

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Conseil de bassin du lac Saint-Augustin

- M. René Gélinas, biologiste : Directeur du suivi de la qualité du milieu, secteur environnement, Ville de Québec
- M. Jean-Claude Desroches : Président du Conseil de bassin du lac Saint-Augustin

EXXEP ENVIRONNEMENT

- M. Sylvain Arsenault, biologiste : Directeur du projet
- M. Régis Pilote, biologiste, Ph.D. (en cours) : Chargé du projet
- M. Christian Corbeil, technicien senior : Aviseur technique
- Mme Guylaine Arseneault, B.E.E. : Révision linguistique

Référence à citer :

Pilote, R., C. Corbeil et S. Arsenault, 2002. Gestion des apports en phosphore pour améliorer la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin. Préparé pour *La grande corvée* par EXXEP Environnement, 38 pages.

TABLE DES MATIÈRES

ÉQUIPE DE TRAVAIL	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	iv
LISTE DES TABLEAUX.....	v
1 MISE EN CONTEXTE	1
1.1 Généralités sur le phosphore.....	2
1.2 Les sources de phosphore.....	2
1.3 L'écosystème lacustre.....	4
1.4 Le cas du lac Saint-Augustin	4
2 MODÈLE DE GESTION DES APPORTS EN PHOSPHORE.....	7
2.1 Données morphométriques.....	8
2.2 Calcul des apports en phosphore.....	9
2.3 Calcul de la charge spécifique	13
2.4 Calcul de la capacité de support.....	13
2.5 Calcul de la charge admissible	14
2.6 Comparaison des résultats « observés » (in-situ) avec le modèle	14
3 ANALYSE DES RÉSULTATS	17
3.1 Provenance et estimation des apports en phosphore	17
3.2 Transformation en charges spécifiques.....	18
3.3 Évaluation de la capacité de support et de la charge admissible.....	18
4 STRATÉGIE DE RESTAURATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU	22
4.1 Description des scénarios.....	22
4.2 Résultats attendus des diverses mesures correctives.....	23
5 INTÉGRATION DES MESURES CORRECTIVES AU SCHÉMA DIRECTEUR.....	30
5.1 Contrôle des apports externes	30
5.2 Contrôle des apports internes	31
5.3 Priorisation des interventions.....	31
6 CONCLUSION	33
7 RECOMMANDATIONS	34
8 RÉFÉRENCES	36

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Schéma des importations (en vert) et des exportations (en rouge) de phosphore à l'échelle d'un lac. Le schéma illustre également les flux de phosphore entre les trois compartiments majeurs (en bleu) du lac. Adapté de USEPA (1988) et de Wetzel (1983).....	5
Figure 2.	Affectation des sols du bassin versant du lac Saint-Augustin et de sa décharge.	16
Figure 3.	Schéma des charges spécifiques en phosphore, importées (en vert) et exportées (en rouge), à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. Le schéma illustre également les flux de phosphore entre les trois compartiments majeurs (en bleu) du lac.....	21
Figure 4.	Schéma directeur des interventions pour la restauration de la qualité des eaux du lac Saint-Augustin.	28
Figure 5.	Modèle reliant l'état trophique du lac Saint-Augustin aux concentrations prédites en phosphore dans l'épilimnion en période estivale (adapté de Dillon, 1974).....	29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Valeurs des paramètres morphométriques utilisés pour le calcul des apports en phosphore et la détermination de la capacité de support du lac Saint-Augustin.....	9
Tableau 2.	Modifications majeures du bassin versant du lac Saint-Augustin survenues de 1979 à 2001.....	11
Tableau 3.	Classification des installations septiques des résidences permanentes en usage dans le bassin versant du lac Saint-Augustin.....	12
Tableau 4.	Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour la position actuelle estimée et pour le scénario 7 (voir la section 4).	20
Tableau 5.	Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 1 et 2.	25
Tableau 6.	Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 3 et 4.	26
Tableau 7.	Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 5 et 6.	27

1 MISE EN CONTEXTE

Différentes actions à caractère environnemental ont été entreprises par la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures, au cours des 20 dernières années, pour améliorer la qualité de l'eau au lac Saint-Augustin. Toutefois, l'ensemble de ces efforts n'a pas été suffisant jusqu'à ce jour pour rétablir l'équilibre de cet écosystème lacustre. L'état du lac est sujet plus fréquemment à la prolifération massive de cyanobactéries (algues bleu-vert). De tels phénomènes sont nuisibles aux activités récréatives, à la santé humaine et animale ainsi qu'à l'écosystème. Ils sont attribuables à une disponibilité massive de nutriments (principalement le phosphore) ce qui a pour conséquence de déséquilibrer la chaîne alimentaire. Pour cette raison, il est justifié d'entreprendre une mise à jour des apports actuels en phosphore à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. Les connaissances sur la provenance et l'amplitude de ces apports sont essentielles à la planification et à la mise en place de mesures correctives en vue de restaurer la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin à l'échelle du bassin versant.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet *La grande corvée* du lac Saint-Augustin, débuté en 2000. D'autres études ont été initiées dans cette dynamique, lesquelles se sont déroulées en parallèle (diagnose écologique, étude paléo-limnologique ainsi que les portraits des boisés, de la bande riveraine, des sites contaminés et de l'agro-environnement). Ces études sont étroitement reliées les unes aux autres et devront éventuellement être considérées dans le cadre d'un schéma directeur de l'eau à l'échelle du bassin versant.

La présente étude, portant sur le bilan du phosphore au lac Saint-Augustin, est basée sur l'utilisation d'un modèle théorique des exportations en phosphore permettant la localisation des sources de phosphore et l'identification de mesures correctives réalistes en vue de restaurer la qualité de l'eau, et ce, à l'échelle du bassin versant.

1.1 Généralités sur le phosphore

En milieu lacustre, la productivité primaire associée aux algues microscopiques est commandée par différents facteurs tels que l'intensité lumineuse, la température et la disponibilité en éléments nutritifs. Les lacs de climat tempéré, bien que sujets à des fluctuations saisonnières, ne présentent pas de limitation majeure quant à l'intensité lumineuse et à la température en saison estivale. Par contre, la production primaire est principalement limitée par les éléments nutritifs, et en particulier le phosphore.

Une raison supplémentaire pour accorder plus d'importance au phosphore plutôt qu'à n'importe quel autre élément est que celui-ci qui est le seul élément pouvant faire l'objet d'un contrôle. En effet, contrairement à certains autres éléments tels que l'azote, le phosphore n'a pas de forme gazeuse tout comme l'azote.

Parmi les techniques de restauration connues en milieu lacustre, le contrôle des apports en phosphore représente donc souvent la cible principale des interventions pour améliorer l'état trophique d'un lac (USEPA, 1988; Dupont, 1997). Le calcul de ces apports se fait en fonction des différentes affectations et activités dans le bassin versant et en tenant compte des caractéristiques du milieu récepteur (superficies du lac et du bassin versant, profondeur moyenne, temps de résidence hydraulique). Les mêmes paramètres interviennent également dans le calcul incontournable de la capacité de support du milieu.

1.2 Les sources de phosphore

On peut classer les apports en phosphore d'un lac selon leur provenance interne ou externe. Les apports internes proviennent des sédiments et sont particulièrement sensibles à la teneur en oxygène dissous hypolimnétique (Nurnberg, 1988; Seo et Canale, 1999). Lorsque la concentration de ce gaz à l'interface eau-sédiment est suffisante, une importante fraction du phosphore est emprisonnée dans les sédiments sous forme précipitée avec les hydroxydes de fer. Par contre, si cette concentration se retrouve en dessous du seuil de 1 mg/L (Vallentyne, 1974), l'état d'oxydation du fer

change et s'en suit une solubilisation rapide du phosphore dans la colonne d'eau, sous forme bio-disponible pour la production biologique des algues microscopiques.

Les apports externes sont divers et peuvent être regroupés selon leur origine ponctuelle ou diffuse. Les sources ponctuelles sont plus facilement identifiables et peuvent être contrôlées plus aisément. Les rejets d'eaux usées municipales et industrielles, de même que les effluents des installations septiques et les fuites des structures d'entreposage pour les déjections animales appartiennent à ce type d'apports.

Les sources diffuses sont plus difficiles à identifier et à contrôler. L'approche par bassin versant prend alors toute son importance. En effet, les apports d'origine diffuse sont fonction des superficies drainées par les eaux de ruissellement et de lessivage. L'importance de l'un ou l'autre de ces modes de transport dépend de la superficie du bassin versant et de la perméabilité du sol (USEPA, 1988). Après un contact plus ou moins prolongé avec le sol, les eaux peuvent entraîner des quantités appréciables de phosphore par érosion des particules du sol et par solubilisation des formes réactives.

Les sources diffuses de phosphore sont également observées en agriculture, plus particulièrement suite au travail du sol et à la fertilisation. La pollution diffuse par le phosphore peut également résulter du changement de l'affectation d'un sol. Une coupe forestière, par exemple, entraîne des mouvements significatifs du phosphore en provenance du sol vers le milieu aquatique récepteur (Carignan et coll., 2000; Evans et coll., 2000). Enfin, les zones municipalisées (affectation résidentielle ou commerciale), en affectant la perméabilité du sol à différents degrés, peuvent être des foyers majeurs en phosphore d'origine culturelle (détergents, engrais pour gazon et jardins, zones de construction, etc.) Le transfert de ces apports au lac peut être facilité si les eaux sont véhiculées par un réseau pluvial.

1.3 L'écosystème lacustre

La figure 1 présente le portrait général des importations et des exportations du phosphore en milieu lacustre. Les déplacements du phosphore à l'intérieur même du lac sont également illustrés en relation avec les trois compartiments majeurs selon Wetzel (1983).

Ces compartiments sont représentés comme suit : 1) le littoral, 2) l'épilimnion et 3) l'hypolimnion et les sédiments. Le littoral comprend les herbiers aquatiques, l'épilimnion (eaux de surface) est occupé par le phytoplancton alors que l'hypolimnion (eaux de fond) et les sédiments sont le siège du benthos.

1.4 Le cas du lac Saint-Augustin

Le lac Saint-Augustin est un lac relativement ancien. On estime en moyenne que les lacs québécois ont 10 000 ans. Leur naissance coïncide avec le retrait des derniers glaciers et le soulèvement subséquent du continent nord-américain. Le lac est demeuré vraisemblablement sans perturbation culturelle jusqu'au 19^e siècle (Roberge et coll., 2002). C'est à ce moment qu'apparaissent les premières traces du développement humain dans le secteur, soit une agriculture de subsistance pour la communauté locale. La situation n'a que très peu évolué par la suite jusqu'aux lendemains de la Seconde Guerre Mondiale. Dès lors, le lac est devenu une zone de récréation pour de nombreux villégiateurs, puis une agglomération péri-urbaine pour la banlieue de la région de Québec.

