



SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT

Étude préliminaire de l'augmentation du taux de
renouvellement des eaux du lac Saint-Augustin

Arrondissement Laurentien



Février 2005

N° de référence : VQ-0414

Équipe de travail

Ville de Québec

René Gélinas, biologiste

Directeur de la division qualité du milieu, Service de
l'environnement

EXXEP Environnement

4740, boulevard Wilfrid-Hamel,

Bureau 120

Québec (Québec)

G1P 2J9

Sylvain Arsenault, biologiste, B.Sc.

Directeur du projet

Régis Pilote, biologiste, M.Sc.

Chargé du projet

Mylène Bergeron, biologiste, M.Sc.

Conseillère scientifique

Référence à citer :

EXXEP, 2005. Étude préliminaire de l'augmentation du taux de renouvellement des eaux du lac Saint-Augustin. Rapport présenté à la direction du Service de l'environnement de la Ville de Québec par EXXEP Environnement, 12 pages et 5 annexes.

Table des matières

Équipe de travail	i
Table des matières	ii
Liste des figures et des tableaux	iii
1 Mise en contexte	1
2 Revue littéraire.....	2
2.1 Dilution.....	3
2.2 Augmentation du taux de renouvellement	4
3 Simulation des impacts.....	6
3.1 Description des scénarios.....	6
3.2 Résultats obtenus	7
4 Conclusion et recommandations.....	10
5 Références	11

Liste des figures et des tableaux

Tableau 1 – Simulation de l'augmentation du taux de renouvellement du lac Saint-Augustin selon différents scénarios.....	7
Tableau 2 – Équivalences en volumes et en débits d'eau requis par les différents scénarios.	8
Figure 1 – Modèle reliant l'état trophique du lac Saint-Augustin à sa concentration prédite en phosphore selon différents scénarios pour augmenter le taux de renouvellement.....	9

1 Mise en contexte

Suite à une étude sur le bilan de phosphore, mené au lac Saint-Augustin en 2000, la Ville de Québec constatait qu'une partie des eaux de surface du bassin versant du lac était déviée au profit du fleuve Saint-Laurent et de la Rivière du Cap-Rouge. L'étude conclue que cette réduction du taux de renouvellement du lac entraîne une augmentation du temps de séjour de l'eau. Il s'en suit donc une augmentation de la productivité biologique du milieu. Une telle situation est profitable pour certaines espèces phytoplanctoniques, notamment les algues bleu-vert, appelées également cyanobactéries.

Afin de réduire la problématique associée à la prolifération excessive des cyanobactéries, la Ville de Québec désire identifier différentes sources en eau qui permettrait de diluer les teneurs élevées en phosphore total (PT) et de ramener le taux de renouvellement des eaux du lac Saint-Augustin à son niveau original (6 mois au lieu de 7 mois) ou à un niveau limitant la prolifération des cyanobactéries. Toutefois avant d'entreprendre cette démarche, la Ville désire connaître de façon conceptuelle et empirique l'effet potentiel d'une augmentation du taux de renouvellement des eaux sur l'amélioration de l'état trophique du lac; soit par réduction des charges en phosphore ou encore par réduction de l'occurrence des cyanobactéries et autres espèces phytoplanctoniques.

L'objectif de ce rapport est d'évaluer l'effet de l'augmentation du renouvellement des eaux du lac Saint-Augustin sur le bilan de phosphore, sachant que cet élément limite la production primaire. Le rapport permettra également d'identifier la qualité et la quantité d'eau à acheminer au lac Saint-Augustin afin d'observer l'effet de dilution et donc l'amélioration de l'état trophique du lac. Une revue de littérature sommaire permettra en plus de documenter la faisabilité technique de cette solution dans la restauration de plans d'eau.

L'outil de travail privilégié pour évaluer empiriquement l'effet du renouvellement des eaux est le modèle du bilan de phosphore du MRN tel qu'appliqué en 2000-'01 au lac Saint-Augustin (Pilote et coll., 2001). Les équations relatives à la technique de dilution présentées par Cooke et coll. (1993) sont également appliquées afin de valider les résultats du modèle. Les résultats sont présentés sous forme de graphiques et de tableaux comparatifs.

