

# La détérioration des plans d'eau : Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophication

rosa galvez-cloutier<sup>1\*</sup>  
sylvaine ize<sup>2</sup>  
sylvain arsenault<sup>3</sup>



1. Professeure  
agrégée, département  
de génie civil  
université Laval  
2. Ingénieure  
fonctionnaire  
3. Biologiste

## Introduction

L'eutrophication est définie par l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économiques) comme un « enrichissement des eaux en matières nutritives qui entraîne une série de changements symptomatiques, tels que l'accroissement de la production d'algues et de macrophytes, la dégradation de la qualité de l'eau et autres changements symptomatiques considérés comme indésirables et néfastes aux divers usages de l'eau ».

À l'origine, l'eutrophication est un phénomène naturel de vieillissement des lacs. Ce processus très lent s'étale sur plusieurs années et est normalement peu perceptible à l'échelle d'une génération. Cependant, l'homme accélère l'avancée de l'eutrophication en apportant de nouvelles sources de nutriments. Ainsi, le phénomène est très avancé aujourd'hui pour les eaux continentales, et prend de plus en plus d'importance pour les eaux marines.

La principale conséquence de l'eutrophication est une dégradation de la qualité de l'eau, et donc des pertes économiques et un risque supplémentaire pour la santé. De nombreuses mesures sont aujourd'hui adoptées pour améliorer la qualité des eaux déjà atteintes et limiter l'expansion de l'eutrophication aux eaux encore saines.

Ce rapport a pour objectifs d'explicitier les causes de l'eutrophication, ses manifestations et les moyens de lutte qui sont à notre disposition. Il faut noter que seules les eaux continentales sont ici abordées.

La première partie tente d'expliquer la nature de la pollution par l'azote et le phosphore : les sources, l'évolution de ces nutriments dans l'environnement, et leur toxicité. Ensuite, l'eutrophication est abordée de manière plus précise : ses mécanismes, sa caractérisation et sa quantification, ses impacts sur l'environnement et son avancée au niveau mondial. Différents moyens de lutte, basés sur le concept de facteur limitant, sont ensuite présentés : traitements préventifs ou curatifs. Enfin, un exemple concret de restauration d'un lac est donné, celui du Lac de Nantua, en France.

## 1. Origine de la pollution par l'azote et le phosphore

Deux des nutriments essentiels à la vie aquatique sont l'azote (N) et le phosphore (P). C'est la disponibilité de ces nutriments, en combinaison avec d'autres facteurs, qui va favoriser ou limiter la croissance de la biomasse. L'azote et le phosphore sont deux éléments présents dans l'environnement sous différentes formes, abordées lors de la présentation de leurs cycles naturels. Lorsque présents en trop grande quantité, ils peuvent devenir toxiques et nuire : on parle alors d'eutrophication. Enfin, les différentes sources d'apport d'azote et de phosphore dans les lacs et réservoirs sont présentées : sources exogènes et sources endogènes.

### 1.1 Formes et transformations de N et P dans l'environnement

#### 1.1.1 L'azote

En absence d'activité humaine, l'azote dans l'environnement provient principalement des micro-organismes (cyanobactéries dans

L'eutrophication est un phénomène naturel, malheureusement amplifié par les activités humaines. L'azote et le phosphore sont les deux principaux nutriments responsables de l'eutrophication. Leur excès dans l'environnement, d'origine domestique, agricole ou industrielle, représente un risque toxicologique important pour les usagers de l'eau, tant au niveau de sa consommation que de son utilisation à des fins récréatives. Ces apports excessifs de nutriments provoquent une surcroissance algale au sein des lacs, puis une disparition de l'oxygène, qui conduit à la mort des organismes aquatiques et à la production de gaz toxiques. Le niveau trophique des lacs peut être quantifié à l'aide de divers paramètres et donne une idée de la qualité de l'eau. L'eutrophication est aujourd'hui présente sur tous les continents. La prise de conscience des différents gestionnaires de l'eau a permis le développement de moyens de lutte contre l'eutrophication : moyens préventifs ou curatifs. Le cas du Lac de Nantua est, au niveau expérimental, un exemple instructif des connaissances à obtenir et des paramètres à prendre en compte lors de la recherche d'une amélioration de la qualité de l'eau d'un lac.

# DES SOLUTIONS



# ADAPTÉES

MABAREX offre une vaste gamme de produits pour répondre à vos besoins en équipements et procédés.

## EAU POTABLE

- ◆ Tamis de prise d'eau
- ◆ Décanteurs
- ◆ Flottateurs
- ◆ Filtres
  - Gravitaires
  - Biologiques, lents
  - Sous pression
- ◆ Désinfection

## BOUES

- ◆ Déshydratation des boues
- ◆ Convoyeurs
- ◆ Digesteurs anaérobies
- ◆ Stabilisation des boues
- ◆ Séchage des boues

## EAUX USÉES

- ◆ Dégrilleurs
- ◆ Dessableurs
- ◆ Procédés physico-chimiques
- ◆ Décanteurs
- ◆ Flottateurs
- ◆ Procédés biologiques
  - Boues activées
  - RBS
  - SMBR (cultures fixées)
- ◆ Filtres à lavage continu
- ◆ Désinfection

## ***MABAREX a la solution !***

Notre équipe hautement qualifiée se fera un plaisir de vous renseigner.

# ***mabarex***

Traitement des eaux et des boues  
Water and Sludge Treatment  
Tratamiento de aguas y lodos

2021, rue Halpern  
Saint-Laurent (Québec) H4S 1S3 Canada  
Tél. : (514) 334-6721 • Fax : (514) 332-1775  
E-Mail : [mabarex@mabarex.com](mailto:mabarex@mabarex.com)  
[www.mabarex.com](http://www.mabarex.com)

l'eau et quelques bactéries du sol) qui transforment l'azote gazeux ( $N_2$ ) en ammoniacque ( $NH_3$ ). L'azote constitue en effet les quatre cinquièmes de l'air atmosphérique. Une fois fixé, il peut être transformé en azote organique par les organismes fixateurs, ou libéré sous forme d'ion ammonium ( $NH_4^+$ ). Dans des conditions aérobies, le  $NH_4^+$  peut être transformé en nitrites ( $NO_2^-$ ) et nitrates ( $NO_3^-$ ): c'est la nitrification. Les plantes peuvent ensuite assimiler l'azote sous forme  $NH_4^+$  ou  $NO_3^-$ . En broutant, les animaux absorbent l'azote organique des plantes, puis le rejettent sous forme d'excréments, rapidement transformés en  $NH_3$ . L'azote est enfin retourné à l'atmosphère grâce à d'autres micro-organismes (présents en milieu anaérobie): on parle de dénitrification ( $NO_3^-$  transformé en  $NO_2^-$  puis en  $N_2$ ).

L'azote parcourt donc une boucle entre l'atmosphère et la biosphère.

Sous la forme de nitrate, l'azote est très mobile dans les sols, et s'accumule dans les nappes phréatiques où la dénitrification ne peut avoir lieu, faute de matière organique. Il constitue alors un polluant des eaux.

### 1.1.2 Le phosphore

La majorité du phosphore est issue de l'altération des roches phosphorées. Il n'a pas de forme gazeuse, et sa forme minérale principale est le phosphate ( $PO_4^{3-}$ ). Le phosphore est absorbé par les racines à partir de la solution interstitielle des sols, et l'excédent est laissé fixé dans les sols et les sédiments. Les animaux broutent la végétation et rejettent le phosphore excédentaire sous forme de sels de phosphore, rapidement transformés en ions phosphatés. Le terme ultime de son parcours dans l'environnement est la mer, puis le « retour à la source » par soulèvement des fonds marins. C'est donc un système ouvert.

Les sédiments fins servent d'accumulateurs de phosphore dans les conditions oxydantes habituelles, mais ils peuvent toutefois relarguer des quantités importantes de phosphore minéral dans le cas où le milieu deviendrait réducteur (paragraphe 1.3.2).

### 1.1.3 Perturbation du cycle des nutriments par l'intervention de l'homme

Le cycle des éléments nutritifs ne peut fonctionner correctement que dans des conditions d'équilibre écologique (figure 1).

Lorsque les apports en nutriments se multiplient (les sources possibles sont abordées un plus loin dans cette partie), le cycle est dérégulé (figure 2): on parle alors d'eutrophisation. Les matières dissoutes et les matières en suspension vont être minéralisées avec consommation d'oxygène et production de sels nutritifs. Les algues profitent des sels nutritifs en excès et se développent à une vitesse plus élevée que celle à laquelle elles pourraient être consommées par les animaux, dispersées par les courants ou décomposées par les bactéries. Il y a donc accumulation de biomasse algale, et la décomposition de ces algues va désoxygéner le milieu. Lorsque les concentrations en oxygène sont basses, les bactéries anaérobies peuvent oxyder les molécules organiques sans consommation d'oxygène. Les produits terminaux

(hydrogène sulfuré  $H_2S$ , ammoniacque  $NH_3$  et méthane  $CH_4$ ) sont toxiques pour de nombreuses espèces animales.

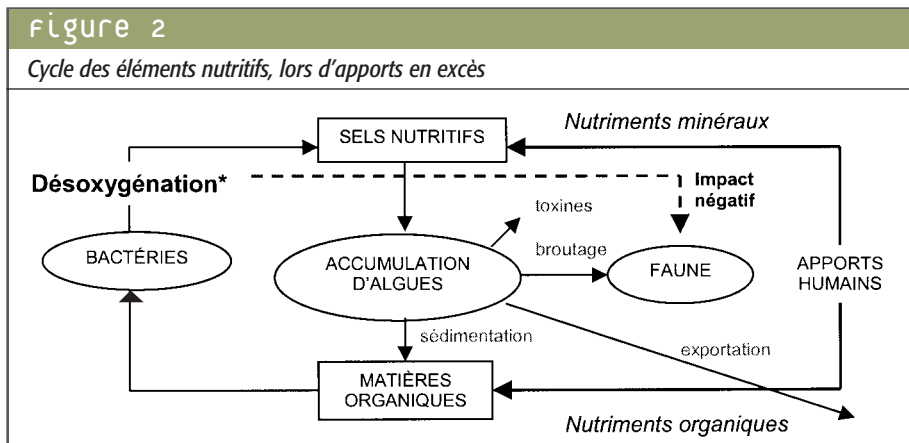
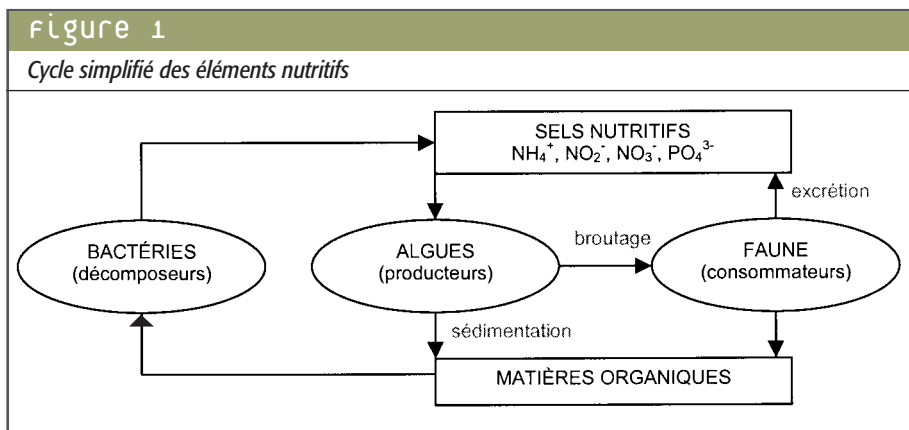
## 1.2 Risques toxicologiques liés à N et P

La toxicité liée à la surproduction des éléments nutritifs est de deux sortes: la toxicité des éléments eux-mêmes, en particulier l'azote, et les effets conséquents de l'eutrophisation.

