



MISE EN PLACE D'UN PROJET D'EXPÉRIMENTATION DE DIVERSES MESURES DE RESTAURATION DU LAC SAINT-AUGUSTIN

Analyse comparative des volets I et II

Rapport final

Présenté au
Ministère du Développement durable, de l'Environnement,
de la Faune et des Parcs

Décembre 2012



*Développement durable,
Environnement,
Faune et Parcs*

Québec 





MISE EN PLACE D'UN PROJET D'EXPÉRIMENTATION DE DIVERSES MESURES DE RESTAURATION DU LAC SAINT-AUGUSTIN

Analyse comparative des volets I et II

Rapport final préparé pour
la **Ville de Québec**

Dans le cadre de l'action 1.4 du Plan d'intervention sur les
algues bleu-vert 2007-2017

**Avec le soutien du ministère du Développement durable,
de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
et
la Fédération canadienne des municipalités
(Fonds municipal vert)**

Rapport final préparé par
Rosa Galvez-Cloutier en collaboration avec
Boris Constantin, Alexandre Bourget,
Jean-Philippe Laliberté et Serge Leroueil

Québec, Décembre 2012

Équipe de travail

Université Laval

Rosa Galvez-Cloutier	Prof., département de génie civil et de génie des eaux
Serge Leroueil	Prof., département de génie civil et de génie des eaux
Alexandre Bourget	Étudiant à la maîtrise en génie civil – environnement
Boris Constantin	Étudiant à la maîtrise en génie civil – environnement
Jean-Philippe Laliberté	Étudiant à la maîtrise en génie civil – environnement

* Les photographies non référencées dans ce document sont la propriété de Prof. R. Galvez-Cloutier.

Référence à citer

Galvez-Cloutier, R., Leroueil, S., R., Bourget, A., Constantin, B. et Laliberté J-P. 2012. Mise en place d'un projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du lac Saint-Augustin. Rapport final : Analyse comparative des volets I et II. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval, Québec

* « Cet essai sur le terrain a été réalisé avec le concours du Fonds municipal vert, un Fonds financé par le gouvernement du Canada et géré par la Fédération canadienne des municipalités. Malgré ce soutien, les points de vue exprimés sont ceux des auteurs et n'engagent nullement la responsabilité de la Fédération canadienne des municipalités ni celle du gouvernement du Canada. ».

Sommaire

Au cours du XX^{ème} siècle, la transformation du territoire dans le bassin versant du lac Saint-Augustin a causé l'apparition de sources de contaminants externes à ce plan d'eau. Ces contaminants, essentiellement le phosphore qui est un nutriment mais aussi des métaux lourds, se sont retrouvés dans le lac et dans les eaux souterraines, et de cette pollution résulte une contamination des sédiments au fond du lac. Au jour d'aujourd'hui, ces sédiments et les eaux souterraines qui alimentent le lac Saint-Augustin sont ses principales sources de phosphore. L'enrichissement graduel du plan d'eau en nutriments a causé son eutrophisation, et donc la dégradation de la qualité de l'eau et l'altération des usages récréatifs.

La réhabilitation du lac nécessite des mesures de gestion des sédiments contaminés. C'est la raison pour laquelle la Ville de Québec est le promoteur d'un projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du lac Saint-Augustin. Ce projet s'inscrit dans le cadre du Plan d'intervention sur les algues bleu-vert 2007-2017 du ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). Il est financé par la Ville de Québec, le MDDEFP et le Fédération canadienne des municipalités via le Fonds municipal vert. Conduit par la Ville de Québec en partenariat avec l'Université Laval, ce projet, comportant deux volets, vise à évaluer, au moyen d'essais *in situ*, plusieurs techniques de contrôle des nutriments, permettant l'atténuation de l'eutrophisation. Les procédés à l'essai sont :

- le traitement par coagulation et recouvrement actif des sédiments (volet I), procédé développé par l'Université Laval ;
- et le dragage des sédiments (volet II), plus précisément le dragage hydraulique (succion) et le dragage mécanique.

Le présent rapport est le rapport comparatif final de ce projet de démonstration technologique. Il décrit la problématique et les objectifs de ce projet d'expérimentation. Il rappelle aussi les principales caractéristiques du lac Saint-Augustin et de son bassin versant, ainsi que la qualité des eaux et des sédiments du lac. Il donne une description de la méthodologie employée pour tester les traitements éprouvés et résume les résultats obtenus des volets I et II. Ce rapport compare également les procédés testés sur les plans environnemental, technique et financier. Enfin, il donne les conclusions du projet d'expérimentation et des recommandations quant à une stratégie de restauration à l'échelle du lac Saint-Augustin.

La comparaison des résultats des I et II montre que le traitement par coagulation et recouvrement actif et le traitement par dragage hydraulique (suction) n'ont pas d'impacts environnementaux négatifs significatifs. En effet, ces deux procédés entraînent une faible remise en suspension des sédiments. De plus, les traitements avec recouvrement actif et les traitements par dragage permettent de réduire la présence d'espèces caractéristiques de lacs eutrophes, notamment les cyanobactéries et les escargots, hôtes de vers infectieux. Ainsi il contribue à atténuer les risques pour la santé des usagers du lac. D'autre part, sur le plan technique, le procédé le plus efficace est le traitement par coagulation et recouvrement actif, avec une performance de rabattement du phosphore dans la colonne d'eau de 95 %. Le dragage hydraulique est également efficace avec une performance de rabattement du phosphore de 88 %. Concernant la durabilité et la faisabilité, le dragage hydraulique est le plus performant avec notamment une durabilité de 100 ans. Par ailleurs, pour la gestion in situ des sédiments dragués, le procédé de séparation des phases liquide et solide qui a été jugé le plus adéquat est la coagulation-filtration des sédiments pompés par dragage hydraulique. Enfin, sur le plan financier et en termes d'investissement initial, les solutions les moins coûteuses sont le dragage mécanique et le traitement par coagulation et recouvrement actif, la solution la plus coûteuse étant le dragage hydraulique.

À la lumière de ces résultats, des recommandations sur la stratégie de restauration à l'échelle du lac Saint-Augustin ont été émises, Il s'agit de traiter des zones prioritaires du lac (zones à plus forte contamination) soit par coagulation et recouvrement actif, soit par dragage hydraulique.

Table des matières

ÉQUIPE DE TRAVAIL	II
SOMMAIRE	III
TABLE DES MATIÈRES	V
TABLE DES FIGURES	VI
TABLE DES TABLEAUX	VII
I. INTRODUCTION	1
I.1. CONTEXTE.....	1
I.2. PROBLÉMATIQUE.....	2
I.3. ÉTUDES ANTÉRIEURES OU EN COURS	4
I.4. RÉHABILITATION DU LAC SAINT-AUGUSTIN	5
I.5. ORGANISATION DU RAPPORT	5
II. DESCRIPTION DU LAC SAINT-AUGUSTIN ET DE SON BASSIN VERSANT	6
II.1. LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES	6
II.2. BILAN HYDRIQUE DU BASSIN VERSANT	7
II.3. QUALITÉ DES EAUX DU BASSIN VERSANT	8
II.4. QUALITÉ DES SÉDIMENTS DU LAC.....	10
III. DESCRIPTION DU PROJET PILOTE	13
III.1. ESSAIS DU VOLET I.....	13
III.2. ESSAIS DU VOLET II.....	20
IV. RÉSULTATS DES RECHERCHES ET ESSAIS	29
IV.1. ESSAIS <i>IN SITU</i> DE COAGULATION ET DE RECOUVREMENT ACTIF	30
IV.2. ESSAIS <i>IN SITU</i> DE DRAGAGE	33
IV.3. ESSAIS DE SÉPARATION DES PHASES SOLIDE-LIQUIDE SUR LES SÉDIMENTS DRAGUÉS LORS DU VOLET II.....	36
V. ANALYSE COMPARATIVE DES TECHNIQUES DES MESURES DE RESTAURATION TESTÉES	37
V.1. ASPECTS ENVIRONNEMENTAUX.....	37
V.2. ASPECTS TECHNIQUES	38
V.3. ASPECTS FINANCIERS	43
VI. CONCLUSION	49
VII. RECOMMANDATIONS POUR UNE STRATÉGIE DE RESTAURATION À L'ÉCHELLE DU LAC SAINT-AUGUSTIN	51
BIBLIOGRAPHIE	53

Table des figures

Figure I-1 Occupation du sol autour du lac Saint-Augustin en (a) 1937, (b) 1953, (c) 1987 et (d) 2007.....	2
Figure I-2 Problématique des sédiments riches en phosphore au lac Saint-Augustin.....	3
Figure II-1 Localisation du lac Saint-Augustin	6
Figure II-2 Répartition des eaux de pluie dans le bassin versant du lac Saint-Augustin	8
Figure II-3 Diagramme de classement du niveau d'eutrophisation des lacs.....	9
Figure II-4 Zones à haute contamination du lac Saint-Augustin	12
Figure III-1 Plan de la plateforme flottante, vue de dessus	14
Figure III-2 Enclos fabriqué par Curry Inc.....	15
Figure III-3 Plateforme d'essais à l'été 2009	16
Figure III-4 Localisation de la plateforme lors des essais du volet I (2009)	17
Figure III-5 Dépôt d'une couche de calcaire avec un tuyau verseur	19
Figure III-6 Bouteille de prélèvement	19
Figure III-7 Lieux d'échantillonnage (A, C, F, I et K) pour les essais de diffusion du phosphore	21
Figure III-8 Montage de l'essai de diffusion du phosphore	22
Figure III-9 Localisation finale de la plateforme.....	23
Figure III-10 Localisations de la plateforme lors des essais des volets I (2009) et II (2011)	24
Figure III-11 Dragage hydraulique à l'aide d'une motopompe et de son tuyau d'aspiration	25
Figure III-12 Sédiments refoulés dans une cuve par la motopompe	25
Figure III-13 Benne à sédiments d'échantillonnage utilisée pour le dragage mécanique	26
Figure III-14 Sac de filtration <i>Geotube GT500</i>	27
Figure III-15 Hydrocyclone du département de génie des mines et de métallurgie.....	28
Figure IV-1 Évolution temporelle de la concentration moyenne en phosphore soluble dans chaque colonne d'eau lors des essais du volet I.....	30
Figure IV-2 Coloration de l'eau des enclos 30 jours après le début des essais du volet I.....	32
Figure IV-3 Évolution temporelle de la concentration moyenne en phosphore soluble dans chaque colonne d'eau lors des essais du volet II.....	34
Figure IV-4 Coloration de l'eau des enclos 30 jours après le début des essais du volet II.....	35

Table des tableaux

Tableau II-1 Données morphométriques du lac Saint-Augustin	7
Tableau II-2 Valeurs moyennes des paramètres de surveillance de l'eutrophisation au lac Saint-Augustin	9
Tableau II-3 Résumé de la qualité des eaux dans le bassin versant du lac Saint-Augustin.....	10
Tableau II-4 Concentration des contaminants problématiques des sédiments du lac Saint-Augustin	11
Tableau III-1 Coordonnées GPS des sites d'essais de 2009 et 2011	16
Tableau III-2 Colonnes d'eau: identification et traitement appliqué lors du volet I	18
Tableau III-3 Résumé des analyses sur l'eau des enclos	20
Tableau III-4 Résultats des essais de diffusion du phosphore sur les sédiments du lac Saint-Augustin.....	22
Tableau III-5 Coordonnées GPS des sites d'essais de 2009 et 2011	24
Tableau III-6 Colonnes d'eau: identification et traitement appliqué lors du volet II	24
Tableau III-7 Résumé des analyses après séparation des phases solide-liquide	28
Tableau IV-1 Performance des traitements de coagulation et de recouvrement actif	31
Tableau V-1 Comparaison de l'efficacité estimée des traitements testés, en termes de rabattement du phosphore	39
Tableau V-2 Comparatif de la durabilité des traitements testés	40
Tableau V-3 Coût estimé de l'investissement initial par mètre carré traité	45
Tableau V-4 Estimation du coût unitaire de rideaux de turbidité	46
Tableau V-5 Niveaux de suivi requis par stratégie de traitement envisagée au lac Saint-Augustin	47
Tableau V-6 Analyses à effectuer et coûts par type d'échantillons	48

I. Introduction

Au cours des dernières décennies, les lacs et rivières du Québec - et ailleurs dans le monde - sont devenus des lieux de plus en plus prisés par la population qui utilise la ressource notamment à des fins résidentielles ou récréa-touristiques. Cette pression anthropique ainsi que le développement agricole engendrent une transformation du territoire qui affecte la qualité des plans d'eau en milieu urbain. En effet, la diminution du couvert forestier, l'imperméabilisation des surfaces et l'éradication des bandes riveraines ont pour conséquences d'accroître l'érosion et le ruissellement des contaminants au sein d'un bassin versant. L'agriculture intensive et les rejets domestiques entraînent un enrichissement progressif des plans d'eau en nutriments. Parmi ceux-ci, le phosphore, généralement sous forme de phosphate, soluble et biodisponible, cause l'eutrophisation des lacs lorsqu'il est en excès. Les conséquences néfastes de l'eutrophisation incluent l'accroissement de la productivité primaire et des algues bleu-vert (aussi appelées cyanobactéries), la dégradation de la qualité de l'eau, la diminution de la biodiversité, la suspension des usages récréatifs de l'eau. (Ryding et Rast, 1994 ; Galvez-Cloutier *et al.* 2002).

I.1. Contexte

D'après une caractérisation de 154 lacs au Québec (Galvez et Sanchez, 2007), le lac Saint-Augustin est dans un état extrême d'eutrophisation. La Ville de Québec a présenté un projet pilote de démonstration technologique pour la restauration des lacs eutrophes au ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) suite à un appel de propositions de ce dernier, dans le cadre du Plan d'intervention sur les algues bleu-vert 2007-2017. Le lac Saint-Augustin ainsi que le lac Brome, le lac Waterloo et le lac à l'Anguille ont été retenus par le ministère pour bénéficier d'une aide financière.

Ainsi, la Ville de Québec a promu la mise en place d'un projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du lac Saint-Augustin, financé en partie par le MDDEFP et la Fédération canadienne des municipalités via le Fonds municipal vert. Conduit par la Ville de Québec en partenariat avec l'Université Laval, ce projet comportant deux volets vise à évaluer plusieurs techniques de contrôle des nutriments, permettant l'atténuation de l'eutrophisation. Le volet I, notamment, s'est inscrit dans le cadre d'un

projet CRSNG (Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada) stratégique, en partenariat avec la Ville de Québec, la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures, le Conseil de Bassin du Lac Saint-Augustin (CBLSA), le ministère des Transports du Québec (MTQ) et l'Université Laval.

I.2. Problématique

Le territoire autour du lac Saint-Augustin a subi de nombreux changements au cours des dernières décennies, illustrés à la figure I-1.