2 Revue littéraire

Le phosphore est souvent le nutriment limitant la croissance algale dans les lacs. Sa concentration dépend essentiellement de la concentration présente dans les eaux entrant dans le lac, du taux de renouvellement des eaux, et de la quantité perdue par sédimentation. Ainsi, les lacs qui ont de faibles concentrations en nutriments ($< 30 \mu\text{g/l}$) ont moins de chances de subir une prolifération algale (Downing et coll., 2001; North American Lake Management Society, 1988). En plus de la concentration des nutriments, le taux de renouvellement des eaux d'un lac est un facteur important pour la croissance algale. Lorsque le taux de croissance des algues est supérieur au taux de renouvellement des eaux du lac, il y a accumulation d'algues dans le lac, ce qui peut être problématique dans certains cas. L'ajout d'eau contenant peu de nutriments peut permettre de diluer la concentration des nutriments contenus dans le lac, d'augmenter la circulation de ses eaux (taux de renouvellement), et ainsi réduire la productivité algale (Ryding et Rast, 1994; Wetzel, 2001).

La méthode consiste à ajouter de l'eau, généralement à faible teneur nutritive, au lac (Ryding et Rast, 1994). Il existe deux façons d'appliquer cette méthode. Premièrement, l'ajout d'eau contenant peu de nutriments permet de réduire la concentration de ceux-ci dans le lac (dilution), ce qui résulte en une diminution de la disponibilité des nutriments déterminant la croissance algale. Deuxièmement, l'ajout de grandes quantités d'eau peut permettre d'augmenter le taux de renouvellement des eaux du lac afin qu'il entraîne une perte plus importante de cellules planctoniques (plus de cellules entraînées vers la décharge du lac). La méthode peut être efficace même si l'augmentation de l'apport en eau n'est pas suffisante pour causer une perte cellulaire importante. En effet, le phénomène de dilution des nutriments peut avoir, à lui seul, suffisamment d'impact sur la communauté algale. Par ailleurs, une augmentation du taux de renouvellement des eaux peut influencer la perte de cellules, même si on ne note pas de réduction significative de la concentration des nutriments (eau ajoutée contenant modérément ou beaucoup de nutriments) (Cooke et coll., 1993).

Lorsque de l'eau est ajoutée à un lac, la quantité totale (ou absolue) de nutriments augmente même si l'eau ajoutée ne contient que de faibles concentrations en nutriments. Par contre, la concentration moyenne de ces nutriments diminue pour l'ensemble du lac. Il est à noter que plus l'apport en eau sera grand (plus grande circulation d'eau), moins la sédimentation des nutriments sera importante (Cooke et coll., 1993; North American Lake Management Society, 1988). Dans certains cas, une augmentation de l'apport en eau pourrait même augmenter la concentration des

nutriments, si le temps de renouvellement initial du lac est faible (ex : 0.1 renouvellement/an). Par contre si le temps de renouvellement initial est grand (plus de 1 renouvellement/an), l'effet d'une réduction de la sédimentation des nutriments est minimisé. Il faut cependant de grandes quantités d'eau pour contrer cet effet (Cooke et coll., 1993). Ainsi, les lacs ayant un faible taux de renouvellement sont de piètres candidats pour une telle méthode de restauration (North American Lake Management Society, 1988). Alors, avant d'entreprendre ce type de méthode de restauration, il est essentiel de bien connaître les caractéristiques hydrologiques et nutritives du lac et de son bassin versant.

2.1 Dilution

L'objectif de la dilution est de réduire la concentration des nutriments contenus dans le plan d'eau. Une dilution adéquate peut contrôler la biomasse algale et augmenter la transparence de l'eau. Elle est possible là où de grandes quantités d'eau contenant peu de nutriments sont disponibles. Le traitement sera d'autant plus efficace que l'eau ajoutée sera pauvre en nutriments (Cooke et coll., 1993).