### 1.2.1 Toxicité des différentes formes d'azote et de phosphore

Les trois formes minérales de l'azote sont l'ammonium (ou azote ammoniacal), les nitrites (ou azote nitreux) et les nitrates (ou azote nitrique). Elles présentent des niveaux de toxicité très différents.

L'azote ammoniacal (1 mg de  $NH_4^+$  correspond à 0,78 mg d'azote ammoniacal) est en équilibre avec l'ammoniacque lorsque mis dans l'eau, et l'ammoniacque est la forme la plus toxique pour les organismes aquatiques. L'équilibre entre  $NH_4^+$  et  $NH_3$  est régi par le pH et la température. Une même concentration d'azote ammoniacal



\* La désoxygénation provient de la surconsommation d'oxygène par les bactéries pour assurer la décomposition de la matière organique algale en excès ainsi que la minéralisation des matières dissoutes.

# Pollutec<sup>2002</sup>

industrie et collectivités

26 - 29  
novembre 2002  
Lyon Eurexpo - France

[www.pollutec.com](http://www.pollutec.com)

18<sup>ème</sup> Salon International  
des Equipements,  
des Technologies et des  
Services de l'Environnement  
pour l'Industrie et  
les collectivités locales

90 000 m<sup>2</sup> d'exposition\*

2 500 exposants\*

65 000 visiteurs professionnels\*

Toutes les solutions à vos problèmes d'environnement

\* Prévus Palais 2002

Informations exposants :

• Reed Expositions France - Ivoe Dapper  
Tel. : + 33 1 47 56 21 12

Fax : + 33 1 47 56 21 20

e-mail : [Ivoe\\_dapper@reedexpo.fr](mailto:Ivoe_dapper@reedexpo.fr)

Informations visiteurs :

• Promosolons Canada  
Tel. : 1 800 387 25 66

Fax : 514 861 79 26

e-mail : [canada.montreal@promosolons.com](mailto:canada.montreal@promosolons.com)

En association avec :

ADEME



Énergies 2002

Salon de la Maîtrise de l'Énergie  
et des Énergies Renouvelables

 Reed Exhibitions

peut donc avoir des effets très différents dans une rivière à eau froide et acide ou dans une rivière aux eaux plus chaudes et alcalines.

*L'azote nitreux* (1 mg d'ion nitrite correspond à 0,3 mg d'azote nitreux) est, pour les organismes aquatiques comme pour l'homme, la forme minérale la plus toxique de l'azote. Très réactif, le nitrite intervient dans de nombreux phénomènes de toxicité dont les plus connus sont la méthémoglobinémie et la production soupçonnée de nitrosamines dans l'estomac. L'ion nitrite est cependant rapidement oxydé dans le milieu naturel, et ses concentrations ne doivent pas dépasser 1 mg/L (Ministère de l'Environnement du Québec, 2001).

*L'azote nitrique* (1 mg d'ion nitrate correspond à 0,22 mg d'azote nitrique) n'est pas toxique aux concentrations auxquelles on le rencontre dans l'eau. Cependant, dans l'organisme, les nitrates peuvent se transformer en nitrites, ce qui revient aux mêmes problèmes de toxicité que pour les nitrites. La limite pour l'eau potable en nitrates est fixée à 10 mg/L (Ministère de l'Environnement du Québec, 2001).

Le phosphore est présent dans les eaux usées sous des formes très diverses, une partie importante des polyphosphates s'hydrolysant rapidement en orthophosphates. Si on excepte certains composés comme les pesticides organophosphorés, les diverses formes du phosphore apparaissent comme très peu toxiques. La limite de 0,03 mg/L, donnée encore une fois par le ministère de l'Environnement du Québec (2001) pour la protection de la vie aquatique, correspond à des considérations relatives aux effets indirects (eutrophisation).

### 1.2.2 Les risques pour la santé humaine et animale

En contribuant au phénomène d'eutrophisation, le nitrate concourt à la dégradation des milieux aquatiques. Il présente aussi une action directe. L'excès de nitrate dans les eaux peut provoquer chez l'homme et les animaux des maladies spécifiques.

*La méthémoglobinémie* est une affection qui se manifeste par un manque

d'oxygénation des tissus, se traduisant par des difficultés respiratoires et des vertiges. L'hémoglobine est transformée, par les fortes doses de nitrates, en méthémoglobine, impropre à fixer l'oxygène de l'air et à le céder aux tissus. Cette maladie atteint essentiellement les nourrissons et peut être mortelle. Aucune relation précise n'est établie entre les doses de nitrates et le taux de méthémoglobine dans le sang, mais on estime que la maladie peut apparaître quand les concentrations de nitrates dans l'eau de consommation dépassent 50 mg/L.

Pour les risques de cancer, aucune relation n'est établie avec les nitrates.

Chez les animaux, les ruminants sont les plus sensibles, car ils peuvent consommer des végétaux extrêmement riches en nitrates. L'intoxication aiguë se manifeste par des difficultés respiratoires, une faiblesse généralisée et une coloration brune du sang. À ce stade chronique, la maladie engendre des retards de croissance, des avortements, la stérilité, etc.

## 1.3 Les sources des apports de nutriments aux lacs et réservoirs

La diversité des sources de nutriments est grande. Elles sont classées selon différentes caractéristiques : ponctuelles ou diffuses, exogènes ou endogènes.

### 1.3.1 Sources exogènes

Une source exogène correspond à un flux de nutriments issus de l'extérieur du plan d'eau considéré. Les effluents ponctuels, d'origine municipale ou industrielle, ainsi que les apports diffus du ruissellement et de l'atmosphère en font partie.

#### Sources ponctuelles

Les stations d'épuration déversant leurs effluents représentent la principale source d'origine municipale ou industrielle. Cet apport dépend du débit de la station, du traitement qui y est réalisé et de la composition initiale des eaux usées. L'utilisation de détergents phosphatés peut par exemple provoquer une augmentation de l'apport de phosphore au milieu. Il faut aussi mentionner le problème de gestion des eaux d'orages. Les surcharges hydrauliques intervenant lors des orages peuvent provoquer le débordement du

réseau ou l'atteinte des capacités maximales des stations d'épuration, qui rejettent alors directement leurs eaux dans l'environnement, sans traitement.

Les installations sanitaires individuelles (installations septiques), les réservoirs de lisier ou les accumulations de fumier sont d'autres sources de nutriments concentrées, qui peuvent avoir un impact important en particulier si ces installations sont réalisées sur des sols à faible capacité de rétention ou à faible pouvoir épuratoire.

#### Sources diffuses

Les apports atmosphériques se déposent directement à la surface des lacs ou des réservoirs, via les précipitations, les retombées sèches ou les turbulences à l'interface eau-air. Ces éléments nutritifs ont des origines diverses, comme les fumées des industries environnantes.

Le ruissellement à partir des zones agricoles entraîne un apport important de composés phosphorés et azotés.

Au Québec, l'impact de la coupe à blanc et des feux de forêt sur la qualité des eaux des lacs est important. Une étude récente (Carignan et al, 2000) a démontré que l'apport, à partir de zones coupées ou brûlées, est deux à trois fois plus important pour le phosphore total et deux fois plus important pour l'azote organique total qu'à partir d'une forêt naturelle. L'apport en  $\text{NO}_3^-$  était aussi 60 fois plus élevé pour les forêts brûlées et 6 fois pour les forêts coupées. Dans la majorité de cas, l'importance de l'impact était directement proportionnelle au rapport entre la superficie déboisée et la superficie ou le volume du lac récepteur.

Les activités liées à l'élevage constituent aussi une source de nutriments, ainsi que l'épandage d'engrais d'origine animale, humaine ou minérale. La mauvaise utilisation de ces engrais peut entraîner le ruissellement de la plus grande partie : quantités trop importantes, sols mal préparés, périodes mal choisies sont autant de paramètres à optimiser pour limiter les pertes inutiles.

Une fertilisation intensive et non contrôlée peut être néfaste sur l'environnement : l'azote en apports trop abondants voit son

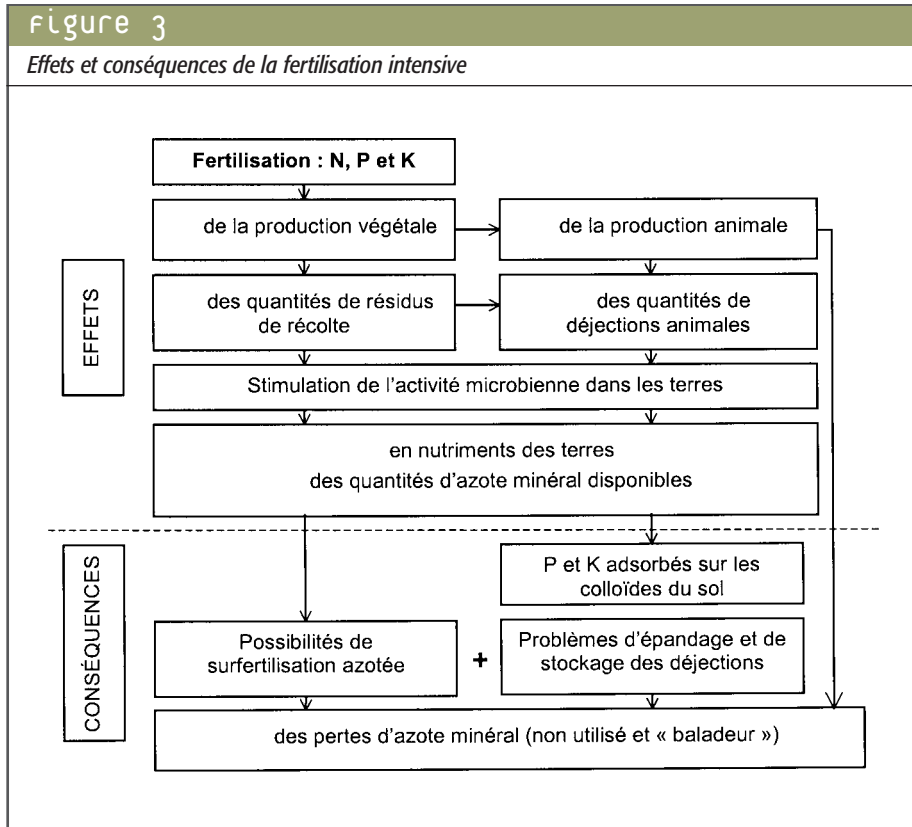
cycle biogéochimique modifié et les excès de nitrates migrent en profondeur. C'est ce qui est schématisé à la figure 3.

