
ESTIMATION DES APPORTS EN PHOSPHORE DU BASSIN VERSANT DU LAC DES SIX

Municipalité de Saint-Boniface

Décembre 2011



ÉQUIPE DE RÉALISATION

Coordination et rédaction

Yann Boissonneault, biologiste, *M.Sc.*¹

Révision

Nathalie Sarault, directrice, *B.Sc.*²

Nous tenons à remercier Louis Roy³ et Daniel Blais⁴ pour leurs conseils et leurs recommandations qui ont été essentiels à la réalisation de ce projet.

¹ Consultant : *Boissonneault, Sciences, eaux et environnement*, www.boissonneault.ca

² Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY)

³ Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP)

⁴ Direction du patrimoine écologique, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP)

CETTE ÉTUDE A ÉTÉ RÉALISÉE POUR L'ORGANISME DE BASSINS VERSANTS DES RIVIÈRES DU LOUP ET DES YAMACHICHE (OBVRLY)



Pour nous joindre

Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY)
143, rue Notre-Dame
Yamachiche, Québec
G0X 3L0

Tél. : (819) 296-2330

Fax : (819) 296-2331

Adresse de courrier électronique : info@obvrly.ca

Adresse Web : www.obvrly.ca

Référence à citer

Boissonneault, Y., 2011. *Estimation des apports en phosphore du bassin versant du lac des Six, municipalité de Saint-Boniface*, rapport réalisé pour l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY), 36 pages.

© OBVRLY, 2011

Ce document est disponible sur le site Web de l'Organisme.

Autorisation de reproduction

La reproduction de ce document, en partie ou en totalité, est autorisée à la condition que la source et les auteurs soient mentionnés comme indiqué dans **Référence à citer**.



Présentation de l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY)

Qu'est-ce qu'un bassin versant?

Un bassin versant constitue un territoire où l'eau reçue par précipitation s'écoule et s'infiltré pour former un réseau hydrographique alimentant un exutoire commun, le cours d'eau principal.

Source: MDDEP



Qu'est-ce que l'OBVRLY?

L'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY) est une table de concertation où siègent tous les acteurs et usagers de l'eau qui oeuvrent à l'intérieur de mêmes bassins versants. L'OBVRLY n'est pas un groupe environnemental, mais plutôt un organisme de planification et de coordination des actions en matière de gestion intégrée de l'eau par bassin versant (GIEBV). C'est donc par la documentation de l'état de la situation sur son territoire d'intervention que l'organisme peut recommander des solutions aux acteurs et usagers afin de maintenir ou d'améliorer la qualité de l'eau et des écosystèmes associés.

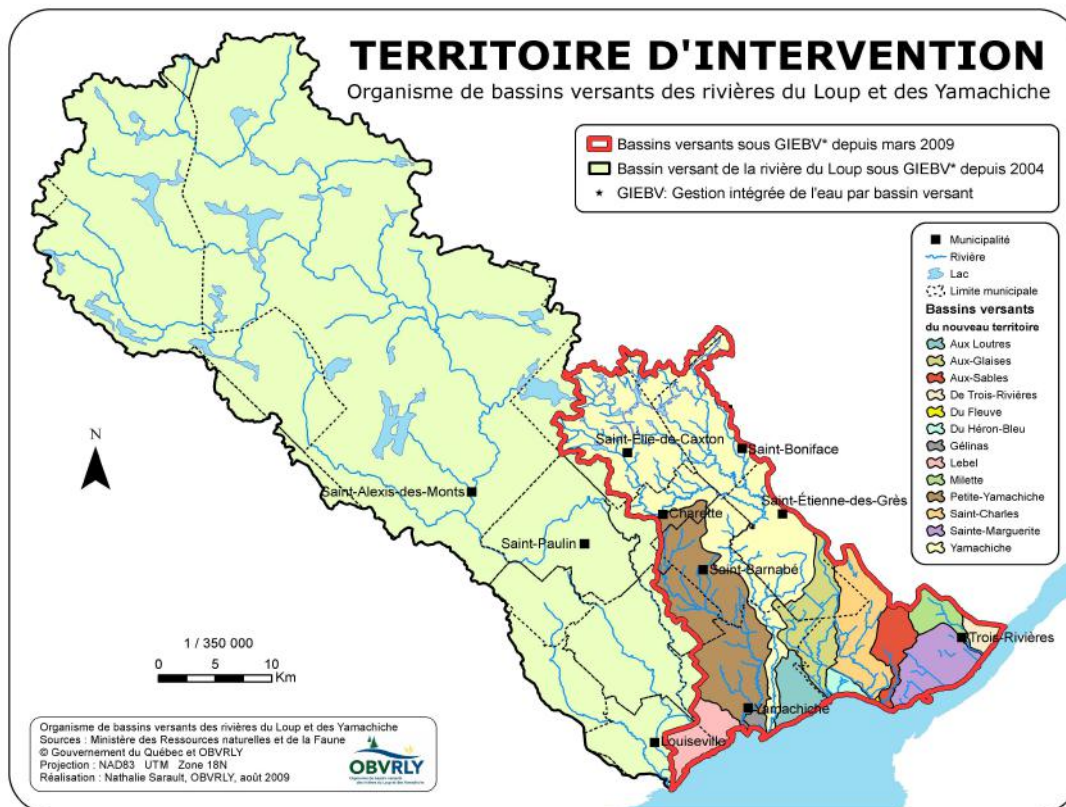


TABLE DES MATIÈRES

Équipe de réalisation	3
Présentation de l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY)	5
Table des matières	7
Introduction	9
Capacité de support en phosphore des lacs	11
Qu'est-ce que le calcul de la capacité de support en phosphore ?.....	11
Les modèles	11
Limites et précision des modèles	15
Matériel et méthode	19
Modèle empirique de Carignan.....	19
Estimation des apports en phosphore.....	20
Résultats	23
Modèle empirique de Carignan.....	23
Estimation des apports en phosphore.....	26
Conclusion	29
Modèle empirique de Carignan.....	29
Estimation des apports en phosphore.....	30
Recommandations	33
Références	34



INTRODUCTION

Suite aux floraisons d'algues bleu-vert signalées au lac des Six depuis 2008, l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY) a effectué en 2009 une étude du bassin versant de ce lac afin d'identifier les causes de ces floraisons. Cette étude réalisée en collaboration avec la municipalité de Saint-Boniface, l'association de riverains du lac Héroux et du lac des Six et l'Université du Québec à Trois-Rivières avait pour titre : *Portrait et diagnostic du bassin versant du lac des Six - 2009, municipalité de Saint-Boniface* (voir OBVRLY, 2011). Afin d'augmenter les informations acquises dans cette première phase de l'étude du lac effectuée en 2009, deux études complémentaires ont été réalisées en 2010 et 2011 :

1. Caractérisation de la zone littorale du lac des Six - 2010
2. Estimation des apports en phosphore du bassin versant du lac des Six - 2011

Ce document présente les résultats de l'estimation des apports en phosphore du bassin versant du lac des Six. La caractérisation de la zone littorale du lac des Six réalisée en août 2010 est plutôt présentée dans un second rapport complémentaire (voir Boissonneault, 2011a). Lors de la réalisation du *Portrait et diagnostic du bassin versant du lac des Six*, nous avons pu identifier les différentes sources potentielles de phosphore contribuant à l'eutrophisation de ce lac. Qu'elles soient ponctuelles (ex. : installations septiques) ou diffuses (ex. : ruissellement des eaux sur le territoire du bassin versant), les sources de pollution identifiées contribuent toutes à l'enrichissement du lac des Six (OBVRLY, 2011). Cependant, le portrait et diagnostic de ce lac ne nous a pas permis de quantifier la contribution des différentes sources de phosphore d'origine naturelle et humaine. L'estimation des apports en phosphore du bassin versant du lac des Six présenté dans ce document a donc pour but de quantifier les apports en phosphore provenant du bassin versant et de la ceinture résidentielle autour du lac. C'est à l'aide de modèles prédictifs des concentrations en phosphore développés pour les lacs du Québec qu'il est possible d'évaluer la contribution en phosphore des activités humaines présentes dans le bassin versant d'un lac. Cette étude s'avérait donc essentielle pour compléter le *Portrait et diagnostic du bassin versant du lac des Six* réalisé en 2009.

