

Article

« La restauration des lacs au Québec : un défi face aux problèmes environnementaux actuels »

J. Dupont

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 10, n° 1, 1997, p. 41-61.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705269ar>

DOI: 10.7202/705269ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

La restauration des lacs au Québec : vers une gestion améliorée

Lake restoration in Québec :
toward an improved management

J. DUPONT¹

Reçu le 2 octobre 1995, accepté le 11 septembre 1996*.

Cet article est publié intégralement en français et en anglais ; les figures et références bibliographiques, communes aux deux versions, sont placées après le texte en anglais, voir p. 57.

This paper is published integrally in both French and English; see p. 42 and 50.

RÉSUMÉ

Le Canada possède l'une des plus importantes réserves d'eau douce au monde. La province de Québec n'y fait pas exception puisqu'on y trouve près de 750 000 lacs et une multitude de rivières. Une grande partie de cette ressource est très fragile et exposée à divers problèmes environnementaux. Ces problèmes prennent leur source à l'échelle locale, régionale, continentale ou même planétaire dans certains cas et sont de différentes natures : eutrophisation, contamination par diverses substances polluantes, acidification, changements climatiques, etc. Au Québec, les moyens d'action actuels visent principalement à réduire les pollutions à la source par voie de réglementation, de programmes d'incitation ou de programmes de subvention (actions d'assainissement des eaux), en ne recourant aux interventions directes à court terme que dans des situations d'urgence ou d'extrême nécessité. Le présent texte rend compte des problèmes liés à l'eutrophisation, à l'acidification et à la contamination, ainsi qu'à leur échelle d'occurrence et des solutions disponibles pour amoindrir leur impact. Cette discussion est menée en favorisant une approche globale concertée qui vise à établir les bases d'une réelle politique de gestion de l'eau.

Mots-clés : *restauration, lac, assainissement, acidification, gestion, écosystème, contamination, eutrophisation.*

1. Direction des écosystèmes aquatiques, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Édifice Marie-Guyart, 7^e étage, 675, Bd René-Lévesque Est, Québec (Québec), Canada G1R 5V7.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 31 octobre 1997.

SUMMARY

Canada has one of the greatest freshwater reserves in the world. The province of Québec is not an exception to this generalization in that there are over 750000 lakes and a large number of rivers of all sizes within the provincial boundaries. A major portion of this resource is highly vulnerable and is exposed to many contamination and environmental problems such as eutrophication, contamination from various pollutants, acidification, global climate changes, etc. In the province of Québec, actions are presently oriented toward reducing pollution hazards at the source by way of legislation, incentives and grant programs (wastewater cleanup programs), while resorting to short term direct approaches only in cases of emergencies and extreme necessity. The present article summarizes information about the problems encountered in Québec, their incidence, and the range of solutions available to reduce the impacts. This reflection is conducted in a way that favors a concerted global approach, which could act as the basis for a true water management policy.

Key words : *restoration, lake, wastewater cleanup, acidification, management, ecosystem, contamination, eutrophication.*

1 – INTRODUCTION

Le Canada possède l'une des plus importantes réserves d'eau douce au monde (CCRS, 1990). Cette richesse s'explique par la présence de plusieurs des plus grands lacs d'eau douce au monde ainsi qu'à la présence d'une multitude de lacs et rivières. Ce constat est également vrai pour le Québec où l'on dénombre plus de 750 000 lacs de toutes tailles, d'innombrables rivières et la présence d'un des plus grands fleuves d'Amérique, le Saint-Laurent.

Autrefois reconnue inépuisable et synonyme de pureté, l'eau douce est maintenant exposée à une multitude d'agents polluants qui peuvent la dégrader. Cette situation est d'ailleurs fortement vécue dans les zones urbanisées et agricoles du Québec méridional (SAMSON et NADEAU, 1991). Toutefois, des lacs éloignés des zones urbaines et agricoles sont de plus en plus exposés à des pressions anthropiques qui contribuent à la dégradation des plans d'eau. Même les lacs les plus éloignés et accessibles seulement par voie aérienne sont soumis à différents stress environnementaux (acidification, contamination des eaux, des sédiments et des organismes biologiques), lesquels viennent à en miner la structure et à compromettre la pérennité des écosystèmes aquatiques (CCRS, 1990).

Le but de cet article est de faire le point sur les principaux problèmes environnementaux à l'origine de la dégradation des écosystèmes lacustres au Québec. Outre une description sommaire des problèmes liés à l'acidification, à la production excessive de substances nutritives d'origine humaine (eutrophisation) et à la contamination, le présent article tente d'évaluer les diverses méthodes de restauration utilisées en mettant l'accent sur les approches à privilégier dans l'avenir. Cette réflexion va plus loin en tentant de définir les bases d'une approche globale concertée sur laquelle pourrait éventuellement venir s'appuyer une nouvelle stratégie de gestion de l'eau au Québec.

2 – PRINCIPAUX PROBLÈMES ENVIRONNEMENTAUX AFFECTANT LES LACS

Le phénomène de l'acidification des eaux de surface représente l'un des principaux problèmes environnementaux au Québec. Ce problème est particulièrement grave pour les écosystèmes aquatiques sensibles du Bouclier canadien, où se situent 95 % des plans d'eau de la province (fig. 1). Cette sensibilité des lacs québécois est due à la combinaison de deux facteurs principaux : des dépôts acides importants et une faible capacité de neutralisation des sols et de la roche en place (CCRS, 1990). Des études récentes (DUPONT, 1993 ; LEDUC *et al.*, 1996) ont montré que plus de 29 000 (19 %) des 159 842 lacs du sud du Bouclier canadien sont acides ($\text{pH} \leq 5,5$). Parmi ces 29 000 lacs acides, 10 400 (35 %) présentent une acidité d'origine principalement naturelle et organique, alors que les 19 000 autres lacs (65 %) auraient été acidifiés par les dépôts acides d'origine inorganique et anthropique (DUPONT, 1993). Il est à noter que plus de 95 % de l'ensemble des lacs acides organiques sont localisés dans la région hydrographique de la Côte-Nord. De même, plus de 81 000 lacs (52 %) des 160 000 lacs recensés au sud du Québec présentent un $\text{pH} \leq 6$, c'est à dire des conditions propices à divers dommages biologiques. De nombreux effets directs et indirects sur les populations de poissons ont d'ailleurs été mis en évidence pour ces lacs (CCRS, 1990 ; TREMBLAY et RICHARD, 1993).

Plusieurs études, basées sur des modélisations mathématiques et des reconstructions paléolimnologiques axées sur l'étude des diatomées et des chrysophycées, ont montré que les lacs de $\text{pH} < 6,0$, dont la composante acide est principalement inorganique (acide sulfurique ou acide nitrique), se seraient acidifiés après le début de l'ère industrielle, soit depuis environ une centaine d'années (RMCC, 1990 ; SULLIVAN *et al.*, 1990 ; DIXIT *et al.*, 1992). Ces mêmes modèles prévoient que la réversibilité des conditions d'acidité est possible advenant une baisse des dépôts acides. L'examen de la qualité de l'eau des lacs consécutive à de récentes baisses d'émissions de SO_2 semble confirmer ce résultat de simulation (BOUCHARD, 1995).