### 1.3.2 Sources endogènes

Les sources endogènes représentent deux types d'apports aux lacs : via les infiltrations d'eaux souterraines ou via le relargage à partir des sédiments.

Une partie de l'écoulement des rivières se fait par infiltrations souterraines. Ces eaux souterraines peuvent alors resurgir directement dans le lac. Si les concentrations en phosphore sont en général assez faibles dans les eaux souterraines, les concentrations en azote (nitrates) peuvent être élevées, en particulier dans les zones agricoles.

Lorsque les nutriments ont atteint un lac, ils sont recyclés entre les sédiments, les plantes aquatiques et la colonne d'eau. À terme, les nutriments devraient être stockés dans les sédiments. Cependant, un changement de conditions dans le lac peut entraîner le relargage des nutriments.



Source : Association pour la promotion industrie agriculture, 1991

# Une Synergie nouvelle dans le domaine du confinement

## Solmers Internationale acquiert Serrener Consultation

Afin d'élargir davantage sa gamme de services conseils reliés aux ouvrages de confinement et à la gestion de déchets, Solmers acquiert la société de Sherbrooke.

Solmers devient ainsi l'entreprise ayant été impliquée dans le plus de projets de lieux d'enfouissement sanitaire (L.E.S.) au Québec depuis les quinze dernières années.

L'équipe Solmers est dorénavant en mesure d'offrir à ses clients actuels et futurs, un savoir-faire et une expertise inégalés dans le domaine.

**Solmers**  
Internationale  
EXPERTS-CONSEILS

Varennes : (450) 929-0303 – Sherbrooke : (819) 822-1441  
Site Internet : [www.solmers.ca](http://www.solmers.ca)

Le relargage du phosphore vers la colonne d'eau est un processus complexe (figure 4). Plusieurs mécanismes, physiques, chimiques et biologiques, interviennent. Plusieurs facteurs sont considérés comme responsables des taux de relargage du phosphore : le potentiel d'oxydoréduction, la concentration en nitrates, la minéralisation, la libération de gaz, la bioturbation, les effets du phytoplancton et des macrophytes, les caractéristiques des sédiments, un pH élevé et le brassage éolien.

### 1.3.3 Quantification et biodisponibilité

Les différents apports présentés précédemment ont été quantifiés au Canada. Les valeurs sont données au tableau 1.

A ces quantités, il est nécessaire d'ajouter la notion de biodisponibilité. La biodisponibilité des nutriments peut permettre de mieux comprendre le phénomène d'eutrophisation et de mieux gérer le problème. En effet, un nutriment présent en faible quantité mais très biodisponible pourrait avoir plus d'impact qu'un élément présent en grande quantité mais peu biodisponible.

Pour le phosphore, le phosphore particulaire n'est qu'en partie biodisponible, et le phosphore soluble est très biodisponible. Ainsi, le phosphore issu des stations d'épuration est facilement biodisponible (75 à 90 %), alors que pour les autres sources, il l'est moins (P provenant de l'érosion : 30 à 40 %, et P des retombées atmosphériques : 25 à 50 %) (Ryding et Wast, 1994).

Tableau 1			
Les différents apports de pollution (milliers de tonnes par an)			
Sources		Azote	Phosphore
Municipale	Usine de traitement des eaux usées	80,3	5,6
	Égouts (trop-pleins)	11,8	2,3
	Installations septiques	15,4	1,9
Industrie		11,	8 2
Agriculture	Apports	2784	442
	Prélèvements	2491	386
	Bilan	293	56
Aquaculture		2,3	0,5
Dépôts atmosphériques		182	s.o.

Notes : Les apports agricoles comprennent les engrais commerciaux, le fumier, les dépôts atmosphériques, les biosolides et l'azote fixé par les légumineuses. Les prélèvements comprennent les récoltes et l'adsorption d'éléments nutritifs par les plantes prairiales.

s. o.= sans objet

Source : G.R.Ironside et W.Bond, 2001.

Cette notion prend de plus en plus d'importance dans la gestion de l'eutrophisation.

## 2. Mécanismes et conséquences de l'eutrophisation

Pour pouvoir trouver des moyens de lutte efficaces contre le phénomène d'eutrophisation, il est nécessaire de bien comprendre son développement. C'est pourquoi les mécanismes, la description et la quantification, ainsi que les facteurs influençant l'eutrophisation sont ici abordés. Dans le dernier paragraphe, un bilan de l'ampleur mondiale de l'eutrophisation est donné.

### 2.1 Mécanisme et degré d'eutrophisation

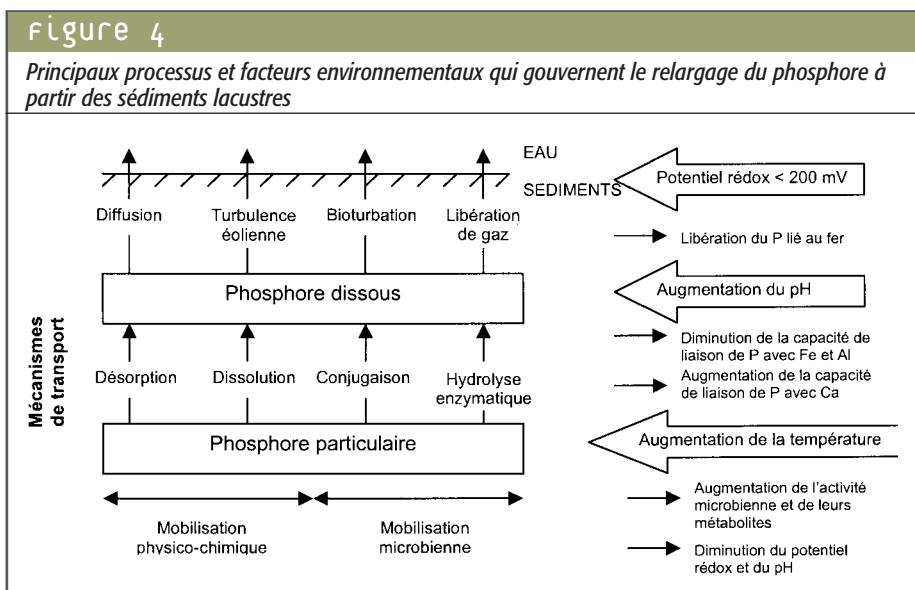
#### 2.1.1 Mécanisme de l'eutrophisation

Le phénomène d'eutrophisation, tel que décrit dans la première partie, est un enrichissement excessif des eaux en nutriments, essentiellement phosphore et azote, qui va favoriser la croissance des végétaux, à la fois des algues et des macrophytes. Le terme macrophyte désigne des algues de grande taille, par opposition aux algues de taille microscopique comme le phytoplancton. Cette surcroissance végétale peut se manifester par des quantités trop grandes de phytoplancton (eaux colorées), ou la présence d'algues flottantes à la surface de l'eau et de macrophytes sur le rivage et sur le fond.

La respiration nocturne du phytoplancton ou la dégradation de la matière végétale par les micro-organismes consomment toutes deux l'oxygène de l'eau. Assez rapidement, la raréfaction de l'oxygène dissous dans les eaux a plusieurs conséquences néfastes : mortalité des poissons, libération de gaz corrosifs et d'autres substances indésirables, et modification des valeurs de pH.

#### 2.1.2 Le degré de trophie

Les plans d'eau peuvent être classés en fonction de l'intensité de l'eutrophisation, ou de leur degré de trophie. On distingue les plans d'eau « oligotrophes » (peu nourris) et « eutrophes » (bien nourris). Le



Source : S.O.Ryding et W.Rast, 1994.

TABLEAU 2

Caractères trophiques des plans d'eau					
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 épilimnion*	Normale	Normale	Variable	sursaturation	de la sur-saturation à une anoxie complète
Oxygénation hypolimnion*	Normale	Normale		Sous-saturation	

Source : J.C.Lacaze, 1996.

\* L'épilimnion est la couche supérieure d'un lac stratifié, située au-dessus du métalimnion, où l'eau est chaude ainsi que riche en oxygène et sur laquelle les conditions atmosphériques agissent. L'hypolimnion est la couche inférieure, au-dessous du métalimnion, où l'eau est froide, pauvre en oxygène et sur laquelle les conditions atmosphériques n'agissent pas.

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

terme « mésotrophe » est fréquemment utilisé pour décrire l'état intermédiaire entre les deux catégories précédentes. Le tableau 2 donne une description des différents états trophiques d'un plan d'eau. Cette description n'a pas une signification

précise, mais elle est couramment employée pour désigner le potentiel trophique d'un plan d'eau.

Des efforts ont été réalisés pour définir ces termes de manière précise en fixant des

seuils numériques pour certains paramètres caractéristiques de la qualité d'eau : la concentration en phosphore, en chlorophylle-a et la transparence au disque de Secchi. La quantification de ces paramètres permet d'établir la qualité d'une eau. Le tableau 3 donne les limites correspondant à chaque type de trophie.

## 2.2 Facteurs liés au plan d'eau influençant l'eutrophisation

Les causes de l'eutrophisation d'un plan d'eau sont bien sûr principalement externes. Cependant, les caractéristiques de ce dernier peuvent en accentuer ou en atténuer les effets. A charge annuelle égale, les évolutions de deux lacs peuvent être très différentes. La distribution des nutriments, leur disponibilité, ou leur assimilation peuvent varier à cause des différences de certaines propriétés des lacs, telles que les caractéristiques des sédiments, la structure biotique, la morphologie ou l'hydrodynamique (Figure 5).

### 2.2.1 Morphologie du bassin lacustre

La profondeur moyenne du plan d'eau et de l'hypolimnion peuvent influencer



**Avez-vous réservé  
votre espace publicitaire ?**

Prochain dossier spécial :

**l'Agriculture et l'environnement**

OK



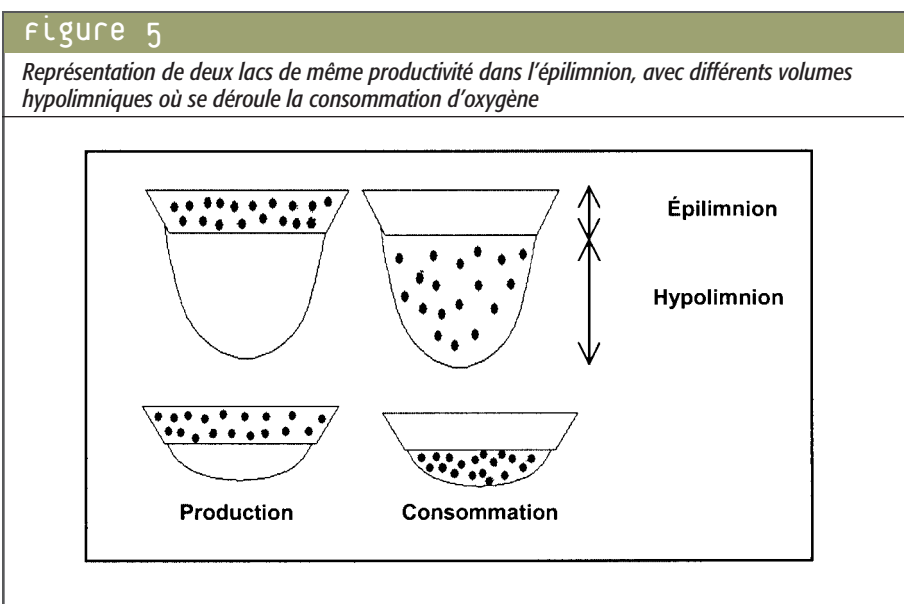
**RÉSEAU** environnement

911, rue Jean-Talon Est, bureau 220  
Montréal, Québec, Canada H2R 1V5  
Téléphone : (514) 270-7110  
Télécopieur : (514) 270-7154  
Courrier électronique :  
dumouchel@videotron.ca  
<http://www.reseau-environnement.com>



Tableau 3					
Valeurs des seuils de l'état trophique des plans d'eau					
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

Source : Ryding et Rast, 1994.