Une brève description des modèles utilisés est présentée dans ce document. Les aspects méthodologiques, les résultats de cette étude ainsi que leur interprétation sont par la suite exposés. Il est important de mentionner que dans cette étude l'utilisation de ces modèles vise seulement à distinguer la contribution en phosphore des activités humaines de la contribution en phosphore des apports naturels. Comme la plupart des modèles ne sont pas calibrés et au point pour toutes les régions du Québec, les résultats ne pourront être transposés en unités utiles à l'aménagement, par exemple en nombre d'habitations, et ne pourront donc pas servir à évaluer le développement encore possible pour ce lac.



CAPACITÉ DE SUPPORT EN PHOSPHORE DES LACS

L'intérêt d'évaluer la capacité de support en phosphore d'un lac réside dans les problèmes d'eutrophisation que les lacs peuvent connaître. Rappelons que l'eutrophisation est le terme général pour expliquer le vieillissement d'un plan d'eau. Ce phénomène peut se résumer ainsi : « ...*enrichissement des eaux par des nutriments, tels l'azote et le phosphore, se traduisant par une prolifération des végétaux aquatiques ou des cyanobactéries et par une diminution de la teneur en oxygène des eaux profondes.* » (Office québécois de la langue française, 2007). L'eutrophisation est d'abord un phénomène naturel à l'échelle géologique qui s'étale sur des dizaines de milliers d'années. Cependant, il peut être accéléré par les activités humaines qui contribuent à l'augmentation des charges en éléments nutritifs, particulièrement le phosphore. En effet, à cause de ces apports en provenance de la présence de l'humain autour des lacs, ce processus naturel s'est vu nettement accéléré, un lac pouvant passer du stade oligotrophe (jeunes lacs) à eutrophe (vieux lacs) en une dizaine d'années (Laniel, 2008).

Qu'est-ce que le calcul de la capacité de support en phosphore ?

« Le calcul de la capacité de support en phosphore des lacs permet, en théorie, d'estimer le degré de développement humain pouvant prendre place dans un bassin versant sans mettre en péril la qualité de l'eau du lac récepteur. Concrètement, la capacité de support est définie comme la quantité de phosphore qu'un lac peut recevoir sans engendrer d'effets indésirables. En utilisant des modèles appropriés, il devient possible de détailler et de calculer les concentrations de phosphore observées dans les lacs. Ces outils nous donnent la possibilité d'estimer la concentration naturelle, c'est-à-dire avant la présence humaine, et d'évaluer l'importance des apports en phosphore provenant de l'ensemble des activités humaines ainsi que la portion associée à chacune des grandes catégories d'utilisation du sol. » (GRIL, 2009)

Les modèles

Afin de calculer la capacité de support en phosphore des lacs, plusieurs modèles prédictifs se sont succédé depuis les années 1970 au Canada. En effet, le développement de modèles et l'utilisation du concept de capacité de support ont débuté en Ontario avec le modèle de Dillon et Rigler (1975). Ils ont été développés dans le but de mieux planifier l'aménagement du territoire des bassins versants des lacs. Depuis, plusieurs modèles ont été développés en Ontario et au Québec. Il existe deux types de modèle de prédiction des concentrations en phosphore dans un lac : les modèles par bilan de masse (explicites) et les modèles empiriques (simples).



Les modèles par bilan de masse

À la manière d'un budget, les modèles par bilan de masse compilent tous les entrants et sortants de phosphore. La concentration de phosphore dans le lac est calculée à partir du ratio des entrants sur les sortants (GRIL, 2009). Pour les sources diffuses de phosphore, les entrants sont calculés à partir de coefficients d'exportation en phosphore des différents usages et types de territoires présents sur le bassin versant du lac (ex. : $\text{mg}/\text{m}^2/\text{an}$ de phosphore exporté par les forêts, les milieux humides, les sols à nu, etc.). Les sources ponctuelles en phosphore sont calculées à partir de charges estimées (ex. : $\text{kg}/\text{capita}/\text{an}$ de phosphore exportés par une installation septique). Parallèlement, les charges en eau sont calculées en tenant compte des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement. Cette étape consiste à calculer le budget hydrologique, qui permet d'estimer le débit à l'exutoire du lac et le transport du phosphore par les eaux de ruissellement du bassin versant du lac. Finalement, ces modèles tiennent aussi compte des pertes de phosphore. Les pertes totales en phosphore d'un lac s'effectuent selon deux processus majeurs : la sédimentation du phosphore au fond du lac ainsi que la perte à l'exutoire (Laniel, 2008). En résumé, ces modèles explicites permettent d'évaluer avec le plus de précision possible le parcours du phosphore, de son origine, dans le bassin versant et dans la ceinture riveraine, jusqu'au lac (figure 1).

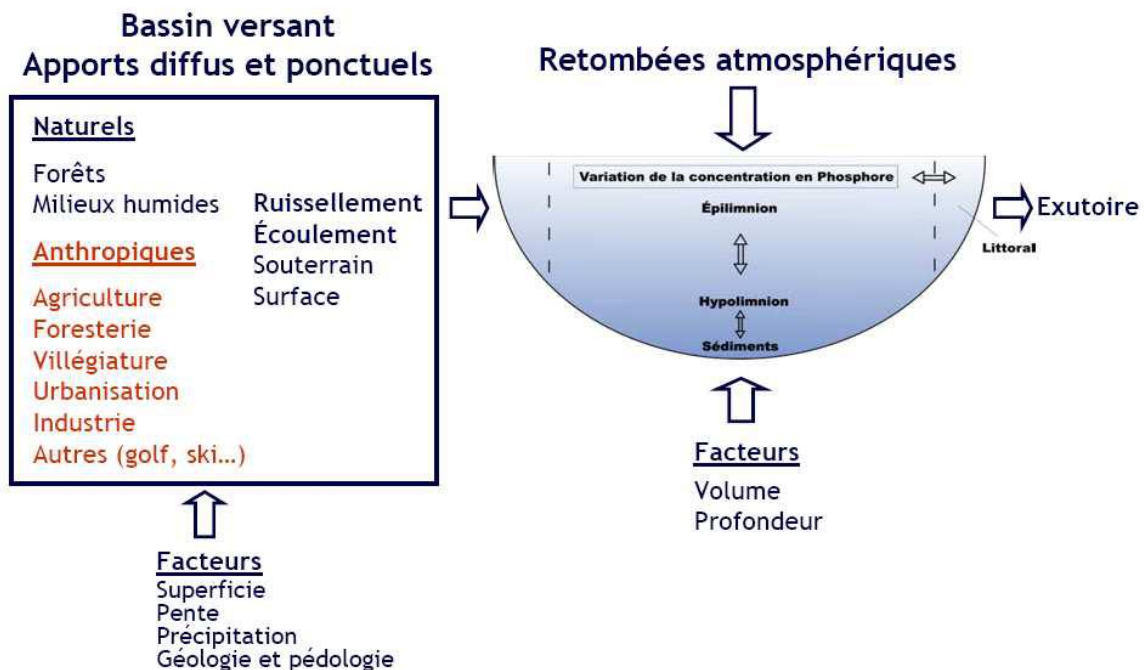


Figure 1 : Schéma illustrant le concept général de l'eutrophisation d'un plan d'eau et les apports du phosphore du bassin versant jusqu'au lac, qu'ils soient d'origine anthropique ou naturelle. Figure tirée de Roy, 2010.



Les modèles de bilan de masse ont l'avantage de permettre d'évaluer la contribution relative de chacune des sources en phosphore présentes dans un bassin versant et de déterminer quelles sont parmi ces dernières, les principales responsables du problème d'eutrophisation du plan d'eau (Laniel, 2008). Cependant, ces modèles nécessitent une connaissance complète des caractéristiques du bassin versant et du lac, ce qui implique énormément de mesures sur le terrain. Ces modèles nécessitent d'avoir des informations précises sur l'exportation moyenne en phosphore attribuée aux différentes pratiques présentes dans le bassin versant (ce qui implique une connaissance adéquate des coefficients d'exportation en phosphore associés à tous les usages) et aussi de connaître la rétention du phosphore par les sols (Laniel, 2008).

Les modèles empiriques

En 2003, une étude fut commandée par le gouvernement du Québec via le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) afin d'améliorer les connaissances sur les possibilités d'utilisation d'un modèle de capacité de support au Québec, pour deux régions, soit les Laurentides et l'Estrie. Cette étude avait pour titre : *Développement d'un outil de prévention de l'eutrophisation des lacs des Laurentides et de l'Estrie* et fut menée par des chercheurs universitaires spécialistes en limnologie, le Dr Richard Carignan et le Dr Yves Prairie (Laniel, 2008), deux chercheurs du Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique (GRIL). Le but principal de l'étude consistait à développer des modèles adaptés à nos régions pour évaluer la capacité de support en phosphore des lacs. Les chercheurs ont favorisé une approche empirique ainsi que les modèles combinés*. Notons que ces deux études en sont maintenant à l'étape de la publication.