En 1979, le Service de la qualité des eaux du ministère des Richesses naturelles a publié un rapport de la diagnose écologique du lac Saint-Augustin (Meunier et Alain, 1979). Cette diagnose avait comme objectif de porter un jugement sur l'état de santé du lac. Dans ce rapport, il était question, entre autres choses, de la quantification et la description des apports en phosphore au lac. L'apport total se chiffrait à 776 kg P/an, concentré à 68% dans le versant nord du bassin. La population humaine était

Figure 1. Schéma des importations (en vert) et des exportations (en rouge) de phosphore à l'échelle d'un lac. Le schéma illustre également les flux de phosphore entre les trois compartiments majeurs (en bleu) du lac. Adapté de USEPA (1988) et de Wetzel (1983).

majoritairement responsable avec une contribution de 77%. Ces apports, combinées avec les données morphométriques, situaient le lac dans le niveau « eutrophe » avec une concentration saisonnière en phosphore au brassage printanier au-delà de la limite dangereuse (norme du ministère de l'Environnement : 20 µg P/L) variant de 9 à 36 µg par litre d'eau. Selon les estimations du rapport, le lac à l'état naturel devait être oligo-mésotrophe à une certaine époque.

Certaines actions furent recommandées suite aux résultats de cette étude. L'une d'entre elles concernait la nécessité de réduire les apports externes en phosphore. Il s'agissait, entre autres, d'éliminer complètement le phosphore provenant de la population, en souhaitant que cette intervention ramène le lac à un état mésotrophe. L'élimination de ces apports était envisagée par l'installation d'un réseau d'égouts collecteurs pour tous les chalets et les résidences permanentes avec un rejet à l'extérieur du bassin versant. À défaut de pouvoir être raccordés à l'égout collecteur, il était suggéré aux propriétaires de certains chalets d'installer une fosse étanche à vidange périodique.

2 MODÈLE DE GESTION DES APPORTS EN PHOSPHORE

Il existe une grande diversité de méthodes visant à déterminer les apports en phosphore en milieu lacustre. L'adoption de l'une ou l'autre de ces méthodes est fonction de la disponibilité des données déjà existantes. Une méthode simple consiste à estimer les apports en nutriments en fonction des diverses affectations du sol et des coefficients d'exportation respectifs. Bien qu'avantageuse à prime abord, cette méthode doit être employée avec réserve et nécessite la validation des résultats obtenus avec un échantillonnage sur le terrain.

La méthode utilisée pour la présente étude est courante au Québec. Elle découle de la publication, par le ministère des Richesses naturelles (1979), d'une méthodologie pour le calcul des apports en phosphore et la détermination de la capacité de support d'un lac (Alain et Le Rouzès, 1979). Cette méthode se divise en cinq étapes :

- Rassemblement des données morphométriques de base ;
- Calcul des apports en phosphore ;
- Calcul de la charge spécifique ;
- Calcul de la capacité de support du lac ;
- Calcul de la charge admissible.

Depuis, la méthode a été bonifiée par l'ajout de nouveaux coefficients d'exportation pour les lacs du Québec, selon De Montigny et Prairie (1996), et par l'utilisation de coefficients de rétention en condition aérobie ou anaérobie, selon Dillon et coll. (1986). Les sections suivantes résument brièvement la méthode et énumèrent les données qui ont été employées dans le cadre de cette étude.

2.1 Données morphométriques

Le lac Saint-Augustin (46° 25' N, 71° 23' O) est localisé dans l'arrondissement 8 de la ville de Québec, à environ 15 km au sud-ouest du centre de la ville. Le matériel parental des sols du bassin versant appartient à la formation schisteuse d'Utica d'origine paléozoïque (Raymond et coll., 1976). La topographie serait la résultante complexe de phénomènes glaciaires récents, des séquences de moraines récessionnelles et des lambeaux de terrasses marines de l'ancienne mer de Champlain. Le climat est de type tempéré avec des températures moyennes oscillant entre -12,3°C en janvier et 19,4°C en juillet. Les précipitations sont réparties de façon relativement uniforme sur toute l'année. Elles se chiffrent annuellement à 1 203 mm et tombent principalement sous forme de neige de novembre à avril. L'évapotranspiration est maximale en période estivale et atteint les 544 mm par année (valeur correspondant à près de 50% des précipitations). Les vents dominants soufflent vers le nord-est au printemps et à l'automne et s'inversent vers le sud-ouest à l'été et à l'hiver (station météorologique de Saint-Augustin - Environnement Canada, 2001).

La première étape de la méthodologie consiste à rassembler les données morphométriques de base. Ces données incluent la superficie du bassin versant et la charge d'eau reçue annuellement. Cette dernière a été obtenue à partir des données météorologiques normalisées de précipitation et d'évapotranspiration. Le tableau 1 regroupe l'ensemble de ces informations.

Tableau 1. Valeurs des paramètres morphométriques utilisés pour le calcul des apports en phosphore et la détermination de la capacité de support du lac Saint-Augustin.

Paramètre (unité)	Abr.	Valeur	Source
Superficie du bassin versant (km ²)	A _d	5,69*	Figure 2
Superficie du lac (km ²)	A _o	0,67	Figure 2
Profondeur moyenne (m)	Z moy.	3,5	Meunier et Alain (1979)
Précipitation moyenne (m/an)	Pr	1,203	Moyennes de 1964 à 1989 à la station météorologique de Saint-Augustin
Évapotranspiration moyenne (m/an)	Et	0,544	
Charge d'eau (m/an)	qs	6,26	$qs = (Pr - Et) \times (Ad + Ao) / Ao$

*La superficie naturelle du bassin versant est de 7,45 km². Cependant, comme il est illustré à la figure 2, les zones Z1 et Z2 sont maintenant drainées vers l'extérieur du bassin versant avec une perte nette de superficie correspondant environ à 1,76 km², d'où la superficie résultante de 5,69 km².

2.2 Calcul des apports en phosphore

Plusieurs informations ont été rassemblées en vue de calculer les apports en phosphore. L'emploi de photos aériennes et de cartes (carte d'utilisation des sols, réseaux d'égouts sanitaires et pluviaux, etc.) a été nécessaire à l'établissement d'une carte d'affectation des sols (figure 2). De plus, plusieurs autres informations concernant les populations saisonnière et permanente, le nombre d'installations septiques, la population animale des élevages agricoles et les quantités d'engrais utilisées en fonction des cultures ont dû être obtenues. Toutes ces données ont servi à calculer les apports selon les provenances suivantes :

- sol (J_s);
- population humaine (J_c);
- animaux (J_a);
- engrais chimiques (J_e).

La méthodologie d'Alain et Le Rouzès (1979) prévoit également de calculer les apports d'origine industrielle (J). Cependant, comme aucun rejet de ce type n'est observé au lac Saint-Augustin et dans son bassin versant, les apports en phosphore de cette provenance sont nuls.

Certains des coefficients d'exportation proposés dans la méthode initiale (celle d'Alain et Le Rouzès, 1979) ont été réajustés. C'est le cas de certains coefficients d'exportation du sol qui proviennent de l'étude de De Montigny et Prairie, réalisée en 1996 pour le bénéfice du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. De plus, comme certaines zones municipalisées (zones Z3 et Z4 de la figure 2) sont drainées vers des marais filtrants, il fut convenu d'attribuer à ces zones un coefficient d'exportation identique à celui des zones marécageuses ($E_s = 20 \text{ kg P/km}^2\text{-an}$) pour tenir compte de leur caractère épuratoire.

Les données ayant trait au secteur agricole viennent du *Portrait agro-environnemental du bassin versant* tracé par Pilote et coll. (2002).

La principale source de phosphore d'un lac de villégiature provient généralement des installations septiques et donc du nombre de résidences réparties dans le bassin. L'apport du phosphore est fonction de la population, du taux d'occupation et de l'efficacité de l'élimination de cet élément par l'installation septique. La quantité de phosphore générée par une personne durant l'année équivaut à 0,8 kilogramme selon Dillon et Rigler (1975). En condition parfaite, une installation septique élimine 25 % du phosphore selon Alain et Le Rouzès (1979), d'où l'importance d'évaluer individuellement l'efficacité d'épuration des installations autonomes, afin de s'assurer de l'atteinte de ce taux. Deux phases d'inspection (1988 et 1993) de ces installations ont d'ailleurs permis de classer chacune des résidences non raccordées au réseau d'égouts en fonction de leur conformité au « *Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées de résidences isolées* » (c. Q-2, r. 8).

Les données nécessaires pour calculer les apports de la population humaine furent obtenues auprès du Service des travaux publics de la municipalité de Saint-Augustin et

du Service du contrôle du développement et de la cartographie de la ville de Sainte-Foy. Comme les données ne concernaient que le nombre de résidences, la population en terme d'habitants a dû être déduite par l'emploi d'un facteur représentant le nombre moyen d'habitants par résidence. Ce facteur était de 3,12 habitants/résidence selon les chiffres du *Projet de plan d'urbanisme de Saint-Augustin* (communication du Service des travaux publics). Dans le cas de la population saisonnière (PS), les données furent rassemblées à la suite d'interviews téléphoniques.

Depuis la diagnose écologique de Meunier et Alain (1979), plusieurs modifications sont survenues à l'intérieur du bassin versant (tableau 2). La modification la plus apparente concerne l'empiètement plus prononcé de la zone municipalisée, au détriment surtout de la zone forestière. La population s'est également accrue d'un facteur 7 depuis 1979. Bien qu'une forte proportion des résidences fut reliée à un réseau d'égouts, l'assainissement des eaux usées de 181 résidences permanentes repose toujours sur des installations septiques autonomes.

Tableau 2. Modifications majeures du bassin versant du lac Saint-Augustin survenues de 1979 à 2001.

Paramètres	1979¹	2001²
Population saisonnière sans égout collecteur	1456	336
Population permanente sans égout collecteur	752	565
Population permanente avec égout collecteur	0	4767
Superficie du bassin versant (km ²)	Superficie naturelle 7,45	Superficie modifiée ³ 5,69
Superficie en forêt (km ²)	1,85	0,93
Superficie en agriculture (km ²)	1,64	1,91 ⁴

¹Source : Meunier et Alain (1979).

²Municipalité de Saint-Augustin et ville de Sainte-Foy.

³Superficie modifiée par la mise en place d'un réseau d'égouts pluviaux (voir figure 2).

⁴Cette valeur comprend aussi les terres en friche.

La classification en fonction du type d'installations septiques en place fait suite aux travaux d'inspection menés en 1988 et en 1993. La mise à jour de ces données, suite à l'ajout au fil du temps de nouvelles installations, est présentée au tableau 3. Cette mise à jour, datant de novembre 2001, a été communiquée par monsieur Michel Therrien du Service des travaux publics de la municipalité de Saint-Augustin. Selon ce suivi, 72 des 181 installations représenteraient un foyer de pollution directe ou indirecte (classes B ou C), presque tous des puisards relativement anciens. De plus, près de 75 % des installations septiques classées « A » ont plus de 15 ans d'utilisation.

Bien qu'il existe 32 fosses de rétention en service, nous les avons incluses au bilan puisqu'elles comprennent toutes une fosse à vidange périodique et une fosse septique avec champ d'évacuation, lequel est une source de phosphore. Mentionnons qu'il y a un contrôle sur la fréquence des vidanges de ces installations depuis 1994 (vidange deux fois par année).