Source : Wetzel, 1975.

considérablement les effets de l'accroissement de la charge nutritive d'un lac. La teneur en oxygène de l'hypolimnion dépend en grande partie de sa profondeur moyenne. Les processus de dégradation de la qualité d'eau et de relargage de nutriments y sont aussi étroitement liés. Ainsi, la consommation d'oxygène par décomposition bactérienne dans l'hypolimnion ( $R_H$ , exprimée en  $g\ O_2/m^3 \cdot d$ ) est généralement estimée par l'équation suivante :  $R_H = L_H/z_H$ , où  $L_H$  est la charge de matière organique facilement dégradée (phytoplancton en décomposition exprimé par son équivalent de consommation d'oxygène dissous, DBO) que reçoit l'hypolimnion, par unité de surfaces ( $g/m^2 \cdot d$ ) et  $z_H$  est la profondeur moyenne de l'hypolimnion (m).

Ainsi, la concentration en oxygène sera plus importante dans l'hypolimnion d'un

lac profond que dans celui d'un lac peu profond ayant la même productivité. Une profondeur moyenne supérieure à 15 m est en général considérée comme une caractéristique morphologique des lacs oligotrophes.

### 2.2.2 Taux de renouvellement de l'eau

L'ampleur des accumulations de substances nutritives dans un plan d'eau est principalement fonction de la pluviométrie et du taux de renouvellement de l'eau. Dans les lacs fermés des régions arides, la concentration en phosphore dissous peut atteindre des taux aussi élevés que ceux rencontrés dans les bassins d'épuration des eaux usées.

La pratique montre qu'un temps de séjour supérieur à trois jours est nécessaire à la prolifération du phytoplancton. Les lacs et les réservoirs sont donc plus sensibles à

l'eutrophisation que les rivières. Cependant, on verra plus loin que les rivières et les fleuves sont maintenant aussi atteints par l'eutrophisation.

### 2.2.3 Température et lumière

Le flux solaire apporte la chaleur et la lumière nécessaire à la production primaire, et favorise donc les processus métaboliques des plans d'eau.

L'épaisseur ( $z_m$ ) de la zone de mélange des eaux d'un lac est souvent considérée comme étant l'épaisseur de l'épilimnion. L'intensité moyenne de la lumière ( $I$ ) dans la zone de mélange peut être calculée par :

$$I = [I_0 / (\epsilon \cdot z_m)] \cdot [1 - \epsilon \cdot z_m],$$

où  $I_0$  est l'intensité de la lumière à la surface de l'eau, et  $\epsilon$  est le coefficient moyen d'atténuation de la lumière ( $m^{-1}$ ).

$I$  est faible si  $I_0$  est faible ou si  $\epsilon \cdot z_m$  est élevée, c'est-à-dire quand l'eau est trouble ou colorée ou quand l'épaisseur de la zone de mélange est grande.

La limitation de la croissance du phytoplancton, donc de l'eutrophisation, peut alors se faire en limitant la valeur de  $I$ , donc en brassant les eaux (sauf si  $z$  est inférieure à 10 m, auquel cas  $z_m$  est trop petite pour limiter la croissance du phytoplancton).

### 2.2.4 Développement des macrophytes

Pour les réservoirs à fortes teneurs en nutriments, il existe deux états d'équilibre possibles. L'un est une prédominance de phytoplancton qui empêche la pénétration de la lumière en profondeur dans l'eau, et par conséquent le développement des plantes aquatiques. L'autre est une prolifération de macrophytes.

Dans le premier cas, les mesures qui sont destinées à améliorer la qualité de l'eau, pour l'utiliser comme source d'eau potable, ne doivent pas en contrepartie permettre aux macrophytes de trop se développer, puisqu'alors c'est la qualité de l'eau de baignade et l'aspect récréatif du plan d'eau qui seront atteints. Pour contrôler le développement des macrophytes, l'introduction d'espèces de poissons herbivores (la carpe chinoise) a déjà été réalisée avec succès.

Il faut donc parvenir à trouver un équilibre entre la présence de phytoplancton et celle des macrophytes, l'élimination de l'un ne devant pas favoriser l'autre.

### 2.2.5 Pisciculture

Le développement de piscicultures peut parfois être un facteur aggravant l'eutrophisation, puisque la nourriture donnée aux poissons ainsi que leurs excréments sont des apports en nutriments importants pour la réserve concernée.

### 2.2.6 Bassin versant

Les différents facteurs liés au bassin versant peuvent aussi modifier les apports ou le comportement d'un lac face à une pollution. Ainsi, les activités humaines se déroulant sur le bassin versant vont bien sûr influencer la quantité de nutriments qui sera apportée au lac. La géologie du bassin versant influence la nature des sédiments du lac, qui interviennent dans les phénomènes d'eutrophisation (paragraphe 1.3.2), ainsi que les apports de nutriments exogènes. La topographie ou le climat sont d'autres variables importantes.

## 2.3 Impacts de l'eutrophisation sur l'exploitation des eaux

L'eutrophisation a différents impacts sur l'utilisation de l'eau par l'homme.

### 2.3.1 Risque sanitaire

Une eau eutrophe présente en premier lieu un risque sanitaire pour l'homme et les animaux : risque lié aux nutriments, tel que vu en première partie, ou risque lié aux toxines algales.

La toxicité du phytoplancton est un problème dont l'importance est grandissante dans le monde. Il semble en effet que les efflorescences (floraisons de plancton végétal) toxiques sont de plus en plus fréquentes et associées à l'eutrophisation. En eaux douces, les cyanobactéries, ou algues bleu-vertes ou cyanophycées, semblent les seules à poser de réels problèmes de toxicité.

La toxicité survient surtout lors de l'ingestion de cyanobactéries formant des fleurs d'eau superficielles liées à l'eutrophisation. *Microcystis aeruginosa* est l'espèce la plus souvent incriminée, mais 75 % des souches de cyanobactéries d'eau douce seraient des toxiques potentielles.

Tableau 4			
Problèmes liés à l'eutrophisation			
Problème		Cause	
		Prolifération de microalgues planctoniques	Prolifération de macrophytes
Altération de la qualité de l'eau	Goût, odeur, couleur, filtration, et autres difficultés de traitement	+++	+
	Désoxygénation, formation de Fe, Mn, CO <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> S	++	+
	Corrosion des tuyaux	++	+
Altération des usages récréatifs de l'eau	Aspect inesthétique	++	+
	Danger pour les baigneurs	++	++
	Risques sanitaires	++	++
Altération des pêches	Mortalité de poissons	+	
	Production d'espèces moins nobles	++	++
Altération des matériaux	Envasement, colmatage des tuyaux et des filtres, réduction du débit	+	+

Notes : +++ : très fréquent, ++ : fréquent, + : quelquefois  
Source : J.C.Lacaze, 1996.

Un mammifère peut mourir s'il passe dans son sang 0,07 mg de toxine de *Microcystis* par kg de son poids. De nombreux cas de morts de bétail ont été recensés. Les toxines qui causent des accidents sont des endotoxines non rejetées par les cellules vivantes, mais libérées au cours de leur lyse. On distingue principalement : des microcystines (hépatotoxines produites par des cyanobactéries comme *Microcystis* et *Oscillatoria*) et des anatoxines (neurotoxines produites par des *Anabaena*).

Le pH élevé des eaux eutrophes peut aussi provoquer l'apparition de conjonctivites ou de dermatites chez l'homme.



- GESTION DE L'EAU
- AMÉNAGEMENT
- ÉCOLOGIE APPLIQUÉE

2.3.2 Autres impacts

**Difficultés de potabilisation** : elles peuvent représenter des mesures supplémentaires à prendre au niveau de la production d'eau potable. En France, l'IFEN (Institut Français de l'Environnement) chiffre à 1,5 à 2,3 milliards de francs (300 à 460 millions de dollars canadiens) le coût de l'eutrophisation pour la potabilisation de l'eau.

**Biodiversité** : c'est une atteinte importante des écosystèmes aquatiques. La biodiversité diminue, et de nombreuses espèces meurent. Globalement, la mort de poissons est très importante.

Le tableau 4 résume les impacts de l'eutrophisation sur les usages de l'eau.

2.4 Avancée de l'eutrophisation dans le monde

De nombreux pays subissent les effets de l'eutrophisation. Le bilan n'est bien sûr pas facile à dresser.

Au Québec

Le Ministère de l'Environnement du Québec a dressé un portrait global de la qualité des eaux de surfaces (données disponibles sur le site Internet du ministère : [www.menv.gouv.qc.ca](http://www.menv.gouv.qc.ca)). Il ressort de cette étude que les rivières du sud-ouest du Québec ont les concentrations en azote et en phosphore les plus importantes, en particulier les zones agricoles (Yamaska, L'Assomption, Châteauguay, Chaudière). Par contre, les têtes de bassin et les zones périphériques semblent moins touchées par l'eutrophisation. Le phosphore constitue l'élément limitant de l'eutrophisation dans ces régions. Environ la moitié des points de mesure présente une concentration en phosphore supérieure à 0,03 mg/L. Pour cet élément, les tendances montrent une diminution du phosphore total entre 1988 et 1998. Par contre, les nitrites et nitrates sont souvent présents en quantités plus faibles que les 10 mg/L autorisés, mais la tendance entre 1979 et 1999 est à la hausse (avec une baisse entre 1988 et 1998).

Il ressort donc de ce bilan que la déphosphatation des eaux usées est un moyen efficace pour diminuer les quantités de phosphore et donc pour lutter contre

l'eutrophisation. De plus, la gestion des engrais basée sur le phosphore plutôt que sur l'azote semble pertinente. Enfin, la principale source de phosphore semble maintenant être les fabriques de pâtes et papiers.

Les Grands Lacs

Plus globalement, au Canada et aux États-Unis, les problèmes d'eutrophisation sont apparus très tôt, avec le cas des Grands Lacs. Dès le début du 20<sup>ème</sup> siècle, certaines régions des Grands Lacs étaient atteintes par l'eutrophisation, due à des rejets locaux de polluants trop importants. Dans les années 60-70, le problème s'est répandu sur l'ensemble des lacs, la forte concentration de population et l'agriculture très développée en étant les principales causes. En 1972, des accords ont été passés entre les deux pays pour imposer des quantités limitées de nutriments sur les lacs.