Concernant leurs mécaniques, les modèles empiriques tentent de décrire la concentration en phosphore du lac en fonction de quelques variables ciblées décrivant le lac et le bassin versant. Plus spécifiquement, ces modèles décrivent les concentrations en phosphore des lacs en fonction de variables indépendantes en utilisant des régressions. Ainsi, la concentration du lac en phosphore est fonction de variables descriptives du lac et de son bassin versant (GRIL, 2009). Le lac des Six est situé sur le Bouclier canadien comme les lacs de la région des Laurentides ayant servi au développement des recherches du Dr Carignan. Par conséquent, nous nous attarderons plus particulièrement aux modèles développés par ce chercheur de l'Université de Montréal.

Or, pour une des versions du modèle de Carignan ayant la meilleure précision, parmi les variables mesurées, celles expliquant le mieux la concentration du phosphore sont le nombre d'habitations dans le premier 100 mètres autour de la rive divisé par le volume du lac, la superficie des milieux ouverts divisée par le volume du lac et la concentration en carbone organique dissous (COD) des eaux de surface du lac (GRIL, 2009). Le carbone organique dissous est la matière responsable de la coloration jaunâtre ou brunâtre de l'eau, tel l'acide humique provenant des milieux humides. Une innovation

* Les modèles combinés utilisent la charge en phosphore estimée par la modélisation empirique comme une première variable indépendante, alors que les autres variables indépendantes décrivent les caractéristiques du lac et de son bassin versant (GRIL, 2009).



majeure qu'apporte le modèle de Carignan pour la région des Laurentides est qu'une relation étroite fut découverte entre la concentration de carbone organique dissous (COD) présente dans un plan d'eau et la concentration naturelle en phosphore de ce dernier. Ainsi, selon ce chercheur, la concentration de COD présent dans un plan d'eau n'est pas vraiment affectée par les différentes utilisations humaines présentes dans le bassin versant, mais plutôt par des paramètres naturels et hydrologiques tels que la quantité de milieux humides, la pente du terrain et le taux de renouvellement du lac. Ainsi, l'humain ne génère pas de COD additionnel à un plan d'eau, contrairement au phosphore qui peut provenir de sources naturelles et humaines. À partir de ce constat, ce chercheur émet donc l'hypothèse qu'il est possible de déterminer la concentration naturelle en phosphore qu'un lac devrait avoir en l'absence de perturbations humaines dans son bassin versant (Laniel, 2008).

Contrairement aux modèles de type bilan de masse, le modèle empirique de Carignan a l'avantage de permettre une prédiction des concentrations en phosphore d'un lac, à l'aide d'un minimum de paramètres. Ce modèle est donc plus facile à utiliser, demandant une diversité de données minimales (Laniel, 2008). De plus, ce modèle affiche une précision[†] et un pouvoir de prédiction des concentrations en phosphore[‡] parmi les meilleurs, pour les lacs de la région des Laurentides (Roy, 2010). Par contre, ce modèle permet seulement d'évaluer l'impact total des apports en phosphore sur le plan d'eau et ne permet pas de déterminer la contribution relative des différentes sources de phosphore présentes sur le bassin versant (Laniel, 2008).

Modèles empiriques versus modèles par bilan de masse

De façon plus générale, en ce qui a trait aux applications possibles et aux informations que nous permettent d'obtenir les modèles, les modèles par bilan de masse ont l'avantage de permettre une évaluation relative de la contribution des différentes sources de phosphore du bassin versant, ce qu'il est impossible de faire à l'aide des équations empiriques, malgré leur degré de précision supérieur pour les prédictions sur les apports en phosphore (Laniel, 2008).

[†] Pour le modèle empirique de Carignan avec mesures du COD dans 50 lacs de la région des Laurentides : erreur relative de 24 % (Roy, 2010).

[‡] Pour le modèle empirique de Carignan avec mesures du COD dans 50 lacs de la région des Laurentides : coefficient de détermination (R^2) de 0,93 avec une erreur type de $\pm 0,8 \mu\text{g/l}$ de phosphore pour la relation entre le phosphore prédit et le phosphore mesuré (Roy, 2010).



Limites et précision des modèles

En écologie, on retrouve plusieurs variables pour un phénomène observé. Conséquemment, en recherche on se satisfait de pouvoir expliquer seulement une faible portion de la variation observée pour ce même phénomène (GRIL, 2009). Le défi est donc de taille lorsqu'il s'agit d'isoler toutes les variables responsables de la concentration en phosphore des lacs. Par exemple, pour l'ensemble des modèles développés récemment au Québec, on obtient une précision plutôt modeste, erreur relative de 20 % et plus, dépendamment des modèles utilisés (Roy, 2010). Au mieux, la précision de certains modèles sera à quelques µg/l de phosphore près et les résultats sont particulièrement variables pour les lacs à concentration de phosphore élevée. En pratique, quelques µg/l de phosphore de plus ou de moins peuvent faire toute une différence pour certains types de lacs (GRIL, 2009).

Une autre mise en garde doit être faite puisque la plupart des modèles ne tiennent pas compte du rôle de la zone littorale dans la dynamique du phosphore à l'intérieur des lacs. Ainsi, la modélisation de la concentration en phosphore dans la zone pélagique[§] (limnétique) ne rend pas toujours compte de l'eutrophisation observée dans le littoral (Roy, 2010). Ce constat est davantage représenté dans les lacs s'apparentant aux étangs, lacs peu profonds et dont la zone littorale occupe une superficie importante du lac. En pratique, pour certains types de lacs soumis aux apports diffus en phosphore, beaucoup d'autres choses changent avant le phosphore, la biomasse planctonique et l'incidence des cyanobactéries. Une grande partie de la charge diffuse en phosphore est initialement séquestrée dans la zone littorale par les macrophytes, les épiphytes et les sédiments (Carignan, 2010). L'OBVRLY a d'ailleurs observé cette situation lors du suivi de lacs, dont le lac Saint-Alexis situé dans la municipalité de Saint-Alexis-des-Monts. Les mesures effectuées dans le cadre du *Réseau de surveillance volontaire des lacs* du MDDEP portaient à croire que le lac Saint-Alexis était plutôt oligotrophe, c'est-à-dire sans problèmes apparents en regard de l'eutrophisation. En effet, les mesures du phosphore et de la chlorophylle *a* dans les eaux de surface classaient le lac Saint-Alexis dans la catégorie oligotrophe correspondant aux lacs non productifs du point de vue biologique et sans problèmes apparents. Cependant, lors de nos visites terrains nous avons observé une densité élevée de macrophytes (algues et plantes aquatiques) sur toute sa superficie. Cette observation nous suggère que ce lac est résolument productif et donc probablement en processus d'eutrophisation (Boissonneault, 2011b). Rappelons que la caractérisation du littoral du lac des Six a été effectuée en 2010 (voir Boissonneault, 2011a) afin de compléter le portrait et diagnostic de ce lac débuté en 2009 (voir OBVRLY, 2011) et afin de pallier les limites des modèles prédictifs des concentrations en phosphore dont fait l'objet le présent rapport.

[§] En océanographie et en limnologie, la zone pélagique est qualifiée par ce qui se trouve ou se produit en pleine eau, loin du fond et des rivages (Office québécois de la langue française, 2004).



Valeurs seuils, apports acceptables et critère de qualité de l'eau des lacs en regard du phosphore

Une zone grise concerne l'apport acceptable de phosphore en surplus dans un lac. Le MDDEP utilise actuellement des critères basés sur les mêmes principes que ceux proposés par le Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME).

