

Développement d'un outil de gestion *in situ* du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin



**DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE
GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE
PROVENANT DES SÉDIMENTS DU
LAC SAINT-AUGUSTIN**

(DOSSIER N° 33666)

RAPPORT TECHNIQUE

**Présenté à la :
VILLE DE QUÉBEC**

**Préparé par :
CONSORTIUM DDM – PRO FAUNE
825, RUE SAINTE-THÉRÈSE
QUÉBEC (QUÉBEC) G1N 1S6
TÉL.: (418) 877-5252
TÉLÉC.: (418) 877-6763**

Mai 2005

ÉQUIPE DE RÉALISATION

VILLE DE QUÉBEC

CHARGÉ DE PROJET : René Gélinas, directeur, Service de
l'environnement, Division de la qualité du
milieu

COMITÉ DE SUIVI : René Gélinas
Gilles Lefebvre, Conseil de bassin du lac
Saint-Augustin
Odette Martineau, Ville de Québec

CONSORTIUM DDM – PRO FAUNE

DIRECTEUR : René Nault, biologiste, M. Sc., M.G.P.

CHARGÉ DE PROJET : Fabien Bolduc, biologiste, M. Sc.

COLLECTE DE DONNÉES : Hugues Bertrand, technicien
Fabien Bolduc, biologiste, M. Sc.
Matthieu Féret, biologiste, M. Sc.
Pierre Kaltenback, technicien

**COMPILATION DES
INFORMATIONS :** Fabien Bolduc, biologiste, M. Sc
Matthieu Féret, biologiste, M. Sc
Pierre Kaltenback, technicien

CARTOGRAPHIE : Bernard Massé, ing. f.
Denis Sundström, cartographe

RÉDACTION : Fabien Bolduc, biologiste, M. Sc
André Delorme, ing. hydrologue
Matthieu Féret, biologiste, M. Sc
René Nault, biologiste, M. Sc, M.G.P.

SOMMAIRE

La problématique de la dégradation de la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin est connue depuis plusieurs décennies et déjà en 1968, le lac était classé comme eutrophe. Dans le but d'améliorer la qualité de l'eau et de limiter les périodes de prolifération massive de cyanobactéries (algues bleu-vert), différents scénarios de réduction des apports en phosphore ont été proposés au début des années 2001-2002. Depuis, la Ville de Québec et le Conseil de bassin du lac Saint-Augustin ont entrepris des actions et en planifient d'autres pour diminuer les apports en phosphore à partir des eaux sanitaires et des sols urbanisés.

Parmi ces actions, la présente étude, réalisée en 2004-2005, avait pour objectifs d'évaluer l'importance des flux en phosphore en provenance des sédiments du lac Saint-Augustin et d'identifier des outils de gestion *in situ* du phosphore provenant des sédiments du plan d'eau, tout en assurant le développement durable et contemporain de ses ressources et de ses potentiels.

L'étude de 2004-2005 montre que la profondeur maximale du lac Saint-Augustin est de 6,45 m et sa superficie de l'ordre de 68 ha. Son volume a été évalué à 2 252 106 m³, pour une profondeur moyenne de 3,30 m. Avec un bassin versant d'une superficie de 5,69 km², le temps de renouvellement de ses eaux est estimé à 153 jours.

Les résultats des mesures de certains paramètres physicochimiques, réalisées en juillet et août 2004, montrent que l'eau près du fond est caractérisée périodiquement par des conditions d'anoxie sévère mais que les eaux sont mélangées fréquemment, ce qui permet de classer le lac Saint-Augustin comme un lac polymictique. D'autre part, ce dernier ne présente pas de véritable thermocline durant la période estivale. La température demeurant toutefois élevée (environ 20 °C) sur toute la colonne d'eau.

Le volume de sédiments non consolidés accumulé dans le lac Saint-Augustin est important et est évalué à 736 379 m³. L'épaisseur moyenne des sédiments déposés dans le lac est de l'ordre de 110 cm. Les sédiments retrouvés dans le lac sont peu denses et contiennent une très forte proportion d'eau (plus de 90 %).

Les résultats d'analyses de laboratoire, réalisées en 2004, montrent que les sédiments du lac Saint-Augustin contiennent de fortes concentrations de phosphore total, de fer et d'aluminium, soit respectivement une moyenne de 892 mg Pt/kg, 19 119 mg Al/kg et 29 355 mg Fe/kg de sédiment sec.

Selon les caractéristiques des sédiments du lac Saint-Augustin, la quantité totale de phosphore contenue dans les sédiments s'élèverait à 54,1 tonnes et les apports en phosphore provenant des sédiments, durant la période estivale, seraient de 357,8 mg/m², soit 245 kg de P.

Le constat global de l'étude 2004-2005 indique que les apports d'eau au lac Saint-Augustin sont insuffisants pour permettre un lessivage vers l'aval du phosphore libéré. D'autre part, la superficie de la zone de moins de 3 m de profondeur serait trop faible pour anticiper des interventions

basées sur des modifications du niveau d'eau. Des actions visant explicitement le contrôle du phosphore présent dans le plan d'eau ont donc fait l'objet d'une recherche.

La revue de littérature réalisée relativement aux outils de gestion *in situ* du phosphore dans un plan d'eau a permis d'identifier une dizaine d'outils potentiels. Ces outils de gestion *in situ* ont été analysés à l'aide d'une méthode d'aide multicritère à la décision. Ainsi, les outils de gestion ont été comparés entre eux en considérant leurs avantages, leurs inconvénients, leur coût et leur efficacité afin de déterminer la position respective de chacun selon sa performance relativement aux critères analysés. Par ailleurs, le cadre légal qui pourrait régir l'application des outils a également fait l'objet d'une consultation auprès des instances environnementales gouvernementales québécoise et canadienne.

Les résultats de l'analyse montrent que l'inactivation du phosphore par floculation est l'outil qui répond le plus aux critères, suivi du pompage des sédiments. La combinaison des deux outils serait probablement une avenue à explorer pour améliorer la qualité des eaux du lac Saint-Augustin et ses usages.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES ANNEXES.....	vi
INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE	2
1.1 DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT.....	2
1.1.1 LOCALISATION ET DESCRIPTION GÉNÉRALE	2
1.1.2 DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES DISPONIBLES	2
1.2 QUALITÉ DE L'EAU	4
1.3 CYCLE DU PHOSPHORE DANS UN PLAN D'EAU	5
2. COLLECTE DE DONNÉES COMPLÉMENTAIRES	7
2.1 MISE À JOUR DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE DU LAC	7
2.1.1 MÉTHODOLOGIE	7
2.1.2 RÉSULTATS.....	7
2.2 SUIVI PHYSICOCHIMIQUE DE L'EAU	9
2.3 CARTOGRAPHIE DES SÉDIMENTS ACCUMULÉS DANS LE LAC SAINT-AUGUSTIN.....	12
2.3.1 MÉTHODOLOGIE	12
2.3.2 RÉSULTATS.....	12
2.4 CARACTÉRISATION PHYSICOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS	15
2.4.1 MÉTHODOLOGIE	15
2.4.2 RÉSULTATS.....	16
2.4.3 AUTRES MÉTAUX ET MÉTALLOÏDES	16
2.5 ÉVALUATION DES FLUX DE PHOSPHORE SÉDIMENTS – COLONNE D'EAU.....	17
3. PROBLÉMATIQUE DE GESTION DU PHOSPHORE.....	20
3.1 MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES OUTILS	22
3.2 ANALYSE COMPARATIVE DES OUTILS	25
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	45
RÉFÉRENCES CONSULTÉES	47

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1	ÉVALUATION DU VOLUME D'EAU DU LAC SAINT-AUGUSTIN (18 AOÛT 2004)	9
TABLEAU 2	ÉVALUATION DU VOLUME DE SÉDIMENTS FINS ACCUMULÉ DANS LE FOND DU LAC SAINT-AUGUSTIN	15
TABLEAU 3	CONCENTRATIONS DE PHOSPHORE TOTAL, DE FER ET D'ALUMINIUM MESURÉES DANS LES SÉDIMENTS DU LAC SAINT-AUGUSTIN EN 2004	18
TABLEAU 4	TENEURS EN PHOSPHORE ET EN DIFFÉRENTS MÉTAUX MESURÉES DANS DES CAROTTES DE SÉDIMENTS DU LAC SAINT-AUGUSTIN EN 2004	19
TABLEAU 5	TENEURS MOYENNES DE DIFFÉRENTS MÉTAUX MESURÉES DANS LES SÉDIMENTS DU LAC SAINT-AUGUSTIN, OCTOBRE 2001	19
TABLEAU 6	OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i> IDENTIFIÉS	23
TABLEAU 7	CRITÈRES UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i> DU PHOSPHORE	23
TABLEAU 8	ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION <i>IN SITU</i> DU PHOSPHORE	26
TABLEAU 9	ÉTAPE 1 – ÉVALUATION DE CHACUN DES OUTILS	39
TABLEAU 10	ÉTAPE 2 – TRANSFORMATION DES COTES ALPHABÉTIQUES EN NUMÉRIQUES	40
TABLEAU 11	ÉTAPES 3 ET 4 – APPLICATION DES FACTEURS DE PONDÉRATION ET CALCUL DU POIDS RELATIF DE CHACUN DES OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	41
TABLEAU 12	RANG OBTENU PAR CHACUN DES OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i> DU PHOSPHORE	42

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1	LOCALISATION DU LAC SAINT AUGUSTIN	3
FIGURE 2	VERSANT DU LAC SAINT-AUGUSTIN ET CARTE D'AFFECTATION DES SOLS	4
FIGURE 3	CYCLE DU PHOSPHORE DANS L'EAU	5
FIGURE 4	PROCESSUS IMPLIQUÉS DANS LA MOBILISATION DU PHOSPHORE PARTICULAIRE JUSQU'À LA LIBÉRATION VERS LA COLONNE D'EAU	6
FIGURE 5	CARTE BATHYMÉTRIQUE DU LAC SAINT-AUGUSTIN (18 AOÛT 2004)	8

FIGURE 6	PROFILS DE TEMPÉRATURE ET D'OXYGÈNE DISSOUS DANS LES EAUX DU LAC SAINT-AUGUSTIN, JUILLET ET AOÛT 2004.....	10
FIGURE 7	PROFIL DE LA CONCENTRATION DE PHOSPHORE DANS LE LAC SAINT-AUGUSTIN, ÉTÉ 2004.....	11
FIGURE 8	LOCALISATION DES STATIONS D'ÉCHANTILLONNAGE DES SÉDIMENTS	13
FIGURE 9	CARTOGRAPHIE DE L'ÉPAISSEUR DES SÉDIMENTS NON CONSOLIDÉS DANS LE FOND DU LAC SAINT-AUGUSTIN	14
FIGURE 10	PROFILS DE LA COLONNE D'EAU ET DES SÉDIMENTS DANS LE LAC SAINT-AUGUSTIN	21
FIGURE 11	DÉMARCHE ANALYTIQUE UTILISÉE.....	24

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1	RAPPORT D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SÉDIMENTS EN LABORATOIRE
ANNEXE 2	GRILLE INTÉrimAIRE DE GESTION DES SOLS CONTAMINÉS EXCAVÉS
ANNEXE 3	COMPTE RENDU DES ENTREVUES AVEC LES EXPERTS
ANNEXE 4	DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS OUTILS ANALYSÉS DE GESTION <i>IN SITU</i> DU PHOSPHORE
ANNEXE 5	ANALYSE DE LA QUALITÉ DE L'EAU DU FLEUVE SAINT-LAURENT COMPARATIVEMENT À CELLE DU LAC SAINT-AUGUSTIN

INTRODUCTION

La problématique de la dégradation de la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin est connue depuis plusieurs décennies. Déjà en 1968, une étude classifiait le lac comme eutrophe¹. Les études subséquentes en sont venues à la même conclusion. Les plus récents travaux, réalisés en 2001-2002 dans le cadre du projet La grande corvée, évaluaient que les apports externes en phosphore atteignaient 614 kg P/an, provenant principalement des sols sous affectation municipale et de la population humaine (Pilote et al., 2002). D'autre part, comme l'accumulation annuelle dans le lac était estimée à 355 kg P, la remise en suspension en période estivale semblait être considérable, bien qu'elle n'ait pas été évaluée précisément à ce moment.

Dans le but d'améliorer la qualité de l'eau et de limiter les périodes de prolifération massive de cyanobactéries (algues bleu-vert), différents scénarios de réduction des apports en phosphore ont été proposés lors des travaux de 2001-2002. Depuis, la Ville de Québec et le Conseil de bassin du lac Saint-Augustin ont entrepris des actions et en planifient d'autres pour diminuer les apports en phosphore à partir des eaux sanitaires et des sols urbanisés.

Afin d'évaluer l'importance des flux en phosphore en provenance des sédiments du lac Saint-Augustin (qui pourraient jouer un rôle important dans le bilan des nutriments), la Ville de Québec a confié un mandat au Consortium DDM – Pro Faune pour compléter les informations. L'objectif de cette étude était d'obtenir un regard neutre sur la problématique du phosphore dans le lac Saint-Augustin et de proposer, à partir des évaluations des flux en phosphore, un plan d'action de réduction des apports provenant des sédiments du plan d'eau, tout en assurant le développement durable et contemporain de ses ressources et de ses potentiels.

Les objectifs spécifiques de l'étude, conformément au devis de la Ville de Québec, étaient les suivants :

- Évaluer la charge totale de phosphore contenue dans les sédiments du lac.
- Caractériser les flux de phosphore entre les sédiments et la colonne d'eau.
- Identifier les processus qui contrôlent la libération du phosphore contenu dans les sédiments.
- Identifier et analyser les outils de gestion *in situ* du phosphore provenant des sédiments, au regard des caractéristiques scientifiques, technico-économiques, sociales et environnementales propres au lac Saint-Augustin.
- Recommander un outil de gestion qui permettra au lac d'atteindre le niveau mésotrophe, en conjugaison avec les autres actions actuellement mises en application par la Ville de Québec.

¹ Représente le stade avancé de vieillissement d'un lac, après l'oligotrophie (jeune) et le stade mésotrophe (intermédiaire). L'eutrophisation se caractérise par des changements physicochimiques et biologiques. Peu à peu, les lacs se remplissent et se transforment en milieu humide, pour finir par disparaître. Ce processus s'étend généralement sur plusieurs siècles, voire des millénaires.

1. MISE EN CONTEXTE

1.1 DESCRIPTION DU BASSIN VERSANT

1.1.1 LOCALISATION ET DESCRIPTION GÉNÉRALE

Le lac Saint-Augustin est situé dans l'arrondissement 8 (Laurentien) de la Ville de Québec, sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent (figure 1). Situé à une altitude approximative de 41 m, le bassin de drainage couvre une superficie de 5,69 km² (figure 2), en tenant compte des secteurs maintenant drainés vers l'extérieur du bassin (Pilote et coll., 2002a). La décharge du lac Saint-Augustin se déverse dans le fleuve Saint-Laurent après avoir parcouru moins de 1,5 km.

Une description détaillée du territoire du bassin versant et de l'utilisation du sol a été présentée dans les différentes études réalisées dans le cadre de La Grande corvée en 2002 (Corbeil et coll., 2002; Lapierre et coll., 2002; Pilote et coll., 2002a; Pilote et coll., 2002b). Les sols dans le bassin sont occupés, par ordre décroissant, par des zones urbaines (38 %), des terres agricoles (34 %), des boisés (16 %) et des zones marécageuses (12 %) (figure 2). La population résidente dans le bassin est évaluée à 5 332 personnes, auxquelles s'ajoute une population saisonnière équivalant à 336 personnes (Pilote et coll., 2002a).

1.1.2 DONNÉES MORPHOMÉTRIQUES DISPONIBLES

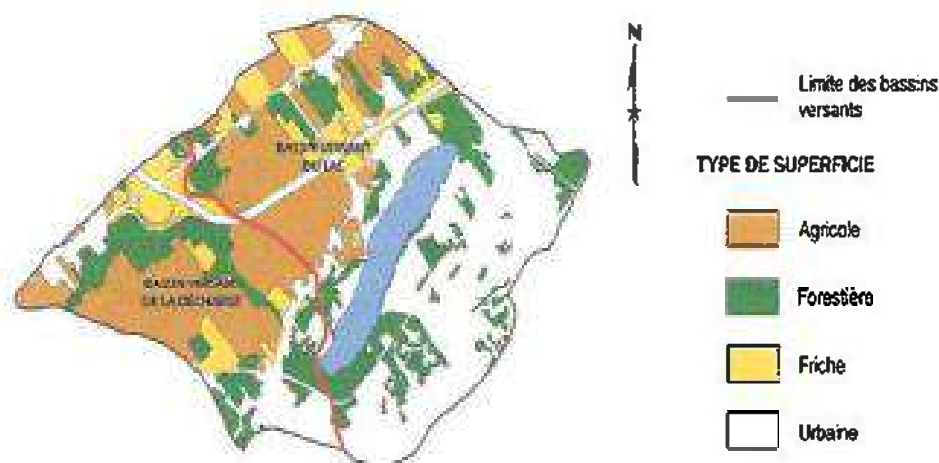
Le lac Saint-Augustin est un plan d'eau de forme allongée, d'une longueur maximale de 2,1 km par 0,29 km de largeur moyenne. Sa forme est assez régulière puisque sa largeur maximale est de 0,30 km, pour un indice de développement des rives de 1,64 (Meunier et Alain, 1979). D'une superficie de 68 ha, le plan d'eau occupe environ 10 % du total du bassin versant.

Bien que le phénomène n'ait pas été démontré, l'étude relative à la diagnose du lac Saint-Augustin rapporte que l'apport en eau se ferait principalement par écoulement souterrain (Bergeron et coll., 2002). Quatre petits tributaires recueillent également les eaux de surface vers le lac ainsi qu'un réseau de drainage urbain et agricole. En 1979, le débit annuel moyen provenant des eaux de surface était évalué à 0,17 m³/s (Meunier et Alain, 1979). La charge annuelle en eau (q_p) est estimée à 6,26 m/an à partir des données météorologiques (Pilote et coll., 2002a).

FIGURE 1
LOCALISATION DU LAC SAINT-AUGUSTIN



FIGURE 2
VERSANT DU LAC SAINT-AUGUSTIN ET
CARTE D'AFFECTATION DES SOLS



Tiré et adapté de Pilote et coll., 2002a

À partir de relevés bathymétriques réalisés en mai 1975, le volume du lac a été estimé à 2 380 000 m³. La profondeur maximale était de 6,1 m, pour une profondeur moyenne de 3,6 m. Les pentes de la berge du lac Saint-Augustin sont donc relativement fortes, atteignant une profondeur de 3,0 sur quelques dizaines de mètres seulement sur presque tout le pourtour du lac, à l'exception de l'extrémité nord-est.

1.2 QUALITÉ DE L'EAU

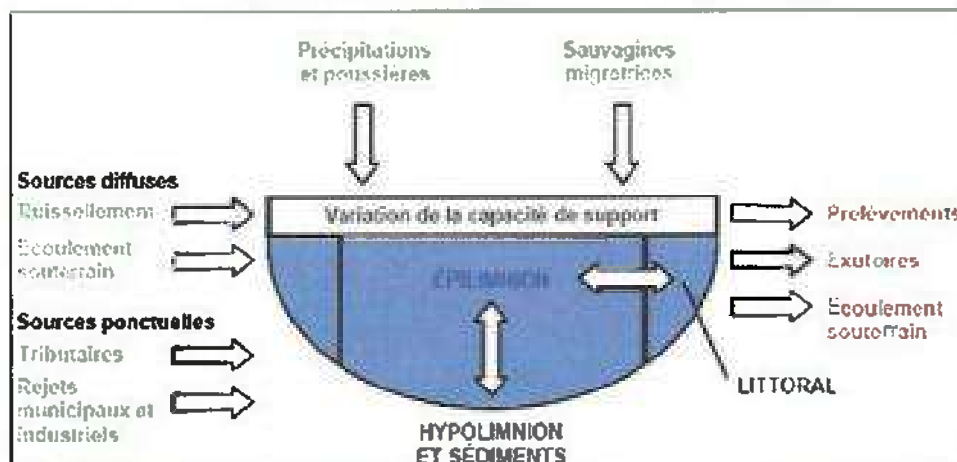
Le lac Saint-Augustin étant peu profond, on note généralement une absence de stratification thermique pendant la saison estivale (Bergeron et coll., 2002). De la même façon, les concentrations en oxygène dissous étaient relativement constantes sur toute la colonne d'eau lors des relevés de 2000 et 2001, et n'indiquaient pas de conditions anoxiques. Par contre, lors de relevés complémentaires effectués le 3 juillet 2003, la saturation en oxygène dissous mesurée dans les eaux profondes était de 5 % ou moins (EXKEP, 2004). De telles conditions anoxiques diminueraient la capacité de rétention du phosphore dans les sédiments (Nürnberg, 1984).

D'autre part, les valeurs de phosphore total mesurées en 2000 et 2001 (variant entre 0,04 et 0,07 mg/l) dans les eaux du lac Saint-Augustin dépassent en tout temps les concentrations recommandées par le ministère de l'Environnement du Québec (0,02 mg/l) pour éviter la prolifération des algues. Les concentrations de phosphore total mesurées dans l'eau de 4 puits situés sur la berge nord du lac sont également élevées, avec des valeurs moyennes de 0,06 mg/l (Galvez-Cloutier, 2005).

1.3 CYCLE DU PHOSPHORE DANS UN PLAN D'EAU

Les modèles généralement utilisés pour évaluer le bilan du phosphore dans un plan d'eau présent sont basés sur une évaluation des intrants et des exportations, en considérant que le plan d'eau agit comme une trappe pour le phosphore. La figure 3 présente un schéma de ce modèle.

FIGURE 3
CYCLE DU PHOSPHORE DANS L'EAU

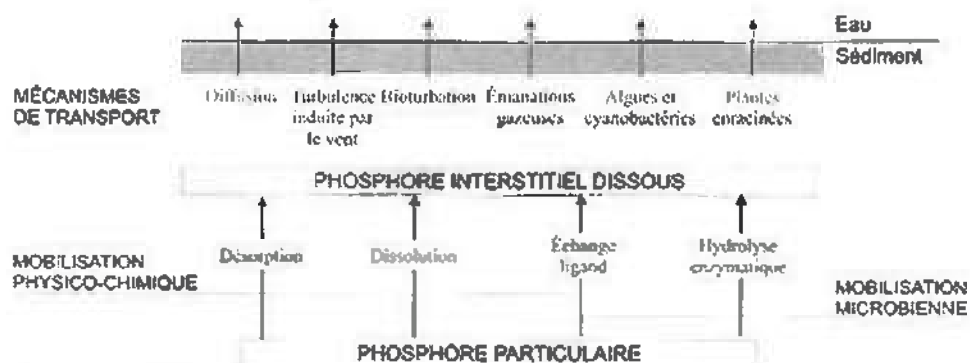


Tiré de Pilote et coll. (2002) (Adapté de Olem et Flock, 1990)

Les apports de nutriments peuvent provenir de sources ponctuelles et diffuses dans le bassin versant, tout comme des précipitations et d'animaux de passage. Une partie du phosphore présent dans l'eau est exporté par l'entremise de tous les prélèvements d'eau. Le reste demeure dans le système : une partie est intégrée dans la matière organique et l'autre (souvent liée à des particules) sédimente dans le fond du lac. Des quantités importantes de phosphore s'accumulent donc dans le plan d'eau.

Les échanges de phosphore entre les sédiments et la colonne d'eau sont souvent une composante majeure dans le cycle du phosphore d'un lac. Bien qu'on observe généralement une sédimentation du phosphore, le taux de relargage vers la colonne d'eau dépend de plusieurs facteurs physiques, chimiques et biologiques. La figure 4 illustre ces processus de « libération » du phosphore à partir des sédiments.

FIGURE 4
PROCESSUS IMPLIQUÉS DANS LA MOBILISATION DU PHOSPHORE
PARTICULAIRE JUSQU'À LA LIBÉRATION VERS LA COLONNE D'EAU



Adapté de Wetzel (2001)

2. COLLECTE DE DONNÉES COMPLÉMENTAIRES

2.1 MISE À JOUR DE LA CARTE BATHYMÉTRIQUE DU LAC

La carte bathymétrique disponible pour le lac Saint-Augustin a été réalisée à partir de relevés datant de 1975. Comme les activités humaines se sont accentuées dans la périphérie du lac et que le taux de sédimentation s'accroît depuis quelques décennies (Roberge et coll., 2002), il apparaissait nécessaire de valider les données bathymétriques afin d'actualiser l'évaluation du volume d'eau du lac. Cette valeur influe sur le taux de renouvellement de l'eau et donc sur la rapidité d'exportation du phosphore.

2.1.1 MÉTHODOLOGIE

Les relevés bathymétriques ont été effectués entre le 16 et le 18 août 2004 à l'aide d'un appareil numérique Lowrance modèle LMS-330C. Cet appareil recueille des mesures de la profondeur de l'eau en conjugaison avec des données de positionnement (GPS). Des transects distants d'environ 20 m ont été parcourus sur toute la longueur du lac de façon à obtenir plusieurs milliers de mesures.

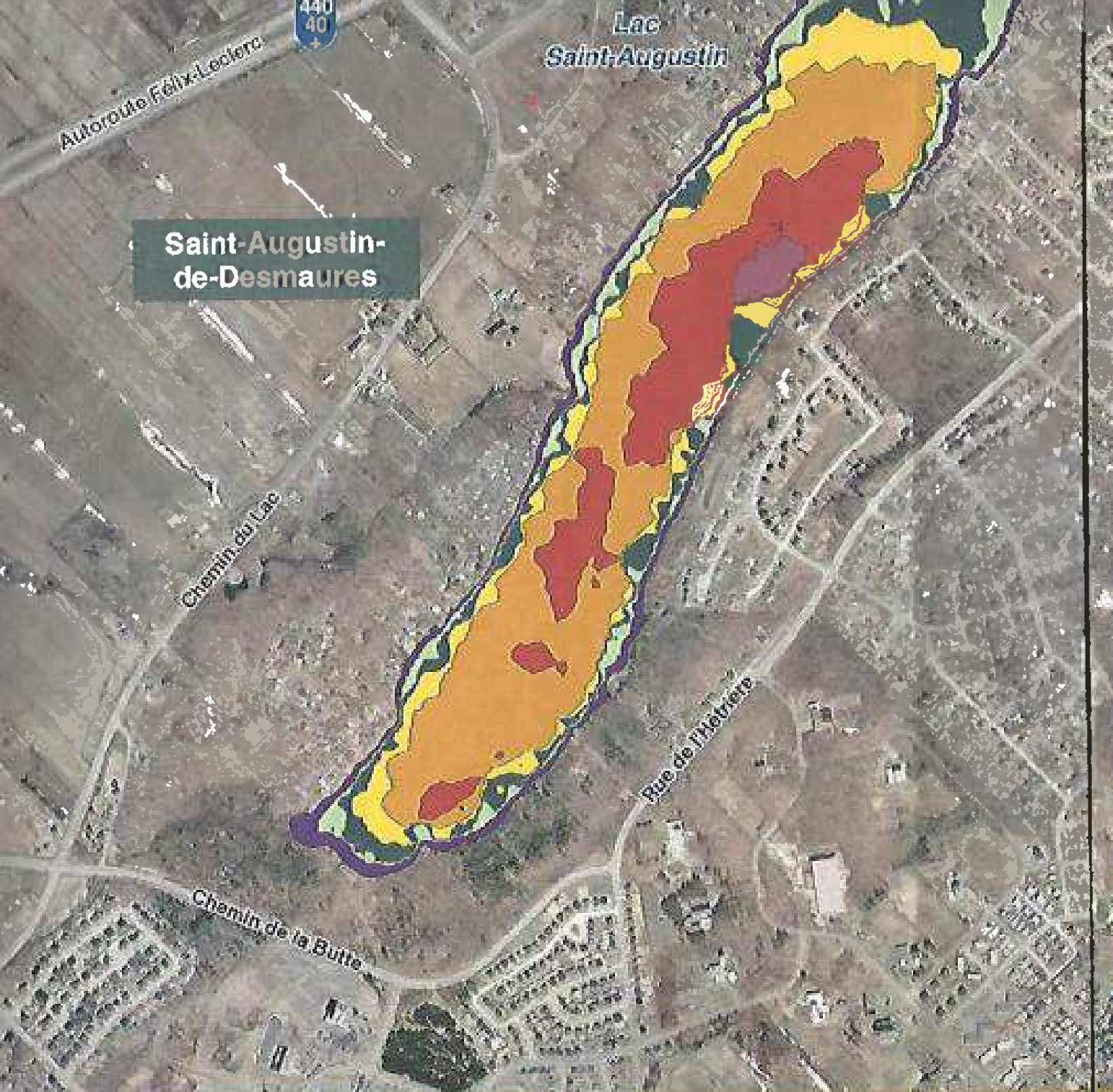
Les données ont ensuite été transférées sur fichier EXCEL et analysées à l'aide du logiciel ArcGis.