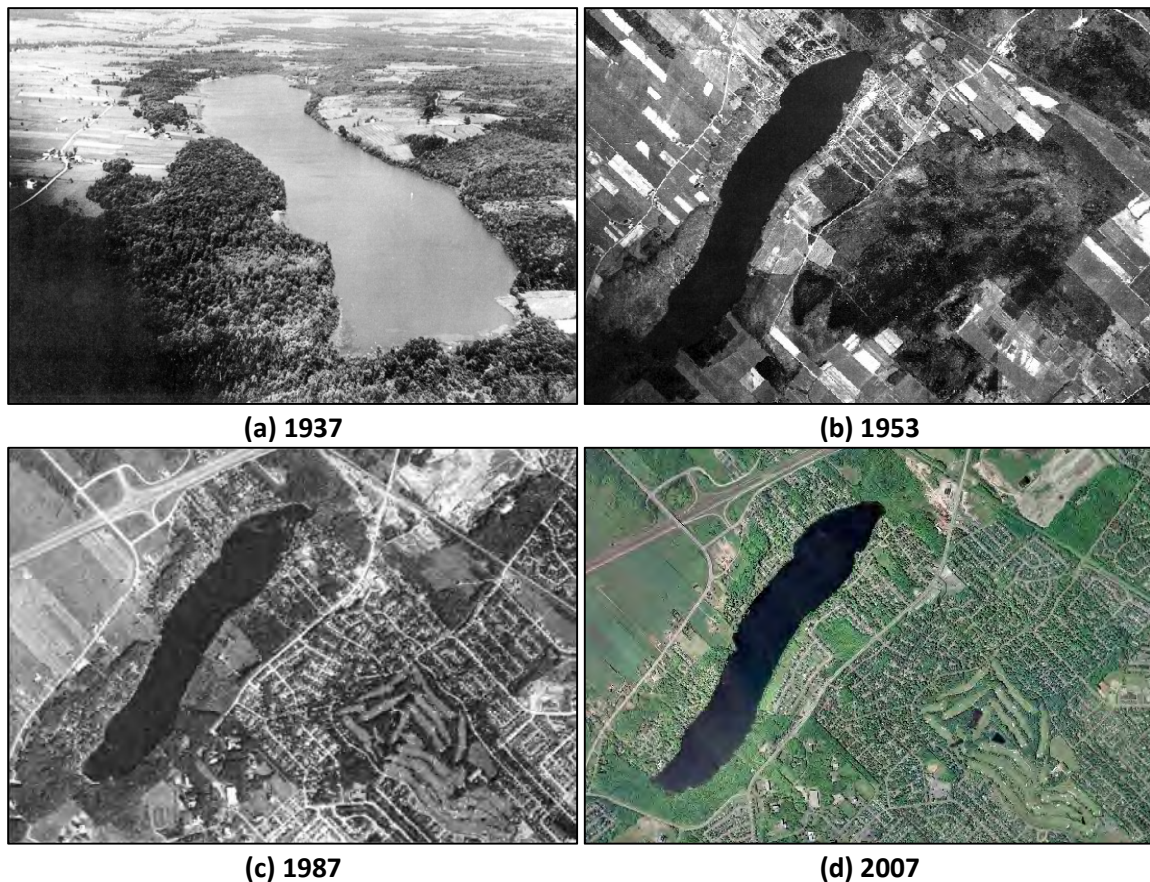


Figure I-1 Occupation du sol autour du lac Saint-Augustin en (a) 1937, (b) 1953, (c) 1987 et (d) 2007
Sources : (a), (b) et (c) Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources ; (d) Google Earth

De tels changements ont affectés le lac. Au début du 20^e siècle, le développement agricole a entamé la dégradation de l'état de santé de ce lac, en raison de l'utilisation d'engrais riches en phosphore. Puis, l'urbanisation et la construction de l'autoroute Félix-Leclerc dans la deuxième moitié du 20^e siècle ont entraîné l'aggravation de l'état de santé précaire du lac en y ajoutant une contamination en métaux lourds, huiles,

graisses et sels de déglacage. Un apport supplémentaire en phosphore provient des installations septiques individuelles non conformes d'habitations et de chalets non reliées au réseau d'égouts, des mauvais raccordements et des engrais à usage résidentiel (Roberge *et al.* 2002). La transformation du territoire a donc causé l'apparition de sources de contaminants externes au lac Saint-Augustin.

De cette pollution du lac par des sources externes résulte une contamination des sédiments au fond du lac. De sorte qu'aujourd'hui, à ces apports externes s'ajoute une source interne de nutriments : les sédiments très riches en phosphore, environ 1200 mg P/kg de poids sec (Brin, 2007). De plus, comme montré à la figure I-2, ces sédiments sont traversés par les eaux souterraines, qui alimentent le lac et qui sont également chargées en phosphore (Galvez-Cloutier *et al.* 2003). Les sédiments et les eaux souterraines sont aujourd'hui les principales sources de phosphore du lac. En effet, en fonction des conditions physico-chimiques retrouvées à l'interface colonne d'eau - sédiments, le phosphore peut être libéré par les sédiments vers la colonne d'eau (Brin, 2007). Par ailleurs, la remise en suspension des sédiments survient par le brassage des eaux dû au vent ou aux embarcations à moteur. Cette remise en suspension des sédiments remet en circulation du phosphore dans la colonne d'eau et le rend potentiellement biodisponible.

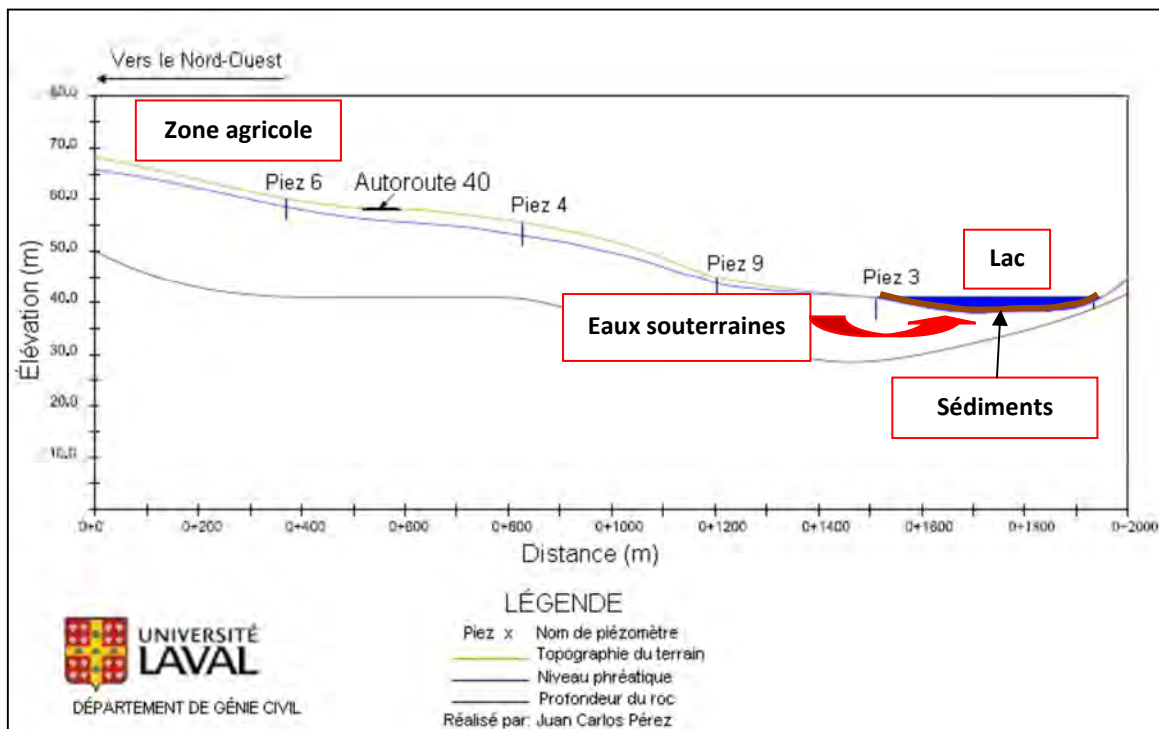


Figure I-2 Problématique des sédiments riches en phosphore au lac Saint-Augustin

Adaptée de Galvez-Cloutier *et al.* (2006 a)

Plusieurs études (Bergeron *et al.* 2002, Galvez-Cloutier *et al.* 2003, 2007) ont classé ce lac comme eutrophe, avec une eau très chargée en phosphore provenant des sources citées précédemment. L'excès de phosphore est la cause principale de la prolifération algale, en particulier celle des cyanobactéries (Galvez-Cloutier *et al.* 2007). Des efflorescences algales ont été observées en 2001 et 2002. Parmi les cyanobactéries, les genres *Anabaena*, *Aphanizomenon*, *Microcystis* et *Oscillatoria* ont été recensés au lac Saint-Augustin en 2001 (Bergeron *et al.* 2002). De sorte que depuis 2001, la baignade y est interdite car ces cyanobactéries peuvent produire des toxines nuisibles à la santé.

L'enrichissement graduel du plan d'eau en éléments nutritifs a causé la dégradation de la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin et l'altération des usages récréatifs. Par conséquent, la réhabilitation du lac requiert des mesures de contrôle des apports internes et externes en phosphore. Aujourd'hui, les sources externes en nutriments ont été répertoriées et la plupart sont maintenant contrôlées ou en voie de l'être (EXXEP, 2003; Saint-Augustin-de-Desmaures, 2011). Néanmoins, le contrôle de la source interne de phosphore nécessite des mesures de gestion des sédiments contaminés au fond du lac Saint-Augustin.

I.3. Études antérieures ou en cours

Le présent projet est la suite logique d'une série de travaux antérieurs conduits par plusieurs étudiants sous la direction de la professeure Rosa Galvez, de l'Université Laval, qui sont :

- Diagnostic global de la qualité dans le bassin versant (Rochefort, 2005 ; Galvez-Cloutier *et al.* 2006 a, 2006 b) ;
- Évaluation de l'étendue de la contamination des sédiments (Galvez-Cloutier *et al.* 2003 ; Brin, 2007) ;
- Projet 1 – Développer un *traitement écologique in-lake* pour le contrôle du P (Dominguez, 2005; Parant, 2007 ; Galvez-Cloutier *et al.* 2006 c ; Soumis-Dugas *et al.* 2010) ;
- Projet 2 – Développer un *traitement écologique* pour les eaux du ruissellement routier (Morteau *et al.* 2006, 2007) ;
- Réalisation d'essais pilotes pour les projets 1 et 2 (Bourget *et al.* 2011 ; Galvez *et al.* 2011 ; Constantin *et al.* 2012 ; Galvez-Cloutier *et al.* 2012).

L'ensemble des travaux effectués s'encadre dans une perspective globale du développement de procédés applicables à la restauration du lac en tenant compte des impacts au niveau du bassin versant.

I.4. Réhabilitation du lac Saint-Augustin

La Ville de Québec, par le projet pilote, souhaite démontrer qu'il est possible de réduire voire d'éliminer la source de phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin pour ainsi lui redonner des caractéristiques qui seront le plus près possible de ses conditions naturelles avant sa dégradation (Plante *et al.* 2008). Afin d'y parvenir, la Ville de Québec et l'Université Laval ont élaboré un projet d'expérimentation de mesures de restauration applicables au lac Saint-Augustin. Ce projet a été divisé en deux volets qui ont été conduits par l'Université Laval et qui ont fait l'objet de rapports techniques (Bourget *et al.* 2011 ; Constantin *et al.* 2012). Ainsi, ces volets ont évalué, par des essais *in situ*, la performance de plusieurs techniques de contrôle du phosphore que sont :

- le traitement par coagulation et recouvrement actif des sédiments (volet I), procédé développé par l'Université Laval ;
- et le dragage des sédiments (volet II), plus précisément le dragage hydraulique (suction) et le dragage mécanique.

Le présent rapport est le rapport comparatif final du projet pilote. Il a pour objectif de déterminer le procédé le plus efficace et le plus adapté aux conditions du lac Saint-Augustin. Les conclusions et recommandations de ce rapport final permettront d'établir un plan d'intervention le plus adéquat possible pour la gestion des sédiments du lac et la neutralisation du phosphore qu'ils contiennent.

I.5. Organisation du rapport

Ce rapport comparatif final résume les résultats et les informations obtenues lors de la réalisation des deux volets du projet pilote. Tout d'abord, la section II rappelle les principales caractéristiques du lac Saint-Augustin et de son bassin versant, ainsi que la qualité des eaux et des sédiments du lac. Puis, la section III présente la plateforme flottante utilisée pendant les essais *in situ* du projet pilote et la méthodologie des techniques de contrôle du phosphore éprouvées lors des deux volets. Ensuite, la section IV résume les résultats obtenus lors des essais. La section V compare les traitements à l'essai, sur les plans environnemental, technique et financier. Enfin, la section VI donne les conclusions du projet pilote et les recommandations sur le choix de la technique de restauration qui en découlent.

II. Description du lac Saint-Augustin et de son bassin versant

II.1. Localisation et caractéristiques morphométriques

Le lac Saint-Augustin (lat. 46°42'N, long. 71°22'O) est situé dans la ville de Saint-Augustin-de-Desmaures en banlieue de Québec, sur la rive nord du fleuve Saint-Laurent. Dans le bassin versant du lac se trouvent des zones agricoles au nord/nord-ouest du lac, un tronçon de l'autoroute 40 (Autoroute Félix-Leclerc) au nord et des habitations tout autour.

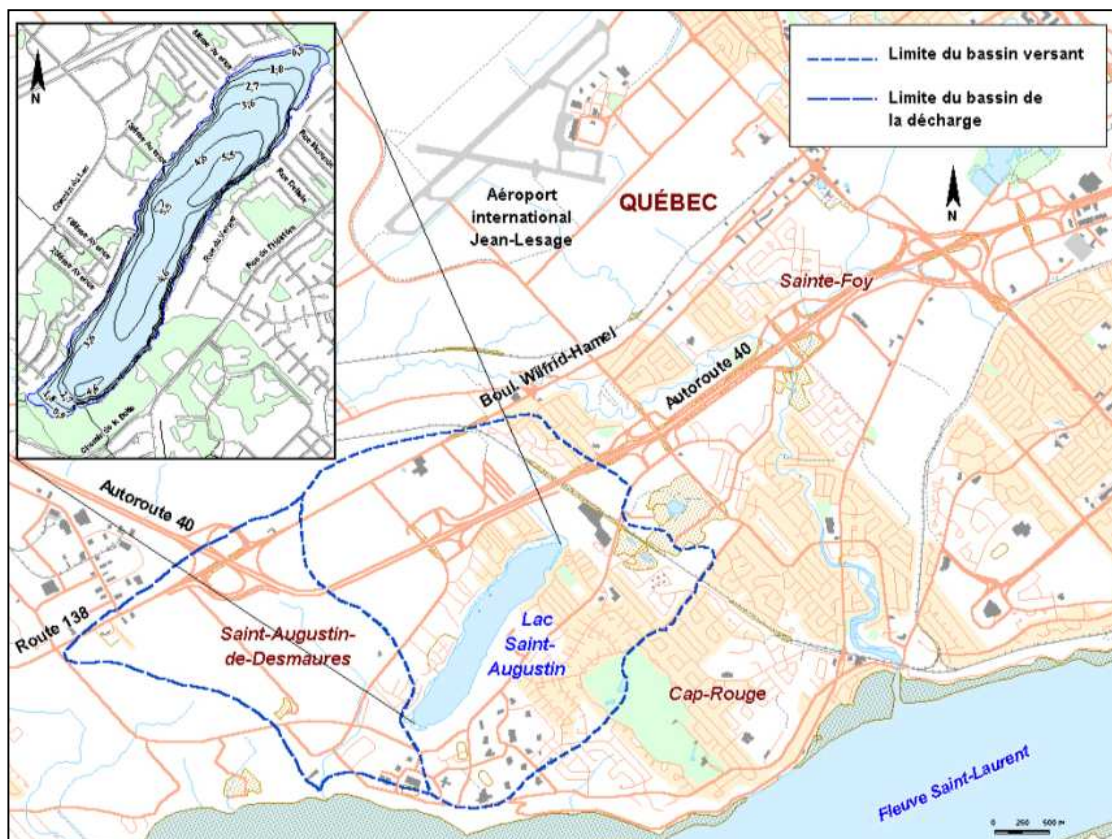


Figure II-1 Localisation du lac Saint-Augustin

Source : Bergeron et al. (2002)

Le lac couvre une superficie de 0,6 km², pour une longueur maximale de 2,1 km et une largeur maximale de 300 m. Sa profondeur moyenne est de 3,5 m avec une profondeur maximale de 6,1 m (Bergeron et al. 2002). Le bassin versant naturel du lac a une superficie d'environ 7,5 km². Actuellement, les eaux de ruissellement d'une zone au sud-est du lac (correspondant au bassin de décharge sur la figure II-1) ont été détournées du

bassin versant naturel. Le bassin versant modifié, qui résulte de ce détournement, a une superficie de 6,3 km². Les données sur la morphométrie du lac sont résumées dans le tableau II-1.

Tableau II-1 Données morphométriques du lac Saint-Augustin

	Paramètres	Valeurs
Lac	Longueur maximale (km)	2,1
	Largeur moyenne (km)	0,29
	Largeur maximale (km)	0,3
	Superficie (km ²)	0,6
	Périmètre (km)	4,5
	Profondeur moyenne (m)	3,6
	Profondeur maximale (m)	6,1
	Volume (x10 ⁶ m ³)	2,38
Bassin versant naturel	Superficie (km ²)	7,462
Bassin versant modifié	Superficie (km ²)	6,293

Source : Bergeron et al. (2002)

II.2. Bilan hydrique du bassin versant

Le lac Saint-Augustin est un lac artésien ; il est essentiellement alimenté par des eaux souterraines, des eaux de ruissellement, un tributaire à l'extrémité nord-est et par un réseau de drainage urbain et agricole. Ce dernier draine notamment les eaux de ruissellement provenant d'un tronçon de l'autoroute Félix-Leclerc. Le ruisseau de décharge du lac Saint-Augustin se jette directement dans le fleuve Saint-Laurent.

D'après une étude de Rochefort (2005) sur l'hydrogéologie du lac Saint-Augustin, le lac est alimenté par une nappe libre souterraine, située dans un aquifère poreux superficiel (voir figure I-2). Les eaux souterraines se déplacent sur le flanc nord du lac dans la direction NO-SE, puis elles traversent les sédiments du lac pour alimenter le lac lui-même. La zone d'influence d'infiltration des eaux de ruissellement de l'autoroute Félix-Leclerc se trouve au-dessus de cette nappe.

Un bilan hydrologique a été réalisé pour ce lac par Rochefort (2005) à partir de données climatiques de 1990 à 2004 d'Environnement Canada. La précipitation annuelle

moyenne est de 1117 mm dans le bassin versant du lac. La répartition des eaux de pluie est illustrée à la figure II-2.