Critères de qualité de l'eau et valeurs de référence pour le phosphore total au Québec : tirés de www.mddep.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.htm

- Dans les ruisseaux et les rivières ne s'écoulant pas vers un lac : 30 µg/l
- Dans les cours d'eau s'écoulant vers un lac dont le contexte environnemental n'est pas problématique : 20 µg/l
- Dans les lacs : 50 % d'augmentation par rapport à la concentration naturelle,
 - sans dépasser un maximum de 10 µg/l pour les lacs où la concentration naturelle est inférieure à 10 µg/l
 - sans dépasser un maximum de 20 µg/l pour les lacs où la concentration naturelle est inférieure à 20 µg/l

Ces critères, qui sont en révision, ne s'appliquent que pour l'évaluation des rejets ponctuels. Il n'existe présentement pas d'obligation d'assurer l'aménagement et la gestion de l'ensemble des activités humaines dans les bassins versants des lacs en fonction de leur capacité de support (GRIL, 2009). Plusieurs pistes peuvent être considérées pour la révision de ces critères : soit une augmentation relative (%) de la concentration en phosphore par rapport à la concentration naturelle ou une augmentation modulée en fonction des caractéristiques du milieu récepteur et des usages à protéger (GRIL, 2009). Pour sa part, le Dr Carignan est d'avis que l'adoption d'un critère ayant comme valeur une augmentation maximale de 10 % de la concentration naturelle en phosphore serait plus prudente pour les lacs des Laurentides. En pratique, l'adoption d'un critère ayant comme valeur une augmentation maximale de 10 % de la concentration naturelle en phosphore serait difficile à gérer à partir de l'information fournie par le modèle de Carignan, car cette valeur seuil (10 %) est inférieure à la précision de ce modèle (erreur relative de 24 %). Par ailleurs, ce chercheur confirme que l'adoption d'une cible absolue à atteindre en deçà de 10 µg/l, n'est pas une approche à adopter. En effet, suite à ses observations sur le terrain, lorsqu'un lac passe d'une concentration en phosphore de 4 µg/l à 8 µg/l, il s'effectue un changement drastique au niveau de l'abondance des algues, des plantes aquatiques, des espèces de poissons présents en son sein et de la quantité d'oxygène disponible (Laniel, 2008). Il est donc difficile d'établir des valeurs seuils, des apports acceptables et un critère de qualité de l'eau des lacs en regard du phosphore qui soient applicables à l'ensemble des lacs du Québec.



Conséquemment, les modèles qui servent à calculer la capacité de support en phosphore des lacs doivent être utilisés avec prudence et ne sont pas assez précis pour calculer un nombre donné d'habitations qu'il est possible de construire autour d'un lac sans affecter sa santé, par exemple. Ainsi, ces modèles représentent plutôt un outil parmi d'autres afin de guider les décisions d'aménagement du territoire. Ces modèles ne peuvent pas se substituer aux études plus approfondies des milieux tels que les plans directeurs de l'eau par bassin versant (PDE), ou bien les études d'impacts environnementaux. Ils s'avèrent plutôt être un bon complément d'information (Laniel, 2008).

Ainsi, les modèles empiriques ont leur utilité pour (Roy *et coll.*, 2008) :

- Estimer l'augmentation relative de la concentration en phosphore par rapport à la situation naturelle
- Évaluer l'impact relatif d'un changement dans l'affectation du territoire sur la concentration en phosphore

D'autre part, les modèles de bilan de masse ou explicites peuvent servir à (Roy *et coll.*, 2008) :

- Donner une indication de l'importance relative des différentes sources de phosphore pour un plan d'eau (bilan des charges en phosphore)
- Évaluer l'impact relatif d'un changement dans l'affectation du territoire sur la concentration en phosphore



MATÉRIEL ET MÉTHODE

Afin d'estimer l'augmentation relative de la concentration en phosphore causée par la présence humaine par rapport à la situation naturelle au lac des Six, nous avons d'abord privilégié le modèle empirique de Carignan. Par la suite, nous avons estimé les apports en phosphore à partir des coefficients d'exportation en phosphore utilisés dans les modèles de bilan de masse, afin d'évaluer la contribution relative et potentielle de chacune des sources en phosphore présentes dans le bassin versant. Finalement, nous avons pu identifier les principales sources responsables du problème d'eutrophisation du lac. Nous présentons ici-bas les détails de ces deux approches.

Modèle empirique de Carignan

Comme le lac des Six est situé sur le Bouclier canadien en Mauricie, le modèle de Carignan s'avérait être le plus adapté pour le calcul de la capacité de support en phosphore de ce lac, car ce modèle a été développé à partir de lacs aussi situés sur le Bouclier canadien, soit dans la région des Laurentides. De plus, ce modèle affiche une précision satisfaisante (erreur relative moyenne de 24 %) et un bon pouvoir de prédiction des concentrations en phosphore (coefficient de détermination, R^2 de 0,93 avec un écart type de $\pm 0,8 \mu\text{g/l}$ de phosphore) pour la relation entre le phosphore prédit et le phosphore mesuré (Roy, 2010), ce qui en fait un modèle parmi les plus performants à ce jour, pour les lacs des Laurentides.

Le Dr Carignan et son équipe ont développé plusieurs modèles au fil de leurs recherches. Le modèle que nous avons utilisé intègre :

- les concentrations en carbone organique dissous mesurées en mg/l (**COD**) ;
- le nombre de bâtiments dans la ceinture de 100 mètres autour du lac (**bâtim_100**) ;
- la superficie des milieux ouverts en mètres carrés (**MOUV**) ;
- le volume d'eau du lac en mètres cubes (**Vol**).

Voici la formule du modèle de Carignan (tirée de Roy, 2010) qui permet d'estimer la concentration en phosphore [Pte] dans les eaux de surface au-dessus de la fosse du lac :

$$[\text{Pte}] = 0,09 \pm 0,050 + 1,20 \pm 0,13 (\text{COD}) + 52\,236 \pm 5516 (\text{bâtim}_{100}/\text{Vol}) + 1,49 \pm 0,71 (\text{MOUV}/\text{Vol})$$

Les concentrations en COD mesurées nécessaires dans l'utilisation de ce modèle proviennent du *Réseau de surveillance volontaire des lacs (RSVL)* du MDDEP. Les concentrations en phosphore mesurées provenant aussi du *RSVL* ont permis de calculer la précision de ce modèle pour le lac des Six. Soulignons que les prélèvements d'eau ont été effectués par l'association de riverains du lac Héroux et du lac des Six en 2007 et 2009 (voir OBVRLY, 2011).



Estimation des apports en phosphore

Afin de prédire les concentrations en phosphore des lacs, les modèles par bilan de masse tiennent compte des apports en phosphore et des pertes en phosphore, à la sortie (exutoire) du lac et aux pertes par la sédimentation au fond du lac. Nous pouvons résumer les modèles de bilan de masse, d'un point de vue conceptuel, par la formule suivante :

$$[P] = P \text{ apport} - P \text{ sortie} - P \text{ sédiments}$$

où

[P] : concentration en phosphore estimée dans les eaux de surface du lac

P apport : apports en phosphore que l'on obtient à l'aide de coefficients d'exportation en phosphore pour différente utilisation du territoire dans le bassin versant

P sortie : pertes en phosphore contenu dans les eaux à l'exutoire du lac

P sédiment : pertes en phosphore par séquestration dans les sédiments des lacs que l'on obtient à l'aide de coefficients de rétention du phosphore

Notons que chacun des éléments compris dans la formule conceptuelle des modèles de bilan de masse présentée ci-haut nécessite l'utilisation de modèles et de calculs spécifiques présentés à la figure 2.

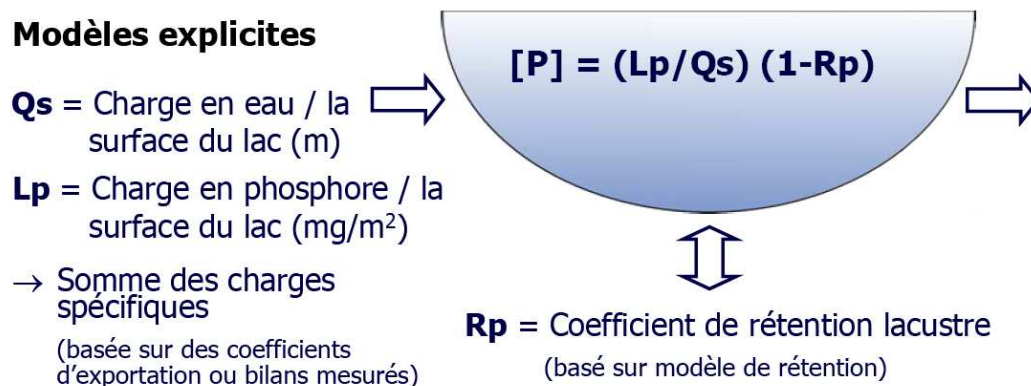


Figure 2 : Schéma explicatif des modèles par bilan de masse (explicites) et leurs composantes. Figure tirée de Roy, 2010.