Ces mesures ont permis la réduction des teneurs en éléments nutritifs des lacs. Aujourd'hui, seuls les lacs Érié et Ontario

sont encore eutrophes, mais en voie de récupération. Les eaux du large du lac Ontario présentent même les caractéristiques d'eaux oligotrophes, et les proliférations algales massives ont presque disparu.

Dans le monde

Le tableau 5 donne un aperçu des problèmes d'eutrophisation au niveau mondial. Il est à noter que ces données sont plus nombreuses pour les pays européens ce qui ne signifie pourtant pas que l'eutrophisation y est plus importante. L'application de mesures curatives contre l'eutrophisation (partie suivante) peut être efficace : 23 lacs autrichiens, sur un total de 28, ont présenté une augmentation puis une décroissance de l'eutrophisation. Ceci s'applique aussi à quelques lacs de Suisse, d'Allemagne, de Suède, du Canada et d'ailleurs. On considère qu'environ 30 à 40 % des lacs et réservoirs sont affectés par des conditions plus ou moins importantes d'eutrophisation.

Tableau 5  
L'eutrophisation dans le monde

	Lacs naturels	Réservoirs, rivières
Pays de la CEE	Belgique	+
	Danemark	+++
	France	++
	Allemagne (ouest)	++
	Allemagne (est)	+
	Grèce	++
	Irlande	+
	Italie	+++
	Luxembourg	
	Pays-Bas	+++
	Portugal	
	Espagne	+
	Grande Bretagne	+
Autres pays	Autriche	++
	Tchécoslovaquie	
	Finlande	+
	Hongrie	+
	Norvège	++
	Pologne	+++
	Suède	++
	Suisse	+++
Russie	+	

Notes : + : problème identifié, ++ : problème sérieux à l'échelle locale, +++ : problème sérieux à l'échelle nationale  
Source : Chiaudani et Premazzi, 1988 dans J.C.Lacaze, 1996.

En France, un tiers des rivières a une mauvaise qualité d'eau, et un autre tiers a une qualité d'eau moyenne, à cause de l'eutrophisation (IFEN, 1999). Cependant, l'évolution actuelle est positive, puisque les teneurs en phosphore diminuent. Les efforts doivent être maintenus pour parvenir à la diminution de l'eutrophisation.

### 3. Moyens de lutte contre l'eutrophisation

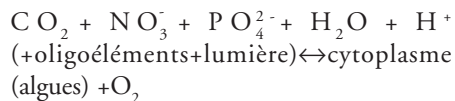
L'eutrophisation est donc un problème touchant la planète entière. La prise de conscience de ce problème a lieu depuis quelques années déjà. Ainsi, différentes techniques, basées sur le concept de facteur limitant, sont appliquées pour lutter contre l'eutrophisation, à la source ou directement dans les lacs.

#### 3.1 Le facteur limitant

##### 3.1.1 Le concept de facteur limitant

Une des méthodes les plus efficaces pour limiter l'eutrophisation accélérée consiste à réduire l'apport de nutriments au plan

d'eau. En effet, les besoins chimiques de la photosynthèse peuvent être représentés, de manière conceptuelle, par l'équation suivante, où les nutriments ont une place essentielle :



En théorie, il est possible d'agir sur toutes les variables de l'équation ci-dessus. Cependant, les efforts de restauration des lacs des dernières années ont montré que la réduction des apports en nutriments est l'une des mesures les plus efficaces.

En limitant l'un des nutriments, on peut donc limiter le déroulement de la réaction. On présume de plus que les taux d'absorption et d'utilisation des nutriments par les algues sont proportionnels aux teneurs de ces éléments dans leur cytoplasme. Ainsi, l'analyse de la matière organique d'un échantillon d'eau de mer a montré le contenu cellulaire suivant : 106C : 16N : 1P (Lacaze, 1996). Pour l'eau douce, le rapport est de 40C : 7N : 1P (Wetzel, 1975).

Ce rapport est une référence de base. Il sert à déterminer l'élément limitant d'un plan d'eau. En général, le carbone organique n'est pas le facteur limitant, à moins de conditions spécifiques, et si c'est le cas, les effets consisteront uniquement en une diminution de la biodiversité. Ce seront donc préférentiellement l'azote ou le phosphore.

De plus, le phosphore est l'élément le plus facile à contrôler, puisqu'il est principalement issu des eaux usées domestiques, qui sont facilement traitables.

##### 3.1.2 La détermination du facteur limitant

Pour déterminer le facteur limitant d'un plan d'eau, la mesure des proportions d'azote et de phosphore est généralement un bon indicateur. La comparaison avec le rapport 16N : 1P permet de déterminer le nutriment limitant. Cependant, si aucun de ces deux éléments ne semble être présent en trop faible quantité, un autre nutriment (le silicate par exemple) pourra servir de facteur limitant. Les analyses ne doivent donc pas se borner à l'azote et au phosphore.



Le droit de l'environnement a une nouvelle adresse



**Robert Daigneault**  
Cabinet d'avocats

- Environnement
- Ressources
- Territoire

Dans le Vieux-Montréal, à deux pas du musée de la Pointe-à-Callière, loge un nouveau cabinet de droit de l'environnement, sous la direction de Me Robert Daigneault, Adm.A., biologiste et avocat.

Son équipe :

Me Marie-Claude Caron, avocate  
Me Lucie Gosselin, avocate  
Me Hervé Pageot, avocat

353, rue Saint-Nicolas (Place d'Youville), bureau 400  
Montréal (Québec) Canada H2Y 2P1  
Téléphone : 514 985 2929 ou 1 888 228 5834  
Télécopieur : 514 985 0595 • [enviro@RDaigneault.com](mailto:enviro@RDaigneault.com)

De plus, lorsque l'évaluation des rapports de concentrations n'est pas suffisante, ou lorsqu'on souhaite confirmer les résultats des analyses, il est possible de réaliser des essais biologiques. Ils consistent à ajouter des quantités connues de nutriments à des cultures d'algues standardisées, ou à des populations naturelles, dans des conditions optimales de lumière et température. Si l'un des éléments limite la biomasse des algues, son adjonction à la culture entraîne normalement un accroissement de la biomasse algale proportionnel à la quantité de nutriments ajoutée. Des tests très variés peuvent être mis en place.

Enfin, si l'ensemble de ces essais ne permet pas de conclure de manière sûre, il est possible d'utiliser les indicateurs physiologiques de carences nutritives. Les propriétés physiologiques et morphologiques des cellules algales peuvent être une source de renseignements utiles concernant les éléments limitants. L'obtention de ces informations nécessite quand même la mise en place de moyens plus sophistiqués.

### 3.2 Les moyens préventifs de lutte

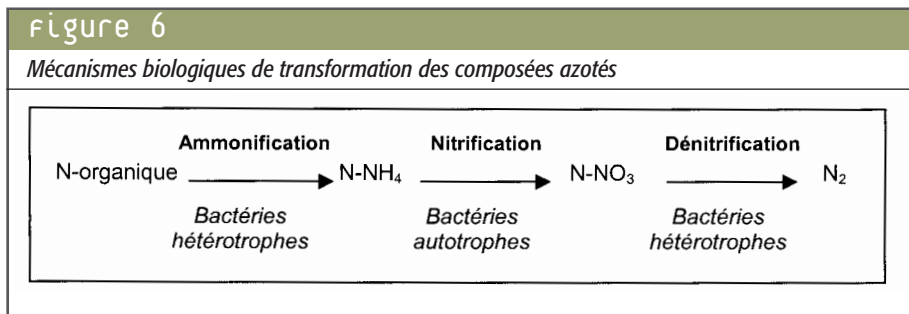
Les moyens de lutte contre l'eutrophisation se situent à deux niveaux. L'un d'entre eux est un moyen préventif, que l'on peut aussi qualifier de lutte à la source. Il consiste à appliquer le concept de facteur limitant, souvent au phosphore, au niveau des sources du nutriment. Ainsi, en restreignant les apports en nutriment limitant à un plan d'eau, des améliorations devraient se faire sentir. Cela peut se faire de manière systématique : limitation de tous les apports, ou sélective : limitation des sources principales, lorsqu'elles sont connues.

#### 3.2.1 Réduction des apports d'origine domestique

La première mesure applicable pour la réduction des apports de nutriments d'origine domestiques est le **traitement des eaux usées**. La plupart des stations de traitement des eaux usées sont conçues pour éliminer les matières en suspension et une partie des matières dissoutes. Bon nombre de ces stations n'éliminent que peu d'azote et de phosphore. Ces deux éléments sont en fait minéralisés et redonnés à la nature. Dans bien des cas, ce

Tableau 6		
Normes de rejet (moyenne annuelle) pour la France (1998)		
	Azote	Phosphore
10 000 à 100 000 EH	15 mg/L	2 mg/L
Plus de 100 000 EH	10 mg/L	1 mg/L

Notes : EH = équivalent habitant



traitement partiel n'est pas suffisant pour maintenir un équilibre biologique satisfaisant au sein du milieu récepteur. Dans le cas d'un milieu particulièrement sensible à l'excès d'azote et de phosphore, il conviendra donc de mettre en place un traitement de la pollution azotée et phosphorée. Les exigences de rejet des stations d'épuration à la fin 1998 en France sont données au tableau 6.

L'élimination de l'azote se fait par des procédés biologiques : cultures libres (boues activées) ou fixées (lits filtrants immergés aérés, lits bactériens, disques biologiques). Ils mettent en jeu les mécanismes de la chaîne illustrée à la figure 6.

L'élimination du phosphore dans les eaux usées peut se faire soit par procédé biologique (surconsommation du phosphore qui est éliminé avec les boues en excès), soit par procédé physico-chimique (précipitation de complexes insolubles).

Une autre mesure est l'instauration d'une **réglementation sur les détergents phosphatés**. En admettant que des substituts soient disponibles, il est possible de limiter la quantité de phosphates dans les détergents. Ces substituts ne doivent bien sûr pas engendrer de nouveaux problèmes environnementaux. Certains pays ont développé une réglementation : le Canada limite la quantité de phosphates à 2,2 % du poids, la Suisse interdit leur présence.

#### 3.2.2 Réduction des apports d'origine agricole

Les apports d'origine agricole sont une des sources diffuses les plus importantes.

La **fertilisation des sols** se fait avec des produits contenant phosphore, azote et potassium. La présence de nitrates dans les eaux mobilise de plus en plus de personnes. Il est important de changer les mentalités et les habitudes. Il faut déterminer la fertilisation strictement nécessaire, et donc prendre en compte plusieurs paramètres, comme la nature du sol, le type de culture, le passé de la parcelle, etc. Cette évolution passe par une sensibilisation des agriculteurs.

