



**L'Observatoire de l'environnement
et du développement durable**



**UNIVERSITÉ DE
SHERBROOKE**



SOLUTIONS CURATIVES POUR LA RESTAURATION DE LACS PRÉSENTANT DES SIGNES D'EUTROPHISATION



Étude réalisée par Sébastien Devidal,
Étudiant en Master environnement de l'université de Rouen (France),
Sous la supervision de Marie Florence Pouet et Olivier Thomas
Avec l'assistance de Camille Rivard-Sirois

Février 2007

SOMMAIRE

AVANT PROPOS	3
INTRODUCTION	4
I) L'EUTROPHISATION DANS LES LACS	5
I.1) Définition de l'eutrophisation	5
I.2) Les différents stades de l'eutrophisation	5
II) LES FAMILLES DE TECHNIQUES CURATIVES FACE À L'EUTROPHISATION	7
III) ACTIONS HYDROLOGIQUES	11
III.1) Action sur l'écoulement des eaux	11
III.1.1) Traitement des eaux des tributaires	11
III.1.2) Déviation des eaux tributaires chargées	11
III.1.3) Augmentation de l'écoulement, effet « chasse d'eau »	12
III.1.4) Évacuation sélective des eaux hypolimniques.....	12
III.2) Action sur le marnage	13
III.2.1) Élévation du niveau d'eau	13
III.2.2) Diminution du niveau d'eau et assèchement	13
III.2.3) Applications sur le terrain.....	13
IV) ACTIONS MÉCANIQUES	14
IV.1) Traitements des sédiments	14
IV.1.1) Le décapage ou curage mécanique	14
IV.1.2) Le dragage	15
IV.1.3) Recouvrement des sédiments	16
IV.1.4) Utilisation de ces techniques	16
IV.2) Actions directes sur la surproduction végétale	17
IV.2.1) Faucardage et récolte manuelle des macrophytes	17
IV.2.2) Coupe mécanique des macrophytes	17
V) TRAITEMENTS PHYSICO-CHIMIQUES	18
V.1) Action sur l'oxygénation et la circulation des eaux	18
V.1.1) La déstratification	18

V.1.2) L'aération hypolimnique	19
V.1.3) Études de cas et Avis scientifiques	21
V.2) Traitement utilisant des produits chimiques.....	23
V.2.1) L'inactivation du phosphore par coagulation/floculation.....	23
V.2.2) Épandage d'argile à la surface de l'eau	26
V.2.3) Usage de sous produits industriels.....	26
V.2.4) Herbicides aquatiques.....	26
V.3) Traitements physiques.....	28
V.3.1) Irradiation ultrasonique des algues	28
V.3.2) Action sur l'énergie lumineuse reçue par les eaux	28
V.4) Usage des produits Plocher®	29
VI) ACTION BIOLOGIQUE	29
VI.1) Introduction de carpes consommatrice d'algues.....	29
VI.2) Ajout de bactéries.....	30
VI.3) La biomanipulation.....	30
VI.3.1) Description	30
VI.3.2) Étude de cas.....	30
VI.4) Les îles flottantes	32
VII) SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS	32
VII.1) Tableaux de synthèses	32
VII.2) Recommandations pour le traitement	40
CONCLUSION	42
GLOSSAIRE	43
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	45

AVANT PROPOS

Ce rapport est le fruit d'un stage d'étudiant. Il ne saurait prétendre être exhaustif dans le recensement des techniques. L'analyse des avantages et des inconvénients ainsi que des critères de choix des techniques ne se base que sur la littérature disponible. En l'absence de retour d'expérience de certaines techniques, les recommandations d'usage doivent donc être considérées comme indicatives.

En cas de citation, la référence suivante doit être utilisée :
S. Devidal, C. Rivard-Sirois, M-F. Pouet, O. Thomas, (2007), Solutions curatives pour la restauration de lacs présentant des signes d'eutrophisation, rapport interne, Observatoire de l'environnement et du développement durable, Université de Sherbrooke – RAPPEL, Sherbrooke, Québec, Canada, 51 p.

INTRODUCTION

Les pressions exercées par les hommes sur le milieu naturel sont de plus en plus importantes, se qui entraîne un risque de dégradation accru, d'année en année, de la qualité de notre environnement. Le domaine de l'eau est un milieu particulièrement sensible aux pressions anthropiques puisque c'est principalement par l'eau que s'effectue la collecte et le transfert des substances ou composés polluants dans l'environnement.

Depuis quelques années, les lacs, les étangs et les marais, où se concentrent les masses d'eau issues des *bassins versants** voient leur qualité se dégrader fortement.

Les phénomènes engendrés par les pollutions affectant le domaine de l'eau sont souvent spectaculaires. Ils peuvent se manifester par exemple par une prolifération de végétaux (algues, *macrophytes**), ou encore par l'envasement rapide des fonds lacustres. On parle alors d'eutrophisation ou encore de « vieillissement accéléré » du plan d'eau.

Conscient de ces problèmes qui nuisent au milieu naturel, mais également à l'ensemble des activités liés aux plans d'eau (pêche, tourisme...) un certain nombre d'actions peuvent être mises en place par les gestionnaires de ces espaces sensibles, pour limiter les phénomènes liés à l'eutrophisation.

Il existe en effet de nombreuses solutions proposées pour faire face aux manifestations directes de l'eutrophisation. On ne peut définir une technique d'intervention unique applicable à tous les milieux aquatiques, car chaque plan d'eau possède ses caractéristiques propres.

Les différentes techniques qui seront présentées par la suite sont des moyens de lutte curatifs. Il est par conséquent essentiel de préciser que ces techniques traitent le problème de pollution uniquement de façon ponctuelle dans le temps. Elles ne limiteront pas la réapparition des phénomènes d'eutrophisation dans les plans d'eau si aucune mesure n'est prise pour réduire l'apport des éléments nutritifs par les eaux des tributaires.

La lutte contre l'eutrophisation des plans d'eau devrait passer avant tout par des méthodes préventives, qui s'attaquent réellement au problème de contamination, en limitant la diffusion du phosphore, de l'azote, de la matière organique ou encore des polluants, dans l'environnement.

I) L'EUTROPHISATION DANS LES LACS

I.1) Définition de l'eutrophisation

L'eutrophisation est une forme de dégradation de certains écosystèmes aquatiques qui se produit lors d'un enrichissement prononcé en éléments nutritifs dans le milieu.

Cette dégradation est à l'origine un phénomène naturel extrêmement lent, qui intervient dans l'évolution du lac. Cependant ce processus peut être fortement accéléré par des apports anthropiques de *nutriments** d'origine agricole, domestique ou encore industrielle.

Les principaux nutriments à l'origine de l'eutrophisation sont le phosphore (principalement sous forme de phosphates) et l'azote (sous forme d'ammonium, de nitrates ou organique). La matière organique joue également un rôle important. Les paramètres physiques du milieu comme l'ensoleillement ou la température de l'eau, peuvent eux aussi favoriser le processus d'eutrophisation.

Ce type de pollution affecte tout particulièrement les lacs, où le renouvellement des eaux est en règle général relativement lent. Ainsi, une quantité importante de nutriments s'accumule dans les lacs qui réceptionnent les eaux de ruissellement et des rivières de l'ensemble du bassin versant.

Stimulées par cet apport en éléments nutritifs, certaines algues ou macrophytes se développent de manière excessive et envahissent les couches d'eaux superficielles du lac. Il en est de même pour les espèces animales (zooplancton et poissons). Cette biomasse en excès conduit, lorsqu'elle meurt et se décompose, à une augmentation de la charge naturelle de l'écosystème en matière organique biodégradable. Les végétaux aquatiques et les animaux morts qui se décomposent et sédimentent au fond du lac sont dégradés par les bactéries qui prolifèrent à leur tour. Ces bactéries, pour la plupart *aérobies** consomment de plus en plus d'oxygène.

Les conditions de faibles circulation et oxygénation au fond des lacs fait que les l'oxygène des couches d'eaux profondes s'épuise. Des mécanismes de fermentation anaérobie peuvent alors prendre place. La matière organique s'accumule avec les sédiments. On parle alors de « vieillissement prématuré » du lac, qui, avec le dépôt des sédiments, se comble peu à peu.

I.2) Les différents stades de l'eutrophisation

Les plans d'eau peuvent être classés en fonction de l'état trophique qu'ils présentent. On différencie ainsi plusieurs stades d'avancement dans le processus d'eutrophisation, appelés aussi niveaux (ou états) trophique ou degrés d'eutrophisation. On retrouve dans cette classification des plans d'eau :

- Les lacs « Ultra-Oligotrophe et Oligotrophe » : (peu nourris), ayant une productivité faible, pauvres en nutriments, mais très oxygénés dans toute leur profondeur, et dont la clarté de l'eau est très bonne.
- Les lacs « Mésotrophe » : qui ont une productivité modérée, et qui correspondent à la catégorie de lacs intermédiaires entre le stade oligotrophe et eutrophe.
- Les lacs « Eutrophe » : (bien nourris), ayant une forte productivité et une importante biomasse

- Les lacs «Hyper-eutrophe» : qui sont des lacs extrêmement affectés par l'eutrophisation, et dont le fonctionnement est très fortement perturbé.

Chaque lac ayant ses propres caractéristiques, il est souvent difficile d'établir une classification précise des différents types de niveaux trophiques. Il existe cependant certains outils et modèles qui permettent d'évaluer le niveau d'eutrophisation.

Le tableau 1 donne par exemple une description des différents états trophiques d'un lac, sans avoir de signification très précise, cette description reste néanmoins couramment utilisée pour désigner le potentiel trophique d'un plan d'eau (Galvez-Cloutier, 2002).

<i>Caractères trophiques des lacs</i>					
Catégorie	Ultra-Oligotrophe	Oligotrophe	Mésotrophe	Eutrophe	Hyper-eutrophe
Biomasse	Faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte
Algue verte et cyanobactérie	Faible	Faible	Variable	Forte	Très forte
Macrophytes	Faible à nulle	Faible	Variable	Faible à forte	Faible**
Productivité	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Forte/instable
Oxygénation de l'épilimnion*	Normale	Normale	Variable	sursaturation	de la sursaturation à une anoxie complète
Oxygénation de l'hypolimnion*	Normale	Normale		Sous-saturation	

(** la surproduction de biomasse et de phytoplancton empêche la pénétration de la lumière dans l'eau, ce qui limite le développement des macrophytes)

Tableau 1 : Tableau des caractéristiques des différents niveaux trophiques de lac

Pour caractériser au mieux l'état trophique des lacs, on évalue le degré d'eutrophisation en se basant sur différents paramètres comme par exemple les concentrations en phosphore total, *chlorophylle-a**, ou la clarté des eaux mesurée à l'aide du disque de Secchi. En quantifiant ces paramètres pour caractériser la qualité de l'eau, on peut établir une classification des niveaux d'eutrophisation des plans d'eau (Tableau 2) (Galvez-Cloutier, 2002).

<i>Valeurs des seuils de l'état trophique des plans d'eau</i>					
Degré de trophie	P total µg/L	Chlorophylle-a moyenne µg/L	Chlorophylle-a maximum µg/L	Secchi moyenne m	Secchi minimum m
Ultra-oligotrophe	< 4	< 1	< 2,5	> 12	> 6
Oligotrophe	< 10	< 2,5	2,5 - 8	> 6	> 3
Mésotrophe	10 - 35	2,5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 1,5
Eutrophe	35 - 100	8 - 25	25 - 75	3 - 1,5	1,5 - 0,7
Hypereutrophe	> 100	> 25	> 75	< 1,5	< 0,7

Tableau 2 : Paramètres permettant l'évaluation du niveau trophique d'un plan d'eau

II) LES FAMILLES DE TECHNIQUES CURATIVES FACE À L'EUTROPHISATION

L'eutrophisation d'un lac peut se manifester sous différentes formes. L'ensemble du milieu lacustre subit ainsi l'impact du vieillissement accéléré du lac si l'apport anthropique d'éléments nutritifs dans le milieu naturel est trop important. Les phénomènes engendrés par l'eutrophisation se manifestent sur l'ensemble des compartiments du milieu, aussi bien sur les sédiments lacustres, la flore, ou encore la faune.

C'est la raison pour laquelle, les moyens de lutte curatifs pour faire face à l'eutrophisation d'un plan d'eau sont divers et variés. On peut ainsi différencier quatre classes de moyens d'actions (figure 1).

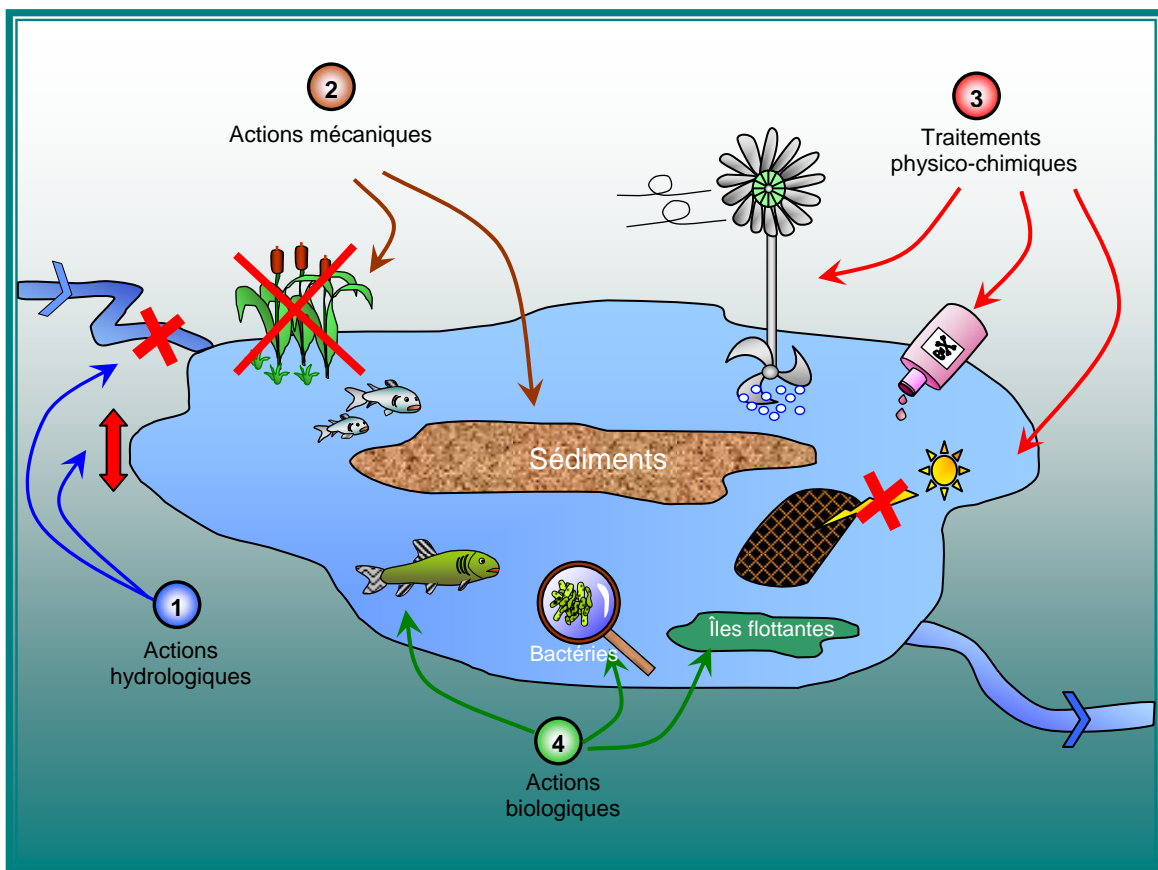


Figure 1 : Schéma synthétique du système lac et des différents groupes d'actions curatives pouvant être mises en place pour lutter contre l'eutrophisation

Les différents groupes d'actions représentés sur le schéma ci-dessus regroupent des actions spécifiques qui comportent chacune leurs avantages et leurs inconvénients, en terme d'impact environnemental et économique.