L'exemple du lac Green (surface de 1,04 km² et profondeur moyenne de 3,8 m) illustre bien le phénomène de dilution. L'apport d'eau nouvelle a permis d'ajuster le taux de renouvellement des eaux du lac de 0,88 à 2,4 renouvellements par année (de 0,24 à 0,65% du volume d'eau du lac par jour), ce qui représente une dilution trois fois plus élevée. Une amélioration de la qualité de l'eau a été observée dès les premières années de traitement. On a noté une diminution de 90% de la concentration de chlorophylle *a*, et le phosphore total est passé de 65 à 20 µg/l (Cooke et coll., 1993).

Afin d'estimer la quantité d'eau nécessaire pour diminuer la concentration des nutriments dans le plan d'eau, il est préférable d'utiliser un modèle de bilan de phosphore qui colle bien à la situation du lac. Par ailleurs, on peut également utiliser l'équation 1 suivante :

$$PT = \frac{L + (PT_i X / A_o)}{Z_{moy.} (X / V + \sigma)} \quad \text{équation 1}$$

Où :

PT est la concentration de phosphore (mg/m³) que l'on veut atteindre, PT_i est la concentration en phosphore (mg/m³) de l'eau ajoutée, L est l'apport annuel actuel en phosphore (mg/m²•an) dans le

lac, Z moy. est la profondeur moyenne (m) du lac, A_0 est l'aire du lac (m^2), V est son volume (m^3), X est la quantité d'eau nouvelle à ajouter par année (m^3) et σ est le taux de sédimentation (/an) donné par l'équation 2

$$\sigma = L / PT_0Z - \rho \quad \text{équation 2}$$

Où :

PT_0 et ρ représentent respectivement la concentration de phosphore initiale (mg/m^3) et le taux de renouvellement (/an) du lac.

2.2 Augmentation du taux de renouvellement

L'objectif de l'augmentation du taux de renouvellement est d'augmenter la perte de cellules planctoniques par une circulation de l'eau plus importante. Pour que cette méthode soit efficace, le taux de renouvellement recherché doit être soit équivalent à la croissance cellulaire ou à 10-15% du volume d'eau du lac par jour (North American Lake Management Society, 1988).

Cette méthode a été utilisée au lac Moses (surface de 27,53 km^2 et profondeur moyenne de 5,6 m) où de l'eau provenant de la rivière Columbia a été ajoutée à la section Parker Horn du lac. L'apport moyen en eau était de 130 000 000 m^3 /année pour la période de avril à septembre, représentant un taux de renouvellement de plus de 7,8% des eaux par jour pour la section Parker Horn. Une amélioration de la qualité de l'eau à Parker Horn a été notée, soit une réduction de plus de 50% pour le phosphore total, le phosphore réactif soluble et la chlorophylle a (Carroll et coll., 2000; Cooke et coll., 1993).

Toutefois, un suivi plus récent montre que le relargage du phosphore des sédiments réduit l'efficacité de la méthode au lac Moses (Carroll et coll., 2000; Jones et Welch, 1990). Des expériences en microcosmes ont montré que lorsque le taux de renouvellement est augmenté à 10% du volume d'eau du lac par jour, le flux de phosphore provenant des sédiments augmente de 33%. Ceci est dû principalement à l'augmentation de la circulation des eaux, ce qui entraîne un plus grand brassage de la colonne d'eau; et à l'établissement d'un gradient de phosphore entre les sédiments et l'eau du lac, ce qui augmente la diffusion du phosphore vers le lac (Jones et Welch, 1990).

Cependant, cette méthode donne généralement de bons résultats et peut être facilement appliquée. Elle est relativement peu coûteuse, s'il y a de grandes quantités d'eau de bonne qualité

disponibles à proximité du plan d'eau à traiter. Puisque cette méthode demande un apport de volume d'eau important, il faudra s'assurer que l'exutoire du lac peut accepter les volumes d'eau additionnels.