L'eutrophisation des eaux de surface constitue un autre problème d'importance en milieu urbain, périurbain et agricole, et ce, en dépit des efforts d'assainissement déployés jusqu'à ce jour (RAST et THORNTON, 1995). Les apports diffus et ponctuels d'éléments nutritifs (N et P) sont souvent à l'origine de l'eutrophisation accélérée des plans d'eau (SHARPLEY *et al.*, 1994). Les rejets ponctuels d'origine urbaine et agro-alimentaire, ainsi que la pollution diffuse d'origine agricole et périurbaine (villégiature) en sont les principaux responsables. Bien que peu nombreux, les lacs en voie d'eutrophisation se concentrent principalement le long du fleuve Saint-Laurent (fig. 1). Les conditions d'eutrophisation les plus marquées sont surtout observées dans les basses terres du Saint-Laurent, où l'agriculture est intensive. De telles conditions existent aussi pour les lacs des Appalaches (sud du Saint-Laurent), dans les secteurs des Cantons de l'Est et de la Beauce, où un mélange d'activités agricoles, de villégiature et de développement urbain est responsable de la dégradation de la qualité des eaux de surface. Finalement, les lacs des basses Laurentides, au nord de Montréal et le long du contrefort des Laurentides, sont aussi touchés par l'eutrophisation de leurs eaux. C'est surtout l'urbanisation marquée des bassins versants qui est à l'origine de l'enrichissement des eaux de surface en nutriments pour cette dernière région. L'efficacité

des procédés d'épuration (fosses septiques, usines de traitement) pourrait aussi être responsable d'une partie du problème.

À l'eutrophisation, s'ajoute le problème de la contamination bactériologique et toxique. Dans ce cas, il peut s'agir d'une contamination par coliformes d'origine urbaine ou agricole, d'une contamination toxique ponctuelle d'origine industrielle ou d'une contamination toxique diffuse provenant du transport à distance de polluants aéroportés (métaux, pesticides et toxiques organiques). La contamination bactériologique ou industrielle de source ponctuelle se limite généralement aux mêmes secteurs que l'eutrophisation (*fig. 1*). Par contre, la contamination toxique (métaux, substances organiques) d'origine atmosphérique touche une région nettement plus vaste (GAFFNEY *et al.* 1987 ; LOCKHART *et al.* 1992 ; ROWAN et KALFF, 1993). C'est le cas par exemple de la contamination de la chair de poisson par le mercure qui est observée sur une grande partie du territoire québécois (Québec, 1995).

3 – LES APPROCHES DE GESTION

Il existe de nombreuses méthodes de restauration dans la littérature. Certaines d'entre elles sont fréquemment utilisées au Québec alors que d'autres ne l'ont jamais été ou ne l'ont été que de façon expérimentale (*fig. 2*). La classification de CHRISTIE *et al.* (1986), aussi décrite dans VALLENTYNE et HAMILTON (1987), est particulièrement bien adaptée pour classer les approches de restauration de lac selon le mode de gestion, leur échelle temporelle et le résultat recherché. Ces auteurs ont établi quatre classes : 1) les approches écosystémiques, 2) le cas par cas, 3) les approches environnementales et 4) les approches écosystémiques. BARICA (1993) a repris cette classification en lui associant des exemples d'application adaptés à diverses problématiques. La classification de CHRISTIE *et al.* (1986) a été reprise ici en l'adaptant spécifiquement au problème de la restauration des lacs.

3.1 L'approche écosystémique

L'approche écosystémique est un mode de gestion axé sur un besoin spécifique ne tenant aucunement compte des autres usages potentiels. Le meilleur exemple est de ne rien faire pour remédier au problème ou d'utiliser le plan d'eau pour des besoins très précis : zones de décantation, réserve d'eau pour l'irrigation. Cette approche ne peut évidemment pas être considérée comme méthode de restauration des lacs.

3.2 L'approche du cas par cas

L'approche au cas par cas est l'une des premières méthodes de restauration de lacs à avoir été utilisée. C'est une approche à court terme impliquant l'utilisation de moyens technologiques spécifiques pour remédier à un problème précis affectant un lac ou un ensemble de plans d'eau. C'est l'approche à préconiser lorsque la ressource est très endommagée et qu'une restauration rapide est nécessaire. Dans certains cas, les moyens employés peuvent être de dernier recours. Le chaulage, l'aération, la biomanipulation, le dragage, etc., font partie de ces techniques.

Pour le problème des précipitations acides, le chaulage des lacs acides et de ses tributaires constitue le principal moyen de restauration à court terme (HOUDE *et al.* 1989). Consécutivement au chaulage, un ensemencement en poissons est généralement requis le printemps suivant lorsque la population d'origine a été décimée. Cette méthode est peu efficace pour les eaux riches en matières organiques, pour les plans d'eau difficiles d'accès, ou ceux dont le renouvellement des eaux est rapide. Le chaulage a aussi l'inconvénient de devoir être répété sur une base récurrente.

Pour l'eutrophisation et la contamination bactériologique, les approches au cas par cas ont été utilisées plus fréquemment. Ces approches ont généralement été mises à profit pour restaurer des écosystèmes lacustres touchés par des problèmes chroniques de contamination bactérienne ou d'eutrophisation (blooms d'algues, algues filamenteuses, odeurs, etc.), et ce, avec plus ou moins de succès. Parmi les méthodes opérationnelles ou expérimentales testées, notons : l'aération ou « bubbling » de la zone hypolimnétique, le dragage des sédiments lacustres, la récolte de macrophytes, la pose de grilles en PVC ou de toiles perméables sur les sédiments de fond, la biomanipulation du lac par les plantes et les organismes aquatiques (introduction de poissons brouteurs ou de plantes faisant compétition aux espèces indésirables), l'installation de bassins de décantation, etc.

Comme dans le cas de l'eutrophisation, les approches de restauration au cas par cas pour les problèmes de contamination toxique sont utilisées surtout en situation d'urgence ou chronique. On peut mentionner les coûteuses techniques de dragage et le problème d'élimination des sédiments contaminés, la pose de toiles géotextiles perméables, etc. Des méthodes draconiennes sont parfois utilisées pour neutraliser les déversements accidentels de produits toxiques et les lixiviats de résidus miniers (neutralisation à la soude caustique).

3.3 L'approche environnementale

C'est une approche à moyen terme qui implique des mesures d'intervention visant à corriger à la source des problèmes spécifiques, lorsque la condition du plan d'eau varie de bonne à dégradée. Parmi ces approches de restauration, notons les divers programmes d'assainissement misant sur la construction d'usines d'épuration, la réduction des émissions de polluants gazeux, l'amélioration des infrastructures sanitaires, etc. Les approches environnementales constituent depuis la fin des années 1970 le principal moyen de restauration des lacs au Québec.

La diminution à la source des émissions industrielles de SO_2 et de NO_x constitue la méthode préconisée par l'ensemble des gouvernements provinciaux et fédéral pour contrer le problème des précipitations acides. Cette approche a aussi été privilégiée dans le cadre de l'Accord Canada-États-Unis sur la Qualité de l'Air (Canada-États-Unis, 1994). Au Québec, cela s'est traduit par la construction d'une usine d'acide sulfurique à Rouyn-Noranda, l'installation de purificateurs de gaz (dépoussiéreurs), le rajeunissement des installations industrielles, un recyclage et l'amélioration du captage des gaz, le recours à des combustibles moins riches en soufre et l'obligation de doter les nouveaux véhicules de catalyseurs (BOULET et LAPOINTE, 1991). Un des objectifs actuels est la réduction des dépôts humides annuels de sulfates en deçà du seuil de 20 kg/ha/an. Il existe de plus des programmes municipaux d'inspection des véhicules automobiles pour vérifier la présence et l'efficacité des convertisseurs catalytiques.