Le tableau suivant donne une description succincte des différents groupes de techniques utilisées dans la lutte curative de l'eutrophisation, qui seront étudiées par la suite.

ACTIONS - SYNTHÈSE

1 – Actions hydrologiques

Ces différentes techniques de lutte contre l'eutrophisation reposent sur des méthodes qui permettent l'évacuation ou la réduction des concentrations des polluants des eaux du lac. Certaines techniques permettent également d'avoir un contrôle sur des espèces végétales nuisibles de l'écosystème en faisant varier les conditions hydrologiques du milieu.

En jouant sur le volume d'eau des lacs, en évacuant les eaux trop chargées en nutriments ou en les traitant avant leur déversement dans les lacs, on peut contrôler l'apport d'éléments nutritifs dans le milieu. En limitant les concentrations de nutriment dans l'eau, on réduit la *production primaire** et on ralentit ainsi le processus d'eutrophisation du plan d'eau.

2 – Actions mécaniques

Actions mécaniques sur les sédiments

Les actions sur les sédiments ont pour principal objectif de stabiliser ou réduire le volume des vases et sédiments déposés au fond des plans d'eau. Ces mesures permettent de limiter le relargage d'éléments nutritifs (phosphore, azote...) des sédiments vers les eaux.

En effet, les nutriments présents dans les sédiments d'un plan d'eau peuvent constituer un apport interne d'éléments nutritifs favorisant la production primaire. Ces nutriments peuvent être rendus à nouveau disponibles durant la période estivale en général, suite à des changements physico-chimiques dans la colonne d'eau. Le phosphore qui avait été adsorbé sur les sédiments peut être remis en circulation dans les eaux, ce qui peut représenter un apport important pour le plan d'eau. Ainsi, même après une diminution des apports externes en nutriments, la qualité d'un plan d'eau peut demeurer inchangée si les sédiments contiennent de grandes quantités de nutriments. En plus de s'attaquer au problème de nutriments, l'enlèvement des sédiments permet de retirer du plan d'eau des matières toxiques accumulées au fil des ans, le cas échéant.

Actions mécaniques sur les plantes

Le ramassage, l'arrachage ou la coupe des plantes aquatiques permettent de retirer du plan d'eau un certain volume de matière organique. L'apport d'éléments nutritifs dans les eaux est ainsi réduit.

Ces opérations ont également pour objectif de maintenir une bonne oxygénation du milieu. En effet si la croissance des plantes proliférantes n'est pas régulée on peut avoir une quantité de matière organique trop importante qui n'arrive plus à se décomposer et entraîne une désoxygénation du milieu. Dans ces conditions certains composés nauséabonds ou toxiques pour certaines espèces végétales ou animales peuvent être libérés (fermentation).

Les opérations de contrôle de la végétation peuvent nécessiter des équipements simple ou complexe.

Les résidus végétaux collectés peuvent être valorisés par compostage dans la mesure où ils ne sont ni contaminés, ni toxiques.

3 – Traitements physico-chimiques

Actions sur l'oxygénation et la circulation des eaux

L'une des conséquences directes de l'eutrophisation d'un plan d'eau est la désoxygénation des eaux profondes, qui peuvent devenir *anoxiques**.

Il existe des solutions pour faire en sorte de maintenir une concentration d'oxygène adéquate dans l'eau afin de préserver la santé de l'écosystème. Ces techniques reposent sur des systèmes d'aération tels que les injecteurs d'air, des systèmes mécaniques de brassage des eaux ou encore l'injection d'oxygène pur ou d'ozone.

L'aération des eaux favorise le développement d'habitats pour les poissons et limite la croissance des algues, réduisant ainsi la quantité de matières organiques à décomposer. La présence d'oxygène à l'interface eau/sédiment peut également réduire la libération de phosphore et de fer provenant des sédiments.

Il est cependant important de signaler que le recours aux techniques d'aération dépend essentiellement des caractéristiques du lac. Un lac eutrophe peu profond par exemple, peut présenter de fortes concentrations en oxygène dans tout son volume, du fait de la forte production photosynthétique. Une aération est dans ce cas inutile.

Actions utilisant des produits chimiques

Il existe plusieurs types de produits chimiques disponibles sur le marché pour lutter contre l'eutrophisation des plans d'eau.

Il existe, par exemple, des composés chimiques qui vont agir sur la phase sédimentaire afin de stabiliser et piéger les substances nutritives dans les sédiments. D'autres méthodes de traitement chimique basent leurs actions sur le « piégeage » des éléments nutritifs présent dans les eaux afin de les rendre non disponible, dans le but de contrôler la production primaire du plan d'eau. D'autres composés chimiques sont des herbicides et traitent le problème du développement des macrophytes en s'attaquant directement aux plantes aquatiques.

Chacune des méthodes de traitement chimique comporte des avantages et des inconvénients. Néanmoins ces méthodes sont en général dommageables pour l'environnement. Si le plan d'eau à traiter contient des poissons, la plus grande prudence s'impose dans l'application de tout produit chimique ou herbicide.

Actions sur l'énergie lumineuse

Un grand nombre d'espèces envahissantes font appel à la photosynthèse pour coloniser les plans d'eau, c'est le cas d'un certain nombre d'espèces d'algues.

Les techniques agissant sur l'énergie lumineuse permettent d'avoir un contrôle de la photosynthèse qui ne peut s'effectuer sans lumière. Ces techniques vont ainsi limiter la production primaire et empêcher la prolifération d'organismes photosynthétiques dans les couches d'eau superficielles du lac.

4 – Actions biologiques

Les techniques de lutte contre l'eutrophisation par un traitement biologique sont relativement récentes mais semblent néanmoins très intéressantes pour l'impact limité qu'elles peuvent avoir sur le milieu.

Les méthodes biologiques n'entraînent en effet aucun aménagement et aucune modification physique du plan d'eau. L'introduction de nouveaux organismes dans le milieu est néanmoins une opération qui nécessite une étude au préalable afin de perturber au minimum les chaînes alimentaires et l'équilibre de l'écosystème.

L'emploi des techniques biologiques est de plus en plus généralisé sans tenir compte de tous les paramètres qui rentrent en jeu au risque bien souvent de réduire la biodiversité de l'écosystème.

III) ACTIONS HYDROLOGIQUES

III.1) Action sur l'écoulement des eaux

III.1.1) Traitement des eaux des tributaires

Cette technique consiste à traiter les eaux chargées en nutriments avant leur arrivée dans le lac. On peut néanmoins considérer cette méthode de traitement comme une technique plutôt préventive que curative. En effet ce procédé agit avant le déversement des eaux dans le lac.

Le traitement des eaux riches en nutriment s'effectue généralement par le biais de *bassins de rétention**, pour piéger le phosphore, le plus souvent adsorbé sur les particules transportées. Dans certains cas, ces bassins peuvent être naturels. La création artificielle de zones humides, ou d'étangs en amont du lac peut être une solution pour retenir une partie du phosphore particulaire et dissous. Cette technique a par exemple été utilisée au cours de la restauration du lac Finjasjön en Suède (Annadotter, 1999).

- Avantages :
 - Ce type de traitement permet de retenir en générale une grande partie du phosphore (particulaire);
 - Il entraîne peu de contraintes sur le milieu lacustre, puisque le traitement des eaux chargées s'effectue avant le déversement dans le plan d'eau.
- Inconvénients :
 - Ce procédé est valable uniquement pour une pollution ponctuelle et non diffuse
 - Le traitement doit être efficace tout au long de l'année, ce qui peut poser problème durant les périodes de crues (à la fonte des neiges, ou lors d'orages importants) ou la quantité d'eau à traiter est supérieure à la capacité des bassins de rétention.
 - Il est nécessaire d'avoir de l'espace disponible pour créer des bassins de rétention dimensionnés correctement en fonction du débit du cours d'eau du tributaire.
 - Cette méthode de traitement entraîne une rétention importante de sédiments qu'il faut régulièrement enlever et traiter.

III.1.2) Déviation des eaux tributaires chargées

Comme la technique de traitement des eaux tributaires, ce moyen de lutte contre l'eutrophisation se classe entre les actions préventives et curatives. En déviant les eaux tributaires chargées en nutriments, on réduit la contamination du lac.

- Avantages :
 - L'apport en nutriments dans le lac est atténué immédiatement après la mise en place de cette action sur l'écoulement;
- Inconvénients :
 - Cette technique est une action provisoire. Il est indispensable que les eaux chargées soient acheminées vers un système ou une station de traitement des eaux;

- Si les eaux ne sont pas traitées, le problème de pollution est seulement déplacé dans le temps ou dans l'espace.
- L'impact sur les niveaux d'eau ou sur l'écoulement des eaux lacustres peut être important si le volume d'eau dévié est conséquent.

III.1.3) Augmentation de l'écoulement, effet « chasse d'eau »

Cette méthode consiste à créer un apport artificiel en eau faiblement chargée, afin d'augmenter le taux de renouvellement de l'eau. Les eaux du lac se trouvent ainsi diluées et la concentration en nutriment est alors plus faible.

- Avantages :
 - L'apport d'eau faiblement chargée permet de diminuer l'accumulation de la biomasse et les concentrations des nutriments;
 - Ce procédé de traitement augmente les échanges d'eau ce qui empêche la mise en place de conditions anoxiques dans le milieu.
- Inconvénients :
 - Cette technique peut entraîner la remise en suspension des sédiments et créer indirectement des conditions anoxiques dommageables pour la faune et la flore;
 - Il est nécessaire d'avoir une grande quantité d'eau peu chargée disponible pour diluer efficacement les eaux, cette technique est donc peu applicable pour des grands lacs.

III.1.4) Évacuation sélective des eaux hypolimniques

Cette technique consiste à évacuer les eaux hypolimniques les plus chargées et les plus riches en nutriments à l'aide de système de pompes.

- Avantages :
 - Ce procédé permet de diminuer l'accumulation de la biomasse et les concentrations des nutriments dans les couches d'eau en profondeur;
 - L'écoulement artificiel créé en eaux profondes permet de réduire les risques d'anoxie du milieu aquatique.
- Inconvénients :
 - Cette technique entraîne une diminution du volume de l'hypolimnion et un appauvrissement global du plan d'eau;
 - Ce procédé ne peut être appliqué que pour des petits lacs profonds et des réservoirs munis de vannes à différents niveaux pour permettre d'évacuer les eaux chargées;
 - Les eaux chargées évacuées doivent être dirigées vers un système de traitement. Dans le cas contraire, le problème de pollution est uniquement déplacé dans l'espace, sur le lac voisin par exemple où se déversent les eaux évacuées;
 - Cette méthode est extrêmement difficile à mettre en place étant donnée la sélectivité souhaitée sur les eaux à évacuer. Si le calibrage des pompes n'est pas correctement réalisé, on peut avoir une remise en suspension des sédiments, et recréer des conditions d'anoxie, l'effet contraire à celui souhaité.

III.2) Action sur le marnage

III.2.1) Élévation du niveau d'eau

Cette méthode peut être envisagée pendant tout, ou une partie du cycle annuel des plantes. L'élévation du niveau des eaux joue sur la quantité de lumière disponible pour les plantes.

- Avantages :
 - Cette méthode permet le contrôle de la croissance de certaines plantes aquatiques (macrophytes);
- Inconvénients :
 - La limitation des macrophytes pourrait favoriser la prolifération d'algues microphytes;
 - Les variations de niveau d'eau ont un impact important sur la stabilité des berges. L'érosion des berges est fortement accélérée en utilisant ce type de traitement.

III.2.2) Diminution du niveau d'eau et assèchement

Le but de cette technique est d'exposer les sédiments à l'atmosphère. Cela permet le contrôle des macrophytes et des algues fixées. Cette opération se déroule en trois temps, la vidange du lac, le maintien à un niveau d'assèchement pendant une période plus ou moins longue et le remplissage du lac.

- Avantages :
 - Cette technique permet la réduction des transferts de nutriment entre les sédiments et l'eau. Les sédiments se consolident par dessiccation;
 - Elle favorise la minéralisation et l'oxydation de substances indésirables (matières organiques, sulfures);
 - Elle permet l'augmentation de la profondeur du plan d'eau, après la dessiccation des vases;
 - Ce procédé élimine une partie des macrophytes indésirables.
- Inconvénients :
 - Rarement possible;
 - Détruit totalement l'écosystème lacustre;
 - Peut abaisser le niveau de la nappe phréatique et provoquer l'assèchement de puits;
 - Peut entraîner l'érosion accélérée et l'affaissement des berges.

III.2.3) Applications sur le terrain

La fluctuation du niveau d'eau des lacs est un phénomène naturel mais qui peut être amplifié pour permettre le contrôle de certaines espèces végétales spécifiques et envahissantes.

Les actions sur le marnage, si elles sont mises en place sur un lac, nécessitent une très bonne connaissance de la flore spécifique de celui-ci. En effet les espèces végétales sont plus ou moins sensibles à la dessiccation ou au contraire à la submersion. C'est pourquoi, en provoquant des fluctuations importantes du niveau du lac, on modifie

considérablement l'écosystème, en favorisant le développement d'un certain type de plante.

Les espèces végétales retrouvées après des variations de marnage ne sont pas systématiquement les mêmes. La végétation aquatique dépend en effet des conditions de fluctuation des eaux mais également d'un grand nombre d'autres facteurs comme la morphométrie du lac, la transparence de l'eau, le vieillissement du lac...(Van Geest, 2005a).