2.1.2 RÉSULTATS

La profondeur maximale observée lors des relevés de 2004 est de 6,45 m (figure 5). Si on compare avec les données de 1975, la profondeur maximale aurait donc augmenté de 35 cm. Comme la zone profonde est de très faible superficie, il est possible que, lors des relevés en 1975, la méthodologie utilisée n'ait pas permis d'identifier cette profondeur. Mentionnons également que la superficie du lac a aussi augmenté par rapport à 1975 (0,6836 km² plutôt que 0,67 km²), ce qui indique également que le niveau d'eau du lac était probablement plus élevé en 2004 qu'en 1975.

Un règlement municipal interdisant le déversement de remblais et de déblais à moins de 20 m de la rive du lac Saint-Augustin, ni au niveau de sa décharge est en vigueur depuis 1985 (M. Corriveau, Ville de Québec, arrondissement Laurentien, comm. pers.). Aussi, la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures ne détient aucun renseignement relativement à des actions qui pourraient confirmer une augmentation du niveau du lac depuis la prise de mesures bathymétriques en 1975.

À partir de la carte bathymétrique, le volume du lac Saint-Augustin a été évalué à 2 252 106 m³ (tableau 1), pour une profondeur moyenne de 3,30 m. On remarque donc une diminution du volume de 5,4 % depuis 1975. Certains secteurs du lac deviennent donc de moins en moins profonds, accélérant ainsi le processus d'eutrophisation et la prolifération des plantes aquatiques.



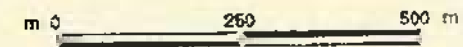
PROFONDEUR DE LA COLONNE D'EAU



Fig

SOURCES

Les orthoimages d'avril 2003 proviennent de la Ville de Québec.



Projection MTM, Fuseau 7, NAD 83

Mai 2005

Consortium
DDM - Pro Pa

Ce phénomène a des conséquences indéniables sur l'amplitude des variations de niveaux d'eau puisque, lors des crues, la diminution de la surface d'écoulement doit être compensée par une inondation sur les berges. Avec cette perte de volume, le temps de renouvellement des eaux est maintenant estimé à 153 jours, plutôt que les 161 jours évalués en 1975 à partir d'un débit annuel moyen de 0,17 m³/s.

TABLEAU 1
ÉVALUATION DU VOLUME D'EAU DU LAC SAINT-AUGUSTIN
(18 AOÛT 2004)

PROFONDEUR (m)	SUPERFICIE (m ²)		VOLUME DE LA STRATE (m ³)	
0,0	683 639	100,0 %	-	-
1,0	606 582	88,7 %	644 726	28,6 %
2,0	516 819	75,6 %	561 102	24,9 %
3,0	443 254	64,8 %	479 566	21,3 %
4,0	331 751	48,5 %	386 159	17,1 %
5,0	38 133	5,6 %	160 787	7,1 %
6,0	5 000	0,7 %	18 981	0,8 %
6,5	10	0,0 %	785	0,0 %
TOTAL	683 639	100,0 %	2 252 106	100,0 %

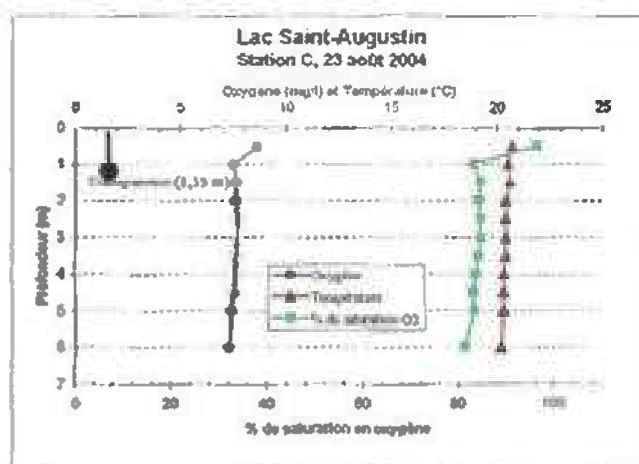
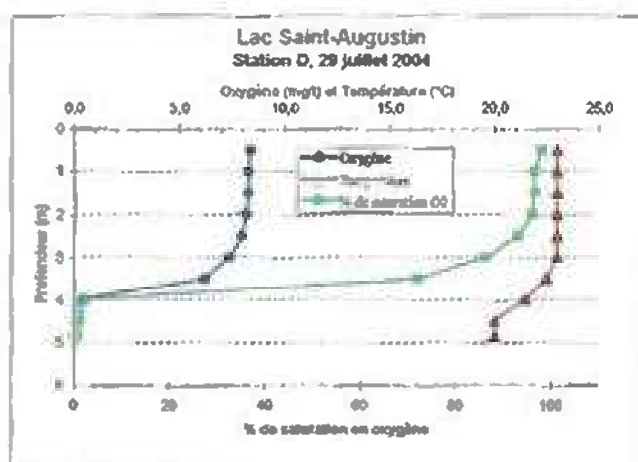
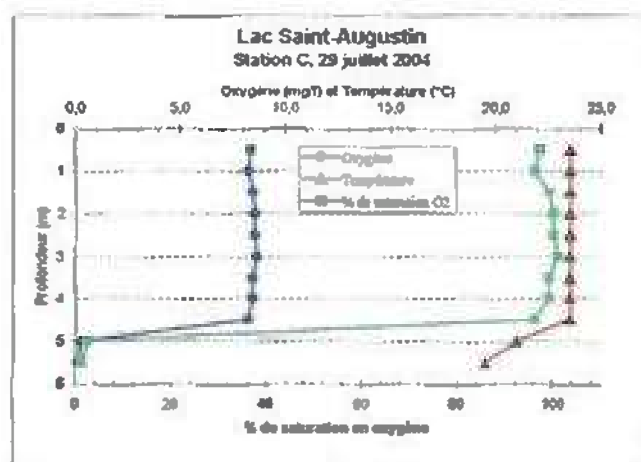
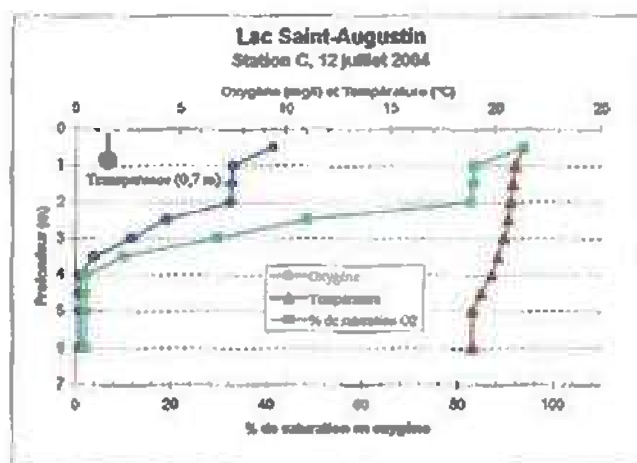
2.2 SUIVI PHYSICOCCHIMIQUE DE L'EAU

Quelques profils de température et oxygène dissous ont été mesurés dans le lac Saint-Augustin au mois de juillet et août 2004 à l'aide d'un oxymètre. Les résultats démontrent que l'eau près du fond est caractérisée périodiquement par des conditions d'anoxie sévère (figure 6). Il semble toutefois qu'un mélange des eaux du lac s'est produit entre le 29 juillet et le 23 août 2004 puisqu'à ce moment, le taux d'oxygène dans l'eau et la température était constant sur toute la colonne d'eau (figure 6). Le lac Saint-Augustin pourrait donc être classé comme un lac polymictique.

D'autre part, le lac Saint-Augustin ne présente pas de véritable thermocline durant la période estivale, bien qu'on observe une baisse de quelques degrés tout près du fond. Les températures demeurent toutefois élevées (environ 20 °C) sur toute la colonne d'eau.

Par ailleurs, aux mêmes stations d'échantillonnage ayant servi à réaliser les profils d'oxygène, des échantillonnages d'eau ont également été réalisés pour déterminer le profil de la concentration de phosphore dans l'eau. Les échantillons ont été récoltés à l'aide d'une bouteille Kemmerer de 2 litres à tous les mètres jusqu'à 0,5 m du fond.

FIGURE 6
PROFILS DE TEMPÉRATURE ET D'OXYGÈNE DISSOUS DANS LES EAUX DU LAC
SAINT-AUGUSTIN, JUILLET ET AOÛT 2004

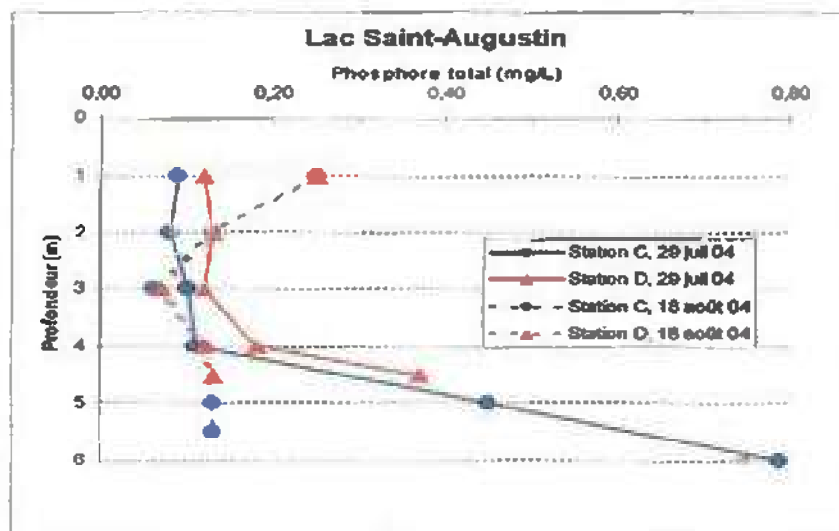


La figure 7 présente les concentrations de phosphore mesurées dans le lac Saint-Augustin. On constate que les concentrations étaient beaucoup plus élevées dans le fond qu'en surface lors de l'échantillonnage du 29 juillet 2004. Ce taux élevé de phosphore total correspond à la zone d'anoxie observée (figure 6). Par contre, le 18 août 2004, les valeurs les plus importantes de phosphore total se retrouvent en surface, pour diminuer jusqu'à une profondeur de 3 m. Elles remontent ensuite légèrement près du fond. Il semble donc que le « mélange » de l'eau du lac énoncé précédemment ait provoqué une remontée du phosphore total du fond vers les eaux de surface. Soulignons qu'au moment des échantillonnages d'août, on observait une période de prolifération d'algues au lac Saint-Augustin.

Un phénomène semblable a été observé au cours de l'été 2002 (Valentine, 2004). En effet, une augmentation importante du phosphore réactif soluble (SRP) a été mesurée lors d'une période d'anoxie sévère ($< 1 \text{ mg/l O}_2$). Un mélange soudain des eaux, à la suite d'un changement des conditions météorologiques, a fait augmenter drastiquement les valeurs de SRP dans les eaux de surface, provoquant ainsi une floraison importante de cyanobactéries.

Ces résultats démontrent donc que, même si elles sont de courte durée, des périodes d'anoxie dans les zones profondes du lac Saint-Augustin permettent une libération substantielle de phosphore qui peut provoquer, si les conditions météorologiques sont propices, une floraison de cyanobactéries dans les jours suivants.

FIGURE 7
PROFIL DE LA CONCENTRATION DE PHOSPHORE DANS LE LAC
SAINT-AUGUSTIN, ÉTÉ 2004



2.3 CARTOGRAPHIE DES SÉDIMENTS ACCUMULÉS DANS LE LAC SAINT-AUGUSTIN

Le phosphore présent dans un plan d'eau, principalement durant la période estivale, est généralement lié à la matière organique ou incorporé aux organismes vivants. La vase contient donc plus de phosphore que les sédiments plus grossiers. De plus, comme les dépôts organiques sont moins compacts, les échanges avec l'eau interstitielle sont plus importants et la remise en suspension est plus facile.

2.3.1 MÉTHODOLOGIE

Pour évaluer le volume de sédiments non consolidés (vase) accumulé dans le lac Saint-Augustin, des relevés de profondeur ont été effectués en septembre 2004. L'épaisseur de la couche de vase a été mesurée à l'aide de tiges pour 138 points répartis sur toute la superficie du lac (figure 8). La tige avait un embout de 2,5 cm et était descendue dans le fond à partir du bateau jusqu'à ce qu'on sente une résistance. On notait alors la position sur la tige pour indiquer le fond du lac. La tige était ensuite poussée dans les sédiments à la main jusqu'à ce qu'elle atteigne une surface dense. Cette deuxième marque indiquait la présence de sédiments consolidés (sable, gravier, roc). La différence entre les deux marques représentait donc l'épaisseur de sédiments non consolidés.

Les coordonnées des points d'échantillonnage et l'épaisseur de sédiments mesurée ont été intégrées à une base de données.

2.3.2 RÉSULTATS

La figure 9 présente la cartographie de l'épaisseur mesurée des sédiments dans le lac. Le volume de sédiments non consolidés accumulé dans le lac Saint-Augustin est important et évalué à 736 379 m³ (tableau 2). Ces sédiments sont typiques des zones d'accumulation, telles que décrites dans Håkanson (2004). Ce type de sédiments est peu dense et contient donc une très forte proportion d'eau (plus de 90 %).

L'épaisseur moyenne des sédiments déposés dans le lac serait de l'ordre de 110 cm.

PROFONDEUR DES SÉDIMENTES DANS LE LAC SAINT-AUGUSTIN SEPTEMBRE 2004

PROFONDEUR DES SÉDIMENTES



SOURCES

Les orthoimages d'avril 2003 proviennent de
Ville de Québec.



STATIONS D'ANALYSE ET DE MESURE AU LAC SAINT-AUGUSTIN (SEPTEMBRE 2004)

STATIONS

-  C Stations de mesure des profils de température et d'oxygène dissous
-  G1 Stations d'analyse des sédiments
-  Stations de mesure d'épaisseur des sédiments

Figure

SOURCES

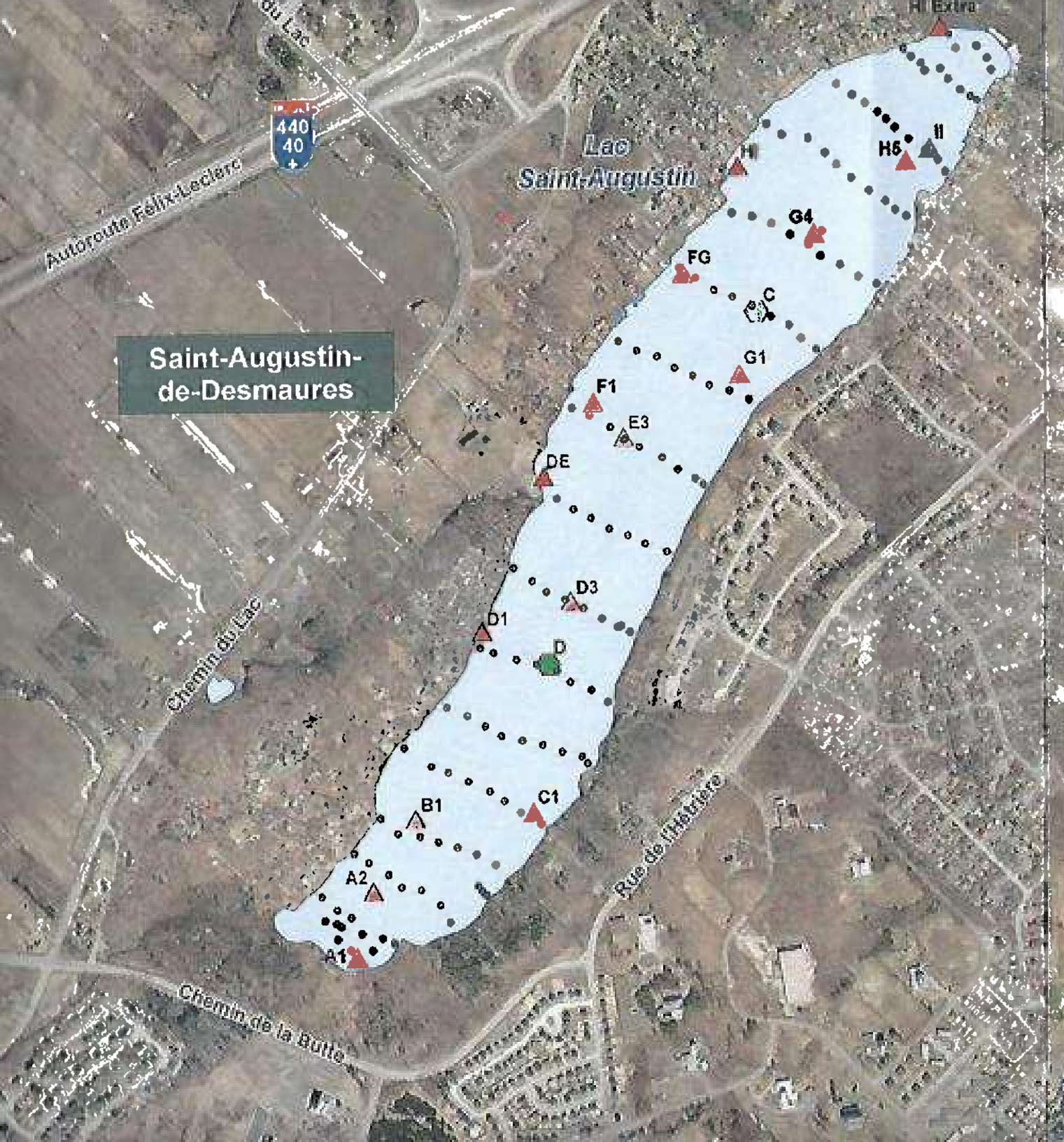
Les orthoimages d'avril 2003 proviennent de la Ville de Québec.

m 0 250 500 m

Projection MTM, Fuseau 7, NAD 83

Mai 2005

Consortium
DDM - Pro Faur



TABEAU 2
ÉVALUATION DU VOLUME DE SÉDIMENTS FINS ACCUMULÉ
DANS LE FOND DU LAC SAINT-AUGUSTIN

PROFONDEUR (m)	SUPERFICIE (m ²)		VOLUME DE LA STRATE (m ³)	
0,0	683 639	100,0 %	-	-
0,5	408 246	60,2 %	268 632	36,5 %
1,0	339 455	50,1 %	186 661	25,3 %
1,5	260 229	38,4 %	149 483	20,3 %
2,0	125 161	18,5 %	94 311	12,8 %
2,5	20 748	3,1 %	32 811	4,5 %
3,0	862	0,1 %	4 306	0,6 %
3,5 et +	191	< 0,1 %	175	< 0,1 %
TOTAL	683 639	100,0 %	736 379	100,0 %

2.4 CARACTÉRISATION PHYSICOCHIMIQUE DES SÉDIMENTS

Le taux de libération de phosphore des sédiments vers l'eau d'un lac varie en fonction de plusieurs paramètres, tant physique, chimique que métabolique. Parmi ceux-ci, soulignons la teneur en phosphore des sédiments, le potentiel de réduction des ions ferreux ou d'aluminium (auxquels est souvent lié le phosphore) et, bien sûr, la disponibilité de ces ions métalliques.

2.4.1 MÉTHODOLOGIE

Pour évaluer ces phénomènes, 20 échantillons de sédiments ont été recueillis sur le terrain le 29 juillet 2004 et analysés en laboratoire afin de déterminer les teneurs en phosphore total, fer et aluminium (figure 8). Afin de faire le lien avec les travaux réalisés en 2001, les stations échantillonnées (18/20) en 2004 ont aussi fait l'objet d'une évaluation de la contamination des sédiments.

Les échantillons de sédiments ont été recueillis à l'aide d'une benne preneuse de type Ponar de 22 cm de côté. Le contenu de la benne a été déversé dans un bac de plastique et mélangé uniformément avant de procéder à un prélèvement pour analyse en laboratoire.



De plus, étant donné l'épaisseur importante de sédiments déposés sur le lit du lac, des analyses supplémentaires ont été effectuées pour déterminer si la concentration du phosphore total et celle des différents métaux (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Ni, Pb et Zn) variaient en fonction de la profondeur du dépôt. Deux carottes de sédiments ont donc été recueillies en plongée à l'aide de cylindre de PVC aux deux points d'échantillonnage d'eau (stations C et D; figure 8). Trois échantillons (surface, centre et fond) de sédiments prélevés sur une profondeur d'environ 2 m ont été récoltés et analysés au laboratoire.

La localisation des stations échantillonnées et les résultats des analyses ont été intégrés à une base de données et ont permis de cartographier la répartition du phosphore et des métaux associés dans les sédiments du lac Saint-Augustin.

2.4.2 RÉSULTATS

Les analyses de laboratoire, effectuées en 2004 sur les 20 échantillons, démontrent que les sédiments du lac Saint-Augustin contiennent de fortes concentrations de phosphore total, de fer et d'aluminium, soit en moyenne 892 mg Pt/kg, 19 119 mg Al/kg et 29 355 mg Fe/kg de sédiment, sec respectivement (tableau 3). Ces fortes teneurs semblent de plus se retrouver sur toute l'épaisseur des sédiments du lac (tableau 4). Les fiches de laboratoire sont présentées à l'annexe 1.

Selon les informations rapportées par Håkanson (2004), des concentrations de fer et de phosphore du même ordre de grandeur ont été mesurées dans les zones d'accumulation des sédiments du lac Mälaren en Suède. Selon les caractéristiques indiquées pour ce type de sédiment (92 % d'eau, densité de 1030 kg par m³ de matière sèche), la quantité totale de phosphore contenue dans les sédiments non consolidés du lac Saint-Augustin s'élèverait à 54,1 tonnes².

2.4.3 AUTRES MÉTAUX ET MÉTALLOÏDES

En octobre 2001, 42 échantillons de sédiments ont été récoltés dans le lac Saint-Augustin afin d'évaluer la teneur en métaux lourds (cadmium, chrome, cuivre, nickel, plomb et zinc) et en arsenic (métalloïde) (Corbeil et coll., 2002). Les valeurs moyennes obtenues sont présentées au tableau 5.

Bien que plusieurs sites présentent des teneurs en métaux supérieures au seuil d'effet mineur sur la faune benthique défini par le Centre Saint-Laurent (1992), aucun ne dépasse le critère de niveau B pour les sols (tableaux 4 et 5). En conséquence, si les sédiments étaient retirés du lac, on pourrait en disposer comme matériel de recouvrement pour les lieux d'enfouissement sanitaire ou comme matériaux de remblayage sur des terrains contaminés à vocation résidentielle (annexe 2).

² 736 379 m³ sédiment x 8 % matières solides x 1 030 kg/m³ x 892 mg Pt/kg

2.5 ÉVALUATION DES FLUX DE PHOSPHORE SÉDIMENTS – COLONNE D'EAU

Le phosphore retrouvé dans les sédiments est souvent lié au fer, à l'aluminium et parfois au carbonate. En condition d'oxygénation suffisante à l'interface eau-sédiment ($> 1 \text{ mg O}_2/\text{L}$ selon Vallentyne (1974)), ces composés demeurent stables. La bio-disponibilité du phosphore pour les algues est alors réduite et peut représenter un facteur limitant leur prolifération. À titre d'exemple, Webber (2003) a confirmé que la disponibilité du phosphore contenu dans les biosolides municipaux est réduite en fonction des concentrations d'aluminium et de fer selon l'équation suivante :

$$\% P \text{ disponible} = 70 - (Al_{\text{total}} + 0,5 Fe_{\text{total}} \text{ (en mg/kg)} - 20\,000) / 2\,000$$

En appliquant cette équation aux résultats d'analyse de laboratoire obtenus (tableau 3), le phosphore disponible dans les quantités de sédiments mesurées serait de 63 %, soit 556 mg/kg de sédiment sec plutôt que les 892 mg/kg observés. Selon les spécialistes consultés, soit madame Rosa Galvez-Cloutier, Ph. D., ingénieure, et monsieur Harm Sloterdijk, Ph. D., il est probable que dans le cas du lac Saint-Augustin, l'aluminium soit lié sous forme cristalline dans les sédiments (annexe 3). Il ne serait donc pas disponible pour former un complexe avec le phosphore. En conséquence, la valeur mesurée de phosphore totale (892 mg/kg) a été utilisée dans les calculs.

Soulignons que les apports internes de phosphore à partir des sédiments en conditions anoxiques (ce qui est le cas, du moins périodiquement, au lac Saint-Augustin) représentent souvent la principale source de phosphore d'un plan d'eau durant la saison estivale, principalement dans les lacs peu profonds (Nürnberg, sous presse). Pour évaluer ces apports, on doit généralement faire un suivi fréquent des concentrations de phosphore dans l'eau et/ou déterminer la superficie des sédiments touchés par des conditions anoxiques et la durée de ce phénomène.

En se basant sur les résultats d'études réalisées sur plusieurs lacs, Nürnberg (sous presse) a développé des formules permettant d'évaluer les apports internes à partir de la moyenne de la concentration de phosphore dans l'eau, de la profondeur moyenne, de la superficie du lac et de la concentration de phosphore contenue dans les sédiments. Les formules sont les suivantes :

$$\text{Charge interne de phosphore} = AF_{\text{pred}} \times RR \quad (1)$$

$$\text{Facteur d'anoxie (AF}_{\text{pred}}) = -35,4 + 44,2 \log (TP) + 0,95 z/A^{0,5} \quad (2)$$

où TP représente la concentration moyenne de phosphore dans la colonne d'eau, z la profondeur moyenne du lac et A la superficie.

$$\text{Taux de relargage : } \log (RR) = 0,8 + 0,76 \log (TP_{\text{sed}}) \quad (3)$$

où TP_{sed} représente la concentration moyenne de phosphore dans les sédiments, en mg/g de matière sèche.

Avec une moyenne de 0,16 mg/l de phosphore dans la colonne d'eau et une moyenne de 892 mg/kg de P/kg de sédiment (matière sèche), les apports en phosphore provenant des sédiments durant la période estivale seraient de 357,8 mg/m², soit 245 kg de P.

On constate donc que, comparativement à la méthode classique d'évaluation des taux de phosphore à partir des apports externes, qui considère une accumulation constante, les sédiments peuvent être une source importante de phosphore dans l'eau. En considérant que le lac Saint-Augustin connaissait des périodes d'anoxie, Pilote et coll. (2002) ont évalué l'accumulation annuelle de phosphore dans les sédiments à 486 mg/m², comparativement à 605 mg/m² si le lac était bien oxygéné. On anticipait donc un relargage de seulement 119 mg/m² plutôt que de 358 mg/m².

TABLEAU 3
CONCENTRATIONS DE PHOSPHORE TOTAL, DE FER ET D'ALUMINIUM
MESURÉES DANS LES SÉDIMENTS DU LAC SAINT-AUGUSTIN EN 2004

STATION	COORDONNÉES		PROFONDEUR D'EAU (m)	Al (mg Al/kg poids sec)	Fe (mg Fe/kg poids sec)	Pt (mg Pt/kg poids sec)
	LATITUDE	LONGITUDE				
C	46,776111	-71,444444	6,0	19 800,0	37 700,0	1 160,0
D	46,863889	-71,498611	4,9	21 600,0	36 000,0	881,0
A1	46,812222	-71,548611	0,8	16 800,0	27 000,0	688,0
A2	53,520000	-71,544444	4,4	22 200,0	33 500,0	871,0
B1	46,836667	-71,533333	4,0	26 500,0	36 700,0	816,0
C1	46,837778	-71,502778	4,2	19 400,0	29 400,0	1 073,0
D1	46,869722	-71,515833	1,5	8 340,0	18 600,0	861,0
D3	46,875000	-71,492778	4,8	18 000,0	34 100,0	921,0
DE	46,896944	-71,499722	1,2	5 080,0	11 700,0	545,0
E1	46,748350	-71,392860	4,7	20 700,0	32 900,0	903,0
E3	46,753889	-71,478889	4,9	20 700,0	35 600,0	1 087,0
F1	46,760000	-71,486667	4,3	28 800,0	34 900,0	927,0
FG	46,782778	-71,463611	3,6	26 800,0	34 500,0	1 142,0
G1	46,765000	-71,448889	5,3	23 200,0	37 600,0	1 043,0
G4	46,789722	-71,429444	5,0	25 500,0	37 700,0	1 150,0
HI	46,801667	-71,449167	2,0	14 700,0	20 000,0	914,0
HI Extra	46,826111	-71,396389	0,1	9 060,0	16 900,0	488,0
H5	46,802500	-71,405278	2,8	25 300,0	31 800,0	912,0
II	46,804722	-71,399167	3,3	19 000,0	24 400,0	699,0
K1	46,757000	-71,386380	1,0	10 900,0	16 100,0	762,0
MOYENNE				19 119,0	29 355,0	892,0
ÉCART-TYPE				6 618,0	8 384,3	189,8

TABLEAU 4
TENEURS EN PHOSPHORE ET EN DIFFÉRENTS MÉTAUX MESURÉES DANS DES CAROTTES
DE SÉDIMENTS DU LAC SAINT-AUGUSTIN EN 2004

PARAMÈTRE (mg/kg POIDS SEC)	CRITÈRES DE SOL* (mg/kg DE MATIÈRE SÈCHE)			STATION C			STATION D			MOYENNE
	A**	B	C	SURFACE	CENTRE	FOND	SURFACE	CENTRE	FOND	
PHOSPHORE TOTAL	-	-	-	1 016,0	1 036,0	1 383,0	659,0	633,0	866,0	932,0
ALUMINIUM	-	-	-	36 000,0	34 200,0	31 200,0	12 800,0	26 500,0	18 100,0	26 467,0
CADMIUM	1,5	5,0	20,0	0,8	0,9	1,0	0,7	1,0	0,6	0,8
CHROME	85,0	250,0	800,0	52,2	45,6	44,8	21,4	36,8	29,3	38,4
CUIVRE	40,0	100,0	500,0	25,5	17,2	21,1	17,7	15,7	12,9	18,4
FER	-	-	-	34 700,0	28 900,0	27 400,0	26 900,0	24 300,0	21 400,0	27 267,0
NICKEL	50,0	100,0	500,0	40,6	44,2	52,0	22,1	39,4	31,6	38,3
PLOMB	50,0	500,0	1 000,0	15,0	6,4	< 2,0	9,6	< 2,0	< 2,0	5,9
ZINC	110,0	500,0	1 500,0	108,0	127,0	133,0	62,9	116,0 ^a	59,4	101,0

* Critères génériques pour les sols utilisés par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Disponible sur le site : www.menv.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique

** Pour les métaux et les métalloïdes, les critères A représentent les teneurs de fond pour la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent

TABLEAU 5
TENEURS MOYENNES DE DIFFÉRENTS MÉTAUX MESURÉES DANS
LES SÉDIMENTS DU LAC SAINT-AUGUSTIN, OCTOBRE 2001

PARAMÈTRE (mg/kg POIDS SEC)	CRITÈRES DE SOL* (mg/kg DE MATIÈRE SÈCHE)			MOYENNE (N = 42)
	A**	B	C	
CADMIUM	1,5	5,0	20,0	2,4
CHROME	85,0	250,0	800,0	30,2
CUIVRE	40,0	100,0	500,0	41,0
NICKEL	50,0	100,0	500,0	43,5
PLOMB	50,0	500,0	1 000,0	81,4
ZINC	110,0	500,0	1 500,0	298,0

* Critères génériques pour les sols utilisés par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Disponible sur le site : www.menv.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique

** Pour les métaux et les métalloïdes, les critères A représentent les teneurs de fond pour la province géologique des Basses-terres du Saint-Laurent

3. PROBLÉMATIQUE DE GESTION DU PHOSPHORE

Le lac Saint-Augustin est un lac eutrophe, ayant des berges fortement perturbées par l'occupation humaine. Les apports externes en phosphore sont importants et on observe régulièrement des périodes de prolifération massive d'algues durant la saison estivale. Lors de ces événements, les usages du plan d'eau sont limités pour éviter les risques au niveau de la santé publique.