Les coûts liés à l'application de cette méthode varient grandement d'un site à l'autre, dépendamment des besoins en pompe, en construction et de la proximité de la nouvelle source d'eau (North American Lake Management Society, 1988). Par exemple, au lac Moses, l'installation de structures de pompage à Parker Horn a coûté 418 000\$ (dollar américain en 1990). Pour le lac Green, on devait acheter de l'eau à l'usine de filtration au coût de 0,095\$ US/m³. Il faut également planifier les coûts de gestion, d'administration, de suivi et de recherche (Cooke et coll., 1993).

3 Simulation des impacts

3.1 Description des scénarios

Afin d'évaluer les impacts de l'augmentation de taux de renouvellement des eaux sur l'état trophique du lac Saint-Augustin quatre scénarios ont été simulés. Pour comparer les scénarios entre eux, le seuil de 30 µg PT/l a été utilisé. Il équivaut à un état trophique de méso-eutrophe, alors que la situation actuelle du lac est nettement eutrophe (70 à 80 µg PT/l). Selon Downing et coll. (2001), pour réduire au minimum le risque de dominance et de prolifération des cyanobactéries, il faut viser une concentration en PT inférieure à 30 µg/l. En effet, les auteurs démontrent qu'en dessous de cette concentration le risque de dominance des cyanobactéries est inférieur à 10%.

Le **premier scénario** examine la possibilité de diluer les eaux du lac en récupérant certaines zones qui ont été drainées vers l'extérieur du bassin versant. Il suppose donc de récupérer les eaux pluviales des zones résidentielles naturellement incluses dans le bassin versant qui ont été détournées vers le fleuve St-Laurent et la Rivière du Cap-Rouge (voir Pilote et coll., 2001). Le scénario suppose également que les eaux récupérées seraient acheminées vers un marais filtrant avant de pénétrer au lac afin de diminuer leur charge en phosphore.

Le **second scénario** projette le gain qui peut être obtenu sur l'état trophique du lac en appliquant la règle de 10% de renouvellement des eaux du lac par jour (en référence à la revue littéraire) afin de curer (*flusher*) le lac de sa production primaire. Pour réaliser la simulation, une eau d'apport à 15 µg PT/l, que l'on peut retrouver en exploitant une source souterraine ou en s'approvisionnant d'eau potable, a été testée.

Le **troisième scénario** s'occupe d'évaluer la quantité d'une eau d'excellente qualité (10 µg PT/l) qui doit être ajoutée pour atteindre le seuil de 30 µg PT/l dans le lac. Pour ce scénario et le suivant, l'équation de Cooke et coll. (1993) a également été appliquée, permettant une comparaison avec les données obtenues de la modélisation des apports en phosphore.

Finalement, le **quatrième scénario** vise à déterminer la quantité d'eau requise pour atteindre le seuil de 30 µg PT/l en utilisant une eau de qualité équivalant à 20 µg PT/l. Cette qualité d'eau correspond à la norme pour une rivière se déversant dans un lac (*Critères de qualité de l'eau de surface au Québec* : http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.htm).

3.2 Résultats obtenus

Le premier constat provenant des scénarios simulés est qu'ils permettent tous d'obtenir un gain au niveau de l'état trophique du lac (tableau 1 et figure 1). Le gain le plus important est obtenu avec le scénario 2 où l'état trophique passerait d'eutrophe à mésotrophe, bien en dessous du seuil de 30 µg PT/l fixé pour prévenir la dominance des cyanobactéries. Les scénarios 3 et 4 permettraient également une amélioration significative de l'état trophique du lac (transition d'eutrophe vers méso-eutrophe). Quant au scénario 1, une légère amélioration serait visible.

Tableau 1 – Simulation de l'augmentation du taux de renouvellement du lac Saint-Augustin selon différents scénarios.