Une étude effectuée en 1999 sur une centaine de lac aux Pays-Bas a permis de montrer que les fluctuations du niveau d'eau avaient des répercussions sur la richesse et la diversité des végétaux dans l'écosystème (Van Geest, 2005b).

Les techniques de restauration de lac basées sur le marnage peuvent permettre une lutte efficace contre la prolifération de certaines plantes aquatiques. Toutefois l'impact écologique de ce type de traitement est important à long terme puisqu'il peut favoriser une certaine flore aquatique au profit d'autres espèces. On peut obtenir de bons résultats au niveau de la réduction du développement des espèces envahissantes après le traitement. Néanmoins en modifiant le milieu, d'autres espèces spécifiques aux nouvelles conditions environnementales peuvent devenir envahissantes.

IV) ACTIONS MÉCANIQUES

Les traitements mécaniques utilisés pour la restauration des lacs, axent leurs domaines d'actions sur deux problématiques liées à l'eutrophisation, l'augmentation et l'accumulation de la phase sédimentaire, d'une part, et le développement et la croissance importante des végétaux aquatiques dans les plans d'eau eutrophes, d'autre part.

IV.1) Traitements des sédiments

IV.1.1) Le décapage ou curage mécanique

Cette technique de nettoyage a pour but de redonner la profondeur initiale au milieu. Les opérations de décapage et de curage s'effectuent en général à l'aide de bulldozers et d'engins racloirs après baisse du niveau d'eau du lac ou assèchement.

- Avantages :
 - Curage et extraction d'un grand volume de sédiment;
 - Permet de redonner une certaine profondeur au lac.
- Inconvénients :
 - Une des techniques les plus contraignantes pour le milieu;
 - Baisse importante du niveau de l'eau par drainage ou pompage;
 - Dégâts importants sur le milieu entraînés par les engins de terrassement;
 - Durée importante des travaux;
 - Risque important d'endommagement de l'étanchéité du plan d'eau;
 - Nuisances importantes pour les riverains;
 - Quantité importante de « boues » à traiter;
 - Coût très élevé.

IV.1.2) Le dragage

Cette technique consiste à extraire les sédiments déposés au fond du lac.

- Avantages :
 - Réduit la quantité d'éléments nutritifs contenus dans les sédiments, favorables au développement des végétaux;
 - Empêche le comblement du lac;
 - Ralentit la dynamique d'eutrophisation du lac.
- Inconvénients :
 - Coût d'opération élevé;
 - Remise en suspension des sédiments;
 - Effets potentiels du dragage sur les organismes vivants;
 - Problèmes du traitement et de l'élimination des sédiments extraits.

Il existe plusieurs types de drague :

➤ Les dragues mécaniques

- Avantages :
 - *Facilement transportable;*
 - *Permet d'extraire les sédiments en minimisant le contenu en eau dans les boues de dragage (40 à 50% d'eau) par rapport aux autres méthodes de dragage.*
- Inconvénients :
 - *Peu efficaces pour des sédiments fin et visqueux comme les vases,*
 - *Remise en suspension importante des sédiments;*
 - *Nécessitent l'utilisation d'une série d'équipements lourds, tels des grues, des barges, des excavatrices, des bateaux-remorques, etc;*
 - *Rendement faible en raison des différentes étapes de dragage (extraction, déchargement, transport vers la rive...).*

➤ Les dragues hydrauliques

- Avantages :
 - *Bien adaptées aux milieux peu profonds;*
 - *Relativement silencieuses;*
 - *Aspirent le sédiment en limitant les remises en suspension;*
 - *Fonctionnement en continu qui permet la collecte de quantités importantes de sédiments;*
 - *Fonctionnement avec une station de traitement située à deux ou trois kilomètres.*
- Inconvénients :
 - *Le sédiment dragué ne contient que 10 à 20% de particules solides ce qui revient à stocker sur l'aire de traitement 80 à 90% d'eau;*
 - *Nécessite une aire de dépôt relativement grande;*
 - *Problème du traitement de la grande quantité d'eau contenue dans les boues de dragage qui peut s'avérer complexes et onéreux dans le cas d'une eau contaminée.*

➤ **Les dragues pneumatiques**

- Avantages :
 - Présentent des qualités spécifiques lorsque les sédiments sont très fins et de nature molle et visqueuse;
 - Permet également de récolter les gaz pour ensuite les traiter ce qui évite l'émanation d'odeurs nauséabondes.
- Inconvénients :
 - Technique relativement coûteuse.

IV.1.3) Recouvrement des sédiments

Cette technique consiste à recouvrir à l'aide d'une bâche plastique ou d'un couvert de matériaux minéraux, les sédiments lacustres. Ce procédé joue ainsi un rôle sur les échanges entre le compartiment sédimentaire et la colonne d'eau.

- Avantages :
 - Permet une stabilisation des sédiments;
 - Limite les échanges nutritifs entre les sédiments et la colonne d'eau;
 - Limite le développement de certains macrophytes;
 - Pas de pollution visuelle (intérêt touristique);
 - Les bâches s'installent facilement pour de petites surfaces et peuvent être enlevées aisément.
- Inconvénients :
 - Coût élevé;
 - Dispositif lourd à mettre en place sur de larges surfaces ou des endroits accidentés;
 - L'impact des matériaux de couverture, ou des bâches plastiques sur les organismes vivants dans le milieu peut nuire de façon importante à l'écosystème;
 - Technique inutile en cas de redéposition de sédiments sur le système de recouvrement;
 - Les bâches peuvent glisser sur des sites escarpés ou même flotter à la surface après avoir été décollées par les gaz de fermentation;
 - Elles peuvent se déchirer.

IV.1.4) Utilisation de ces techniques

Les techniques d'extraction de sédiments ont été relativement efficaces dans certains cas d'utilisation. Quelques lacs scandinaves, comme le lac Trummen en Suède ont vu la qualité de leurs eaux fortement améliorées après les opérations de dragage des sédiments (IETC, 1999).

Plusieurs études ont été menées sur l'utilisation de ce type de méthode dans la restauration des lacs. Le suivi de la qualité des eaux au cours de la restauration de 8 lacs hollandais présentant des signes d'eutrophisation prononcée a permis de montrer que la nécessité de draguer les lacs pouvait être discutée dans un grand nombre de cas.

Certaines techniques de restauration ne faisant pas appel à l'extraction de sédiment peuvent aboutir à des résultats similaires au niveau de la réduction des concentrations de phosphore (Van der Does, 1992).

Les traitements par extraction de sédiment sont des méthodes de restauration très lourdes et extrêmement coûteuses qui ne peuvent par conséquent être appliquées uniquement sur des petits lacs ou des portions de grands lacs. La décision de prendre de telles mesures doit s'appuyer sur une étude solide qui met en évidence les zones d'accumulation de sédiment.

Les objectifs des opérations de réduction des sédiments dans le lac concernant la quantité de sédiments à extraire, mais aussi la qualité des eaux et l'utilisation du plan d'eau après le traitement, doivent être clairement établis. Cette étape permet de comparer avec les autres méthodes alternatives de traitement du plan d'eau, afin de voir si le dragage ou le curage est la technique la plus appropriée tant au niveau du coût financier que de l'impact sur le milieu naturel (Hudson, 1998).

Les techniques de recouvrement de sédiments ne sont pas suffisamment répandues pour donner lieu à un retour d'expérience.

IV.2) Actions directes sur la surproduction végétale

Cette opération d'élimination des plantes est immédiate et permet la réutilisation du plan d'eau pour la baignade. Elle représente cependant un coût élevé, doit être renouvelée régulièrement et l'évacuation des végétaux peut poser un problème.

IV.2.1) Faucardage et récolte manuelle des macrophytes

Il existe plusieurs techniques manuelles pour réduire le volume de plantes aquatiques et d'algues présentes dans un lac. On retrouve ainsi l'arrachage à la main, le ramassage à l'aide de râpeaux, ou encore la coupe à l'aide de cisailles spécifiques. Toutes ces techniques ont cependant les mêmes avantages et inconvénients.

- Avantages :
 - Facile à mettre en place;
 - Équipement peu coûteux;
 - Très peu de contrainte sur l'écosystème;
 - Sélectif dans la récolte des plantes.
- Inconvénients :
 - Problème de recolonisation souvent rapide car difficile d'arracher et ramasser tous les fragments de végétaux indésirables;
 - Non applicable aux grandes surfaces;
 - Technique très lente;
 - Peu d'effet sur les végétaux possédant un système racinaire important.

IV.2.2) Coupe mécanique des macrophytes

Cette technique repose sur l'utilisation d'engins spécialisés à cet effet. La taille de ces engins est variable. On retrouve ainsi de petites embarcations munies d'équipements de fauche mais aussi des « moissonneuses » capables d'arracher une quantité très importante de végétaux.

- Avantages :
 - Action directe pour effectuer des zones d'ouverture dans le plan d'eau;
 - Permet le traitement de surfaces plus importantes que les méthodes manuelles.

- Inconvénients :
 - Problème de recolonisation souvent rapide car il est difficile d'arracher et ramasser tous les fragments de végétaux indésirables;
 - Certaines espèces de végétaux sont difficiles à couper;
 - Impact plus important sur l'écosystème que les techniques manuelles;
 - Engins pas toujours très maniables.

V) TRAITEMENTS PHYSICO-CHIMIQUES

V.1) Action sur l'oxygénation et la circulation des eaux

Les différentes techniques de réoxygénation des eaux permettent de maintenir au sein du plan d'eau une teneur minimale en oxygène dissous. Le but étant de rétablir les conditions oxydantes au niveau des sédiments, le relargage de composés indésirables est ainsi fortement réduit. Dans ces techniques de réoxygénation des eaux on différencie deux types de procédés, la déstratification et l'aération hypolimnique.

V.1.1) La déstratification

La déstratification est une technique destinée à aérer les plans d'eau de faible profondeur, par le brassage de l'ensemble des masses d'eau. Les couches froides du fond sont ainsi progressivement mélangées aux eaux de surface.

- Avantages :
 - Pas de pollution visuelle;
 - Technique dite « non polluante »;
 - Recrée de conditions favorables à la vie piscicole en eau profonde;
 - Permet en règles générales une amélioration de la transparence de l'eau, une augmentation de la teneur en oxygène dissous, une réduction des concentrations en ammoniacale, fer, manganèse et également en matières organiques;
 - Faibles coûts de maintenance.
- Inconvénients :
 - Pas applicable pour des lacs dont la stratification thermique est prononcée (lac de profondeur importante);
 - Dans certains cas nuisances olfactives importantes;
 - Dans certaines situations on peut avoir une augmentation de la charge interne du phosphore disponible, effet contraire à celui attendu;
 - Perturbe néanmoins l'équilibre de l'écosystème puisque on a une déstratification totale des masses d'eau, qui se traduit par une homogénéisation des teneurs en oxygène et des températures sur l'ensemble de la colonne d'eau. Ces conditions entraînent la disparition d'espèces spécifiques aux eaux froides et pauvres en oxygène dissous;
 - Dans certains cas, cette technique peut diminuer la transparence de l'eau avec le brassage des eaux et la remise en suspension des limons et algues microscopiques.

Pour réaliser l'aération des plans d'eau, on a recours à plusieurs méthodes. On retrouve ainsi des dispositifs permanents mais aussi des installations plus légères et donc de plus faibles coûts.

➤ ***Réseau de circulation d'air immergé***

Une des techniques d'aération permettant l'aération des plans d'eau de faibles profondeurs consiste en l'instauration d'un réseau de canalisation immergé et perforé, qui permet l'oxygénation des eaux les plus profondes, au moyen de rideaux de bulles créés par injection d'air comprimé dans les canalisations.

Cette technique relativement coûteuse nécessite des travaux importants pour la mise en place du réseau de tuyau d'injection d'air comprimé. Ce système est par conséquent difficile à mettre en place et inadéquat pour des plans d'eau de surfaces importantes.

➤ ***Fontaines d'eau***

Ce dispositif permet l'aération de l'eau de façon épisodique et à faible coût. En installant une fontaine à la surface du plan d'eau, on augmente la surface d'échange entre l'eau et l'air ainsi que la teneur en oxygène dissous.

Cette méthode ne peut cependant pas s'appliquer à des surfaces étendues et n'est efficace qu'à proximité de la fontaine. Ces fontaines d'eau sont mises en route pendant la nuit afin d'éviter au maximum une augmentation de la température.

➤ ***Mélangeurs mécaniques***

Ces systèmes ont le vent en poupe puisqu'ils sont de plus en plus autonomes en énergie grâce à une alimentation électrique solaire ou éolienne. Le principe de ces dispositifs est de mélanger l'eau du lac à l'aide d'hélices. Les mouvements de l'eau favorisent l'oxygénation du plan d'eau et permet son aération.

Toutefois, les mélangeurs entraînent la plupart du temps une augmentation de la température des eaux. De plus, un mélangeur surdimensionné provoque la remise en suspension de particules, qui peut provoquer l'effet contraire à celui souhaité, et favoriser le développement des macrophytes et algues proliférantes. L'application de ces équipements doit donc être faite avec précaution.

De nombreuses études ont été réalisées pour améliorer les performances de ces systèmes (Kirke, 1997).

➤ ***Traitement à l'air ozoné***

Une circulation d'eau est assurée au moyen d'un bateau qui se déplace sur le plan d'eau. L'eau passe par une chambre d'ozonation avant d'être rejetée. Cette technique très peu utilisée à permis de restaurer un plan d'eau en zone industrielle en Floride.

V.1.2) L'aération hypolimnique

Cette méthode est utilisée quand il existe une stratification des eaux marquée. En apportant de l'oxygène aux eaux hypolimniques d'un lac, sans perturber la thermocline,

on peut empêcher l'anoxie de l'hypolimnion et réduire les problèmes liés à cette déoxygenation.

Les objectifs de cette méthode sont multiples, elle doit permettre l'augmentation de la concentration en oxygène dissous de l'hypolimnion sans déstratifier l'ensemble de la colonne d'eau ni réchauffer l'hypolimnion. Elle doit également permettre de contrôler et limiter le relargage dans la colonne d'eau du phosphore et d'autres éléments à partir des sédiments. Pour répondre à l'ensemble de ces objectifs il est difficile de dimensionner le système d'aération et il n'est pas rare d'aboutir à la déstratification de la colonne d'eau (Lindenschmidt, 1997)

- Avantages :
 - Réoxygenation de l'hypolimnion sans déstratification de la colonne d'eau, ni augmentation de la température. Il n'y a pas de mélange des eaux profondes et froides avec les eaux superficielles plus chaudes.
 - Accroissement possible de l'habitat et de la nourriture pour les poissons d'eau froide.
 - Diminution des concentrations en phosphore et autres constituants indésirables dans l'eau tel que l'ammonium, le manganèse, le fer grâce aux réactions redox favorisées par les conditions aérobies.
- Inconvénients :
 - Un des aspects négatifs est la possibilité de libérer de l'azote gazeux, qui peut provoquer la mort des poissons.
 - Il est possible que l'aération de l'hypolimnion provoque une diffusion des nutriments vers le métalimnion entraînant l'apparition de cyanobactéries.
 - Les appareils ne sont pas toujours bien dimensionnés, entraînant parfois une destratification des eaux et un effet contraire sur la croissance algale.