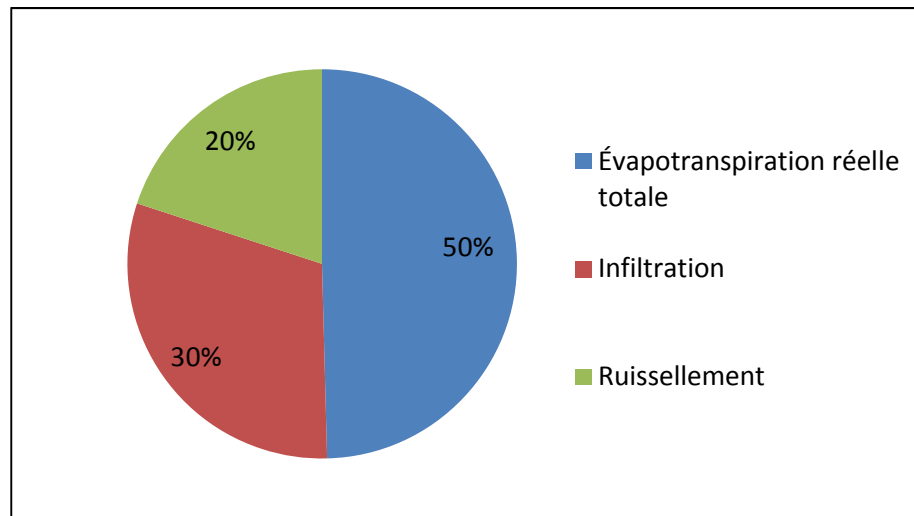


Figure II-2 Répartition des eaux de pluie dans le bassin versant du lac Saint-Augustin

Le temps de renouvellement du lac calculé est entre 0,44 an (Bergeron *et al.* 2002) et 0,71 an (Galvez-Cloutier *et al.* 2006 a). Ainsi l'eau du lac se renouvelle 1,4 à 2,3 fois par an, ceci faciliterait une restauration du lac. En effet, la réduction des apports en nutriments et un temps de renouvellement relativement court des eaux du lac permettrait de réduire plus rapidement la concentration des nutriments dans la colonne d'eau.

II.3. Qualité des eaux du bassin versant

Dans cette section sont résumées les principales données concernant la qualité des eaux du bassin versant du lac Saint-Augustin.

Les données relatives à la qualité de l'eau du lac permettent de déterminer le niveau d'eutrophisation du lac. Les descripteurs couramment utilisés pour la surveillance de l'eutrophisation sont la transparence et les concentrations en phosphore total et en chlorophylle *a*. Les valeurs moyennes mesurées pour ces paramètres en été sont présentées au tableau II-2. Ces données et le diagramme de classement du niveau d'eutrophisation des lacs présenté à la figure II-3 indiquent que le lac Saint-Augustin est un lac eutrophe voire hyper-eutrophe, et donc dans un état critique.

Tableau II-2 Valeurs moyennes des paramètres de surveillance de l'eutrophisation au lac Saint-Augustin

Période	Transparence en m	Phosphore total en µg/L	Chlorophylle α en µg/L
Été 2000 *	0,7	70	-
Été 2001 *	0,9	70	62,4
Été 2003 **	1,5	77,6	53

Sources : * Bergeron et al. (2002) ; ** Simoneau et al. (2004)

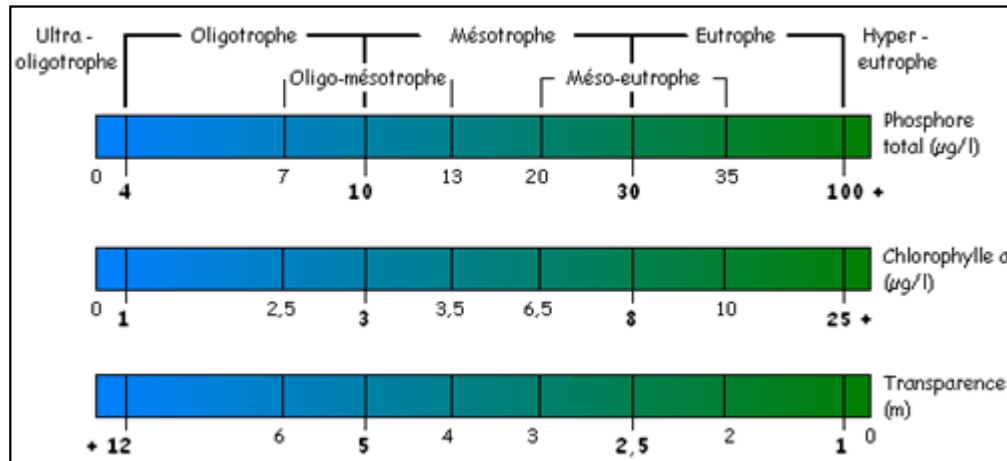


Figure II-3 Diagramme de classement du niveau d'eutrophisation des lacs

Source : MDDEP (2002)

Par ailleurs, les concentrations en métaux (cadmium, chrome, cuivre, fer, mercure, nickel, plomb et zinc) et les concentrations en chlorures, calcium et sodium (sels dissous) sont inférieures aux critères de qualité de l'eau de surface du MDDEFP (Bergeron et al. 2002).

Les données concernant les eaux souterraines et les eaux de ruissellement, ainsi que les eaux du lac sont résumées dans le tableau II-3. Ce tableau donne les gammes de valeurs mesurées lors des différents travaux de caractérisation des eaux du bassin versant du lac Saint-Augustin. Les eaux souterraines et de ruissellement transportent des contaminants qui se retrouvent ensuite dans le lac. Les eaux souterraines apportent essentiellement du phosphore au lac. Les eaux de ruissellement apportent au lac une eau légèrement basique chargée en sels dissous (conductivité élevée) tels que le chlorure et le sodium, provenant des sels de déglacage.

Tableau II-3 Résumé de la qualité des eaux dans le bassin versant du lac Saint-Augustin

Paramètre	pH	Conductivité en $\mu\text{s}/\text{cm}$	Phosphore total en $\mu\text{g}/\text{L}$
Eau lac	7,5 – 7,8	700 - 1300	60 - 120
Eaux souterraines	7,4 – 7,5	425 - 925	40 - 60
Eaux de ruissellement	7,7 - 8,3	625 - 4380	10

II.4. Qualité des sédiments du lac

Les sédiments du lac Saint-Augustin ont fait l'objet de caractérisations afin de déterminer les contaminants les plus problématiques.

Les analyses sur les sédiments ont révélé une concentration moyenne en phosphore total de 1209 mg/kg (Brin, 2007) et de 892 mg/kg (Consortium DDM – ProFaune, 2005). La concentration moyenne se situe entre le « Lowest Effect Level » (seuil d'effets mineurs) égal à 600 mg/kg et le « Severe Effect Level » (seuil d'effets néfastes) égal à 2000 mg/kg, seuils établis par le ministère de l'Environnement de l'Ontario (1993). En regard de ces critères de qualité, les sédiments sont considérés comme étant légèrement à significativement contaminés en phosphore (aucun critère pour cette substance n'a été établi par le MDDEFP).

Des métaux lourds sont présents dans les sédiments mais leur concentration ne dépasse par la concentration d'effets probables (CEP), qui est un critère de qualité tiré du guide « Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'applications : prévention, dragage et restauration » (Environnement Canada et MDDEP, 2007). D'après ce guide, il n'y a pas alors lieu d'initier de processus de restauration au regard de la contamination relativement faible des sédiments par les métaux. Néanmoins, la concentration en cadmium (Cd), plomb (Pb) et zinc (Zn) dépasse la concentration d'effets occasionnels (CEO), autre critère du guide précédemment cité. Ceci implique qu'il est nécessaire de s'assurer qu'après dragage, la gestion des sédiments ne contribue pas à détériorer le milieu récepteur (Environnement Canada et MDDEP, 2007).

Le mercure et l'arsenic sont également retrouvés dans les sédiments, mais n'excèdent pas le CEO (Galvez-Cloutier *et al.*, 2003 ; Environnement Canada et MDDEP, 2007). Quant à l'aluminium et le fer, leur concentration est du même ordre de grandeur que les

teneurs naturelles retrouvées dans les sédiments des lacs d'eau douce du Saint-Laurent (Consortium DDM – ProFaune, 2005; Environnement Canada et MDDEP, 2007).

Les concentrations moyennes pour le phosphore et les métaux les plus inquiétants sont résumées dans le tableau II-4 et comparées aux différents critères précédemment cités.

Tableau II-4 Concentration des contaminants problématiques des sédiments du lac Saint-Augustin

Contaminant	Concentration moyenne en mg/kg *	Seuil d'effets mineurs en mg/kg **	Concentration d'effets occasionnels en mg/kg ***	Concentration d'effets probables en mg/kg ***
Phosphore	1209	600	-	-
Cadmium	2,3	0,9	1.7	3.5
Plomb	75	42	52	91
Zinc	272	150	170	310

Source : *Brin (2007) ; ** Centre Saint-Laurent et ministère de l'Environnement du Québec (1992)

*** Environnement Canada et MDDEP (2007)

Suite à la caractérisation qualitative des sédiments sur toute la surface du lac, des zones à plus forte contamination ont pu être délimitées. La carte des zones hautement contaminées est montrée à la figure II-4. Les flèches vertes indiquent les points d'entrée des eaux de ruissellement et, en conséquence, les zones I, III et IV sont des zones à haute sédimentation. Les concentrations seuils utilisées pour une gestion écoresponsable des contaminants sont tirées du guide Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'applications : prévention, dragage et restauration (Environnement Canada et MDDEP, 2007). Les lettres A à I suivies d'un incrément numérique représentent les sites caractérisés où il y a eu échantillonnage des sédiments pour analyse (Galvez-Cloutier *et al.* 2003; Dominguez, 2005).

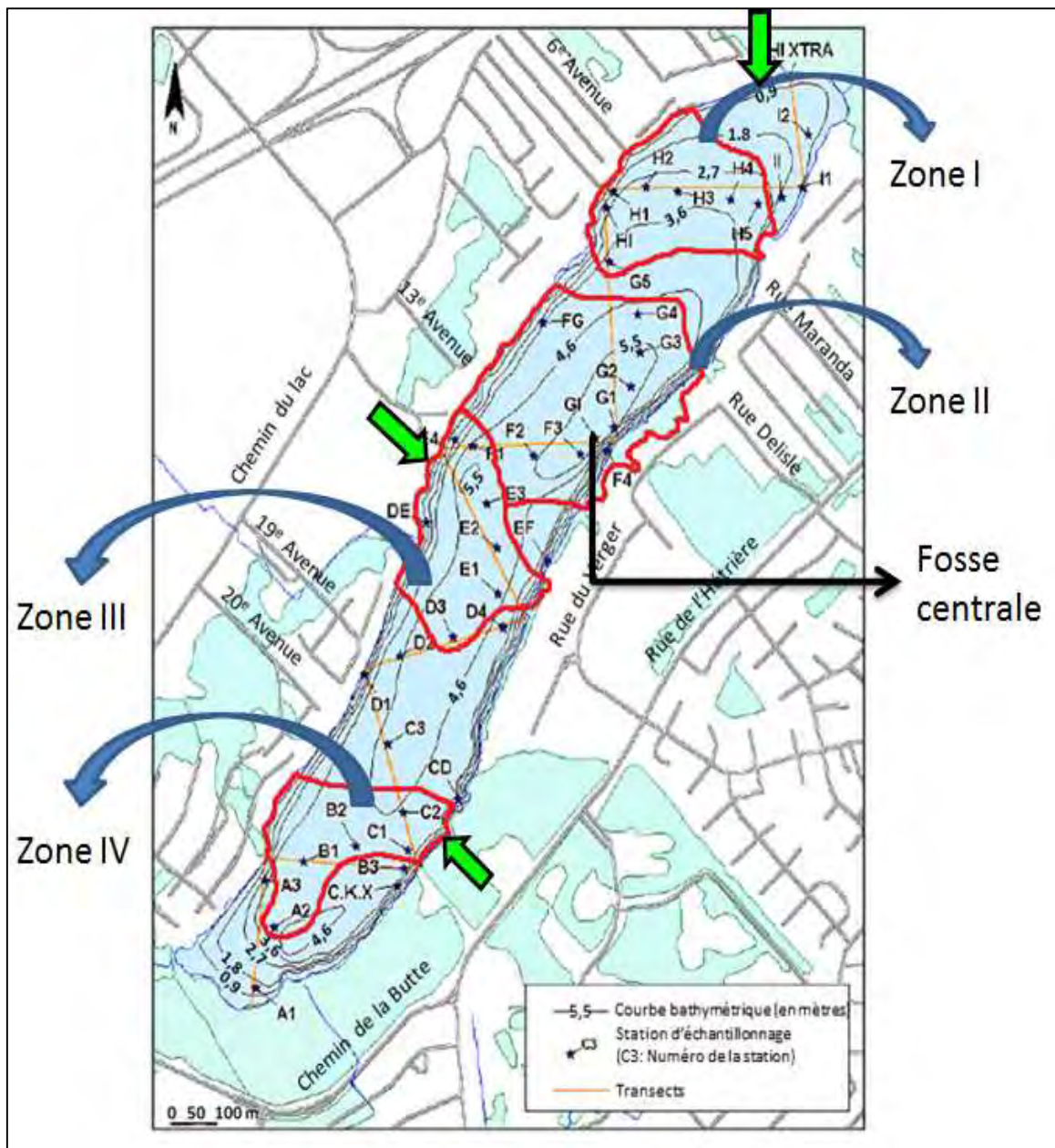


Figure II-4 Zones à haute contamination du lac Saint-Augustin

Adaptée de Brin (2007)

III. Description du projet pilote

Le projet pilote de restauration du lac Saint-Augustin est un projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du lac Saint-Augustin, divisé en deux volets. Le cœur du projet consiste en l'évaluation, par des essais *in situ*, de la performance de plusieurs techniques de contrôle du phosphore. Ces essais *in situ* ont été réalisés sur le lac, au moyen d'une plateforme flottante. Lors du volet I, à l'été 2009, les procédés de traitement par coagulation et de recouvrement actif des sédiments ont été testés. Au cours du volet II, trois types d'essais ont été menés. Tout d'abord, des essais de diffusion du phosphore ont été effectués afin d'étudier le potentiel de relargage du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin. Puis, des essais *in situ* lors de l'été 2011 ont permis de tester le dragage hydraulique et le dragage mécanique. Enfin, des essais de séparation de phases solide-liquide ont été réalisés sur les sédiments dragués à la suite des essais *in situ* du volet II.

III.1. Essais du volet I

Cette section présente, tout d'abord, la plateforme flottante utilisée pendant les essais *in situ* du projet pilote. Puis les procédures suivies lors de l'application des techniques de contrôle *in situ* du phosphore lors des essais du volet I sont résumées. Enfin, la méthode de prélèvement d'échantillons dans les enclos et les différentes méthodes analytiques effectuées sur les prélèvements sont également décrites.

III.1.1. Plateforme d'essais

Pour pouvoir évaluer les différentes techniques de contrôle du phosphore dans les conditions du lac, les essais ont été réalisés au lac au moyen d'une plateforme flottante munie de quatre enclos, conçue par l'Université Laval. Chaque enclos permet d'isoler, du reste du lac, une colonne d'eau, afin d'y appliquer un traitement et de suivre les changements physico-chimiques. La même plateforme a été utilisée pour les volets I et II.

La plateforme flottante comporte cinq modules rectangulaires, assemblés en forme de croix (voir figure III-1). Chaque module comprend une passerelle en bois non traité, reposant sur des flotteurs. L'ensemble fait 11 m de longueur et 9,5 m de largeur. La structure cruciforme permet d'accueillir quatre enclos de 4 m² de surface et donc de tester quatre procédés différents. Elle est stabilisée et ancrée au moyen de douze parpaings en béton enfouis dans les sédiments.