Tableau 3. Classification des installations septiques des résidences permanentes en usage dans le bassin versant du lac Saint-Augustin.

Types d'installations septiques	Classes			TOTAL
	A ou AA	B	C	
1- Fosse septique avec champ d'épuration	74	3	0	77
2- Fosse de rétention (vidange périodique) et fosse septique avec champ d'évacuation	30	2	0	32
3 - Puisard	0	69	3	72
TOTAL	104	74	3	181

Signification des classes :

AA : Conforme aux normes et ne représentant pas un foyer de pollution;

A : Non conforme aux normes, mais ne représentant pas un foyer de pollution;

B : Non conforme et représentant un foyer de pollution indirecte;

C : Non conforme et représentant un foyer de pollution directe et majeure.

2.3 Calcul de la charge spécifique

La troisième étape concerne le calcul de la charge spécifique du lac (L_p). Pour les apports en phosphore en provenance du sol, le facteur d'environnement (f_u) tel que défini par Alain et Le Rouzès (1979) a été utilisé. En ce qui a trait aux apports en phosphore en provenance des précipitations (L_{pr}), la valeur retenue fut 0,038 g P/m²/an (Lachance et Sasseville, 1976). Pour les apports des autres provenances (population, animaux, engrais chimiques), la charge spécifique fut obtenue en divisant les apports en phosphore respectifs par la superficie du lac.

Dans le cas présent, puisqu'aucun lac n'est situé en amont, il n'a pas été nécessaire de considérer le calcul de la charge spécifique en provenance des lacs en amont. Et comme aucune industrie ne rejette ses effluents au lac, le calcul de cette charge a également été écarté.

Pour calculer la charge spécifique naturelle (L_{pn}), c'est-à-dire la charge qui résulterait d'une absence d'occupation humaine du territoire, on considère la surface du bassin versant comme étant boisée à 100%. Cette donnée est essentielle aux calculs de la capacité de support et de la charge admissible, ainsi que pour connaître approximativement l'état trophique naturel d'un lac.

2.4 Calcul de la capacité de support

Le calcul de la capacité de support consiste à déterminer la charge maximale en phosphore pouvant être tolérée par un milieu lacustre donné. Ce calcul nécessite, en plus des charges spécifiques totales et entièrement naturelles, l'évaluation de la fréquence de renouvellement du lac et du coefficient de rétention en phosphore (i.e., la proportion des apports en phosphore séquestré dans le lac). La méthode d'Alain et Le Rouzès (1979) diffère à ce niveau de la méthode de Dillon et coll. (1986). En effet, ce

dernier fait la distinction entre une situation où il y a épuisement en oxygène dans l'hypolimnion et une autre où le milieu demeure en condition aérobie. Cette distinction est importante car elle permet d'estimer la contribution des sédiments dans l'apport en phosphore au lac. Par la suite, les résultats sont transposés dans un graphique reliant l'état trophique à la concentration prédite en phosphore dans l'épilimnion en période estivale. Un tel graphique s'obtient en groupant l'apport en phosphore par unité de surface ($L_p (1-R)/F_r$, où F_r représente la fréquence de renouvellement) à la profondeur moyenne ($Z_{\text{moy.}}$) (voir la figure 5). La comparaison de la valeur calculée au niveau de la concentration épilimnétique en phosphore avec des mesures réalisées *in situ* (c'est à dire dans les eaux du lac) est essentielle pour valider cette démarche.

2.5 Calcul de la charge admissible

Le calcul de la charge admissible se fait en regard des directives du ministère de l'Environnement du Québec. Dans le cas du phosphore, le critère de qualité de l'eau de surface pour le maintien des activités récréatives et de l'aspect esthétique implique que les rejets ne doivent pas entraîner un excès de la concentration dans le milieu supérieur à 50% par rapport à la concentration naturelle, sans dépasser un maximum de 20 µg P/L (MENV, 2001). Ce critère vise, entre autres, à limiter la nuisance causée par la prolifération d'algues et d'herbiers aquatiques.

2.6 Comparaison entre les résultats « observés » *in situ* et le modèle

L'étape de validation est nécessaire afin de voir si le calcul des apports en phosphore de la méthodologie est réaliste. Il s'agit de comparer la valeur calculée de la concentration en phosphore d'après le modèle avec la moyenne de mesures effectuées sur le terrain durant la période estivale. Pour le lac Saint-Augustin, cette moyenne était de 70 µg/L pour les étés 2000 et 2001 (Corbeil et coll., 2002). De plus, l'ensemble des données antérieures indique un épuisement en oxygène près des sédiments en période hivernale et lors de la stratification thermique en été. L'observation des carottes de sédiments prises à l'été 2001 appuie cette affirmation. Des organismes typiques des conditions anaérobies (ex., vers du genre *Tubifex*) furent identifiés dans les sédiments (Roberge et

coll., 2002). Cela suggère donc l'emploi dans la méthodologie du coefficient de rétention anaérobie de Dillon et coll. (1986) au niveau des calculs de la capacité de support et de la charge admissible.

Figure 2. Affectation des sols du bassin versant du lac Saint-Augustin et de sa décharge.

3 ANALYSE DES RÉSULTATS

Toutes les données et les coefficients nécessaires aux calculs des différentes étapes de la méthodologie furent reportés au tableau 4, ce qui a permis de faire les calculs pour le lac Saint-Augustin à la saison 2001. Les données entrées sont identifiées en vert, celles des coefficients en rouge et les résultats des différents calculs sont en noir.

3.1 Provenance et estimation des apports en phosphore

Les apports en phosphore en fonction des différentes provenances occuperaient l'ordre d'importance suivant : sol, population humaine, activités agricoles et précipitations (tableau 4). L'apport global du sol (J_s) au lac est estimé à 361 kg de phosphore sur une base annuelle. La majeure partie de ces apports, soit 90%, viendrait des sols sous affectation municipale (B). La différence, soit 10%, proviendrait des sols drainés vers les marais filtrants (M: 4%), des sols à caractère agricole (I_p : 4%) et des sols forestiers (T_s : 2%). Pour ce qui est de l'apport global de la population humaine (J_c), les calculs indiquent une contribution annuelle de 216 kg de phosphore au lac. Les installations septiques des résidences permanentes (PPS) et saisonnières (PSS), localisées sur la rive ouest du lac, seraient responsables de ces apports. Par contre, un certain nombre d'installations septiques représentent un foyer important de pollution directe (classe C) ou indirecte (classe B), et certaines fosses de rétention pourraient ne pas jouer leur rôle. Un apport plus important en phosphore pourrait par conséquent être généré par ces installations.

Enfin, les apports globaux en provenance des animaux d'élevage (J_d) et des engrais utilisés en culture (J_e) seraient négligeables par rapport à l'ensemble des apports (moins de 2%). Le portrait agro-environnemental du bassin versant réalisé dans le cadre de *La grande corvée* (Pilote et coll., 2002) montre que l'élevage et la culture y sont très extensifs : moins de 20 unités animales et très peu d'engrais organiques et chimiques épandus sur le territoire. En fait, ces apports pris séparément seraient même moins importants que ceux en provenance des précipitations (L_{pr}).

3.2 Transformation en charges spécifiques

Les apports totaux représenteraient annuellement une charge spécifique totale (L_p) de 0,917 g P par mètre carré du lac (tableau 4). De tels apports seraient suffisants à entretenir, pour ce lac à caractère vraisemblablement dimictique (qui présente une stratification thermique différente selon les saisons) avec développement de conditions anaérobies près des sédiments, une concentration en phosphore total dans l'épilimnion en période estivale ($[Pt]$ estimée anaérobie) de 71 $\mu\text{g/L}$. Pour une meilleure compréhension, les résultats sont agencés à la figure 3 de façon à former, en quelque sorte, un bilan du phosphore à l'échelle du bassin versant. Il est possible d'y comparer clairement entre elles les sources d'importation en phosphore. La figure indique également, d'après le coefficient de rétention anaérobie (R_{ANA} : 0,53), que 0,486 g de phosphore serait accumulé annuellement par mètre carré dans le littoral et les sédiments.

3.3 Évaluation de la capacité de support et de la charge admissible

La charge estimée pour la période actuelle dépasserait largement celle calculée en imaginant la superficie boisée entièrement ($L_{pn} = 0,118$) d'un facteur 7,77 (tableau 4). De plus, cette valeur théorique indiquerait que le lac avait à l'état naturel (c'est-à-dire, avant tout développement culturel) une concentration en phosphore total dans la nappe d'eau ($[Pt]$ naturelle aérobie) de 7 $\mu\text{g P/L}$. Cette estimation appuierait les affirmations de Roberge et coll. (2002) qui ont démontré que le lac était à l'origine oligo-mésotrophe, soit des concentrations inférieures à 10 $\mu\text{g P/L}$.

En résumé, les apports externes en phosphore proviendraient majoritairement des sols, surtout des sols municipalisés, et des installations septiques. Les conditions anaérobies se développant périodiquement (hiver et été) près des sédiments entraîneraient d'importantes remises en solution du phosphore, contribuant à un apport interne significatif. La combinaison de ces apports et conditions maintiendrait une concentration en phosphore total de 71 $\mu\text{g/L}$, bien au-delà de la limite inférieure d'eutrophisation (limite dangereuse, 20 $\mu\text{g/L}$). La charge admissible par année excéderait donc le critère du

ministère de l'Environnement de 0,739 g P par mètre carré du lac (tableau 4 : L_p anaérobie admissible), la concentration admissible étant de 10,5 µg/L ([Pt] naturelle aérobie + 50%).

Tableau 4. Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour la position actuelle estimée et pour le scénario 7 (voir la section 4).

Figure 3. Schéma des charges spécifiques en phosphore, importées (en vert) et exportées (en rouge), à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. Le schéma illustre également les flux de phosphore entre les trois compartiments majeurs (en bleu) du lac.

4 STRATÉGIE DE RESTAURATION DE LA QUALITÉ DE L'EAU

Le modèle utilisé pour le calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du milieu est utile pour estimer l'état d'un lac, mais il offre également la possibilité de modifier les paramètres de manière à simuler l'implication de diverses mesures correctives pour améliorer la qualité de l'eau du lac. Cette simulation permettra de générer un schéma directeur d'ordre général.

4.1 Description des scénarios

De nombreuses méthodes sont présentement établies ou offrent des perspectives encourageantes dans la restauration des milieux lacustres (USEPA, 1988; Dupont, 1997). Certaines s'appliquent au contrôle des apports externes, alors que d'autres se concentrent sur le contrôle interne, en agissant de façon directe ou indirecte. Dans le cas du lac Saint-Augustin, l'utilisation du modèle montre que les apports externes sont principalement liés à deux sources (sols municipalisés et présence d'installations septiques) et que les apports internes liés aux sédiments du lac sont significatifs. Il apparaît donc possible qu'en intervenant sur l'une ou l'autre de ces causes nous puissions obtenir un gain substantiel au niveau de la qualité de l'eau.