L'élevage produit aussi des déchets qui peuvent être utilisés comme fertilisants pour l'agriculture, mais qui peuvent aussi être à l'origine de la pollution des rivières, des plans d'eau et des nappes souterraines. Ces effluents contiennent en effet de l'urée, qui se décompose en ammoniacque, très toxique pour la vie aquatique tel que vu en première partie. Il convient donc d'éviter toutes les fuites d'effluents vers les eaux de surface et souterraines et de contrôler le stockage. Pour cela, des mesures peuvent être prises pour un contrôle systématique des installations agricoles et des pratiques d'épandage, et par la suite, des conseils doivent éventuellement être donnés aux agriculteurs pour améliorer les points négatifs.

Enfin, une amélioration peut être apportée au niveau des pertes de fertilisants vers

l'environnement. Le **couvert végétal** joue un grand rôle dans la pénétration de l'azote dans le sol et les eaux souterraines : la présence de couvert va limiter la pénétration de l'azote dans le sol. Ainsi, il est intéressant de laisser un couvert en permanence, éventuellement en pratiquant l'interculture, pour éviter d'avoir des périodes de l'année sans aucun couvert.

De même, le maintien d'une zone tampon autour des zones cultivées permet de limiter la fuite des nutriments, quelle que soit leur origine, vers les cours d'eau.

### 3.2.3 Traitement ou déviations des eaux tributaires

Pour limiter la pénétration des nutriments dans les lacs ou réservoirs atteints d'eutrophisation, il est possible de traiter ou dévier les eaux chargées en nutriments avant leur arrivée dans la réserve en question.

Ainsi, la construction de **pré-barrages** permet de retenir les eaux chargées dans des pré-réservoirs pendant quelques jours. S'il y a formation d'algues, ce pré-réservoir peut devenir un réacteur biologique éliminant une partie des nutriments. Il peut aussi limiter l'envasement trop rapide du réservoir principal, et le phosphore peut être piégé dans la biomasse et dans les sédiments. Des projets ont montré que plusieurs pré-barrages peuvent permettre un enlèvement de 96 % du phosphore présent dans les eaux.

Le principe des **marais filtrants** est le même : les plantes présentes permettent à la fois la diminution de la vitesse de l'eau, et donc le dépôt des matières solides en suspension, et le développement des micro-organismes. Elles favorisent donc le déroulement de la nitrification et de la dénitrification. Tout ceci permet d'obtenir un effluent épuré à la sortie du marais.

Le **traitement** de ces eaux tributaires est aussi possible avant leur pénétration dans la réserve : c'est le cas de la station de traitement de la rivière Wahnback en Allemagne. Les traitements consistent en une floculation et une filtration du phosphore. L'efficacité de cette mesure est importante (concentration en phosphore inférieure à 10 µg/L), et l'étude de coût a montré une réduction de 60 % par rapport à un traitement de réduction du phosphore à la source.

L'adjonction directe aux eaux tributaires de produits de précipitation du phosphore, comme les sels de fer ou d'aluminium, entraîne la précipitation immédiate du phosphore dans le réservoir. De même, le passage de ces eaux sur un filtre d'oxyde d'aluminium est un traitement chimique permettant de réduire l'apport exogène de nutriments.

Enfin, la **canalisation ou la déviation** des eaux usées sont des mesures très efficaces, mais il faut cependant conduire ces eaux jusqu'à une station de traitement, sinon cela reviendrait à reporter le problème en aval.

La création de **fossés d'infiltration** est encore une mesure économique et naturelle. Elle consiste à favoriser la pénétration du phosphore dans le sol, où il va être retenu. Ces fossés doivent être installés en aval des sources spécifiques de pollution, et si les

conditions de terrain le permettent (sol argilo-sablonneux favorable).

L'ensemble de ces mesures permet de réduire l'apport exogène de nutriments vers une réserve : ce sont des traitements des causes fondamentales de l'eutrophisation.

### 3.3 Les moyens curatifs de lutte

Si des améliorations rapides de la qualité de l'eau sont nécessaires, il peut être possible d'intervenir directement sur l'eau. Ce genre de traitement est moins efficace à long terme, et ne revient qu'à éliminer les symptômes, mais provoque une amélioration immédiate. Plusieurs options sont décrites dans la suite.

**Gestion**  
**Entretien**  
**Exploitation**  
**Assistance technique**  
**d'ouvrages de traitement**  
**d'eau potable et usée**

101, boul. Roland-Therrien  
Bureau 110  
Longueuil (Québec) J4H 4B9

Téléphone: (450) 646-5270  
Télécopieur: (450) 646-7977

**Désactiver les nutriments** - En introduisant directement des produits causant la précipitation du phosphore (sel de fer ou alun), on provoque l'immobilisation du phosphore, qui n'est plus disponible pour les organismes. Les risques d'intoxication des organismes vivants et le caractère temporaire du traitement sont ses désavantages principaux.

**Aérer l'hypolimnion** - En apportant de l'oxygène aux eaux hypolimniques d'un lac (figure 7), sans perturber la thermocline, on peut contrôler le relargage du phosphore et d'autres éléments à partir des sédiments.

**Activer la circulation** - De la même manière que pour l'aération hypolimnique, un apport d'oxygène est réalisé au fond du lac, mais dans ce cas-ci, l'aération est plus violente, ce qui a pour effet de modifier la thermocline, et même de brasser les eaux du lac (figure 7).

**Augmenter 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. Ceci permet de diminuer l'accumulation de la biomasse et les concentrations des nutriments. Le principal obstacle à cette méthode est de trouver une grande quantité d'eau peu chargée.

**Évacuer sélectivement les eaux hypolimniques** - L'évacuation des eaux les plus riches en nutriments entraîne une diminution du volume de l'hypolimnion et un appauvrissement global du plan d'eau. Ce procédé ne peut être appliqué qu'à des petits lacs profonds et des réservoirs munis de vannes à différents niveaux pour permettre d'évacuer l'eau.

**Abaisser le niveau d'eau** - Le but de cette technique est d'exposer les sédiments à l'atmosphère. Cela permet le contrôle des macrophytes et des algues fixées. On peut accompagner cette mesure d'un dragage ou d'un recouvrement des sédiments. Les problèmes liés à cette technique sont la destruction des organismes fragiles ainsi que le maintien pendant un certain temps d'un niveau d'eau faible, voire nul.

**Recouvrir les sédiments** - Ce recouvrement peut se faire à l'aide d'une bâche plastique ou d'un matériau particulière (cendres volantes) pour limiter les échanges nutritifs entre les sédiments et la colonne d'eau et pour diminuer le développement des macrophytes. Les difficultés résident dans le coût de la technique et dans l'impact des matériaux particuliers sur les organismes vivants.

**Enlèvement des sédiments** - Cela permet de diminuer l'apport endogène de nutriment, mais le coût d'opération, les

effets potentiels du dragage sur les organismes vivants et les problèmes d'élimination des sédiments sont des obstacles importants.

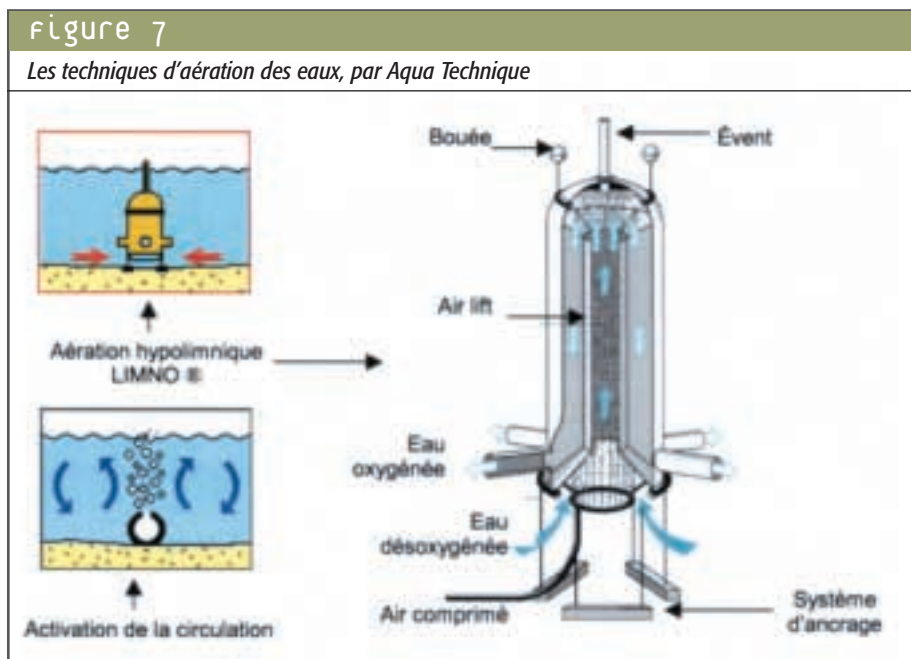
**Faucarder et récolter les macrophytes** - Cette opération d'élimination des algues est immédiate et permet la réutilisation du plan d'eau pour la baignade. Elle représente cependant un coût élevé, doit être renouvelée régulièrement et les végétaux posent un problème d'évacuation.

**Contrôle biologique** - L'introduction d'espèces vivantes nouvelles dans un lac peut permettre d'éliminer certaines algues présentes en trop grand nombre. Ainsi, les poissons peuvent permettre de contrôler les macrophytes et le lamantin la jacinthe d'eau. Les précautions à prendre sont cependant importantes puisque l'introduction de nouvelles espèces dans un milieu peut avoir des conséquences sur les autres espèces.

**Contrôle chimique** - L'utilisation de certains produits chimiques permet l'élimination des plantes aquatiques indésirables. Le cuivre est un algicide couramment employé, et les herbicides peuvent aussi être utilisés. Les inconvénients sont les coûts, la nature temporaire de l'intervention et le risque d'intoxication des autres organismes.

Le tableau 7 est un résumé des différentes techniques associées à la résolution d'un problème. Parmi ces mesures, certaines consistent à déplacer ou contenir la pollution, mais pas à l'éliminer : le dragage pose le problème de la gestion des sédiments; l'inactivation des nutriments ou le recouvrement des sédiments ne font que contenir la contamination et ne la détruisent pas; ou encore la circulation forcée et la dilution la déplacent en aval. Ainsi, les techniques qui semblent être les plus pertinentes à utiliser seraient l'aération hypolimnique, qui permet d'éliminer l'excès de nutriments, ou le contrôle biologique, dans la mesure où il est bien réalisé.

Cependant, l'ensemble de ces mesures contre l'eutrophisation doit être impérativement appliqué en association avec des mesures de réduction à la source pour avoir une plus grande efficacité à long terme.