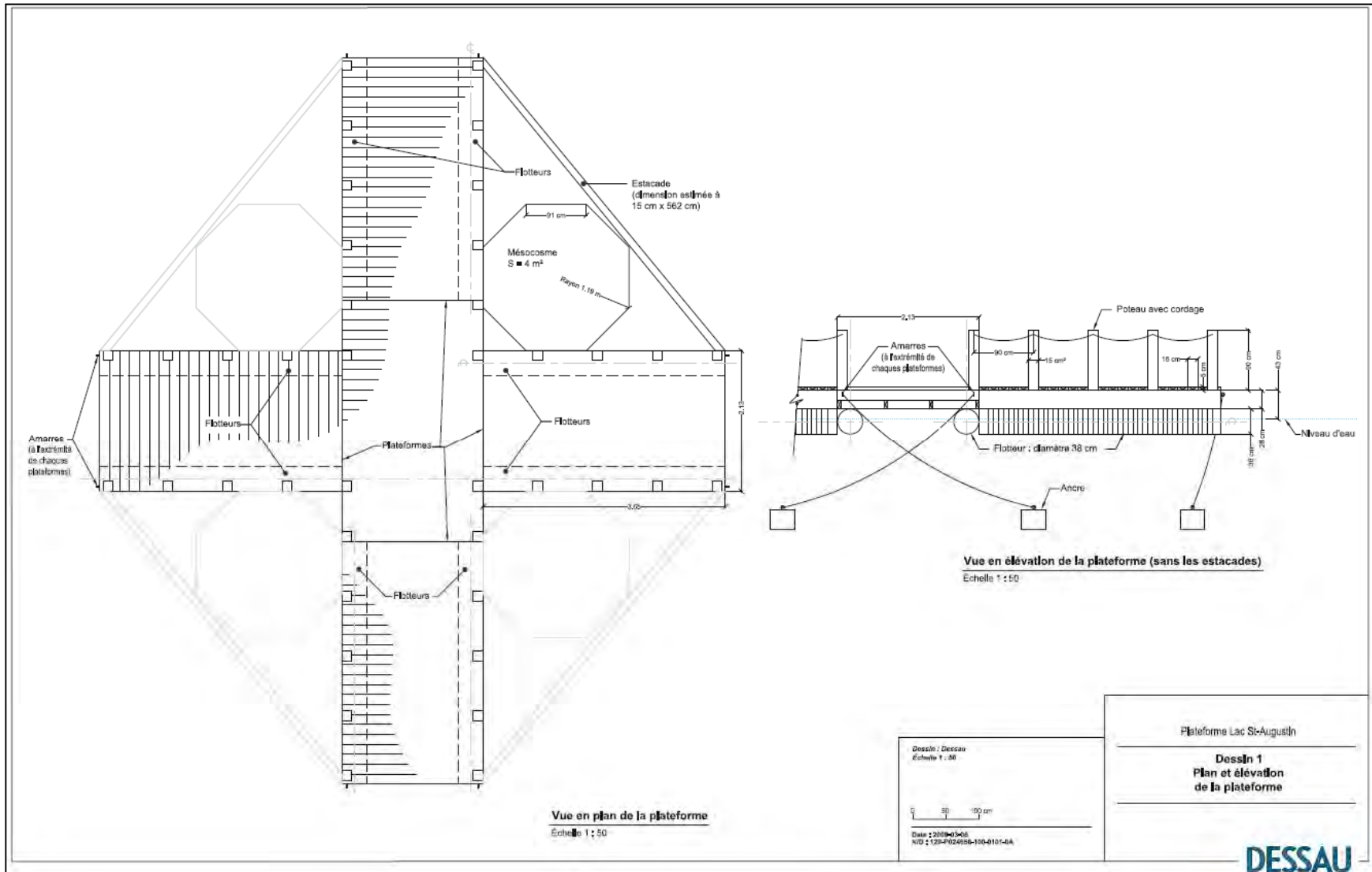


Figure III-1 Plan de la plateforme flottante, vue de dessus

Les enclos utilisés ont été fabriqués par la firme Curry Industries Ltd, ils sont présentés à la figure III-2. De forme octogonale, ils ont une surface de 4 m² et ne sont pas couverts, de manière à ce que les précipitations puissent y pénétrer. La toile est faite d'un matériau composite : du vinyle transparent renforcé par un maillage de fibres en polyester. L'extrémité supérieure de l'enclos se trouve à 30 cm au-dessus de la surface. Cette section de l'enclos empêche l'eau du lac de pénétrer dans la colonne d'eau. À l'extrémité inférieure, une chaîne en acier inoxydable a été ajoutée à l'enclos, afin d'augmenter le poids et donc faciliter l'ancrage.



Figure III-2 Enclos fabriqué par Curry Inc.

Ces essais *in situ* en plateforme font suite à une série d'expériences en laboratoire antérieures à savoir :

- des essais en colonnes (hauteur de 30 cm et 60 cm) en laboratoire avec des sédiments remaniés du lac Saint-Augustin, qui peuvent être considérées comme des essais à « très petite échelle » ;
- des essais en colonnes de 4 m avec des sédiments et de l'eau provenant du lac, avec la simulation de l'écoulement vertical des eaux souterraines. Ces essais peuvent être considérés comme étant à « petite échelle » puisque l'écoulement souterrain, les sédiments et la colonne d'eau permettent de simuler le plus possible les conditions réelles et les dimensions du lac.

C'est à partir de ces essais en laboratoire que les essais *in situ* ont été conçus. La plateforme flottante a permis d'effectuer des expérimentations dans des enclos d'une surface de 4 m², isolant complètement une colonne d'eau du lac dans toute sa hauteur et les sédiments du fond. Par conséquent, ces essais sont à « moyenne échelle » tout en étant plus près des conditions « naturelles » du lac.



Figure III-3 Plateforme d'essais à l'été 2009

III.1.2. Localisation de la plateforme

Le positionnement et les coordonnées GPS de la plateforme au cours des essais du volet I sont donnés au tableau III-1 et à la figure III-4.

Tableau III-1 Coordonnées GPS des sites d'essais de 2009 et 2011

Site	Coordonnées GPS	
Plateforme volet I (2009)	46°44'44.0" N	71°23'51.6" O



Figure III-4 Localisation de la plateforme lors des essais du volet I (2009)

Source : Google Earth (2012)

III.1.3. Essais *in situ* de coagulation et de recouvrement actif

Les essais *in situ* du volet I ont été réalisés par l'Université Laval pendant l'été 2009. Ils ont permis de tester les procédés de traitement par coagulation et de recouvrement actif des sédiments. Le coagulant utilisé lors du traitement par coagulation est l'alun. Le recouvrement actif des sédiments s'est fait avec de la pierre calcaire. Les quatre enclos ont accueilli des traitements distincts qui sont présentés au tableau III-2. Chaque colonne d'eau et son enclos associé ont été identifiés par un code lettré en rapport avec son traitement correspondant.

L'enclos T n'a subi aucun traitement et sert donc de témoin. Seuls les effets de l'isolement de son eau par la membrane auront été exercés sur l'eau de cet enclos. Un traitement par coagulation à l'alun a été appliqué à l'eau de l'enclos A. Un recouvrement actif de calcaire a été effectué au fond de l'enclos C. L'enclos AC, quant à lui, a subi le traitement combiné de coagulation à l'alun suivie du recouvrement actif de calcaire. La colonne d'eau L est l'ultime témoin, puisqu'il ne s'agit pas d'un enclos, mais de la colonne d'eau du lac sans influence de la plateforme. Précisément, la colonne d'eau du lac a été utilisée pour apprécier l'effet créé par la présence d'un l'enclos.

Tableau III-2 Colonnes d'eau: identification et traitement appliqué lors du volet I

Code de la colonne d'eau	Traitement appliqué
T	Enclos témoin, aucun traitement
A	Coagulation à l'alun
C	Recouvrement actif de calcaire
AC	Coagulation à l'alun puis recouvrement actif de calcaire
L	Lac (colonne d'eau libre), aucun traitement

III.1.3.1. Coagulation

Le traitement par coagulation à l'alun a été réalisé dans les enclos A et AC. L'alun a été fourni sous forme de sulfate d'aluminium à 640 mg/mL. Le volume d'alun ajouté à chacun des enclos a été calculé de sorte que la concentration finale d'alun dans une colonne d'eau soit égale à 20 mg/L. Cette concentration a été choisie car elle donne les meilleurs résultats en termes d'enlèvement du phosphore soluble (Galvez-Cloutier *et al.* 2006 c). Les étapes du traitement par coagulation ainsi que les paramètres d'opération sont résumés ci-après :

- phase d'agitation rapide de 7 minutes et injection de coagulant (coagulation)
- phase d'agitation lente de 2 heures (floculation) :
- sédimentation post-traitement d'un minimum de 72 heures.

III.1.3.2. Recouvrement actif

Le recouvrement actif a été effectué dans les enclos C et AC. Il comporte deux étapes : le dépôt d'une couche de 10 cm de pierre calcaire sur les sédiments suivi du dépôt d'une couche de 10 cm de sable sur le calcaire. La pierre calcaire utilisée est de la roche 1/4" (6,35 mm) nette. La couche de sable a été déposée sur le calcaire afin d'appliquer une pression sur celle de calcaire et ainsi solidifier le recouvrement



Figure III-5 Dépôt d'une couche de calcaire avec un tuyau verseur
Source : Bourget et al. (2011)

III.1.4. Prélèvements d'eau dans les enclos

Lors des essais *in situ*, des échantillons ont été prélevés dans les enclos ainsi que dans la colonne d'eau libre du lac. Les prélèvements ont été effectués au centre de la colonne au moyen d'une bouteille d'échantillonnage à des profondeurs différentes : à la surface, au milieu et au fond de la colonne (à environ 50 cm de la surface des sédiments).



Figure III-6 Bouteille de prélèvement

III.1.5. Analyses

Dans cette section sont présentées les analyses effectuées directement dans les enclos ou sur les échantillons prélevés. Les analyses ont été effectuées soit directement dans les colonnes d'eau, soit au laboratoire d'environnement de l'Université Laval, soit par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ). Le tableau III-4 détaille le lieu où les différentes analyses ont été effectuées.

Tableau III-3 Résumé des analyses sur l'eau des enclos

Lieu d'analyse	Analyse
Plateforme	Transparence
	Température
	pH
	Potentiel d'oxydoréduction
	Conductivité électrique
Université Laval	Phosphore soluble
	Matières en suspension
	Calcium et Sodium solubles
	Métaux solubles
	Chlorure
CEAEQ	Phosphore total
	Métaux

III.2. Essais du volet II

Cette section présente successivement : les essais de diffusion du phosphore en laboratoire ; les essais *in situ* lors de l'été 2011 qui ont permis de tester le dragage hydraulique et le dragage mécanique ; et les essais de séparation de phases solide-liquide qui ont été réalisés sur les sédiments dragués à la suite des essais *in situ* du volet II.

III.2.1. Étude préliminaire : essais de diffusion du phosphore

Le potentiel de relargage du phosphore provenant des sédiments a été évalué grâce à des essais de diffusion du phosphore réalisés en laboratoire. Cette étude préliminaire avait deux objectifs : 1) déterminer l'épaisseur optimale de sédiments à retirer lors d'une restauration du lac par dragage et 2) localiser l'emplacement de la plateforme du volet II. Le potentiel de relargage du phosphore a été étudié sur les sédiments récents et les sédiments anciens. Les sédiments récents correspondent aux dix premiers centimètres de

la couche superficielle des sédiments ; il s'agit des sédiments accumulés depuis les années 1960. Sous ces derniers se trouvent les sédiments anciens.

Quatre colonnes de sédiments de 70 cm ont été prélevées à chacun des sites d'échantillonnage (les sites A, C, F, I et K) situés à la pointe nord-est du lac Saint-Augustin (voir figure III-12). Cette zone du lac a été choisie car le taux de sédimentation et donc l'épaisseur des sédiments y sont élevée (Bourget *et al.* 2010). Pour chaque site, deux colonnes de sédiments ont été laissées telles quelles pour déterminer le potentiel de relargage du phosphore provenant des sédiments récents. Sur les deux autres, les dix premiers centimètres ont été retirés afin d'évaluer le potentiel de relargage de phosphore provenant des sédiments anciens.

Le protocole d'essai consiste à rajouter de l'eau pure (déionisée) au sommet de chaque colonne de sédiments pour permettre la diffusion du phosphore provenant des sédiments vers cette eau surnageante. Cette dernière a été échantillonnée à intervalles de temps réguliers et sa concentration en phosphore soluble a été mesurée.



Figure III-7 Lieux d'échantillonnage (A, C, F, I et K) pour les essais de diffusion du phosphore
Source : Bourget *et al.* (2010)

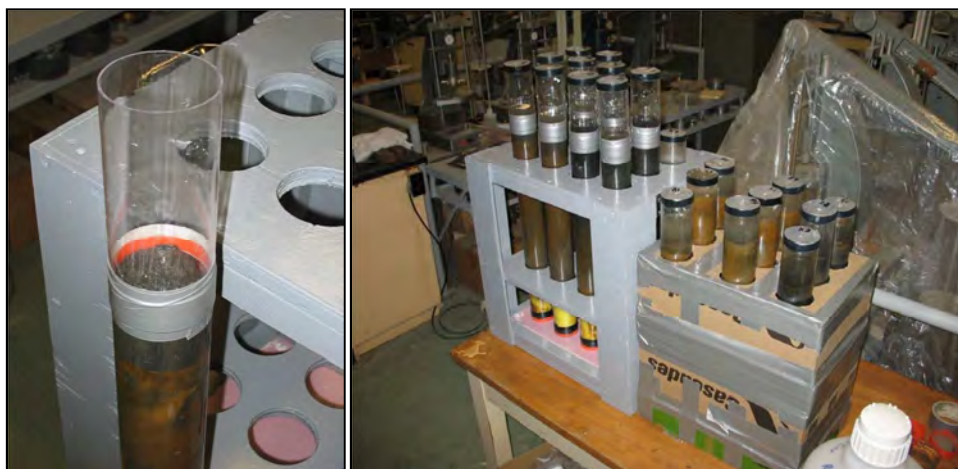


Figure III-8 Montage de l'essai de diffusion du phosphore

Source : Bourget et al. (2010)

Les concentrations moyennes en phosphore soluble dans l'eau surnageante sont présentées au tableau III-4. Ces résultats ont révélé que les sédiments anciens pour tous les sites d'échantillonnage libèrent peu de phosphore soluble comparativement aux sédiments récents. La concentration en phosphore soluble est généralement inférieure à 10 µg/L pour les sédiments anciens. En revanche, la concentration moyenne en phosphore soluble dans l'eau surnageante est égale à 77 µg/L pour les sédiments récents provenant du site I, et à 212 µg/L, pour ceux provenant du site K.

Tableau III-4 Résultats des essais de diffusion du phosphore sur les sédiments du lac Saint-Augustin

Origine de l'échantillon	Sédiments anciens					Sédiments récents				
	A	C	F	I	K	A	C	F	I	K
Concentration moyenne en phosphore soluble dans l'eau surnageante en µg/L	5	3	2	2	3	12	8	4	77	212

Source : Bourget et al. (2010)

D'après ces résultats, les sédiments récents sont davantage susceptibles de libérer du phosphore par diffusion dans l'eau du lac que les sédiments anciens. Par conséquent, l'enlèvement des dix premiers centimètres des sédiments est suffisant pour contrôler les apports en phosphore dans le cas d'une restauration du lac par dragage. Comme le potentiel de relargage du phosphore est plus élevé pour les sédiments récents des sites I et K, il a été décidé de placer la plateforme du volet II à proximité de ceux-ci.

III.2.2. Essais *in situ* de dragage

Les essais *in situ* du volet II ont eu lieu pendant l'été 2011 et ont permis de tester les procédés de traitement par dragage hydraulique (suction) et dragage mécanique des sédiments. Suite aux conclusions des essais de diffusion du phosphore mentionnés à la section précédente, il a été décidé de placer la plateforme du volet II à proximité des sites I et K. En raison d'une forte présence d'herbier et d'algues au niveau des sites I et K, la zone d'essais a été déplacée à quelques mètres, proche du site I, à quelques mètres du rivage (voir figure IV-5). La position finale a été choisie de telle sorte que :

- elle soit le plus proche des sites I et K ;
- l'épaisseur des sédiments y soit élevée ;
- il n'y ait pas d'herbier dans les enclos ;
- à proximité du rivage pour des raisons pratiques (accès) et de sécurité (évacuation).



Figure III-9 Localisation finale de la plateforme

Source : Constantin et al. (2012)

Le positionnement et les coordonnées GPS de la plateforme au cours des essais des volets I et II sont donnés au tableau III-5 et à la figure IV-6.