Donc les mesures qui ont été envisagées se présentent comme suit :

Le contrôle des apports externes en provenance des installations septiques, par des modifications aux installations présentant un foyer de pollution directe ou indirecte, ou par le raccordement des résidences isolées concernées au réseau d'égouts sanitaires.

Mesure 1 : aucune contamination en provenance des eaux sanitaires ;

Le contrôle des apports externes, en provenance des sols municipalisés, par l'adoption de bonnes pratiques (ex., réglementation sur l'utilisation des engrais domestiques et des détergents, stabilisation des sols dans les zones de construction, déblaiement des fossés par la méthode du tiers inférieur, respect des bandes riveraines, utilisation des

marais filtrants, etc.) qui permettraient de réduire les exportations de ces sols de 150 à 20 kg P/km²-an. **Mesure 2** : aucune contamination en provenance des territoires municipalisés ;

Contrôle des apports internes en provenance des sédiments par une méthode empêchant ou limitant la solubilisation du phosphore à partir des sédiments en conditions anaérobies. **Mesure 3** : aucune contamination en provenance des sédiments.

Il était également possible et intéressant d'envisager ces mesures par différentes combinaisons pour s'interroger sur leur effet cumulatif. Ces combinaisons donnent lieu à sept scénarios différents, soient : les mesures 1, 2 et 3 considérées séparément, les trois combinaisons possibles impliquant deux mesures et les trois mesures appliquées ensemble. Les chiffriers ayant servi aux calculs de ces différents scénarios sont présentés aux tableaux 4 à 7.

4.2 Résultats attendus des diverses mesures correctives

La figure 4 illustre les résultats escomptés au niveau de la concentration en phosphore total dans l'épilimnion et de l'état trophique pour les divers scénarios, et ce, en comparaison avec les résultats obtenus pour les positions naturelle et estimée ainsi que pour la position réelle mesurée « observés » (*in-situ*). Selon ce diagramme, les scénarios 1 et 2 seraient les seuls qui pourraient redonner au lac Saint-Augustin un état trophique se rapprochant de l'état naturel. Seule la combinaison des trois mesures (scénario 1) pourrait même permettre de rencontrer le critère du ministère de l'Environnement (concentration admissible de 10,5 µg P/L calculée à la section 3.4). Prise séparément, la mesure 2 serait la plus efficace avec une diminution de 32 µg P /L dans l'épilimnion, suivie de la mesure 1 avec 25 µg P/L, puis de la mesure 3 avec 20 µg P /L.

En résumé, les résultats obtenus montrent clairement, autant par la valeur estimée que par celle observées, que l'état actuel du lac Saint-Augustin s'est dégradé depuis 1979 pour atteindre de façon claire un état eutrophe. Le graphique montre également les

gains escomptés par rapport à l'état trophique si seule la mesure 1 concernant les installations septiques était appliquée (scénario 4), si la mesure 2 ayant trait aux bonnes pratiques sur les sols municipalisés était appliquée en plus (scénario 2) et si le contrôle de la solubilisation du phosphore à partir des sédiments était envisagé après le contrôle de ces apports externes (scénario 1). Ainsi, si les mesures 1 à 3 sont appliquées successivement, une amélioration progressive de l'état trophique du lac serait fort probable allant jusqu'à la rencontre du critère d'admissibilité, mais sans toutefois revenir à la position naturelle. La figure 5 montre aussi l'effet de la profondeur moyenne du lac sur l'état trophique, suggérant qu'un lac comme celui-ci ne pourrait qu'au mieux être oligo-mésotrophe.

Tableau 5. Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 1 et 2.

Tableau 6. Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 3 et 4.

Tableau 7. Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 5 et 6.

Figure 4. Schéma directeur des interventions pour la restauration de la qualité des eaux du lac Saint-Augustin.

Figure 5. Modèle reliant l'état trophique du lac Saint-Augustin aux concentrations prédites en phosphore dans l'épilimnion en période estivale (adapté de Dillon, 1974).

5 INTÉGRATION DES MESURES CORRECTIVES AU SCHÉMA DIRECTEUR

Le bassin versant contribue, d'une part, à l'apport en eau requis pour entretenir un lac et, d'autre part, à la majorité des charges (polluantes ou non) qui entrent dans le milieu lacustre. Pour cette raison, le programme de restauration du lac Saint-Augustin doit faire intervenir les meilleures pratiques en matière de gestion environnementale dans le cadre d'un schéma directeur de l'eau à l'échelle du bassin versant.

5.1 Contrôle des apports externes

Les apports externes en phosphore au lac Saint-Augustin proviennent d'au moins deux sources majeures. La première est ponctuelle et concerne les installations septiques des résidences de la rive ouest du lac qui ne sont pas raccordées au réseau d'égouts. Selon le tableau 3, 77 des 181 installations représentent un foyer de pollution directe et indirecte. Ces installations appartiennent aux catégories B et C (non conformes et représentant des foyers de pollution). Les installations appartenant aux catégories A et AA répondent aux critères du règlement, même si leur classification (et leur construction) remonte pour la majorité à plus de 15 ans (avant 1988). Les raisons qui peuvent faire qu'une installation septique soit inefficace, malgré la conformité à la réglementation, sont multiples : systèmes arrivés à la fin de leur vie utile, mauvais emplacement, sol inadéquat, nappe phréatique élevée, pente excessive, sous dimensionnement et mauvais choix du type d'installation. Le pouvoir d'épuration de ces systèmes est alors faible ou nul. Une installation peut devenir inefficace lorsque les sols deviennent saturés et à partir du moment où les structures montrent une certaine détérioration en raison de l'âge. De plus, de mauvais croisements d'égouts sanitaires et pluviaux se jettent toujours dans le milieu naturel; même si ces eaux passent par un marais filtrant, cette situation n'est pas acceptable.

L'autre source externe de phosphore au lac Saint-Augustin semble d'origine diffuse. Elle proviendrait principalement du lessivage des sols municipalisés. Certaines bonnes

pratiques en matière de contrôle de la pollution diffuse concernent la responsabilisation de la population au niveau de l'utilisation des engrais phosphatés, des pesticides phosphorés et de certains détergents domestiques.

5.2 Contrôle des apports internes

La troisième source de phosphore en importance au lac Saint-Augustin vient de la solubilisation des sédiments lorsque les conditions près des sédiments sont favorables (teneur en oxygène, potentiel redox et pH).

Le contrôle des apports internes relève plus des techniques de restauration. Ces techniques ont toutes leurs bénéfices, leurs limites et leurs effets secondaires. Une des techniques actuellement utilisées s'apparente au procédé de la coagulation-floculation de l'eau par l'alun (un sulfate d'aluminium employé couramment en potabilisation des eaux). Cette technique présente un succès élevé dans le contrôle des apports internes en phosphore pour certain lac, et ce, même à long terme (Cooke et coll. 1978; Cooke et Kennedy, 1988).

Or, la méthodologie de calcul au niveau des apports internes est plus nébuleuse et permet seulement de constater quelle quantité de phosphore est retenue dans le lac (coefficients de rétention aérobie et anaérobie). Toute la notion de flux entre les différents compartiments du lac (épilimnion-littoral-hypolimnion-sédiments) est négligée. Dans l'éventualité d'une intervention à ce niveau, il sera nécessaire d'étudier plus en détail ces déplacements afin de choisir une technique de restauration adéquate.

5.3 Priorisation des interventions

La littérature est plus incertaine quant à savoir par où commencer au niveau du contrôle de tous les apports. La logique dirait de considérer en premier la source la plus importante, mais celle-ci ne tient pas compte des investissements requis, ni de la disponibilité de la main-d'œuvre et des techniques nécessaires. Ces réalités peuvent

être intégrées au diagramme de la figure 4 pour éclairer le choix et la planification des interventions.

Dans le cadre de cette étude, l'emploi du modèle pour l'identification des priorités d'action permet en même temps l'évaluation du succès et de l'effort de travail dans l'application des mesures de contrôle en fonction de la qualité de l'eau escompté.

6 CONCLUSION

Considérant que le phosphore est un des éléments clés dans la détermination de l'état trophique d'un lac, cette étude avait comme objectif de localiser et d'estimer l'importance des principales sources en phosphore avec l'intention de simuler des mesures de contrôles dans le cadre d'un schéma directeur pour la restauration du lac Saint-Augustin. Le modèle utilisé suggère trois sources majeures qui seraient responsables de l'état eutrophe présentement observé. Parmi ces trois sources on retient les eaux sanitaires avec les installations septiques (ne sont pas inclus les eaux parasites via les mauvais croisements sanitaires – pluviales), les sols urbanisés et les sédiments. Le modèle suggère également que si des mesures étaient prises pour contrôler chacun de ces apports, il serait possible de redonner au lac un état trophique proche de l'état naturel sans toutefois l'atteindre.

Le modèle permet d'obtenir de bonnes indications sur les secteurs à regarder plus en détail. Nous croyons que dans le présent cas, soit celui du lac Saint-Augustin, le modèle des apports en phosphore peut être utilisé comme outil décisionnel compte tenu de la fiabilité des comparaisons avec les observations *in situ*. Dans l'ensemble, les apports majeurs semblent avoir été bien ciblés et leur ordre de grandeur semble réaliste selon la littérature existante sur d'autres projets semblables en Amérique du Nord et au Québec.

7 RECOMMANDATIONS

Les recommandations formulées ci-dessous visent le contrôle des sources en phosphore à l'échelle du bassin versant et du lac Saint-Augustin; de manière à obtenir un stade trophique équivalent à un milieu mésotrophe, où la qualité de l'eau est nettement améliorée comparativement au stade eutrophe.

Contrôler les apports externes en phosphore provenant des installations septiques. Orienter les mesures correctives vers l'implantation d'un réseau d'égouts collecteurs. Cette recommandation est en vigueur depuis 1979 avec le rapport de Meunier et Alain (1979) ;

Contrôler les apports externes en phosphore provenant des sols municipalisés. Les bonnes pratiques en matière de gestion environnementale, l'éducation relative à l'environnement, l'information du public ainsi que la législation et la réglementation doivent être implantées à l'échelle du bassin versant au lac Saint-Augustin. Ce travail vise la réduction des épandages d'engrais et de pesticides et les secteurs d'érosion de la rive ;

Réaliser une étude de faisabilité, laquelle étudierait la possibilité de rediriger vers le lac les eaux qui ont été drainées hors du bassin versant en tenant compte autant de la qualité que de la quantité de l'eau récupérée. Un retour à la valeur initiale du taux de renouvellement des eaux au lac devrait permettre une amélioration de l'état trophique du lac. Actuellement, les eaux qui entrent au lac sont en moins grande quantité et de moins bonne qualité. Pour cette raison, l'étude de faisabilité pourrait également considérer les importations en eau de la rivière du Cap-Rouge. Selon des documents historiques, la rivière du Cap-Rouge aurait déjà alimenté en eau le lac Saint-Augustin pour augmenter le débit à la décharge du lac en vue de faire fonctionner un moulin situé au bord du fleuve ;

Identifier les flux internes en phosphore provenant des sédiments en considérant une étude plus approfondie sur la dynamique à l'interface eau-sédiments. En effet, le phosphore en provenance des sédiments contribue à la croissance excessive des algues qui forment un tapis vert à la surface du plan d'eau. Les sédiments jouent un rôle plus important dans la prolifération des cyanobactéries. Il faut connaître davantage le cycle du phosphore au lac Saint-Augustin de manière à mettre en oeuvre des méthodes de contrôles appropriées.