Il existe plusieurs types d'aérateur hypolimnique :

➤ *Aérateur à oxygène pur*

Son coût est relativement élevé en raison de l'utilisation d'oxygène pur. De plus, il peut apparaître un problème lié aux remontées de bulles chargées en azote. Les bulles peuvent également provoquer un brassage de l'eau entre l'hypolimnion et l'épilimnion. Il est donc nécessaire que le lac soit suffisamment profond pour que les bulles soient dissoutes avant d'atteindre la surface.

➤ *Agitation mécanique*

Cette méthode consiste à capter l'eau de l'hypolimnion puis à l'aérer à la surface grâce à un bassin agitateur. Ensuite, l'eau est relarguée à sa profondeur initiale. Cette méthode est peu efficace, car les échanges gazeux entre l'air et l'eau sont limités. De plus, cette méthode produit souvent une augmentation non négligeable de la température.

➤ *Injection d'air*

Un aérateur permet la réoxygenation de l'eau grâce à un système équipé d'un compresseur qui l'alimente en air comprimé.

Ce système relativement coûteux est néanmoins efficace par son rendement d'oxygénation important (Woo-Myung, 2004).

V.1.3) Études de cas et Avis scientifiques

Les techniques d'aération des eaux sont de plus en plus utilisées pour régler les problèmes d'eutrophisation des lacs. Celles-ci ne sont cependant pas toujours les solutions les mieux adaptées pour lutter efficacement contre les effets indésirables du vieillissement prématuré des lacs.

De nombreuses études ont été réalisées afin d'évaluer l'efficacité de ces techniques de traitement curatif. Dernièrement le ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec a fait paraître un article concernant l'utilisation des méthodes d'aération pour la restauration des lacs présentant des signes d'eutrophisation prononcée.

➤ *Effet sur les macrophytes*

A l'heure actuelle, la documentation scientifique ne mentionne pas les techniques de circulation forcée de l'eau comme traitement contre la prolifération des macrophytes.

La plupart du temps, les plantes aquatiques envahissantes s'implantent dans les secteurs où les conditions sont très favorables à leur développement (zones peu profondes avec des fonds riches en matière organique et un bon ensoleillement des eaux). En règle générale l'aération de ces zones a un effet minime sur le développement des macrophytes. En effet dans ce type de milieu, les plantes aquatiques ne dépendent pas exclusivement des conditions physico-chimiques de la colonne d'eau pour assurer leurs besoins en substances nutritives mais principalement des sédiments dans lesquels elles plongent leurs racines.

➤ *Effet sur les conditions physiques*

Après un traitement du plan d'eau par circulation/aération des eaux, le plus souvent, la transparence de l'eau, mesurée par le *disque de Secchi**, a été réduite. Ce phénomène peut avoir plusieurs origines.

- Le système de circulation n'a pas été correctement dimensionné et a entraîné une remise en suspension des sédiments dans la colonne d'eau;
- La transparence peut également décroître lorsque les couches d'eaux de surface sont enrichies en éléments nutritifs par la circulation artificielle;
- Le système n'est pas assez puissant, le brassage réduit entraîne une microstratification offrant des conditions de lumière qui favorisent la productivité.

Dans le cas d'une destratification du plan d'eau, la température peut varier fortement dans la colonne d'eau. L'étude effectuée de 1995 à 2000 sur le lac Dalbang en Corée du Sud a ainsi montré que, durant l'été, la température maximum de la surface du lac pouvait passer de 28,9°C avant aération à 20,0-26,4°C après traitement, alors que la température maximum observée dans l'hypolimnion passait de 8°C à 17,0-23,7°C (Woo-Myung, 2004).

La hausse des températures dans l'hypolimnion a un effet très dommageable pour l'écosystème puisqu'elle restreint l'habitat des espèces de poissons d'eau froides en augmentant la surface des habitats des poissons d'eau plus chaudes.

➤ *Effet sur les conditions physico-chimiques*

Certains paramètres concernant la qualité des eaux des plans d'eau semblent, dans la plupart des cas étudiés, faire l'objet d'amélioration à la suite du traitement par circulation artificielle et aération de la colonne d'eau.

L'augmentation de l'oxygène dissous et la diminution des concentrations des métaux traces comme le fer et le manganèse, sont les principales améliorations constatées de la qualité des eaux. Dans certains cas, des changements favorables impliquant l'azote ammoniacal et le pH de l'épilimnion ont également été observés.

En ce qui concerne le phosphore, contrairement aux métaux traces, la diminution des concentrations dans la colonne d'eau n'est pas systématique. Dans 65% des cas, la concentration de phosphore a même augmenté ou est demeurée inchangée à la suite d'une circulation artificielle de l'eau. Cette augmentation peut cependant s'expliquer dans certains cas par des apports externes. Toutefois, le système d'aération peut parfois être responsable d'un relargage du phosphore des sédiments vers la colonne d'eau.

De nombreuses études ont ainsi montré que l'oxygénation des eaux n'était pas une solution pour réduire les teneurs en phosphore. L'étude réalisée sur les lacs Baldegg et Sempach en Suisse où la circulation artificielle s'est effectuée sur une durée de 10 ans démontre l'inefficacité de cette méthode pour réduire les concentrations de phosphore dans le plan d'eau (Gächter, 1998).

Néanmoins, il arrive parfois que le brassage artificiel ait une action positive sur le phosphore. Selon l'étude réalisée par B.Mackay et B.Fairley, l'amélioration de la qualité des eaux des étangs-reservoir en hiver équipés d'un système d'aération est importante. Les concentrations d'oxygène dissous sont ainsi passées de 0,4 mg/L à 14,3 mg/L entre un étang non aéré et un autre équipé d'un système d'aération.

➤ *Effet sur le phytoplancton*

La circulation artificielle peut également avoir une influence sur les populations phytoplanctoniques. Cependant une diminution du phytoplancton a été constatée dans 50 % des cas examinés. Néanmoins le brassage artificiel semble avoir un impact positif sur la fréquence des blooms phytoplanctoniques.

Le nombre de cyanobactéries peut chuter fortement grâce à la déstratification, on a dès lors les algues vertes et les diatomées qui deviennent prédominantes dans la colonne d'eau. Une étude réalisée dans un lac aux USA a ainsi mis en évidence une diminution de 1700 à 500 cyanobactéries/ml en effectuant une déstratification. (Kortman, 1994).

La circulation artificielle peut favoriser la croissance des algues en réduisant la sédimentation de celles-ci. Cependant, les algues les plus avantagées par ce procédé sont les algues vertes et les diatomées qui sont moins dommageables que les cyanobactéries qui peuvent libérer des toxines (Woo-Myung, 2004).

➤ *Les critères d'utilisation*

Le critère principal à considérer lorsque l'on envisage le recours à la circulation artificielle comme moyen de lutte contre les effets de l'eutrophisation accélérée est la profondeur du plan d'eau.

Le choix dans le système d'aération et de circulation des eaux dépend des caractéristiques physiques du lac mais également des objectifs fixés dans l'amélioration de la qualité des eaux du lac. Il existe ainsi plusieurs possibilités dans le choix du système d'aération mais aussi dans le choix de l'implantation de celui-ci.

Bien que la documentation scientifique sur ce type de technique mette en évidence en générale une action bénéfique sur le milieu, il semble cependant que l'efficacité de ces procédés sur le contrôle des macrophytes soit limitée. C'est une des raisons pour laquelle le maintien de la stratification de l'eau peut souvent être préférable.

Ainsi l'utilisation de cette technique n'est pas recommandée dans un certains nombre de cas. L'aération artificielle de l'eau des lacs qui impliquent un brassage et une déstratification de la colonne ne doit pas être utilisée pour la réoxygénation des lacs eutrophes peu profond (moins de 3 mètres de profondeur moyenne) et non stratifiés. Ce procédé de traitement ne doit pas être mis en place pour contrer l'envahissement du lit des lacs par les macrophytes.

Il est déconseillé d'utiliser un procédé d'aération circulation dans certaines situations où l'on risquerait d'augmenter la concentration en phosphore.

Ainsi il ne convient pas d'utiliser ce procédé lorsque :

- Le recyclage interne du phosphore provenant de la couche anoxique du lac ne constitue pas la source principale de cet élément;
- le relargage du phosphore n'est pas contrôlé par les complexes hydroxy-ferriques (lacs aux eaux dures et lacs acides);
- le relargage du phosphore est lié à la décomposition aérobie de la matière organique ou associé à des sédiments flocculeux constitués d'une forte proportion d'eau et de matière organique.

Quelque soit le système d'aération envisagé pour la restauration d'un plan d'eau, la mise en place de celui-ci ne peut s'effectuer sans une étude au préalable et sans l'aide de professionnels pour le dimensionnement et l'installation des équipements.

Il est également important de considérer l'action attendue du système d'aération sur le milieu. Les objectifs fixés pour la restauration du plan d'eau permettront le paramétrage du fonctionnement du système d'aération (période et durée de fonctionnement) (Hudson, 1997).

V.2) Traitement utilisant des produits chimiques

V.2.1) L'inactivation du phosphore par coagulation/floculation

Certains agents chimiques introduits dans le plan d'eau sont capables de diminuer la concentration en phosphore soluble. En le précipitant ou en le piégeant par adsorption sur les sédiments, le phosphore n'est dès lors plus *biodisponible** (IETC, 1999).

La précipitation du phosphore peut être obtenue par l'épandage de produits chimiques tels que les sels d'aluminium, de fer ou de calcium. La chaux (sous forme de chaux vive ou d'hydroxyde de calcium), l'alun (sous forme de sulfate d'aluminium) et le chlorure ferrique sont des coagulants, ils se lient aux particules dissoutes et celles en suspension, y compris les algues et les cyanobactéries, formant des amas qui se déposent au fond du plan d'eau.

- Avantages :
 - Cette méthode permet de rendre non disponible une partie du phosphore;
 - Ces produits permettent non seulement le piégeage et le dépôt dans les sédiments d'une partie du phosphore mais aussi d'une partie de la flore envahissante.
- Inconvénients :
 - Risques très importants d'intoxication des organismes vivants et impacts sur l'environnement encore mal connu pour certains composés;
 - Procédé qui produit une quantité importante de boues. Celles-ci posent généralement problème si elles ne sont pas évacuées. Le stockage et le traitement de ces boues sont par conséquent des contraintes importantes pour l'utilisation de cette technique de restauration;
 - Mesure temporaire qui piège le phosphore mais ne l'élimine pas de la phase sédimentaire;
 - Mesures inefficaces si les apports nutritifs qui suivent le traitement continuent d'être importants;
 - Coûts qui peuvent être élevés selon la surface à traiter;
 - Empêche, pendant un certains temps, les activités telles que la pêche, la baignade, les sports nautiques, sur le lac.

En règle générale, l'utilisation de ces produits n'est pas une méthode efficace pour les lacs peu profonds où le vent peut provoquer la remise en suspension des composés phosphorés qui ont précipité et se sont déposés sur le fond du lac. C'est pourquoi cette technique de traitement est seulement préconisée pour des lacs relativement profonds après avoir effectué des études de modélisation pour s'assurer de l'effet bénéfique de l'emploi de ces produits sur la qualité de l'eau (IETC, 1999).

Le choix du produit utilisé doit être fait en fonction des caractéristiques du milieu et de ces effets potentiels.

➤ *Les sels d'aluminium*

Les sels d'aluminium les plus utilisés dans le domaine de la restauration des lacs sont l'alun ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) et l'aluminate de sodium ($\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$). Ces sels sont des agents flocculants très efficaces. Ils ont la propriété d'adsorber le phosphore soluble, mais aussi d'autres composés tels que la matière organique pour former des « floccs ».

Afin de déterminer la quantité de produit à introduire pour traiter le plan d'eau il est fortement recommandé de faire des tests en laboratoire pour tenir compte des caractéristiques chimiques intrinsèques de l'eau à traiter.

L'aluminate de sodium est moins sensible aux températures froides que l'alun et possède une meilleure action à pH acide. Par contre, il coûte deux fois plus cher que l'alun. Toutefois, les sels d'aluminium ne sont pas bien adaptés pour les lacs peu profonds.

Ces produits doivent être utilisés avec prudence car ils peuvent être à l'origine d'une acidification du plan d'eau et entraîner la formation de composés toxiques si le dosage et l'épandage du produit ne sont pas correctement établis. De plus la quantité de produit à introduire peut s'avérer énorme dans le cas de lac dont la superficie et le volume sont importants (Reitzel, 2003).

Dans le cas de l'étude effectuée sur le lac Süssee en Allemagne, au total plus de 7000 tonnes d'alun ont été introduites de 1977 à 1992, la longévité du traitement semble plutôt faible puisqu'il a fallu renouveler l'opération d'ajout d'alun un grand nombre de fois (Lewandowski, 2003).

➤ *Les sels de fer*

Les sels de fer tels que le chlorure ferrique (FeCl_3) et le sulfate ferreux ($\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$) sont comme les sels d'aluminium, des agents flocculants pouvant être utilisés pour inactiver le phosphore des plans d'eau.

Tout comme les sels d'aluminium, les sels de fer ont la propriété de former des floccs pouvant adsorber le phosphore soluble.

Comme l'utilisation des sels de fer en milieu lacustre a été beaucoup moins fréquente que celle des sels d'aluminium, il n'existe pas encore de consignes précises pour la détermination du dosage. Cependant, l'emploi des sels de fer occasionne moins de variation du pH et n'entraîne pas de problème de toxicité. Pour ces raisons, il semble que les sels de fer soient plus appropriés pour les lacs peu profonds.

Le problème essentiel quand à l'utilisation de ce type de produit est que l'on peut observer une resolubilisation des précipités fer-phosphore si les conditions d'oxygénation du milieu sont mauvaises.

➤ *Les sels de calcium*

Les sels de calcium tels que la chaux (CaCO_3 et $\text{Ca}(\text{OH})_2$) constituent une troisième catégorie d'agents flocculants permettant le piégeage du phosphore. Ces sels sont peu coûteux, faciles à appliquer et sans effets toxiques reconnus jusqu'à présent. Néanmoins, ils conviennent uniquement dans des situations bien précises. Les traitements à la chaux entraînent dès leurs applications d'importantes précipitations de phosphore dans les sédiments ainsi qu'une augmentation de la transparence de l'eau.