Pour ce qui est de l'eutrophisation, de la contamination bactériologique et des problèmes de contamination toxique, le Gouvernement québécois a mis en route dans les années 1970 un vaste programme d'assainissement des eaux, comprenant un volet urbain (PAEQ : Programme d'assainissement des eaux du Québec) et un volet industriel (PRRI : Programme de réduction des rejets industriels) totalisant plus de 7 milliards de dollars (MONFET *et al.* 1993). Le volet urbain sera bientôt terminé. Le but visé dans ce dernier volet était de restaurer les usages de l'eau en diminuant les apports ponctuels de phosphore, d'azote, de matières en suspension, de demande biochimique en oxygène et de bactéries coliformes. Au plan local, le programme a eu du succès, mais la pollution d'origine diffuse qui représente la principale source de nutriments dans les bassins agricoles est parfois venue masquer cette amélioration (PRIMEAU et GRIMARD, 1990 ; SIMONEAU, 1991).

Il n'existe pas encore de programme d'assainissement de l'ampleur du PAEQ et du PRRI pour le volet agricole. A l'heure actuelle, seuls quelques règlements régissent les fumiers et les lisiers. Les installations septiques sont aussi réglementées pour amoindrir l'impact des pollutions diffuses d'origine urbaine et de la villégiature. Un programme d'incitation à préserver une zone tampon en bordure des lacs a également été initié pour contrer l'artificialisation des rives, l'érosion et le transport des substances nutritives tout en préservant les milieux naturels pour les organismes aquatiques. Ce programme n'est toutefois pas réglementé et le suivi est déficient. Par contre, des groupes environnementaux et des associations de riverains ont initié divers projets visant à restreindre l'eutrophisation des plans d'eau, à aménager des lacs (aménagement de frayères et d'herbiers) et à renaturaliser les rives de ces derniers.

Au plan des rejets industriels, les gouvernements québécois et fédéral ont tous deux initié des programmes de réduction des sources de pollution d'origine industrielle visant à réduire leurs charges de 90 % (PRRI et Saint-Laurent Vision 2000). Ceci se fait par réglementation et par l'entremise de programmes de subvention visant l'installation de systèmes d'épuration spécifiques aux polluants émis (Québec, 1992a). Une interdiction d'utilisation a été édictée pour certaines substances toxiques comme les organochlorés (BPC, dioxine, furanne) et certains pesticides à longue demi-vie (DTT). Une série de critères de qualité est utilisée pour la surveillance des niveaux de pollution (Québec, 1992b).

3.4 L'approche écosystémique

C'est une approche à long terme, qui bien que peu utile pour restaurer rapidement un lac, même moyennement dégradé, a l'avantage majeur de permettre l'aménagement et le développement durable d'un lac en minimisant les possibilités de déséquilibres biologique et chimique (SLOCOMBE, 1993a). L'approche écosystémique se base sur l'examen des interactions entre l'eau, la biocénose, l'atmosphère, le bassin versant et les populations humaines (BARICA, 1993) et s'adresse à l'ensemble des problèmes affectant le lac. VALLENTYNE (1993) va plus loin en utilisant le terme « d'approche axée sur la biosphère (biospheric approach) ». L'approche écosystémique est aussi la plus difficile à mettre en pratique puisqu'elle implique souvent une participation directe de la population et nécessite une connaissance approfondie de l'écosystème. Selon MONTGOMERY *et al.* (1995), l'approche écosystémique doit être précédée ou du moins basée sur l'analyse détaillée du bassin versant. Elle semble bien adaptée aux lacs de villégiature où elle pourrait aider au ralentissement des processus d'eutrophisation des lacs. Cette approche mise entre autres sur les changements d'habitudes

chez les gens (REYNOLDS, 1993). Les moyens peuvent varier du simple programme d'incitation jusqu'au moratoire complet sur le développement résidentiel d'un bassin lacustre.

L'approche écosystémique n'est pratiquement pas utilisée pour réduire l'acidification des lacs. Seules quelques rares initiatives municipales, comme l'incitation à recourir au transport en commun, commencent à être mises en avant. L'approche écosystémique a également très peu été utilisée pour les problèmes d'eutrophisation et de contamination. De nombreux interlocuteurs gouvernementaux et universitaires appuient cette démarche comme étant le meilleur choix à long terme, mais il n'existe aucune situation précise où elle ait été appliquée dans son ensemble. Certains éléments de cette approche ont inspiré les méthodes de restauration préconisées par des organismes comme la FAPEL (Fédération des Associations pour la Protection de l'Environnement des Lacs), la Fondation de la Faune, l'UQCN (L'Union Québécoise pour la Conservation de la Nature) et quelques autres : interdiction d'utiliser des embarcations motorisées, préservation d'une zone tampon autour du lac, sensibilisation des citoyens au sujet de leur installation septique et des mesures possibles pour la préservation du lac, etc. Au plan de la contamination, l'on note le programme fédéral Éco-choix qui mise sur une sensibilisation du public aux produits toxiques. On peut aussi noter les efforts faits auprès de riverains pour les sensibiliser à l'impact de l'utilisation d'engrais avec ou sans pesticides, et des rejets d'huiles, peintures et autres substances toxiques domestiques dans les lacs, les égouts ou les fosses septiques.

4 – VERS UNE GESTION GLOBALE DES LACS

4.1 Priorités des actions à venir

La restauration des lacs doit nécessairement passer par une réduction à la source des polluants. Une telle approche a été en partie mise en oeuvre par les gouvernements en place dans le cas des précipitations acides, des rejets urbains et des rejets industriels. Toutefois, les actions entreprises jusqu'à ce jour n'ont pas été suffisantes, puisque les lacs sont encore acides et que plus de 25 % de ceux-ci le resteront même après la mise en application de l'ensemble des mesures de réductions américaines et canadiennes (DUPONT, 1993). Ceci est sans compter le rôle croissant des nitrates dans l'acidification (EPA, 1995), qui pourrait se traduire par une augmentation appréciable de la proportion des lacs acides à long terme. D'autre part, les programmes d'assainissement des eaux visant les rejets urbains et industriels ont été initiés il y a déjà plusieurs années, mais n'ont pas encore été achevés. Malgré une réalisation faite dans près de 50 % des villes (environ 80 % de la population), beaucoup d'usages et de milieux ne rencontrent pas encore les objectifs environnementaux prescrits.

L'étape de réduction à la source des rejets ponctuels aura probablement été la plus aisée. Cependant, le succès de la restauration des lacs au Québec devra également passer par la réduction des pollutions diffuses d'origine agricole et urbaine. Déjà, certains programmes sont en place pour la gestion des fumiers et des lisiers (PAAGF), la conservation des sols (bonnes pratiques de gestion) et les pesticides. Toutefois, ce secteur d'activité nécessiterait le support d'un éventuel

programme d'assainissement, comme pour les volets urbain et industriel. Les méthodes de restauration au cas par cas, comme le chaulage pour hausser le pH de l'eau ou faire précipiter les métaux traces (mercure, plomb, cadmium), ne devraient être envisagées que dans les cas où rien d'autre ne peut être tenté. Pour un palier central de gouvernement, l'approche au cas par cas ne peut évidemment être favorisée en raison du grand nombre de lacs et du caractère récurrent des opérations de restauration. Ces méthodes pourraient toutefois être utiles à des associations de riverains et aux gestionnaires de zones d'exploitation contrôlée (ZEC), pour restaurer un plan d'eau à court terme en attendant que l'impact des mesures de restauration à moyen et long termes se concrétise. Toutefois, ces actions devraient être menées dans la mesure du possible en intervenant également au niveau du bassin versant et des causes à l'origine de la dégradation (BARROIN, 1991).