(Source : [www.aquatech.fr](http://www.aquatech.fr))

Tableau 7

Résumé des moyens de lutte curatifs

Mesures de contrôle	TYPE DE PROBLEME							
	Odeurs	Destruction des poissons	Algues toxiques	Baignade entravée	Baisse du rendement des pêches commerciales	Prolifération des macrophytes	Eau potable de mauvaise qualité	Prolifération algale
Enlèvement des sédiments (dragage)		X			X			X
Aération hypolimnique	X	X		X			X	
Inactivation des nutriments				X	X	X		X
Circulation forcée	X	X						X
Algicides			X					X
Contrôle biologique			X	X		X		X
Dilution / chasse d'eau	X	X			X		X	X
Évacuation des eaux hypolimniques	X	X			X			
Réduction du niveau de l'eau	X							X
Faucardage			X	X		X		
Recouvrement des sédiments	X	X						X

## Demandez-la. Installez-la. Oubliez-la.

Les Vannes à Boisseau Excentrique DeZurik sont à toutes fins pratiques, la solution universelle pour vos besoins de contrôle et de régulation d'eaux usées, boues, air, eau et gaz. Plusieurs de ses caractéristiques de série, dont plusieurs inventées par DeZURIK, font de la Vanne à Boisseau Excentrique DeZURIK le choix idéal, quelle que soit l'application rencontrée dans le domaine du traitement des eaux usées.

Lorsque vous spécifiez la Vanne à Boisseau DeZURIK dans vos prochains devis, vous obtiendrez un produit de qualité, fruit de plus de 50 ans d'expérience. Une vanne ayant :

- Une grande capacité
- Un siège en nickel anti-corrosion à face surélevée
- Un choix de recouvrements de boisseau élastiques et parfaitement étanches
- Des coussinets en acier inoxydable
- Une garniture ajustable
- Des butées d'ouverture/fermeture réglables de l'extérieur



## Vannes à Papillon AWWA

Les Vannes à Papillon AWWA DeZURIK rencontrent ou même excèdent les normes C504 de l'AWWA. Elles sont disponibles également en version carrée/rectangulaire, pour la régulation des débits d'entrée et de sortie des dessableurs ou les réservoirs de traitements primaires et secondaires.

Lorsque vous êtes à la recherche de Vannes à Papillon AWWA, jetez un coup d'oeil à DeZURIK. Vous serez en mesure d'apprécier les différences :

- Diamètres de 4" - 120" et 24"-144" en version carrée, en plus des options disponibles sur les versions rectangulaires
- Siège de caoutchouc implanté dans le corps
- Coussinets d'arbre supérieurs et inférieurs
- Arbre en acier inoxydable
- Disponibles avec raccords à brides, à joints mécaniques, à joints soudés et Victaulic
- Une grande variété d'actionneurs manuels et automatiques, et un grand choix d'accessoires



A UNIT OF GENERAL SIGNAL  
**DeZURIK**

Pour tous les détails complets, contactez :

**CONTRÔLES PROVAN ASS. Inc.**

2011, Halpern, Ville Saint-Laurent (Québec) H4S 1S3

Tél.: (514) 332-3230 • Fax: (514) 332-3552



#### 4. Étude de cas de restauration – Le Lac de Nantua

Le lac de Nantua est un lac français, situé dans le Jura. Il est souvent cité en France comme un exemple caractéristique de l'influence néfaste de l'activité humaine sur l'environnement. Le nom *Oscillatoria rubescens* apparaît alors pour décrire les proliférations algales qui en sont la manifestation la plus importante. Ce lac est considéré comme eutrophe depuis 1947. A partir de 1969, il a été étudié par des chercheurs de l'INRA (Institut National de Recherche Agronomique). Ces études ont confirmé l'état eutrophe du lac et ont conduit à proposer plusieurs méthodes de restauration : chaulage du lac et siphonnage de la moitié du débit de l'émissaire, siphonnage égal au débit de l'émissaire, aération hypolimnique et oxygénation hypolimnique. C'est le dernier projet qui a été le seul à être appliqué, dans un cadre expérimental.

##### 4.1 Cadre de l'étude : le lac et son bassin versant

Ce lac est à une altitude de 475 m, et est de taille moyenne : il a une longueur de 2,5 km et une largeur de 0,6 km. Sa profondeur maximale est de 42 m. Sa superficie totale est de 1,42 km<sup>2</sup> et son volume de 40,35 millions de m<sup>3</sup> (figure 8). C'est un lac d'origine glaciaire. Il est alimenté à 80 % par trois ruisseaux qui se

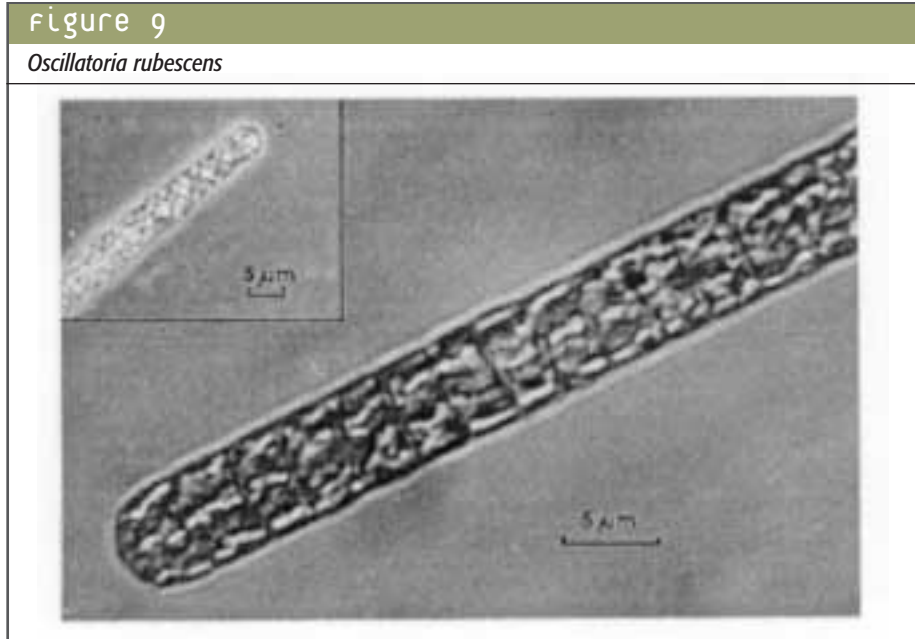
jettent dans sa partie sud-est : la Doye, le Merlot Nord et le Merlot Sud. Ce dernier est le plus important avec un débit maximal de 5 à 6 m<sup>3</sup>/s. Il a un seul émissaire, le Bras du Lac, de débit maximum compris entre 8 et 10 m<sup>3</sup>/s.

D'un point de vue géologique, la formation est de type karstique, c'est-à-dire calcaire, où l'érosion chimique domine. Un vaste réseau souterrain est aussi caractéristique de ce type de formation, et rend plus difficile l'établissement d'un bilan hydrique.

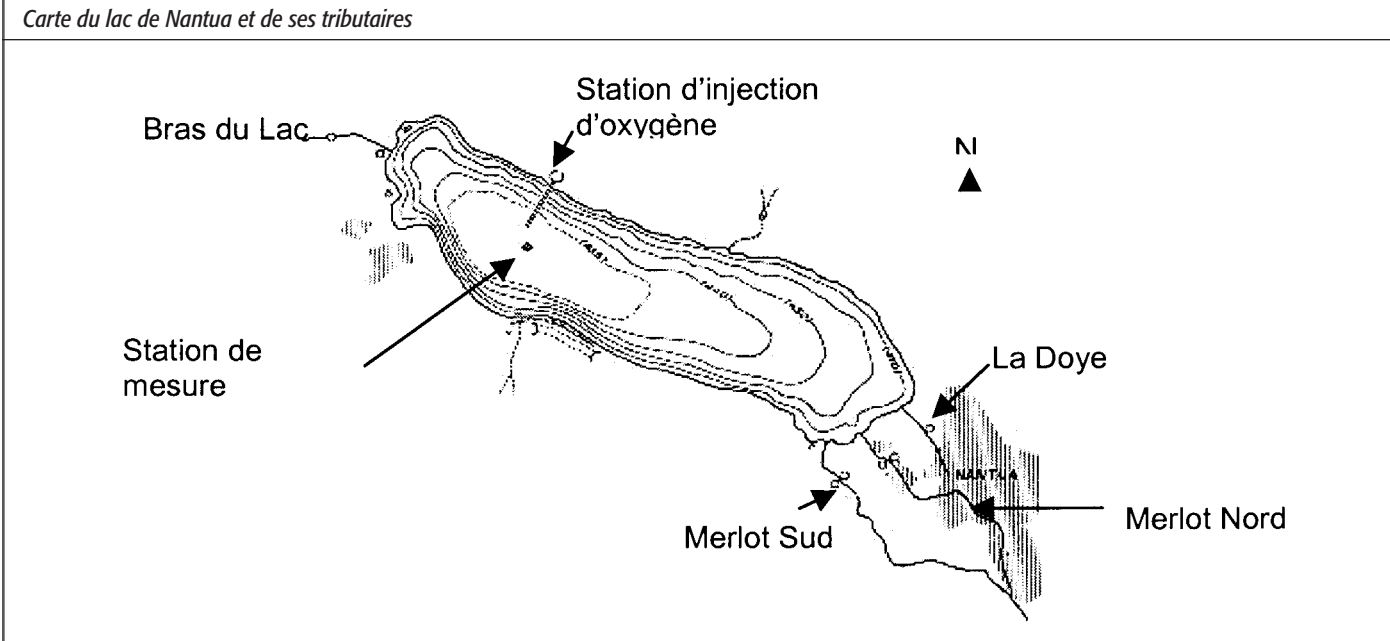
##### 4.2 L'organisme caractéristique : *Oscillatoria rubescens*

L'organisme caractéristique de l'état eutrophe du lac de Nantua est *Oscillatoria rubescens*. Il se présente sous la forme de filaments colorés rouge-brun. Il appartient à la catégorie des phytoplanctons, plus précisément les Cyanophycées ou cyanobactéries (figure 9).

Lorsqu'elle est en état de croissance active, *O. rubescens* a une teneur en azote allant jusqu'à 12 % du poids de matière sèche, et sa teneur en phosphore atteint 1,3 %. Sa

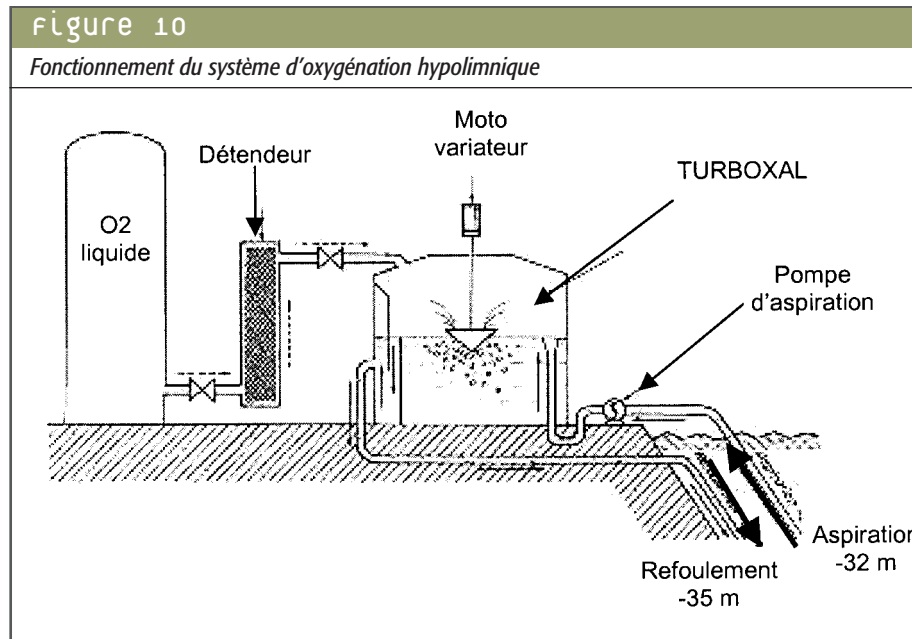


**Figure 8**  
Carte du lac de Nantua et de ses tributaires



composition pigmentaire rend *O. rubescens* capable d'exploiter tout le spectre lumineux, c'est aussi ce qui lui confère sa couleur rouge. Le besoin en énergie lumineuse de cette cyanobactérie est très faible, et de forts éclaircissements peuvent même être néfastes.

