orand, A. 2004. Bilan du phosphore dans un bassin versant du lac Léman: conséquences pour la détermination de l'origine des flux exportés. Revue des sciences de l'eau, vol. 17, no. 3, pp. 329-354.

Hemispheres. 2008. Évaluation du bilan de phosphore du lac Davignon Cowansville. Rapport technique présenté pour le compte du Conseil de Gestion du bassin versant de la Yamaska. 43 pages.

Michaud, A., Deslandes, J. et Beaudin, I. 2006. Modélisation de l'hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin versant de la rivière aux Brochets à l'aide du modèle SWAT. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 99 pages + annexes.

P. Lin. J. 2004. Review of Published Export Coefficient and Event Mean Concentration (EMC) Data. Wetlands Regulatory Assistance Program. 15 pages.

Autres :

Camille Rivard-Sirois et Marie-Florence Pouet (2006) État de santé du Lac Nick, Rapport final, RAPPEL, 129 pages.

Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2008. La mobilité du phosphore: du sol au cours d'eau. Fiche technique no1, 8 pages.

Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs. 2004. Qualité des eaux du lac Memphrémagog, 1996-2002. 17 pages.

Simoneau, M. 2004. Qualité des eaux du lac Memphrémagog, 1996-2002. Québec, MDDEP, Direction de suivi de l'état de l'environnement, n°ENV/2004/0265, rapport n°QE/149, 17 pages.

United States Department of Agriculture. (USDA) 2007. Part 630 Hydrology National Engineering Handbook. Chapter 7 Hydrologic Soil Groups. Natural resources Conservation Service, 5 pages.

Vermont Department of Environmental Conservation and New York State Department of Environmental Conservation. 1997. A phosphorus Budget, model, and load reduction for lake Champlain. Lake Champlain Diagnostic-Feasibility Study Final Report

W. Diebel, M., T. Maxted, J., M. Robertson, D., Han, S. And Vander Zanden, M. J. 2009. Landscape Planning for Agricultural Nonpoint Source Pollution Reduction III: Assessing Phosphorus and Sediment Reduction Potential. Environmental management. Environmental Management, no. 43: pp. 69-83.

Yves T. Prairie et Matthew Wild (2000) Rapport sur le suivi de la qualité des eaux 2000, RAPPEL, 92 pages.

Sites Internet :

International Lake Environment Committee (ILEC). Promoting Sustainable Management of the World's Lakes and Reservoirs: <http://www.ilec.or.jp/database/nam/nam-48.html>

The water Quality of Lake Memphremagog: resultants of the Joint Quebec-Vermont Water Quality Monitoring Initiative and Recommendations for Strategy Development (2008): http://www.anr.state.vt.us/dec/waterq/lakes/docs/lp_monjointque-vtreport.pdf

Présentations :

Bélanger, F. 2008. Lac Memphrémagog et son bassin versant. Pour une eau claire, objectifs de réduction du phosphore, propositions du Memphrémagog Conservation Inc. (MCI).

Carignan, R. 2006. Les causes de la dégradation des lacs des Laurentides. Forum national sur les lacs (2006). Université de Montréal. 73 diapositives.



Blais, D. Modélisation des écoulements de surface, gestion de l'eau et du territoire. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs.

MacDougall, S. and Kretchmer, D. New Hampshire Nutrient Lake TDMLs : Medium Scale Complexity Models.

Roy, L., Gravel, B., Carignan, R. et Prairie, Y. La modélisation de la capacité de support des lacs au Québec. Forum national sur les lacs 2008.

Annexe 1

CARTE D'UTILISATION DU SOL

Annexe 2

CARTE PÉDOLOGIQUE

Annexe 3

CARTE DES PENTES

Annexe 4

CARTE DES SOURCES PONCTUELLES

Annexe 5

SOMMAIRE DES CALCULS DES CHARGES DE P AUX EXUTOIRES DES QUATRE
PRINCIPAUX AFFLUENTS AUX ÉTATS-UNIS

Annexe 6

CARTES DES CHARGES DE P EXPORTÉES (KG/AN) PAR UNITÉ DE DRAINAGE :
SCÉNARIO DE MODÉLISATION RETENU (CE3-MR3)

Annexe 7

CARTES DES CHARGES DE P EXPORTÉES PONDÉRÉES (KG/KM²/AN) SELON LA
SUPERFICIE DES UNITÉS DE DRAINAGE : SCÉNARIO DE MODÉLISATION
RETENU (CE3-MR3)



SMⁱ

AMÉNATECH INC.