Comme ces modèles nécessitent des calculs complexes et une connaissance complète des caractéristiques du bassin versant et du lac, nous avons seulement effectué le calcul des apports en phosphore à l'aide des coefficients d'exportation en phosphore. Ainsi, il est possible d'estimer la contribution potentielle des différentes sources de phosphore, c'est-à-dire les charges en phosphore qui pourraient atteindre le lac, et ce, sans considérer les processus conduisant aux pertes de phosphore. L'objectif de cette approche ne consiste donc pas à estimer les concentrations en phosphore du lac, mais consiste plutôt à évaluer la contribution potentielle des différentes sources de phosphore d'origines anthropiques et naturelles.



Coefficients d'exportation en phosphore déterminés pour les apports diffus

Pour les apports diffus provenant de l'ensemble d'un bassin versant, les coefficients d'exportation en phosphore sont généralement exprimés en charges de phosphore (mg de phosphore) sur une superficie donnée (mètre carré) par an. Ces coefficients sont spécifiques pour chaque type d'utilisations du territoire (milieux humides, forêts, chemins, etc.).

Tableau 1 : Coefficients d'exportation en phosphore utilisés pour les apports diffus

Utilisation du territoire	Coefficient d'exportation en phosphore (mg/m ² /an)	Référence
Forêts - roches ignées (naturel)	5	Travaux de Richard Carignan, communications personnelles, Louis Roy 2011
Milieux humides (naturel)	180	Crago, 2005
Dépôts atmosphériques - plans d'eau (naturel)	17	Paterson <i>et coll.</i> , 2006
Milieux de villégiature (anthropique)	10 *	Sonzogni, 1980
Routes (anthropique)	64 **	USEPA, 1976

* Cette valeur correspond au coefficient proposé par Sonzogni (1980) pour des terres agricoles non exploitées (prairie) sur une texture limoneuse moyenne ou à une terre cultivée mixte sur sable. Comme les coefficients d'exportation en phosphore sont non disponibles pour les milieux de villégiature, nous avons choisi l'utilisation du territoire qui s'approchait le plus des terrains riverains qui sont généralement composés de pelouses. De plus, le coefficient proposé vise à rendre compte de l'enlèvement d'une partie de la végétation et de l'aménagement de chemins et de fossés. Notons que ce coefficient d'exportation ne tient pas compte de la contribution en phosphore des installations septiques. La contribution en phosphore de ces dernières est calculée à l'aide des coefficients d'exportation en phosphore déterminés pour les apports ponctuels (voir plus bas).

** Le coefficient d'exportation en phosphore pour le réseau routier est une adaptation de la valeur attribuée pour les milieux urbains dans USEPA (1976). Nous assumons que la contribution en phosphore des routes est la même que la contribution des milieux urbains en raison de l'effet de l'imperméabilisation des surfaces sur le ruissellement de surface.

À ce jour, plusieurs coefficients d'exportation en phosphore sont disponibles dans la littérature pour une même utilisation du territoire. Par conséquent, nous devons choisir un coefficient qui soit le plus représentatif des conditions qui prévalent pour une région. En premier lieu, la majorité des coefficients d'exportation en phosphore que nous avons choisis sont ceux déterminés pour le Québec (tableau 1). Pour les milieux naturels québécois (forêts et milieux humides), lorsque plusieurs coefficients étaient disponibles, nous avons volontairement choisi les valeurs les plus élevées afin de ne pas sous-estimer l'apport en phosphore provenant des milieux naturels. Par exemple, les valeurs



des coefficients d'exportation en phosphore déterminées pour les milieux humides au Québec varient entre 25 et 214 mg/m²/an. Notons que la détermination de ces valeurs est généralement fonction du type de milieux humides (tourbières, marécages, etc.). Pour les milieux humides présents dans le bassin versant du lac des Six qui proviennent de l'activité du castor (voir OBVRLY, 2011), nous avons choisi le coefficient de Crago (2005), car celui-ci a été déterminé pour ce même type de milieux humides. Pour les milieux anthropiques (villégiature et routes), nous avons choisi les coefficients dont les valeurs étaient les plus faibles. Comme plusieurs coefficients d'exportation en phosphore ne font pas l'unanimité dans la communauté scientifique, cette approche conservatrice et prudente permet de minimiser les erreurs d'estimation qui pourraient conduire à une surestimation des apports provenant des activités humaines.

Coefficients d'exportation en phosphore déterminés pour les apports ponctuels

Au lac des Six, les apports ponctuels en phosphore proviennent principalement des installations septiques, car les résidences de ce lac ne sont pas reliées à un réseau d'égout. Les coefficients d'exportation en phosphore pour ces apports ponctuels s'expriment en kilogramme de phosphore par personne par an (*kg/capita/an*). Le coefficient d'exportation en phosphore que nous avons choisi est 0,7 *kg/capita/an*, valeur à la sortie de la fosse septique avant que les eaux usées entrent dans l'élément épurateur : le champ d'épuration. Notons qu'afin d'estimer les apports potentiels en phosphore à la source, comme pour les apports diffus, nous ne tenons pas compte des facteurs de rétention du phosphore par les sols pour les eaux usées en aval de l'élément épurateur. Ainsi, le coefficient d'exportation en phosphore choisi (0,7 *kg/capita/an*) pour une fosse septique semble être réaliste, car ces coefficients varient entre 0,6 et 0,8 *kg/capita/an* dans plusieurs études effectuées en Ontario et au Québec entre 1975 et 2006 (voir, Dillon et Rigler, 1975 ; Jacques et Lerouzes, 1979 ; Gartner Lee Limited, 2005 ; Paterson *et al.* 2006).

Après avoir choisi le coefficient d'exportation en phosphore des installations septiques à la sortie de la fosse qui est calculé par personne, nous avons déterminé le nombre moyen de personnes qui habitent une résidence au lac des Six. En 2009, nous avons évalué que sur les 43 résidences situées dans la ceinture du lac des Six, près de la moitié était habitée à l'année (résidence principale) et l'autre moitié était utilisée comme résidence secondaire. Ainsi, le taux d'occupation moyen pour une résidence principale a été établi arbitrairement à 2,5 personnes par an. Par la suite, nous avons établi le taux d'occupation pour les résidences secondaires à 2,5 personnes pour 4 mois, ce qui correspond à 0,825 personne par an. Ces quatre mois d'occupation pour les résidences secondaires peuvent se traduire par une occupation complète pendant la saison estivale (ex. : du mois de mai au mois d'août) ou par une occupation sporadique les fins de semaine et pendant deux semaines de vacances, soit 120 jours par an qui correspond aussi à 4 mois d'occupation.



RÉSULTATS

En premier lieu, nous présentons dans cette section les résultats de la modélisation des concentrations en phosphore des eaux de surface du lac des Six à l'aide du modèle empirique de Carignan. Par la suite, le calcul des coefficients d'exportation en phosphore a été réalisé afin d'estimer la contribution relative des apports en phosphore d'origine naturelle et anthropique. Ces approches ont aussi permis d'estimer l'augmentation relative de la concentration en phosphore par rapport à la situation naturelle, situation qui prévalait avant le développement résidentiel dans le bassin versant du lac des Six. Notons que les données nécessaires pour ces calculs proviennent du *Portrait et diagnostic du bassin versant du lac des Six* (OBVRLY, 2011).

Modèle empirique de Carignan

Afin d'estimer l'augmentation relative de la concentration en phosphore par rapport à la situation naturelle, nous avons utilisé le modèle de Carignan. Les données nécessaires aux calculs de ce modèle qui sont présentés au tableau 2 ont permis d'estimer la concentration en phosphore des eaux de surface du lac des Six pour 2007 et 2009. Nous avons effectué la modélisation séparément pour 2007 et 2009, car le bris d'un important barrage de castor survenu en amont dans le bassin versant en 2008 a fait monter les eaux du lac et a ainsi changé drastiquement les conditions physico-chimiques des eaux du lac en 2009 (OBVRLY, 2011). En effet, les concentrations mesurées en carbone organique dissous (COD) et en phosphore ont doublé suite à cet événement (tableau 2 et 3).