4.2 Intégration des approches de restauration pour la gestion des lacs

Un programme global de restauration des plans d'eau devrait donc passer par l'application de trois des quatre approches de gestion : écosystémique, environnementale et cas par cas, en misant surtout sur la première pour les lacs éprouvant peu de problèmes et en complétant avec les suivantes pour rectifier les carences ou les problèmes environnementaux plus graves.

Comme il existe une multitude de problèmes qui affectent la qualité des écosystèmes lacustres et des usages qui en découlent, une approche globale de restauration des lacs et des eaux de surface devrait éventuellement passer par la mise en place d'une véritable stratégie de gestion de l'eau au Québec, laquelle pourrait mettre à profit une concertation entre les divers niveaux décisionnels et la population elle-même. Cette stratégie de gestion de l'eau mériterait d'être basée sur une approche intégrée par bassin versant où les interventions tiendraient compte non seulement des effets, mais aussi des causes de la dégradation (YIN et PIERCE, 1993 ; GRUMBINE, 1994). Une telle approche est nécessaire pour définir les actions prioritaires, résoudre les conflits d'usages et coordonner le rôle de chaque intervenant (SLOCOMBE, 1993b ; WESSEL, 1993). L'approche hybride décrite plus haut s'inscrit bien dans ce contexte.

4.3 Implication des intervenants régionaux et centraux

Jusqu'à tout récemment, la gestion de l'eau au Québec et par le fait même, la restauration des lacs a été pilotée par les gouvernements provincial et fédéral. Cette approche de gestion, communément appelée « top-bottom » est maintenant en voie de révision pour impliquer davantage les intervenants locaux et régionaux. Il serait improbable que la gestion de l'eau soit complètement cédée aux organismes régionaux (« approche bottom-up »). La solution idéale sera probablement mitoyenne. Une véritable stratégie de gestion de l'eau devrait miser éventuellement sur un partage des responsabilités tenant compte de l'échelle et de la nature des problèmes. Il est donc possible d'imaginer que les paliers de gouvernements provinciaux et fédéraux se réserveront le mandat d'intervenir face aux problèmes environnementaux d'ampleur provinciale, nationale ou internationale (pluies acides, précipitations toxiques, changements climatiques, etc.). Ils continueront à jouer un rôle majeur dans l'harmonisation des actions d'assainissement, dans la législation et la réglementation en matière d'environnement et la définition de normes et critères de qualité pour l'ensemble du territoire québécois.

Le rôle des paliers de gouvernements centraux devrait idéalement être complété par celui des intervenants régionaux et locaux qui devraient déterminer les priorités d'intervention tout en mettant en place des méthodes environnementales et écosystémiques de préservation et de restauration des ressources lacustres (WESSEL, 1993). La stratégie à adopter demandera toutefois une collaboration rigoureuse entre les divers acteurs afin d'éviter une gestion de type « poubelle » (tiré de l'anglais « garbage can ») qui est le reflet d'un manque de coordination (DEYLE, 1995). La figure 3 suggère l'échelle appropriée pour laquelle les instances décisionnelles pourraient concentrer leurs actions.

Indépendamment de la structure de gestion qui émergera éventuellement au Québec, il importe que la restauration des lacs soit appuyée par des programmes de prévention visant à éliminer à la source des facteurs de stress locaux, régionaux ou continentaux pouvant avoir des répercussions sur l'eutrophisation des lacs, la pérennité de l'écosystème, la santé humaine et le développement durable des ressources.

5 – CONCLUSION

Les efforts de restauration des lacs au Québec ont évolué passablement au cours des années. Les actions passées ont surtout aidé à corriger des problèmes graves d'eutrophisation, d'acidification et de contamination. Les approches au cas par cas ont laissé place aux approches environnementales d'envergure nationale qui elles-mêmes devraient migrer vers des approches environnementales plus régionales et des approches écosystémiques à plus long terme. Malgré ces efforts, de nombreux problèmes continuent d'affecter les écosystèmes lacustres. Ces problèmes résiduels seront plus ardues à contrer du fait que les sources polluantes seront plus difficiles à traiter, qu'il s'agisse des rejets agricoles diffus ou de l'urbanisation des bassins lacustres. Seule une réelle concertation entre partenaires provinciaux, régionaux et locaux, accompagnée d'une sensibilisation accrue des citoyens et des riverains, permettra d'enrayer les problèmes environnementaux qui perturbent encore la pérennité de nos lacs.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les personnes qui suivent pour leurs judicieux conseils ou leurs commentaires sur le présent article : Madeleine Papineau et André Bouchard d'Environnement Canada, Denyse Gouin, Robert Bertrand, Yves Grimard et Lévis Talbot de la Direction des écosystèmes aquatiques du ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Pierre Bérubé et Serge Tremblay du même ministère, et Tony LeSauteur de la FAPEL.

*

* *

1 – INTRODUCTION

Canada has one of the largest freshwater reserves in the world (CCRS, 1990). This richness can be explained by the presence of several of the world largest soft-water lakes and a great number of lakes and rivers. The province of Québec is not an exception to this generalization in that there are over 750000 lakes, a large number of rivers of all sizes and one of the world largest rivers, the St. Lawrence River, within the provincial boundaries.

Until recently, freshwater resources in Québec have been considered inexhaustible. However, fresh water is now recognized to be exposed to numerous pollutants that can degrade it, particularly in the urban and agricultural regions of Southern Québec (SAMSON et NADEAU, 1991). Even remote lakes accessible only by air are exposed to environmental stresses such as acidification, and contamination of living organisms, soils and waters. These stress factors can compromise the integrity and structure of aquatic ecosystems (CCRS, 1990).

The goal of this article is to summarize the main environmental problems affecting aquatic ecosystems in Québec. Apart from presenting an overview of problems related to acidification, eutrophication, and contamination, the present article will discuss different restoration techniques with emphasis on methods best suited for future use. This reflection also suggests a concerted global approach on which a future water management strategy could be based.

2 – MAJOR ENVIRONMENTAL PROBLEMS AFFECTING LAKES

The lake acidification phenomenon represents one of the major environmental problems in Québec. This problem is relatively serious for sensitive aquatic ecosystems located on the Canadian Shield, where 95% of all Québec lakes are found (Fig. 1). Two main factors explain this lake sensitivity: high acidic loads in precipitation and soils, and rocks having low acid neutralizing capacities (CCRS, 1990). Recent studies (DUPONT, 1993; LEDUC *et al.*, 1996) show that 29000 lakes (19%) out of a target population of 159842 are acidic ($\text{pH} \leq 5.5$); 10400 (35%) of these 29000 acidic lakes show naturally acidic conditions induced by organic acids, whereas the other 19000 lakes (65%) were probably acidified by inorganic acids of anthropogenic origin (DUPONT, 1993). It is important to note that more than 95% of all naturally occurring acidic lakes are located in the Côte-Nord area. There are also more than 81000 lakes (52%) out of the total 159842 that show a $\text{pH} \leq 6$, a threshold below which condition may be stressful enough to produce biological damages. Many direct and indirect effects on fish populations were recorded for these lakes (CCRS, 1990; TREMBLAY and RICHARD, 1993).

Several studies using simulation models and paleolimnological reconstructions based on diatom and chrysophyte assemblages showed that acidic lakes, in which the ionic balance is dominated by inorganic acids (sulfuric and nitric acids), have acidified since the onset of industrial activities nearly 100 years ago (CCRS,

1990; SULLIVAN *et al.*, 1990; DIXIT *et al.*, 1992). Simulation models also predict that acidification recovery would be possible after reductions in acidic deposition. Recent surveys of lake water quality in areas affected by reduction in SO₂ emissions tend to confirm this assumption (BOUCHARD, 1995).