Tableau III-5 Coordonnées GPS des sites d'essais de 2009 et 2011

Site	Coordonnées GPS	
Plateforme volet I (2009)	46°44'44.0" N	71°23'51.6" O
Plateforme volet II (2011)	46°45'18.5" N	71°23'06.7" O

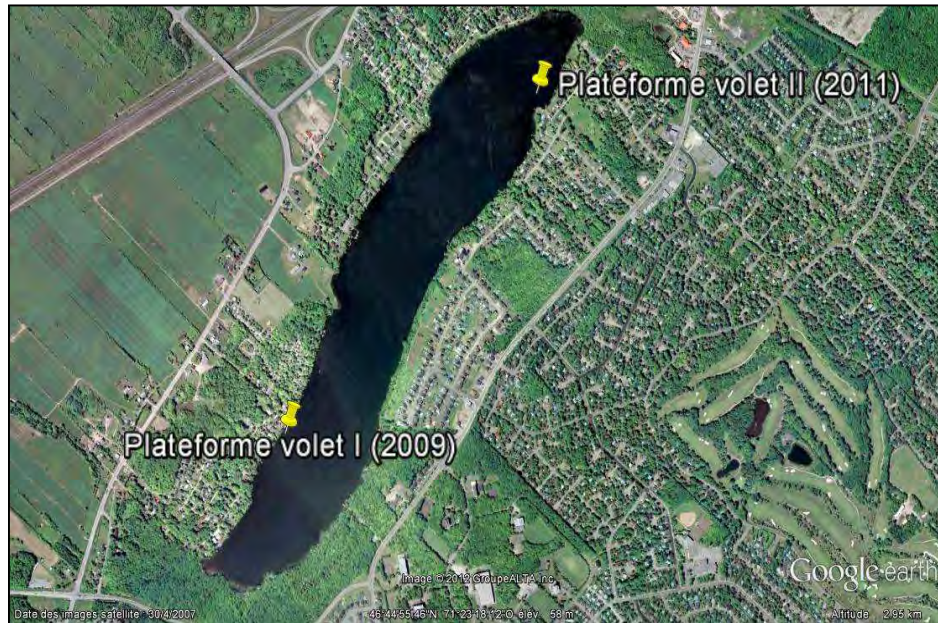


Figure III-10 Localisations de la plateforme lors des essais des volets I (2009) et II (2011)

Source : Constantin et al. (2012)

Trois enclos ont accueilli des traitements distincts qui sont présentés au tableau III-6. Chaque colonne d'eau et son enclos associé ont été identifiés par un code lettré en rapport avec son traitement correspondant. Comme lors du volet I, un enclos n'a subi aucun traitement et a servi donc de témoin, et une colonne d'eau libre du lac a servi d'ultime témoin. Le dragage hydraulique a été réalisé dans l'enclos H et le dragage mécanique dans l'enclos M.

Tableau III-6 Colonnes d'eau: identification et traitement appliqué lors du volet II

Code de la colonne d'eau	Traitement appliqué
T	Enclos témoin, aucun traitement
H	Dragage hydraulique (suction)
M	Dragage mécanique
L	Lac (colonne d'eau libre), aucun traitement

III.2.2.1. Dragage hydraulique (suction)

Ce traitement vise à simuler le dragage hydraulique par une drague suceuse. Le dragage hydraulique a consisté en un enlèvement d'au moins dix centimètres de sédiments superficiels par suction. Compte-tenu de la taille de l'enclos et du volume de sédiments à retirer, ce dragage a été réalisé au moyen d'une motopompe auto-amorçante, destinée au pompage d'eaux chargées en particules solides. Au total, environ 950 L de sédiments ont été dragués, puis stockés en rive. À la fin du dragage, l'épaisseur de sédiments pompés est de 10 à 15 cm.



Figure III-11 Dragage hydraulique à l'aide d'une motopompe et de son tuyau d'aspiration



Figure III-12 Sédiments refoulés dans une cuve par la motopompe

III.2.2.2. Dragage mécanique

Ce traitement vise à simuler le dragage mécanique par benne preneuse. Ce traitement a consisté en un enlèvement d'au moins dix centimètres de sédiments superficiels. Il a été réalisé au moyen de deux bennes à sédiments d'échantillonnage. Au total, environ 450 L de sédiments ont été dragués puis stockés en rive.



Figure III-13 Benne à sédiments d'échantillonnage utilisée pour le dragage mécanique

De même que lors des essais in situ du volet I, des échantillons ont été prélevés dans les enclos. De plus, les analyses effectuées directement dans les enclos ou sur les échantillons prélevés sont les mêmes que lors du volet I.

III.2.3. Essais de séparation des phases solide-liquide

Les essais de séparation des phases solide-liquide ont eu lieu au département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval, lors de l'automne 2011 et ont été conduits par l'équipe de recherche de Prof. Rosa Galvez. Ces essais visent à évaluer la performance de techniques de traitement des produits de dragage afin d'établir une stratégie de gestion et de réutilisation des sédiments adaptée au cas du lac Saint-Augustin.

La séparation des phases solide-liquide permet de :

- concentrer les particules solides, en vue d'une réutilisation ou d'une élimination ;
- clarifier l'eau contenue dans les produits de dragage, en vue d'un retour au lac ou d'une élimination.

Les méthodes testées sont la décantation, la coagulation par un polymère suivie d'une filtration et la clarification par hydrocyclone.

III.2.3.1. Décantation

L'essai de décantation a consisté à laisser sédimenter la boue issue du dragage mécanique et à mesurer la teneur en matières en suspension dans l'eau surnageante. Ceci a permis :

- d'estimer le délai de décantation à attendre afin d'obtenir une eau suffisamment clarifiée et potentiellement retournable au lac ;
- d'évaluer la contamination de cette eau surnageante.

Cet essai a été réalisé sur la boue issue du dragage mécanique, dans une cuve en PVC située à la ferme Pâquet. Le volume de boue utilisée est d'environ 350 L.

III.2.3.2. Coagulation et filtration

Cet essai a été réalisé sur les sédiments extraits par dragage hydraulique qui ont été conservés à 4°C au laboratoire d'environnement de l'Université Laval. Le choix du polymère a été effectué par la firme Chemco Inc. Il s'agit d'un polymère cationique, utilisé dans le domaine de l'agroalimentaire. La filtration s'est faite avec un sac de filtration *Geotube GT500*® (voir figure III-11), spécialement conçu pour la déshydratation des boues, fabriqué par Tencate Geotube®.



Figure III-14 Sac de filtration *Geotube GT500*

III.2.3.3. Hydrocyclone

La séparation des phases solide-liquide par hydrocyclone a été réalisée sur un échantillon de 20 L de sédiments issus du dragage hydraulique. L'hydrocyclone utilisé est celui du département de génie des mines et de la métallurgie de l'Université Laval.



Figure III-15 Hydrocyclone du département de génie des mines et de métallurgie

III.2.3.4. Analyses

Les analyses effectuées sur les phases solide et liquide des sédiments après séparation sont résumées dans le tableau III-5. Après séparation, la siccité de la phase solide a été mesurée, ceci correspond au pourcentage massique de matière sèche dans les sédiments.

Tableau III-7 Résumé des analyses après séparation des phases solide-liquide

Type d'échantillon	Lieu d'analyse	Analyse
Phase liquide après séparation	Université Laval	pH
		Conductivité électrique
		Matières en suspension
		Calcium et Sodium solubles
		Métaux solubles
	Chlorure	
	CEAEQ	Phosphore total
Phase solide après séparation	Université Laval	Siccité

IV. Résultats des recherches et essais

Dans cette section sont présentés les résultats des essais menés dans le cadre du projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du lac Saint-Augustin. Sont présentés tout d'abord les essais *in situ* de coagulation et de recouvrement actif (volet I), puis les essais *in situ* de dragage (volet II), et les essais de séparation de phase solide-liquide sur les sédiments dragués (volet II).

Compte tenu de la problématique d'eutrophisation du lac, l'objectif principal des essais *in situ* était d'évaluer différentes techniques permettant d'inactiver la source interne en phosphore que sont les sédiments du fond du lac. Par conséquent, ce rapport final comparatif reprend les résultats relatifs au phosphore, principal paramètre discriminant, ainsi que les phénomènes d'intérêt présentés dans les rapports techniques des volets I et II du projet pilote. Les données sur le phosphore soluble étant plus abondantes, seules celles-ci sont présentées ici. Pour de plus amples détails sur les résultats des essais, le lecteur est invité à contacter le Service de l'environnement de la Ville de Québec.

Les résultats présentés sont à considérer avec précaution pour plusieurs raisons :

- Chaque technique n'a été mise à l'essai qu'une seule fois et sur une durée mesurée en mois (3 à 4 mois). Ainsi les données sont présentées en termes d'efficacité à court terme (toute suite après traitement) et à moyen terme (à la fin de la période d'essai). Les essais n'ont pu être répétés en raison des importantes ressources logistiques nécessaires à la réalisation de telles expérimentations *in situ*. L'évaluation de l'efficacité à plus long terme des techniques reste à faire et devra tenir compte des contraintes saisonnières (gel du lac à l'hiver) ainsi que matérielles.
- L'hétérogénéité spatiale de la qualité des sédiments est à considérer lors de l'interprétation des résultats. En effet, bien qu'adjacents, deux enclos peuvent avoir des fonds un peu différents et cette variabilité est accentuée par la présence de l'enclos (effet de concentration).

Néanmoins les résultats obtenus donnent un aperçu de l'impact des techniques testées sur le lac et permettent de mettre en évidence un certain potentiel de ces techniques.

IV.1. Essais *in situ* de coagulation et de recouvrement actif

IV.1.1. Performance des traitements

La performance des différents traitements a été évaluée en termes de réduction de la concentration moyenne en phosphore soluble dans la colonne d'eau, compte tenu de la problématique du lac Saint-Augustin. Ceci a permis de déterminer l'efficacité des procédés testés lors du volet I. Le suivi au cours du temps de la concentration moyenne en phosphore soluble dans chaque colonne d'eau est donné à la figure IV-1.

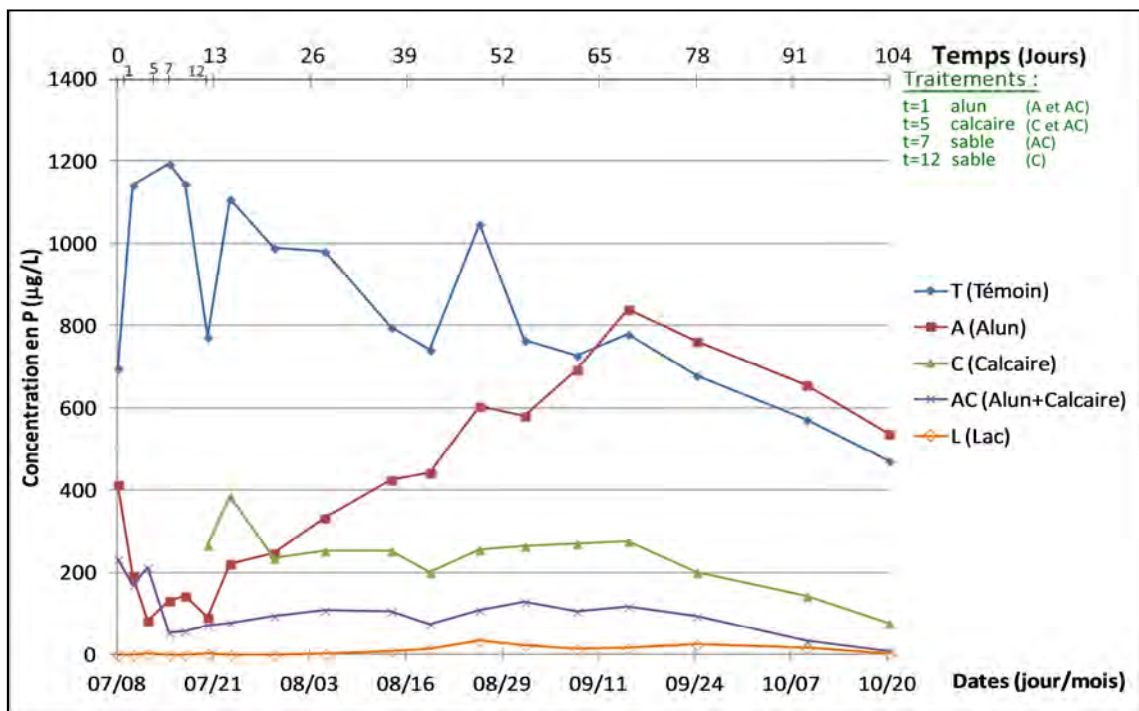


Figure IV-1 Évolution temporelle de la concentration moyenne en phosphore soluble dans chaque colonne d'eau lors des essais du volet I

Source : Bourget et al. (2011)

Le traitement par coagulation seule a causé un abattement rapide mais bref du phosphore soluble. La concentration en phosphore soluble ($[P_{\text{soluble}}]$) après trois jours était inférieure d'environ 86 % par rapport à la concentration avant coagulation. Ainsi, cette technique a permis de faire précipiter la majeure partie du phosphore présent dans l'eau. Puis $[P_{\text{soluble}}]$ a commencé à augmenter. À la fin des essais, soit plus de trois mois après la coagulation, la concentration en phosphore soluble était nettement supérieure à la concentration minimale obtenue juste après le traitement ainsi qu'à celle d'avant traitement. Par

conséquent, l'efficacité de la coagulation seule à la fin des essais est considérée comme nulle.

Le traitement par recouvrement actif seul a permis, après trois semaines, de stabiliser la concentration en phosphore soluble dans la colonne d'eau pendant six semaines. Puis $[P_{\text{soluble}}]$ a diminué jusqu'à la fin des essais. En comparant la concentration atteinte en fin d'essai à celle d'avant traitement, l'efficacité du recouvrement actif seul à la fin des essais a été estimé à 71 %.

Quant au traitement par coagulation et recouvrement actif, il a permis dans un premier temps de réduire d'environ 77 % la teneur en phosphore soluble, une semaine après le début du traitement. Puis, deux semaines après, la concentration en phosphore dans la colonne d'eau s'est stabilisée. Enfin, lors du dernier mois de l'expérimentation, elle a diminué progressivement. Ainsi le traitement par coagulation et recouvrement actif a combiné les impacts des deux premières techniques décrites précédemment. En comparant la concentration atteinte en fin d'essai à celle d'avant traitement, l'efficacité de l'association coagulation et recouvrement actif à la fin des essais a été estimé à 95 %.

Par ailleurs, la performance des différents traitements a pu être observée de manière très prononcée dans les enclos, comme montré à la figure IV-2. L'enclos témoin et celui du traitement par coagulation ont montré une coloration verte particulièrement intense. En revanche, les traitements de recouvrement actif et de coagulation combinée au recouvrement actif ont permis une amélioration de la transparence de l'eau.

Tableau IV-1 Performance des traitements de coagulation et de recouvrement actif

Traitement	Performance relative à la réduction de la teneur en phosphore soluble en %
Coagulation	0
Recouvrement actif	71
Coagulation + recouvrement actif	95

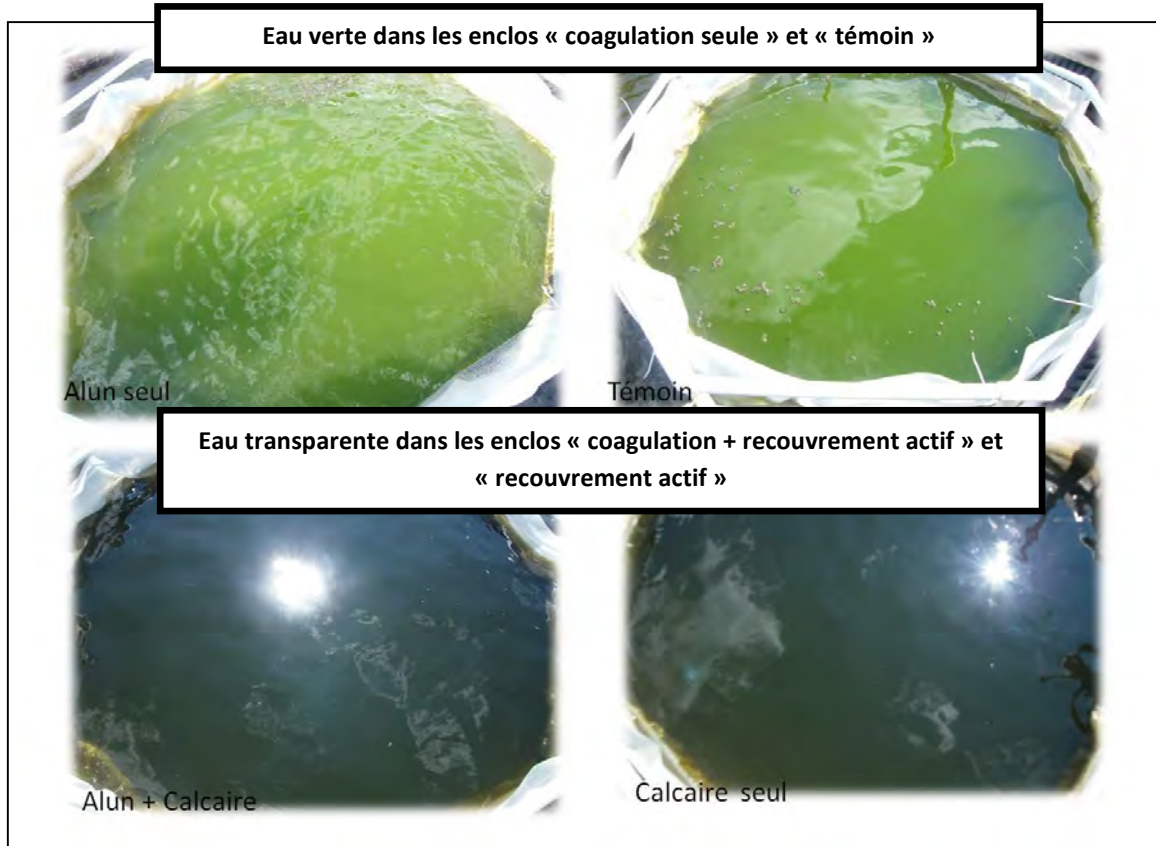


Figure IV-2 Coloration de l'eau des enclos 30 jours après le début des essais du volet I

Source : Bourget et al. (2011)

IV.1.2. Suivi de l'aluminium pour les procédés avec coagulation à l'alun

Le coagulant utilisé, de par sa composition (alun = sulfate d'aluminium), entraîne un ajout d'aluminium dans la colonne d'eau, un suivi de ce métal a été donc effectué. Les analyses d'aluminium total ont montré une forte hausse de ce métal dans l'eau des deux enclos traités à l'alun, jusqu'à 0,45 mg/l pour le traitement de coagulation utilisé seul et 0,15 mg/l pour le traitement de coagulation combiné au recouvrement actif. En comparaison, les concentrations maximales mesurées dans le lac ne dépassaient pas 0,02 mg/l. Ces hausses n'ont toutefois été mesurées que le lendemain des traitements à l'alun, puisque l'abattement des concentrations en aluminium total a été rapide par la suite. Après 19 jours, les deux enclos traités montraient des niveaux d'aluminium total inférieurs à 0,1 mg/l (critère qualité du MDDEFP), pour rejoindre les concentrations du lac après 40 jours.