Les données recueillies et les analyses effectuées en laboratoire montrent que :

- le lac Saint-Augustin est peu profond (profondeur moyenne de 3,3 m seulement, profondeur maximale de 6,4 m) (figures 5 et 10);
- la pente de la berme est assez prononcée puisque la zone de moins de 3 m de profondeur ne couvre qu'environ 36 % de la superficie du plan d'eau (figures 5 et 10);
- la quantité accumulée de sédiments non consolidés (vase) dans le fond du lac est importante (736 379 m³), pouvant atteindre jusqu'à 4 m d'épaisseur (figures 9 et 10), pour une moyenne de 1,10 m;
- le taux de phosphore total contenu dans les sédiments est important, avec une moyenne de 892 mg P/kg de matière sèche (tableau 3). Les concentrations d'aluminium et de fer sont également importantes, soit plus de 20 fois celle du phosphore;
- des conditions anoxiques prononcées à l'interface eau-sédiments durant la période estivale (figure 6) sont observées, ce qui favorise la dégradation des liens avec les ions ferreux et d'aluminium, et augmente la biodisponibilité du phosphore;
- l'absence de stratification thermique et la forte emprise du vent sur le lac Saint-Augustin font en sorte qu'il se produit, sous certaines conditions, un mélange des eaux du lac, faisant ainsi remonter le phosphore « libéré » des sédiments vers la surface. On observe alors toutes les conditions propices à l'apparition d'un *bloom* d'algues;
- l'apport des sédiments est évalué à 245 kg durant la période estivale, ce qui en fait une source importante de phosphore dans l'eau du lac.

Ayant un petit bassin versant, le taux de renouvellement de l'eau du lac Saint-Augustin (estimé à 153 jours) est insuffisant pour permettre un lessivage vers l'aval du phosphore libéré. D'autre part, la superficie de la zone de moins de 3 m de profondeur est trop faible pour anticiper des interventions basées sur des modifications du niveau d'eau. C'est pourquoi des actions visant explicitement le contrôle du phosphore présent dans le plan d'eau (ex. : dilution, aération artificielle, précipitation des éléments nutritifs, etc.) ont fait l'objet d'une recherche et ont été évaluées dans le but d'identifier des outils potentiels permettant une gestion *in situ* du phosphore provenant du lac Saint-Augustin.

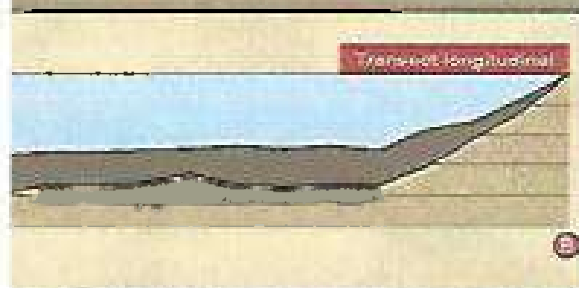
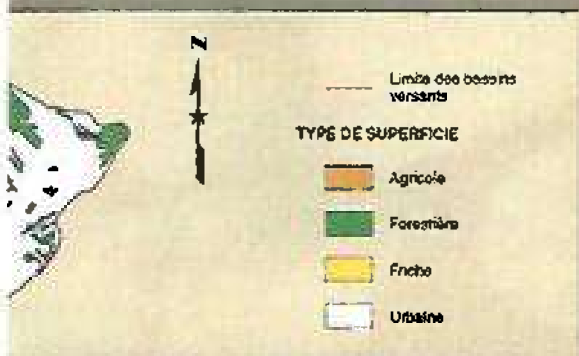
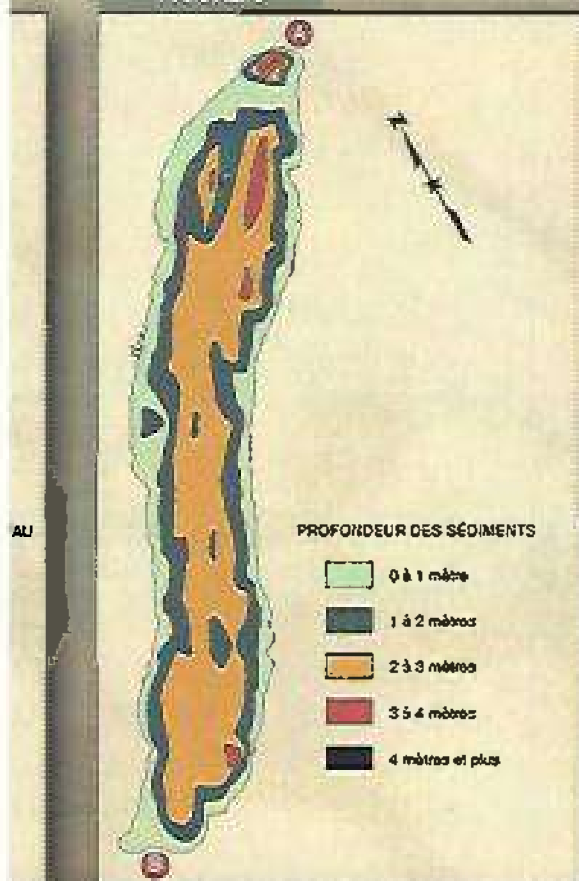


FIGURE 3



PROBLÉMATIQUE

La quantité accumulée de sédiments (vaso) dans le fond du lac est importante (736 379 m³) et peut atteindre jusqu'à 4 m d'épaisseur, pour une moyenne de 1,10 m d'épaisseur (Figure 3). Selon les caractéristiques des sédiments du lac Saint-Augustin, la quantité totale de phosphore contenue dans les sédiments s'élèverait à 54 tonnes et leurs apports en phosphore, durant la période estivale, seraient de 357,8 mg/m², soit 245 kg de P. Par ailleurs, les concentrations d'aluminium et de fer sont également importantes, soit plus de 20 fois celle du phosphore.

Le constat global de l'étude 2004-2005 indique que, compte tenu du fait que son bassin versant est de petite superficie (5,7 km²) (Figure 4) et que le taux de renouvellement de son eau est de l'ordre de 153 jours, la quantité d'eau qui transite dans le lac Saint-Augustin est insuffisante pour permettre un lessivage du phosphore libéré vers l'aval.

Par ailleurs, la superficie de la zone de moins de 3 m de profondeur (Figure 2) étant trop faible pour anticiper des interventions basées sur des modifications du niveau d'eau, des actions visant explicitement le contrôle du phosphore présent dans le plan d'eau ont fait l'objet d'une recherche.

SOLUTIONS

Les outils représentant un potentiel de gestion *in situ* du phosphore dans le lac Saint-Augustin ont été évalués dans le but d'identifier ceux qui représenteraient les meilleures solutions tout en ayant des coûts acceptables et permettant d'assurer le développement durable et contemporain de ses ressources et de ses potentiels.

Une revue de littérature a permis d'identifier une dizaine d'outils potentiels de gestion *in situ* du phosphore dans un plan d'eau.

- | | |
|--|---|
| 1- Inactivation du phosphore par floculation | 6- Dragage |
| 2- Circulation artificielle de l'eau du lac | 7- Recouvrement de la surface des sédiments (capping) |
| 3- Aération de l'hypolimnion | 8- Oxydation des sédiments |
| 4- Dilution de l'eau du lac | 9- Pompage des sédiments |
| 5- Abaissement du niveau d'eau | 10- Pompage de l'eau de l'hypolimnion |

Ceux-ci ont été analysés avec une méthode d'aide multicritère à la décision. Ainsi, les outils de gestion ont été comparés entre eux en considérant leurs avantages, leurs inconvénients, leur coût et leur efficacité afin de déterminer la position respective de chacun selon leur performance relativement aux critères analysés. Par ailleurs, le cadre légal qui pourrait régir l'application des outils a également fait l'objet d'une consultation auprès des instances environnementales gouvernementales québécoise et canadienne.

Les résultats de l'analyse montrent que certains outils nécessitent des investissements d'importance et que d'autres peuvent ne pas être applicables compte tenu des conditions physicochimiques observées. Selon cette analyse, l'inactivation du phosphore par floculation est l'outil qui répond le mieux aux critères, suivi du pompage des sédiments. La combinaison des deux outils serait probablement une avenue à explorer. Le premier fixe le phosphore et le deuxième pompe les sédiments dans un champ à proximité, ce qui permettrait d'améliorer substantiellement la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin et son utilisation.

INTRODUCTION

La problématique de la dégradation de la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin est connue depuis plusieurs décennies et déjà en 1968, le lac était classé comme eutrophe. Un lac eutrophe se décrit comme étant un lac ou une rivière ayant une forte productivité et une haute biomasse. L'étendue d'eau est riche en nutriments, souvent peu profonde et saisonnièrement déficiente en oxygène où l'autoépuration activée par le brassage continu des eaux (rivière, torrents, etc.) ne peut s'exercer. Cette fertilisation peut être naturelle ou causée par l'activité humaine et peut entraîner des répercussions néfastes pour le milieu.

Dans le but d'améliorer la qualité de l'eau et de limiter les périodes de prolifération massive de cyanobactéries (algues bleu-vert), différents scénarios de réduction des apports en phosphore dans le lac Saint-Augustin ont été proposés au début des années 2001-2002. Depuis, la Ville de Québec et le Conseil de bassin du lac Saint-Augustin ont entrepris des actions et en planifient d'autres pour diminuer les apports en phosphore à partir des eaux sanitaires et des sols urbanisés.

Parmi ces actions, la présente étude, réalisée en 2004-2005, avait pour objectifs d'évaluer l'importance des flux en phosphore en provenance des sédiments du lac et d'identifier des outils de gestion *in situ* du phosphore provenant des sédiments du plan d'eau, tout en assurant le développement durable et contemporain de ses ressources et de ses potentiels.

CARACTÉRISTIQUES DU LAC SAINT-AUGUSTIN

L'étude de 2004-2005 montre que la profondeur maximale du lac Saint-Augustin est de 6,45 m et sa superficie de l'ordre de 0,68 km² ou 68 ha. Son volume a été évalué à 2 252 106 m³, pour une profondeur moyenne de 3,30 m (Figures 1 et 2).

Les résultats des mesures de certains paramètres physicochimiques, réalisées en juillet 2004, montrent que l'eau près du fond est caractérisée périodiquement par des conditions d'anoxie sévère, ce qui permet de classer le lac Saint-Augustin comme un lac polymictique qui connaît une stratification thermique instable et facilement détruite par le vent.

D'autre part, ce dernier ne présente pas de véritable thermocline durant la période estivale. La température demeurant toutefois élevée (environ 20 °C) sur toute la colonne d'eau. L'absence de stratification thermique et la forte emprise du vent sur le lac Saint-Augustin fait en sorte qu'il se produit, sous certaines conditions, un mélange des eaux du lac, faisant ainsi remonter le phosphore « libéré » des sédiments vers la surface. Nous observons alors toutes les conditions propices à l'apparition d'un « bloom » d'algues.



Consortium
DDM - Pro Faune

FIGURE 1

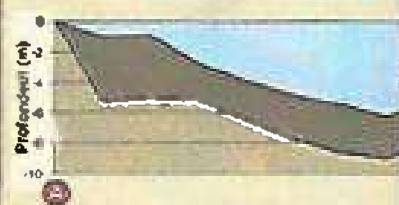


FIGURE 2



FIGURE 3





3.1 MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES OUTILS

Dans le cadre du présent mandat, une revue de littérature a été réalisée afin de rechercher des outils de contrôle des apports internes de phosphore dans un plan d'eau. Différentes publications d'organismes gouvernementaux ou privés ont été consultées. L'agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA) a été une source notable d'informations. Certains rapports faisaient également une revue de littérature, plus ou moins exhaustive, concernant les traitements possibles.

Les ouvrages consultés ont permis d'obtenir de l'information sur les outils de gestion *in situ* du phosphore, sur leurs avantages, inconvénients, coût et efficacité. Dans la plupart des cas, ces rapports présentaient également des analyses de cas, partout dans le monde.

Une des contraintes à l'application de certains outils de contrôle du phosphore est le cadre légal qui prévaut au Canada et au Québec. Par conséquent, les ministères concernés par ce type de problématique ont été consultés.

Finalement, plusieurs experts du milieu universitaire ou professionnel ont été contactés afin d'obtenir leurs avis scientifiques sur la pertinence et l'efficacité des outils de contrôle des apports internes de phosphore dans un plan d'eau. Les organismes ciblés pour cette consultation ont été identifiés à la suite de recherches sur différents médias (Internet, articles scientifiques, comptes rendus de conférences). Le Département de génie civil de l'Université Laval, ayant des équipes qui travaillent sur cette problématique au Québec, notamment au lac Saint-Augustin, a été consulté. Le GRIL (Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique), qui s'est illustré dans différents projets de restauration de milieux eutrophes, ainsi que monsieur Sloterdijk, conseiller à la Biosphère, ont également été contactés (annexe 3).

Le processus d'analyse comparative et de classification des outils de gestion *in situ* du phosphore a donc débuté après l'identification des méthodologies potentielles disponibles à la suite d'une revue de littérature. Cette analyse a comporté les étapes suivantes :

- Identification des outils
- Identification des critères d'évaluation des outils
- Classement des critères d'évaluation selon des niveaux d'importance
- Pondération des critères
- Évaluation des outils
- Classement des outils les uns par rapport aux autres
- Identification d'un outil optimal

La figure 11 présente la démarche analytique.

La revue de littérature et la consultation d'experts ont permis d'identifier, dans un premier temps, une dizaine d'outils potentiels (tableau 6). À l'annexe 4, une description de chacun des outils de gestion *in situ* du phosphore est présentée.

TABLEAU 6
OUTILS DE GESTION *IN SITU* IDENTIFIÉS

N° 01 Inactivation du phosphore par floculation	N° 06 Dragage
N° 02 Circulation artificielle de l'eau du lac	N° 07 Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>)
N° 03 Aération de l'hypolimnion	N° 08 Oxydation des sédiments
N° 04 Dilution de l'eau du lac	N° 09 Pompage des sédiments
N° 05 Abaissement du niveau d'eau	N° 10 Pompage de l'eau de l'hypolimnion

Une comparaison des outils a ensuite été réalisée en fonction de critères techniques, économiques, sociaux, environnementaux et législatifs.

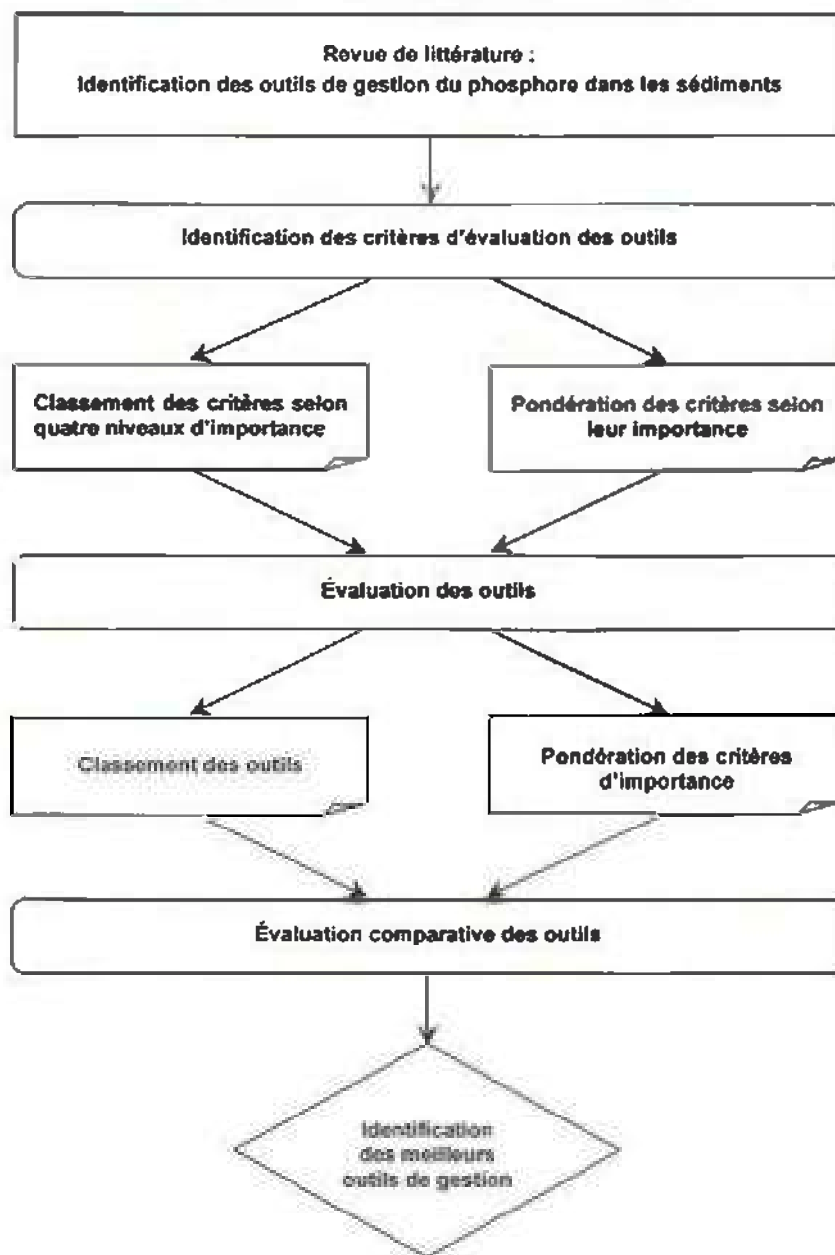
Selon l'importance des critères utilisés, les outils ont été classés en quatre groupes distincts suivant l'importance attribuée aux critères d'analyse (tableau 7). Dans le cadre de cette étude, une importance élevée a été attribuée aux critères techniques et économiques.

L'objectif de cet exercice a été de parvenir à un classement global des outils de gestion.

TABLEAU 7
CRITÈRES UTILISÉS POUR L'ANALYSE DES
OUTILS DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE

Importance 1 ^{re}	Efficacité
	Applicabilité au lac Saint-Augustin
	Importance des coûts des travaux
Importance 2 ^e	Complexité technique
	Importance des impacts sur le milieu humain (riverains)
Importance 3 ^e	Durabilité de l'intervention
	Importance des impacts sur le milieu naturel
Importance 4 ^e	Importance des infrastructures à mettre en place
	Durée des travaux de mise en place des infrastructures
	Importance des efforts liés aux aspects légaux (demande de permis)

FIGURE 11
DÉMARCHE ANALYTIQUE UTILISÉE



3.2 ANALYSE COMPARATIVE DES OUTILS

Les différents outils de gestion *in situ* du phosphore ont été analysés à l'aide de la méthode de la somme pondérée, un outil d'aide multicritère à la décision avec agrégation totale (Raymond, M. et G. Leduc, 1994; André, P. et al., 1999).

À l'aide des informations relatives aux différents outils de gestion identifiés, une classification de ceux-ci a été réalisée. Les outils de gestion ont été comparés entre eux afin de déterminer la position respective de chacun selon leur performance relativement aux critères analysés. Pour la comparaison, les dix outils de gestion ont été classés selon leur aptitude à répondre aux critères analysés, à l'aide de cinq cotes alphabétiques. La valeur A indique la meilleure position et la valeur E, la moins bonne. Deux outils peuvent obtenir la même position pour un critère donné (étape 1).

Par la suite, les cotes alphabétiques ont été transformées en cote numérique (étape 2).

Puis, une pondération variant de 1 à 5 a été appliquée aux différents critères. Une valeur de 5 signifiant un poids élevé du critère et une valeur de 1, un poids faible (étape 3).

Afin de déterminer le poids relatif de chacun des outils, les cotes numériques attribuées à chaque critère pour un outil donné ont été multipliées par la pondération du critère (étape 4).

Le détail de l'analyse de chacun des outils en fonction des critères retenus est présenté aux pages suivantes (tableau 8).

Les différentes étapes de l'analyse sont présentées aux tableaux 9, 10 et 11.

Le tableau 12 présente les résultats finaux de l'analyse des différents outils et le rang de chacun.

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE

OUTILS DE GESTION	CRITÈRES			
	EFFICACITÉ		APPLICABILITÉ AU LAC SAINT-AUGUSTIN	
0 1 Inactivation du phosphore par floculation	Efficace à court et long terme.	A	Bonne Des tests réalisés en laboratoire montrent des résultats concluants.	A
0 2 Circulation artificielle de l'eau du lac	Efficace, mais résultats variés.	C	Faible Méthode temporaire, efficace tant qu'on ne l'arrête pas. Une augmentation de la teneur en oxygène dans l'eau du lac n'aurait pas d'effet significatif sur le relargage du phosphore. Réserve émise par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.	C
0 3 Aération de l'hypolimnion	Efficace, mais résultats variés.	C	Très restreinte Méthode temporaire, efficace tant qu'on ne l'arrête pas; applicable aux lacs stratifiés, ce qui n'est pas le cas du lac Saint-Augustin.	E
0 4 Dilution de l'eau du lac	Efficace, mais résultats variés.	C	Faible Méthode temporaire, efficace tant qu'on ne l'arrête pas; nécessite une source d'eau importante. Le fleuve, à proximité du lac Saint-Augustin, représente une source d'eau importante. Les apports potentiels de la rivière du Cap Rouge (apports insuffisants), du système d'aqueduc municipal (conflit d'usage) et des eaux souterraines (données insuffisantes) ont été exclus de l'analyse.	C
0 5 Abaissement du niveau d'eau	Peu efficace seul.	E	Restreinte Méthode temporaire, efficace tant qu'on ne l'arrête pas. Le lac Saint-Augustin possède des pentes abruptes et une superficie importante.	D
0 6 Dragage des sédiments (excavation)	Efficace à court et long terme.	A	Très restreinte Présence de sédiments à haute teneur en eau.	E
0 7 Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>)	Efficace à moyen et long terme pour empêcher le relargage, mais outil encore en phase développement.	B	Faible Le lac Saint-Augustin possède une superficie importante et des pentes abruptes pouvant rendre difficile l'application de cette méthode.	C
0 8 Oxydation des sédiments	Efficacité relative, mais non démontrée à long terme; résultats variés.	D	Restreinte Demande beaucoup d'études géochimiques pour comprendre et maîtriser les processus du cycle du phosphore dans le lac Saint-Augustin.	D
0 9 Pompage des sédiments	Efficace à court et long terme.	A	Moyenne Présence de sédiments non consolidés dans le lac Saint-Augustin; nécessite une aire de sédimentation; utilisation possible d'un champ agricole vacant à proximité.	B
0 10 Pompage de l'eau de l'hypolimnion	Efficace à moyen et long terme.	B	Très restreinte Applicable aux lacs stratifiés, ce qui n'est pas le cas du lac Saint-Augustin. Méthode s'apparentant à un pompage des sédiments.	E

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION IN SITU DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION	CRITÈRES			
	IMPORTANCE DES COÛTS DES TRAVAUX (EN \$ CA)		COMPLEXITÉ TECHNIQUE	
O 1 Inactivation du phosphore par floculation	Source : BBL (2001) Utilisation de nouvelles technologies, environ 0,09 \$/m ³ Lac Saint-Augustin 683 639 m ³ Projet lac Saint-Augustin : ~65 000 \$	A	Peu complexe L'épandage de l'alun ou d'autres produits est relativement simple.	A
O 2 Circulation artificielle de l'eau du lac	Source : Éco-Guide International Coûts de l'achat et de l'installation d'éoliennes flottantes ou solaires variant de 2 300 \$ à 16 000 \$ selon le modèle; coût annuel d'entretien d'environ 500 \$ par éolienne/5 ans 1 éolienne aux 4 ha pour un lac eutrophe Projet du lac Saint-Augustin : Achat et installation : 17 x 9 000 \$ = ~153 000 \$ Entretien : aux 5 ans : ~500 \$; aux 10 ans : 20 000 \$ Total du projet : ~175 000 \$	A	Présente une certaine complexité Positionnement adéquat des pompes ou des aérateurs. Le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs a émis des réserves relativement à la restauration de la qualité de l'eau à l'aide de cette méthode.	B
O 3 Aération de l'eau (hypolimnion)	Source : Cooke et al., (1993) Coûts d'installation du système d'aération de l'eau variant de 2 300 \$ à 9 150 \$/ha et coût annuel d'entretien variant de 166 \$ à 660 \$/ha Projet du lac Saint-Augustin (68 ha) : Achat et installation : ~156 400 \$ à 622 200 \$ Entretien : annuel : ~11 290 \$ à 44 880 \$; aux 10 ans : ~112 900 \$ à 448 800 \$ Total du projet : ~1 100 000 \$	B	Complexe Positionnement adéquat des diffuseurs et de la fixation en profondeur.	C
O 4 Dilution de l'eau du lac	Source : Wagner (2001) Mise en place du système de dérivation et de dilution représentant un coût de 0,15 \$ à 0,75 \$/m ³ Coût d'application de cette méthode se situant entre 1,51 \$ et 7,60 \$/m ³ , si l'eau pauvre en phosphore doit être pompée et canalisée pour être acheminée et traitée. Source : Génium Travaux de construction d'un poste de pompage, de l'alimentation électrique, de l'aqueduc, de la voirie évalués à ~1 915 500 \$ CA. Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m ³) : Selon les données de Wagner, les coûts pourraient varier entre 1 030 295 \$ et 5 195 655 \$ Selon les données de Génium, les coûts seraient de l'ordre de 1 915 500 \$	D	Complexe Besoin important en apport d'eau. L'eau provenant du fleuve Saint-Laurent présente une qualité qui pourrait susciter des craintes pour les usagers du lac Saint-Augustin (voir annexe 5). Mise en place d'une canalisation d'environ 3 km.	C