Eutrophication of surface waters represents another major problem worldwide for lakes in urban, semi-urban and agricultural areas, despite recent wastewater cleanup efforts (RAST and THORNTON, 1995). Point and non-point sources of nutrients such as N and P are often held to be responsible for the accelerated eutrophication of water bodies (SHARPLEY *et al.*, 1994). Point source pollutants from cities and agricultural industries, combined with those produced from non-point sources of pollution in agricultural and recreational areas, are mainly responsible for this problem. Lakes undergoing rapid eutrophication in Québec, although relatively low in number, are mostly found along the St. Lawrence River valley (*Fig. 1*). The worst eutrophic conditions are observed within the St. Lawrence Low Lands where agriculture is the most intensive. Similar conditions are also observed for Appalachian lakes (south of the St. Lawrence), located within the Eastern Townships and Beauce areas, where mixed agricultural, urban and recreational activities are considered responsible for the observed degradation in water quality conditions. Finally, Laurentian lakes, which are located north of Montreal and the St. Lawrence River, are also affected by eutrophication. Development of watersheds is the main factor contributing to the nutrient enrichment in these areas. Less than peak efficiency in waste water treatments (septic tanks, wastewater treatment plants) may also contribute to the problem.

Bacteriological and toxic contamination add to the eutrophication problem. Water quality degradation may come from bacterial contamination, e.g. due to coliforms originating from urban or agricultural activities, or may be attributed to a toxic contamination derived from point source industrial activities, or from long-range transport of pollutants such as metals, pesticides and other toxic substances. Bacteriological and point source industrial pollution are generally confined to the same areas affected by eutrophication (*Fig. 1*). Toxic contamination from airborne sources affects a much larger area (GAFFNEY *et al.* 1987; LOCKHART *et al.* 1992; ROWAN *et al.* 1993), notably in the case of mercury contamination of fish, which is widespread in Québec (Québec, 1995).

3 – MANAGEMENT APPROACHES

Many restoration techniques are described in the literature. Some of these are frequently used in Québec, while others have never been considered or have only been tested experimentally (*Fig. 2*). The classification made by CHRISTIE *et al.* (1986), which was also described by VALLENTYNE and HAMILTON (1987), is particularly well suited for classifying lake restoration techniques with reference to their management approach, their temporal scale and the expected results. These authors established four specific categories of approaches: 1) ecosystemic, 2) piecemeal, 3) environmental, and 4) ecosystemic. BARICA (1993) worked with this classification in presenting application examples adapted to various problems. The CHRISTIE *et al.* (1986) classification is used in this article with the specific goal of applying it to lake restoration.

3.1 Ecosystemic approach

The ecosystemic approach is a management style based on a fixed need in which no care is given to other potential uses. The best example is to do nothing to fix a problem or to use a lake as a settling pond or a water storage for irrigation. This approach can not be considered as acceptable for lake restoration.

3.2 Piecemeal approach

The piecemeal approach was one of the first to be commonly used. It is a short-term approach based on specific technological means to address a precise problem affecting a lake or a set of lakes. It is the recommended approach to use when water quality is highly degraded, and where a rapid recovery is needed. In some cases, the action taken can be of last resort. Liming, bubbling, biomanipulation, dredging, etc. represent some of these techniques.

Liming of surface waters represents the main short-term restoration technique for acidic lakes and streams (HOUDE *et al.*, 1989). Fish stocking is generally needed the year after liming in cases where the indigenous fish populations have been decimated. This method is not well suited for high organic content waters, for remote lakes, or those lakes where water turnover time is fast. Liming also has the disadvantage of requiring repeated applications over time.

Piecemeal techniques were generally used with relative success when restoring lakes affected by chronic problems of bacterial contamination or eutrophication (algae blooms, filamentous algae, odors, etc.). These restoration techniques include hypolimnetic water bubbling, macrophyte harvesting, installation of PVC grids or permeable canvas on lake sediments, lake biomanipulation using plants or aquatic organisms (introduction of grazer fish species and competing species of plants), installation of settling ponds, etc.

As in the case of eutrophication, piecemeal techniques are mostly used in cases of emergencies and chronic situations for toxic contamination problems. The following techniques are some of those used for addressing contamination problems: high-cost dredging techniques, with its related problem of disposing of contaminated sediments, installation of permeable geotextile canvas, etc. Drastic methods, such as caustic soda application, are sometimes used to neutralize toxic spills or the leachate originating from mining residues.

3.3 Environmental approach

Environmental restoration approaches are used to correct causes of specific problems, where water quality conditions vary from fair to degraded. The following actions represent good examples of this approach: the Québec urban wastewater cleanup program, relying strongly on the construction or upgrading of treatment plants, reductions of gaseous pollutants, improvement of sanitary installations, etc. Environmental approaches such as these have been the most commonly used actions in Québec since the end of the 70's.

Reduction of SO₂ and NO_x industrial emissions is currently the approach recommended by Canadian federal and provincial governments in order to solve the acid precipitation problem. This approach was also acknowledged through the Canada-United-States Agreement on Air Quality (Canada-Etats-Unis, 1994). In Québec, these efforts took the form of the construction of a sulfuric acid proces-

sing plant in Rouyn-Noranda, the recycling and cleanup of captured gaseous emissions, a shift toward sulfur-poor fuels, and the obligation for all new vehicles to be equipped with a catalytic converter (BOULET and LAPOINTE, 1991). One of the main goals is to reduce annual wet sulfate deposition below the target loading of 20 kg/ha/year. There are also municipal programs involving regular inspection of motorized vehicles and verification of catalytic converters.

As for eutrophication, bacterial and toxic contamination, the Québec Government initiated a major wastewater cleanup program, involving urban (PAEQ: Programme d'assainissement des eaux du Québec) and industrial programs (PRRI: Programme de réduction des rejets industriels). These programs represent a combined cost of nearly 7 billion dollars (MONFET *et al.*, 1993). The urban wastewater cleanup program is now nearing completion. Its main goal was to restore water uses while reducing point sources of phosphorus, nitrogen, suspended solids, biochemical oxygen demand, and coliforms. The PAEQ program has been successful locally, but non-point source pollution, which is the main nutrient contributor in agricultural watersheds, has in some cases concealed this improvement (PRIMEAU and GRIMARD, 1990; SIMONEAU, 1991).

The agricultural domain has not yet benefited from a wastewater cleanup program of a scale similar to those in the industrial and urban areas. There are only a few existing regulations, such as the one pertaining to manure management. Septic installations are also regulated to reduce the impact of urban and recreational non-point source pollutants. An incentive program was also initiated to overcome shore destruction, erosion and transport of nutrients, to urge people to preserve a buffer zone around the lake, and to maintain aquatic ecosystem integrity. This program is voluntary, not mandatory, and the follow up is still deficient. On the other hand, environmental groups and lakeside resident associations have initiated several projects at the local scale, e.g. reducing nutrient inputs, improving lake environments by setting up fish spawning sites and aquatic plant sites, and revitalizing lake shores.

As for industrial effluents, both federal and provincial governments have implemented reduction programs to reduce 90% of the pollutant loads discharged by large industries (PRRI and Saint-Laurent Vision 2000). These actions involve regulatory and incentive programs designed to ensure the construction of specially-adapted treatment plants (Québec, 1992a). Some highly toxic substances such as organochlorides (PCB's, dioxin, furanne) and certain long-lived pesticides (DDT) have been banned. Finally, water quality criteria are used to evaluate pollution levels in Québec (Québec, 1992b).