IV.1.3. Présence de gastéropodes

La présence invasive de gastéropodes jonchant la surface des sédiments a été relevée lors de l'examen du fond du lac avant l'installation de la plateforme lors du volet I (Bourget *et al.* 2011). Ces organismes sont des escargots de l'espèce *Cipangopaludina chinensis*. Ces gastéropodes ont tendance à remuer les sédiments en période de stress ; apparenté ici au changement d'habitat qu'est la mise en place d'enclos d'isolement bloquant le courant de l'eau du lac. Par conséquent, ces escargots ont pu être responsables d'une forte bioturbation, qui est ici le transfert de nutriments des sédiments vers la colonne d'eau. Ceci expliquerait que les concentrations en phosphore soluble dans les enclos soient plus de 30 fois supérieures à celles de la colonne d'eau libre du lac.

IV.2. Essais *in situ* de dragage

IV.2.1. Performance des traitements

De même que pour les essais de coagulation et de recouvrement actif, la performance des techniques de dragage a été évaluée en termes de réduction de la concentration moyenne en phosphore soluble dans la colonne d'eau. Le suivi au cours du temps de la concentration moyenne en phosphore soluble dans les enclos « dragage mécanique » et « dragage hydraulique » est donné à la figure IV-3.

Concernant le dragage hydraulique (suction), il a permis, dans un premier temps, de stabiliser la concentration en phosphore soluble tout de suite après sa réalisation. Puis, près de deux semaines après le dragage hydraulique, la concentration en phosphore soluble a chuté, et a fini par diminuer progressivement jusqu'à la fin des essais. À la fin des essais, un abattement moyen de 88 % de la concentration en phosphore soluble a été calculé par rapport à la concentration mesurée juste avant la réalisation du dragage hydraulique.

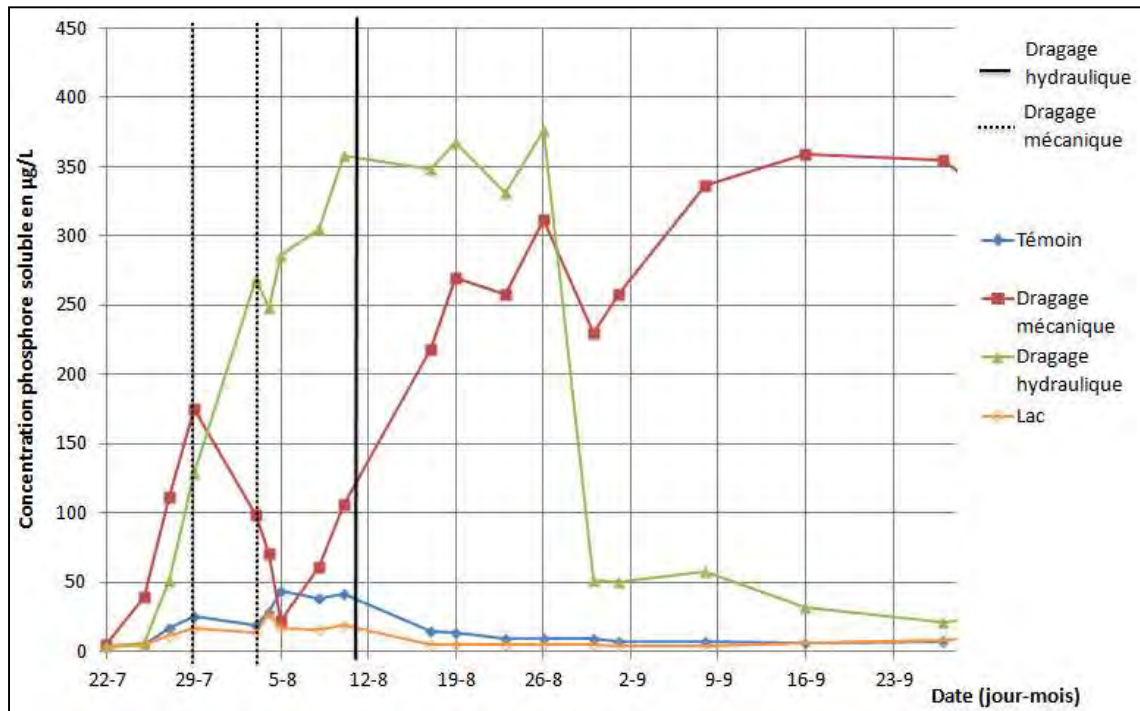


Figure IV-3 Évolution temporelle de la concentration moyenne en phosphore soluble dans chaque colonne d'eau lors des essais du volet II
 Source : Constantin et al. (2012)

Le dragage mécanique a causé une augmentation de la concentration en phosphore soluble deux semaines après l'application du traitement. Puis, elle s'est ensuite stabilisée, à la fin des essais, à un niveau nettement supérieur à celui dans l'enclos « dragage hydraulique ». Finalement, aucun rabattement n'a été observé à la fin des essais par rapport à la concentration mesurée juste avant la réalisation du dragage mécanique. La performance est considérée comme étant nulle à l'échelle de l'essai. Ces essais ont donc montré que le dragage hydraulique (suction) est plus efficace que le dragage mécanique sur une durée de deux mois dans les conditions du lac Saint-Augustin.

Contrairement aux essais *in situ* du volet I, les essais *in situ* du volet II n'ont pas permis d'observer à l'œil nu une différence significative entre les deux types de dragage en termes d'aspect visuel un mois après les traitements, comme montré à la figure IV-4.



Figure IV-4 Coloration de l'eau des enclos 30 jours après le début des essais du volet II

IV.2.2. Mise en suspension

Le dragage mécanique a mis en suspension des sédiments, ce qui a provoqué la chute de la transparence et une hausse de la teneur en matières en suspension (MES). Un jour après cette opération de dragage, la teneur en MES était dix fois plus grande qu'avant le dragage, dépassant le seuil maximal de MES égal à 25 mg/L (MDDEP, 2009), au-dessus duquel le MDDEFP qualifie l'eau comme étant turbide. Elle est revenue à sa valeur initiale une semaine après. Pour le dragage hydraulique, la teneur en MES est restée stable avant et après le dragage hydraulique, la transparence a même augmenté suite à ce traitement pendant deux semaines. Ainsi, en raison de l'aspect non consolidé des sédiments superficiels du lac, le dragage mécanique a enlevé moins efficacement un même volume donné de sédiments que le dragage hydraulique.

IV.3. Essais de séparation des phases solide-liquide sur les sédiments dragués lors du volet II

Dans cette section sont présentés les résultats des essais de séparation des phases solide-liquide sur les sédiments dragués lors du volet II.

D'après les résultats de l'essai de décantation sur les sédiments dragués mécaniquement, il faudrait attendre environ 15 jours à partir du début de la décantation pour avoir un liquide surnageant de qualité acceptable en termes de MES en vue d'un retour au lac. Ce surnageant a une concentration en phosphore soluble inférieure à 10 µg/L. Par ailleurs, la siccité (pourcentage massique de matières sèches) de la phase solide est égale à 30 %, alors qu'un échantillon de sédiments dragués mécaniquement a une siccité initiale de 29 %. Donc la décantation ne permet pas de concentrer significativement les solides.

Suite à l'essai de coagulation avec polymère et filtration sur les sédiments dragués hydrauliquement, la phase liquide obtenue est de qualité acceptable en termes de MES en vue d'un retour au lac, cette phase liquide étant plus limpide que les eaux du lac. Cette phase liquide a une concentration en phosphore soluble inférieure à 10 µg/L. Quant à la phase solide obtenue après séparation, sa siccité est égale à 35 %, alors que les sédiments dragués hydrauliquement ont une siccité initiale de 5 %. Ainsi la séparation par coagulation-filtration permet de réduire nettement la quantité d'eau contenue dans la phase solide.

Ainsi la coagulation par polymère couplée à une filtration semble la technique la plus performante. En un temps plus court que la décantation, la phase liquide obtenue est plus limpide que l'eau du lac et présente une concentration en phosphore soluble très faible. De plus, cette technique de coagulation par polymère et filtration permet de concentrer davantage les solides comparativement à la décantation.

V. Analyse comparative des techniques des mesures de restauration testées

Dans cette section, les mesures de restauration, qui ont été expérimentées lors des essais *in situ* des volets I et II, sont comparées suivant des aspects environnementaux, techniques et financiers.

V.1. Aspects environnementaux

V.1.1. Remise en suspension des sédiments

Une remise en suspension importante des sédiments peut entraîner une libération de phosphore et de métaux lourds, ce qui a pour conséquences de diminuer la qualité de l'eau et de perturber le milieu récepteur (Environnement Canada, 1994 ; Sigg *et al.*, 2006). En théorie, le dragage hydraulique génère une remise en suspension des sédiments, toutefois moins importante que le dragage mécanique (Environnement Canada, 1994). Cette tendance a également été observée au lac Saint-Augustin lors des essais en enclos du volet II. La transparence Secchi a augmenté pour le dragage hydraulique pendant deux semaines, tandis qu'elle a diminué pendant près de deux semaines pour le dragage mécanique, causant une augmentation de la concentration en phosphore soluble (Constantin *et al.* 2012).

La remise en suspension des sédiments associée à la mise en place du matériel de recouvrement sur les sédiments est faible et varie selon la méthode d'application (Bourget *et al.* 2011; Constantin *et al.* 2012; Fredette *et al.* 2004). La mise en place de rideaux de turbidité est une mesure pouvant aider à diminuer l'impact négatif associé à la remise en suspension des sédiments (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004; Ville de Québec, 2009).

V.1.2. Transformation de l'habitat des organismes benthiques

Excepté le traitement par coagulation seule, tous les procédés à l'essai impliquent une transformation radicale du fond, et donc un impact *a priori* sur les organismes benthiques (organismes vivant à l'interface eau-sédiments). En effet, le fond actuel du lac Saint-Augustin représente un habitat et une source riche en matière organiques et en nutriments pour ces organismes, notamment les escargots qui ont été observés lors du volet I. Néanmoins, les sédiments superficiels actuels comportent des espèces caractéristiques de lacs eutrophes, et notamment des spores de cyanobactéries. Ainsi la

suppression de ce fond inhiberait la reproduction des cyanobactéries. Les matériaux du recouvrement actif, en jouant le rôle de barrière physique, et le dragage des sédiments où se trouvent ces germes empêcheraient la germination des cyanobactéries. Par ailleurs, ces deux procédés permettraient d'entraver la prolifération d'escargots. Ces derniers peuvent être des hôtes de vers parasites à l'origine de la « dermatite du nageur », qui est une infection causant rougeurs sur la peau, œdèmes, démangeaisons, voire fièvre, insomnie et nausées (Villeneuve, 2003 ; Cotruvo et Organisation Mondiale de la Santé, 2004). Donc, le recouvrement actif et le dragage permettraient d'atténuer les risques d'infection pour les usagers du lac.

Dans le cas des solutions avec recouvrement actif, le nouveau fond est du sable peu propice à la colonisation par les espèces benthiques, s'il comporte peu ou pas de matière organique (Galvez-Cloutier *et al.* 2012). Néanmoins, les nouveaux sédiments qui s'accumulent sur le sable faciliteraient la colonisation du nouveau fond par des espèces caractéristiques de lacs en bonne santé. Dans le cas des traitements par dragage des sédiments contaminés, le nouveau fond est constitué de sédiments plus profonds, moins contaminés et contenant de la matière organique (Galvez-Cloutier *et al.* 2003). Il serait donc propice à la colonisation par les espèces benthiques.

V.2. Aspects techniques

D'un point de vue technique, le procédé à retenir doit offrir la meilleure performance en termes de rabattement des concentrations en phosphore soluble retrouvées dans l'eau et être le plus durable. De plus, la technique à retenir doit être techniquement faisable compte tenu des réalités du site et de la nature des sédiments problématiques à neutraliser. Enfin, la gestion des résidus produits par les mesures de restauration est à considérer, notamment dans le cas des techniques de dragage.

V.2.1. Efficacité

La coagulation seule permet de faire précipiter le phosphore soluble de la colonne d'eau, néanmoins elle n'empêche pas la remise en solution/suspension du phosphore précipité. Ce traitement apparaît donc comme peu efficace puisque le phosphore précipité reste toujours disponible et qu'il n'agit pas sur les sédiments contaminés. Quant au recouvrement actif seul, il réduit les apports en phosphore à la colonne d'eau par les sédiments en confinant ces derniers. Étant donné que les sédiments sont la principale source de phosphore du lac, le recouvrement actif seul semble plus efficace que la coagulation seule. Cependant ce procédé n'agit pas sur le phosphore déjà présent dans la

colonne d'eau. Enfin, la combinaison {coagulation + recouvrement actif} permet de faire précipiter le phosphore de la colonne d'eau et de confiner ce dernier ainsi que le phosphore contenu dans les sédiments. En combinant les impacts de la coagulation seule et du recouvrement actif seul, il semble plus efficace que ceux-ci.

Le dragage des sédiments superficiels permet théoriquement de retirer définitivement la principale source de phosphore du lac. Mais, en mettant en suspension des sédiments, le dragage mécanique enlève moins efficacement les sédiments que le dragage hydraulique. Par conséquent, pour des sédiments ayant une même teneur en phosphore, le dragage mécanique enlèvera moins de phosphore que le dragage hydraulique. Le dragage mécanique est donc, en ce sens, moins efficace que le dragage hydraulique.

L'objectif visé par les projets de réhabilitation au lac Saint-Augustin est de diminuer la concentration en phosphore total dans l'eau à un niveau oligo-mésotrophe (< 30 µg/L), ce qui représente un rabattement d'environ 75 %. Les efficacités des traitements utilisées dans cette analyse comparative ont été évaluées dans les conditions du lac Saint-Augustin et des essais décrits précédemment dans ce rapport. La combinaison coagulation et recouvrement actif et le dragage hydraulique des sédiments contaminés permettent d'atteindre un rabattement respectivement de 95 % et de 88 % (Bourget *et al.* 2011 ; Constantin *et al.* 2012).

Comme aucun rabattement de la concentration en phosphore soluble n'a été observé à la fin des essais par rapport aux valeurs d'avant traitement pour le dragage mécanique et pour le traitement par coagulation seule, la performance considérée est de 0 % (Bourget *et al.* ; Constantin *et al.* 2012). À noter que les sédiments contaminés sont tout de même retirés du lac, donc l'atteinte d'un niveau de performance quelconque à plus long terme pour le dragage mécanique n'est pas à exclure.

Tableau V-1 Comparaison de l'efficacité estimée des traitements testés, en termes de rabattement du phosphore

Traitement	Efficacité estimée relative à la réduction de la teneur en phosphore soluble en %
Coagulation et recouvrement actif	95
Dragage hydraulique	88
Recouvrement actif	71
Coagulation	0
Dragage mécanique	0

Finalement, la combinaison coagulation et recouvrement actif apparaît comme le procédé le plus efficace comparativement aux techniques de dragage dans le cas du lac Saint-Augustin sur une durée de trois mois.