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION	CRITÈRES		
	IMPORTANCE DES COÛTS DES TRAVAUX (EN \$ CA)	COMPLEXITÉ TECHNIQUE	
O 5 Abaissement du niveau d'eau	Source Génium Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m ²) : Travaux de construction d'un poste de pompage, de l'aqueduc et de la voirie évalués à 1 317 500 \$	C Très complexe Topographie abrupte du lac; construction d'un ouvrage de contrôle; dragage du ruisseau en aval.	E
O 6 Dragage des sédiments (excavation)	Source : Mattson et al., (2003) Travaux d'excavation à sec de l'ordre de 7 \$ à 10 \$/m ³ de sédiments Travaux d'excavation humide environ 16 \$/m ³ Projet du lac Saint-Augustin (700 000 m ³) : Total du projet : excavation à sec ~ 7 000 000 \$ excavation humide ~11 200 000 \$	D Très complexe Présence de sédiments non consolidés Excavation à sec : abaissement du niveau du lac en période hivernale (pompage); utilisation de machinerie lourde; construction d'accès; réaménagement important des rives après les travaux (accès). Excavation humide : utilisation de machinerie lourde; construction d'accès et de bassins de sédimentation; réaménagement important des rives après les travaux (accès et bassins).	E
O 7 Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>)	Source : BBL (2001) Environ 122,5 \$/m ³ de matériaux sans traitement des sédiments contaminés Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m ² , recouvrement de 10 cm de matériaux) : Total du projet : ~8 374 575 \$ Source Industries Norurock (Amphibex) : Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m ² , recouvrement de 10 cm de matériaux) : Total du projet : ~6 000 000 \$ Source : Palermo et al., (2002) Recouvrement de 7 acres de sédiments non consolidés (600 000 \$) Projet du lac Saint-Augustin (68 ha (168 acres), recouvrement de 10 cm de matériaux) : Total du projet : ~14 400 000 \$	D Complexe Topographie abrupte du lac et sa superficie; construction d'accès; méthode encore en voie de développement.	C
O 8 Oxydation des sédiments	Source : BBL (2001) Environ 1,10 \$/m ³ pour un traitement au nitrate de calcium Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m ²) : Total du projet : ~752 000 \$	Relativement complexe Travaux de calibrage. L'injection des oxydants doit se faire directement au niveau des sédiments.	D

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES	
	IMPORTANCE DES COÛTS DES TRAVAUX (EN \$ CA)	COMPLEXITÉ TECHNIQUE
O 9 Pompage des sédiments	Source : Industries Normrock (Amphibex) Environ 4 \$/m³ de sédiments non consolidés Projet du lac Saint-Augustin (736 380 m³) : Total du projet : sédiments pompés dans un champ à proximité (~3 000 000 \$) Source : Industries Clamex : Projet du lac Saint-Augustin (736 380 m³) : Total du projet : sédiments pompés dans un champ à proximité (~1 365 000 \$) Total du projet : sédiments pompés et volume réduit de l'ordre de 80 % à 90 % avec une centrifugeuse mobile (~ 8 840 000 \$)	C Présente une certaine complexité Besoin d'un bassin de sédimentation selon la méthode. B
O 10 Pompage de l'eau de l'hypolimnion ou de la zone profonde	Source : Wagner (2001) Coûts associés à la construction des installations variant de 0,15 \$ à 0,30 \$/m²; pompage de l'hypolimnion représentant un coût d'environ 0,03 \$/m² Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m²) : Construction des infrastructures de pompage ~102 540 \$ Pompage de la zone profonde inférieure à 4 m (375 000 m²) ~20 500 \$/an; période de 10 ans : 205 100 \$ Total du projet : ~410 000 \$ Source : Génium Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m²) : Travaux de construction d'un poste de pompage, de l'aqueduc et de la voirie évalués à 1 317 500 \$	D Présente une certaine complexité Positionnement des pompes de forte puissance; pompage ne devant pas excéder les apports; construction d'un déversoir à l'effluent. B

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	IMPORTANCE DES IMPACTS SUR LE MILIEU HUMAIN (RIVERAINS)		DURABILITÉ DE L'INTERVENTION (RÉCURRENCE)	
0 1 Inactivation du phosphore par floculation	Faible Les embarcations utilisées pourraient générer une nuisance sonore qualifiée de mineure.	A	~1 fois tous les 10 ans	C
0 2 Circulation artificielle de l'eau du lac	Moyenne Les pompes pourraient générer une nuisance sonore non négligeable, sans compter les risques de blessures pour les personnes qui s'en approcheraient. En hiver, l'utilisation de cette méthode retarderait la formation de glace et celle-ci serait plus mince, ce qui limiterait certaines activités récréatives (ex. : moto-neige).	B	En continu	E
0 3 Aération de l'hypolimnion	Moyenne Les aérateurs éoliens pourraient générer une nuisance sonore et visuelle non négligeable, sans compter les risques de blessures pour les personnes qui s'en approcheraient.	B	En continu	E
0 4 Dilution de l'eau du lac	Faible Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux, mais aucune répercussion n'est prévue lors des opérations de dilution.	A	3 à 6 mois par année	E
0 5 Abaissement du niveau d'eau	Très élevée Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux. Une modification importante des activités liées à l'utilisation du lac est prévue lors des périodes d'abaissement du niveau du lac.	E	1 fois par an pendant 3 ans et 1 fois tous les 5 ans par la suite	D
0 6 Dragage des sédiments (excavation)	Très élevée Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux de même qu'une augmentation des risques liés aux accidents routiers compte tenu du nombre élevé de camions (~74 000 voyages) pour le transport des sédiments. Perturbation importante des activités liées aux usages du lac	E	~1 fois tous les 100 ans	A
0 7 Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>)	Élevée Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux de même qu'une augmentation des risques liés aux accidents routiers compte tenu du nombre élevé de camions (~7 000 voyages) pour le transport des matériaux de recouvrement. Perturbation importante des activités liées aux usages du lac	D	~1 fois tous les 100 ans	A
0 8 Oxydation des sédiments	Faible Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux. Les embarcations utilisées pour l'injection du peroxyde d'hydrogène, nitrate de calcium ou autre pourraient générer une nuisance sonore qualifiée de mineure.	A	~1 fois tous les 10 ans	C

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	IMPORTANCE DES IMPACTS SUR LE MILIEU HUMAIN (RIVERAINS)		DURABILITÉ DE L'INTERVENTION (RÉCURRENCE)	
O 9 Pompage des sédiments	Moyenne Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux. Perturbation possible des activités récréatives.	B	~1 fois tous les 100 ans	A
O 10 Pompage de l'eau de l'hypolimnion	Moyenne Une modification du climat sonore est anticipée lors des travaux.	B	1 fois par an	D

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	IMPORTANCE DES IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL		IMPORTANCE DES INFRASTRUCTURES À METTRE EN PLACE	
O 1 Inactivation du phosphore par floculation	Faible Les composés chimiques utilisés peuvent avoir des effets sur la faune et la flore du lac, surtout si le pH n'est pas contrôlé adéquatement.	A	Ne nécessite pas la construction d'infrastructures	A
O 2 Circulation artificielle de l'eau du lac	Faible L'oxygénation de l'eau entraîne généralement des modifications dans la composition des communautés animales. Puisque la température du lac devient homogène (plus de stratification), les poissons d'eau froide risquent de disparaître, mais dans le lac Saint-Augustin il n'y a pas de stratification. L'aération du lac risque d'entraîner une augmentation de la turbidité.	A	Nécessite l'installation d'éoliennes requérant la construction d'infrastructures. Ces installations sont nombreuses et disposées à différents endroits sur le lac.	B
O 3 Aération de l'hypolimnion	Faible L'aération de l'hypolimnion a très peu d'effets négatifs sur l'environnement. L'oxygénation de l'eau entraîne généralement des modifications dans la composition des communautés animales.	A	Nécessite l'installation de compresseurs requérant la construction d'infrastructures en profondeur. Ces installations ne sont pas importantes.	B
O 4 Dilution de l'eau du lac	Faible Les effets de la dilution de l'eau sur l'environnement d'un écosystème aquatique sont généralement bénéfiques au niveau du lac lui-même, en raison de l'amélioration des conditions (diminution de la concentration de phosphore et de la turbidité). La dilution de l'eau du lac représente une méthode peu stressante pour la faune et la flore. La dilution peut entraîner des changements dans la composition des communautés à la suite de l'amélioration des conditions de vie. Une modification des conditions hydrauliques de l'effluent est anticipée compte tenu d'un apport important et constant d'eau. L'utilisation de l'eau du fleuve Saint-Laurent ne causerait pas de préjudices à l'écosystème lacustre (voir annexe 5).	A	Nécessite la construction d'infrastructures permettant le pompage de l'eau du fleuve et l'aménagement de conduites d'amenée d'eau (~3 km).	C
O 5 Abaissement du niveau d'eau	Très élevée Cette méthode entraîne des changements dans la composition des communautés végétales, quelquefois aux dépens d'espèces rares ou d'intérêt. Certaines espèces végétales indésirables peuvent prendre de l'expansion dans de telles conditions. Il peut y avoir destruction d'habitats du poisson. L'assèchement et le gel des berges peuvent entraîner la mort de certains animaux en hibernation.	E	Nécessite la construction d'infrastructures permettant de contrôler le niveau du lac. Nécessite la construction d'infrastructures d'accès.	E

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	IMPORTANCE DES IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL		IMPORTANCE DES INFRASTRUCTURES À METTRE EN PLACE	
O 6 Dragage des sédiments (excavation)	Très élevée Les effets à court terme d'une excavation sèche sont majeurs, mais peuvent être atténués en asséchant le lac par sections (sauf que cela augmente considérablement les coûts). Les tributaires doivent être détournés ou canalisés durant les travaux d'excavation. L'excavation humide entraîne une forte augmentation de la turbidité de l'eau; des précautions doivent être prises afin de limiter le déversement de sédiments et de nutriments en aval du lac. Les organismes benthiques de même que les larves qui s'y développent sont généralement détruits par le dragage des sédiments. Il peut être nécessaire de replanter certaines espèces et d'ensemencer le lac après ce traitement. L'entreposage des sédiments excavés dans des champs d'épandage (afin qu'ils sèchent) peut mener à une contamination des sols s'ils contiennent, par exemple, des métaux lourds.	E	Nécessite l'utilisation, dans le cas de l'excavation sèche (<i>dry excavation</i>), de bulldozers, de grues, de pelles mécaniques. Nécessite l'utilisation, dans le cas de l'excavation humide (<i>wet excavation</i>), d'engins amphibies ou de grues. Nécessite la construction d'infrastructures pour la gestion des sédiments. Nécessite la construction d'infrastructures d'accès.	E
O 7 Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>)	Élevée Le recouvrement de la surface des sédiments perturbe les organismes benthiques, sans toutefois les tuer. Les effets à long terme ne sont pas documentés puisque cette méthode est expérimentale, à cette échelle. L'inversion de couche risque d'augmenter temporairement la turbidité de l'eau.	D	Nécessite l'utilisation de barges, d'engins amphibies ou de grues pour l'épandage des matériaux dans le fond du lac. Nécessite la construction d'infrastructures d'accès pour l'apport des matériaux. Nécessite l'exploitation d'une carrière/sablière.	C
O 8 Oxydation des sédiments	Moyen Aucun effet négatif n'a été documenté, mais il est fort probable que le traitement chimique ait des incidences sur les organismes benthiques. L'oxydation des sédiments par le nitrate de calcium entraîne leur dénitrification, ce qui fournit de l'azote aux cyanobactéries qui risquent de proliférer rapidement. La demande en oxygène des sédiments risque d'augmenter, ce qui peut conduire à un appauvrissement de l'eau.	B	Nécessite l'installation de matériel permettant d'injecter le peroxyde d'hydrogène, le permanganate de potassium ou le nitrate de calcium pour stimuler l'oxydation des sédiments. Ces installations ne sont pas importantes.	B

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	IMPORTANCE DES IMPACTS SUR LE MILIEU NATUREL		IMPORTANCE DES INFRASTRUCTURES À METTRE EN PLACE	
O 9 Pompage des sédiments	Élevée Cette méthode entraîne une remise en suspension plus ou moins importante des sédiments, ce qui a pour effet d'augmenter la turbidité et la productivité du milieu. Cette méthode affecte l'habitat des organismes benthiques. Leur rétablissement à la suite d'un tel traitement peut prendre un certain temps.	D	Nécessite l'utilisation de matériel de dragage hydraulique ou pneumatique et de pompes centrifuges qui retirent et transportent les sédiments sous forme de boues liquides vers un champ de sédimentation. Nécessite la construction d'infrastructures de traitement des sédiments (bassins de rétention, champs d'épandage, etc.).	B
O 10 Pompage de l'eau de l'hypolimnion	Faible Le pompage de l'hypolimnion peut avoir des répercussions sur les écosystèmes situés en aval du lac traité si l'eau est pompée dans les effluents. En effet, l'eau ainsi déversée est pauvre en oxygène et riche en nutriments. Le pompage de l'hypolimnion peut mener à une déstratification, ce qui peut avoir des conséquences notables sur certaines espèces, notamment les poissons d'eau froide. Toutefois, le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié. L'eau n'a pas besoin d'être traitée compte tenu que le milieu récepteur serait le fleuve Saint-Laurent.	A	Nécessite l'installation d'infrastructures pour les pompes et la canalisation.	C

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES		
	DURÉE DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE DES INFRASTRUCTURES	IMPORTANCE DES EFFORTS LIÉS AUX ASPECTS LÉGAUX (DEMANDE DE PERMIS)	
O 1 Inactivation du phosphore par floculation	10-15 jours/an, fin juin.	A	<u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.
O 2 Circulation artificielle de l'eau du lac	Installation : environ 1 mois	B	<u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.
O 3 Aération de l'hypolimnion	Installation : environ 1 mois	B	<u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES		
	DURÉE DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE DES INFRASTRUCTURES	IMPORTANCE DES EFFORTS LIÉS AUX ASPECTS LÉGAUX (DEMANDE DE PERMIS)	
0 4 Dilution de l'eau du lac	Installation : environ 6 mois	D <u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.	C
0 5 Abaissement du niveau d'eau	Installation : environ 4 mois Période d'abaissement du niveau : de 3 à 4 mois en hiver	D <u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement. L'utilisation d'un ouvrage régulateur est soumise à la Loi sur la sécurité des barrages et à la Loi sur le régime des eaux.	E
0 6 Dragage des sédiments (excavation)	Excavation sèche en hiver : environ 6 mois Excavation humide en hiver : environ 6 mois Nécessite une infrastructure pour assécher les sédiments ou un champ d'épandage Nécessite un pompage des eaux du lac et un contrôle des apports.	E <u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.	E

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	DURÉE DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE DES INFRASTRUCTURES		IMPORTANCE DES EFFORTS LIÉS AUX ASPECTS LÉGAUX (DEMANDE DE PERMIS)	
0 7 Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>)	Épandage des matériaux : 8 mois	E	<u>Fédéral</u> : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial</u> : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.	D
0 8 Oxydation des sédiments	Injection des composés oxydants : 1 mois	B	<u>Fédéral</u> : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial</u> : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.	A

TABLEAU 8
ANALYSE DES CRITÈRES UTILISÉS POUR LE CHOIX D'UN OUTIL DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	CRITÈRES			
	DURÉE DES TRAVAUX DE MISE EN PLACE DES INFRASTRUCTURES		IMPORTANCE DES EFFORTS LIÉS AUX ASPECTS LÉGAUX (DEMANDE DE PERMIS)	
O 9 Pompage des sédiments	Pompage des sédiments environ 9 mois		E <u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.	D
O 10 Pompage de l'eau de l'hypolimnion	Installation des infrastructures : 2 mois		C <u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés respectivement par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.	C

TABLEAU 9
ÉTAPE 1 – ÉVALUATION DE CHACUN DES OUTILS

CRITÈRES	OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	O 1	O 2	O 3	O 4	O 5	O 6	O 7	O 8	O 9	O 10
IMPORTANCE 1 ^{re}	Efficacité	A	C	C	C	E	A	B	D	A	B
	Applicabilité au lac Saint-Augustin	A	C	E	C	D	E	C	D	B	E
	Importance des coûts des travaux	A	B	D	D	D	E	E	C	D	D
IMPORTANCE 2 ^e	Complexité technique	A	B	C	C	E	E	C	D	B	B
	Importance des impacts sur le milieu humain (riverains)	A	B	B	A	E	E	D	A	B	B
IMPORTANCE 3 ^e	Durabilité de l'intervention	C	E	E	E	D	A	A	C	A	D
	Importance des impacts sur le milieu naturel	A	A	A	A	E	E	D	B	D	A
IMPORTANCE 4 ^e	Importance des infrastructures à mettre en place	A	B	B	C	E	E	C	B	B	C
	Durée des travaux de mise en place des infrastructures et du traitement	A	B	B	D	D	E	E	B	E	C
	Importance des efforts liés aux aspects légaux (demande de permis)	A	B	B	C	E	E	D	A	D	C
A = 25 B = 20 C = 15 D = 10 E = 5											

TABLEAU 10
ÉTAPE 2 – TRANSFORMATION DES COTES ALPHABÉTIQUES EN NUMÉRIQUES

CRITÈRES	OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	O 1	O 2	O 3	O 4	O 5	O 6	O 7	O 8	O 9	O 10
IMPORTANCE 1 ^{re}	Efficacité	25	15	15	15	5	25	20	10	25	20
	Applicabilité au lac Saint-Augustin	25	15	5	15	10	5	15	10	20	5
	Importance des coûts des travaux	25	20	10	10	10	5	5	15	10	10
IMPORTANCE 2 ^e	Complexité technique	25	20	15	15	5	5	15	10	20	20
	Importance des impacts sur le milieu humain (riverains)	25	20	20	25	5	5	10	25	20	20
IMPORTANCE 3 ^e	Durabilité de l'intervention	15	5	5	5	10	25	25	15	25	10
	Importance des impacts sur le milieu naturel	25	25	25	25	5	5	10	20	10	25
IMPORTANCE 4 ^e	Importance des infrastructures à mettre en place	25	20	20	15	5	5	15	20	20	15
	Durée des travaux de mise en place des infrastructures et du traitement	25	20	20	10	10	5	5	20	5	15
	Importance des efforts liés aux aspects légaux (demande de permis)	25	20	20	15	5	5	10	25	10	15

TABEAU 11
ÉTAPES 3 ET 4 – APPLICATION DES FACTEURS DE PONDÉRATION ET CALCUL DU POIDS
RELATIF DE CHACUN DES OUTILS DE GESTION *IN SITU*

PONDÉRATION	CRITÈRES	OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	O 1	O 2	O 3	O 4	O 5	O 6	O 7	O 8	O 9	O 10
5	IMPORTANCE 1 ^{re}	Efficacité	125	75	75	75	25	125	100	50	125	100
		Applicabilité au lac Saint-Augustin	125	75	25	75	50	25	75	50	100	25
		Importance des coûts des travaux	125	100	50	50	50	25	25	75	50	50
3	IMPORTANCE 2 ^e	Complexité technique	75	60	45	45	15	15	45	30	60	60
		Importance des impacts sur le milieu humain (riverains)	75	60	60	75	15	15	30	75	60	60
2	IMPORTANCE 3 ^e	Durabilité de l'intervention	30	10	10	10	20	50	50	30	50	20
		Importance des impacts sur le milieu naturel	50	50	50	50	10	10	20	40	20	50
1	IMPORTANCE 4 ^e	Importance des infrastructures à mettre en place	25	20	20	15	5	5	15	20	20	15
		Durée des travaux de mise en place des infrastructures et du traitement	10	10	10	5	5	20	25	15	25	5
		Importance des efforts liés aux aspects légaux (demande de permis)	25	20	20	15	5	5	10	25	10	15
TOTAL POINTAGE			665	480	365	415	200	295	395	410	520	400

TABLEAU 12
RANG OBTENU PAR CHACUN DES OUTILS DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE

RANG	OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	POINTAGE	COMMENTAIRES	APPLICABLE
1	Inactivation du phosphore par floculation (01)	665	Problématique liée à la présence de fer et d'aluminium dans les sédiments. Toutefois, des tests réalisés en laboratoire montre que cet outil pourrait être utilisé. Coûts évalués : < 100 000 \$	Oui
2	Pompage des sédiments (09)	520	Problématique liée à l'aménagement d'un bassin de sédimentation si les sédiments sont pompés sans déshydratation. Une caractérisation des sédiments sera nécessaire compte tenu que des secteurs du lac sont contaminés par des métaux et des métalloïdes. Les analyses de laboratoire montrent que les sédiments contaminés sont classés dans la plage A-B et peuvent être utilisés comme matériel de recouvrement. Coûts évalués : entre 1 000 001 \$ et 5 000 000 \$	Oui
3	Circulation artificielle de l'eau du lac (02)	480	Problématique liée aux usages du plan d'eau en présence d'une série d'éolienne. Avis défavorable du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs relativement à l'utilisation de cet outil dans un lac peu profond. Coûts évalués : 101 000 \$ à 500 000 \$	Non
4	Dilution de l'eau du lac (04)	415	Problématique liée à un apport d'eau important et à la gestion des eaux du lac. Coûts évalués : entre 1 000 001 \$ et 5 000 000 \$	Oui
5	Oxydation des sédiments (08)	410	Problématique liée aux connaissances des processus géochimiques dans le lac afin de décrire et de bien connaître le cycle du phosphore dans les sédiments et dans l'eau. L'efficacité à long terme de cet outil n'est pas démontrée. Coûts évalués : 501 000 \$ à 1 000 000 \$	Non
6	Pompage de l'eau de l'hypolimnion (10)	400	Non applicable. Lac non stratifié. Coûts évalués : entre 1 000 001 \$ et 5 000 000 \$	Non
7	Recouvrement de la surface des sédiments (<i>capping</i>) (07)	395	Problématique liée aux méthodes d'épandage des matériaux. Caractère expérimental de l'outil. Coûts évalués : > 5 000 0000 \$	Oui
8	Aération de l'hypolimnion (03)	365	Non applicable. Lac non stratifié. Coûts évalués : entre 1 000 001 \$ et 5 000 000 \$	Non

TABLEAU 12
RANG OBTENU PAR CHACUN DES OUTILS DE GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE (suite)

RANG	OUTILS DE GESTION <i>IN SITU</i>	POINTAGE	COMMENTAIRES	APPLICABLE
9	Dragage des sédiments (excavation) (06)	295	Problématique liée aux pentes abruptes, à la nécessité de baisser le niveau du lac et à la nature des sédiments non consolidés. Une caractérisation des sédiments sera nécessaire compte tenu que des secteurs du lac sont contaminés par des métaux et des métalloïdes. Les analyses de laboratoire montrent que les sédiments contaminés sont classés dans la plage A-B et peuvent être utilisés comme matériel de recouvrement. Coûts évalués : : > 5 000 0000 \$	Oui
10	Abaissement du niveau d'eau (05)	200	Problématique liée aux pentes abruptes du lac et aux infrastructures de contrôle exigées. Contrainte majeure due aux usages du plan d'eau. Coûts évalués : entre 1 000 001 \$ et 5 000 000 \$	Oui

Les résultats de l'analyse montrent que six outils représentent un potentiel d'utilisation. L'outil O 1 - Inactivation du phosphore par floculation - est celui qui répond le plus aux critères, suivi des outils O 9 (pompage des sédiments) et O 2 (circulation artificielle de l'eau du lac) (tableau 12).

L'outil O 2 - Circulation artificielle de l'eau du lac - n'apporterait pas de solution durable à la problématique. En effet, selon les relevés physicochimiques, l'eau du lac Saint-Augustin est suffisamment oxygénée. Aussi, une augmentation de la teneur en oxygène dans l'eau n'aurait pas d'effet significatif sur le relargage du phosphore.

Les outils O 1 et O 9 seraient à retenir. La combinaison des deux outils serait probablement une avenue à explorer. En effet, l'ajout par exemple de chaux permettrait de fixer le phosphore pour former l'apatite, un minéral insoluble. Le phosphore ainsi fixé ne serait plus disponible pour les organismes, compte tenu que l'apatite est plus stable que le floculat formé par l'alun qui se dépose au fond du lac. Combiné au pompage des sédiments, cet outil permettrait de gérer la problématique phosphore dans le lac Saint-Augustin, d'améliorer la qualité de l'eau et, par conséquent, son utilisation. Toutefois, il sera primordial de contrôler les sources d'apports de phosphore externes au lac afin d'optimiser les actions.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Depuis près de 40 ans, la dégradation de la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin est reconnue comme étant une problématique environnementale qui affecte l'utilisation du plan d'eau. En effet, les apports externes en phosphore sont importants et une dégradation de la qualité des eaux ainsi que des périodes de prolifération massive d'algues durant la saison estivale sont régulièrement observées. Lors de ces événements, les usages du plan d'eau sont limités pour éviter les risques au niveau de la santé publique. Le lac ayant des berges fortement perturbées par l'occupation humaine, différents scénarios de réduction des apports en phosphore ont été proposés et des actions relatives à la diminution de ces apports provenant des eaux sanitaires et des sols urbanisés ont été réalisées.

La présente étude, réalisée en 2004-2005, montre que le lac Saint-Augustin a une superficie de 68 ha et un volume de 2 252 106 m³, pour une profondeur moyenne de 3,30 m. Il possède un petit bassin versant et un taux de renouvellement de l'eau de 153 jours. Les résultats des mesures de certains paramètres physicochimiques réalisées en juillet 2004 montrent que l'eau près du fond est caractérisée périodiquement par des conditions d'anoxie sévère, mais que les eaux sont fréquemment mélangées, ce qui permet de classer le lac Saint-Augustin comme un lac polymictique. D'autre part, ce lac ne présente pas de véritable thermocline durant la période estivale; la température demeurant toutefois élevée (environ 20 °C) sur toute la colonne d'eau. L'absence de stratification thermique et la forte emprise du vent sur le lac Saint-Augustin font en sorte qu'il se produit, sous certaines conditions, un mélange des eaux du lac, faisant ainsi remonter le phosphore « libéré » des sédiments vers la surface. On observe alors toutes les conditions propices à l'apparition d'un *bloom* d'algues.

La quantité de sédiments (vase) accumulés dans le fond du lac est importante (736 379 m³) et peut atteindre jusqu'à 4 m d'épaisseur, pour une moyenne de 1,10 m. Selon les caractéristiques des sédiments du lac Saint-Augustin, la quantité totale de phosphore contenue s'élèverait à 54,1 tonnes et les apports en phosphore provenant des sédiments, durant la période estivale, seraient de 357,8 mg/m², soit 245 kg de P. Par ailleurs, les concentrations d'aluminium et de fer sont également importantes, soit plus de 20 fois celle du phosphore.

L'étude réalisée en 2004-2005 montre également que les apports en eau du bassin versant sont insuffisants pour permettre un lessivage vers l'aval du phosphore libéré. D'autre part, la superficie de la zone de moins de 3 m de profondeur est trop faible pour anticiper des interventions basées sur des modifications du niveau d'eau.

À la lumière de ce constat, des actions visant explicitement le contrôle du phosphore présent dans le plan d'eau ont fait l'objet d'une recherche et ont été évaluées. Cette évaluation avait pour but d'identifier des outils potentiels permettant une gestion *in situ* du phosphore provenant du lac Saint-Augustin, tout en assurant le développement durable et contemporain de ses ressources et de ses potentiels.

Cette recherche a permis d'identifier une dizaine d'outils potentiels. Ceux-ci ont été analysés et comparés entre eux, en considérant leurs avantages, leurs inconvénients, leur coût et leur efficacité, afin de déterminer la position de chacun, selon sa performance, par rapport aux critères analysés. Par ailleurs, le cadre légal qui pourrait régir l'application des outils a également fait l'objet d'une consultation auprès des instances environnementales gouvernementales québécoise et canadienne.

Les résultats de l'analyse montrent que certains outils nécessitent des investissements d'importance et que d'autres peuvent ne pas être applicables compte tenu des conditions physicochimiques observées. Selon cette analyse, l'inactivation du phosphore par floculation est l'outil qui répond le mieux aux critères, suivi du pompage des sédiments. La combinaison des deux outils serait probablement une avenue à explorer. Le premier outil fixe le phosphore et le deuxième pompe les sédiments dans un champ à proximité, ce qui permettrait d'améliorer substantiellement la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin et son utilisation.

Pour bien ajuster les dosages et s'assurer de ne pas provoquer de choc acide durant le traitement à l'alun ou autre produit, certaines données complémentaires devraient être recueillies au préalable :

- Suivi de l'alcalinité et du pH dans l'eau
- Évaluation des apports d'eau souterraine (ajustement du taux de renouvellement de l'eau du lac)
- Caractérisation des apports externes de phosphore
- Caractérisation des vents et du brassage des eaux dans le lac
- Caractérisation des impacts des embarcations moteurs sur la qualité des eaux du lac

RÉFÉRENCES CONSULTÉES

- AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE (2004). *Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*, rapport développé par l'Agence de l'eau Artois-Picardie, In Vivo inc. et le Pôle de compétence des sites et sédiments pollués.
- AMBLER, N., J. HALL, M. PETERS, K. D. RUDNITSKI, et E. SPEELMAN (1998). *St. Mary's Remedial Action Plan: Remediation of Contaminated Sediments*, Environmental Science Colloquium, University of Guelph, Guelph.
- ANDRÉ, P., C. E. DELISLE, J. P. REVÊRET, A. SÈNE (1999). *L'évaluation des impacts sur l'environnement : processus, acteurs et pratique*, Presses internationales, polytechnique.
- BBL (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.
- BERGERON, M., C. CORBEIL et S. ARSENAULT (2002). *Diagnose écologique du lac Saint-Augustin*, rapport préparé pour la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures par EXXEP Environnement, 70 p. et 6 annexes.
- BOIRE-LAVIGNE, C. (2004). *3^e rapport sur l'utilisation d'un oxygénateur de l'hypolimnion (Speece cone) au lac Carré*, rapport préparé pour la municipalité de Saint-Faustin-Lac-Carré, Québec.
- CENTRE SAINT-LAURENT (1992). *Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments*, Plan d'action Saint-Laurent.
- COOKE, G. D., E. B. WELCH, S. A. PETERSON et P. R. NEWROTH, (1993). *Restoration and management of lakes and reservoirs*, Second Edition, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- CORBEIL, C., N. JUNEAU, M-E. BRIN, G. DOMINGUEZ, R. GALVEZ-CLOUTIER et S. ARSENAULT (2002). *Portrait de la contamination des sédiments du lac Saint-Augustin*, présenté au Conseil de bassin du lac Saint-Augustin, préparé par EXXEP Environnement, en collaboration avec le Département de génie civil de l'Université Laval, 31 p. et 3 annexes.
- CORBEIL, C., N. JUNEAU et S. ARSENAULT (2002). *Portrait des sites potentiellement contaminés dans le bassin versant du lac Saint-Augustin*, présenté au Conseil de bassin du lac Saint-Augustin par EXXEP Environnement, 36 p. et 1 annexe.
- EXXEP ENVIRONNEMENT (2005). *Étude préliminaire de l'augmentation du taux de renouvellement des eaux du lac Saint-Augustin*, rapport présenté à la direction de l'environnement de la Ville de Québec, 12 p. et 5 annexes.