Toutefois l'utilisation de sels de calcium s'avère inutile dans les lacs de pH neutre ou acide car les effets de ces sels sont de courtes durées. Tous les précipités retournent sous forme dissoute à court terme.

Des études ont montrées que les traitements lourds faisant appel à de fortes concentrations de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (de l'ordre de 200 à 300 mg/L) permettaient l'élimination des macrophytes. L'introduction de produit à des concentrations plus faibles (20 à 110 mg/L) n'élimine pas la totalité des macrophytes mais les réduit fortement. (Chambers, 2001).

D'autres études ont permis d'évaluer l'efficacité des traitements utilisant les sels de calcium pour contrôler l'abondance du phytoplancton et des macrophytes dans les lacs fortement eutrophisés. Par exemple, des ajouts répétés de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et/ou de CaCO_3 supérieurs à 38 mg/L dans un lac peu profond au nord de l'Alberta (Figure Eight Lake) a entraîné la réduction de la biomasse macrophyte, principalement dans les zones de profondeur supérieur à 2 mètres d'eau. Cette réduction de la biomasse végétale s'est accompagnée d'une amélioration de la clarté de l'eau ainsi qu'une diminution de la concentration en phosphore dans la colonne d'eau (Prepas, 1990, 2001).

Les effets bénéfiques attendus ne sont malheureusement pas toujours présents. L'ajout unique de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans deux lacs du nord de l'Alberta, (le lac Lofty et le lac North Halfmoon) à des concentrations respectives de 74 et 107 mg/L, a pu réduire la

biomasse macrophyte de plus de 80%. Cependant, malgré l'effet positif sur les macrophytes, la clarté de l'eau s'est dégradée et la concentration de phosphore dans la colonne d'eau n'a pas été réduite à long terme (Reedyk, 2001).

➤ *Autres agents inactivant*

Il existe des traitements qui utilisent une combinaison de plusieurs produits, on retrouve par exemple dans le commerce des produits composés à la fois de fer, d'azote mais aussi de calcium (Wauer, 2005a). Le pouvoir de coagulation s'en trouve ainsi renforcé. Certains de ces produits testés par des équipes scientifiques semblent efficaces pour immobiliser le phosphore en le stabilisant dans la phase sédimentaire (Wauer, 2005b).

Il existe d'autres agents flocculants comme certains polymères, de type bioflocculants, qui sont des produits de synthèse. Ceux-ci sont plutôt utilisés pour le traitement des eaux destinées à la consommation.

Bien qu'ils soient plus efficaces que les coagulants conventionnels dans un plus large éventail de pH et de température, ils demeurent encore trop coûteux et imprévisibles quant à leurs effets sur le milieu et l'écosystème.

V.2.2) Épandage d'argile à la surface de l'eau

L'argile a une action comparable aux coagulants et à l'avantage d'être un produit naturel. L'action de l'argile, pulvérisée à la surface de l'Eau est de se fixer sur les algues qui ainsi lestées, tombent au fond des eaux. Dans leur chute, les particules d'algue-argile se heurtent et recueillent plus d'algues, formant ainsi des masses de débris pelucheux appelées neige marine.

Aux États-Unis, le traitement à l'argile n'est pas encore autorisé comme stratégie de traitement pour les algues à fleur d'eau parce qu'il y a encore des doutes au sujet des conséquences écologiques de ce procédé. De nombreuses recherches sont effectuées pour découvrir comment ces débris affectent les organismes des fonds des eaux.

V.2.3) Usage de sous produits industriels

L'usage de sous produits industriels tels que les scories d'aciéries a été récemment proposé. Les scories possèdent la capacité d'adsorber des éléments comme le phosphore dissous (orthophosphates) d'où leur intérêt. Cependant, si l'usage de ces sous-produits peut être envisagé pour un traitement fixe en milieu contrôlé, l'introduction de quantités importantes dans un milieu naturel est à risque. L'apport de micropolluants métalliques, de même que des risques de modification des équilibres physico-chimiques sont à craindre.

V.2.4) Herbicides aquatiques

Les herbicides sont de différents types, on retrouve des composés minéraux, mais dans l'ensemble, les herbicides sont des molécules de synthèse.

➤ *Composés minéraux*

Parmi les herbicides minéraux on retrouve principalement le sulfate de cuivre, qui a longtemps été utilisé contre la prolifération des algues et qui peut également s'avérer utile dans la lutte contre les cyanobactéries.

Avantages :

- En quantités infimes, le cuivre est un oligoélément essentiel à l'alimentation des plantes et des animaux mais à forte concentration (entre 0,06 et 0,25 mg Cu/L) le cuivre est toxique pour la plupart des types de cyanobactéries;
- Produit facilement utilisable.

▪ Inconvénients :

- Peut entraîner la mortalité massive de poissons et d'autres organismes de l'écosystème;
- Une mauvaise utilisation du produit peut entraîner une augmentation dans l'environnement des concentrations de métaux lourds qu'on trouve couramment dans le sulfate de cuivre granulé;
- Lors d'un mauvais dosage l'utilisation de ce produit peut avoir l'effet inverse à celui souhaité. Si ce traitement nuit à trop d'organismes utiles tel que le zooplancton, les algues vertes reprennent leur croissance et atteignent vite un niveau de population très élevé, bénéficiant de l'absence des organismes prédateurs qui limitent leur croissance;
- Les cyanobactéries détruites par un traitement à base de cuivre risquent de libérer de fortes concentrations de toxines, contaminant l'eau du plan d'eau et la rendant impropre à la consommation humaine et animale pendant un certain temps;
- Les algues et les cyanobactéries peuvent développer une résistance au cuivre;
- Au cours du traitement, le cuivre peut précipiter, se déposer et s'accumuler dans les sédiments. Avec le temps, certaines formes ionisées du cuivre peuvent réintégrer la colonne d'eau et donc être favorable au développement des végétaux.

➤ *Herbicide de synthèse*

En ce qui concerne les composés de synthèse, il en existe un grand nombre comme le Glyphosate, le Fluridone, le Diquat, le 2,4-D ou encore le Triclopyr...

▪ Avantages :

- Agit directement sur les végétaux indésirables;
- Facile d'utilisation

▪ Inconvénients :

- Risques très importants d'intoxication des organismes vivants;
- Impact considérable sur l'écosystème;
- Limitation des activités liées à l'utilisation du lac;
- Peu de recul par rapport à l'utilisation de certains produits, on ne connaît donc pas leur impact à long terme sur le milieu naturel.

V.3) Traitements physiques

V.3.1) Irradiation ultrasonique des algues

La technique par irradiation ultrasonique a récemment été considérée comme une bonne alternative pour le contrôle rapide des fleurs d'eau.

- Avantages :
 - Ne présente a priori pas de danger pour les êtres humains, les animaux et les plantes aquatiques ;
 - Agit de façon très rapide car provoque l'implosion de la vacuole cellulaire de l'algue et ainsi inflige des dommages immédiats sur l'activité photosynthétique ;
 - L'irradiation ultrasonique des algues n'engendre pas de dégagement des toxines des algues dans l'eau.
- Inconvénients :
 - Technique récente qui manque de recul, absence d'impact sur la faune et la flore encore non prouvé scientifiquement;
 - Technique qui entraîne la libération dans le milieu d'une quantité importante de matière organique partiellement dégradée;
 - Difficulté d'estimer la puissance et la fréquence nécessaire.

V.3.2) Action sur l'énergie lumineuse reçue par les eaux

➤ *Les bâches de recouvrement des eaux*

Le but de cette technique est d'empêcher le développement des algues en les privant de la lumière du soleil nécessaire à leur croissance. On place donc à la surface de l'eau une couverture opaque qui peut être de nature diverse.

- Avantages :
 - Facile à mettre en place et à retirer
- Inconvénients :
 - Inefficace en ce qui concerne la lutte contre certaines algues;
 - Empêchent l'utilisation d'une partie du lac et créent une «pollution visuelle»;
 - Ces bâches sont à la merci du vent et peuvent se déchirer;
 - Ces bâches généralement en plastique se dégradent assez rapidement sous l'exposition du soleil, et doivent être changées tous les 5 ans en moyenne.

➤ *Les encres spéciales*

Technique qui repose sur l'utilisation de teintures ou d'encres pour stopper la croissance des plantes aquatiques nuisibles. Ces encres ont pour but de limiter la quantité de lumière qui parvient aux algues mais elles ne sont pas toxiques pour celles-ci.

- Avantages :
 - Particulièrement efficace dans le cas d'algues filamenteuses;
 - Aucun effet toxique sur la faune et la flore aquatique;
 - N'empêche pas la baignade
- Inconvénients :
 - Peu efficace pour les lacs dont la profondeur moyenne n'excède pas un mètre;
 - Cette encre ne peut pas être utilisée si le lac sert de source en eau potable.

V.4) Usage des produits Plocher®

Le système proposé par l'entreprise Plocher est à l'heure actuelle encore non expliqué scientifiquement. Depuis plus de vingt ans, cette technique, mise au point par l'allemand Roland Plocher, dérange la communauté scientifique dans le domaine du traitement de l'eau. Cette technique se base sur des énergies inconnues scientifiquement. Ce procédé permet de stimuler les cycles en aérobie des plans d'eau et empêcher l'eutrophisation (disparition des algues et nette diminution des hauteurs des vases organiques).

Des essais ont été menés dans divers lacs considérés comme "morts" pour mesurer ses effets sur divers paramètres comme le pH, le taux d'oxygène, la conductivité... Ces paramètres sont effectivement modifiés par l'usage de produits activés sous forme liquide ou de poudre et l'immersion de tubes énergétiques proposés par l'entreprise.

Un certain nombre des lacs en Suisse et en Allemagne ont bénéficié de ce traitement. D'après son inventeur, le système Plocher fonctionne à l'image de l'homéopathie et permet de doter une matière porteuse choisie d'informations spécifiques, lui conférant des propriétés actives déclenchant (par résonance) dans le milieu à traiter les processus souhaités.

Bien que difficilement compréhensible, les utilisateurs de cette technique douce constatent une amélioration de la qualité des eaux. Toutefois, aucune étude scientifique n'a été menée sur ce type de produit pouvant confirmer son efficacité. Seule une pré-étude récente, a montré une réoxygénation rapide des eaux profondes d'un étang eutrophe.

VI) ACTION BIOLOGIQUE

L'introduction d'espèces vivantes nouvelles dans un lac peut permettre d'éliminer certaines algues présentes en trop grand nombre

VI.1) Introduction de carpes consommatrice d'algues

Certains poissons peuvent permettre de contrôler les macrophytes, c'est le cas par exemple de la carpe chinoise herbivore appelée aussi sous le nom « amour blanc ». Originaires d'Asie cette espèce exclusivement carnivore dans les premières semaines, devient exclusivement herbivore dès que le poisson a atteint la longueur de 25-30 mm. Malgré cela, on peut considérer que cette carpe, majoritairement herbivore, n'entre pas en compétition alimentaire avec les autres espèces.

L'introduction d'une espèce de ce type peut s'avérer intéressante, il est toutefois important de signaler qu'une partie de la masse végétale ingérée réintègrera les eaux sous forme de fèces, donc de matière organique transformée, ce qui aura pour conséquence une fertilisation du milieu.

De plus il est difficile d'avoir une action sélective sur les plantes envahissantes avec cette méthode car les carpes ne consomment pas forcément en priorité les végétaux qui posent problèmes.

VI.2) Ajout de bactéries

Il est souvent essentiel de coupler cette mesure avec l'installation d'un aérateur avant de procéder à l'application de bactéries. Les bactéries requièrent un milieu oxygéné pour survivre, croître et se reproduire en se nourrissant de matière organique et d'algues présentes dans le lac. Avant d'introduire des bactéries dans le plan d'eau il est indispensable de faire des analyses de l'eau et des vases à traiter pour s'assurer de l'efficacité du traitement.

- Avantages :
 - Aucune intervention mécanique;
 - Peu de nuisance pour les riverains;
 - Aucune évacuation et stockage des boues ou sédiments;
 - Faibles coûts.
- Inconvénients :
 - Peu entraînant une hausse de température des eaux;
 - Ajout d'espèces étrangères qui peuvent nuire aux espèces autochtones.

VI.3) La biomanipulation

VI.3.1) Description

Une technique pour lutter contre la prolifération algale consiste à influencer la structure de la communauté planctonique, c'est la biomanipulation. En favorisant la dominance de certaines populations zooplanctoniques tels que les daphnies par exemple, on peut observer une diminution des cyanobactéries filamenteuses et coloniales.

On peut promouvoir la dominance des espèces de zooplancton intéressantes de plusieurs façons, soit par leur introduction directe, l'introduction de poissons piscivores, l'ajout d'abris pour le zooplancton, l'introduction de plantes aquatiques submergées ou enfin le retrait de poissons *benthivores** ou planctonivores. Cette dernière technique citée semble être la plus intéressante. En effet, les populations de poissons sont plus faciles à contrôler que les nutriments, le phytoplancton ou encore le zooplancton (Lammens, 1999).

La biomanipulation, en réduisant la densité des poissons de la famille des cyprinidés, peut avoir un effet sur le phytoplancton de trois manières différentes. Cette opération permet de réduire la fraction de nutriments disponibles, de favoriser le développement des herbivores zooplanctonique (*Daphnia* sp.) et de réduire la turbidité de l'eau (Shapiro, 1975 ; Perrow, 1997 ; Hansson, 1998 ; Drenner, 1999; Meijer, 1999).

Le remodelage des populations planctoniques permet le contrôle efficace des cyanobactéries. Cette technique n'a cependant pas d'influence sur les végétaux supérieurs.

VI.3.2) Étude de cas

Les effets de la biomanipulation ont été testés sur plusieurs lacs. Une étude portant sur dix lacs finlandais a permis de montrer l'évolution de la qualité de l'eau, des populations de poissons et des communautés phytoplanctoniques, après la mise en place de ce type de traitement.

L'eutrophisation en Finlande est en effet un réel problème. A l'image du Québec, plus de 2000 lacs finlandais sont concernés (Tammi, 1999). Dans ces lacs la densité de cyprinidé est habituellement élevée, l'eau est turbide et la biomasse des herbivores zooplanctoniques plutôt faible.

Les résultats de cette étude ont permis de mettre en évidence que dans certain cas la biomanipulation entraînait une réduction des concentrations de phosphore. Cette observation a été faite principalement dans les lacs peu profonds où la teneur en phosphore dépend essentiellement des interactions eau-sédiments (Søndergaard, 2003).