V.2.2. Durabilité

La durabilité d'une technique de gestion *in situ* de sédiments contaminés pour la restauration de lacs eutrophes est fortement influencée par le contrôle des apports externes en phosphore qui alimentent le lac par ruissellement ou écoulements souterrains. En faisant l'hypothèse que tous les apports externes sont contrôlés, la stratégie la plus durable est le dragage des sédiments contaminés. En effet, comme les sédiments problématiques sont retirés du milieu, le dragage hydraulique et le dragage mécanique offrent une durabilité supérieure à 100 ans (Consortium DDM – ProFaune, 2005).

Le procédé le moins durable est le recouvrement actif puisque la pierre calcaire a un potentiel d'absorption en phosphore limité et finira inévitablement par se saturer. La durabilité calculée pour le recouvrement actif dans le cas où les affluents provenant de l'autoroute et de la zone agricole au nord du lac ne sont pas contrôlés est de l'ordre de 30 ans (Bourget *et al.* 2011; Consortium DDM – ProFaune, 2005; Parant, 2007). Le contrôle de ces affluents permettrait donc de rallonger la durée de vie du matériel de recouvrement. Il est à noter qu'un autre projet en cours traite du contrôle des affluents au moyen d'un système pilote composé d'un marais épurateur construit adapté et d'un lit filtrant réactif (Galvez *et al.* 2011).

Tableau V-2 Comparatif de la durabilité des traitements testés

Traitement	Durabilité en années
Dragage hydraulique	> 100
Dragage mécanique	> 100
Coagulation et recouvrement actif	≈ 30
Recouvrement actif	≈ 30
Coagulation seule	≈ 0

Néanmoins, bien que le dragage implique un retrait définitif de la couche superficielle des sédiments chargés en phosphore, il ne permet pas de contrôler l'apport de phosphore provenant des eaux souterraines, contrairement au recouvrement actif. En effet, les eaux souterraines approvisionnent en nutriments les sédiments et le lac. En revanche, le recouvrement actif joue le rôle de barrière physico-chimique, grâce à sa capacité de

rétenion des contaminants (Galvez-Cloutier *et al.* 2006 c). Il permet donc de contrôler les apports en phosphore non seulement des sédiments mais aussi des eaux souterraines.

V.2.3. Faisabilité

Dépendamment des propriétés des sédiments et des caractéristiques du milieu, certains de ces procédés sont techniquement plus faciles à réaliser (faisabilité) que d'autres au lac Saint-Augustin. Avec une teneur en eau avoisinant 90 %, les sédiments superficiels, lâches et non consolidés du lac Saint-Augustin se prêtent davantage au dragage hydraulique qu'au dragage mécanique (Consortium DDM – ProFaune, 2005; Ville de Québec, 2009). De plus, le dragage mécanique tend à être moins précis avec la profondeur, ce qui affecte l'uniformité du dragage, sa performance et donc sa faisabilité (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004).

Bien que la mise en place du recouvrement actif soit réalisable au lac Saint-Augustin, cette méthode entraîne une diminution de la hauteur de la colonne d'eau et des difficultés additionnelles peuvent être rencontrées lorsque les pentes du fond sont prononcées (Consortium DDM – ProFaune, 2005). Toutefois, la diminution de la hauteur de la colonne d'eau peut être compensée par le tassement des sédiments suite à l'application du matériel de recouvrement. À propos, un tassement de 6 % en l'espace de quelques mois avait été observé lors des essais en colonnes préliminaires aux essais *in-situ* en enclos (Parant, 2007).

V.2.4. Gestion des sédiments dragués

La disposition et/ou la valorisation des résidus générés touchent les scénarios de dragage seulement. Les résidus dont il est question incluent les sédiments dragués de même que les eaux interstitielles. Préalablement à leur valorisation, les sédiments dragués doivent faire l'objet d'un prétraitement visant à séparer les phases liquide et solide. Ceci permet de réduire le volume des sédiments et donc de faciliter leur transport et donc de réduire leur coût de valorisation.

Dans le cas du dragage hydraulique, la séparation des phases est plus facile puisque l'ensemble du procédé s'effectue en circuit fermé. Pour les sédiments pompés par dragage hydraulique, la coagulation-filtration apparaît comme la solution la plus efficace parmi les traitements testés lors du volet II du projet pilote. La phase liquide récupérée est de qualité suffisante pour être retournée au lac. La séparation des phases peut également se faire par centrifugation des boues pompées (Constantin *et al.*, 2012; Agence de l'eau

Artois-Picardie, 2004; Ville de Québec, 2009). Une autre méthode de séparation plus adaptée au cas du dragage mécanique est la décantation, également étudiée lors des essais du volet II. Selon cette méthode, les sédiments dragués mécaniquement sont acheminés par barges jusqu'au bassin de décantation où les particules sédimentent (Agence de l'eau Artois-Picardie, 2004). Au bout de deux semaines, la qualité de l'eau est suffisante pour être retournée au lac.

Pour l'étape de séparation, l'empreinte au sol du dispositif de séparation ne doit pas être négligée, puisque celle-ci dépend du volume de sédiments dragués. Dans le cas d'une coagulation-filtration, les sacs de filtration peuvent être empilés afin de réduire l'empreinte au sol.

Une fois extraits, les sédiments sont considérés comme des sols et leur gestion doit tenir compte de la « Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés » et du « Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés » (Ville de Québec, 2009). Les sédiments peuvent être valorisés si les concentrations des contaminants qui s'y trouvent n'excèdent pas une certaine valeur seuil qui change d'un contaminant à l'autre. Comme les concentrations en métaux lourds retrouvées dans les sédiments du lac Saint-Augustin ne dépassent pas le niveau B pour les sols, ceux-ci peuvent être réutilisés ou valorisés sans problèmes. Par conséquent, les sédiments dragués peuvent être utilisés comme matériel de recouvrement pour les lieux d'enfouissement sanitaire. Ils peuvent aussi être utilisés comme remblai sur des terrains contaminés à vocation résidentielle en voie de réhabilitation de même que des terrains à vocation commerciale ou industrielle, à la condition de ne pas augmenter la contamination du terrain récepteur (Consortium DDM –ProFaune, 2005; Ville de Québec, 2009; MDDEP, 2011 a). Les sédiments dragués doivent toutefois faire l'objet de traitements ou d'études de toxicité supplémentaires advenant le cas où ils sont réinsérés dans le milieu récepteur ou s'ils sont épandus tel quel directement sur les terrains environnants au lac Saint-Augustin (Ville de Québec, 2009; Environnement Canada et MDDEP, 2007).

V.2.5. Autres considérations importantes

V.2.5.1. Mesures d'atténuation

Une mesure d'atténuation peut être envisagée dans le cas d'une remise en suspension importante des sédiments à travers le dragage mécanique ou la réinsertion des sédiments dragués. Cette mesure permet de limiter les impacts négatifs associés à la remise en

suspension des sédiments dans la colonne d'eau et incluent la mise en place de rideaux de turbidité. Ceux-ci doivent être installés à partir de la surface et un espace variant de 12 à 18 pouces (de 30 à 45 cm) doit être laissé au fond du lac de manière à permettre un écoulement des eaux. De tels rideaux peuvent également être mis en place pour contrôler la remise en suspension des sédiments issue des activités de dragage hydraulique. Cependant, la remise en suspension est assumée moins importante dans le cas du dragage hydraulique que dans le cas du dragage mécanique et la mise en place de rideaux de turbidité n'est pas absolument nécessaire.

Par ailleurs, dans le cas du dragage hydraulique, le débit de pompage doit être réglé de manière à ne pas causer une diminution trop importante du niveau d'eau lors des opérations. Le pompage d'eau provenant d'une source externe peut être envisagé pour maintenir le niveau d'eau du lac lors du pompage des sédiments.

V.2.5.2. Entretien et suivi

L'entretien et le suivi surviennent après l'implantation de la solution retenue. En effet, il est important de vérifier la performance réelle de la solution implantée et de procéder à un entretien régulier afin d'assurer sa pérennité. Ces actions sont réalisées afin de prévenir une éventuelle détérioration qui affecterait le niveau de performance et qui pourrait compromettre la viabilité et la durabilité de la solution implantée. Au lac Saint-Augustin, un suivi de la qualité de l'eau est essentiel puisque c'est par celle-ci qu'est déterminé le niveau trophique d'un lac. Un suivi au niveau des sédiments et du matériel de recouvrement est également requis afin de valider que les sources externes et internes de contamination sont bien contrôlées. Par ailleurs, le suivi annuel de la bathymétrie permet de vérifier l'intégrité du matériel de recouvrement et donne une idée du taux de sédimentation, plus élevé dans le cas des lacs eutrophes (Parant, 2007). Comme les solutions proposées sont passablement agressives sur le biote aquatique, un suivi à ce niveau est également requis.

V.3. Aspects financiers

La dimension financière des techniques de contrôle du phosphore provenant des sédiments est abordée dans cette section. L'investissement initial du projet, les coûts associés aux mesures d'atténuation, à l'entretien et au suivi, à la disposition et/ou valorisation des sédiments contaminés s'ils sont extraits par dragage sont considérés ici. À ces coûts doivent s'ajouter, les taxes, les coûts indirects d'ingénierie et les coûts associés aux demandes de permis qui n'ont pas été pris en compte dans ce rapport. Les données économiques proviennent de soumissions, d'entrevues téléphoniques et d'une revue de

littérature exhaustive sur des projets similaires de dragage mécanique/hydraulique et de recouvrement. Les coûts présentés dans ce rapport sont donnés en dollars canadiens.

V.3.1. Investissement initial

L'investissement initial pour un projet de gestion des sédiments contaminés inclut la location d'équipements, la main-d'œuvre, l'achat des matériaux et des produits chimiques de même que les coûts directement reliés à la réalisation et à la mise en œuvre du projet. Le coût estimé pour chaque traitement *in situ* est donné au tableau V-3.

Pour les solutions avec dragage, le coût pour l'enlèvement des trente premiers centimètres et le coût du traitement avant valorisation ou disposition des sédiments dragués sont calculés. S'il s'agit du dragage hydraulique, la coagulation avec polymère et la filtration avec un sac Géotube® est considéré; quant au dragage mécanique, une décantation est considérée. Chaque coût est donné en dollar canadien par mètre carré de sédiments traités. Les taxes, les coûts indirects d'ingénierie de même que les coûts associés aux demandes de permis ne sont pas inclus dans l'investissement initial du projet.

Le coût du prétraitement des sédiments extraits par dragage hydraulique comprend les sacs Geotube®, le lit de drainage et l'unité de coagulation. Le coût du traitement des sédiments extraits par dragage mécanique comprend la création d'un bassin de décantation et d'un chemin d'accès, les coûts de nivellement des matériaux, etc.

Afin de minimiser les dépenses associées au transport des matériaux et des équipements, ces derniers doivent être disponibles localement. Dans le cas du recouvrement actif et du dragage mécanique, tous les matériaux et équipements nécessaires peuvent provenir des environs de la ville de Québec. Quant au dragage hydraulique, les équipements sont disponibles dans la province de Québec ou au Nouveau-Brunswick.

Tableau V-3 Coût estimé de l'investissement initial par mètre carré traité

Traitement <i>in situ</i>	Poste	Coût par poste \$/m ²	Coût total par traitement (\$/m ²)
Coagulation + recouvrement actif	Matériaux (transport inclus)	6,70	9,70
	Réalisation	3,00	
Dragage hydraulique + traitement des sédiments dragés hydrauliquement	Dragage	6,30	11,15
	Coagulation- filtration des sédiments	4,85	
Dragage mécanique + traitement des sédiments dragés mécaniquement	Dragage	8,13	9,09
	Décantation	0,96	

V.3.1. Coûts associés à la gestion des sédiments dragués

Les coûts associés à la gestion des sédiments dragués une fois l'étape de séparation des phases liquide et solide effectuée comprennent les coûts de transport et les coûts de disposition et/ou de valorisation. Ils peuvent être conséquents pour de grands volumes de sédiments et une grande distance à parcourir. Il faut compter 6,37 \$/m³ de sédiments pour la réinsertion dans le lac et 10,61 \$/m³ de sédiments pour l'utilisation de ceux-ci comme matériel de remblaiement. Comme les sédiments peuvent être valorisés (recouvrement, remblai), les coûts associés à leur gestion sont moindres que s'ils devaient nécessiter une décontamination dans un centre spécialisé.

V.3.2. Coûts des mesures d'atténuation

La mise en place de rideaux de turbidité est nécessaire lors de la réalisation du dragage mécanique ou lors de la réinsertion des sédiments dragués dans le lac. Une estimation du coût unitaire de rideaux de turbidité de dimensions standards, faits de géotextile est donnée au tableau V-4. Le coût total dépend de la superficie et de la profondeur de la zone de dragage à isoler du reste du lac.

Concernant le maintien du niveau d'eau du lac lors du dragage hydraulique des sédiments, le pompage d'eau provenant d'une source externe peut être envisagé pour, moyennant un coût additionnel approximé à 1000 \$ par jour.

Tableau V-4 Estimation du coût unitaire de rideaux de turbidité

Dimensions	Prix unitaire
7' x 50'	450 \$
13' x 50'	600 \$
19' x 50'	715 \$

V.3.3. Coûts d'entretien et de suivi

Les principaux éléments à inclure dans un plan d'entretien et de suivi pour un projet de gestion des sédiments contaminés sont résumés au tableau V-6 et sont tirés de la littérature pour des projets similaires (Bortone *et al.* 2004; Nadeau *et al.*, 2007; USACE, 2008). La tarification horaire utilisée au tableau V-6 est tirée des grilles de tarification du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ) pour l'échantillonnage et l'analyse des échantillons. Selon cette grille et pour l'année 2011, un technicien coûte 43,54 \$/h et un professionnel coûte 65,33 \$/h (MDDEP, 2011 b).

Les tarifs retenus pour les analyses à effectuer en laboratoire sur les échantillons d'eau et de sédiments prélevés sont ceux de l'Association des Consultants et Laboratoires Experts. Ceux-ci sont détaillés au tableau V-7 par type d'échantillons et selon les paramètres suivis pour un plan d'entretien et de suivi propre au cas du lac Saint-Augustin (ACLE, 2011).

Les coûts finaux d'entretien et de suivi dépendent de la superficie du lac concernée par les mesures de restauration et du nombre d'échantillons à analyser.

Tableau V-5 Niveaux de suivi requis par stratégie de traitement envisagée au lac Saint-Augustin

Suivi requis	Dragage mécanique	Dragage hydraulique	Recouvrement actif	Tarifification	Fréquence attendue
Suivi du matériel de recouvrement : épaisseur, bioturbation, mélange avec les sédiments			X	43.54 \$/h	1X par saison estivale
Recolonisation du nouveau fond par les organismes benthiques	X	X	X	65.33 \$/h	2X par saison estivale
Prises d'échantillons d'eau sur le site	X	X	X	43.54 \$/h	4 à 6X par saison estivale
Prises d'échantillons de sédiments sur le site (incluant résidus de dragage)	X	X	X	43.54 \$/h	1X par saison estivale
Suivi des paramètres d'intérêt dans l'eau de surface	X	X	X	212 \$/éch.	4 à 6X par saison estivale
Suivi des paramètres d'intérêt dans les sédiments	X	X	X	162 \$/éch.	1X par saison estivale
Suivi de la bathymétrie du lac	X	X	X	65.33 \$/h	1X par saison estivale

Tableau V-6 Analyses à effectuer et coûts par type d'échantillons

Paramètres analysés	Coût par type d'échantillon (en \$)	
	Eau	Sédiments
Digestion pour l'analyse des métaux	0	17
Analyse - groupe de 6 métaux (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn)	0	58
Analyse des métaux - balayage complet	92	0
Nitrites/nitrates	39	40
Azote ammoniacal	29	0
Phosphore total	0	35
Phosphore soluble	40	0
pH	12	12
Total (\$/échantillon analysé)	212	162

VI. Conclusion

Le lac Saint-Augustin est dans un état extrême d'eutrophisation, de sorte que l'enrichissement graduel du plan d'eau en éléments nutritifs a causé la dégradation de la qualité de l'eau du lac et l'altération des usages récréatifs. Sa réhabilitation nécessite des mesures de gestion des sédiments contaminés au fond du lac. C'est pourquoi la Ville de Québec en partenariat avec l'Université Laval a mis en place un projet d'expérimentation de mesures de restauration du lac Saint-Augustin.

Ce projet vise à évaluer plusieurs techniques de gestion des sédiments, permettant l'atténuation de l'eutrophisation, en deux volets qui ont l'objet de rapports techniques intermédiaires. Les procédés à l'essai sont le traitement par coagulation et par recouvrement actif étudié lors du volet I, et le dragage hydraulique et le dragage mécanique étudiés au cours du volet II. Le présent rapport est le rapport final du projet d'expérimentation, dans lequel une analyse comparative des résultats des volets I et II a été réalisée. L'objectif de ce rapport est de déterminer le procédé le plus efficace et le plus adapté aux conditions du lac Saint-Augustin.