- EXXEP ENVIRONNEMENT (2004). *Suivi de la qualité de l'eau - lac Saint-Augustin - été 2003*, rapport technique présenté à la Direction de l'environnement de la Ville de Québec, 13 p. et 4 annexes.
- GALVEZ-CLOUTIER, R. (2005). *Méthode combinée : coagulation à l'alun et recouvrement actif: principes et simulations*, présentation faite au ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs le 28 avril 2005. [En ligne]
[http://web.gci.ulaval.ca/professeurs/rcloutier/projets_fichiers/MDDEP/MDDEP-RG.pdf]
- HÅKANSON, L. (2004). *Internal loading: A new solution to an old problem in aquatic sciences*, Lakes & Reservoirs: Research and Management 9 : 3-23.
- INRE (2004). *Décontamination des sédiments aquatiques*, Institut national de recherche sur les eaux, [En ligne]
[www.nwri.ca/research/contaminatedsediment-f.html].
- LAPIERRE, H., B.-P. HARVEY et V. YELLE (2002). *Portrait de l'encadrement forestier du bassin versant du lac Saint-Augustin*, projet réalisé dans le cadre de La Grande corvée par BPH Environnement pour la Ville de Québec, 20 p. et 2 annexes.
- MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEa Commonwealth of Massachusetts.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT (2003). *Avis concernant l'aération ou la circulation artificielle de l'eau des lacs comme mesures de restauration de la qualité de l'eau*, ministère de l'Environnement du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Direction des politiques du secteur municipal et Direction régionale de l'Estrie, Québec.
- MEUNIER, P. et J. ALAIN (1979). *Rapport de la diagnose écologique du lac Saint-Augustin*, Direction régionale des eaux, ministère des Richesses naturelles, Québec, 108 p.
- NÜRNBERG, G. K. (1984). *The prediction of internal phosphorus load in lakes with anoxic hypolimnia*, Limnol. Oceanogr. 29 : 111-124
- NÜRNBERG, G. K., sous presse (2005). *Quantification of internal phosphorus loading in polymictic lakes*, SIL, Verh. Internat. Limnol. 29 : 000-000
- OLEM, H. et G. FLOCK (éd.) (1990). *Lake and reservoir restoration guidance manual*, 2e édition, EPA 440/4-90-006, préparé par N. Am. Lake Manage. Soc. pour U.S. Environ. Prot. Agency, Washington D.C.
- PILOTE, R., C. CORBEIL et S. ARSENAULT (2002a). *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 p.

- PILOTE, R., E. BUON et S. ARSENAULT (2002b). *Portrait agroenvironnemental du bassin versant du lac Saint-Augustin*, préparé pour le Conseil de bassin du lac Saint-Augustin par EXXEP Environnement, 20 p. et 1 annexe.
- PALERMO, MICHAEL, R., T. A. THOMPSON and F. SWED (2002). *White Paper No 6B- In Situ Capping as a Remedy Component for the Lower Fox River*, response to a document by The Johnson Company « Ecosystem-Based Rehabilitation Plan - an Integrated Plan for Habitat Enhancement and Expedited Exposure Reduction in the Lower Fox River and Green Bay, January.
- RAYMOND, M., et G. LEDUC (1994). *L'évaluation des impacts environnementaux*, programme de formation et d'études d'impact pour l'ONEP, préparé par Hatch - Hydro-Québec - UQAM, 212 p.
- ROBERGE, K., R. PIENITZ, N. JUNEAU et S. ARSENAULT (2002). *Eutrophisation rapide du lac Saint-Augustin : étude paléolimnologique*, document présenté au Comité de restauration du lac Saint-Augustin, La Grande corvée, par EXXEP Environnement, 20 p. et 4 annexes
- UNEP (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre, Technical publications series (11).
- USEPA (1994). *Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS). Remediation guidance document*, U.S. Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, Chicago.
- VALENTINE, M. B. (2004). *Floraison de cyanobactéries au lac Saint-Augustin : Dynamique à court terme et stratification*, mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval, dans le cadre du programme de maîtrise en biologie, Faculté des sciences et de génie, Université Laval, Québec, 124 p. et 4 annexes.
- VALLENTYNE, J. R. (1974). *The algal bowl: Lakes and man*. Miscellaneous Special Publication 22, Fisheries and Marine Service, Environnement Canada, Ottawa.
- WAGNER, K. J. (2001). *Management techniques within the lake or reservoir. Chapter 7*, p. 215-306 in C. Holdren, W. Jones et J. Taggart, Eds. *Managing lake and reservoirs*, North American Lake Management Society, Terrene Institute and U.S. Environmental Protection Agency, Madison.
- WEBBER, M. D. (2003). *Valorisation agricole des biosolides municipaux : revue de littérature et recommandations concernant l'impact des sels d'aluminium et de fer sur la disponibilité du phosphore du sol*, Agrosol, vol. 14, n° 1, p. 22-28.
- WETZEL, R. G. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems 3rd edition*, Academic Press, 1 006 p.

ANNEXE 1

RAPPORT D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS DE SÉDIMENTS EN LABORATOIRE



Laboratoire
de
L'Environnement LCQ Inc.

2690, avenue Dalton
Sainte-Foy, Qc, G1P 3S4
Tél. : (418) 658-5784
Fax : (418) 658-6594
Courriel : info@lablcq.com

Eau - Air - Sol - Aliments - Sédiments - Matériaux
Analyses chimiques, bactériologiques et toxicologiques

Client : PRO-FAUNE
2095, rue Jean-Talon Nord, #217
Sainte-Foy (Québec) G1N 4L8

Attention : Monsieur Fabien Bolduc

Votre projet : Lac St-Augustin

Dossier : LE042121
Date de réception : 30/07/04
Date du rapport : 16/08/04
Rapport : LCQ - 70692

CERTIFICAT D'ANALYSE

Prélevé par : Pro Faune
Date de prélèvement : 29 juillet 2004
Description des échantillons : Sédiments
Type d'analyse : Chimique
Identification des échantillons : (voir feuilles suivantes)

<u>Analyses</u>	<u>Quantité</u>	<u>Date d'analyse</u>	<u>Méthode d'analyse</u>	<u>Réf. de la méthode</u>
Aluminium	20	05/08/04	LCQ 04.02/CP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Fer	20	05/08/04	LCQ 04.02/CP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
P total	20	11/08/04	LCQ 95.03/NTPT-03	MENVIO.90.04/313-NTPT 1.1.**** et SM 424 E***

- * Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20e Edition 1998.
- ** CACEQ - Édition 2003-03-03
- *** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 16e Edition 1985.
- **** Ministère de l'Environnement. Direction des Laboratoires. Méthodes d'analyse des boues d'usines d'épuration. - 1991.


Mario PERRON
Chimiste



RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 70692

No. du laboratoire	86957	86958	86959	86960	86961	Limite de détection
Identifications	D	C	C1	A1	A2	
Paramètres	29/07/04	29/07/04	29/07/04	29/07/04	29/07/04	
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	21 600	19 800	19 400	16 800	22 200	1,0
Fer (mg Fe/kg de m.s.)	36 000	37 700	29 400	27 000	33 500	2,0
P total (mg P/kg de m.s.)	881	1 160	1 073	688	871	30

REMARQUE :

Chimiste :


Mario PERRON

Date :

16 août 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

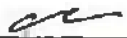
Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 70692

No. du laboratoire	86962	86963	86964	86965	86966	Limite de détection
Identifications	B1	D1	D3	E1	DE	
Paramètres	29/07/04	29/07/04	29/07/04	29/07/04	29/07/04	
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	26 500	8 340	18 000	20 700	5 080	1.0
Fer (mg Fe/kg de m.s.)	36 700	18 600	34 100	32 900	11 700	2.0
P total (mg P/kg de m.s.)	816	861	921	903	545	30

REMARQUE :

Chimiste : 
Mario PERRON

Date : 16 août 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

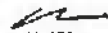
Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 70692

No. du laboratoire	86967	86968	86969	86970	86971	Limite de détection
Identifications	E3	F1	FG	H1	H5	
Paramètres	29/07/04	29/07/04	29/07/04	29/07/04	29/07/04	
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	20 700	28 800	26 800	14 700	25 300	1,0
Fer (mg Fe/kg de m.s.)	35 600	34 900	34 500	20 000	31 800	2,0
P total (mg P/kg de m.s.)	1 087	927	1 142	914	912	30

REMARQUE :

Chimiste : 
Mario PERRON

Date : 16 août 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

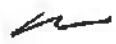
Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 70692

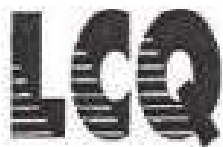
No. du laboratoire	86972	86973	86974	86975	86976	Limite de détection
Identifications	I1 27/07/04	H1 extra 27/07/04	K1 27/07/04	G4 27/07/04	G1 27/07/04	
Paramètres						
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	19 000	9 060	10 900	25 500	23 200	1,0
Fer (mg Fe/kg de m.s.)	24 400	16 900	16 100	37 700	37 600	2,0
P total (mg P/kg de m.s.)	699	488	762	1 150	1 043	30

REMARQUE :

Chimiste : 
Mario PERRON

Date : 16 août 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.



Laboratoire
de
L'Environnement LCQ Inc.

2690, avenue Dalton
Sainte-Foy, Qc, G1P 3S4
Tél. : (418) 658-6784
Fax : (418) 658-6594
Courriel : info@lablcq.com

Eau - Air - Sol - Aliments - Sédiments - Matériaux
Analyses chimiques, bactériologiques et toxicologiques

Client : PRO-FAUNE
2095, rue Jean-Talon Nord, #217
Sainte-Foy (Québec) G1N 4L8

Dossier : LE042121
Date de réception : 13/09/04
Date du rapport : 28/09/04
Rapport : LCQ - 71998

Attention : Monsieur Fabien Bolduc

Votre projet : Lac St-Augustin

CERTIFICAT D'ANALYSE

Prélevé par : P. Kaltenback
Date de prélèvement : 10 septembre 2004
Description des échantillons : Sol
Type d'analyse : Chimique
Identification des échantillons : (voir feuilles suivantes)

<u>Analyses</u>	<u>Quantité</u>	<u>Date d'analyse</u>	<u>Méthode d'analyse</u>	<u>Réf. de la méthode</u>
Aluminium	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Cadmium	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Chrome	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Cuivre	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Fer	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Nickel	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Plomb	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
Zinc	6	15/09/04	LCQ 04.02/ICP-03	MA 200-Mét1.1** et SM 3120 B*
P total	6	24/09/04	LCQ 95.09/NTPT-03	MENVQ.90.04/313-NTPT 1.1,**** et SM 424 E***

- * Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20e Edition 1998.
- ** CACEQ - Édition 2003-03-03
- *** Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16e Edition 1985.
- **** Ministère de l'Environnement. Direction des Laboratoires. Méthodes d'analyse des boues d'usines d'épuration. - 1991.


Mario PERRON
Chimiste



RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 71998

No. laboratoire	A*	B*	C*	#89951	#89952	#89953	Limite de détection
Identifications				#1-E - surface 10/09/04	#1-E - milieu 10/09/04	#1-E - fond 10/09/04	
Paramètres**							
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	--	--	--	12 800	26 500	18 100	1,0
Cadmium (mg Cd/kg de m.s.)	1,5	5	20	0,7	1,0	0,6	0,5
Chrome (mg Cr/kg de m.s.)	65	250	800	21,4	36,8	29,3	0,5
Cuivre (mg Cu/kg de m.s.)	40	100	500	17,7	15,7	12,9	0,5
Fer (mg Fe/kg de m.s.)	--	--	--	26 900	24 300	21 400	2,0
Nickel (mg Ni/kg de m.s.)	50	100	500	22,1	39,4	31,6	0,5
Plomb (mg Pb/kg de m.s.)	50	500	1 000	9,6	<2,0	<2,0	2,0
Zinc (mg Zn/kg de m.s.)	110	500	1 500	62,9	116	59,4	0,5
P total (mg P/kg de m.s.)	--	--	--	659	633	866	30

REMARQUE : • Selon l'Annexe 2 du guide "Politique de protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés" intitulé "Les critères généraux pour les sols et pour les eaux souterraines", ENVIRODOQ EN880478
 -- Base sèche.

Chimiste : 
 Mario PERRON



Date : 28 septembre 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 71998

Stade

No. laboratoire	A*	B*	C*	#89954	#89955	#89956	Limite de détection
Identifications				#2-E - surface 10/09/04	#2-E - milieu 10/09/04	#2-E - fond 10/09/04	
Paramètres**							
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	—	—	—	36 000	34 200	31 200	1,0
Cadmium (mg Cd/kg de m.s.)	1,5	5	20	0,8	0,9	1,0	0,5
Chrome (mg Cr/kg de m.s.)	85	250	800	52,2	45,6	44,8	0,5
Cuivre (mg Cu/kg de m.s.)	40	100	500	25,5	17,2	21,1	0,5
Fer (mg Fe/kg de m.s.)	—	—	—	34 700	28 900	27 400	2,0
Nickel (mg Ni/kg de m.s.)	50	100	500	40,6	44,2	52,0	0,5
Piomb (mg Pb/kg de m.s.)	50	500	1 000	15,0	6,4	<2,0	2,0
Zinc (mg Zn/kg de m.s.)	110	500	1 500	108	127	133	0,5
P total (mg P/kg de m.s.)	—	—	—	1 016	1 036	1 383	30

REMARQUE : * Selon l'Annexe 2 du guide "Politique de protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés" intitulé "Les critères généraux pour les sols et pour les eaux souterraines", ENVIRODOO EN980478
 ** Base sèche.

Chimiste : Mario PERRON

Date : 28 septembre 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

RAPPORT DE CONTRÔLE DE QUALITÉ

Identification du client Pro-Faune

V/# de commande ---

No. du dossier LE042121

No. de rapport LCQ - 71998

RÉSULTATS

Type de contrôle	Blanc	Matériel de référence	Valeur attendue
Identification		MR 941	
Paramètres			
Aluminium (mg Al/kg de m.s.)	<1,0	33 800	37 400
Cadmium (mg Cd/kg de m.s.)	<0,5	26,5	30,0
Chrome (mg Cr/kg de m.s.)	<0,5	221	282
Cuivre (mg Cu/kg de m.s.)	<0,5	316	334
Nickel (mg Ni/kg de m.s.)	<0,5	269	300
Plomb (mg Pb/kg de m.s.)	<2,0	417	489
Zinc (mg Zn/kg de m.s.)	<0,5	364	437
P total (mg P/kg de m.s.)	<30	24 460	24 700

REMARQUE :

Chimiste :


Mario PERRON



Date :

28 septembre 2004

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

Rapport d'analyse

Rapport no : 2169

Version no : 0

Demande de travail : 6604

No de dossier : 15-152-1

Client : Qualité du milieu - Service de l'Environnement

Projet : Qualité du milieu - Lac Saint-Augustin

Référence du client : NA

Date d'échantillonnage : 29 juillet 2004

Responsable : René Gélinas

Date de réception : 30 juillet 2004

Requérant : Odette Martineau

Échantillonneur : Fabien Bolduc

Téléphone : (418) 641-6411 poste 2954

Télécopieur : (418) 641-6556

Adresse : 1595, Monseigneur-Plessis, Arrondissement 2 - Les Rivières

Québec

G1M 1A2

Échantillon numéro 46705 - D1 m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.12	mg/l P	ILQ-P total	3 août 2004

Échantillon numéro 46707 - D2 m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.13	mg/l P	ILQ-P total	3 août 2004

Échantillon numéro 46708 - D3 m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.12	mg/l P	ILQ-P total	3 août 2004

Échantillon numéro 46709 - D4 m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.18	mg/l P	ILQ-P total	3 août 2004

Échantillon numéro 46710 - D4,5 m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.37	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

Échantillon numéro 46711 - C/G2 1m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.09	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

Échantillon numéro 46712 - C/G2 2m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.08	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

Échantillon numéro 46713 - C/G2 3m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.10	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

Échantillon numéro 46714 - C/G2 4m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.11	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

Échantillon numéro 46716 - C/G2 5m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.45	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

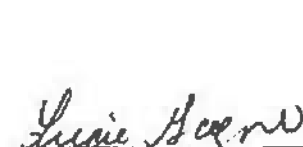
Échantillon numéro 46717 - C/G2 6m

A

Paramètres	Résultats	Unités	Méthode	Date d'analyse
Phosphore total	0.79	mg/l P	ILQ-P total	4 août 2004

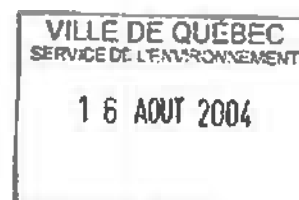
Date du rapport : 12 août 2004

Remarque :


Lucie Gagné, B. Sc., chimiste
Superviseure du secteur chimie
Division des laboratoires



Co rapport ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite de la Division des laboratoires



Rapport d'analyse

Rapport no : 2300

Version no : 0

Demande de travail : 6913

No de dossier : 15-152-1

Client : Qualité du milieu - Service de l'Environnement

Projet : Qualité du milieu - Lac Saint-Augustin

Référence du client : NA

Date d'échantillonnage : 18 août 2004

Responsable : René Gélinas

Date de réception : 18 août 2004

Requérant : Odette Martineau

Échantillonneur : Pierre Kallenback

Téléphone : (418) 641-6411 poste 2954

Télexcopieur : (418) 641-6556

Adresse : 1595, Monseigneur-Plessis, Arrondissement 2 - Les Rivières

Québec

G1M 1A2

Échantillon numéro 48707 - Station D-1

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.25	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48708 - Station D-2

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.13	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48709 - Station D-3

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.07	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48710 - Station D-4

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.12	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48711 - Station D-5 à 4.5 m

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.13	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48712 - Station C-1

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.25	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48713 - Station C-2

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.13	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48714 - Station C-3

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.06	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48715 - Station C-4

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.12	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48716 - Station C-5

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.13	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Échantillon numéro 48717 - Station C-6 (5.5)

A

<i>Paramètres</i>	<i>Résultats</i>	<i>Unités</i>	<i>Méthode</i>	<i>Date d'analyse</i>
Phosphore total	0.13	mg/l P	ILQ-P total	19 août 2004

Date du rapport : 27 août 2004

Remarque :



Lucie Gagné, B. Sc., Chimiste
Superviseure du secteur chimie
Division des laboratoires

Ce rapport ne peut être reproduit, sinon en entier, sans l'autorisation écrite de la Division des laboratoires



Laboratoire
de
L'Environnement LCQ Inc.

2690, avenue Dalton
Sainte-Foy, Qc. G1P 3S4
Tél. : (418) 658-5784
Fax : (418) 658-6594
Courriel: info@lablq.com

Eau - Air - Sol - Aliments - Sédiments - Matériaux
Analyses chimiques, bactériologiques et toxicologiques

Cliant : PRO-FAUNE
2095, rue Jean-Talon Sud, #217
Sainte-Foy (Québec) G1N 4L8

Dossier : LE052121
Date de réception : 15/03/05
Date du rapport : 04/04/05
Rapport : LCQ - 76805

Attention : Monsieur Fabien Bolduc

Votre projet : Lac St-Augustin

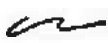
CERTIFICAT D'ANALYSE

Prélevé par : M. Éric Alain
Date de prélèvement : 15 mars 2005
Description des échantillons : Eau de surface
Type d'analyse : Chimique
Identification des échantillons : (voir feuille suivante)

<u>Analyse</u>	<u>Quantité</u>	<u>Date d'analyse</u>	<u>Méthode d'analyse</u>	<u>Réf. de la méthode</u>
P total	10	16,24,30/03/05	LCQ 95.03/P, - 02	SM 424 C et E*

* Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16e Edition 1985.




Mario PERRON
Chimiste



RAPPORT D'ANALYSE

Identification du client Pro-Faune

Votre projet Lac St-Augustin

No. du dossier LE052121

No. de rapport LCQ - 76805

No. laboratoire	Identifications	P total (mg/L)	Limite de détection (mg/L)
#11071	ST 1 - 1 m - 13/03/05	0,04	0,02
#11072	ST 1 - 2 m - 13/03/05	0,03	0,02
#11073	ST 1 - 3 m - 13/03/05	0,04	0,02
#11074	ST 1 - 4 m - 13/03/05	0,04	0,02
#11075	ST 1 - 5,5 m - 13/03/05	0,04	0,02
#11076	ST 2 - 1 m - 13/03/05	0,02	0,02
#11077	ST 2 - 2 m - 13/03/05	0,03	0,02
#11078	ST 2 - 3 m - 13/03/05	0,03	0,02
#11079	ST 2 - 4 m - 13/03/05	0,08	0,02
#11080	ST 2 - 5 m - 13/03/05	1,3	0,02

REMARQUE :

Approuvé par: _____

Mario PERRON
chimiste



Vérifié par: _____

Mathieu LÉTOURNEAU
chimiste



Date : 4 avril 2005

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit sans une permission écrite du Laboratoire de l'Environnement LCQ Inc.

ANNEXE 2

GRILLE INTÉRIMAIRE DE GESTION
DES SOLS CONTAMINÉS EXCAVÉS

POLITIQUE DE PROTECTION DES SOLS ET DE RÉHABILITATION DES TERRAINS CONTAMINÉS

GRILLE INTÉRIMAIRE DE GESTION DES SOLS CONTAMINÉS EXCAVÉS

NIVEAU DE CONTAMINATION	OPTIONS DE GESTION
< A	Utilisation sans restriction.
Plage A - B	1. Utilisation comme matériaux de remblayage sur les terrains contaminés à vocation résidentielle en voie de réhabilitation* ou sur tout terrain à vocation commerciale ou industrielle, à la condition que leur utilisation n'ait pas pour effet d'augmenter la contamination** du terrain récepteur et, de plus, pour un terrain à vocation résidentielle, que les sols n'émettent pas d'odeurs d'hydrocarbures perceptibles. 2. Utilisation comme matériaux de recouvrement journalier dans un lieu d'enfouissement sanitaire (LES). 3. Utilisation comme matériaux de recouvrement final dans un LES, à la condition qu'ils soient recouverts de 15 cm de sol propre.
Plage B - C	1. Décontamination de façon optimale*** dans un lieu de traitement autorisé et gestion selon le résultat obtenu. 2. Utilisation comme matériaux de remblayage sur le terrain d'origine, à la condition que leur utilisation n'ait pas pour effet d'augmenter la contamination** du terrain et que l'usage de ce terrain soit à vocation commerciale ou industrielle. 3. Utilisation comme matériaux de recouvrement journalier dans un LES.
> C	1. Décontamination de façon optimale*** dans un lieu de traitement autorisé et gestion selon le résultat obtenu. 2. Si l'option précédente est impraticable, dépôt définitif dans un lieu d'enfouissement sécuritaire autorisé pour recevoir des sols.

* Les terrains contaminés à vocation résidentielle en voie de réhabilitation sont ceux voués à un usage résidentiel dont une caractérisation a démontré une contamination supérieure au critère B et où l'apport de sols en provenance de l'extérieur sera requis lors des travaux de restauration.

** La contamination renvoie à la nature des contaminants et à leur concentration.

*** Le traitement optimal est défini pour l'ensemble des contaminants par l'atteinte du critère B ou la réduction de 80 % de la concentration initiale et pour les composés organiques volatils par l'atteinte du critère B. À cet égard, les volatils sont définis comme étant les contaminants dont le point d'ébullition est < 180 °C ou dont la constante de la Loi de Henry est supérieure à $6,58 \times 10^{-7}$ atm·m³/g, incluant les contaminants répertoriés dans la section III de la grille des critères de sols incluse à l'annexe 2 de la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés.

ANNEXE 3

COMPTE RENDU DES ENTREVUES AVEC LES EXPERTS

- Madame Rosa Galvez-Cloutier, Ph. D., ingénieure, professeure au Département de génie civil de la Faculté des sciences et de génie de l'Université Laval
- Monsieur Yves Prairie, Ph. D., professeur au département des sciences biologiques de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et directeur du Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie et en environnement aquatique (GRIL)
- Monsieur Harm Sloterdijk, Ph. D., scientifique des milieux aquatiques, conseiller à la Biosphère, Environnement Canada.

Compte rendu de l'entrevue avec madame Rosa Galvez-Cloutier, Ph. D., ing.

Professeure au département de génie civil
Faculté des sciences et de génie
de l'Université Laval

Le 21 janvier 2005

Madame Galvez-Cloutier a fait ses études de doctorat sur le traitement de sédiments contaminés provenant du canal Lachine et sur une étude comparative de différentes méthodes curatives. Par la suite, elle a travaillé sur différentes problématiques semblables, notamment la contamination des sédiments de la baie des Ha-Ha, au Saguenay, par l'usine Alcan.

Madame Galvez-Cloutier précise que cela fait plus de quatre ans que des études sont menées au lac Saint-Augustin. Selon elle, l'eutrophisation de ce lac ne peut être traitée convenablement qu'en agissant à la fois au niveau des apports externes et internes de phosphore.

Le temps de renouvellement du lac Saint-Augustin est d'environ six mois. C'est relativement élevé pour un lac naturel. Il ne faut donc pas considérer le lac Saint-Augustin comme une mare d'eau stagnante.

Les sources de pollutions sont diverses. Les sels qui proviennent de l'autoroute, entre autres, entraînent une augmentation de la conductivité de l'eau du lac. La présence de nombreux ions favorise le développement d'algues exotiques, spécifiques de milieux saumâtres (cyanobactéries). L'eau du lac Saint-Augustin est également très basique comparativement aux lacs de la région.

Les sédiments du lac Saint-Augustin sont riches en métaux lourds (cadmium, cuivre, zinc, plomb, etc.). Les concentrations sont au-delà des normes. Certains métaux lourds sont liés aux sédiments minéraux et ne seront donc pas relargués dans la colonne d'eau. D'autres sont liés à la matière organique et risquent de devenir biodisponibles à la suite de la dégradation bactérienne de cette matière.

Le lac Saint-Augustin est principalement alimenté par des sources souterraines. Cette eau traverse la couche de sédiments, ce qui favorise le relargage de phosphore par les sédiments en créant une circulation d'eau. Plus l'apport en eau souterraine est important, plus la vitesse de relargage est grande.

Selon madame Galvez-Cloutier, le *capping* serait la méthode la plus appropriée au lac Saint-Augustin. Elle est actuellement en train de réaliser des tests visant à combiner le recouvrement des sédiments par des matériaux et un traitement à l'alun. Le traitement à l'alun donne également de bons résultats en laboratoire. En l'appliquant avant les matériaux, on assisterait à une amélioration rapide de la qualité de l'eau du lac (turbidité, phosphore disponible, algues diminueraient).

Madame Galvez-Cloutier propose de recouvrir les sédiments d'une couche de quelques centimètres de roche calcaire (calcite), elle-même recouverte d'une couche de sable. Ce *capping* constituerait une barrière physique et également chimique, car la calcite est capable de fixer une grande quantité de phosphore.

Les premiers tests ont été réalisés en laboratoire avec seulement 1 cm d'épaisseur de calcite. Toutefois, afin d'augmenter l'efficacité de la méthode, madame Galvez-Cloutier préconise plutôt 7,5 cm d'épaisseur.

De plus, madame Galvez-Cloutier tente de trouver un moyen de ralentir le flux d'eau souterraine grâce à son *capping*. Cela aurait pour effet de ralentir le relargage et d'augmenter le taux de fixation du phosphore sur la calcite.

L'application des matériaux se ferait plutôt en surface car la calcite fixerait le phosphore de la colonne d'eau. Même si les sédiments sont très liquides (plus de 90 % d'eau) et que les matériaux vont légèrement s'enfoncer dans cette couche, madame Galvez-Cloutier considère que le *capping* sera efficace. La calcite agira pour fixer le phosphore, même si elle ne se situe pas à l'interface eau-sédiments. Par contre, la barrière chimique que représentent la calcite et le sable sera moins performante. De plus, la présence de calcite dans la couche de sédiments liquides aura pour effet de les compacter et de les stabiliser.