Situation	Z moy.	L _p	R	F _r	[PT]	L _p (1-R)/F _r
Position en 2001	3,5	0,917	0,53	1,79	71	0,238
Position naturelle	3,5	0,118	0,66	1,79	7	0,022
Scénario 1	3,5	0,969	0,47	2,28	67	0,223
Scénario 2	3,5	2,833	0,05	38,29	21	0,070
Scénario 3	3,5	1,201	0,17	9,90	30	0,100
Scénario 4	3,5	2,138	0,10	19,24	30	0,100

Z moy. : Profondeur moyenne (mètre)

L_p : Charge spécifique totale (g PT/m²-an)

R : Coefficient de rétention

F_r : Fréquence de renouvellement (/an)

[PT] : Concentration en phosphore total dans la colonne d'eau (µg/l)

L_p(1-R)/F_r : Apport en phosphore par unité de surface (g/m²)

Le deuxième constat qui ressort est la similitude des résultats obtenus avec ceux du projet de restauration du lac Green (Cooke et coll., 1993). Ce lac possède des caractéristiques qui ressemblent beaucoup à celles du lac Saint-Augustin : A₀ = 1 040 000 m² vs 670 000 m²; Z moy. = 3,8 m vs 3,5 m; V = 3 950 000 m³ vs 2 345 000 m³; ρ = 0,92/an vs 1,79/an et PT₀ = 42 mg/m³ vs 71 mg/m³. Ainsi, pour faire passer la concentration en PT de ce lac à 21 mg/m³ (µg/l), il aura fallu ajouter 23 500 000 m³ d'eau/an (Cooke et coll., 1993). Les données des scénarios 2 à 4 (tableau 2) sont tout à fait comparables, considérant que le lac Saint-Augustin possède au départ un taux de renouvellement plus élevé.

Tableau 2 – Équivalences en volumes et en débits d'eau requis par les différents scénarios.

Scénario	Description	V requis	%V/jour	Q requis
1	Superficies récupérées déviées vers un marais filtrant	289 746	0,1	0,04
2	Recommandation du NALMS pour « flusher » la production primaire	21 398 125	10,0	2,75
3	Volume d'eau à 10 µg PT/l requis pour réduire la [PT] à 30 µg PT/l	4 756 381	2,2	0,61
		6 009 063		
4	Volume d'eau à 20 µg PT/l requis pour réduire la [PT] à 30 µg PT/l	10 231 932	4,8	1,32
		12 018 125		

V : Volume (m³) sur une base de 90 jours (juillet à septembre)

%V/jour : %age du volume du lac renouvelé à chaque jour

Q : Débits (m³/s)

F_r : Fréquence de renouvellement (/an)

q_s : Charge d'eau reçue annuellement (m/an)

 : Volume calculé d'après les équations de Cooke et coll. (1993)

Le troisième constat est que les résultats obtenus par modélisation des apports en phosphore sont compatibles avec ceux de l'équation de Cooke et coll. (1993). En effet, les volumes obtenus par équation (voir cases ombragées dans le tableau 2) pour les scénarios 3 et 4 sont du même ordre de grandeur que ceux du modèle de phosphore. Il n'y a en fait qu'une différence de 17 à 26% en faveur des données obtenues par équation, ce qui pourrait s'expliquer par l'absence de considération des sédiments dans leurs calculs.

Enfin le dernier constat concerne le réalisme des données obtenues. À titre comparatif, le lac Saint-Charles (A_o = 3 600 000 m² et Z moy. = 5,6 m) a un taux de renouvellement de 16/an (Légaré, 1998), plus de 8 fois plus élevé que celui du lac Saint-Augustin. Si le lac avait un taux de renouvellement comparable (ce qui ressemble au scénario 4), les volumes d'eau transitant par le lac sembleraient réalistes. Par ailleurs, les données de débits associées aux volumes d'eau requis (tableau 2) ne sont pas si impressionnantes lorsqu'on les compare avec les débits de la rivière Cap-Rouge située à proximité. En effet, la moyenne des débits quotidiens mesurés entre 1974 et 1979 lors des périodes d'étiage et de crue printanière étaient respectivement de 0,13 et 22,7 m³/s (ÉcoVision, 2003).