8 RÉFÉRENCES

- Alain, J. et M. Le Rouzès. 1979. Méthodologie pour le calcul des apports en phosphore et la détermination de la capacité de support d'un lac. Ministère des Richesses naturelles. Service de la qualité des eaux. Éditeur officiel du Québec.
- Corbeil, C., M. Bergeron, N. Juneau, S. Arsenault, 2002. Diagnose écologique du lac Saint-Augustin. Réalisé dans le cadre de *La grande corvée* par EXXEP environnement.
- Carignan, R., P. D'Arcy and S. Lamontagne. 2000. Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 57(Suppl. 2): 105-117.
- Cooke, G.D., R.T. Heath, R.H. Kennedy and M.R. McComas. 1978. Effects of diversion and alum applications on two trophic lakes. EPA-600/3-78-033, U.S. Environmental Protection Agency, Corvallis (OR).
- Cooke, G.D. and R.H. Kennedy. 1988. Water quality management techniques for reservoirs and tailwaters. *In: Lake reservoir water quality management techniques*. Technical report E-87, U.S. Army Corps Eng., Vicksburg (MS).
- De Montigny, C. et Y. Prairie. 1996. Estimation des coefficients d'exportation du phosphore pour différentes régions du territoire québécois. Rapport de recherche préparé pour le ministère de l'Environnement et de la Faune.
- Dillon, P.J. 1974. Application du concept de la vitesse d'apport par unité de surface à la recherche sur l'eutrophisation. Publication 13691, Secrétariat de l'environnement, Conseil national de recherche du Canada.
- Dillon, P.J., K.H. Nicholls, W.A. Scheider, N.D. Yan and D.S. Jeffries. 1986. Lakeshore capacity study: Trophic status. Research and Special Project Branch. Ontario Ministry of Municipal Affairs. Queen's Printer for Ontario.
- Dupont, J. 1997. La restauration des lacs au Québec : vers une gestion améliorée. *Revue des Sciences de l'Eau* 1(1997): 41-61.
- Environnement Canada. 2001. Normales climatiques de la station météorologique de Saint-Augustin (Québec). Service météorologique du Canada. http://www.smc-msc.ec.gc.ca/climate/climate_normals (20-11-2001).

- Evans, J.E., E.E. Prepas, K.J. Devito and B.G. Kotak. 2000. Phosphorus dynamics in shallow subsurface waters in an uncut and cut subcatchment of a lake on the Boreal Plain. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 57(Suppl. 2): 60-72.
- Lachance, M. et J.L. Sasseville. 1976. Étude intégrée de la qualité des eaux des bassins versants des rivières Saint-François et Yamaska. Dans : Alain, J. et M. Le Rouzès. 1979. *Méthodologie pour le calcul des apports en phosphore et la détermination de la capacité de support d'un lac*. Ministère des richesses naturelles. Service de la qualité des eaux. Éditeur officiel du Québec.
- MENV. 2001. Critères de qualité de l'eau de surface pour le phosphore total. Ministère de l'Environnement du Québec. http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau (13-02-2001).
- Meunier, P. et J. Alain. 1979. Rapport de la diagnose écologique du lac Saint-Augustin. Direction régionale des eaux. Ministère des Richesses naturelles, Québec.
- Nurnberg, G.K. 1988. Prediction of phosphorus release rates from total and reductant-soluble phosphorus in lake sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science* 45: 453-462.
- Pilote, R., E. Buon et S. Arsenault. 2002. Portrait agro-environnemental du bassin versant du lac Saint-Augustin. Rapport préparé ppor le Conseil du bassin du lac Saint-Augustin, réalisé par EXXEP Environnement, 20 pages + 1 annexe.
- Raymond, R., G. Laflamme et G. Godbout. 1976. Pédologie du comté de Portneuf. Bulletin technique no 18. Direction générale de la recherche et de l'enseignement, Agriculture Québec. Bibliothèque nationale du Québec.
- Roberge, K., R. Pienitz, N. Juneau et S. Arsenault. 2002. Eutrophisation rapide du lac Saint-Augustin : étude paléolimnologique pour une reconstitution de la qualité de l'eau. Travail présenté au comité de restauration du lac Saint-Augustin, *La grande corvée* par EXXEP environnement.
- Seo, D. and R.P. Canale. 1999. Analysis of sediment characteristics and total phosphorus models for Shagawa Lake. *Journal of Environmental Engineering* 125(4): 346-350.
- USEPA. 1988. Lake and reservoir restoration guidance manual. 1st ed. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

Vallentyne, J.R. 1974. The algal bowl: Lakes and man. Miscellaneous Special Publication 22. Fisheries and Marine Service, Environment Canada, Ottawa.

Wetzel, R.G. 1983. Limnology. 2nd ed. Saunders College Publishing. Fort Worth, TX.

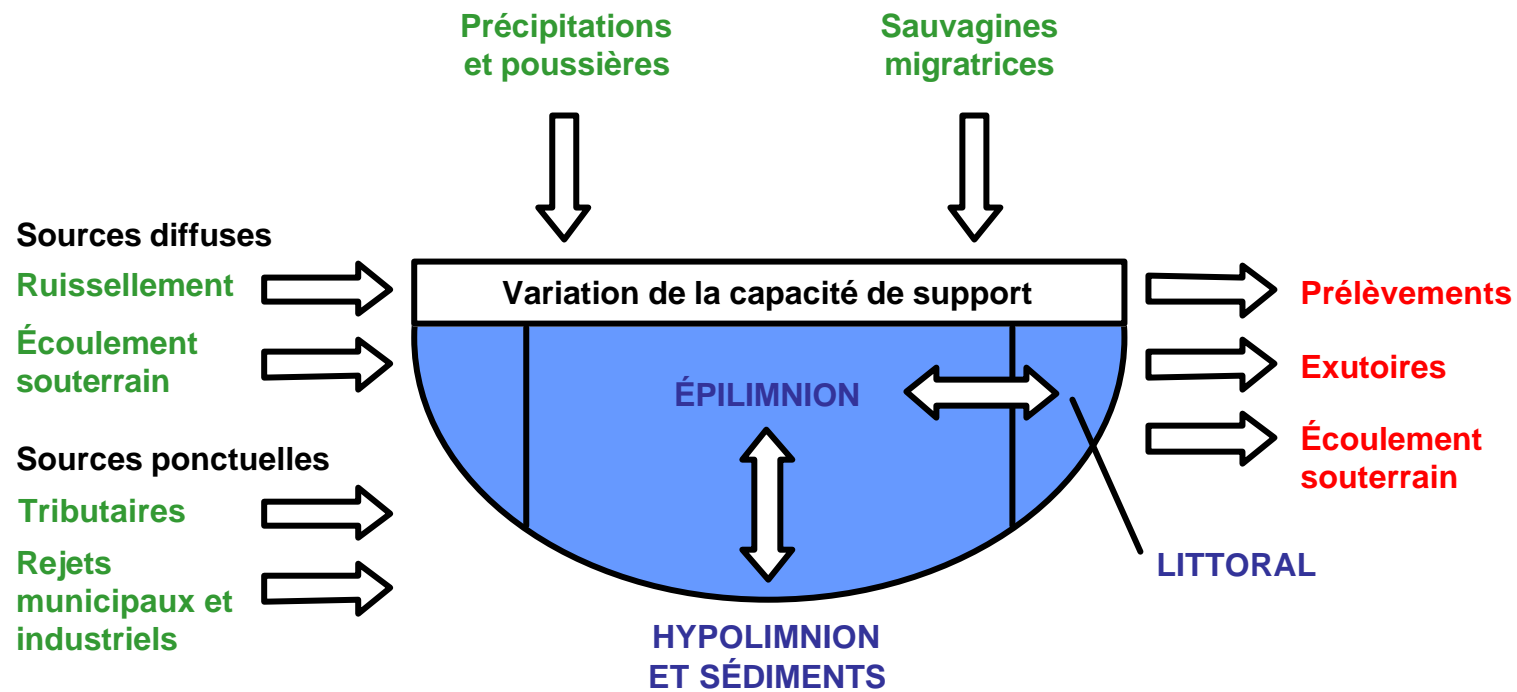


Figure 1 – Schéma des importations (en vert) et des exportations (en rouge) de phosphore à l'échelle d'un lac. Le schéma illustre également les flux de phosphore entre les trois compartiments majeurs (en bleu) du lac. Adapté de USEPA (1988) et de Wetzel (1983).

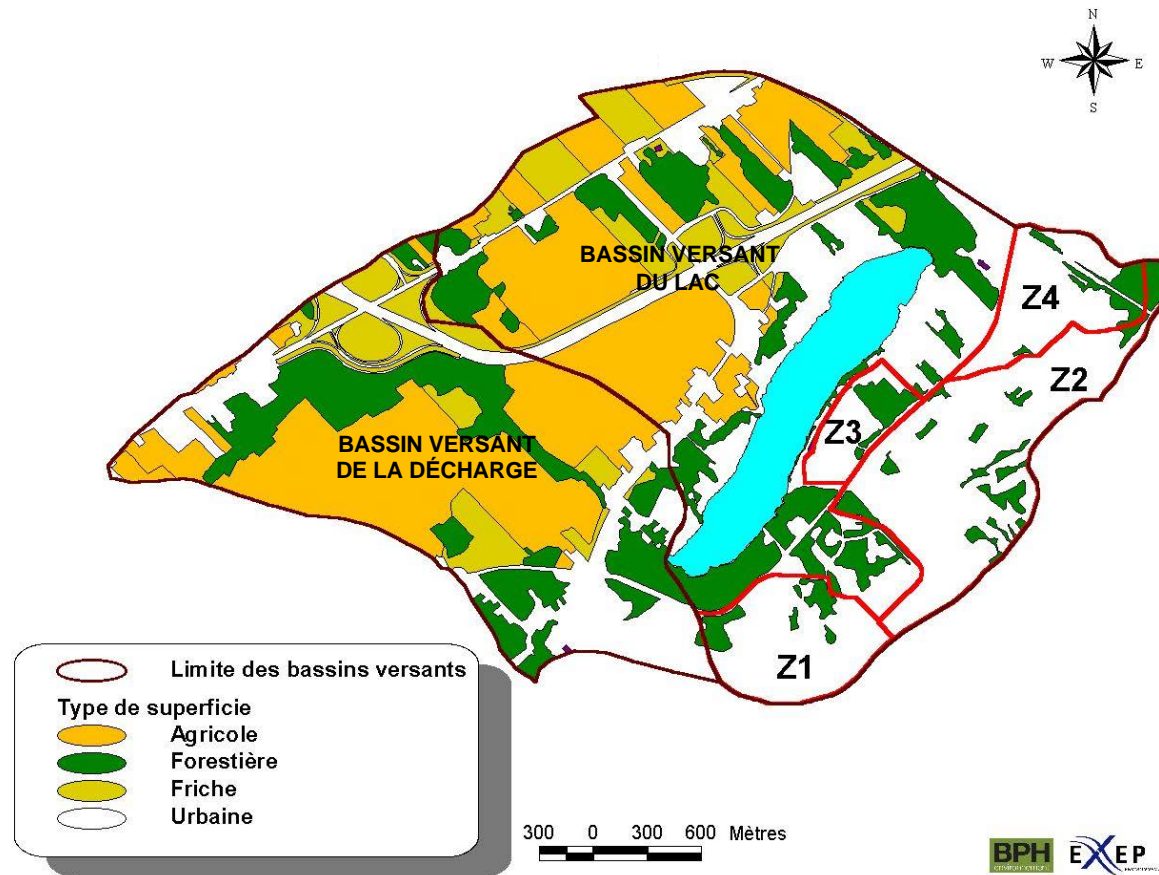


Figure 2 – Affectations des sols des bassins versants du lac Saint-Augustin et de sa décharge. Le drainage de surface des zones Z1 et Z2 a été modifié par le réseau pluvial; Z1 étant maintenant drainée vers la décharge et Z4 vers la rivière Cap-Rouge. Les zones Z3 et Z4 représentent les superficies qui se déversent respectivement vers les deux marais filtrants situés à l’est du lac.