En laboratoire, les matériaux s'enfoncent légèrement dans la couche de sédiments mais ils forment des couches bien distinctes. Au final, la surface serait relativement lisse et plate grâce au sable. Les organismes benthiques seraient, selon madame Galvez-Cloutier, dans un meilleur environnement comparativement aux sédiments liquides.

Commentaires sur les méthodes alternatives :

L'inactivation du phosphore par ajout d'alun serait une méthode efficace, surtout combinée au *capping*. Les doses nécessaires sont variables en fonction des objectifs de restauration. La dose est relativement faible pour obtenir une nette amélioration de la turbidité et pour limiter l'eutrophisation (entre 0 et 25 mg/l). Une dose plus forte permettrait d'éclaircir l'eau au maximum (30-35 mg/l).

La circulation et l'aération du lac, ou simplement de l'hypolimnion, ne permettraient pas, selon madame Galvez-Cloutier, de favoriser la fixation du phosphore à l'aluminium, présent en grande quantité dans les sédiments. En effet, selon madame Galvez-Cloutier, l'eau du lac est bien oxygénée. Mais le phosphore ne se lie pas à l'aluminium car ce dernier est fixé à la structure minérale des sédiments. Il n'est donc pas disponible. C'est pourquoi, un traitement à l'alun serait efficace, s'il est réalisé à une période où l'eau est bien oxygénée. De plus, le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié. De plus, c'est une méthode temporelle qui donne des résultats tant qu'on ne l'arrête pas.

L'abaissement du niveau de l'eau ne serait pas efficace car les pentes sont relativement fortes.

La dilution est une méthode temporelle qui donne des résultats tant qu'on ne l'arrête pas et qui ne règle pas le problème.

Le dragage des sédiments est une méthode impensable en raison de leur toxicité (métaux lourds). Il serait très coûteux de les décontaminer, et ce coût s'ajouterait à celui de l'excavation.

Le pompage de l'hypolimnion est inutile puisque le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié.

L'oxydation des sédiments, comme d'autres méthodes similaires, requiert beaucoup d'études géochimiques afin de déterminer les échanges et les cycles du phosphore dans l'écosystème, entre l'eau et les sédiments. Il faut déterminer quels sont les composés chimiques auxquels se fixe le phosphore. Beaucoup de tentatives ont échoué en raison du manque de connaissance du système.

Compte rendu de l'entrevue avec monsieur Yves Prairie, Ph. D.

Professeur au département de sciences biologiques
de la Faculté des arts et des sciences
de l'Université de Montréal

Directeur du Groupe de recherche interuniversitaire en limnologie
et en environnement aquatique (GRIL)

Les 4 et 7 février 2005

Après avoir décrit le contexte historique et écologique entourant le lac Saint-Augustin, monsieur Prairie s'est dit mal à l'aise de se prononcer sur les méthodes de traitement identifiées, à moins que cela ne fasse l'objet d'un contrat spécifique.

Il a notamment émis des doutes quant à la pertinence de s'attarder au problème de sédiments puisque, selon lui, l'épaisseur de ces derniers, de même que leur concentration en phosphore, ne justifient pas les actions envisagées :

- *Plusieurs lacs au Canada ont plus de 4 m de sédiments, même des lacs oligotrophes.*
- *Tous les sédiments sont naturellement riches en phosphore.*

Compte rendu de l'entrevue avec monsieur Harm Sloterdijk, Ph. D.,

Scientifique des milieux aquatiques
Conseiller à la Biosphère, Environnement Canada

Le 26 février 2005

Dans un premier temps, le contexte historique et écologique du lac Saint-Augustin a été présenté à monsieur Sloterdijk. Selon lui, il faut être conscient que la problématique des blooms d'algues n'est pas uniquement attribuable à l'abondance de phosphore. Certes, sans phosphore il n'y aurait pas de bloom, mais d'autres paramètres interviennent tels que les conditions thermiques et la formation d'une mini-thermocline dans les premiers décimètres de la colonne d'eau. Selon lui, le brassage d'un lac suivi d'une période de stabilité serait propice à la formation d'un bloom d'algues. Le brassage permet de distribuer le phosphore en surface et la période stable permet la formation de la mini-thermocline.

C'est donc dire que la circulation artificielle du lac permettrait, en théorie, de contrôler les blooms d'algues en empêchant la formation d'une mini-thermocline. Toutefois, monsieur Sloterdijk me rappelle la réserve émise par le ministère de l'Environnement du Québec quant à l'utilisation de cette méthode et également le risque de remise en suspension des sédiments et des nutriments, qui risque d'aggraver les conditions du lac.

Bien qu'il ne connaisse pas toutes les conditions et tous les paramètres propres au lac Saint-Augustin, monsieur Sloterdijk s'est avancé sur certaines méthodes applicables : le pompage des sédiments, bien que ce soit coûteux, et surtout l'application de chaux. Cette dernière méthode n'a pas été détaillée dans le cadre de la présente revue de littérature. La chaux est une alternative à l'utilisation d'alun pour l'inactivation du phosphore (voir méthode 1). La chaux fixe le phosphore en formant un minéral insoluble, l'apatite. Une fois fixé, le phosphore ne peut plus être disponible. Selon monsieur Sloterdijk, cette méthode donnerait de meilleurs résultats que l'ajout d'alun.

Nous avons questionné monsieur Sloterdijk spécifiquement sur la question de l'aluminium dans les sédiments. Comment se fait-il que les sédiments soient riches en aluminium et que, en présence d'oxygène, ce dernier ne fixe pas le phosphore ? En fait, monsieur Sloterdijk donne la même explication que madame Galvez-Cloutier, à savoir que l'aluminium présent dans les sédiments est lié à une structure cristalline. Il n'est donc pas disponible pour fixer le phosphore, même en présence d'oxygène. C'est donc dire que l'ajout d'alun permettrait d'inactiver le phosphore. Toutefois, comme mentionné plus tôt, monsieur Sloterdijk privilégierait l'ajout de chaux pour obtenir de meilleurs résultats, d'autant plus que le floculat de quelques centimètres, formé par l'alun, peut se rompre par les courants et le brassage de l'eau, et être remis en suspension.

L'abaissement du niveau de l'eau pourrait constituer une méthode de prétraitement afin de compacter les sédiments avant, par exemple, un pompage ou un *capping*. Toutefois, cette méthode ne se prêterait pas au lac Saint-Augustin en raison de sa superficie et des pentes fortes au niveau des berges.

D'autre part, les méthodes axées sur l'hypolimnion sont à exclure puisque le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié.

Pour conclure monsieur Sloterdijk précise que quelle que soit la solution envisagée, il faut également réduire les apports externes. De plus, avant d'aller plus loin dans le processus de traitement des sédiments, monsieur Sloterdijk conseille d'approfondir le niveau de connaissance quant aux conditions thermiques et à la dynamique du lac, particulièrement l'effet sur le brassage du lac des activités récréatives, du vent et de l'approvisionnement d'eau souterraine.

ANNEXE 4

DESCRIPTION DES DIFFÉRENTS OUTILS ANALYSÉS DE
GESTION *IN SITU* DU PHOSPHORE

Évaluation des outils de gestion *in situ* du phosphore

Dans le cadre du présent mandat, une revue de littérature a été réalisée afin de rechercher des outils de contrôle des apports internes de phosphore dans un plan d'eau. Différentes publications d'organismes gouvernementaux ou privés ont été consultées. L'agence de protection de l'environnement des États-Unis (USEPA) a été une source notable d'informations. Certains rapports faisaient également une revue de littérature, plus ou moins exhaustive, concernant les traitements possibles.

Les ouvrages consultés ont permis d'obtenir de l'information sur les outils de gestion *in situ* du phosphore, sur leurs avantages et leurs inconvénients, leur coût et leur efficacité. Dans la plupart des cas, ces rapports présentaient également des analyses de cas, partout dans le monde.

Une des contraintes à l'application de certains outils de contrôle du phosphore est le cadre légal qui prévaut au Canada et au Québec. Par conséquent, les ministères concernés par ce genre de problématique ont été contactés, à savoir :

Pêches et Océans Canada

Daniel Laroche, biologiste de l'habitat
Conservation de l'habitat du poisson
104, rue Dalhousie
Québec (Québec) G1K 7Y7
Téléphone : (418) 648-7736

L'Agence canadienne d'évaluation
environnementale (ACEE)

Annie Déziel, conseillère principale
Bureau régional du Québec
1141, route de l'Église, 2^e étage
Sainte-Foy (Québec) G1V 4B8
Téléphone : (418) 649-6804

Le ministère de l'Environnement du
Québec (MENV)

Pierre Bellefleur, biologiste
Service de l'analyse et de l'expertise régionale
365, 55^e Rue Ouest
Charlesbourg (Québec) G1H 7M7
Téléphone : (418) 644-8844

Afin d'appuyer l'évaluation des outils, les avis scientifiques des experts consultés sur la pertinence et l'efficacité des outils identifiés ont été pris en considération (annexe 3).

Le résultat de cette recherche est présenté dans des fiches descriptives comprenant les informations suivantes :

- Description (type d'outil de contrôle et description);
- Analyse de l'outil (historique, efficacité, contraintes environnementales, avantages et contraintes techniques, durée des travaux et périodes de réalisation, aspects économiques des travaux, nécessité d'une évaluation environnementale, aspects légaux);
- Avis scientifiques;
- Conclusion (principaux avantages et inconvénients, application au lac Saint-Augustin).

Il est à noter que les coûts présentés dans les fiches descriptives sont fournis à titre indicatif, en fonction de prévisions élaborées par certains organismes. Les coûts d'application de l'outil retenu pour le lac Saint-Augustin devront faire l'objet d'une évaluation plus rigoureuse en tenant compte de l'envergure des travaux.

Les outils identifiés sont :

- Outil 1 : Inactivation du phosphore par floculation
- Outil 2 : Circulation artificielle de l'eau du lac
- Outil 3 : Aération de l'hypolimnion
- Outil 4 : Dilution de l'eau du lac
- Outil 5 : Abaissement du niveau d'eau
- Outil 6 : Dragage des sédiments (excavation)
- Outil 7 : Recouvrement de la surface des sédiments (*capping*)
- Outil 8 : Oxydation des sédiments
- Outil 9 : Pompage des sédiments
- Outil 10 : Pompage de l'eau de l'hypolimnion

OUTIL 1

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	INACTIVATION DU PHOSPHORE PAR FLOCCULATION
Description de la méthode	Des composés chimiques (généralement du sulfate d'aluminium) sont employés pour fixer le phosphore dans la colonne d'eau. Après décantation, le floculat neutralise également le phosphore contenu dans les premiers centimètres des sédiments. ^(1, 2, 3)

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Les premières utilisations de l'inactivation du phosphore, en Suède et au Danemark à la fin des années 60, ont mené à des échecs en raison de mauvais dosages et de l'absence de contrôle des apports externes.⁽³⁾ Cette méthode a été utilisée pour une centaine de lacs aux États-Unis (Massachusetts, Vermont, New Hampshire, Maine, Connecticut) depuis plus de 25 ans.^(1, 3) L'inactivation du phosphore a été réalisée sur des petits lacs (Dug Pond : 0,19 km² et 4,5 m de profondeur moyenne), sur des lacs moyens (Hambin Pond : 0,49 km² et 10,4 m de profondeur moyenne; Ashumet Pond : 0,87 km² et 7,0 m de profondeur moyenne) et sur de grands lacs (Irondequoit Bay : 6,8 km²).^(1, 3)
Efficacité de la méthode	À court terme, cette méthode réduit la quantité de phosphore disponible dans le lac. En quelques heures, elle augmente très rapidement la clarté de l'eau. Ce traitement permet également d'éliminer une bonne proportion d'algues et ainsi d'éviter les blooms.⁽¹⁾ À long terme, le traitement est également très efficace à condition que les apports externes soient contrôlés.⁽¹⁾ La longévité du traitement est estimée à environ 10 ans pour un lac non stratifié et 15 ans pour un lac stratifié.⁽³⁾ Cette méthode pourrait ne pas être efficace dans des lacs peu profonds et non stratifiés, car le vent et les courants pourraient remettre en suspension le phosphore précipité.^(2, 3)
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	L'aluminium est toxique pour les poissons au-delà d'un seuil critique et cette toxicité est amplifiée dans des eaux où le pH n'est pas contrôlé adéquatement. L'aluminium n'est pas toxique pour un pH compris entre 6 et 8. ^(1, 3) Dans le cas du lac Saint-Augustin, le pH varie de 7,4 à 8,7. La concentration sécuritaire d'aluminium réactif dissous est de 50 µg/l. Ce seuil ne peut virtuellement pas être atteint si le pH est maintenu entre 6 et 7,5.⁽¹⁾ Certains traitements, surtout les premiers, ont mené à une mortalité massive de la faune (poissons, herpétofaune et invertébrés) en raison de variations importantes du pH.⁽¹⁾ Le traitement ne semble pas avoir d'effets sur la qualité de l'eau.⁽¹⁾

Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore) (suite)	L'augmentation de la clarté de l'eau favorise les macrophytes, ce qui peut représenter une nuisance supplémentaire. ⁽¹⁾ L'aluminium peut avoir des répercussions sur les personnes qui souffrent de problèmes rénaux. Autrement, l'aluminium est naturellement éliminé de l'organisme. ⁽¹⁾
Avantages techniques	Cette méthode est très efficace dans certains cas. L'application des composés chimiques peut se faire de la surface ou en profondeur. ⁽¹⁾ De nouvelles recherches permettent d'améliorer la technique d'application des composés chimiques. ⁽¹⁾ D'autres composés peuvent remplacer le sel d'aluminium (sulfate ferrique, chlorure ferrique, chaux, carbonate de calcium, etc.). ^(1, 2) Le floculat permet de stabiliser la couche de sédiments ce qui réduit la turbidité. ⁽²⁾ L'inactivation du phosphore est une méthode peu coûteuse et un seul traitement est nécessaire. ⁽²⁾
Contraintes techniques	Il faut que les apports en phosphore (externes et internes) soient bien identifiés car cette méthode s'applique aux lacs dont la source de phosphore est principalement interne (sédiments). ⁽¹⁾ Les apports externes en phosphore doivent être contrôlés pour que l'inactivation par floculation soit efficace à long terme. ⁽¹⁾ La réalisation d'un tel traitement chimique doit tenir compte des caractéristiques morphométriques du lac et des brassages annuels des eaux. ⁽²⁾ L'eau du lac doit être bien tamponnée car des variations importantes de pH ont des effets majeurs sur les poissons et sur les invertébrés. Il est possible d'utiliser des composés chimiques afin de stabiliser le pH. ⁽¹⁾ Il est possible d'appliquer les composés chimiques directement dans l'hypolimnion afin de minimiser les effets sur l'environnement. ⁽¹⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	L'inactivation du phosphore dans le lac Saint-Augustin nécessiterait 10 à 15 jours d'application. ⁽¹⁾ Les travaux doivent être réalisés après la crue printanière (fin juin) mais certains travaux ont eu lieu en septembre. ⁽¹⁾ Un seul traitement est nécessaire et peut être efficace au moins 10 ans. La fréquence de traitement pourrait donc être tous les 10 ans. ⁽³⁾
Aspects économiques des travaux	Les quantités de sulfate d'aluminium nécessaires à ce traitement varient de 5 à 40 mg/l d'eau, mais sont généralement comprises entre 20 et 30 mg/l d'eau. ^(1, 3) Ce traitement représenterait une dépense d'environ 0,15 à 0,30 \$/m ² ⁽⁴⁾ . Toutefois, l'application de nouvelles technologies mène à un coût de 0,09 \$/m ² ⁽³⁾ Projet du lac Saint-Augustin (683 639 m ²): Coût de 0,09 \$/m ² : ~ 65 000 \$ Coût de 0,15 à 0,30 \$/m ² : ~ 102 545 \$ à 205 100 \$ Total estimé pour le projet du lac Saint-Augustin (période de dix ans): ~ 65 000 \$

Évaluation environnementale nécessaire	Puisque le traitement chimique risque de perturber l'habitat du poisson, une évaluation environnementale pourrait être demandée par Environnement Canada.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	Fédéral : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables administrée par Transports Canada. Provincial : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	L'inactivation du phosphore par ajout d'alun serait très efficace pour le lac Saint-Augustin. D'ailleurs des tests en laboratoire montrent que même à faible dose (inférieure à 25 mg/l), la qualité de l'eau est significativement améliorée. D'après madame Galvez-Cloutier, l'aluminium présent en grande quantité dans les sédiments est lié à une structure cristalline. Il n'est donc pas disponible pour se lier au phosphore, même en présence d'oxygène. L'ajout d'alun permettrait de fournir des ions aluminium disponibles pour fixer le phosphore. Ce traitement est actuellement à l'essai dans les laboratoires du département de génie civil, en combinaison avec un recouvrement des sédiments (outil 7).
H. Sloterdijk	L'ajout de chaux représenterait une alternative intéressante à l'alun pour obtenir de meilleurs résultats. En effet, la chaux fixe le phosphore pour former l'apatite, un minéral insoluble. Le phosphore ainsi fixé ne sera plus disponible pour les organismes. L'apatite est plus stable que le floculat formé par l'alun qui se dépose au fond du lac. Ceci est d'autant plus intéressant quand le brassage du lac est notable. D'après monsieur Sloterdijk, l'aluminium présent en grande quantité dans les sédiments serait lié à la structure cristalline de ces derniers. Il n'est donc pas disponible pour se lier au phosphore, même en présence d'oxygène.

CONCLUSION

Principaux avantages	L'inactivation du phosphore est très efficace à long terme, elle est bien documentée et peu coûteuse comparativement à d'autres méthodes.
Principaux inconvénients	Les composés chimiques utilisés peuvent avoir des effets sur la faune et la flore du lac, surtout si le pH n'est pas contrôlé adéquatement.

Application au lac
Saint-Augustin

Les sédiments du lac Saint-Augustin sont très riches en fer et en aluminium.⁽⁵⁾

Un rapport fer/phosphore inférieur à 10/1 indique qu'une quantité non négligeable de phosphore est libre (non fixé au fer), même en condition aérobie.⁽³⁾ Dans le lac Saint-Augustin, il y a, en théorie, suffisamment de fer (rapport de 33/1) et d'aluminium (rapport de 21/1) pour fixer le phosphore présent dans les sédiments.⁽⁵⁾ Les spécialistes consultés considèrent que l'aluminium présent dans les sédiments n'est pas disponible pour fixer le phosphore, même en présence d'oxygène.

Des tests réalisés en laboratoire par l'équipe de madame Galvez-Cloutier donnent des résultats concluant quant à l'efficacité de la méthode (ajout d'alun) pour le lac Saint-Augustin.

- ¹ MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEA Commonwealth of Massachusetts.
- ² UNEP (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).
- ³ BBL (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.
- ⁴ WAGNER, K. J., (2001). *Management techniques within the lake or reservoir. Chapter 7*, p. 215-306 in C. Holdren, W. Jones et J. Taggart, Eds. *Managing lake and reservoirs*. North American Lake Management Society, Terrene Institute and U.S. Environmental Protection Agency, Madison.
- ⁵ CONSORTIUM DDM – PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.

OUTIL 2

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	CIRCULATION ARTIFICIELLE DE L'EAU DU LAC
Description de la méthode	Des pompes et des aérateurs de type éolien sont utilisés afin d'homogénéiser les conditions physicochimiques de l'eau du lac en empêchant la stratification, la formation de milieux stagnants et anoxiques, les blooms d'algues et le relargage de phosphore par les sédiments.

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Cette méthode a d'abord été utilisée au début des années 50 afin d'assurer la survie des poissons en hiver dans des lacs peu profonds et recouverts de glace. Au début des années 60, cette méthode a été employée afin de contrôler les problèmes liés à l'eutrophisation des lacs.⁽¹⁾ C'est une des méthodes les plus fréquentes pour le contrôle de l'eutrophisation et de la qualité de l'eau.⁽²⁾
Efficacité de la méthode	À court terme, cette méthode permet d'augmenter la concentration d'oxygène dissous dans l'eau du lac.⁽¹⁾ À moyen terme, les résultats sont variés. En théorie, cette méthode permet de diminuer la biomasse phytoplanctonique et le relargage de phosphore par les sédiments. La présence d'oxygène et de fer au niveau de l'interface eau-sédiments assure l'adsorption du phosphore dans les sédiments. Mais plus de la moitié des expériences réalisées avant les années 80 se sont soldées par une détérioration des conditions (augmentation de la concentration de phosphore et de la turbidité), comme au Crystal Lake, Minnesota, où la concentration de phosphore a quadruplé.^(2, 3) La circulation entraîne également une augmentation de la température du lac et une oxydation des substances dissoutes.⁽²⁾ À long terme, le traitement est efficace à condition que les apports externes de phosphore soient contrôlés. Dans quelques cas, la concentration de phosphore a augmenté quand le traitement a été arrêté.^(2, 3)
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Les compresseurs et les éoliennes engendrent une nuisance sonore non négligeable, sans compter les risques de blessures pour les personnes qui s'en approcheraient.⁽³⁾ En hiver, l'utilisation de cette méthode retarde la formation de glace et celle-ci est plus mince, ce qui limite certaines activités récréatives (motoneige).⁽³⁾ La circulation artificielle peut entraîner la remise en suspension de sédiments et donc une augmentation de la turbidité et éventuellement un bloom d'algues.^(1, 2, 3) L'oxygénation de l'eau entraîne généralement des modifications dans la composition des communautés animales.⁽³⁾ Puisque la température du lac devient homogène (plus de stratification) les poissons d'eau froide risquent de disparaître.⁽³⁾

Avantages techniques	La circulation de l'eau du lac peut être assurée par un déplacement d'eau, d'air ou des deux. Le mouvement de l'eau est plus efficace mais le mouvement par air permet d'accélérer l'oxygénation du lac. Il est possible d'utiliser de l'oxygène pur à la place de l'air pour augmenter l'efficacité de la méthode.^(2, 3) Les équipements nécessaires à ce traitement peuvent être des éoliennes flottantes.⁽¹⁾ Il est possible de n'aérer que l'hypolimnion afin de limiter les changements d'oxygène et de température dans l'ensemble du lac (voir méthode 3).
Contraintes techniques	Si la solubilité du phosphore est contrôlée par le calcium, et non par le fer, cette méthode peut induire une augmentation de la quantité de phosphore relargué par les sédiments (dans les eaux calcaires par exemple).^(2, 3) La technique est améliorée en utilisant conjointement un composé chimique (comme du fer) capable de fixer le phosphore à l'interface eau-sédiments car il y a toujours une certaine anoxie dans les sédiments, ce qui libère du phosphore.⁽³⁾ La méthode n'est pas efficace dans les lacs eutrophes peu profonds (non stratifiés) où l'interface eau-sédiments est généralement bien oxygénée.⁽²⁾ Les pompes ou les aérateurs doivent être assez puissants.⁽³⁾ Le traitement ne doit pas remettre en suspension des nutriments contenus dans les sédiments car il en résulterait une détérioration des conditions menant à l'eutrophisation.^(1, 2, 3)
Durée des travaux et périodes de réalisation	La durée de la circulation de l'eau est illimitée et peut être restreinte à certaines saisons (printemps, été) ou fonctionner en continu. La fréquence de traitement, dans le cas d'un arrêt de la circulation de l'eau, dépend du maintien de la qualité de l'eau.
Aspects économiques des travaux	Source : Éco-Guide International ⁽⁵⁾ Coûts de l'achat et de l'installation d'éoliennes flottantes ou solaires variant de 2 300 \$ à 16 000 \$, selon le modèle; coût annuel d'entretien environ 500 \$ par éolienne/5 ans 1 éolienne aux 4 ha pour un lac eutrophe; Projet lac Saint-Augustin : Achat et installation de 17 éoliennes à 9 000 \$~ 153 000 \$ Entretien aux 5 ans ~ 500 \$; période de 10 ans : 20 000 \$ Total du projet : ~ 175 000 \$
Évaluation environnementale nécessaire	Si l'installation des aérateurs et leur utilisation sont considérées comme une perturbation de l'habitat du poisson, une évaluation environnementale pourrait être demandée par Pêches et Océans Canada.

Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral</u> : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada.
Aspects légaux (fédéral et provincial) (suite)	<u>Provincial</u> : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	La circulation artificielle du lac Saint-Augustin serait une méthode temporaire, car elle donne des résultats tant qu'elle est appliquée. Selon madame Galvez-Cloutier, l'eau du lac Saint-Augustin est suffisamment oxygénée. Une augmentation de la teneur en oxygène dans l'eau n'aurait pas d'effet significatif sur le relargage du phosphore. Cette méthode ne serait pas appropriée pour le lac Saint-Augustin.
H. Sloterdijk	La circulation artificielle du lac suffirait, en théorie, à éviter les blooms d'algues en empêchant la formation d'une mini-thermocline dans les premiers décimètres de la colonne d'eau, condition nécessaire à la prolifération des cyanobactéries. Toutefois, monsieur Sloterdijk rappelle la réserve émise par le MDDEP quant à l'utilisation de cette méthode.

CONCLUSION

Principaux avantages	La circulation artificielle est une méthode relativement efficace, plus « douce » pour l'environnement que certaines méthodes plus radicales.
Principaux inconvénients	La circulation artificielle est efficace tant qu'on ne l'arrête pas. Le MDDEP a émis plusieurs recommandations concernant l'utilisation de la circulation artificielle de l'eau. Cette méthode n'est pas recommandée ⁽¹⁾ : • pour les lacs eutrophes peu profonds (profondeur moyenne de moins de 3 m); • pour les lacs aux eaux dures et les lacs acides où le relargage du phosphore par les sédiments n'est pas contrôlé par le fer; • pour les lacs où l'apport en phosphore provient surtout de sources externes (bassin versant).

Application au lac Saint-Augustin	D'après les recommandations du MDEP, le lac Saint-Augustin ne serait pas assez profond pour que la circulation artificielle soit efficace. De plus, les premiers mètres de sédiments sont très meubles. L'aération du lac risquerait donc d'entraîner une augmentation de la turbidité. À long terme, cette méthode peut toutefois permettre la compaction des sédiments et leur oxygénation afin de limiter le relargage du phosphore.
-----------------------------------	---

- ¹ MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, (2003). *Avis concernant l'aération ou la circulation artificielle de l'eau des lacs comme mesures de restauration de la qualité de l'eau*, ministère de l'Environnement du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Direction des politiques du secteur municipal et Direction régionale de l'Estrie, Québec.
- ² BBL, (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.
- ³ MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEa Commonwealth of Massachusetts.
- ⁴ COOKE, G. D., E. B. WELCH, S. A. PETERSON et P. R. NEWROTH, (1993). *Restoration and management of lakes and reservoirs*, Second Edition. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- ⁵ ÉCO-GUIDE INTERNATIONAL
L'éolienne flottante. www.lake2000.com/Eco-Guide_aerateurs.htm
146, rue Dalesville, Brownsburg-Chatham (Québec) J8G-1H4
Tél. : (450) 533-9191 ou sans frais au 1-866-411-9191

OUTIL 3

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	AÉRATION (OXYGÉNATION) DE L'HYPOLIMNION
Description de la méthode	Cette méthode est une variante de la circulation artificielle qui permet d'oxygéner l'eau en profondeur, à l'aide de pompes et d'aérateurs, tout en conservant la stratification du lac.