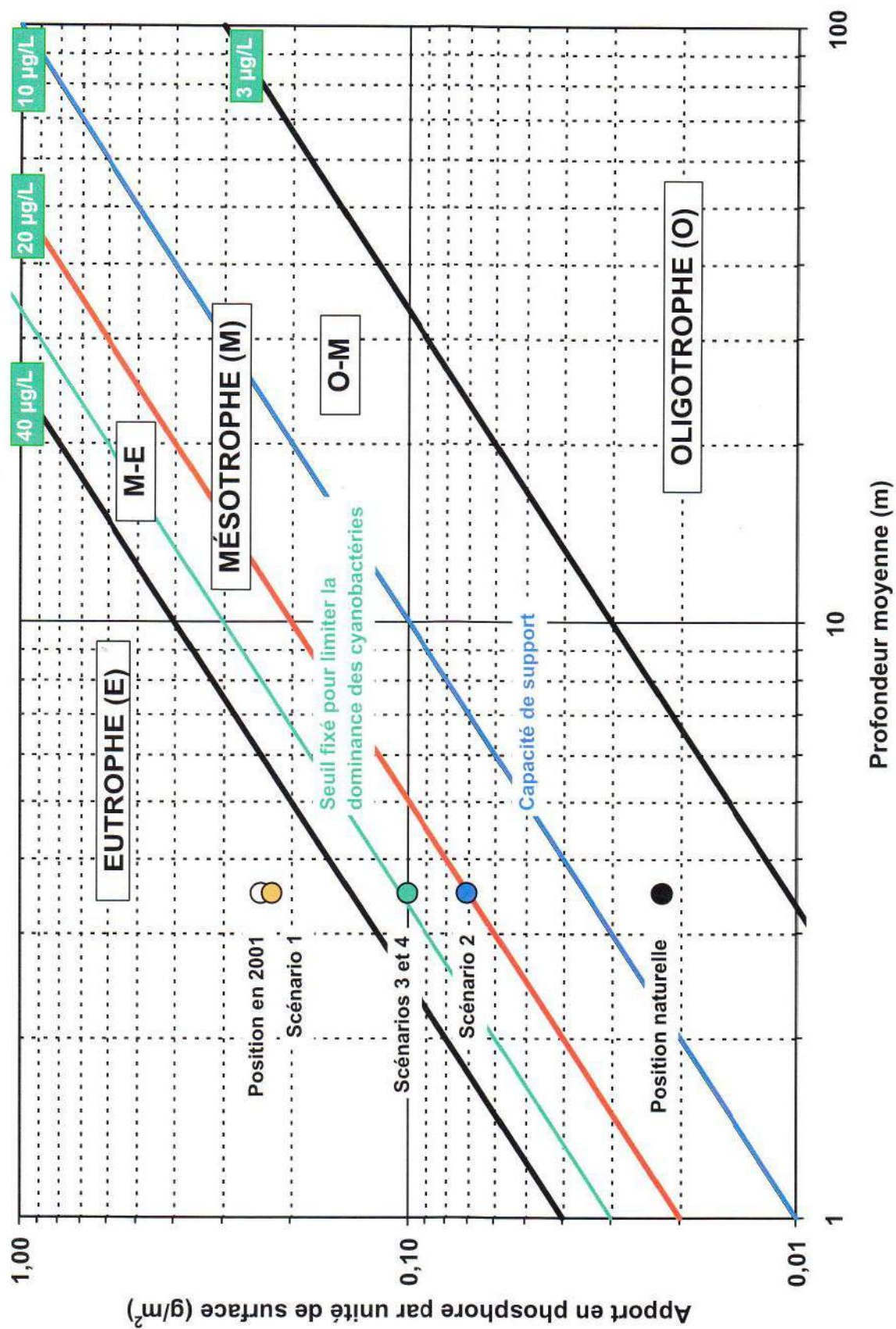


Figure 1 - Modèle reliant l'état trophique du lac Saint-Augustin à sa concentration prédite en phosphore selon différents scénarios pour augmenter le taux de renouvellement.