La biomanipulation peut également être la cause de modifications dans le cycle des nutriments. Ces modifications, due à l'augmentation de la sédimentation, une compétition plus importante pour la consommation de ces nutriments et une réduction de leur resuspension, peuvent entraîner un développement important des macrophytes (Meijer, 1999).

Dans la plupart des lacs étudiés, la réponse de la biomasse zooplanctonique face au traitement est également positive, dans le sens où la prédation est moins importante. L'augmentation des consommateurs secondaires du zooplancton entraîne dès lors une réduction de la biomasse phytoplanctonique. Les blooms de cyanobactéries ont donc été fortement réduits (Olin, 2006).

Le lac Finjasjön du Sud de la Suède, est un également un bon exemple pour montrer l'efficacité de cette méthode biologique. Ce lac eutrophe, d'une surface de 1100 ha, atteignant des profondeurs de 13 mètres et de 3 mètres de profondeur moyenne, doit faire face durant l'été à des boom de cyanobactéries depuis de nombreuses années.

Après avoir fait appel à différents procédés de restauration qui se sont avérés inefficaces, les gestionnaires du lac ont décidé de recourir à la biomanipulation.

Basée sur le contrôle des populations de poissons, cette méthode de traitement a dans un premier temps favorisé le développement du zooplancton par le biais du contrôle et de la réduction de ces prédateurs (les poissons planctonivores).

En réduisant les populations de poissons planctonivores, le ratio entre les populations de poissons planctonivores et piscivores a ainsi pu être rééquilibré.

A la suite de cette restructuration des populations de poissons, des effets importants sur les communautés zooplanctoniques ont été observés. Les communautés de phytoplancton, en grande partie contrôlées par le zooplancton ont également subies d'importantes transformations. Les blooms récurrents et toxiques de cyanobactéries ont ainsi été fortement réduits.

Pour accompagner les mesures prises pour lutter contre les blooms phytoplanctoniques toxiques un étang de 30 hectares a également été construit pour piéger le phosphore des eaux tributaires avant leur arrivée dans le lac.

L'ensemble des mesures prises sur ce lac a considérablement amélioré la qualité des eaux. La transparence de l'eau mesurée à l'aide du disque de Secchi est passée de 0,9 mètre en 1994 à 1,5 mètre en 1995. La restauration de ce lac qui présentait des signes d'eutrophisation prononcés semble être une réussite par rapport au suivi des populations d'oiseaux qui le colonisent à nouveau (Annadotter, 1999).

Pour toutes les méthodes biologiques présentées, les précautions à prendre sont importantes puisque l'introduction de nouvelles espèces dans un milieu ou la restructuration des populations autochtones peut avoir des conséquences sur l'écosystème.

VI.4) Les îles flottantes

Récemment sont apparues les îles flottantes, massif végétal artificiel qui flotte à la surface de l'eau. Ces îles sont construites à base d'une matrice de polymère plastique recouverte de terre végétale dans laquelle des plantes aquatiques ou semi-aquatiques sont plantées. Les racines de ces plantes constituent alors un rideau permettant la filtration de l'eau et des éléments dissous.

Par contre pour obtenir un bon rendement il est préconisé d'installer en même temps un système d'aération favorisant le mouvement de l'eau à travers les racines.

Les premières utilisations ont été notées récemment sur de petits lacs privés au Canada et aux États-Unis, mais aucune étude scientifique n'a encore été effectuée pour tester l'efficacité de la technique.

VII) SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

VII.1) Tableaux de synthèses

Les techniques de restauration de lac, présentées précédemment dans ce rapport, sont celles utilisées principalement pour lutter de manière curative contre l'eutrophisation prononcée des plans d'eau. La mise en place de ces actions de traitement n'est pas anodin et entraîne un impact sur le milieu naturel et l'écosystème.

Les tableaux A et B qui suivent reprennent de manière synthétique l'ensemble des informations énoncées dans ce rapport concernant l'impact des différentes méthodes sur le milieu naturel ainsi que sur les utilisateurs du lac.

Il convient de signaler que ces tableaux de synthèses se basent sur des études scientifiques effectuées sur différents lacs, et s'appuient sur les observations constatées après la mise en place d'une technique de traitement. Néanmoins chaque lac, suivant ces caractéristiques, réagit de façon différente aux traitements qu'on lui applique. C'est pourquoi l'évaluation de l'impact sur les différents paramètres du système aquatique reste une estimation. Cet impact peut en effet être accentué ou atténué suivant le type de lac.

Il est également essentiel de signaler que l'impact engendré par la mise en place d'action contre l'eutrophisation est directement en relation avec la superficie de la surface traitée. En effet plus cette surface est grande et plus les nuisances sur le milieu naturel ou pour les usages du plan d'eau sont importantes.

La légende des tableaux d'impact A et B est la suivante :











Impact du traitement sur le milieu		Type de traitement	
	: Légèrement affecté		: Actions hydrologiques
	: Légèrement affecté ou affecté		: Actions mécaniques
	: Affecté		: Actions physico-chimiques
	: Affecté ou très affecté		: Actions biologiques
	: Très, voire extrêmement affecté		
	: Pas d'informations		

TABLEAU A

Actions mises en place	Impact sur l'écosystème						Commentaires
	Lors du traitement			À long terme			
	Faune	Flore	Habitat	Faune	Flore	Habitat	
Traitement des eaux de tributaires	1	1	1	1	1	1	Préserve la qualité du milieu en agissant avant une éventuelle contamination du lac
Déviations des eaux chargées	1 à 2	1 à 2	1 à 2	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Affecte le milieu naturel en réduisant l'alimentation en eaux du lac
Augmentation de l'écoulement	2	2	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Asphyxie potentiel du milieu si l'écoulement entraîne la remise en suspension des sédiments
Évacuation sélective des eaux hypolimniques	2	1 à 2	2	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Appauvrissement du milieu à long terme et perturbations importantes des habitats d'eaux profondes
Actions sur le marnage	2 à 3	3	3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Perturbe fortement les habitats d'interface terres/eaux
Décapage/curage mécanique	3	3	3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Impact sur le milieu au court des travaux, diminution possible de l'impact sur les populations piscicoles et le milieu naturel en général grâce aux pêches électriques
Dragage	3	3	3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Augmentation de la turbidité de l'eau entraînant le plus souvent l'asphyxie du milieu
Recouvrement des sédiments	2	2 à 3	2	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Réduit l'habitat des poissons en uniformisant les fonds et les rendant non disponible
Faucardage manuel	1 à 2	3	2	1	1	1	Impact limité étant donné la ponctualité de cette action dans le temps et dans l'espace
Coupe mécaniques des macrophytes	3	3	2 à 3	2	2	2	Perturbations liées à l'utilisation des machines mais qui peut avoir un impact à plus long terme si les dégâts infligés au milieu naturel durant le traitement sont conséquents
Déstratification	1 à 2	1	2	2 à 3	2	2 à 3	Peu d'impact sur la flore lors du traitement mais perturbations de la faune et des habitats des eaux profondes importantes à long terme
Aération hypolimnique	1 à 2	1	1 à 2	2 à 3	2	2 à 3	
Inactivation du phosphore	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Impact qui varie en fonction du produit chimique utilisé
Herbicides aquatiques	2 à 3	3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Produits d'une durée d'efficacité généralement longue, qui peuvent être piégés par les sédiments et être rendus disponibles lors d'une remise en suspension des sédiments
Irradiation des algues	1 à 2	3	1 à 2	?	?	?	Agit exclusivement sur les végétaux mais peu de recul sur l'utilisation de cette technique
Action sur l'énergie lumineuse	1 à 2	3	2 à 3	2	3	2 à 3	Perturbation importante liée à la privation d'énergie lumineuse pour le milieu
Produits Plocher	1?	1?	1?	?	?	?	Pas d'études scientifiques réalisées sur l'utilisation de ces produits
Introduction de carpes	2	3	2	2 à 3	3	2 à 3	Introduction d'espèces étrangères qui peuvent perturber de façon irréversible le milieu naturel
Ajout de bactéries	2	3	2	2 à 3	3	2 à 3	
Biomanipulation	3	1	1	2	2	2	Remaniement des populations entraînant un impact sur la faune
Îles flottantes	1?	1?	1?	?	?	?	Apport de nouveaux végétaux mais peu de recul sur l'utilisation de cette technique

TABLEAU B

Actions mises en place	Nuisances pour les usagers du plan d'eau						Commentaires
	Entrave à la baignade		production d'eau potable		activités de pêche		
	Court terme	Long terme	Court terme	long terme	Court terme	long terme	
Traitement des eaux tributaires	1	1	1	1	1	1	Pas de contraintes pour les usagés
Déviations des eaux chargées	1	1	1	1	1	2	Peut entraîner une baisse du niveau du lac et une réduction des stocks de poissons
Augmentation de l'écoulement	1	1	2	2	2	2 à 3	Peut entraîner la remise en suspension des sédiments: impact sur la qualité de l'eau, les stocks de poissons
Évacuation sélective des eaux hypolimniques	1	1	2	2	2	2 à 3	Diminution des poissons de profondeur, risque de contamination des eaux par les sédiments remis en suspension
Actions sur le marnage	2	2	1 à 2	1 à 2	2	2 à 3	Impact sur l'érosion des berges, pression importantes sur les poissons avec les variations du niveau d'eau
Décapage/curage mécanique	3	1	3	1 à 2	3	1 à 2	Contraintes importantes pour les usagés lors du traitement: baisse du niveau d'eau, intervention de bulldozers
Dragage	3	1 à 2	3	1 à 2	3	1 à 2	Augmentation de la turbidité influençant la faune et la qualité de l'eau
Recouvrement des sédiments	1	1	1	1	2	3	Réduit l'habitat des poissons de profondeur et donc leur nombre
Faucardage manuel	1 à 2	1	1	1	1	1	Contrainte due au fait d'avoir à renouveler régulièrement ces opérations, car peu efficace
Coupe mécaniques des macrophytes	1 à 2	1	1	1	2	1 à 2	Peut causer des dégradations sur le milieu entraînant une diminution des stocks de poissons
Déstratification	1	1	1	1 à 2	2	2 à 3	Réduction possible de la diversité piscicoles : impact sur la pêche, baisse de la qualité de l'eau si les sédiments sont remis en suspension
Aération hypolimnique	1	1	1	1 à 2	2	2 à 3	
Inactivation du phosphore	3	2 à 3	3	2 à 3	3	2 à 3	Impact variant en fonction du type de produit introduit. Composés présentant pour la plupart des risques toxiques par bioaccumulation
Herbicides aquatiques	3	3	3	3	3	2 à 3	Introduction de produits chimiques ayant des propriétés toxiques
Irradiation des algues	2 à 3	1 à 2	2 à 3	?	2 à 3	?	Matières organiques partiellement dégradées libérées dans le milieu, perturbations potentielles de la baignade et de la faune
Action sur l'énergie lumineuse	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	2 à 3	Utilisation des bâches de recouvrement et des encres nuisibles à la baignade, et à la production d'eau potable pour les encres
Produits Plocher	1	?	1	?	1	?	Pas d'études scientifiques réalisées sur l'utilisation de ces produits
Introduction de carpes	1	1	1	2 à 3	2	3	Problèmes liés aux rejets organiques des carpes, réduction de la biodiversité par ces consommateurs de végétaux perturbant la faune.
Ajout de bactéries	2	1	2 à 3	1 à 2	2	2	Compétition entre les colonies de bactéries: répercussions sur la diversité des poissons
Bio-manipulation	1	1	1	1	3	2	Remaniement des populations de poissons: impact sur la faune et les activités de pêches.
Îles flottantes	1	?	1	?	1	?	Apport de nouveaux végétaux mais peu de recul sur l'utilisation de cette technique

Le tableau C s'intéresse quand à lui au coût des différentes techniques employables dans la lutte contre les manifestations de l'eutrophisation.

Ce tableau tient compte à la fois des frais de mise en place des divers procédés mais aussi des coûts sur le long terme liés à l'utilisation de ces méthodes de traitement (maintenance du matériel, fréquences des opérations de traitement....).

En ce qui concerne les coûts de traitement il est là aussi important de signaler que le tableau de synthèse réalisé se base sur des études réalisées sur des plans d'eau de surfaces variables. Il convient d'indiquer qu'en règle générale, plus la surface du plan d'eau est grande et plus le coût de traitement est important.

Le choix de la méthode à privilégier doit tenir compte de cette surface du lac à traiter. Si certaines méthodes semblent plus respectueuses du milieu naturel, elles ne peuvent pas toutes être appliquées à grande échelle.

La légende du tableau C est la suivante :





Coût du traitement :	
1 : Faible coût	2 à 3 : Coût moyen à élevé
1 à 2 : Coût faible à moyen	3 : Coût élevé
2 : Coût moyen	? : Pas d'information
Difficulté de mise en œuvre :	
A : Facile à appliquer	C : Très difficile à appliquer
B : Moyennement applicable	
Type de traitement :	
 : Actions hydrologiques	 : Actions physico-chimiques
 : Actions mécaniques	 : Actions biologiques

TABLEAU C

Coûts et difficultés de mise en place des différents traitements

Actions mises en place	Coût du traitement	Coût à long terme ou de maintenance	Difficulté de mise en oeuvre	Commentaires
Traitement des tributaires	2	1 à 2	B	Frais de maintenance pour entretenir les installations de traitement
Déviations des eaux chargées	2 à 3	1 à 2	B	Travaux de terrassement importants pour dévier les eaux chargées
Augmentation de l'écoulement	2 à 3	2	C	Aménagements coûteux pour alimenter en eaux "propre" le lac
Évacuation sélective des eaux hypolimniques	3	3	C	Appareillage spécifique très coûteux à installer au fond du lac, frais de fonctionnement et de maintenance en profondeur importants
Actions sur le marnage	2 à 3	2 à 3	B	Mise en place de vannes qu'il faut ensuite entretenir
Décapage/curage mécanique	3	1	C	Techniques les plus coûteuses lors du traitement car elles utilisent des engins lourds et spécifiques pour ce type de traitement
Dragage	3	1	B	
Recouvrement des sédiments	2 à 3	3	B	Peut devenir extrêmement cher suivant la surface à traiter, fréquence de renouvellement du traitement élevée si l'apport en nutriment est encore élevé
Faucardage manuel	1	1 à 2	A	Opérations qui doivent être renouvelées très régulièrement
Coupe mécaniques des macrophytes	2	1	A	Faucardeuse mécanique chère à l'achat, frais liés à la fréquence d'utilisation si rien n'est fait pour améliorer la qualité de l'eau et réduire le développement des végétaux
Déstratification	2 à 3	2 à 3	B	Coûts généralement élevés pour rendre ce type de traitement efficace sur l'ensemble du plan d'eau, coûts de fonctionnement parfois élevés
Aération hypolimnique	3	2 à 3	C	
Inactivation du phosphore	3	3 à 3	A	Coût de traitement variable d'un produit à l'autre mais frais importants pour le traitement de grande surface. Si les apports en nutriment dans le lac ne sont pas réduits la fréquence des ajouts de produit reste élevée accroissant le coût du traitement
Herbicides aquatiques	3	2 à 3	A	
Irradiation des algues	2 à 3	2 à 3	A	Appareillage spécifique, frais de maintenance et de fonctionnement pouvant être importants
Action sur l'énergie lumineuse	2	2 à 3	A	Coût de traitement parfois élevé, ajouts d'encre à renouveler régulièrement et durée de vie limitée pour les bâches de recouvrement
Produits Plocher	1 à 2	?	A	Pas suffisamment de recul pour pouvoir estimer les coûts du traitement à long terme
Introduction de carpes	2 à 3	1 à 2	A	Organismes parfois chers à l'achat, pour lesquels on s'est assuré de leur stérilité afin d'empêcher leur développement dans le milieu
Ajout de bactéries	2	1 à 2	A	
Biomanipulation	2 à 3	1 à 2	C	Opérations de pêche pour remanier les populations de poissons nécessitant du matériel spécifique, opérations qui peuvent durer dans le temps, accroissant le coût du traitement
Îles flottantes	1	?	A	Coût en fonction de la taille des îles et de l'installation ou non du système d'aération

Le tableau D donne un avis général sur les conditions d'utilisation de chacune des méthodes de traitement présentées précédemment.