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	L'aération de l'hypolimnion est une technique d'aménagement des lacs et des réservoirs développée en Autriche.⁽¹⁾ Cette méthode est également utilisée en Amérique du Nord depuis plus de 15 ans ⁽²⁾ de même qu'en Scandinavie.⁽³⁾ Depuis juin 2002, le lac Carré, situé dans les Laurentides, fait l'objet d'une aération de son hypolimnion, ce qui représente une expérience unique au Québec.⁽⁴⁾
Efficacité de la méthode	L'augmentation de la teneur en oxygène dans l'hypolimnion permet de réduire le relargage de phosphore par les sédiments ⁽²⁾. Les résultats sont généralement meilleurs que la circulation artificielle de l'eau, mais ils demeurent variables. À la suite de l'aération de l'hypolimnion, la quantité de phosphore disponible diminue graduellement. En revanche, dès que l'aération cesse, la concentration de phosphore augmente rapidement.⁽²⁾ L'aération s'est avérée efficace dans des réservoirs d'eau potable ayant une faible surface d'échange eau-sédiments, et où le fer et le manganèse étaient présents pour fixer le phosphore.⁽³⁾ Cette méthode a également donné de bons résultats pour des lacs dont les sédiments étaient riches en fer. En milieu aérobie, le phosphore se fixe au fer et n'est plus disponible pour les algues.⁽³⁾ Au lac Carré, dans les Laurentides, près du Mont-Tremblant, les conditions se sont améliorées, surtout en ce qui concerne l'expansion du myriophylle à épi, une plante envahissante. Toutefois, les résultats sont variables en ce qui a trait à la concentration de phosphore dans l'eau.⁽⁴⁾
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	L'aération de l'hypolimnion a très peu d'effets négatifs sur l'environnement.⁽²⁾ Les compresseurs engendrent une nuisance sonore non négligeable, sans compter les risques de blessures pour les personnes qui s'en approcheraient.⁽²⁾ L'oxygénation de l'eau entraîne généralement des modifications dans la composition des communautés animales.⁽²⁾
Avantages techniques	Contrairement à la circulation artificielle de l'eau (méthode 2), l'aération de l'hypolimnion permet de conserver la stratification et ainsi de maintenir un abri pour les poissons. De plus, l'hypolimnion conserve sa température, ce qui protège les poissons d'eau froide.⁽²⁾

Contraintes techniques	La technique est plus efficace dans des lacs où le fer contrôle la fixation du phosphore, car il y a toujours une certaine anoxie dans les sédiments, ce qui libère du phosphore.⁽¹⁾ Il est possible d'utiliser conjointement un composé chimique capable de fixer le phosphore à l'interface eau-sédiments.⁽²⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	La durée de l'aération de l'hypolimnion est illimitée et peut être restreinte à certaines saisons (printemps, été) ou fonctionner en continu. La fréquence de traitement, dans le cas d'un arrêt de l'aération de l'hypolimnion, dépend du maintien de la qualité de l'eau.
Aspects économiques des travaux	Source : Cooke et al., (1993) ⁽³⁾ Coûts d'installation du système d'aération de l'eau variant de 2 300 \$ à 9 150 \$/ha et coût annuel d'entretien variant de 166 \$ à 660 \$/ha Projet lac Saint-Augustin (68 ha) : Achat et installation : ~ 156 400 \$ à 622 200 \$ Entretien annuel : ~ 11 290 \$ à 44 880 \$ Période de 10 ans : ~ 112 900 \$ à 448 800 \$ Total du projet : ~ 1 100 000 \$
Évaluation environnementale nécessaire	Si l'installation des aérateurs et leur utilisation sont considérées comme une perturbation de l'habitat du poisson, une évaluation environnementale pourrait être demandée par Pêches et Océans Canada.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	L'aération de l'hypolimnion ne serait pas une méthode efficace au lac Saint-Augustin car ce dernier n'est pas strausifié. De plus, comme la circulation artificielle, cette méthode est temporaire et les effets bénéfiques cessent dès qu'elle est arrêtée. Une augmentation de la teneur en oxygène dans l'eau du fond du lac n'aurait pas d'effet significatif sur le relargage du phosphore. Cette méthode ne serait pas appropriée pour le lac Saint-Augustin.

H. Sloterdijk	L'aération de l'hypolimnion ne serait pas une méthode efficace car le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié.
---------------	---

CONCLUSION

Principaux avantages	L'aération de l'hypolimnion permet de conserver la stratification et de limiter les effets de l'homogénéisation des conditions dans le lac.
Principaux inconvénients	Cette méthode est efficace tant qu'on ne l'arrête pas. Les résultats sont très variables d'un lac à l'autre. Il est donc difficile de prévoir avec certitude l'efficacité de la méthode.
Application au lac Saint-Augustin	Le lac Saint-Augustin ne connaît pas de stratification thermique à proprement parlé ⁶ . Par conséquent, l'aération de l'hypolimnion ne représente pas une solution pour ce lac.

- ¹ MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, (2003). *Avis concernant l'aération ou la circulation artificielle de l'eau des lacs comme mesures de restauration de la qualité de l'eau*, ministère de l'Environnement du Québec, Direction du suivi de l'état de l'environnement, Direction des politiques du secteur municipal et Direction régionale de l'Estric, Québec.
- ² MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOE Commonwealth of Massachusetts.
- ³ UNEP, (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).
- ⁴ BOIRE-LAVIGNE, C., (2004). *3^e rapport sur l'utilisation d'un oxygénateur de l'hypolimnion (Speece cone) au lac Carré*, rapport préparé pour la municipalité de Saint-Faustin-Lac-Carré, Québec.
- ⁵ COOKE, G. D., E. B. WELCH, S. A. PETERSON et P. R. NEWROTH, (1993). *Restoration and management of lakes and reservoirs*, Second Edition, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- ⁶ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.

OUTIL 4

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	DILUTION DE L'EAU DU LAC
Description de la méthode	Cette méthode vise à réduire la concentration de phosphore dans le lac en ajoutant des quantités importantes d'eau pauvre en phosphore. ⁽¹⁾

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Cette méthode a été peu utilisée en raison de la contrainte d'avoir une source importante d'eau pauvre en phosphore. Moses Lake, Washington, est un bon exemple : l'eau de la rivière Columbia a été dérivée pour renouveler l'eau du lac de 10 % à 20 % par jour, au début des années 80. Les blooms d'algues ont grandement diminué et l'eau s'est éclaircie.⁽¹⁾ Le lac urbain Lago Paranoá, au Brésil, fait l'objet de traitements divers depuis 1975, dont une augmentation drastique du débit (<i>flushing</i>), associée à une réduction du niveau du lac. Ce traitement a permis de réduire la turbidité de l'eau et la prolifération de cyanobactéries.⁽²⁾
Efficacité de la méthode	L'efficacité de cette méthode dépend de la charge en phosphore du lac. À court terme, la diminution de la concentration de phosphore permet de limiter la croissance des algues et d'éviter un bloom. Ce résultat est bonifié par l'élimination d'algues en augmentant le débit du lac (<i>flushing</i>).⁽¹⁾ Peu d'études permettent d'évaluer les résultats à long terme de la dilution. Cette méthode semble efficace tant qu'elle est appliquée, mais la concentration de phosphore risque d'augmenter rapidement à l'arrêt de la dilution, en fonction de l'importance des apports internes et externes.⁽¹⁾
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Les effets de la dilution sur l'environnement sont généralement bénéfiques au niveau du lac lui-même, en raison de l'amélioration des conditions (diminution de la concentration de phosphore et de la turbidité).¹ La dilution peut entraîner des changements dans la composition des communautés à la suite de l'amélioration des conditions de vie.⁽¹⁾ Les effets peuvent se faire sentir en aval, si l'eau à la décharge du lac, par exemple, est pauvre en oxygène ou riche en nutriments.¹
Avantages techniques	La dilution permet de diminuer la concentration de phosphore dans le lac.⁽¹⁾ L'ajout d'eau peut entraîner un rinçage du lac (<i>flushing</i>), en éliminant de bonnes quantités d'algues nuisibles et de phosphores.⁽¹⁾
Contraintes techniques	Il faut trouver une source importante d'eau de bonne qualité, ce qui peut représenter un coût important dans certains cas.⁽¹⁾

Contraintes techniques (suite)	L'apport en eau peut être assuré par le pompage ou la dérivation d'une source alternative telle qu'une rivière, un lac, le réseau d'aqueduc, etc. Le fleuve Saint-Laurent représente une source importante d'apports. La dilution ne diminue pas la quantité absolue de phosphore, mais elle réduit sa concentration ce qui ralentit la croissance des algues.⁽³⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	La durée la dilution de l'eau du lac est illimitée et le système fonctionne toute l'année, en continu.⁽¹⁾
Aspects économiques des travaux	Source : Wagner (2001) ⁽³⁾ Mise en place du système de dérivation et de dilution représentant un coût de 0,15 \$ à 0,75 \$/m² Coût d'application de cette méthode se situant entre 1,51 \$ et 7,60 \$/m², si l'eau pauvre en phosphore doit être pompée et canalisée pour être acheminée et traitée. Source : Génium ⁽⁴⁾ Travaux de construction d'un poste de pompage, alimentation électrique, aqueduc, voirie évalués à ~ 1 915 500 \$. Projet lac Saint-Augustin Selon les données de Wagner les coûts pourraient varier entre 1 032 295 \$ et 5 195 655 \$ Selon les données de Génium les coûts seraient de l'ordre de 1 915 500 \$.
Évaluation environnementale nécessaire	Si la dilution de l'eau du lac est considérée comme une perturbation de l'habitat du poisson, une évaluation environnementale pourrait être demandée par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. Le détournement d'une rivière nécessite une évaluation environnementale en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement du gouvernement du Québec. La législation provinciale est différente s'il s'agit d'une source souterraine.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	La dilution de l'eau du lac Saint-Augustin serait une méthode temporaire, car elle ne donne des résultats que tant qu'elle est appliquée. Cette méthode ne serait pas appropriée pour le lac Saint-Augustin.

CONCLUSION

Principaux avantages	La dilution de l'eau du lac représente une méthode peu stressante pour la faune et la flore.
Principaux inconvénients	Il est souvent difficile de trouver une source d'eau pauvre en phosphore et la dérivation de cette source peut être très coûteuse. Cette méthode est efficace tant qu'on ne l'arrête pas, car la quantité absolue de phosphore n'est pas réduite, elle n'est que diluée.
Application au lac Saint-Augustin	La principale limite de cette méthode pour le lac Saint-Augustin est la disponibilité d'une source importante d'eau, qui plus est, pauvre en phosphore. Le fleuve Saint-Laurent représenterait un apport important et ne causerait pas de préjudices à l'écosystème lacustre (voir annexe 5). Toutefois, l'utilisation de l'eau du fleuve pourrait susciter des craintes chez les utilisateurs du lac.

¹ MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEA Commonwealth of Massachusetts.

² UNEP, (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).

³ WAGNER, K. J., (2001). *Management techniques within the lake or reservoir. Chapter 7*, p. 215-306 in C. Holdren, W. Jones et J. Taggart, Eds. *Managing lake and reservoirs*. North American Lake Management Society, Terrene Institute and U.S. Environmental Protection Agency, Madison.

⁴ GÉNIUM, (2005). *Remédiation lac Saint-Augustin. Estimation budgétaire des coûts des outils 4 (dilution de l'eau du lac) et 5 (abaissement du niveau d'eau du lac)*. Consultants Génium inc., 780, boul. Saint-Joseph, 2^e étage, Québec (Québec) G2K 1W6, téléphone : (418) 648-8619, télécopieur : (418) 648-8724, courriel : info@genium.ca

OUTIL 5

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	ABAISSEMENT DU NIVEAU D'EAU
Description de la méthode	Cette méthode consiste à baisser le niveau du lac afin de permettre l'oxydation, l'assèchement et la compaction des sédiments, ce qui limite la quantité de nutriments disponibles dans l'eau. ⁽¹⁾

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Au cours des années 60, cette méthode était employée dans le cadre d'aménagements pour la sauvagine afin d'améliorer la qualité des milieux humides pour la reproduction et l'alimentation.⁽¹⁾ Par la suite, cette méthode a surtout été employée pour le contrôle de la végétation dans des lacs utilisés pour des activités récréotouristiques.⁽¹⁾ Le lac urbain Lago Paranoá, au Brésil, fait l'objet de traitements divers depuis 1975, dont l'abaissement du niveau à la fin de la saison sèche, à la suite d'une augmentation drastique du débit du lac (<i>flushing</i>). L'eau de pluie permet ensuite au lac de revenir à son niveau initial. Ce traitement a permis de réduire la turbidité de l'eau et de réduire la prolifération de cyanobactéries.⁽²⁾
Efficacité de la méthode	L'abaissement du niveau de l'eau et l'exposition des sédiments à l'air entraînent une oxydation et une compaction de ceux-ci, ce qui diminue leur demande en oxygène et le taux de relargage de phosphore à long terme.⁽³⁾ La baisse du niveau de l'eau est davantage utilisée pour le contrôle des plantes envahissantes. Les résultats varient en fonction du type de dépôt riverain et de la pente.⁽¹⁾ Les expériences antérieures montrent que la baisse du niveau de l'eau n'entraîne pas nécessairement une baisse de la quantité de phosphore disponible. Cette méthode peut même mener à une augmentation du phosphore disponible à la suite de la décomposition de la matière organique des sédiments.⁽¹⁾ La méthode est peu efficace quand la couche de sédiments est épaisse, car l'assèchement et l'oxydation sont alors négligeables.⁽¹⁾
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Cette méthode entraîne des changements dans la composition des communautés végétales, quelquefois aux dépens d'espèces rares ou d'intérêt.⁽¹⁾ Certaines espèces végétales indésirables peuvent prendre de l'expansion dans de telles conditions.⁽¹⁾ La concentration d'oxygène dissous peut diminuer au moment du remplissage du lac, ce qui nuit aux poissons.⁽¹⁾ L'assèchement et le gel des berges peuvent entraîner la mort de certains animaux en hibernation.⁽¹⁾

Avantages techniques	Cette méthode permet de réduire la quantité de phosphore disponible dans la colonne d'eau. Ceci limite la croissance des algues et se traduit par une baisse de leur biomasse.⁽¹⁾ Lorsque le niveau est bas, cette méthode permet d'entretenir les berges afin d'éviter l'érosion, de contrôler certaines plantes de rivage (salicaires), de réparer certaines installations, notamment les installations septiques.⁽²⁾ L'abaissement du niveau de l'eau permet de restaurer les habitats riverains favorables à la faune riveraine et à certaines espèces de poissons.⁽¹⁾
Contraintes techniques	L'abaissement du niveau du lac entraîne des changements du réseau hydrique situé en aval.⁽¹⁾ Il faut aménager une structure à la décharge du lac qui permette de contrôler le niveau du lac.⁽³⁾ Cette méthode peut également entraîner une augmentation de la disponibilité en nutriments.⁽¹⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	La baisse du niveau de l'eau est généralement réalisée en automne, en contrôlant le débit à la charge et/ou à la décharge du lac. Le bas niveau est maintenu pendant plusieurs mois au cours de l'hiver.⁽¹⁾ Ce traitement est généralement réalisé sur plusieurs années consécutives (3 dans le cas du lac Lashaway au Massachusetts) jusqu'à ce que la qualité de l'eau s'améliore de façon significative.⁽¹⁾
Aspects économiques des travaux	Le coût de réalisation de ce traitement est variable selon le mode de contrôle de débit à la charge et/ou à la décharge du lac.⁽¹⁾ Le coût total de traitement du lac Lashaway, Massachusetts, deux fois plus grand que le lac Saint-Augustin (1,2 km²), représente 487 000 \$.⁽¹⁾ En théorie, la construction d'installations à la décharge du lac représenterait environ 125 000 \$. Les coûts d'exploitation et d'entretien varieraient de 3 700 \$ à 12 500 \$.⁽¹⁾ Source Génium ⁽⁵⁾ Projet lac Saint-Augustin : Travaux de construction d'un poste de pompage, aqueduc et voirie évalués à 1 317 500 \$ Dans le cas du lac Saint-Augustin, l'abaissement du niveau de l'eau d'au moins 3 m du niveau de l'eau représenterait un coût élevé, compte tenu de la pente des berges.
Évaluation environnementale nécessaire	L'abaissement du niveau d'eau, en affectant les berges du lac, perturbe l'habitat du poisson. Ce traitement requiert donc une évaluation environnementale pour Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. La construction d'un ouvrage régulateur du niveau de l'eau nécessite une évaluation environnementale en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement du gouvernement du Québec.

Aspects légaux (fédéral et provincial)	Fédéral : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. Provincial : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement. L'utilisation d'un ouvrage régulateur est soumise à la Loi sur la sécurité des barrages et la Loi sur le régime des eaux.
--	---

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	L'abaissement du niveau de l'eau du lac Saint-Augustin serait une méthode temporaire, car elle donne des résultats tant qu'elle est appliquée. De plus, les berges du lac sont très pentues, ce qui limite la surface de sédiments exposée à l'air. Cette méthode ne serait pas appropriée pour le lac Saint-Augustin.
H. Sloterdijk	L'abaissement du niveau de l'eau pourrait constituer un prétraitement afin de compacter les sédiments avant l'application d'autres méthodes. Toutefois, cette méthode ne se prêterait pas au lac Saint-Augustin en raison de sa superficie et des pentes fortes des berges.

CONCLUSION

Principaux avantages	Cette méthode peut s'avérer peu coûteuse dans certaines conditions où la régulation du niveau de l'eau ne demanderait pas de travaux de grande envergure (ce qui n'est pas le cas du lac Saint-Augustin).
Principaux inconvénients	À moins d'assécher le lac au complet, cette méthode est peu efficace en ce qui concerne la charge interne de phosphore.
Application au lac Saint-Augustin	En raison de la bathymétrie du lac, l'abaissement du niveau de l'eau ne permettrait d'exposer que très peu de sédiments. En effet, les pentes de la berme sont relativement fortes.⁽¹⁾ L'application de cette méthode serait donc très coûteuse pour le lac Saint-Augustin.

¹ MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEA Commonwealth of Massachusetts.

- ² UNEP, (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).
- ³ WAGNER, K. J., (2001). *Management techniques within the lake or reservoir. Chapter 7*, p. 215-306 in C. Holdren, W. Jones et J. Taggart, Eds. *Managing lake and reservoirs*. North American Lake Management Society, Terrene Institute and U.S. Environmental Protection Agency, Madison.
- ⁴ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.
- ⁵ GÉNIUM, (2005). *Remédiation lac Saint-Augustin. Estimation budgétaire des coûts des outils 4 (dilution de l'eau du lac) et 5 (abaissement du niveau d'eau du lac)*. Consultants Génium inc., 780, boul. Saint-Joseph, 2^e étage, Québec (Québec) G2K 1W6, téléphone : (418) 648-8619, télécopieur : (418) 648-8724, courriel : info@genium.ca

OUTIL 6

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	DRAGAGE DES SÉDIMENTS (EXCAVATION)
Description de la méthode	Les sédiments sont extraits du lac, en totalité ou partiellement, par différentes techniques éprouvées ou encore en développement : • par excavation sèche (<i>dry excavation</i>), où le lac est vidé afin de retirer les sédiments à l'aide de bulldozers, grues, pelles mécaniques.⁽¹⁾ • par excavation humide (<i>wet excavation</i>), où le niveau du lac est légèrement baissé pour retirer les sédiments à l'aide d'engins amphibies ou de grues.^(1, 2)

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Le dragage des sédiments a souvent eu comme objectif d'augmenter la profondeur de lacs pour la pêche ou pour la navigation. Depuis plusieurs décennies, cette méthode est utilisée afin de retirer les nutriments contenus dans les sédiments responsables des blooms d'algues ou de la croissance de macrophytes.^(1, 3) Un des cas les plus documentés est le lac Trummen, en Suède, où le dragage humide a mené à une amélioration de la qualité de l'eau. En république tchèque, le dragage humide de 330 000 m³ de sédiments du lac Vajgar a mené à une amélioration de la qualité de l'eau et à une limitation des blooms d'algues bleues. Ces conditions ne se sont pas maintenues plus de 5 ans puisque les apports externes en phosphores n'ont pas été réduits.⁽⁴⁾ Le dragage est généralement utilisé dans des contextes autres que le traitement de sédiments contaminés par du phosphore (entretien de la voie navigable). La plupart des projets touchant à ce type de sédiments ont privilégié l'excavation hydraulique (pompage des sédiments : méthode 9).⁽²⁾
Efficacité de la méthode	Le dragage, sec ou humide, est efficace à condition que les apports en phosphore proviennent principalement des sédiments, et que les apports externes fassent l'objet de mesures visant à les réduire.⁽⁴⁾ L'excavation sèche est plus efficace et donne généralement de meilleurs résultats. L'excavation humide est préférée lorsqu'il est impossible de vider le milieu, dans le cas d'une baie par exemple.⁽¹⁾ L'efficacité du dragage humide serait limitée dans le cas de sédiments meubles, à haute teneur en eau. Le dragage hydraulique serait une alternative dans ce cas (méthode 9).⁽³⁾ L'efficacité du dragage humide est améliorée et la qualité de l'eau augmente plus rapidement en réalisant un traitement chimique (alun) afin de fixer le phosphore résiduel remis en suspension par le dragage.⁽³⁾

Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Les effets à court terme d'une excavation sèche sont majeurs mais peuvent être atténués en asséchant le lac par sections (sauf que cela augmente considérablement les coûts).⁽¹⁾ Les tributaires doivent être détournés ou canalisés durant les travaux d'excavation.⁽¹⁾ L'excavation humide entraîne une forte augmentation de la turbidité de l'eau et des précautions doivent être prises afin de limiter le déversement de sédiments et de nutriments en aval du lac.^(1, 2, 3) Les organismes benthiques sont généralement détruits par le dragage humide des sédiments, de même que les larves qui s'y développent. Après ce traitement, il peut être nécessaire de replanter certaines espèces et d'ensemencer le lac.^(1, 3) L'entreposage des sédiments excavés dans des champs d'épandage (afin qu'ils sèchent) peut mener à une contamination des sols s'ils contiennent, par exemple, des métaux lourds.
Avantages techniques	Le dragage augmente la profondeur et le volume du lac et permet de revenir en arrière dans l'évolution naturelle.^(1, 3) Le dragage réduit les réserves de nutriments, entre autres de phosphore, et permet de les diluer en raison de l'augmentation du volume du lac.^(1, 4) Le dragage mécanique est la méthode la plus efficace pour des sédiments formés de sables, d'argile ou de limons.⁽⁵⁾ Le dragage peut permettre de restaurer des habitats pour les poissons d'eau froide (frayères).⁽¹⁾ Le dragage peut être suivi d'un traitement à l'alun (méthode 1) afin de contrôler et de fixer le phosphore résiduel, éventuellement remis en suspension.⁽³⁾ Les sédiments peuvent être vendus, ce qui peut réduire les coûts. Ils peuvent être épandus sur des sols pauvres en nutriments, à condition qu'ils ne contiennent pas de composés toxiques.^(2, 4) Les méthodes de dragage sont bien connues et bien documentées, ce qui facilite leur choix selon la quantité de sédiments, la vitesse de dragage, le risque de remise en suspension des particules, etc.^(2, 4)
Contraintes techniques	Selon la technique employée, la faune et la flore du lac peuvent subir des effets négatifs.^(1, 3) Le dragage humide peut entraîner une augmentation importante, mais temporaire, de la turbidité.^(1, 2, 3, 4, 5) Les sédiments peuvent être traités et recyclés. La principale contrainte associée à cette technique est leur entreposage dans des champs d'épandage. ⁽¹⁾ L'eau extraite des sédiments doit séjourner dans un bassin de rétention avant d'être retournée au lac.⁽¹⁾ La quantité d'eau dans les sédiments influence grandement le coût du dragage.⁽³⁾

Contraintes techniques (suite)	L'excavation sèche comporte beaucoup de risques concernant l'efficacité de la vidange du lac (complète ou par section), la capacité à retirer les sédiments en fonction de la quantité d'eau résiduelle, et la disponibilité d'un site d'épandage pour le traitement des sédiments.⁽³⁾ Le dragage, sec ou humide, n'est pas adapté aux grands lacs, car les sédiments doivent être acheminés jusqu'à la rive.^(3, 5) Durant les travaux, le lac n'est pas utilisable par les plaisanciers et les utilisateurs.^(1, 3)
Durée des travaux et périodes de réalisation	La durée des travaux varie en fonction de la superficie du lac et de la quantité de sédiments à extraire. Il peut y avoir un intérêt à réaliser les travaux en hiver, car des sédiments gelés se manipulent et se transportent mieux. Le dragage des sédiments est efficace pour de nombreuses années, à moins que le taux de sédimentation soit élevé. Dans le contexte actuel, un seul dragage serait nécessaire pour traiter le problème des apports internes de phosphore dans le lac Saint-Augustin. Si les apports externes sont bien contrôlés, aucun autre dragage n'est à prévoir.
Aspects économiques des travaux	Source : Mattson et al., (2003) ⁽¹⁾ Travaux d'excavation à sec de l'ordre de 7 \$ à 10 \$/m³ de sédiments; Travaux d'excavation humide environ 16 \$/m³ Projet lac Saint-Augustin : Quantité de sédiments 700 000 m³ Total du projet : excavation à sec ~ 8 800 000 \$ Total du projet : excavation humide ~ 14 100 000 \$
Évaluation environnementale nécessaire	Une évaluation environnementale est nécessaire pour Pêches et Océans Canada, Environnement Canada et Transports Canada. Une évaluation environnementale est nécessaire en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement du gouvernement du Québec.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral :</u> Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. <u>Provincial :</u> Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	Le dragage des sédiments ne serait pas une méthode appropriée pour le lac Saint-Augustin en raison de la charge possible en métaux lourds de ces sédiments. Selon le niveau de contamination, leur gestion pourrait nécessiter des coûts importants.

CONCLUSION

Principaux avantages	L'excavation permet de restaurer un lac dans des conditions originales, avant l'accumulation de sédiments.
Principaux inconvénients	L'excavation est très coûteuse et très néfaste à court terme pour la faune et la flore du lac et en aval. Les travaux peuvent déranger les riverains.
Application au lac Saint-Augustin	En raison de la présence de nombreuses résidences tout autour du lac, des travaux de dragage représenteraient un dérangement important de la population. De plus, les sédiments riches en phosphore sont relativement meubles, à haute teneur en eau (plus de 90 %). ⁽⁶⁾ Par conséquent, l'excavation humide ne serait pas efficace car les engins utilisés ne peuvent excaver ce type de sédiments. ⁽³⁾ Le dragage sec serait plus efficace, mais il entraîne davantage d'impacts sur l'environnement. De plus, la vidange complète du lac nécessiterait des travaux importants au niveau de sa décharge.

¹ MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEA Commonwealth of Massachusetts.

² AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE, (2004). *Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*, rapport développé par l'Agence de l'eau Artois-Picardie, In Vivo inc. et le Pôle de compétence des sites et sédiments pollués.

³ BBL, (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.

⁴ UNEP, (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).

⁵ AMBLER, N., J. HALL, M. PETERS, K. D. RUDNITSKI, et E. SPEELMAN, (1998). *St. Mary's Remedial Action Plan: Remediation of Contaminated Sediments*, Environmental Science Colloquium, University of Guelph, Guelph.

⁶ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.

OUTIL 7

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	RECOUVREMENT DE LA SURFACE DES SÉDIMENTS (CAPPING)
Description de la méthode	Cette méthode consiste à déposer une ou plusieurs couches de matériaux (sédiments pauvres en nutriments, sable, gravier, membrane géotextile) au niveau de l'interface eau-sédiments afin d'être imperméable au phosphore.⁽¹⁾ Une variante encore expérimentale à cette méthode consiste à prélever des sédiments sablonneux en profondeur (moins riches en nutriments) pour l'étendre au-dessus des sédiments riches en nutriments (<i>reverse layering</i>).⁽²⁾ Ce traitement permet de minimiser le relargage de phosphore par les sédiments et de les stabiliser vis-à-vis de l'érosion.⁽³⁾

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Le recouvrement des sédiments est une technique récemment exploitée afin de limiter l'apport interne en nutriments dans les lacs eutrophes. Cette méthode est également utilisée afin de traiter les sédiments extraits du fond des lacs par excavation.⁽¹⁾ Les expériences de recouvrement des sédiments proviennent notamment du Japon, des États-Unis et du Canada.⁽¹⁾ Cette méthode fait encore l'objet de recherches et de développement afin d'améliorer l'efficacité et de simplifier l'utilisation.⁽³⁾
Efficacité de la méthode	Le recouvrement des sédiments serait une technique efficace à long terme pour empêcher le relargage de phosphore.⁽¹⁾ À long terme, la diminution de la concentration de phosphore devrait limiter la prolifération des algues et ainsi éviter les blooms.⁽²⁾ Cette méthode est adaptée surtout aux petits et moyens lacs.⁽⁴⁾ Beaucoup d'études en laboratoire visent à développer de nouveaux assemblages de matériaux dans le but d'améliorer l'efficacité et la longévité des couches de matériaux utilisés.⁽³⁾
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	La méthode perturbe les organismes benthiques sans toutefois les tuer. Les effets à long terme ne sont pas documentés puisque cette méthode est relativement récente.^(1, 2) L'inversion de couches de matériaux peut entraîner une augmentation temporairement la turbidité de l'eau.⁽²⁾
Avantages techniques	La quantité de sédiments et leur richesse n'est pas limitante pour l'utilisation de cette méthode.⁽¹⁾ Différents moyens d'application existent, mais typiquement, les matériaux sont transportés sur des barges. Ils peuvent être appliqués à partir de la surface (en utilisant des pelles mécaniques ou des convoyeurs) ou directement au fond du lac (en utilisant des épandeurs, des diffuseurs submergés ou des tubes).⁽³⁾

Avantages techniques (suite)	L'application de matériaux dans le fond du lac peut permettre de limiter la croissance de certaines plantes envahissantes.⁽¹⁾ Des matériaux plus grossiers peuvent être déposés par-dessus la couche imperméable au phosphore afin de la stabiliser davantage (<i>armoring</i>). Cette technique permet de lutter contre les forces hydrodynamiques, qui entraînent l'érosion des sédiments, et contre les organismes aquatiques.^(1, 3) Cette méthode permet de traiter certaines zones, préalablement identifiées, où les concentrations de phosphore sont les plus importantes. Cependant, une telle stratégie ne donne pas d'aussi bons résultats que le traitement du lac au complet.⁽⁴⁾
Contraintes techniques	Les couches de matériaux vont légèrement réduire la profondeur du lac, ce qui pourrait limiter les activités nautiques ultérieures. L'épaisseur de ces couches varie traditionnellement entre 30 cm et 90 cm.⁽³⁾ Toutefois, dans le cas du lac Saint-Augustin, cette couche de matériaux serait de l'ordre de 10 cm. L'épandage des matériaux dans le fond du lac requiert des méthodes et du matériel encore en développement afin de constituer des couches uniformes.^(1, 4) Si les sédiments sont trop meubles, c'est-à-dire qu'ils contiennent beaucoup d'eau, les matériaux ne resteront pas à l'interface eau-sédiments; ceux-ci vont se stabiliser plus en profondeur, en dessous des sédiments les plus riches en phosphore.^(2, 3) L'inversion de couches est une méthode applicable à certains lacs glaciaires où les sédiments riches en phosphore reposent sur un sol sablonneux, comme en Nouvelle-Angleterre.⁽²⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	La durée des travaux est variable en fonction de la superficie du lac et de la quantité de matériaux à étendre sur les sédiments. Si les matériaux restent en place au fond du lac, le recouvrement des sédiments ne serait réalisé qu'une fois. En revanche, il pourrait être nécessaire d'ajouter des matériaux s'il s'avère que la couche initiale n'est plus imperméable. Un suivi de l'efficacité de ce traitement est donc recommandé.
Aspects économiques des travaux	L'épandage de sédiments à Denny Way, Seattle, Washington, a coûté environ 5 \$/m³ de matériaux. Le recouvrement des sédiments par 50 cm de matériaux à Hamilton Harbour, Ontario, pour une superficie de 10 000 m², a coûté 795 000 CAN \$.⁽⁴⁾ Source : BBL (2001) Environ 122,5 \$/m³ de matériaux sans traitement des sédiments contaminés Projet lac Saint-Augustin : 683 639 m², recouvrement de 10 cm de matériaux (68 363 m³) Total du projet : ~ 8 374 575 \$

Aspects économiques des travaux (suite)	Source : Industries Normrock (Amphibex) Projet lac Saint-Augustin : 683 639 m², recouvrement de 10 cm de matériaux Total du projet : - 6 000 000 \$ Source : Palermo et al., (2002) ⁽⁴⁾ Recouvrement de 7 acres de sédiments non consolidés (600 000 \$) Projet lac Saint-Augustin : 68 ha (168 acres), recouvrement de 10 cm de matériaux Total du projet : - 14 400 000 \$
Évaluation environnementale nécessaire	Puisque le recouvrement des sédiments par des matériaux est susceptible de perturber l'habitat du poisson, une étude environnementale pourrait être exigée par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada. Si ce traitement est considéré comme un remblai par le ministère de l'Environnement du Québec, une évaluation environnementale sera nécessaire en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral</u> : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. <u>Provincial</u> : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.
AVIS SCIENTIFIQUE	
Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	Le recouvrement des sédiments par des matériaux est la méthode privilégiée par son laboratoire de recherche. Madame Galvez-Cloutier propose de constituer une barrière active capable d'agir comme barrière physique et également chimique en fixant le phosphore. Ce procédé s'adapterait même aux conditions particulières du lac Saint-Augustin telles que l'apport important en eau souterraine, la haute teneur en eau des sédiments, l'utilisation récréative.
CONCLUSION	
Principaux avantages	Cette méthode est relativement complexe et peut s'avérer plus coûteuse que plusieurs autres alternatives, en fonction de la quantité et du prix des matériaux nécessaires.