Tableau 2 : Données nécessaires aux calculs du modèle empirique de Carignan pour le lac des Six

Données nécessaires aux calculs	Valeurs
Carbone organique dissous (COD) moyen* mesuré en 2007	7,2 mg/l
Carbone organique dissous (COD) moyen** mesuré en 2009	13,1 mg/l
Volume d'eau du lac (Vol)	1 509 434 m ³
Nombre de résidences à l'intérieur d'une ceinture de 100 m autour du lac (bâtim_100)	43 résidences
Superficie milieux ouverts (routes et villégiature) (MOUV)	248 376 m ²

* Valeur moyenne calculée à partir de 3 mesures effectuées en 2007

** Valeur moyenne calculée à partir de 3 mesures effectuées en 2009

Source : Réseau de surveillance volontaire des lacs (RSVL) du MDDEP et OBVRLY, 2011



À partir de la modélisation (équation 1), la concentration en phosphore estimée des eaux de surface du lac des Six était de 10,5 µg/l en 2007 et de 17,5 µg/l en 2009, alors que la valeur moyenne mesurée pour ce lac en 2007 était de 15,3 µg/l et de 30,3 µg/l en 2009 pour ce paramètre. Ainsi, la précision de ce modèle était acceptable en 2007 pour ce lac, avec une erreur relative de 32 % entre la concentration en phosphore prédite et mesurée (tableau 3). Cette précision est près de l'erreur relative moyenne obtenue (24 %) lorsque ce modèle fut testé sur 50 lacs dans la région des Laurentides (SIADL** dans Roy, 2010). Cependant, la précision du modèle était plus faible pour 2009 avec une erreur relative de 42 % entre la concentration en phosphore prédite et mesurée pour cette année. Retenons que les conditions physico-chimiques des eaux du lac des Six ont drastiquement changé en 2009 suite au bris d'un barrage de castor qui a eu lieu en 2008.

Tableau 3 : Précision du modèle empirique de Carignan calculée à partir des mesures et des estimations des concentrations en phosphore qui tiennent compte de la présence humaine au lac des Six

Concentration en phosphore total :	2007	2009
... estimée à l'aide du modèle	10,5 µg/l	17,5 µg/l
... mesurée <i>in situ</i> *	15,3 µg/l	30,3 µg/l
Erreur relative (précision)	32 %	42 %

* Valeurs moyennes calculées à partir de 3 mesures effectuées en 2007 et de 3 mesures effectuées en 2009. La précision des mesures *in situ* des concentrations en phosphore ($\pm 17,5$ µg/l en 2007 et $\pm 26,2$ µg/l en 2009) a été obtenue à partir de l'erreur type et de la valeur *t* de Student (niveau de confiance à 95 %).

Après avoir déterminé la précision de ce modèle pour le lac des Six, nous avons estimé l'augmentation relative de la concentration actuelle en phosphore (en 2007 et 2009) par rapport à la situation naturelle. Ce dernier scénario a été obtenu en éliminant le nombre de bâtiments et les superficies occupées par les milieux ouverts lors de la modélisation. En résumé, l'estimation de la concentration en phosphore avant le développement résidentiel et avant la construction des chemins a été obtenue à partir de la concentration en carbone organique dissous (COD) seulement. Rappelons que l'humain ne génère pas de COD additionnel à un plan d'eau, contrairement au phosphore qui peut provenir de sources naturelles et humaines. Nous pouvons voir au tableau 4 que la concentration en phosphore estimée en 2007 au lac des Six pour le scénario qui exclut la présence humaine était de 8,7 µg/l et de 10,5 µg/l lorsque les résidences et les milieux ouverts étaient inclus. Nous obtenons pour 2007 une augmentation de la concentration

** Le système d'information d'aide à la décision des Laurentides (SIADL) est issu d'un projet de développement d'une « *Approche de gestion des lacs en lien avec leur capacité de support en phosphore* » (projet CS SIADL) qui fut mis sur pied en 2007. Le projet géomatique SIADL est issu d'un effort des MRC de la région des Laurentides de créer un SIG régional voué à l'amélioration des connaissances du territoire dans le but d'encadrer le développement régional. (Laniel, 2008).



en phosphore dans les eaux de surface du lac des Six de 17 %, qui résulte de la présence d'activités humaines dans le bassin versant de ce lac.

Tableau 4 : Estimation de l'augmentation relative de la concentration en phosphore en 2007 et en 2009 par rapport à la situation naturelle au lac des Six, modèle de Carignan

Modèles	[P_{Te}] avant le développement résidentiel (conditions naturelles)	[P_{Te}] avec résidences et milieux ouverts	Augmentation de la concentration en phosphore par rapport à la situation naturelle
En 2007	8,7 µg/l	10,5 µg/l	17 %
En 2009	15,8 µg/l	17,5 µg/l	10 %

Note : [P_{Te}] = concentration estimée en phosphore total

Pour 2009, la concentration en phosphore estimée pour le scénario qui exclut la présence humaine était de 15,8 µg/l. Cette concentration estimée correspond au double de la concentration en phosphore estimée en 2007 qui était de 8,7 µg/l en conditions naturelles. Cette différence importante des concentrations en phosphore estimées en conditions naturelles pour les modèles calculés à partir des données de 2007 et des données de 2009 est expliquée par les changements importants des conditions physico-chimiques qui ont eu lieu suite aux apports en carbone organique dissous et en phosphore provenant des eaux du réservoir de castor dont le barrage a cédé en 2008. Comme le modèle de Carignan tient compte des concentrations en carbone organique dissous (COD) pour estimer les concentrations en phosphore, l'augmentation des concentrations en COD de près du double entre 2007 et 2009 (tableau 2) explique cette surestimation des concentrations en phosphore en conditions naturelles pour 2009. À partir de ce constat, nous retenons seulement la modélisation effectuée avec les données de COD et de phosphore mesurées en 2007.



Estimation des apports en phosphore

Rappelons que le calcul des coefficients d'exportation en phosphore a été réalisé afin d'estimer la contribution relative des apports en phosphore d'origine naturelle et anthropique. Pour les apports diffus présentés au tableau 5, nous observons que les milieux naturels (milieux humides, forêts et les dépôts atmosphériques sur les plans d'eau) contribuent pour la majorité des apports potentiels en phosphore, avec plus de 70 % des charges en phosphore estimées. Les apports diffus estimés pour les terrains résidentiels et les routes contribuent pour 16 % des apports diffus potentiels en phosphore pouvant atteindre le lac des Six. Qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique, les apports diffus en phosphore estimés contribueraient pour 90 % des apports potentiels susceptibles de se retrouver dans le lac des Six.

Tableau 5 : Estimation des charges annuelles en phosphore des apports diffus pour les principales utilisations du territoire du bassin versant du lac des Six et leur contribution relative en 2009

Utilisation du territoire	Superficie (m ²)	Coefficient d'exportation en P (mg/m ² /an)	P estimé* (mg/an)	P estimé (kg/an)	Contribution relative (%)
Forêt	4 934 100	5	24 670 501	247	50
Dépôts atmosphériques - plans d'eau	408 842	17	6 950 314	70	14
Milieux humides	27 525	180	4 954 453	50	10
Apports diffus en phosphore d'origine naturelle				367	74
Résidentiel (villégiature)	144 876	10	1 448 760	14	3
Routes	103 500	64	6 624 000	66	13
Apports diffus en phosphore d'origine anthropique				80	16
Charges totales des apports diffus en phosphore				447	90

* Le phosphore (P) estimé est obtenu en multipliant la superficie par le coefficient d'exportation en phosphore pour une utilisation donnée du territoire.

Les apports ponctuels en phosphore provenant des installations septiques représentent 10 % de l'ensemble des apports en phosphore (diffus et ponctuels) que le lac des Six pouvait recevoir en 2009. La contribution en phosphore des installations septiques pour les résidences en occupation permanente représente 7 % des apports potentiels en phosphore, alors que les résidences en occupation saisonnière contribuent pour 3 % des apports potentiels en phosphore (tableau 6).



Tableau 6 : Estimation des charges annuelles en phosphore des apports ponctuels pour les installations septiques des résidences du bassin versant du lac des Six et leur contribution relative en 2009

Type d'occupation des résidences*	Nombre bâtiments	Coefficient d'exportation en phosphore (kg/capita/an)	Nombre de personnes/an	P estimé (kg/an)	Contribution relative (%)
occupation permanente	21	0,7	2,5	37	7
occupation saisonnière	22	0,7	0,825	13	3
Charges totales des apports ponctuels en phosphore d'origine anthropique				50	10

* En 2009, le bassin versant du lac des Six comptait 43 résidences dont environ 50 % étaient habitées à l'année et l'autre moitié servait de résidences secondaires (OBVRLY, 2011).