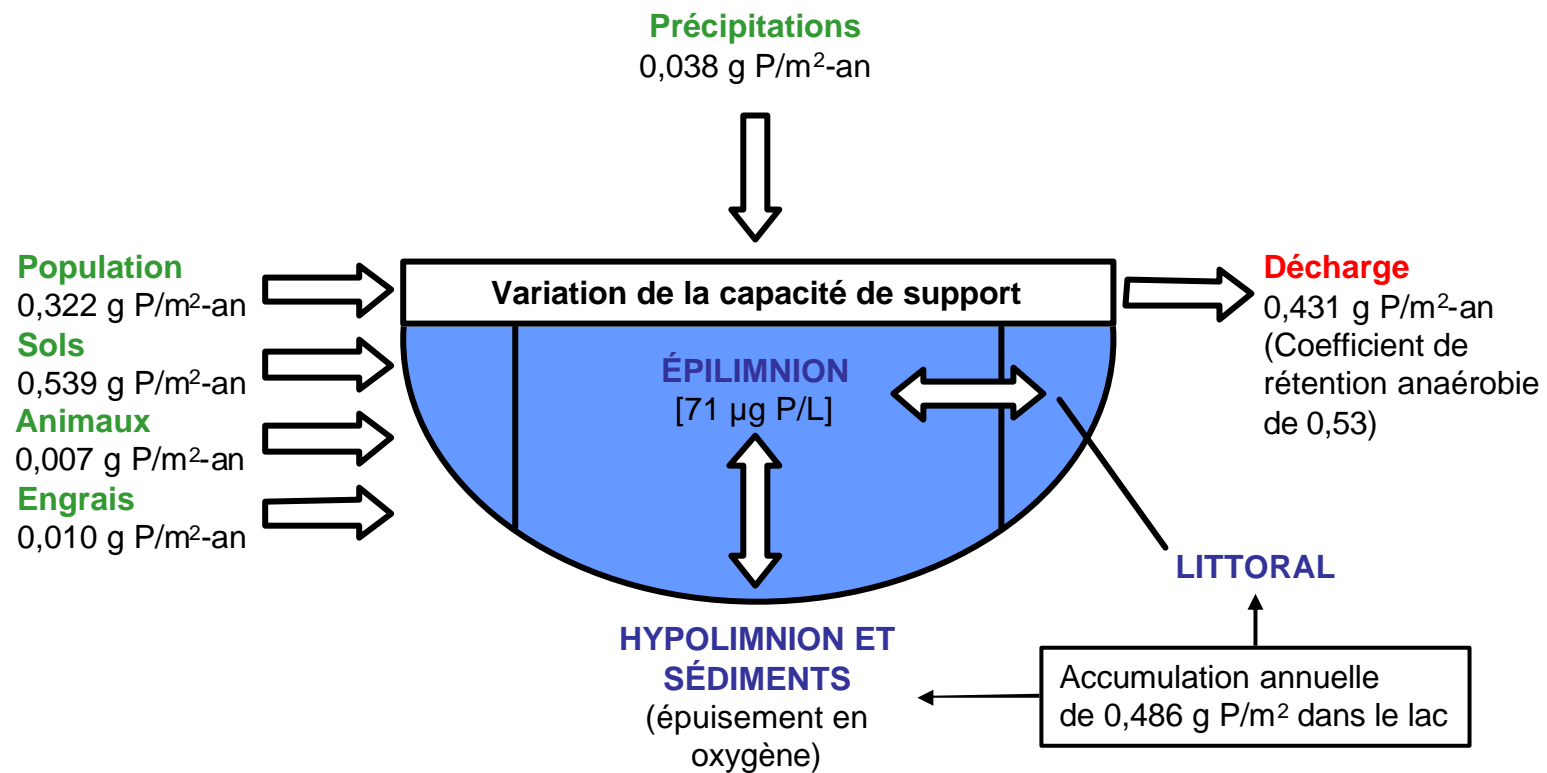


Figure 3 – Schéma des charges spécifiques en phosphore, importées (en vert) et exportées (en rouge), à l'échelle du bassin versant du lac Saint-Augustin. Le schéma illustre également les flux de phosphore entre les trois compartiments majeurs (en bleu) du lac.

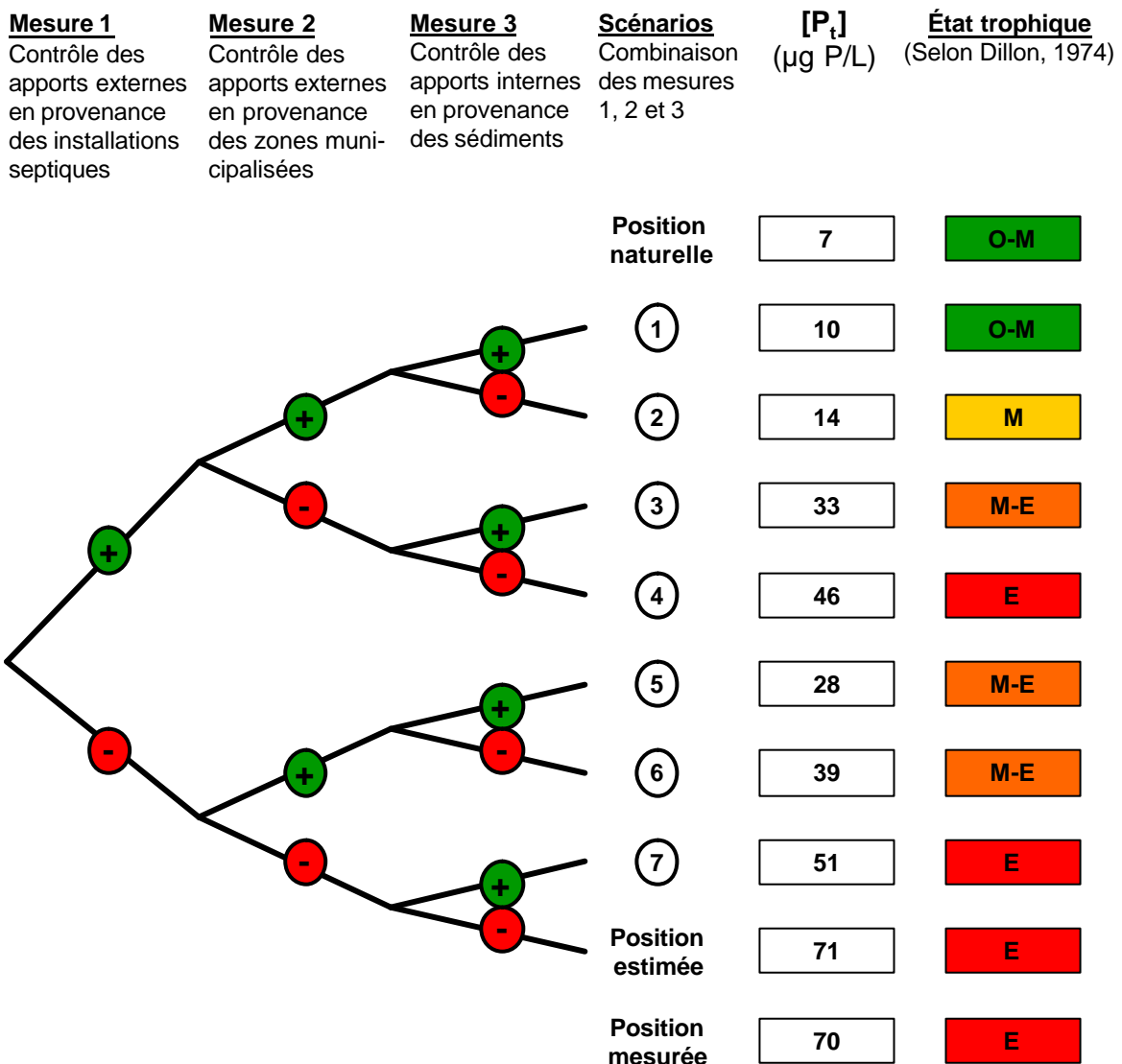


Figure 4 – Schéma directeur des interventions pour la restauration de la qualité des eaux du lac Saint-Augustin. La figure présente les résultats théoriques attendus d'après divers scénarios de gestion et de restauration de la qualité de l'eau (section 4.1). Il s'agit d'une projection des concentrations en phosphore total en période estivale dans l'épilimnion et de l'état trophique du lac. Les différents scénarios (numérotés de 1 à 7) correspondent aux combinaisons possibles entre les trois mesures d'intervention numérotées de 1 à 3.
Abréviations: O-M, oligo-mésotrophe; M, mésotrophe; M-E, méso-eutrophe; E, eutrophe.