3.4 Ecosystemic approach

*The ecosystem approach is a long-term approach to management. It is not well suited to rapidly restore even a moderately-damaged lake, but it has the quality of permitting long-term sustainable development of a lake while insuring biological and chemical equilibrium (SLOCOMBE, 1993a). The ecosystem approach relies on the examination of interrelationships among the water, biota, atmosphere, watershed and human population (BARICA, 1993). It is well suited to address as a whole all the problems affecting a lake. According to VALLENTYNE (1993), the ecosystem approach can also be related to the biosphere approach. Although recommended by many scientists, the ecosystem approach is the most difficult to implement because it needs the direct support of the population and a thorough knowledge of the ecosystem. According to MONTGOMERY *et al.* (1995),*

the ecosystem approach must be preceded by, or at least take into account, a detailed analysis of the watershed. It seems well adapted to recreational lakes where it could help slow down the eutrophication of the lake. The success of this approach is often dependent on people's capacity to change their habits (REYNOLDS, 1993). The means can range from simple incentives program up to a complete ban on housing development in the lake watershed.

The ecosystem approach is rarely considered as a means to reduce lake acidification. Only a few municipal initiatives such as promoting public transportation are beginning to take effect. The ecosystem approach is also rarely used for contamination and eutrophication problems. Many government officials and scientists think it is the best long-term approach for lake restoration, but there are very few practical examples. Some elements derived from the ecosystem approach inspired restoration techniques used by environmental groups such as FAPEL (Fédération des Associations pour la Protection de l'Environnement des Lacs), Fondation de la Faune, UQCN (L'Union Québécoise pour la Conservation de la Nature) and some others: ban on use of motorized boats, preservation of a buffer zone around the lake, citizen education pertaining to septic installation and lake protection measures, etc. As for toxic contamination, a federal program entitled Eco-Choix was initiated to give people a better understanding of toxic substances. The efforts involved briefing lake residents on the use of fertilizers with or without pesticides, and warning them not to dispose of used oils, paints and other domestic toxic substances in the sewer, septic tank, or the lake environment.

4 – TOWARD GLOBAL LAKE MANAGEMENT

4.1 Priorities of future actions

It is vital that lake restoration involve reductions of pollutants at the source. Such an approach has been used to a certain extent by governments for acid rain, urban and industrial effluents. In the case of acid rain, actions that have been taken up until now have however been insufficient as a large number of lakes are still acidic, and more than 25% of these will remain so even after completion of planned emission reductions by Canada and the United States (DUPONT, 1993). This projection does not even take into account the increasing role of nitrates in surface water acidification (EPA, 1995), which could lead to a substantial increase in the proportion of acidic lakes over time. On the other hand, industrial and urban wastewater cleanup plans were initiated several years ago but have not yet been completed. Many water uses and sites still do not meet the prescribed environmental goals, even though 50% of all cities (nearly 80% of the population) now have wastewater treatment facilities.

Reduction of point-source pollutants has probably been the easiest step. However, lake restoration will only be successful if reductions of agricultural and urban non-point sources of pollution are made in the future. Some programs are already in place, as for manure management (PAAGF), soil conservation (BMP's: best management practices), and pesticide management. However, this sector of activity still needs to be supported by a wastewater cleanup program similar in scope to those in the industrial and urban sectors. Piecemeal restoration tech-

niques, such as liming to increase the pH or to precipitate trace metals (mercury, lead, cadmium), should only be considered in cases where nothing else can be done. Liming acidic lakes does not represent a valid choice for the Québec government because of the high number of lakes needing treatment and the recurrent nature of liming. This method may prove to be useful however for lake-side residents and ZEC (Zone d'exploitation contrôlée) managers, who want to restore a lake rapidly while awaiting the benefits of more medium- to long-term restoration approaches. These actions should be carried-out while addressing both causes and effects at the watershed level (BARROIN, 1991).

4.2 Integration of restoration approaches for lake management

A global lake restoration program should take into account three of the four restoration approach types: ecosystem, environmental and piecemeal techniques. The first type is appropriate for lightly-damaged lakes, whereas the other approaches may be needed to correct more profound environmental problems.

Because there are numerous problems affecting the quality of lake ecosystems and their related uses in Québec, a global lake and surface water restoration approach should be part of a true water management policy. Such a policy should involve a true dialogue among the various levels of decision-makers, and with the population itself. It would benefit even more if this management strategy were to be based upon the integrated watershed approach, where causes and effects are accounted for (YIN and PIERCE, 1993; GRUMBINE, 1994). Such an approach is needed to adequately address priorities of action, to settle usage conflicts, and to coordinate the role of each participant (SLOCOMBE, 1993b; WESSEL, 1993). The hybrid approach involving 3 of the 4 management approaches fits well within this context.

4.3 Involvement of regional and central authorities

Until now, water management in Québec, including lake restoration, has been conducted mostly by the provincial and federal governments. This top-bottom management approach is slowly being revised. There is now a gradual shift toward a greater involvement of local and regional authorities. It is improbable that a complete bottom-up management approach will develop but an effective compromise may be a shared level of responsibilities. As part of a true water management strategy, this sharing of responsibilities should take into account the nature and scale of problems. One can think that provincial and federal governments will be the main actors dealing with environmental problems of provincial, national, and international scopes (acid rain, toxic rain, climate change, etc.). They should continue to play a major role in wastewater action plans, in setting environmental legislation and regulation, and in defining new environmental quality standards and criteria for the entire province.

The role of central governments should be integrated with the involvement of local and regional water resource managers. These latter participants could be made responsible for setting regional action priorities while relying on environmental and ecosystem preservation and restoration techniques to manage lake resources (WESSEL, 1993). Regardless of the management strategy to be chosen, a rigorous partnership should exist among all participants to avoid garbage-can decision-making management, which reflects a lack of coordination (DEYLE, 1995). Figure 3 suggests the appropriate scale within which decision-making institutions might concentrate their actions.

Whatever management structure arises in Québec, it is important that lake restoration be backed up by prevention programs. These programs should address a reduction at the source of local, regional, and continental stresses that may influence lake eutrophication, ecosystem integrity, human health and sustainable resource development.

5 – CONCLUSION

Lake restoration efforts in Québec have evolved greatly in recent years. Early actions have helped correct some of the worst problems of eutrophication, acidification, and contamination. These piecemeal restoration techniques were gradually replaced by provincially-oriented environmental approaches, which should lead the way toward regional environmental and long-term ecosystem approaches. Despite these efforts, many problems are still affecting lake ecosystems. These residual problems will be harder to correct because of the diffuse nature of the pollutants, whether they originate from agricultural non-point sources or through lake watershed urbanization. A true dialogue among partners at local, regional, and provincial decision-making levels, coupled to an increased awareness on the part of citizens and lake-side residents, is needed to solve the environmental problems that still jeopardize the integrity of our lake ecosystems.

ACKNOWLEDGEMENTS

I would like to thank the following persons who provided me with useful advice and comments for this article: Madeline Papineau and André Bouchard from Environment Canada, Denyse Gouin, Robert Bertrand, Yves Grimard, and Lévis Talbot from the Direction des écosystèmes aquatiques of the Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, Pierre Bérubé, and Serge Tremblay of the same Ministry, and Tony LeSauteur from FAPEL.