4 Conclusion et recommandations

Cette étude avait pour but d'étudier la possibilité d'améliorer l'état trophique du lac Saint-Augustin en augmentant la fréquence de renouvellement de ses eaux. La revue de littérature énumère les avantages et les inconvénients de cette technique de restauration de la qualité de l'eau. Dans le contexte du lac Saint-Augustin, la simulation montre un gain appréciable sur l'état trophique. Elle présente également des résultats qui sont compatibles avec ceux observés dans la littérature (ex. : lac Green).

Pour que la technique soit plus efficace, le volume d'eau à ajouter doit être de bonne qualité pour atteindre le niveau trophique escompté. En théorie le seuil de 30 µg PT/l, fixé pour réduire l'incidence des fleurs d'eau de cyanobactéries, peut être obtenu moyennant un apport d'eau, dont la qualité varie de 10 à 20 µg PT/l, de 9 à 19 fois supérieur à l'apport d'eau naturel, correspondant au scénario 3 et 4. Le scénario 2 demanderait un apport en eau 38 fois plus élevé par rapport à l'apport naturel, ce qui nous apparaît peu réaliste du point de vue technique et financier.

Il existe donc un potentiel pour appliquer cette technique au lac Saint-Augustin. Il est recommandé d'investiguer davantage les scénarios 3 et 4 par le biais d'une étude de faisabilité. Cette étude devra prendre en considération les éléments suivants, sans s'y limiter :

- Identifier une ou plusieurs sources d'eaux potentielles pour augmenter le taux de renouvellement du lac ;
- Évaluer, par le biais de la modélisation des apports en phosphore, les impacts de cette technique prise en synergie avec les autres mesures correctives inscrites dans le cadre du programme de restauration du lac Saint-Augustin ;
- Déterminer la capacité de l'exutoire à prendre en charge les volumes d'eau supplémentaires apportés au lac ;
- Documenter l'impact de la technique sur le taux de sédimentation du phosphore et le relargage par les sédiments ;
- Faire une évaluation préliminaire des impacts environnementaux potentiels et des coûts de mise en oeuvre ainsi que des coûts d'opération associés à cette technique.

5 Références

Carroll, J.V., Cusimano, R.F. et Ward, W.J., 2000. Moses lake proposed phosphorus criterion and preliminary load allocations based on historical review. Rapport préparé par le Washington State Department of Ecology (No. 00-03-036), 51 pages.

Cooke, G.D., E.B. Welch, S.A. Peterson et P.R. Newroth, 1993. Restoration and Management of lakes and reservoirs. CRC Press LLC, 548 pages.

Downing, J.A., S.B. Watson et E. McCauley, 2001. Predicting cyanobacteria dominance in lakes. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 58: 1905-1908.

ÉcoVision, 2003. Restauration écologique du bassin versant de la rivière Cap-Rouge – Étude du bassin versant. Rapport présenté à la Ville de Québec.

Jones, C.A. et E.B. Welch, 1990. Internal phosphorus loading related to mixing and dilution in a dendritic, shallow prairie lake. Research Journal WPCF 62: 847-852.

Légaré, S., 1998. Dynamique de l'oxygène dissous en lac et en rivière dans le bassin versant de la rivière Saint-Charles. Mémoire de Maîtrise, Université Laval.

North American Lake Management Society, 1988. Lake and reservoir restoration guidance manual. L. Moore et K. Thornton (Eds.) EPA Cooperative Agreement No. CR813531-01-0

Pilote, R., C. Corbeil et S. Arsenault, 2001. Gestion des apports en phosphore pour améliorer la qualité de l'eau du lac Saint-Augustin. Préparé pour La grande corvée par EXXEP Environnement, 38 pages.

Ryding, S.-O. et W. Rast, 1994. Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs. Ed. Masson et Unesco, Paris, 295 p. UNESCO : 92-3-202550-7.

Wetzel, R., 2001. Limnology : Lake and River Ecosystems. 3^e édition. Academic press, 1006 pages.