Il est important de noter cependant que ce tableau est un tableau de synthèse et qu'en aucun cas il ne doit être utilisé pour prendre une décision sur le type de traitement à appliquer sans avoir effectué d'étude au préalable sur le lac.

Ce tableau donne des indications sur les possibilités de traitement à envisager sur différents types de lac. Il faut noter que chaque lac possède cependant ces propres caractéristiques qui font qu'un type de traitement peut être préconisé pour un lac et fortement déconseillé pour le lac voisin.

La plupart des techniques présentées dans ce rapport peuvent parfois apporter plus de désagréments que d'améliorations dans le milieu. C'est pourquoi elles doivent être utilisées avec précautions et faire l'objet d'une étude avant le traitement.

Il est aussi essentiel d'établir un suivi durant leur mise en place, mais également à plus long terme pour apporter des modifications en cas de désagrément ou même de risques pour les populations riveraines et le milieu naturel.

La légende du tableau D est la suivante :

Avis sur le traitement	
1	: Recommandé
1 à 2	: Recommandé à moyennement conseillé
2	: Moyennement conseillé
2 à 3	: Moyennement conseillé voire déconseillé
3	: Déconseillé voire très déconseillé
?	: Pas d'informations
Type de traitement	
	: Actions hydrologiques
	: Actions mécaniques
	: Actions physico-chimiques
	: Actions biologiques

Emploi des différentes techniques de traitement							
TABLEAU D	Type de lac						Commentaires
	Mésotrophe		Eutrophe		Hyper eutrophe		
Techniques de traitement	Peu profond	Profond	Peu profond	Profond	Peu profond	Profond	
Traitement des eaux tributaires	1	1	1	1	1	1	Technique la moins dommageable pour le milieu, à utiliser en priorité
Déviations des eaux chargées	1	1	1 à 2	1 à 2	1 à 2	1 à 2	Limite les apports en nutriments dans les milieux déjà trop riches, mais doit être couplée à un autre type de traitement. Les eaux chargées doivent être évacuées vers une station de traitement.
Augmentation de l'écoulement	3	3	2 à 3	2	2 à 3	1 à 2	Techniques à éviter dans les lacs peu profonds car peut entraîner la remise en suspension des sédiments, Intéressante pour réduire les conditions d'anoxie en profondeur
Évacuation sélective des eaux hypolimniques	3	3	3	2	3	1 à 2	
Actions sur le marnage	3	3	2 à 3	2	2 à 3	2	Entraîne le plus souvent une forte érosion des berges et un apport sédimentaire important
Décapage/curage mécanique	3	3	3	3	2	2	Techniques à mettre en place en dernier recours, si le comblement du plan d'eau est prononcé, car ces techniques sont les plus dommageables pour le milieu naturel et pour les usagés
Dragage	3	3	3	3	2	2	
Recouvrement des sédiments	3	3	2 à 3	1 à 2	2	1 à 2	Permet la stabilisation des sédiments lacustres mais doit être mis en place avec des techniques permettant de réduire l'apport sédimentaire au fond du lac
Faucardage manuel	2 à 3	2 à 3	1 à 2	1 à 2	3	3	Actions inutiles si le milieu est déjà fortement eutrophisé, les opérations de faucardage ou de coupe serraient à renouveler trop régulièrement. Méthode intéressante pour les milieux eutrophes moyennement enrichis en nutriment.
Coupe mécanique des macrophytes	3	3	1 à 2	1 à 2	2 à 3	2 à 3	
Déstratification	3	3	1 à 2	2	1 à 2	2	Permet la réoxygénation des eaux profondes pour les lacs de faibles et moyennes profondeurs
Aération hypolimnique	3	2 à 3	2 à 3	1 à 2	2	1 à 2	A appliquer pour les lacs où les conditions d'anoxies sont prononcées en eaux profondes
Inactivation du phosphore	3	3	2	1 à 2	2	1 à 2	Grande quantité de boue qui sédimente et accentue le comblement du lac si non évacuées
Herbicides aquatiques	3	3	2	1 à 2	2	2	Permet un contrôle efficace des végétaux, pas toujours conseillé pour les milieux hyper-eutrophes au vu de la quantité de biomasse à traiter, et la quantité de produit à introduire
Irradiation des algues	3	3	1 à 2	2	1 à 2	2	Technique qui semble intéressante pour le contrôle des végétaux de surface, mais difficilement applicable pour des grandes surfaces ou des lacs profonds
Action sur l'énergie lumineuse	3	3	2 à 3	1 à 2	2 à 3	3	Technique inefficace si le milieu est fortement affecté, la clarté de l'eau étant déjà très faible.
Produits Plocher	1 à 2 ?	1 à 2 ?	1 à 2 ?	1 à 2 ?	1 à 2 ?	1 à 2 ?	Technique qui semble efficace au vu des différents essais réalisés sur des lacs européens
Introduction de carpes	3	3	1 à 2	1 à 2	2	2	Technique à utiliser avec précaution dans les lacs fortement eutrophés et déjà très vulnérables, car peut accentuer le déséquilibre et l'instabilité du milieu
Ajout de bactéries	3	3	1 à 2	1 à 2	2	2	
Bio-manipulation	3	3	1 à 2	1 à 2	2	2	Technique à utiliser lorsque le milieu n'est pas instable, et que la biodiversité est encore élevée
Îles flottantes	1 à 2 ?	3	1 à 2 ?	3	1 à 2 ?	3	Très peu de recul, effet attendu sur lacs de petite taille et peu profonds

VII.2) Recommandations pour le traitement

Avant de mettre en place des actions pour la restauration d'un plan d'eau il est essentiel d'établir un diagnostic écologique de l'état du lac et de son bassin versant. Dans cet état des lieux du milieu naturel, il est préférable d'avoir recours à des équipes scientifiques ou bureaux d'études indépendants plutôt que des entreprises qui offrent à la fois des services conseils et la vente d'équipements. Il s'avère pertinent de solliciter une deuxième opinion, au besoin, avant d'investir des sommes importantes dans des équipements coûteux qui pourraient ne pas améliorer l'état du lac, et même, dans certains cas, le détériorer davantage.

Il est important de rappeler que la dégradation d'un lac a des causes diverses, et que les effets de l'eutrophisation d'un lac se manifestent par des phénomènes multiples affectant l'ensemble des composantes du milieu naturel. C'est la raison pour laquelle, la restauration d'un lac nécessite habituellement des interventions multiples sur les différentes composantes du système (sédiments, plancton, eaux...) (Carpenter, 1999).

L'utilisation d'une méthode unique dans la restauration d'un plan d'eau n'est souvent pas la solution la plus adéquate. Il est souvent intéressant de coupler les procédés de restauration afin d'agir sur l'ensemble des problèmes engendrés par le vieillissement accéléré du lac.

Certaines études ont été effectuées sur différents couplages de méthode comme par exemple celle réalisée sur le lac Fure au Danemark (Gurkan, 2006). Cette étude a permis de montrer que l'utilisation de méthodes combinées, ayant un contrôle sur plusieurs facteurs de l'eutrophisation permettaient d'obtenir des résultats très intéressants en terme de restauration du milieu naturel.

Dans le cas du lac Fure, les scientifiques se sont penchés sur les méthodes d'aération, de biomanipulation et une combinaison de ces deux techniques. Au cours leur travail, les scientifiques ont élaboré des simulations pour évaluer l'impact et les effets des différentes techniques utilisées dans la restauration du lac Fure. Ils ont ainsi pu prédire l'évolution de certains paramètres comme la diminution de la concentration du phosphore ou du phytoplancton sur plusieurs années (Gurkan, 2006).

L'évaluation du niveau trophique d'un lac est une étape très importante, de même que l'étude des caractéristiques du plan d'eau (qualité et quantité des sédiments, propriétés physico-chimiques des eaux, inventaires des populations phytoplanctoniques...). Elle permet d'établir clairement les objectifs attendus lors des opérations de restauration du lac et du choix du moyen de restauration du plan d'eau, afin de ne pas s'orienter vers un traitement inefficace.

Il est important de suivre l'évolution du plan d'eau au cours du traitement. Il faut aussi remettre en question le choix du type de moyen de lutte lorsque les objectifs de restauration n'ont pas été atteints. Certaines techniques peuvent en effet avoir été efficaces durant une période mais s'avérer inutiles au bout d'un certain temps.

La restauration du lac Finjasjön en Suède en est un parfait exemple. Le premier traitement mis en place durant les années 80 fut un traitement chimique par floculation pour réduire les concentrations de phosphore. Aux vues des quantités encore importantes

des effluents se déversant dans le lac, le niveau trophique du lac n'a pas diminué et a même fortement augmenté dans les années 80.

Un nouveau système de traitement a donc été préconisé, les sédiments semblaient être responsables des fortes concentrations de phosphore dans les eaux. Le dragage de ces sédiments a donc été entrepris afin d'avoir une action directe sur les stocks de phosphore disponible. L'extraction des sédiments a été réalisée pendant 5 ans mais les résultats sur les concentrations de phosphore n'étant pas satisfaisant, les opérations de dragage ont été stoppées. Ces opérations étaient en effet très coûteuses et ne permettaient pas une amélioration significative de la qualité des eaux du lac.

Une nouvelle stratégie de restauration a donc été mise en place, basée sur l'idée qu'il était possible de réduire la charge du phosphore interne sans extraction de sédiments ni ajout de produits chimiques. Le recours à la biomanipulation et la création d'un étang permettant le piégeage du phosphore en amont du plan d'eau a donc permis la restauration du lac (Annadotter, 1999).

La réussite d'un projet de restauration de plan d'eau dépend de nombreux facteurs. La collaboration entre les scientifiques et les gestionnaires du lac fait néanmoins partie des éléments essentiels pour lutter efficacement contre l'eutrophisation du plan d'eau. Dans le choix de la technique et des moyens financiers pouvant être mis en œuvre pour restaurer le lac, cette collaboration doit être constructive et permettre la sélection de ou des solutions de traitement les mieux adaptés aux caractéristiques du plan d'eau (Carpenter, 1999).

CONCLUSION

Les mesures pour traiter de façon curative les problèmes d'eutrophisation des lacs sont diverses et variées. Il convient néanmoins de rappeler qu'il n'existe pas de solution miracle pour restaurer rapidement un lac.

De plus chaque lac a ces propres caractéristiques (bathymétrie, superficie, bassin versant, etc.), il n'existe par conséquent pas de solution unique pour traiter les problèmes de pollution et de dégradation du milieu naturel. Les pressions anthropiques sont également très différentes d'un lac à l'autre. Toutes ces particularités font du traitement de chaque plan d'eau un cas spécifique et unique.

C'est la raison pour laquelle, quelle que soit l'action envisagée en vue de restaurer un lac, il importe d'adopter une approche globale afin d'obtenir le portrait le plus complet possible de la situation actuelle du lac avant son traitement.

Lorsque toutes les informations concernant le plan d'eau ont été réunies, il est alors plus facile de se fixer des objectifs et de prendre les décisions qui s'imposent pour les atteindre. L'état actuel du lac empêche-t-il certains usages? Quels sont les usages compromis? Quelles sont les causes probables de la détérioration de la qualité de l'eau? Quelles sont les actions réalistes qui peuvent être entreprises pour améliorer la situation à court, à moyen et à long terme?

La démarche de diagnostic à effectuer avant le traitement du plan d'eau est essentielle. C'est elle qui permettra l'application de mesures curatives efficaces après avoir tenu compte des spécificités du plan d'eau.

Cependant, malgré l'application des techniques curatives appropriées, il est indispensable que ces actions contre l'eutrophisation soient appliquées en association avec des mesures de réduction à la source pour avoir une plus grande efficacité à long terme.

GLOSSAIRE

Aérobic :

On dit qu'un micro-organisme est aérobic lorsqu'il a la possibilité de se développer dans l'air ambiant, ou dans un milieu saturé en oxygène.

Anoxique (conditions) :

Caractérisé par l'absence d'oxygène. Dans un milieu anoxique, le maintien de la respiration aérobic est impossible, par conséquent, la vie se limite à la présence d'organismes dont le métabolisme est assuré par d'autres mécanismes (fermentation, respiration anaérobic comme la sulfato-réduction, la photosynthèse bactérienne ...).

Bassin de rétention :

Bassin à ciel ouvert ou réservoir sous-terrain, le plus souvent artificiels mais qui peuvent être naturels. Ces bassins permettent de contenir provisoirement les eaux des tributaires ou les eaux pluviales. Ils retiennent une partie de la matière en suspension et donc du phosphore qui sédimente au fond des bassins.

Bassin versant :

Surface géographique qui correspond au territoire sur lequel les eaux s'écoulent toutes vers un même point appelé exutoire.

Benthivores :

Se dit des poissons se nourrissant principalement d'organismes invertébrés tels que les larves, diatomées, crustacés... etc. dans et sur le fond du lac (dans la vase, les sédiments, les algues... etc.).