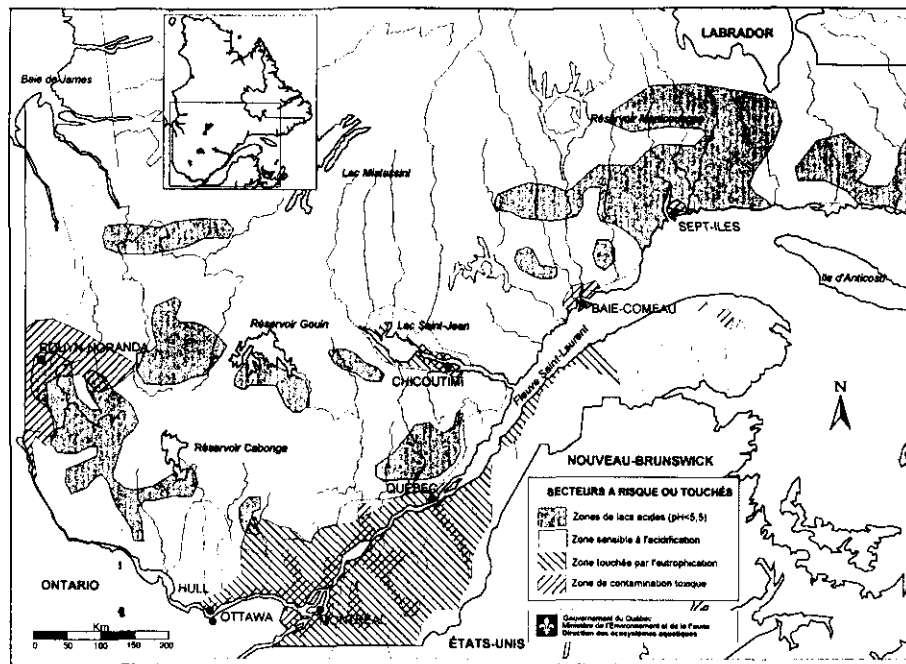


Figure 1

Régions lacustres du Québec méridional touchées par des problèmes d'acidification, d'eutrophication et de contamination des eaux de surface. Cette carte est une compilation de l'ensemble des études produites au Ministère de l'Environnement et de la Faune. Elle tient compte entre autre des bilans de qualité d'eau par bassin, des études scientifiques relatives aux précipitations acides, de l'examen général de la qualité de l'eau de près de 4 000 lacs archivés dans la Banque de la qualité du milieu aquatique, du suivi du PAEQ, des cartes géologiques et des écodistricts.

Lake areas in southern Québec where surface waters are affected by acidification, eutrophication, and contamination. This map integrates information produced from many studies by the Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec. It takes into account several watershed water quality status reports, scientific studies pertaining to acid precipitation, general evaluation of water quality from the 4000 lakes available in the Banque de la qualité du milieu aquatique, the PAEQ follow-up, geologic maps, and ecodistrict maps.


| ACTION | ACIDIFICATION | EUTROPHISATION | CONTAMINATION |
|--|---|---|--|
| LONG TERME (APPROCHE ÉCOSYSTÉMIQUE) | Changement de mode de génération d'énergie Réduction de la consommation de carburants fossiles | Respect de la capacité d'assimilation du lac Aménagement durable du bassin versant Changements d'habitudes des riverains et des collectivités Moratoire sur le développement agricole et résidentiel sur le bassin Éducation et sensibilisation des riverains | Changements d'habitudes des riverains et des collectivités Interdiction d'utiliser des embarcations motorisées sur le lac Recyclage des déchets dangereux |
| MOYEN TERME (APPROCHE ENVIRONNEMENTALE) | Réduction des émissions de SO ₂ et NO _x Mise en place de convertisseurs catalytiques Usage de combustibles à faible teneur en soufre Rajustement des installations industrielles | Programmes d'assainissement des eaux (PAEQ, PRRI, PASL) Gestion des fumiers (PAAGF) Conservation des sols Réglementation sur les installations septiques Assainissement agricole Programme de régénération des rives de lac Aménagement des lacs et cours d'eau | Programmes d'assainissement industriels PRRI, PASL pâtes et papiers, et alumineries Réduction des émissions toxiques aéroportées Accords de réduction internationaux Réglementation stricte sur les substances toxiques et les pesticides |
| COURT TERME (APPROCHE AU CAS PAR CAS) | Chaulage des lacs et des tributaires Implantation d'espèces tolérantes à l'acidité de l'eau | Bassins de sédimentation Chaulage Aération Dragage des sédiments Toiles et grilles en PVC Biomaniipulation Enlèvement des plantes aquatiques | Neutralisation Urgence Environnement Guide de consommation du poisson pour le citoyen |
| [---] Approches non utilisées au Québec [---] Approches à envisager dans le cadre d'une gestion intégrée [---] Approches utilisées à l'occasion ou sujettes à un suivi d'intensité variable [---] Approches fortement réglementées, faisant l'objet d'un suivi rigoureux ou d'usage courant au Québec | | | |
|  Gouvernement du Québec Ministère de l'Environnement et de la Faune Direction des écosystèmes aquatiques | | | |

Figure 2 Méthodes de restauration à court, moyen et long termes pour contrer l'acidification, l'eutrophication et la contamination des plans d'eau.

Short-, medium-, and long-term restoration methods to address surface water acidification, eutrophication, and contamination.

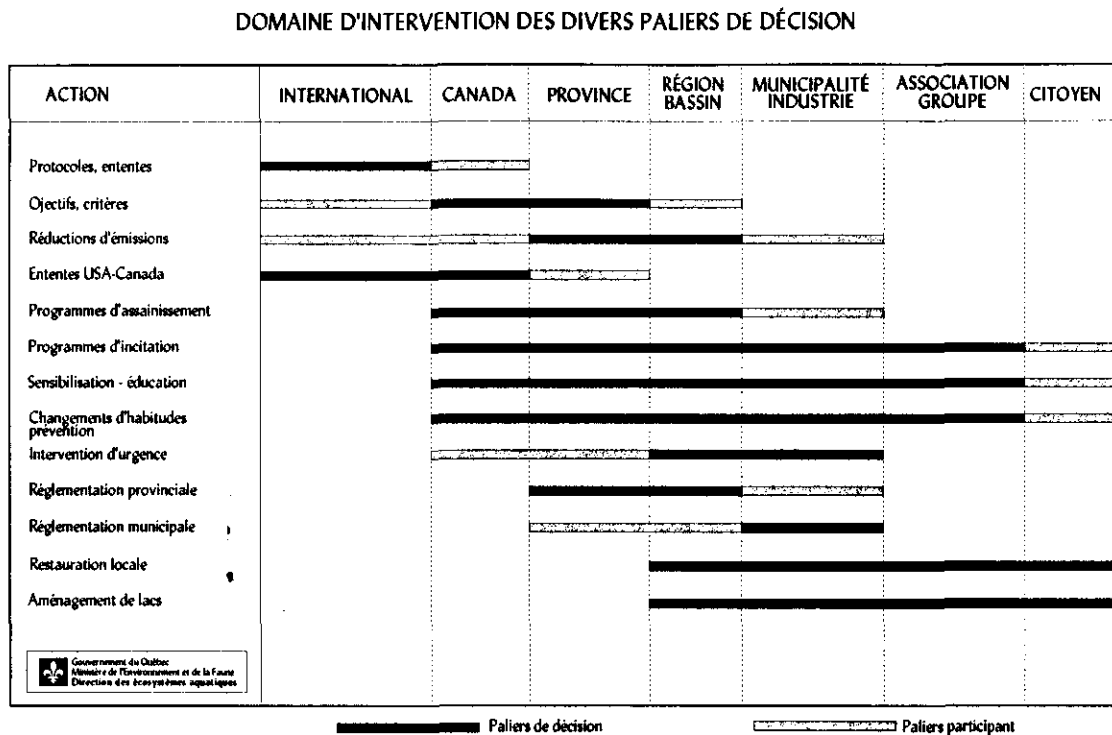


Figure 3. Échelle d'opération optimale pour différents paliers décisionnels impliqués dans la restauration et la protection des écosystèmes lacustres.