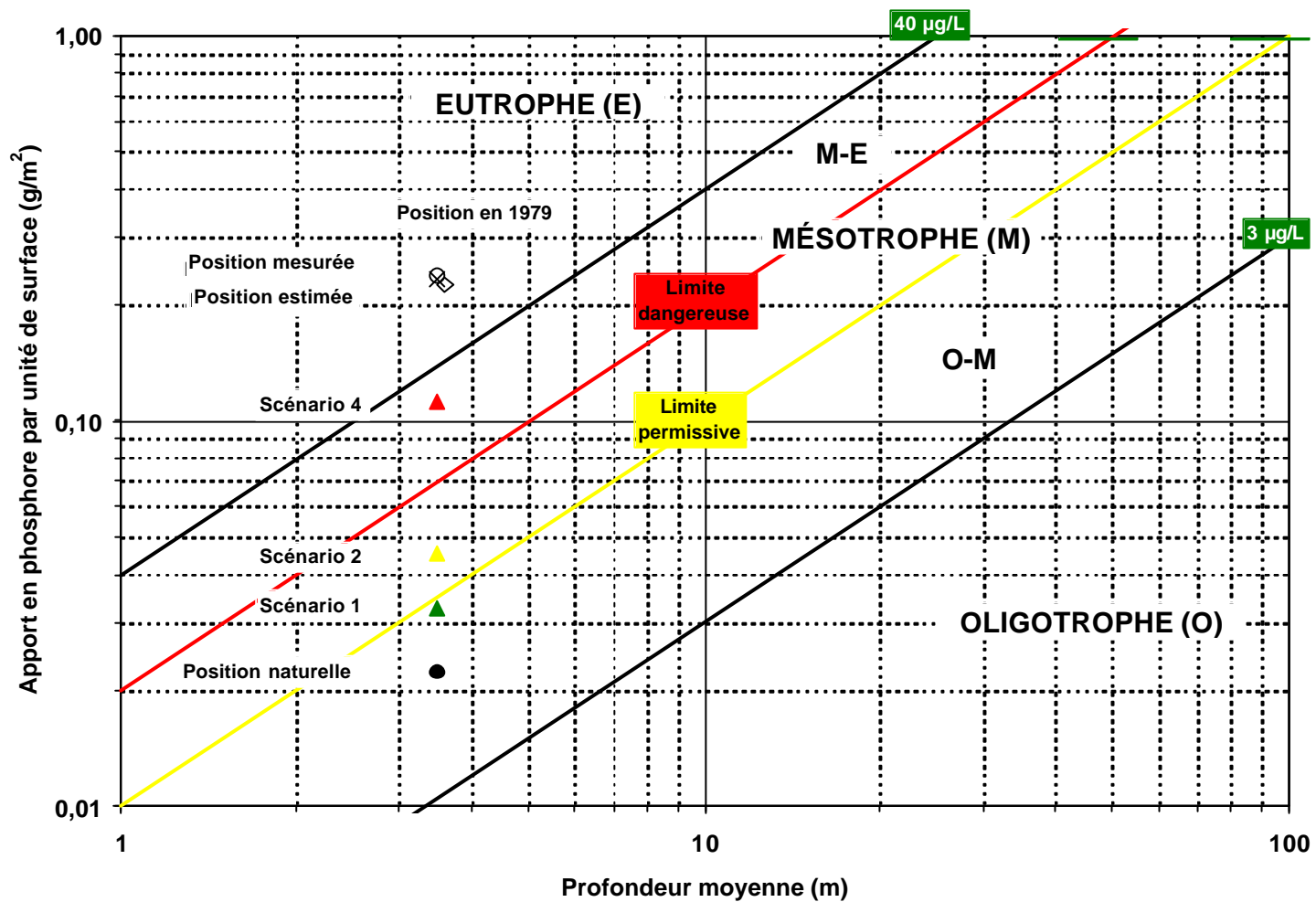


Figure 5 – Modèle reliant l'état trophique du lac Saint-Augustin aux concentrations prédites en phosphore dans l'épilimnion en période estivale (adapté de Dillon, 1974). Symboles: ×, valeur mesurée *in situ* en 2001; ○, valeur actuelle estimée; ◇, valeur estimée en 1979; ●, valeur naturelle estimée; ▲, valeurs estimées selon les différents scénarios (couleurs différentes).

Tableau 4 - Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour la position actuelle estimée et pour le scénario 7 (voir la section 4).

DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES				
A _d - Superficie du bassin (sans le lac), km ²	5,6933			
A _o - Superficie du lac, km ²	0,67			
f _u - Facteur d'environnement	8,497462687			
Z moy. - Profondeur moyenne, m	3,5			
F _r - Fréquence de renouvellement, /an	1,79			
Pr - Précipitation moyenne, m/an	1,203			
Et - Évapotranspiration moyenne, m/an	0,544			
Ru - Ruisellement, m/an	0,659			
Qp - Débit des précipitations, m ³ /an	4193415			
qs - Charge d'eau reçue, m/an	6,26			
APPORTS EN PROVENANCE DU SOL				
	%	km ²	E _s , kg P/km ² -an	Apports, kg P/an
Ip - Sol nu	33	1,9059	8	15,25
Ti - Forêts avec substrat ignée	0	0	7	0,00
Ts - Forêts avec substrat sédimentaire	16	0,930694	8	7,45
B - Zones d'affectation urbaine	38	2,165586	150	324,84
M - Zones marécageuses	12	0,68563	20	13,71
E _s moy. - Coefficient d'exportation moyen			63,5	
J _s - Apport global du sol				361,24
Co - Coefficient d'occupation	240			
PERSONNES-JOURS SAISONNIÈRES				
	Avec égout	Sans égout		
Nc - Nombre de chalets	0	25		
Nr - Emplacements de roulottes	0	39		
Ntr - Emplacement de tentes-roulottes	0	0		
Nt - Emplacements de tentes	0	100		
Nbp - Espaces de stationnement	0	0		
Nlc - Lits dans une colonie de vacances	0	0		
NBJ - Nombre total	0	20160		
APPORTS DE LA POPULATION				
	Nombre	kg P/pers.-an	Facteur RIS	Apports, kg P/an
PSA - Population saisonnière avec égout	0	0,8		0,00
PSS - Population saisonnière sans égout	336	0,8	0,75	12,43
PPA - Population permanente avec égout	4767	0,8		0,00
PPS - Population permanente sans égout	565	0,8	0,75	203,30
J _c - Apport global de la population				215,73
APPORTS DES ANIMAUX				
	Nombre	Potentiel	Transfert	Apports, kg P/an
BO - Bovins	0	12,26	0,05	0,00
PO - Porcs	0	3,46	0,05	0,00
MO - Moutons	7	1,61	0,05	0,56
VO - Volailles	0	0,26	0,05	0,00
CH - Chevaux	10	8,43	0,05	4,22
J _d - Apport global des animaux				4,78
APPORTS DES ENGRAIS CHIMIQUES				
	kg P/ha	ha	Transfert	Apports, kg P/an
P - Grandes cultures et pâturages	27,3162968	5,04	0,05	6,88
Hr - Horticulture	0	0	0,05	0,00
A - Cultures spéciales	0	0	0,05	0,00
G - Vergers en production	0	0	0,05	0,00
Terrains de golf	0	0	0,05	0,00
J _e - Apport global des engrais				6,88
APPORTS DES INDUSTRIES				
	Nombre	kg P rejetés	Traitement	Apports, kg P/an
J _i - Apport global des industries	0	0	1	0,00
CALCUL DE LA CHARGE SPÉCIFIQUE				
	g P/m ² -an			
L _s - En provenance du sol	0,539			
L _c - En provenance de la population	0,322			
L _d - En provenance des animaux	0,007			
L _e - En provenance des engrais	0,010			
L _i - En provenance des industries	0,000			
L _{pr} - En provenance des précipitations	0,038			
L _a - En provenance des lacs en amont	0,000			
L _p - Charge spécifique totale	0,917			
L _{pn} - Entièrement naturelle	0,118			
CALCUL DE LA CAPACITÉ DE SUPPORT				
R _{ANA} - Coefficient de rétention anaérobie	0,53			
L _p (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,238			
L _{pn} (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,031			
[Pt] estimée anaérobie, µg P/L	71			
[Pt] naturelle anaérobie, µg P/L	9			
R _{AER} - Coefficient de rétention aérobie	0,66			
L _p (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,172			
L _{pn} (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,022			
[Pt] estimée aérobie µg P/L	51			
[Pt] naturelle aérobie µg P/L	7			
CALCUL DE LA CHARGE ADMISSIBLE				
[Pt] anaérobie admissible, µg P/L	-57			
L _p anaérobie admissible, g P/m ² -an	-0,739			
[Pt] aérobie admissible, µg P/L	-41			
L _p aérobie admissible, g P/m ² -an	-0,739			
VALIDATION				
[Pt] mesurée <i>in situ</i> , µg P/L	70			

Les données entrées sont identifiées en vert, celles des coefficients en rouge et les résultats des différents calculs sont en noir.

Tableau 5 - Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 1 et 2.

DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES					
A _d - Superficie du bassin (sans le lac), km ²	5,6933				
A _o - Superficie du lac, km ²	0,67				
f _u - Facteur d'environnement	8,497462687				
Z moy. - Profondeur moyenne, m	3,5				
F _r - Fréquence de renouvellement, /an	1,79				
Pr - Précipitation moyenne, m/an	1,203				
Et - Évapotranspiration moyenne, m/an	0,544				
Ru - Ruissellement, m/an	0,659				
Qp - Débit des précipitations, m ³ /an	4193415				
qs - Charge d'eau reçue, m/an	6,26				
APPORTS EN PROVENANCE DU SOL					
	%	km ²	E _s , kg P/km ² -an	Apports, kg P/an	
Ip - Sol nu	33	1,9059	8	15,25	
Ti - Forêts avec substrat ignée	0	0	7	0,00	
Ts - Forêts avec substrat sédimentaire	16	0,930694	8	7,45	
B - Zones d'affectation urbaine	0	0	150	0,00	
M - Zones marécageuses	50	2,851216	20	57,02	
E _s moy. - Coefficient d'exportation moyen			14,0		
J _s - Apport global du sol				79,72	
Co - Coefficient d'occupation	240				
PERSONNES-JOURS SAISONNIÈRES					
	Avec égout	Sans égout			
Nc - Nombre de chalets	25	0			
Nr - Emplacements de roulottes	39	0			
Ntr - Emplacement de tentes-roulottes	0	0			
Nt - Emplacements de tentes	100	0			
Nbp - Espaces de stationnement	0	0			
Nlc - Lits dans une colonie de vacances	0	0			
NBJ - Nombre total	20160	0			
APPORTS DE LA POPULATION					
	Nombre	kg P/pers.-an	Facteur RIS	Apports, kg P/an	
PSA - Population saisonnière avec égout	336	0,8		0,00	
PSS - Population saisonnière sans égout	0	0,8	0,75	0,00	
PPA - Population permanente avec égout	5332	0,8		0,00	
PPS - Population permanente sans égout	0	0,8	0,75	0,00	
J _c - Apport global de la population				0,00	
APPORTS DES ANIMAUX					
	Nombre	Potentiel	Transfert	Apports, kg P/an	
BO - Bovins	0	12,26	0,05	0,00	
PO - Porcs	0	3,46	0,05	0,00	
MO - Moutons	7	1,61	0,05	0,56	
VO - Volailles	0	0,26	0,05	0,00	
CH - Chevaux	10	8,43	0,05	4,22	
J _d - Apport global des animaux				4,78	
APPORTS DES ENGRAIS CHIMIQUES					
	kg P/ha	ha	Transfert	Apports, kg P/an	
P - Grandes cultures et pâturages	27,3162968	5,04	0,05	6,88	
Hr - Horticulture	0	0	0,05	0,00	
A - Cultures spéciales	0	0	0,05	0,00	
G - Vergers en production	0	0	0,05	0,00	
Terrains de golf	0	0	0,05	0,00	
J _e - Apport global des engrais				6,88	
APPORTS DES INDUSTRIES					
	Nombre	kg P rejetés	Traitement	Apports, kg P/an	
J _i - Apport global des industries	0	0	1	0,00	
CALCUL DE LA CHARGE SPÉCIFIQUE					
	g P/m ² -an				
L _s - En provenance du sol	0,119				
L _c - En provenance de la population	0,000				
L _d - En provenance des animaux	0,007				
L _c - En provenance des engrais	0,010				
L _i - En provenance des industries	0,000				
L _{pr} - En provenance des précipitations	0,038				
L _a - En provenance des lacs en amont	0,000				
L _p - Charge spécifique totale	0,174				
L _{pn} - Entièrement naturelle	0,157				
CALCUL DE LA CAPACITÉ DE SUPPORT					
R _{ANA} - Coefficient de rétention anaérobie	0,53				
L _p (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,045				
L _{pn} (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,041				
[Pt] estimée anaérobie, µg P/L	14				
[Pt] naturelle anaérobie, µg P/L	12				
R _{AER} - Coefficient de rétention aérobie	0,66				
L _p (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,033				
L _{pn} (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,029				
[Pt] estimée aérobie µg P/L	10				
[Pt] naturelle aérobie µg P/L	9				
CALCUL DE LA CHARGE ADMISSIBLE					
[Pt] anaérobie admissible, µg P/L	5				
L _p anaérobie admissible, g P/m ² -an	0,061				
[Pt] aérobie admissible, µg P/L	3				
L _p aérobie admissible, g P/m ² -an	0,061				

Les données entrées sont identifiées en vert, celles des coefficients en rouge et les résultats des différents calculs sont en noir.