Somme toute, les apports potentiels en phosphore provenant des milieux naturels (forêts, milieux humides et dépôts atmosphériques) représentent 74 %, alors que l'ensemble des apports provenant des activités humaines (terrains résidentiels, routes et installations septiques) représente 26 % de la contribution totale des charges en phosphore qui peuvent atteindre le lac (tableaux 5 et 6).



CONCLUSION

Modèle empirique de Carignan

Les modèles de prédiction des concentrations en phosphore des lacs doivent être utilisés avec prudence, car ceux-ci ne sont pas calibrés pour toutes les régions du Québec et parce qu'ils ne tiennent pas compte du rôle de la ceinture littorale dans la dynamique du phosphore à l'intérieur des lacs. Cependant, comme des mesures de la concentration en phosphore étaient disponibles pour le lac des Six, il a été possible de déterminer la précision du modèle empirique de Carignan en comparant la concentration en phosphore prédite par le modèle et la concentration moyenne en phosphore obtenue à partir de mesures prises par les riverains du lac des Six dans le cadre du *Réseau de surveillance volontaire des lacs* (RSVL) en 2007 et 2009. Il s'est avéré qu'à partir des concentrations de carbone organique dissous mesurées en 2007 au lac des Six la précision de ce modèle (erreur relative de 32 %) était près de la précision obtenue pour 50 lacs (erreur relative moyenne de 24 %) qui furent testés dans la région des Laurentides dans le cadre du projet *CS SIADL*, région dans laquelle le Dr Carignan a développé ce modèle. Que le lac des Six soit situé dans une région caractérisée par le Bouclier canadien, comme les lacs ayant servi au développement de ce modèle, n'est probablement pas étranger à la précision acceptable obtenue pour ce modèle.

Pour les calculs effectués en 2009 à partir du modèle de Carignan, la précision du modèle était moindre, avec une erreur relative de 42 % entre les concentrations en phosphore estimées et mesurées. Les conditions physico-chimiques des eaux du lac des Six observées en 2009 n'étaient pas représentatives des conditions qui prévalaient avant le bris d'un important barrage de castor (voir OBVRLY, 2011). En effet, les charges en phosphore et en carbone organique dissous apportées par les eaux de ruissellement dans le lac suite à cet événement survenu en 2008 ont fait augmenter les concentrations de ces deux paramètres de près du double. Conséquemment, la précision du modèle calculé en 2009 en est affectée ainsi que l'estimation des concentrations en phosphore pour le scénario qui exclut la présence humaine (en conditions naturelles). De ce fait, nous avons fait le choix de seulement retenir la modélisation effectuée à partir des données (COD et phosphore) acquises en 2007.

En comparant la concentration en phosphore estimée par le modèle de Carignan au lac des Six, qui est de 10,5 µg/l, et la concentration moyenne en phosphore mesurée en 2007 qui était de 15,3 µg/l, nous avons constaté une sous-estimation de la concentration en phosphore prédite par ce modèle. Cette concentration en phosphore mesurée qui était plus importante peut être occasionnée par le relargage du phosphore provenant des sédiments du fond du lac qui a lieu en condition d'anoxie (absence d'oxygène) dans l'hypolimnion. En effet, dans ces conditions d'anoxie, le phosphore insoluble stocké dans les sédiments peut être transformé en phosphore soluble. Les sédiments libèrent alors une quantité importante de phosphore biodisponible dans les eaux froides du fond. On estime que les sédiments anoxiques peuvent libérer jusqu'à 1 000 fois plus de phosphore que les sédiments bien oxygénés des lacs peu productifs. Cette hypothèse est plausible, car nous avons observé en 2009 des déficits importants en oxygène (anoxie) dans l'ensemble de l'hypolimnion (eaux profondes) du lac qui pouvait atteindre



moins de 1 % de saturation en oxygène (voir OBVRLY, 2011). Rappelons que la précision de ce modèle calculé à partir des mesures effectuées en 2007 au lac des Six est satisfaisante, et ce, malgré cette sous-estimation de la concentration en phosphore prédite par le modèle.

Essentiellement, l'utilisation du modèle de Carignan a permis d'estimer l'augmentation relative de la concentration en phosphore par rapport à la situation naturelle, situation qui prévalait avant le développement résidentiel dans le bassin versant du lac des Six. Par exemple, la concentration en phosphore estimée des eaux de ce lac à l'aide de ce modèle pour le scénario qui exclut la présence humaine était de 8,7 µg/l et de 10,5 µg/l lorsque la présence humaine était incluse dans le modèle. Cette différence de 1,8 µg/l de phosphore que nous observons entre le scénario naturel et le scénario actuel peut apporter des modifications à l'écosystème du lac et changer dans une certaine mesure le statut trophique de ce lac. En effet, selon le diagramme de classement du niveau trophique des lacs de Carlson (1977), la concentration en phosphore estimée pour le scénario qui exclut la présence humaine situe le lac dans la classe oligotrophe, alors que la concentration en phosphore estimée pour le scénario actuel situe le lac dans la classe mésotrophe. D'autre part, l'augmentation de la concentration en phosphore reliée à la présence humaine selon les estimations du modèle de Carignan correspond à 17 % pour ce lac. Rappelons qu'une augmentation de seulement 10 % des concentrations en phosphore par rapport aux concentrations naturelles serait suffisante pour apporter des changements significatifs de l'état du lac. Or, pour le lac des Six, l'apport en phosphore d'origine anthropique serait près de deux fois supérieur à cette valeur seuil. En terminant, rappelons que la concentration moyenne en phosphore mesurée en 2007 au lac des Six était de 15,3 µg/l, valeur supérieure au résultat du modèle, situant véritablement le lac des Six dans la classe mésotrophe à l'égard de ce paramètre.

Estimation des apports en phosphore

Le calcul des coefficients d'exportation en phosphore a essentiellement été effectué afin de distinguer la contribution en phosphore des activités humaines de la contribution en phosphore des apports naturels. Rappelons que les résultats de ces calculs ne tiennent pas compte de la rétention du phosphore, de la distance au lac des différentes utilisations du territoire et des modèles hydrologiques. Conséquemment, il ne nous a pas été possible de prédire la concentration en phosphore à l'aide du modèle de bilan de masse. Nous avons plutôt estimé la contribution potentielle des différentes sources de phosphore, c'est-à-dire les charges en phosphore qui pourraient atteindre le lac, et ce, sans considérer les processus conduisant aux pertes de phosphore.

La contribution potentielle des apports naturels en phosphore modélisés représente près de 74 % des charges en phosphore du bassin versant du lac des Six. Malgré que les milieux humides représentent moins de 1 % de la superficie du bassin versant de ce lac, ces milieux contribuent pour 10 % des apports potentiels en phosphore. Rappelons que les valeurs des coefficients d'exportation en phosphore déterminés pour les milieux humides varient entre 25 et 214. La détermination de ces valeurs est généralement fonction du type de milieux humides (tourbières, marécages, etc.). Pour les milieux humides présents dans le bassin versant du lac des Six, qui sont récents et qui proviennent de l'activité du castor (voir OBVRLY, 2011), nous avons choisi le coefficient de Crago (2005), car celui-ci a été déterminé pour ce même type de milieux humides



récent. Cette valeur d'exportation en phosphore est élevée, car l'inondation de territoires forestiers par l'activité du castor peut libérer d'importantes quantités de phosphore contenu dans les sols. Il est important de souligner que cette estimation des apports en phosphore provenant des milieux humides qui résultent de l'activité du castor a été réalisée pour 2007, soit avant la rupture d'un important barrage de castor qui a eu lieu en 2008. Cet événement ponctuel a apporté d'importantes charges en sédiments et en phosphore au lac des Six, qui ont fait doubler les concentrations en phosphore et ont fait décupler les concentrations en chlorophylle a dans les eaux du lac en 2009, après cet événement (voir OBVRLY, 2011).

D'autre part, la contribution potentielle des apports anthropiques en phosphore représente 26 % des charges en phosphore du bassin versant du lac. Selon ces calculs, la contribution des routes est la plus importante, suivi des installations septiques et des terrains résidentiels situés dans la ceinture riveraine du lac. Rappelons que les facteurs de rétention du phosphore par les sols et la distance au lac de ces éléments ne sont pas compris dans nos calculs. Il pourrait en résulter une surestimation de la contribution en phosphore de ces apports d'origine anthropique, et ce, malgré la proximité des activités humaines avec le lac.