L'analyse comparative des mesures de restauration testées lors de ce projet d'expérimentation ont permis de retenir les conclusions suivantes :

- 1) Sur le plan environnemental, contrairement au dragage mécanique, le traitement par recouvrement actif et le dragage hydraulique entraîne une faible remise en suspension des sédiments. Ainsi, le risque de libération de phosphore et de métaux lourds dans la colonne d'eau est moindre avec ces deux derniers procédés. De plus, la remise en suspension peut être davantage atténuée au moyen de rideaux de turbidité. Par ailleurs, en transformant radicalement le fond actuel du lac, le traitement par recouvrement actif et les techniques de dragage permettent de réduire la présence des espèces caractéristiques de lacs eutrophes, comme par exemple les cyanobactéries et les escargots, hôtes de vers infectieux. Ceci implique une atténuation des risques pour la santé des usagers du lac.
- 2) Sur le plan technique, le procédé le plus efficace est le traitement par coagulation combiné au recouvrement actif des sédiments suivi du dragage hydraulique. Leur performance en termes de rabattement du phosphore dans la colonne d'eau est de respectivement 95 % et 88 %. En revanche, en termes de durabilité et de faisabilité, le dragage hydraulique est le plus performant, avec notamment une

durabilité de 100 ans. Néanmoins, il est à noter que le recouvrement actif permet d'atténuer l'apport de phosphore par les eaux souterraines, contrairement au dragage hydraulique, même si celui-ci retire définitivement des sédiments chargés en phosphore.

- 3) Concernant la gestion *in situ* des sédiments dragués, le procédé de séparation des phases liquide et solide le plus adéquat parmi ceux étudiés est la coagulation-filtration des sédiments pompés par dragage hydraulique et la décantation pour les sédiments extraits par dragage mécanique. Une fois cette étape réalisée, les sédiments dragués du lac Saint-Augustin peuvent être valorisés comme matériaux de remblai ou de recouvrement.
- 4) Sur le plan financier, les solutions les moins coûteuses en termes d'investissement initial sont le dragage mécanique combiné à la décantation des sédiments dragués avec 9,09 \$/m² (coût par mètre carré du lac traité) et la coagulation combinée au recouvrement actif avec 9,70 \$/m². Le procédé le plus cher est le dragage hydraulique combiné à une coagulation-filtration des sédiments dragués avec 11,15 \$/m².
- 5) À cet investissement initial s'ajoute le coût de gestion des sédiments lorsqu'ils sont extraits par dragage. La qualité des sédiments permet une valorisation de ceux-ci. Son coût varie entre 6,37 et 10,61 \$/m³ de sédiments suivant la réutilisation envisagée.
- 6) Les coûts des mesures d'atténuation, d'entretien et de suivi sont sensiblement les mêmes pour toutes les solutions étudiées. Ils dépendent essentiellement de la superficie du lac concernée par les mesures de restauration, ainsi que de la durée du suivi retenue.

VII. Recommandations pour une stratégie de restauration à l'échelle du lac Saint-Augustin

Le présent rapport a présenté les résultats d'un projet d'expérimentation de diverses mesures de restauration du lac Saint-Augustin. Les essais *in situ* réalisés dans le cadre de ce projet pilote ont permis de tester les techniques une fois et sur une durée de 3-4 mois dans les conditions de ce lac. Avant toute application d'une de ces techniques sur tout le lac, il apparaît souhaitable de réaliser des essais sur des zones isolées du lac et sur une durée de 2 à 3 ans. Ces expérimentations, sous réserves des autorisations nécessaires, documenteraient davantage l'estimation de l'efficacité des technologies retenues. De tels essais permettront de vérifier *in situ* et à plus long terme :

- si, suite au dragage des sédiments récents, les sédiments anciens risquent de libérer du phosphore et si la résurgence d'eau souterraine apporte du phosphore dans le lac ;
- si l'immobilisation du phosphore par un recouvrement actif sera efficace dans le temps.

Par ailleurs, une des conclusions de ce rapport final comparatif était que le recouvrement actif seul semblait légèrement moins efficace que le traitement par coagulation et recouvrement actif. Bien que l'alun soit couramment utilisé dans l'industrie de potabilisation de l'eau, que les concentrations résiduelles mesurées après traitement soient en-dessous des seuils de toxicité pour les espèces aquatiques à la base de la chaîne alimentaire, mais que les efficacités des deux techniques incluant le recouvrement actif soient relativement proches, il apparaît que, pour des raisons économiques et de risque toxicologique potentiel, une restauration du lac Saint-Augustin par recouvrement actif seul semble plus pertinente.

En ce qui concerne le traitement de l'eau résultant du dragage hydraulique, il aurait été intéressant de tester plusieurs autres produits de coagulation, bien que le coagulant utilisé ait été préalablement choisi par une entreprise spécialiste dans le domaine. Dans le cas d'une application à plus large échelle, il faudra tenir compte de l'impact potentiel de ces coagulants sur l'environnement lors du dépôt des sédiments dragués et le retour de l'eau au lac, par des essais de toxicité adéquats.

Bien que des essais supplémentaires soient souhaitables, les conclusions de ce rapport permettent de proposer des recommandations quant à une stratégie de restauration à l'échelle du lac. Afin de réduire les coûts et comme les sédiments du lac Saint-Augustin montrent une hétérogénéité spatiale en termes de degré de contamination, la stratégie

choisie pourrait cibler uniquement les zones à plus forte contamination (voir figure II-4). Ces zones prioritaires avaient été déterminées en faisant une superposition des cartes de contamination pour les métaux lourds prioritaires dépassant la concentration produisant un effet probable (CEP) (Cd, Cu, Pb et Zn) et le phosphore total dépassant la concentration seuil de 900 mg/kg.

Donc, suite aux conclusions de ce rapport final comparatif, des scénarios de restauration pourraient être envisagés :

- le recouvrement actif des sédiments des zones les plus profondes (zone II de la figure II-4) ;
- le dragage hydraulique des zones les moins profondes (zones I, III et IV de la figure II-4) et coagulation-filtration des sédiments dragués
- un scénario hybride combinant le recouvrement actif et le dragage hydraulique des sédiments.

Ce scénario hybride pourrait consister en un dragage hydraulique des zones les moins profondes (zones I, III et IV), suivi d'une réinsertion des sédiments dragués dans la fosse centrale du lac (zone II) puis du traitement par coagulation et recouvrement actif de cette fosse. L'acceptabilité d'une telle option devra être analysée en détail, en prenant en compte le degré de contamination des sédiments, les risques de solubilisation ou de mise en suspension des contaminants et les modifications de l'habitat faunique. Dans le cas où cette option serait retenue par l'initiateur, elle devra faire l'objet d'une analyse dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement qui sera requise pour la réalisation du projet de restauration du lac.

Bibliographie

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. 126 pages.

ASSOCIATION DES CONSULTANTS ET LABORATOIRES EXPERTS (ACLE). 2011. *Guide de rémunération 2011. Ingénierie des sols et matériaux, Géoenvironnement, Toiture et étanchéité. 68 pages (PDF)*. [Consulté le 15 décembre 2011]; Adresse URL : <http://www.acle.qc.ca/GUIDE.pdf>

Bergeron, M., Corbeil, C., et Arsenault, S. 2002. Diagnose écologique du lac Saint-Augustin. Document préparé pour la municipalité de Saint-Augustin-de-Desmaures par EXXEP Environnement, Québec:70 p. et 6 annexes.

Bortone, G., Arevalo, E., Deibel, I., Detzner, H.-D., De Propriis, L., Elskens, F., Giordano, A., Hakstege, P., Hamer, K., Harmsen, J., Hauge, A., Palumbo, L. et Van Veen, J. 2004. Sediment and Dredged Material Treatment. *Journal of Soils and Sediments*, 4 : 225-32.

Bourget, A., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S. 2010. Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet II - E2 : Résultats des essais de diffusion du phosphore. Rapport technique présenté à la Ville de Québec. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. 58 pages.

Bourget, A., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S. 2011. Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet I : Projet pilote d'évaluation des procédés de traitement par coagulation et recouvrement actif en enclos sur plateforme flottante. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. 215 pages.

Brin, M.-È. 2007. Mémoire : « Étude de la biodisponibilité des contaminants (éléments traces métalliques et phosphore) contenus dans les sédiments du lac Saint-Augustin ». Département de génie civil. Université Laval : Québec. 182 pages.

CENTRE SAINT-LAURENT et MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC. 1992. Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent. Environnement Canada, Conservation et Protection, Région du Québec, Montréal.

CONSORTIUM DDM – PROFAUNE. 2005. Développement d'un outil de gestion in-situ du phosphore provenant des sédiments du lac Saint-Augustin (Dossier #33666), Rapport technique présenté à la ville de Québec. 106 pages.

Constantin, B., Galvez-Cloutier, R., et Leroueil, S. 2012. Projet Pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin. Volet II, Étape 4 : Inactivation du phosphore par dragage et séparation de phases solide-liquide. Département de génie civil et de génie des eaux. Université Laval : Québec. 167 pages.

Cotruvo, J.A. et Organisation Mondiale De La Santé. 2004. Waterborne zoonosis : identification, causes, and control. Emerging issues in water and infectious disease series. London: IWA Pub. xvii, 506 pages.

Dominguez, G. 2005. Mémoire : « Étude du phénomène de relargage des sédiments du lac Saint-Augustin ». Département de génie civil. Université Laval : Québec. 134 pages.

ENVIRONNEMENT CANADA. 1994. Répercussions environnementales du dragage et de la mise en dépôt des sédiments. Document préparé par Les Consultants Jacques Bérubé inc. pour la Section du développement technologique. Direction de la protection de l'environnement, régions du Québec et de l'Ontario. N° de catalogue En 153-39/1994F. 109 p.

ENVIRONNEMENT CANADA et MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2007. Critères pour l'évaluation de la qualité des sédiments au Québec et cadres d'application : prévention, dragage et restauration. 39 pages.

EXXEP. 2003. Plan directeur 2003-2005 du lac Saint-Augustin. Document préparé pour le Conseil de bassin du lac Saint-Augustin par EXXEP Environnement. 32 pages + 1 annexe.

Fredette, T.J. et French, G.T. 2004. Understanding the physical and environmental consequences of dredged material disposal: history in New England and current perspectives. *Marine Pollution Bulletin*, 49 (1-2) : 93-102.

Galvez, R., Leroueil, S., Triffaut-Bouchet, G. et Martel, L. 2011. Étude pilote pour le traitement du ruissellement routier par éco-procédés. *Routes et Transports Spécial Neige*, 12 : 15-18.

Galvez-Cloutier, R., Ize, S. et Arsenault, S. 2002. La contamination des lacs : manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation. *Vecteur Environnement*, 35 (6) : 18-38.

Galvez-Cloutier, R., Brin, M.-È., Dominguez, G., Leroueil, S. et Arsenault, S. 2003. Quality Evaluation of Eutrophic Sediments at St. Augustin Lake, Quebec, Canada. *ASTM Special Technical Publication*. 1442 : 35-52.

Galvez-Cloutier, R., Leroueil, S., et Pérez-Arzola. 2006 a. Le lac Saint-Augustin, sa problématique d'eutrophisation et le lien avec les produits d'entretien de l'autoroute Félix-Leclerc. Volet Hydrogéologie. Rapport technique final 03605'3_06 présenté au ministère des Transports du Québec. 31 pages.

Galvez-Cloutier, R., Leroueil, S., et Pérez-Arzola. 2006 b. Le lac Saint-Augustin, sa problématique d'eutrophisation et le lien avec les produits d'entretien de l'autoroute Félix-Leclerc. Rapport d'avancement présenté au ministère des Transports du Québec. 51 pages.

Galvez-Cloutier, R., Leroueil, S., Allier, D., Locat, J. et Arsenault, S. 2006 c. A Combined Method : Precipitation and Capping, to Attenuate Eutrophication in Canadian Lakes. *ASTM Special Technical Publication*. 1482 : 232 : 239.

Galvez-Cloutier, R. et Sanchez, M. 2007. Trophic Status Evaluation for 154 lakes in Québec, Canada : Monitoring and Recommendations. *Water Qual. Res. J. Canada*, 42 (4) : 252-68.

Galvez-Cloutier, R., Saminathan, S. K. M., Boillot, B., Triffault-Bouchet, G., Bourget, A. et Soumis-Dugas, G. 2012. An Evaluation of Several In-Lake Restoration Techniques to Improve the Water Quality Problem (Eutrophication) of Saint-Augustin Lake, Quebec, Canada. *Environmental Management*, 49 (5) : 1037-1053.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2009. Critères de qualité de l'eau de surface : Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, ISBN 978-2-550-57559-7 (PDF). 506 p. et 16 annexes.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2011 a. *Politique de gestion de sols et de réhabilitation de terrains contaminés*. [Consulté le 16 juin 2011]; Adresse URL : http://www.mddep.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2.htm#2.1.1%20Grille%20de%20crit%C3%A8res%20g%C3%A9n%C3%A9riques

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS DU QUÉBEC. 2011 b. *Tarifs en vigueur*, section autres frais. [Consulté le 5 décembre 2011] Adresse URL : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/ministere/tarification/mddep.htm#echantillonnage>

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT DE L'ONTARIO. 1993. Guidelines for the protection and management of aquatic sediments in Ontario. Toronto, Ontario. 39 p.

Morteau, B., Galvez-Cloutier, R. et Leroueil, S. 2006 Développement d'une chaîne de traitement pour l'atténuation des contaminants provenant des produits d'entretien de l'autoroute Félix-Leclerc: lit filtrant et marais épurateur adapté. Rapport Technique 03605'2_06 présenté au Ministère des Transport de Québec. 45pp.

Morteau, B., Galvez-Cloutier, R., Triffault-Boucher, G. et Leroueil, S. 2007. Évaluation du potentiel de bioaccumulation de sel par des plantes halophytes. 2^{ème} rapport d'avancement présenté au Ministère des Transport de Québec. 52 pp.

Nadeau, S.C. et Skaggs, M.M. 2007. Analysis of Recontamination of Completed Sediment Remedial Projects. Sediment Management Work Group. 10 pages (PDF). [Consulté le 28 novembre 2011]; Adresse URL : <http://www.smwg.org/presentations/>

Parant, M.-A. 2007. Mémoire : « Évaluation de la performance en essais en colonnes d'un recouvrement actif pour contrer l'eutrophisation du lac Saint-Augustin (Québec) ».Département de génie civil, Université Laval : Québec. 192 pages.

Plante, P., Marin, M., et Gélinas, R. 2008. Proposition d'un projet pilote pour la restauration du lac Saint-Augustin, Proposition présentée au MDDEP:68 pages.

Roberge, K., Pienitz, R. et Arsenault, S. 2002. Eutrophisation rapide du lac Saint-Augustin, Québec : étude paléolimnologique pour une reconstitution de la qualité de l'eau. *Le naturaliste Canadien*, 126 (2) : 68-82.

Rocheffort, M. 2005. « Étude hydrogéologique du lac Saint-Augustin ». Rapport de stage présenté au Prof. Galvez-Cloutier R., Université Laval, 30 p. et annexes.

Ryding, S.O. et Rast, W. 1994. *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs*. Masson. Paris. 194 pages.

SAINT-AUGUSTIN-DE-DESMAURES. 2011. Les résidents disent « OUI » aux travaux du lac Saint-Augustin Nord. Communiqué pour diffusion immédiate. 2 pages (PDF). [Consulté le 26 octobre 2011]; Adresse URL : <http://www.ville.st-augustin.qc.ca/Content/uploads/docs/Reglements/Communiqu%C3%A9%20R%C3%A9f%C3%A9rendum.pdf>

Sigg, L., Berha, P. et Stumm, W. 2006. *Chimie des milieux aquatiques, Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement*, Dunod : 4^e Édition, ISBN : 2-10-050380-4, Paris, 564 pages.

Simoneau, M., Roy, L. et Ouellet, M. 2004. *Info-lacs-Résultats de l'année 2003*, Québec, ministère de l'Environnement. Direction du suivi de l'état de l'environnement, envirodoq n°ENV/2004/0374, rapport n°QE/152, 14p.

Soumis-Dugas, G., Triffault-Bouchet, G., Galvez, R., and Martel, L. 2010. Ecotoxicological Assessment of an In-Lake Remediation Method. *J. ASTM Intl*, 6 (4): 248-268.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). 2008. *Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments*. Environmental Laboratory. ERDC/EL TR-08-29. September. 302 pages.

VILLE DE QUÉBEC. 2009. Étude de faisabilité technique et économique pour l'extraction, le traitement et la disposition des sédiments du lac Saint-Augustin. Rapport final préparé par DESSAU. N/Réf. :129-P024118-0103-EN-0001-01. 34 pages.

Villeneuve, A. 2003. *Les zoonoses parasitaires : l'infection chez les animaux et chez l'homme*. Montréal: Presses de l'Université de Montréal. 499 p.