Tableau 6 - Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 3 et 4.

DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES					
A _d - Superficie du bassin (sans le lac), km ²	5,6933				
A _o - Superficie du lac, km ²	0,67				
f _u - Facteur d'environnement	8,497462687				
Z moy. - Profondeur moyenne, m	3,5				
F _r - Fréquence de renouvellement, /an	1,79				
Pr - Précipitation moyenne, m/an	1,203				
Et - Évapotranspiration moyenne, m/an	0,544				
Ru - Ruisellement, m/an	0,659				
Qp - Débit des précipitations, m ³ /an	4193415				
qs - Charge d'eau reçue, m/an	6,26				
APPORTS EN PROVENANCE DU SOL					
	%	km ²	E _s , kg P/km ² -an	Apports, kg P/an	
Ip - Sol nu	33	1,9059	8	15,25	
Ti - Forêts avec substrat ignée	0	0	7	0,00	
Ts - Forêts avec substrat sédimentaire	16	0,930694	8	7,45	
B - Zones d'affectation urbaine	38	2,165586	150	324,84	
M - Zones marécageuses	12	0,68563	20	13,71	
E _s moy. - Coefficient d'exportation moyen			63,5		
J _s - Apport global du sol				361,24	
Co - Coefficient d'occupation	240				
PERSONNES-JOURS SAISONNIÈRES					
	Avec égout	Sans égout			
Nc - Nombre de chalets	25	0			
Nr - Emplacements de roulottes	39	0			
Ntr - Emplacement de tentes-roulottes	0	0			
Nt - Emplacements de tentes	100	0			
Nbp - Espaces de stationnement	0	0			
Nlc - Lits dans une colonie de vacances	0	0			
NBJ - Nombre total	20160	0			
APPORTS DE LA POPULATION					
	Nombre	kg P/pers.-an	Facteur RIS	Apports, kg P/an	
PSA - Population saisonnière avec égout	336	0,8		0,00	
PSS - Population saisonnière sans égout	0	0,8	0,75	0,00	
PPA - Population permanente avec égout	5332	0,8		0,00	
PPS - Population permanente sans égout	0	0,8	0,75	0,00	
J _c - Apport global de la population				0,00	
APPORTS DES ANIMAUX					
	Nombre	Potentiel	Transfert	Apports, kg P/an	
BO - Bovins	0	12,26	0,05	0,00	
PO - Porcs	0	3,46	0,05	0,00	
MO - Moutons	7	1,61	0,05	0,56	
VO - Volailles	0	0,26	0,05	0,00	
CH - Chevaux	10	8,43	0,05	4,22	
J _d - Apport global des animaux				4,78	
APPORTS DES ENGRAIS CHIMIQUES					
	kg P/ha	ha	Transfert	Apports, kg P/an	
P - Grandes cultures et pâturages	27,3162968	5,04	0,05	6,88	
Hr - Horticulture	0	0	0,05	0,00	
A - Cultures spéciales	0	0	0,05	0,00	
G - Vergers en production	0	0	0,05	0,00	
Terrains de golf	0	0	0,05	0,00	
J _e - Apport global des engrais				6,88	
APPORTS DES INDUSTRIES					
	Nombre	kg P rejetés	Traitement	Apports, kg P/an	
J _i - Apport global des industries	0	0	1	0,00	
CALCUL DE LA CHARGE SPÉCIFIQUE					
	g P/m ² -an				
L _s - En provenance du sol	0,539				
L _c - En provenance de la population	0,000				
L _d - En provenance des animaux	0,007				
L _c - En provenance des engrais	0,010				
L _i - En provenance des industries	0,000				
L _{pr} - En provenance des précipitations	0,038				
L _a - En provenance des lacs en amont	0,000				
L _p - Charge spécifique totale	0,595				
L _{pn} - Entièrement naturelle	0,118				
CALCUL DE LA CAPACITÉ DE SUPPORT					
R _{ANA} - Coefficient de rétention anaérobie	0,53				
L _p (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,155				
L _{pn} (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,031				
[Pt] estimée anaérobie, µg P/L	46				
[Pt] naturelle anaérobie, µg P/L	9				
R _{AER} - Coefficient de rétention aérobie	0,66				
L _p (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,112				
L _{pn} (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,022				
[Pt] estimée aérobie µg P/L	33				
[Pt] naturelle aérobie µg P/L	7				
CALCUL DE LA CHARGE ADMISSIBLE					
[Pt] anaérobie admissible, µg P/L	-32				
L _p anaérobie admissible, g P/m ² -an	-0,417				
[Pt] aérobie admissible, µg P/L	-23				
L _p aérobie admissible, g P/m ² -an	-0,417				

Les données entrées sont identifiées en vert, celles des coefficients en rouge et les résultats des différents calculs sont en noir.

Tableau 7 - Chiffrier de calcul des apports en phosphore et de la capacité de support du lac Saint-Augustin pour les scénarios 5 et 6.

DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES					
A _d - Superficie du bassin (sans le lac), km ²	5,6933				
A _o - Superficie du lac, km ²	0,67				
f _u - Facteur d'environnement	8,497462687				
Z moy. - Profondeur moyenne, m	3,5				
F _r - Fréquence de renouvellement, /an	1,79				
Pr - Précipitation moyenne, m/an	1,203				
Et - Évapotranspiration moyenne, m/an	0,544				
Ru - Ruissellement, m/an	0,659				
Qp - Débit des précipitations, m ³ /an	4193415				
qs - Charge d'eau reçue, m/an	6,26				
APPORTS EN PROVENANCE DU SOL					
	%	km ²	E _s , kg P/km ² -an	Apports, kg P/an	
Ip - Sol nu	33	1,9059	8	15,25	
Ti - Forêts avec substrat ignée	0	0	7	0,00	
Ts - Forêts avec substrat sédimentaire	16	0,930694	8	7,45	
B - Zones d'affectation urbaine	0	0	150	0,00	
M - Zones marécageuses	50	2,851216	20	57,02	
E _s moy. - Coefficient d'exportation moyen			14,0		
J _s - Apport global du sol				79,72	
Co - Coefficient d'occupation	240				
PERSONNES-JOURS SAISONNIÈRES					
	Avec égout	Sans égout			
Nc - Nombre de chalets	0	25			
Nr - Emplacements de roulottes	0	39			
Ntr - Emplacement de tentes-roulottes	0	0			
Nt - Emplacements de tentes	0	100			
Nbp - Espaces de stationnement	0	0			
Nlc - Lits dans une colonie de vacances	0	0			
NBJ - Nombre total	0	20160			
APPORTS DE LA POPULATION					
	Nombre	kg P/pers.-an	Facteur RIS	Apports, kg P/an	
PSA - Population saisonnière avec égout	0	0,8		0,00	
PSS - Population saisonnière sans égout	336	0,8	0,75	12,43	
PPA - Population permanente avec égout	4767	0,8		0,00	
PPS - Population permanente sans égout	565	0,8	0,75	203,30	
J _c - Apport global de la population				215,73	
APPORTS DES ANIMAUX					
	Nombre	Potentiel	Transfert	Apports, kg P/an	
BO - Bovins	0	12,26	0,05	0,00	
PO - Porcs	0	3,46	0,05	0,00	
MO - Moutons	7	1,61	0,05	0,56	
VO - Volailles	0	0,26	0,05	0,00	
CH - Chevaux	10	8,43	0,05	4,22	
J _d - Apport global des animaux				4,78	
APPORTS DES ENGRAIS CHIMIQUES					
	kg P/ha	ha	Transfert	Apports, kg P/an	
P - Grandes cultures et pâturages	27,3162968	5,04	0,05	6,88	
Hr - Horticulture	0	0	0,05	0,00	
A - Cultures spéciales	0	0	0,05	0,00	
G - Vergers en production	0	0	0,05	0,00	
Terrains de golf	0	0	0,05	0,00	
J _e - Apport global des engrais				6,88	
APPORTS DES INDUSTRIES					
	Nombre	kg P rejetés	Traitement	Apports, kg P/an	
J _i - Apport global des industries	0	0	1	0,00	
CALCUL DE LA CHARGE SPÉCIFIQUE					
	g P/m ² -an				
L _s - En provenance du sol	0,119				
L _c - En provenance de la population	0,322				
L _d - En provenance des animaux	0,007				
L _c - En provenance des engrais	0,010				
L _i - En provenance des industries	0,000				
L _{pr} - En provenance des précipitations	0,038				
L _a - En provenance des lacs en amont	0,000				
L _p - Charge spécifique totale	0,496				
L _{pn} - Entièrement naturelle	0,157				
CALCUL DE LA CAPACITÉ DE SUPPORT					
R _{ANA} - Coefficient de rétention anaérobie	0,53				
L _p (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,129				
L _{pn} (1-R _{ANA})/(F _r), g P/m ²	0,041				
[Pt] estimée anaérobie, µg P/L	39				
[Pt] naturelle anaérobie, µg P/L	12				
R _{AER} - Coefficient de rétention aérobie	0,66				
L _p (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,093				
L _{pn} (1-R _{AER})/(F _r), g P/m ²	0,029				
[Pt] estimée aérobie µg P/L	28				
[Pt] naturelle aérobie µg P/L	9				
CALCUL DE LA CHARGE ADMISSIBLE					
[Pt] anaérobie admissible, µg P/L	-20				
L _p anaérobie admissible, g P/m ² -an	-0,261				
[Pt] aérobie admissible, µg P/L	-15				
L _p aérobie admissible, g P/m ² -an	-0,261				

Les données entrées sont identifiées en vert, celles des coefficients en rouge et les résultats des différents calculs sont en noir.