Biodisponible :

Désigne l'aptitude d'un élément à être absorbé et à atteindre les membranes cellulaires des organismes vivants. Ce concept général intègre tous les phénomènes mis en jeu depuis la pénétration d'un composé dans un organisme vivant jusqu'à son métabolisme, son élimination ou son stockage.

Bloom phytoplanctonique :

Dans certaines situations où le milieu naturel est fortement enrichi en nutriment, le phytoplancton peut croître de façon explosive produisant des floraisons algales (le «bloom») très rapide et de très grande amplitude mais temporaire.

Chlorophylle-a :

Il existe plusieurs formes de chlorophylle différenciables selon leur structure chimique. La chlorophylle *a* existe chez tous les végétaux.

Dessiccation :

La dessiccation est le phénomène de perte d'eau à l'intérieur des plantes, entraîné par une restriction en eau disponible pour les végétaux dans le milieu naturel.

Disque de Secchi :

Appareil simple permettant une évaluation grossière de la transparence (turbidité) de l'eau. Cette évaluation se déduit de la mesure de la profondeur à laquelle " disparaît " un disque blanc de 30 cm de diamètre descendu à partir de la surface de l'eau. Il existe aussi des disques de couleur (plus rares).

Épilimnion :

L'épilimnion est la couche supérieure d'un lac stratifié, où l'eau est chaude et riche en oxygène et sur laquelle les conditions atmosphériques agissent.

Hypolimnion :

L'hypolimnion est la couche inférieure du lac, au-dessous du métalimnion, où l'eau est froide, pauvre en oxygène et sur laquelle les conditions atmosphériques n'agissent pas.

Macrophyte :

Plante aquatique de grande taille (par opposition au phytoplancton et aux algues de petite taille).

Piscivores :

Se dit des poissons se nourrissant principalement d'autres poissons.

Production primaire :

Correspond à l'élaboration de biomasse végétale et l'accumulation d'énergie par la photosynthèse engendrée par les organismes de la base de la chaîne alimentaire (plantes, algues).

Nutriments :

Éléments nécessaires à la croissance des plantes ; principalement le phosphore et l'azote dont les atomes sont présents dans de nombreux composés minéraux naturels, mais aussi dans de nombreux produits de synthèse tels que engrais, détergents et insecticides.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Sites généraux de description des méthodes curatives

- <http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/plants/management/index.html>

Dossier management des plantes aquatiques sur le site Internet du Washington State Department of Ecology.

- <http://perso.wanadoo.fr/gael.renaux/techniques/sommaire.htm>

Site sur les techniques curatives face à l'eutrophisation : D.RABANT et G.RENAUX (1996) Les techniques de traitement in-situ des eaux lacustres.

- <http://www.up.univ-mrs.fr/ufrsm/filieres/LicPlurid/pollution/page3.html>

Site de l'université d'Aix Marseille I: Conséquences et Moyens de lutte de l'eutrophisation.

- <http://www.u-picardie.fr/beauchamp/duce/pouilleu.htm>

La lutte contre l'eutrophisation des rivières, des lacs et des réservoirs par Eric POUILLEUTE,(1996).

- <http://www.pca.state.mn.us/publications/lakes-guidetoprotection-2.pdf>

Site sur les méthodes de traitement.

- <http://www.epa.state.il.us/water/conservation-2000/lake-notes>,

Hudson H., Kirschner B., 1997, Lake Notes : lake aeration and circulation, Illinois Environmental Protection Agency,

- <http://www.epa.state.il.us/water/conservation-2000/lake-notes>

Hudson H., 1998, Lake Notes : lake dredging, Illinois Environmental Protection Agency

Traitement des sédiments

- <http://www.epa.state.il.us/water/conservation-2000/lake-notes/lake-dredging/>

Description de la méthode de dragage des sédiments

Traitement biologique

- http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/DOCREP/005/Y4261F/y4261f04.htm

Site de la Food and Agriculture Organization of the united nations (FAO), sur la biomanipulation des poissons comme outil de gestion environnementale.

Sites sur l'aération des eaux

- <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/eutrophi/aeration/index.htm>

Position du ministère de l'Environnement, 2003, Avis concernant l'aération ou la circulation artificielle de l'eau des lacs comme mesures de restauration de la qualité de l'eau.

- http://www.agr.gc.ca/pfra/water/yaerate_f.htm

L'aération selon le gouvernement canadien, Mackay B., Fairley B., 1999, Pourquoi aéré votre étang-réservoir?, ARAP

- <http://www.epa.state.il.us/water/conservation-2000/lake-notes/aeration-circulation>

Site de l'Illinois Environmental Protection Agency, description des méthodes d'aération des lacs.

- http://www.aqua-technique.fr/wwwaquatechniquefr/les_lacs/fr/Documentations/doc.htm

Entreprise de destratification et aération hypolimnique.

- <http://www.solarbee.com/sbchallenge.shtml#9>

Aérateur solaire

- <http://www.lake2000.com/myriophylle.htm>

Technique d'aération, éolienne flottante, aérateur solaire....

- <http://www.lake2000.com/lacmaskinonge.htm>

Comparatif des niveaux d'oxygène dissous avant et après l'installation d'éoliennes flottantes

- <http://www.etang.ca/gazette-janvier05.htm>
- <http://www.etang.ca/waterloo/index.html>

Aération étude de cas le lac Waterloo

Traitement chimique

- http://www.agr.gc.ca/pfra/water/dugoutcoag_f.htm

Site d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, description de l'action des coagulants

- <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub75/19watalg.htm>

Site sur les herbicides disponible pour la lutte contre les plantes aquatiques indésirables

- http://www.agr.gc.ca/pfra/water/pmrainfo_f.htm :

Août 2003, site d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, Bulletin d'information de l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA), Utilisation du sulfate de cuivre (granulé) dans les étangs et les mares-réservoirs.

- http://www.agr.gc.ca/pfra/water/copper_f.htm

D. Corkal, 2003, site d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, Le traitement au cuivre des étangs-réservoirs.

Traitement biologique

Site d'entreprise française utilisant le traitement biologique pour restaurer les plans d'eau

- <http://www.plan-d-eau-bio.com/>
- <http://www.amb-environnement.com/>

Traitement aux ultrasons

Entreprises de vente de matériel ultrason contre la prolifération des algues :

- http://www.uvrer.com/nos-produits_details15.asp?lang=fr
- <http://www.lgsonic.com/>

Traitement basée sur la réduction de l'énergie lumineuse

- http://www.agr.gc.ca/pfra/water/dugoutcovers_f.htm

Description de la méthode de recouvrement des eaux (couverture plan d'eau)

Solution Plocher

- http://www.econature.fr/eau_traitement_bassin.htm

Site de solution biologique contre l'eutrophisation

- <http://www.plocher.de/english/main.php?pageid=19>

Site de la compagnie Plocher

- http://www.symbionature.com/fr/recherches_temoignages/liste/index.html

Entreprise québécoise de distribution des produits Plocher

Sites d'entreprises polyvalentes dans le domaine de la lutte contre l'eutrophisation

- <http://www.etang.ca/>

Entreprise compétente dans l'aération, les traitements par bactéries, les éoliennes, les îles flottantes...

- http://www.loasis-boutique.com/traitement_aquabio0.htm

entreprise de vente, tous traitement confondus, aérateur, produit de traitement chimique....

- <http://www.aquaticcontroltech.com/>

Entreprise compétente dans différents domaines, traitements mécaniques, aération, traitements chimiques, restaurations biologiques...

- <http://www.lenntech.com/fran%E7ais/Eutrophisation/autres-solutions.htm>

Entreprise compétente dans le traitement par ultrasons, limitation de nutriment...

Sites complémentaires

- <http://www.rappel.qc.ca/>

Site de RAPPEL.

- <http://fapel.org/frstade2.htm>

Site de la Fappel état des lieu sur les lac au Québec et niveau d'eutrophisation

- <http://fapel.org/frsurf.htm>

Caractéristiques des principaux lacs du Québec

Référence des publications utilisées

- Annadotter H., Cronberg G., Aagren R., Lundstedt B., Nilsson P-A., Ströbeck s., 1999, Multiple techniques for lake restoration, *Hydrobiologia*, 395/396, p 77-85.
- Carpenter S. R., Lanthrop R.C., 1999, Lake restoration: capabilities and needs, *Hydrobiologia*, vol 395/396, p 19-28.
- Chambers P.A., Prepas E.E., Ferguson M.E., Serediak M., M. Guy, Holst M., 2001, The effects of lime addition on aquatic macrophytes in hard water: in situ and microcosm experiments, *Freshwater Biology*, vol 46, p 1121-1138.
- Drenner R.W., Hambright K.D., 1999. Biomanipulation of fish as a lake restoration technique, *Archiv für Hydrobiologie*, vol 146, p 129-165.
- Gächter R., Wehrli B., 1998, Ten years of artificial mixing and oxygenation: no effect on the internal phosphorus loading of two eutrophic lakes, *Environmental science & technology*, vol 32, n°23, p 3659-3665.

- Galvez-Cloutier R., Ize S., Arsenault S., 2002, La détérioration des plans d'eau : Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation, Vecteur environnement, vol 35, n°6, p 18-37.
- Gurkan Z., Jingjie Zhang, Sven Erik Jørgensen, 2006, Development of a structurally dynamic model for forecasting the effects of restoration of Lake Fure, Denmark, Ecological Modelling, 4331,
- Hansson, L.-A., H. Annadotter, E. Bergman, S. F. Hamrin, E. Jeppesen, T. Kairesalo, E. Luokkanen, P.A. Nilsson, M. Søndergaard, 1998, Biomanipulation as an application of food chain theory: constraints, synthesis and recommendations for temperate lakes. Ecosystems, vol 1, p 558–574.
- International Environmental Technology Centre (IETC), 1999, Planning and management of lakes and reservoirs: An Integrated Approach to eutrophication, Technical publication series, Issue 11, Osaka/Shiga, chapitre 6, p 231-280.
- Kasper Reitzel, Jonas Hansen, Henning S. Jensen, Frede Ø. Andersen, Kjeld S. Hansen, 2003, Testing aluminum addition as a tool for lake restoration in shallow, eutrophic Lake Sønderby, Denmark, Hydrobiologia, 506–509, p781–787.
- Kirke B., El Gezawy A., 1997, Design and model tests for an efficient mechanical circulator/aerator for lakes and reservoirs, Water Research, vol 31, n°6, p 1283-1290.
- Kortmann, R. W., Knoecklein G-W., Bonnell C-H., 1994, Aeration of stratified lakes: theory and practice. Lake and Reservoir Management, vol 8, p 99–120.
- Lammens E. H. R. R., 1999, The central role of fish in lake restoration and management, Hydrobiologia, 395/396, p 191–198.
- Lindenschmidt K-E., Hamblin P-F., 1997, Hypolimnetic aeration in lake Tegel, Berlin, Water Research, vol 31, n°7, p 1619-1628.
- Lewandowski J., Schauser I., Hupfer M., 2003, Long term effects of phosphorus precipitations with alum in hypereutrophic Lake Susser See (Germany), Water Research , vol 37, n°13, p 3194–3204.
- Meijer, M. L., I. de Bois, M. Scheffer, R. Portielje, H. Hosper, 1999. Biomanipulation in shallow lakes in The Netherlands: an evaluation of 18 case studies. Hydrobiologia, vol 408/409, p 13–30.
- Olin M., M. Rask, J. Ruuhijä, J. Keskitalo, J. Horppila, P. Tallberg, T. Taponen, A. Lehtovaara, I. Sammalkorpi, Effects of biomanipulation on fish and plankton communities in ten eutrophic lakes of southern Finland, Hydrobiologia, vol 553, p 67–88.

- Perrow, M. R., M. L. Meijer, P. Dawidowicz, H. Coops, 1997, Biomanipulation in shallow lakes, *Hydrobiologia*, vol 342/343, p 355–365.
- Prepas E.E., Murphy T.P., Crosby J.M., Walty D.T., Lim J.T., Babin J., Chambers P.A., 1990, Reduction of phosphorus and chlorophyll a concentrations following CaCO₃ and Ca(OH)₂ additions to hypereutrophic Figure Eight Lake, Alberta, *Environment Science and Technology*, vol 24, p 1252-1258.
- Prepas E.E., Babin J., Murphy T.P., Chambers P.A., Sandland G.J., Serediak M. 2001, Long-term effects of successive Ca(OH)₂ and CaCO₃ treatments on the water quality of two eutrophic, hardwater lakes, *Freshwater Biology*, vol 46, p 1089_1103.
- Reedyk S., Prepas E.E., Chambers P.A., 2001, Effects of single Ca(OH)₂ doses on phosphorus concentration and macrophyte biomass of two boreal, eutrophic lakes over 2 years, *Freshwater Biology*, vol 46, p 1075-1087.
- Shapiro, J., V. Lamarra, M. Lynch, 1975. Biomanipulation: an ecological approach to lake restoration. In Brezonik, P. L. & J. L. Fox (eds.) *Water Quality Management through Biological Control*. University of Florida, Gainesville, p 85–96.
- Søndergaard, M., J. P. Jensen, E. Jeppesen, 2003, Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506–509, p 135–145.
- Tammi J., A. Lappalainen, J. Mannio, M. Rask, J. Vuorenmaa, 1999. Effects of eutrophication on fish and fisheries in Finnish lakes: a survey based on random sampling, *Fisheries Management and Ecology*, vol 6, p173–186
- Van der Does J., Verstraelen P., Boers P., Van Roestel J., Roijackers R., Moser G., 1992, Lake restoration with and without dredging of phosphorus- enriched upper sediment layers, *Hydrobiologia*, vol 233, p 197-210.
- Van Geest G. J., Coops H., Roijackers R. M. M., Buijse A. D., Scheffer M., 2005, Succession of aquatic vegetation driven by reduced water-level fluctuations in floodplain lakes, *Journal of Applied Ecology*, vol 42, p 251–260
- Van Geest G.J., Wolters H., Roozen F.C.J.M., Coops H., Roijackers R.M.M., Buijse A.D., Scheffer M., 2005, Water-level fluctuations affect macrophyte richness in floodplain lakes, *Hydrobiologia*, vol 539, p 239–248.
- Wauer G., Gonsiorczyk T., Kretschmer K., Casper P., Koschel R., 2005, Sediment treatment with a nitrate-storing compound to reduce phosphorus release, *Water Research*, vol 39, p 494–500.
- Wauer G., Gonsiorczyk T., Casper P., Koschel R., 2005, P-immobilisation and phosphatase activities in lake sediment following treatment with nitrate and iron, *Limnologica*, vol 35, p 102–10.

- Woo-Myung Heo, Bomchul Kim, 2004, The effect of artificial destratification on phytoplankton in a reservoir, *Hydrobiologia*, vol 524, p 229–239.