Optimal scale of operation for various decision-making levels involved in lake ecosystems protection and restoration.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARICA, J. (1993). The anticipated degree of success of different approaches to lake rehabilitation. *J. Aquatic Ecosys. Health*, 2, 95-98.
- BARROIN, G. (1991). La réhabilitation des plans d'eau. *La Recherche*, 238, 1412-1422.
- BOUCHARD, A. (1995). Changements dans le niveau d'acidité des lacs du sud du Québec de 1985 à 1994. Environnement Canada, Conservation de l'Environnement, Centre Saint-Laurent, *Rapport scientifique et technique ST-32*, 64 p.
- BOULET, G., LAPOINTE, L. (1991). Le programme de réduction des émissions de SO₂ au Québec: 1980-1990. *Colloque sur les précipitations acides et sur la pollution par l'ozone (Smog)*, Montréal, pp. 115-132.
- CHRISTIE, W.J., BECKER, M., COWDEN, J.W., VALLENTYNE, J.R. (1986). Managing the Great Lakes Basin as a home. *J. Great Lakes Res.*, 12, 2-17.
- CANADA-ÉTATS-UNIS (1994). Accord Canada-États-Unis sur la qualité de l'air, rapport d'étape 1994. Gouvernement du Canada et Gouvernement des États-Unis d'Amérique, 64 p.
- Comité de coordination de la recherche et de la surveillance (CCRS), 1990. Rapport canadien d'évaluation de 1990 sur le transport à distance des polluants atmosphériques et sur les dépôts acides - Partie 4 : Effets sur les milieux aquatiques. CCRS/RMCC, 183 p.
- DEYLE, R.E. (1995). Integrated water management: contending with garbage can decision making in organized anarchies. *Water Resour. Bull.*, 31, 387-398.
- DIXIT, S.S., SMOL, J.P., KINGSTON, J.C., CHARLES, D.F. (1992). Diatoms: powerful indicators of environmental change. *Environ. Sci. Technol.*, 26, 23-32.
- DUPONT, J. (1993). Bilan de l'acidité des lacs du Québec méridional. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction des écosystèmes aquatiques, *rapport no QEN/PA-47/1*, 129 p.
- Environmental Protection Agency (EPA) (1995). Acid Deposition Standard Feasibility Study: Report to Congress. EPA, *report n° 430-R-95-001*, 105 p.
- GAFFNEY, J.S., STREIT, G.E., SPALL, W.D., HALL, J.H. (1987). Beyond acid rain. *Environ. Sci. Technol.*, 21, 519-524.
- GRUMBINE, R.E. (1994). What is ecosystem management? *Conserv. Biol.*, 8, 27-38.
- HOUDE, L., LEMIEUX, M., DUPONT, J. (1989). Le chaulage au Québec: problématique et suivi temporel de ses effets sur huit lacs de la région de la Mauricie. Ministère de l'Environnement et ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, *rapport no QEN/PA-32/1*, 137 p.
- LEDUC, R., BOULET, G., CHHEM, C., DUPONT, J., OUIMET, R., PAQUIN, C., WALSH, P. (1996). Les précipitations acides au Québec - État de situation (1996). Ministère de l'Environnement et de la Faune, ministère des Ressources Naturelles, *rapport no PA-52*, 49 p.
- LOCKHART, W.L., WAGEMANN, R., TRACEY, B., SUTHERLAND, D., THOMAS, D.J. (1992). Presence and implications of chemical contaminants in the fresh waters of the Canadian Arctic. *Sci. Total Environ.*, 122, 165-243.
- MONFET, J., BERTRAND, R., LANDRY, R., MARCHAND, G., CARPENTIER, J. (1993). Évaluation du Programme d'assainissement des eaux (PAEQ). Ministère de l'Environnement et de la Faune, sous-ministériat au milieu urbain.
- MONTGOMERY, D.R., GRANT, G.E., SULLIVAN, K. (1995). Watershed analysis as a framework for implementing ecosystem management. *Water Resour. Bull.*, 31, 369-385.
- PRIMEAU, S., GRIMARD, Y. (1990). Rivière Yamaska 1975-1988, Volume I: Description du bassin versant et qualité du milieu aquatique. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, *rapport no QE-66-1*, 136 p.
- QUÉBEC, 1995. Guide de consommation du poisson de pêche sportive en eau douce. Ministère de l'Environnement et de la Faune, ministère de la Santé et des Services Sociaux, 132 p.
- QUÉBEC, 1992a. Manuel des opérations - secteur industriel: Guide général. Ministère de l'Environnement du Québec.

- QUÉBEC, 1992b. Critères de qualité des eaux, Service d'évaluation des rejets toxiques. Direction de la qualité des cours d'eau, ministère de l'Environnement du Québec, 425 p.
- RAST, W., THORNTON, J.A. (1996). Trends in eutrophication research and control. *Hydrol. Proc.*, 10, 295-313.
- REYNOLDS, C.S. (1993). The ecosystems approach to water management. The main features of the ecosystem concept. *J. Aquat. Ecosyst. Health*, 2, 3-8.
- ROWAN, D.J., KALFF, J. (1993). Predicting sediment metal concentration in lakes without point sources. *Water Air Soil Pollut.*, 66, 145-161.
- SAMSON, M., NADEAU, R. (1991). Villégiature et station touristique : Le cas de Magog-Orford. Département d'études urbaines et touristiques, UQAM et Département de géographie et de télédétection, Université de Sherbrooke, 189 p.
- SHARPLEY, A.N., CHAPRA, S.C., WEDE-POHL, R., SIMS, J.T., DANIEL, T.C., REDDY, K.R. (1994). Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters : Issues and options. *J. Environ. Qual.*, 23, 437-451.
- SIMONEAU, M. (1991). Qualité des eaux du bassin de la rivière Chaudière 1976 à 1988. Ministère de l'Environnement du Québec, Direction de la qualité des cours d'eau, rapport no QEN/QE-68/1, 207 p.
- SLOCOMBE, D.S. (1993a). Environmental planning, ecosystem science, and ecosystem approaches for integrating environment and development. *Environ. Manag.*, 17, 289-303.
- SLOCOMBE, D.S. (1993b). Implementing ecosystem-based management. *BioScience*, 43, 612-622.
- SULLIVAN, T.J., CHARLES, D.F., SMOL, J.P., CUMMING, B.F., SELLE, A.R., THOMAS, D.R., BERNERT, J.A., DIXIT, S.S. (1990). Quantification of changes in lakewater chemistry in response to acidic deposition. *Nature*, 345, 54-58.
- TREMBLAY, S., RICHARD, Y. (1993). Effects of acidity on fish communities in southwestern Québec (Canada). *Water Air Soil Pollut.*, 66, 315-331.
- VALLENTYNE, J.R. (1993). Biospheric foundations of the ecosystem approach to environmental management. *J. Aquat. System Health*, 2, 9-13.
- VALLENTYNE, J.R., HAMILTON, A.L. (1987). Managing human uses and abuses of aquatic resources in the Canadian ecosystem. Healey, M.C. and Wallace, R. R, [eds.], Canadian Aquatic Resources, The Rawson Academy of Aquatic Science, Department of Fisheries and Oceans, *Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences report n° 215*, 513-533.
- WESSEL, J. (1993). Institutional arrangements which may promote ecosystems water management. *J. Aquat. Ecosyst. Health*, 2, 15-19.
- YIN, Y., PIERCE, J.T. (1993). Integrated resource assessment and sustainable land use. *Environ. Manag.*, 17, 319-327.