Principaux inconvénients	L'épandage des matériaux au fond du lac est délicat et souvent, l'épaisseur des couches n'est pas homogène. Il est difficile d'appliquer les matériaux afin d'obtenir des couches uniformes.
Application au lac Saint-Augustin	Les premiers mètres de sédiments sont peu denses et contiennent donc une très grande proportion d'eau (plus de 90 %) ⁵ . Selon les études réalisées par l'Université Laval, en déposant au fond du lac une double couche de matériaux, composée de roches calcaires et de sable, on assure une précipitation du phosphore. Toutefois, cet outil est encore au stade de développement. Par ailleurs, les caractéristiques morphométriques du lac Saint-Augustin pourraient rendre difficile l'application de cette technique.

¹ USEPA, (1994). *Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS). Remediation guidance document*, U.S. Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, Chicago.

² MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEa Commonwealth of Massachusetts.

³ BBL, (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.

⁴ UNEP, (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).

⁵ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.

⁶ PALERMO, MICHAEL, R., T. A. THOMPSON et F. SWED (2002). *White Paper No 6B- In Situ Capping as a Remedy Component for the Lower Fox River*, response to a document by The Johnson Company - Ecosystem-Based Rehabilitation Plan - an Integrated Plan for Habitat Enhancement and Expedited Exposure Reduction in the Lower Fox River and Green Bay, January.

OUTIL 8

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	OXYDATION DES SÉDIMENTS
Description de la méthode	Cette méthode consiste à stimuler l'oxydation des sédiments en ajoutant du peroxyde d'hydrogène, du permanganate de potassium ou du nitrate de calcium.^(1, 2) L'utilisation de nitrate de calcium nécessite l'ajout de chaux (oxyde de calcium), pour réguler le pH, et d'un composé liant (chlorure ferrique), afin d'augmenter la fixation du phosphore dans les sédiments.^(2, 3)

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Le peroxyde d'hydrogène et le permanganate de potassium sont fréquemment utilisés pour désinfecter, désodoriser et traiter l'eau.⁽²⁾ L'utilisation du nitrate de calcium a été développée par Ripl dans les années 70 et a été testée sur un lac en Suède et un autre au Minnesota. Cependant, cette méthode a été très peu utilisée et demande encore quelques ajustements.^(1, 3) L'institut national de recherche sur les eaux a développé un traitement (Limnofix) permettant d'oxyder, de stabiliser et de compacter les sédiments en injectant un produit directement au fond des milieux. Ce traitement a été mis en place à Hamilton Harbour, Ontario.⁽⁴⁾
Efficacité de la méthode	Les traitements au nitrate de calcium ont donné des résultats variés. En Suède (lac Lillesjön), le traitement a grandement réduit le relargage de phosphore par les sédiments, pendant au moins 10 ans.^(1, 2) Au Minnesota (Long Lake), le traitement n'a pas été efficace en raison d'apports externes en phosphore trop importants.^(1, 2) Peu d'études ont porté sur l'oxydation des sédiments, si bien que l'efficacité à long terme de ce traitement n'est pas documentée.^(1, 2)
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Aucun effet négatif n'a été documenté, mais il est possible que le traitement chimique ait de sérieuses incidences sur les organismes benthiques.^(1, 3, 5) L'oxydation des sédiments par le nitrate de calcium entraîne leur dénitrification, ce qui fournit de l'azote aux cyanobactéries qui risquent de proliférer rapidement.⁽⁵⁾ La demande en oxygène des sédiments risque d'augmenter, ce qui tend à appauvrir l'eau en oxygène.⁽⁵⁾
Avantages techniques	Ce traitement permet de réduire le phosphore disponible dans la colonne d'eau et la prolifération des algues.^(1, 2) L'injection des composés oxydants doit se faire directement au niveau des sédiments, ce qui permet de limiter les effets dans toute la colonne d'eau.⁽²⁾

Contraintes techniques	La méthode requiert encore plusieurs ajustements car, depuis les premiers essais dans les années 70, elle a été très peu employée.⁽¹⁾ L'injection des composés oxydants doit se faire directement au niveau des sédiments, ce qui implique un coût de réalisation plus élevé qu'une application en surface.⁽²⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	Pour être plus efficace, le traitement doit être effectué au début de l'été. Compte tenu des études antérieures, ce traitement devrait être répété tous les 10 ans.
Aspects économiques des travaux	Source : BBL (2001) ⁽²⁾ Environ 1,10 \$/m² pour un traitement au nitrate de calcium Projet lac Saint-Augustin : 683 639 m² Total du projet : ~ 752 000 \$
Évaluation environnementale nécessaire	Puisque le traitement chimique perturbe l'habitat du poisson, une évaluation environnementale pourrait être demandée par Environnement Canada.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral</u> : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. <u>Provincial</u> : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	L'oxydation des sédiments, comme d'autres méthodes chimiques, nécessite beaucoup d'études géochimiques afin de décrire et de bien connaître le cycle du phosphore dans les sédiments et dans l'eau. Une mauvaise connaissance des processus de relargage et de sédimentation peut mener à un échec. C'est pourquoi cette méthode ne serait pas recommandée pour le lac Saint-Augustin.

CONCLUSION

Principaux avantages	La méthode permet de fixer le phosphore et de stimuler la dégradation de la matière organique dans les sédiments.
Principaux inconvénients	L'efficacité à long terme de cette méthode n'est pas démontrée. Les effets sur la faune et la flore risquent d'être plus élevés que l'inactivation du phosphore (méthode 1).⁽²⁾

Application au lac Saint-Augustin	Il semblerait que ce soit le manque d'oxygène au niveau de l'interface eau-sédiments qui empêche la fixation du phosphore dans les sédiments. ⁽⁶⁾ Ce traitement au peroxyde ou au permanganate permettrait, en théorie, la fixation du phosphore dans les sédiments. Toutefois, cette méthode est encore en cours de développement et son efficacité à long terme n'est pas démontrée.
-----------------------------------	---

¹ USEPA, (1994). *Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS). Remediation guidance document*, U.S. Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, Chicago.

² BBL, (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.

³ WAGNER, K. J., (2001). *Management techniques within the lake or reservoir. Chapter 7*, p. 215-306 in C. Holdren, W. Jones et J. Taggart, Eds. *Managing lake and reservoirs*. North American Lake Management Society, Terrene Institute and U.S. Environmental Protection Agency, Madison.

⁴ INRE, (2004). *Décontamination des sédiments aquatiques*, Institut national de recherche sur les eaux, [En ligne, www.nwri.ca/research/contaminatedsediment-f.html].

⁵ MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEA Commonwealth of Massachusetts.

⁶ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.

OUTIL 9

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	POMPAGE DES SÉDIMENTS
Description de la méthode	Le pompage des sédiments est un dragage hydraulique ou pneumatique réalisé à l'aide de pompes centrifuges qui retirent et transportent les sédiments sous forme de boues liquides. Les sédiments sont aspirés au fond du lac par des engins généralement montés sur des barges ou des pontons. ^(1, 2)

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	La forme la plus simple du pompage des sédiments, par succion, a été utilisée dans différents projets dont au lac Vancouver (Colombie-Britannique) et pour le traitement de sédiments riches en mercure (couche de 50 cm d'épaisseur) dans la baie de Minamata, au Japon.⁽¹⁾ D'autres techniques et engins sont en développement afin de minimiser la remise en suspension de sédiments. Ces nouvelles technologies ont été mises en application aux États-Unis, entre autres sur la rivière Mississippi, au First Petroleum Harbor, à Calumet Harbor.⁽¹⁾
Efficacité de la méthode	Le pompage est aussi efficace que le dragage, tout en limitant la remise en suspension des sédiments. Cette méthode offre un plus grand potentiel d'efficacité à court et long terme.⁽¹⁾ Le pompage est efficace pour des sédiments à haute teneur en eau.^(1, 3) Le pompage des sédiments représente un moyen économique de les retirer d'un lac en grande quantité.⁽⁴⁾ Les résultats peuvent varier d'un site à l'autre et être accélérés en utilisant un traitement chimique (alun) afin de fixer le phosphore résiduel en suspension (méthode 1).⁽¹⁾ Le pompage hydraulique ne serait pas efficace pour des lacs peu profonds.⁽³⁾
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Cette méthode entraîne une remise en suspension, plus ou moins importante, des sédiments, ce qui a pour effet d'augmenter la turbidité et la productivité du milieu à court terme.⁽¹⁾ Cette méthode affecte l'habitat des organismes benthiques. Leur rétablissement à la suite d'un tel traitement peut prendre un certain temps.⁽¹⁾
Avantages techniques	Les technologies en développement permettent d'adapter les méthodes de pompage au type de sédiments (solides ou fluides), à la présence de débris et à la disponibilité d'un site d'entreposage.⁽¹⁾ Certains engins permettent un dragage environnemental qui tient compte du niveau de contamination des sédiments en limitant leur dispersion et leur remise en suspension.⁽²⁾

Avantages techniques (suite)	Certains engins permettent de pomper et de déshydrater les sédiments avant de les entreposer.^(1, 2) Le pompage pneumatique présente l'avantage de limiter la quantité d'eau dans les sédiments excavés, ce qui facilite leur entreposage, leur recyclage et leur transport.⁽²⁾ La méthode permet de draguer sélectivement certaines zones d'accumulation de sédiments.⁽³⁾ Dans la plupart des cas, le pompage des sédiments ne gêne pas la navigation.⁽²⁾
Contraintes techniques	Dans le but de limiter la remise en suspension de sédiments, le pompage entraîne une grande proportion d'eau, entre 90 % et 95 %, ce qui peut prolonger les travaux et compliquer le traitement des sédiments sur des champs d'épandage.^(1, 2) La présence de débris dans les sédiments peut nuire à leur excavation.^(2, 3) Cette méthode n'est pas toujours adaptée aux grands lacs, car les sédiments doivent être acheminés jusqu'à la rive.⁽¹⁾ La principale contrainte associée à cette technique est la gestion des sédiments dans des champs d'épandage ou de rétention afin de filtrer l'eau retirée avec les sédiments.⁽¹⁾
Durée des travaux et périodes de réalisation	Les vitesses de pompage varient de 20 à 2 000 m³/h, en fonction de l'épaisseur de la couche de sédiments, de leur teneur en eau et des engins utilisés.⁽¹⁾ Le dragage hydraulique peut même atteindre 7 000 m³/h.⁽²⁾ Le pompage des sédiments est efficace pour de nombreuses années, à moins que le taux de sédimentation soit élevé. Dans le contexte actuel, un seul pompage serait nécessaire pour le lac Saint-Augustin pour traiter le problème lié aux apports internes de phosphore. Si les apports externes sont bien contrôlés, aucun autre pompage ne serait à prévoir à long terme.
Aspects économiques des travaux	Les coûts associés au pompage varient grandement d'un milieu à l'autre, en fonction de la nature et du volume de sédiments à traiter et des contraintes associées au milieu.⁽⁴⁾ Le pompage de 23 000 m³ de sédiments dans le cadre du projet Waukegan Harbor Superfund, dans l'Illinois, a coûté 1 350 000 \$.⁽⁴⁾ En Europe, les coûts associés à ces travaux varient de 33 \$ à 58 \$/m³ et ne comprennent pas le transport et le traitement des sédiments contaminés.⁽²⁾ Source : Industries Normrock (Amphibex) ⁽⁶⁾ Environ 4 \$/m³ de sédiments non consolidés Projet lac Saint-Augustin : 736 380 m³ Total du projet : sédiments pompés dans un champ à proximité (~ 3 000 000 \$) Source : Industries Clamex ⁽⁷⁾ Projet lac Saint-Augustin : 736 380 m³ Total du projet : sédiments pompés dans un champ à proximité (~ 1 365 000 \$) Total du projet : sédiments pompés et volume réduit de l'ordre de 80 % à 90 % avec une centrifugeuse mobile (~ 8 840 000 \$)

Évaluation environnementale nécessaire	Une évaluation environnementale est nécessaire pour Pêches et Océans Canada, Environnement Canada et Transports Canada. Une évaluation environnementale est nécessaire en vertu de la Loi sur la qualité de l'environnement du gouvernement du Québec.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	<u>Fédéral</u> : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. <u>Provincial</u> : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	Le pompage des sédiments ne serait pas une méthode appropriée pour le lac Saint-Augustin en raison de leur charge en métaux lourds. Leur décontamination coûterait très cher. Toutefois, notons que la contamination est du type A-B et que les sédiments pourraient être utilisés comme matériel de remblai.
H. Sloterdijk	Bien que coûteuse, cette méthode est relativement efficace.

CONCLUSION

Principaux avantages	Le pompage est une méthode adaptée aux sédiments non consolidés (à haute teneur en eau), qui limite la mise en suspension de particules.
Principaux inconvénients	Le pompage des sédiments entraîne beaucoup d'eau qu'il faut ensuite traiter sur des aires d'épandage avant de la retourner au lac ou en aval.
Application au lac Saint-Augustin	Le pompage des sédiments est une méthode parfois peu productive puisque les matériaux transportés contiennent beaucoup d'eau (entre 90 % et 95 %). Compte tenu du volume de sédiments non consolidés dans le lac Saint-Augustin, ce traitement risquerait de durer longtemps. Toutefois, les méthodes et les outils se sont perfectionnés pour améliorer leur rendement. Il faudrait peut-être concentrer le pompage dans les zones où la teneur en phosphore est la plus grande.

¹ BBL, (2001). *Development of alternatives for the Lake Okeechobee sediment management feasibility study*, rapport technique de Blasland, Bouck & Lee Inc. pour le South Florida Water Management District, West Palm Beach, Florida.

- ² AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE, (2004). *Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués*, rapport développé par l'Agence de l'eau Artois-Picardie, In Vivo inc. et le Pôle de compétence des sites et sédiments pollués.
- ³ AMBLER, N., J. HALL, M. PETERS, K. D. RUDNITSKI, et E. SPEELMAN, (1998). *St. Mary's Remedial Action Plan: Remediation of Contaminated Sediments*, Environmental Science Colloquium, University of Guelph, Guelph.
- ⁴ USEPA, (1994). *Assessment and remediation of contaminated sediments (ARCS). Remediation guidance document*, U.S. Environmental Protection Agency, Great Lakes National Program Office, Chicago.
- ⁵ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.
- ⁶ INDUSTRIES NORMROCK (Amphibex). Évaluation des coûts de dragage des sédiments du lac Saint-Augustin. 3360, boul. des Entreprises, Terrebonne (Québec) J6X 4J8, téléphone : (450) 477-5132, sans frais 1-800-830-9080, courriel : normroo@cam.org.
- ⁷ INDUSTRIES CLAMEX. Évaluation des coûts de dragage des sédiments du lac Saint-Augustin. 340, avenue du Maréchal, C.P. 44, Pintendre (Québec) G6C 1R8, téléphone : (418) 837-1444, courriel : clamex@globetrotter.net, site Web : <http://www.clamex.qc.ca>

OUTIL 10

DESCRIPTION

Type de méthode de contrôle	POMPAGE DE L'EAU DE L'HYPOLIMNION
Description de la méthode	L'hypolimnion a souvent une teneur en phosphore plus élevée que l'épilimnion, en raison du relargage par les sédiments en condition anaérobie. La présente méthode vise à retirer du lac, par pompage, cette eau riche en phosphore. ⁽¹⁾

ANALYSE DE LA MÉTHODE

Historique	Cette méthode est quelques fois utilisée afin de traiter des problèmes d'eutrophisation, notamment aux États-Unis. ⁽²⁾ Pour les lacs à usage récréatif, le pompage de l'hypolimnion est souvent employé afin d'améliorer la qualité de l'eau.
Efficacité de la méthode	Le pompage de l'eau de l'hypolimnion permet d'accélérer le processus de restauration d'un lac. ⁽¹⁾ Ce traitement permet de remplacer l'hypolimnion par une eau plus riche en oxygène, ce qui entraîne une diminution du relargage du phosphore par les sédiments. ⁽²⁾ Les effets de ce traitement ne se font pas sentir à court terme puisque, dans le cas de lacs bien stratifiés, les strates ne se mélangent qu'au printemps et à l'automne. ⁽²⁾ À long terme, la méthode est de plus en plus efficace. ⁽²⁾
Contraintes environnementales (social, eau, faune et flore)	Le pompage de l'hypolimnion peut avoir des répercussions sur les écosystèmes situés en aval si l'eau est pompée dans les effluents du lac traité. En effet, l'eau ainsi déversée est pauvre en oxygène et riche en nutriments. ⁽²⁾ Le pompage de l'hypolimnion peut mener à une déstratification, ce qui peut avoir des conséquences notables sur certaines espèces, notamment les poissons d'eau froide. ⁽³⁾
Avantages techniques	Cette méthode est généralement appliquée aux lacs bien stratifiés. ⁽²⁾ Cette méthode permet de diminuer le temps de rétention de l'eau du lac, tout en l'oxygénant. ⁽²⁾ La profondeur de pompage peut-être ajustée, dans certains cas, pour éliminer une partie des algues situées dans l'épilimnion. ⁽³⁾
Contraintes techniques	L'eau pompée ne doit pas être déversée directement en aval du lac pour éviter de déplacer le problème en libérant une grande quantité de phosphore dans un autre milieu. Il faut donc traiter l'eau pour en retirer les nutriments. ^(1, 2) Il faut s'assurer que le volume d'eau pompé n'excède pas les apports du lac, sinon son niveau risquerait de baisser.
Durée des travaux et périodes de réalisation	Le pompage de l'hypolimnion doit se faire avant le turnover automnal, c'est-à-dire avant que le phosphore de l'hypolimnion ne soit mélangé dans le reste du lac. ⁽²⁾ Le pompage peut être réalisé une année, ou encore plusieurs années consécutives.

Aspects économiques des travaux	Source : Wagner (2001)⁽¹⁴⁾ Coûts associés à la construction des installations variant de 0,15 \$ à 0,30 \$/m²; pompage de l'hypolimnion représentant un coût d'environ 0,03 \$/m² Projet lac Saint-Augustin : 683 639 m² Construction des infrastructures de pompage ~ 102 540 \$ à 205 100 \$ Pompage de la zone profonde inférieure à 4 m (375 000 m²) ~ 20 500 \$/an; période de 10 ans : 205 000 \$ Total projet : ~ 410 000 \$ Source : Génium⁽⁵⁾ Projet lac Saint-Augustin : Travaux de construction d'un poste de pompage, aqueduc et voirie évalués à 1 317 500 \$
Évaluation environnementale nécessaire	Si le pompage de l'hypolimnion est considéré comme une perturbation de l'habitat du poisson, une évaluation environnementale pourrait être demandée par Pêches et Océans Canada et par Environnement Canada.
Aspects légaux (fédéral et provincial)	Fédéral : Le projet doit être analysé en vertu des articles 35 et 36, de la Loi sur les pêches, administrés par Pêches et Océans Canada et Environnement Canada, respectivement. La réalisation du projet est également soumise à l'application de la Loi sur la protection des eaux navigables, administrée par Transports Canada. Provincial : Une demande doit être formulée pour obtenir une autorisation en vertu de l'article 128.7 de la Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune, et un certificat d'autorisation en vertu des articles 22 ou 31 de la Loi sur la qualité de l'environnement.

AVIS SCIENTIFIQUE

Nom du scientifique	Commentaires
R. Galvez-Cloutier	Cette méthode ne serait pas applicable au lac Saint-Augustin car il n'est pas stratifié.
H. Sloterdijk	Le pompage de l'hypolimnion ne serait pas une méthode efficace car le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié.

CONCLUSION

Principaux avantages	Cette méthode permet d'éliminer de grande quantité de phosphore contenue dans l'hypolimnion.⁽¹³⁾ Ce pompage permet également d'éviter le manque d'oxygène dans l'hypolimnion et le relargage du phosphore par les sédiments.⁽¹⁴⁾
Principaux inconvénients	Cette méthode est relativement peu coûteuse, mais les coûts peuvent augmenter rapidement pour traiter l'eau pompée avant de la déverser en aval du lac.⁽¹¹⁾

Application au lac Saint-Augustin	Le lac Saint-Augustin n'est pas stratifié, mais l'eau située à l'interface eau-sédiments est très riche en phosphore et parfois, pauvre en oxygène.⁽⁴⁾ Cette méthode, appliquée au lac Saint-Augustin, reviendrait au pompage des sédiments (méthode 9).
-----------------------------------	---

¹ UNEP, (1999). *Planning and management of lakes and reservoirs: an integrated approach to eutrophication*, United Nations Environment Programme, International Environmental Technology Centre. Technical publications series (11).

² MATTSON, M. D., P. J. GODFREY, R. A. BARLETTA et A. AIELLO, (2003). *Eutrophication and aquatic plant management in Massachusetts. Final Generic Environmental Report*, Department of Environmental Protection and Department of Conservation and Recreation, EOEA Commonwealth of Massachusetts.

³ WAGNER, K. J., (2001). *Management techniques within the lake or reservoir. Chapter 7*, p. 215-306 in C. Holdren, W. Jones et J. Taggart, Eds. *Managing lake and reservoirs*. North American Lake Management Society, Terrene Institute and U.S. Environmental Protection Agency, Madison.

⁴ CONSORTIUM DDM - PRO FAUNE, (2004). *Développement d'un outil de gestion in situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin*, rapport d'étape présenté à la Ville de Québec, Québec.

⁵ GÉNIUM, (2005). *Remédiation lac Saint-Augustin. Estimation budgétaire des coûts des outils 4 (dilution de l'eau du lac) et 5 (abaissement du niveau d'eau du lac)*. Consultants Génium inc., 780, boul. Saint-Joseph, 2^e étage, Québec (Québec) G2K 1W6, téléphone : (418) 648-8619, télécopieur : (418) 648-8724, courriel : info@genium.ca

ANNEXE 5

ANALYSE DE LA QUALITÉ DE L'EAU DU FLEUVE SAINT-LAURENT
COMPARATIVEMENT À CELLE DU LAC SAINT-AUGUSTIN

Selon les échantillons d'eau du fleuve Saint Laurent analysés en mai, juillet, septembre et novembre 2004 à la prise d'eau de Sainte-Foy, différents paramètres mesurés sur ces échantillons dépassent les normes en ce qui concerne l'eau potable, la vie aquatique (toxicité aiguë ou chronique) la santé humaine et les activités récréatives.

BACTÉRIES ET COLIFORMES FÉCAUX

Les microorganismes, particulièrement les coliformes fécaux, sont relativement abondants dans les échantillons du fleuve analysés. Les concentrations de coliformes fécaux varient de 92 à 520 UFC/100 ml, selon les échantillons. Ces charges dépassent les normes concernant l'eau potable (0 UFC/100 ml) et de protection des activités récréatives de contact primaire (200 UFC/100 ml).

La concentration de coliformes fécaux dans le lac Saint-Augustin se situe entre 0 et 50 UFC/100 ml, en période d'étiage, alors qu'elle peut dépasser 1 000 UFC/100 ml après de fortes pluies (Bergeron et al., 2002).

ALUMINIUM

La concentration d'aluminium dans les échantillons du fleuve varie de 0,16 à 0,27 mg/l, dépasse les normes de santé humaine (0,2 mg/l) et de protection de la vie aquatique (effet chronique = 0,087 mg/l).

Aucune donnée n'est disponible pour la concentration d'aluminium dans la colonne d'eau du lac Saint-Augustin.

PHOSPHORE TOTAL

La concentration de phosphore total dans les échantillons du fleuve varie de 0,018 à 0,054 mg P/l. Ces concentrations dépassent les normes de protection des activités récréatives et de protection de la vie aquatique (effet chronique = 0,02 mg P/l).

La concentration de phosphore dans l'eau du lac Saint-Augustin variait de 0,04 à 0,07 mg P/l lors des mesures réalisées en 2000 et 2001. Au cours de l'été 2004, ces concentrations variaient de 0,06 à 0,80 mg P/l. C'est donc dire que l'eau du fleuve semble moins riche en phosphore que celle du lac Saint-Augustin. Selon EXXEP (2005), le volume d'eau à ajouter pour une dilution efficace doit être de bonne qualité pour atteindre le niveau trophique escompté. En théorie, le seuil de 0,030 mg P/l, fixé pour réduire l'incidence des fleurs d'eau de cyanobactéries, peut être obtenu moyennant un apport d'eau dont la qualité varie de 0,010 à 0,020 mg P/l. La concentration de phosphore total dans l'eau du fleuve rencontrerait, à certains égards, les critères nécessaires pour la réduction du phosphore dans le lac Saint-Augustin.

MATIÈRES SOLIDES TOTALES ET TURBIDITÉ

L'eau du fleuve est relativement riche en matières solides totales (entre 84 et 168 mg/l) et sa turbidité est élevée (entre 5 et 17,5 UTN). Les normes fixées pour ces paramètres en ce qui concerne la protection de la vie aquatique sont dépassées (toxicité aiguë = 25 mg/l et 8 UTN). La turbidité de l'eau du fleuve dépasse également la norme de protection des activités récréatives (5 UTN).

La turbidité du lac Saint-Augustin est de l'ordre de 4,45 à 4,68 UTN. C'est donc dire que l'eau du fleuve augmenterait la turbidité du lac Saint-Augustin.

PH

Les échantillons d'eau du fleuve ont un pH compris entre 7,2 et 7,5. Les normes fixées pour ce paramètre, en ce qui concerne les eaux de surface, ne sont pas dépassées. Le pH doit se

maintenir entre 5 et 9,5 afin d'assurer la protection de la vie aquatique (toxicité aiguë) et entre 6,5 et 8,5 afin d'assurer la protection de la santé humaine et des activités récréatives.

Le pH du lac Saint-Augustin varie de 7,5 à 8,7. L'ajout d'eau provenant du fleuve aurait pour conséquence de diminuer le pH du lac, ce qui permettrait d'être dans les normes de protection de la santé humaine et des activités récréatives.

CONDUCTIVITÉ

La conductivité dans les échantillons du fleuve varie de 92 à 244 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Il n'y a pas de normes concernant les eaux de surface pour ce paramètre. La norme concernant l'eau potable serait de 1 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La conductivité du lac Saint-Augustin est de l'ordre de 740 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'eau du fleuve permettrait donc de diminuer la conductivité du lac Saint-Augustin.