Néanmoins, les conclusions dégagées à partir des modèles et les calculs utilisés dans cette étude appuient les conclusions des études effectuées précédemment (voir OBVRLY, 2011 et Boissonneault, 2011a). Les études réalisées par l'OBVRLY depuis 2009 suggèrent que depuis quelques dizaines d'années la présence humaine dans le bassin versant du lac des Six a un effet significatif sur l'état de santé de ce lac. L'ensemble des mesures effectuées et les modèles utilisés suggèrent que l'eutrophisation du lac des Six est bien amorcée. Ce dernier était situé dans la classe mésotrophe avant que les conditions se dégradent suite à la rupture du barrage de castor. En 2009, après cet événement, le lac des Six était plutôt situé dans la classe eutrophe.

Futures recherches

Comme les modèles explicites de type bilan de masse nécessitent des calculs complexes et une connaissance complète des caractéristiques du bassin versant et du lac, nous avons seulement effectué le calcul des apports en phosphore à l'aide des coefficients d'exportation en phosphore. Il en résulte que l'estimation de la contribution relative des apports naturels et anthropiques en phosphore peut être imprécise. La modélisation complète des apports en phosphore réalisée à partir des modèles par bilan de masse permettrait de tenir compte des différents facteurs de rétention du phosphore dans le bassin versant et dans le lac. Il en résulterait une estimation plus précise des apports en phosphore vers le lac. De plus, les modèles par bilan de masse n'ont pas encore été testés et calibrés pour le territoire d'intervention de l'OBVRLY. Comme les études effectuées depuis 2009 au lac des Six, Héroux et Plaisant ont permis le développement de protocoles de suivi des lacs, la réalisation complète de modèles par bilan de masse pour ce lac permettrait de vérifier la pertinence de leur utilisation ultérieure dans le programme de suivi des lacs de l'OBVRLY.



À retenir...

- Selon les estimations du modèle de Carignan, pour le lac des Six en 2007, l'augmentation de la concentration en phosphore reliée à la présence humaine correspondait à 17 %. Une augmentation de seulement 10 % des concentrations en phosphore par rapport aux concentrations naturelles pourrait être suffisante pour affecter l'état trophique du lac.
- Le calcul des coefficients d'exportation en phosphore a permis d'estimer la contribution potentielle des apports humains en phosphore qui représentent 26 % des charges en phosphore du bassin versant du lac des Six. Selon ces calculs, la contribution des routes est la plus importante, suivi des installations septiques et des terrains résidentiels situés dans la ceinture riveraine du lac.



RECOMMANDATIONS

1. Poursuivre le suivi de l'état de santé du lac des Six

Comme le lac des Six montre d'importants signes d'eutrophisation suite à la rupture du barrage de castor qui a eu lieu en 2008, le suivi de son état de santé devrait être poursuivi. Afin de vérifier le retour à l'état de santé qui prévalait avant cet événement, soit en 2007, la mesure des paramètres physico-chimiques suivants est recommandée pour les prochaines années :

- Continuer d'inscrire le lac des Six au *Réseau de surveillance volontaire des lacs (RSVL)* du MDDEP, afin de mesurer l'évolution des concentrations en phosphore, en carbone organique dissous et en chlorophylle *a*.
- Effectuer annuellement un profil physico-chimique (température, O₂, pH et conductivité) dans la colonne d'eau au-dessus de la fosse du lac afin de vérifier l'évolution des conditions d'anoxie dans l'hypolimnion (eaux profondes).

Ainsi, le lac des Six devrait être sous surveillance pour les prochaines années. Même si après quelques années l'état de santé du lac des Six revenait aux conditions qui prévalaient en 2007 (classe mésotrophe), soit avant la rupture du barrage de castor, une attention particulière devrait toutefois être apportée aux apports en phosphore d'origine humaine afin d'éviter que l'état de santé du lac ne se dégrade davantage.

2. Réduire les apports en phosphore vers le lac

Toutes les études réalisées depuis 2009 dans le bassin du lac des Six permettent de confirmer que ce lac est en processus de vieillissement prématuré (eutrophisation). Malgré les imprécisions des estimations de la contribution relative des différentes activités humaines qui ont lieu dans le bassin versant du lac, toutes les mesures qui visent à diminuer les apports anthropiques en phosphore vers le lac doivent être prises. Des recommandations sont émises à ce sujet dans le *Portrait et diagnostic du bassin versant du lac des Six – 2009* (OBVRLY, 2011). En guise de rappel, ces recommandations concernent :

- le suivi de la conformité des installations septiques
- le suivi de la revégétalisation des bandes riveraines
- la promotion de l'utilisation de savons sans phosphate
- l'interdiction de l'utilisation d'engrais
- la gestion environnementale des eaux de ruissellement
- l'exploitation forestière en forêt privée
- le suivi des barrages de castors
- l'élaboration du plan directeur du bassin versant du lac



RÉFÉRENCES

- BOISSONNEAULT, Y., 2011a. *Caractérisation du littoral du lac des Six – 2010, municipalité de Saint-Boniface*, rapport réalisé pour l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY), 26 pages et 1 annexe.
- BOISSONNEAULT, Y., 2011b. *Évaluation des symptômes d'eutrophisation (phase 2) du lac Saint-Alexis - 2010, municipalité de Saint-Alexis-des-Monts*, rapport réalisé pour l'Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY), 48 pages et 2 annexes.
- CARIGNAN, R., 2010. *L'importance de la zone littorale comme indicateur de suivi de l'état de santé des lacs*, présentation effectuée par Richard Carignan, station de biologie des Laurentides, Université de Montréal, lors du forum régional sur les lacs des Laurentides en juin 2010.
- CARLSON, R.E., 1977. *A trophic state index for lakes*, *Limnology and Oceanography* 22 : 361-369.
- CRAGO, C., 2005. *Coefficients d'exportation de phosphore, carbone organique dissous et matières en suspension associés à la forêt, aux résidences et aux milieux humides dans les Laurentides*, mémoire de maîtrise en Sciences biologiques, Département des Sciences biologiques, Université de Montréal, Québec (Canada).
- DILLON, P.J. et RIGLER, F.H., 1975. *A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status*; *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*; 32(9), p.1519-1531.
- GARTNER LEE, LIMITED, 2005. *Recreational water quality management in Muskoka – Final Report*, District of Muskoka, Ontario, Department of planning and economic development: 113 p.
- GRIL, 2009. *Calcul de la capacité de support en phosphore des lacs : où en sommes-nous?* Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique (GRIL), avril 2009, 11 p.
- JACQUES, A. et M. LEROUZES., 1979. *Méthodologie pour le calcul des apports en phosphore et la détermination de la capacité de support d'un lac*, gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, Service de la Qualité des eaux.
- LANIEL, M., 2008. *Intégration du concept de capacité de support d'un plan d'eau aux apports en phosphore à l'aménagement du territoire au Québec : Réalité ou utopie?* Mémoire de maîtrise, Faculté de l'aménagement, Université de Montréal, 214 p. et 9 ann.



- OBVRLY, 2011. *Portrait et diagnostic du bassin versant du lac des Six - 2009*, municipalité de Saint-Boniface, Organisme de bassins versants des rivières du Loup et des Yamachiche (OBVRLY), 91 pages.
- PATERSON A.M., D. P. J., HUTCHINSON, N.J., FUTTER, M.N., CLARK, B.J., MILLS R.B., REID, R.A., SCHEIDER W.A. 2006. *A review of the components, coefficients, and technical assumptions Ontario's Lakeshore Capacity Model*, Lake and Reservoir Management, 22(1), p.7-18.
- ROY, L., 2010. *État de situation du phosphore dans nos lacs*. Présentation effectuée par Louis Roy de la Direction de l'état de suivi de l'état de l'environnement (DSÉE) du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), dans le cadre du Forum Sciences et environnement, 1^{er} décembre 2010.
- ROY, L., BENOIT, G., CARIGNAN R. et Y. PRAIRIE, 2008. *La modélisation de la capacité de support des lacs au Québec*, présentation effectuée dans le cadre du 2^e Forum National sur les lacs organisé par le CRE Laurentides, Sainte-Adèle, le 6 juin 2008.
- USEPA, 1976. *Areawide Assessment Procedures Manual: Volume I, II et III*, EPA-600/9-76-04. U.S. Protection agency, Cincinnati, Ohio 45268.