Cet organisme possède une capacité importante d'adaptation aux conditions variables de son milieu. Les phosphatases alcalines, enzymes libérées par la membrane cellulaire, lui permettent de s'adapter à un milieu pauvre en phosphore. Ces enzymes libèrent des ions  $PO_4^{3-}$  à partir des matières organiques phosphorées et fournissent donc une source de phosphore assimilable alors qu'il n'y a plus de  $PO_4^{3-}$  libre dans le milieu. De plus, *O. rubescens* comporte, comme toute cyanophycée planctonique, des vacuoles à gaz. Ces petites vésicules sont remplies d'azote ou d'air. Elles subissent des variations de volume : écrasement suivi d'une disparition complète. Elles peuvent éventuellement se reformer en conditions favorables. Ces variations dans le nombre



de vacuoles permettent une montée ou une descente dans la colonne d'eau : une carence en azote provoque la diminution du nombre de vacuoles, et donc une descente dans la colonne d'eau. Les algues arrivent alors dans une zone plus riche en

azote minéral dissous, où elles reconstituent leurs pigments et peuvent alors s'adapter aux faibles luminosités des fonds. Un phénomène inverse peut provoquer la remontée des algues dans la colonne d'eau : elles atteignent alors la



**Collège de la région de L'Amiante**  
Service de la formation continue

**Compétences du programme**

- ✓ Localiser, évaluer et protéger des nappes d'eau souterraines.
- ✓ Construire des ouvrages de captage de l'eau souterraine et installer des systèmes de pompage.
- ✓ Caractériser, restaurer et faire le suivi environnemental des sites contaminés.
- ✓ Rechercher et évaluer des sites d'enfouissement.
- ✓ Contrôler, gérer et valoriser des déchets, sols et résidus miniers.

**Nouveau programme**

**HYDROGÉOLOGIE ET GÉOENVIRONNEMENT...**

un secteur en recrutement de main-d'œuvre

ATTESTATION D'ÉTUDES COLLEGIALES (A.E.C.)

Début : Janvier 2003  
Durée : 62 semaines à temps plein

**Pour inscription ou information**

Téléphone : (418) 338-8591 poste 294  
[elaflamme@cegep-ra.qc.ca](mailto:elaflamme@cegep-ra.qc.ca)

surface où elles meurent à cause de la lumière et de la température trop élevées.

### 4.3 Les travaux appliqués au lac

Ils ont débutés en 1970, et consistaient en deux points d'intervention : l'installation d'un réseau d'égouts relié à une station d'épuration en premier lieu, puis une expérience d'oxygénation des eaux profondes. Le but de l'oxygénation était d'accélérer le processus de restauration de la qualité de l'eau déjà entamé avec la construction du réseau d'égout.

#### 4.3.1 Travaux d'assainissement

Les travaux ont été terminés en juin 1972, date à laquelle 50 % des eaux usées étaient collectées et traitées avant rejet dans l'émissaire. En octobre 1973, la capacité est montée à 90 % des eaux usées. Les conditions climatiques de la région, caractérisées par une pluviométrie importante et irrégulière, entraînent de fréquentes pointes dans le débit des eaux collectées. Plusieurs déversoirs d'orage ont donc dû être prévus et rejettent leurs eaux dans les rivières ou directement dans le lac.

#### 4.3.2 Oxygénation hypolimnique

En 1976, la compagnie *Air liquide* installa, à titre expérimental, un dispositif d'oxygénation hypolimnique utilisant de l'oxygène pur.

#### Dispositif d'oxygénation hypolimnique :

Pompée par 32 m de fond, l'eau hypolimnique est introduite dans un « Turboxal », placé à la surface (figure 10). Il s'agit d'un système d'oxygénation à turbine, opérant dans une enceinte close de 1800 L. La teneur en oxygène de la phase gazeuse est maintenue à environ 60 % sous une surpression de quelques millibars, permettant de minimiser la dépense énergétique et de maintenir un rendement de transfert de l'oxygène voisin de 95 %. Une fois traitée, l'eau contient 20 à 25 mg/L d'oxygène et est renvoyée à 35 m de fond. Le débit traité est de 420 m<sup>3</sup>/h, ce qui permet de traiter un volume de 10 000 m<sup>3</sup> quotidiennement, avec 250 kg d'oxygène liquide.

#### Les campagnes d'oxygénation

Plusieurs campagnes d'oxygénation ont été réalisées sur le lac de Nantua. La première en août 1976 a fonctionné durant 1400 heures, pour un total de 15 tonnes

d'oxygène injectées. Cette campagne a surtout permis le réglage du système. Deux autres campagnes ont été réalisées les deux années suivantes, avec respectivement 51 et 60 tonnes d'oxygène employées.

La dernière campagne a été assortie d'un contrôle du devenir de l'oxygène. Ainsi, il a pu être mis en évidence que les teneurs en oxygène dissous demeuraient faibles. Deux hypothèses ont été proposées pour expliquer ces faibles concentrations :

- une consommation de l'oxygène par les sédiments réducteurs,
- une consommation de l'oxygène par une microfaune qui, ainsi stimulée, se serait développée dans les couches profondes de l'hypolimnion.

Les mesures effectuées ont aussi montré une diminution des teneurs en azote et phosphore pour les eaux de l'hypolimnion. Toutefois, la corrélation entre ces observations et les campagnes d'oxygénation demeure impossible à vérifier, du fait même de l'existence d'autres facteurs concourant à cette diminution (facteurs climatiques, diminution des rejets par la mise en service des systèmes d'égouts).

### 4.4 Bilan des opérations

Le lac a présenté une évolution très nette au cours de l'étude. La population des oscillaires se concentrait vers la surface jusqu'en 1973, mais par la suite, la teneur en phosphore minéral soluble a diminué de manière très nette et les couches d'oscillaires ont disparu dans les couches d'eau plus profondes.

Cependant, cette évolution apparemment favorable ne s'est pas accompagnée d'une diminution du nombre global des oscillaires, mais uniquement d'une diminution de la production primaire. Ceci s'explique par le fait que la biomasse se trouve dans une zone d'activité photosynthétique diminuée, à cause de la profondeur.

Sur le plan biologique, l'évolution la plus spectaculaire a donc été l'enfoncement des oscillaires à partir de 1974, grâce à la diminution des apports en nutriments, suite au détournement des eaux usés et aux

deux phénomènes suivants :

- l'optimum d'éclairement et de température varie avec la concentration ionique en phosphates et en nitrates dans le milieu,
- les apports en nutriments devenant insuffisants dans les couches superficielles, les oscillaires, capables de se déplacer grâce à leurs vacuoles à gaz, pourraient descendre à un niveau où les eaux sont plus fertiles.

Les mesures de détournement des eaux usées auraient dû permettre de faire passer les apports annuels en phosphore de 4,5 à 0,3 g/(m<sup>2</sup>.an). Cette carence en phosphore était théoriquement suffisante pour retrouver un lac de type oligotrophe à long terme. Cependant, les mesures de la charge annuelle de phosphore se situaient au-delà des prévisions : ceci s'explique par le fait que le phosphore était principalement présent sous forme d'oscillaires qui s'adaptent à toutes les conditions (paragraphe 4.2), et par le fait que la collecte des eaux usées n'était peut être pas encore optimale.

De la même manière, le système d'aération hypolimnique n'a pas eu l'effet escompté. L'oxygène introduit n'a pas été suffisant pour répondre à la demande des eaux. Plusieurs facteurs supplémentaires viennent expliquer cette surconsommation, en particulier des phénomènes liés à la consommation d'oxygène par les sédiments et les organismes qui s'y développent. En résumé, l'apport en oxygène qui aurait été efficace était de 3,5 à 4 t plutôt que 250 kg d'oxygène par jour.

Si, à la suite de ces interventions, les concentrations en nutriments sont repassées au niveau de celles d'un lac oligotrophe (moyenne hivernale en phosphore en 1978 de 8 µg/L), l'algue *O. rubescens* n'a malheureusement pas disparu. D'autres moyens de lutte ont alors été envisagés.

### 4.5 Autres moyens de lutte éventuels

Pour provoquer la disparition d'*O. rubescens* et favoriser l'apparition d'espèces phytoplanctoniques plus avantageuses, plusieurs techniques sont possibles, mais certaines ne sont pas applicables au Lac de Nantua :

- assèchement : le lac est trop grand,
- dilution : on ne dispose pas en quantité suffisante d'une eau de qualité suffisante,
- récolte de la biomasse : hors de portée des techniques de l'époque,
- interactions biologiques : un agent prédateur possible serait la carpe argentée, mais son efficacité réelle n'est pas certaine, et l'introduction d'un agent pathogène demanderait un travail de mise au point préalable important et inenvisageable à court terme.

Par contre, certaines techniques seraient applicables au lac :

- la destratification : les brusques variations de pression pourraient provoquer l'écrasement des vésicules à gaz ou les algues pourraient aussi être entraînées vers des zones à pH défavorable à leur croissance. Cette technique devrait permettre la circulation des eaux de la surface jusqu'à une profondeur limitée pour éviter le réchauffement des eaux du fond;
- la précipitation : en introduisant un réactif de floculation-précipitation à une profondeur convenable, le P-PO<sub>4</sub> précipiterait et serait alors inaccessible aux organismes;
- les algicides : il s'agirait de réaliser un seul traitement définitif, et la difficulté réside alors dans le choix d'un produit adapté à l'écosystème du lac de Nantua.

En résumé, pour éliminer définitivement les oscillaires du lac de Nantua, il fallait à la fois poursuivre la politique de protection mise en œuvre sur le bassin versant et adapter au lac les différentes interventions proposées pour une application isolée ou simultanée. Cependant, dans tous les cas, des études devaient être réalisées pour connaître les réactions de l'écosystème à ces traitements, et les nuisances ayant disparu, les riverains n'ont pas souhaité d'intervention supplémentaire coûteuse.

## 5. Conclusion

L'eutrophisation est un problème environnemental actuel, qui prend de plus en plus d'ampleur, tant au niveau continental que marin. Une forte eutrophisation a pour conséquence une réduction notable du nombre d'espèces aquatiques végétales et animales. Quelques espèces sont favorisées, au dépend d'autres espèces. L'eau voit aussi sa qualité se dégrader de manière importante : ses utilisations récréatives pour la production d'eau potable sont alors plus difficiles.

Cependant, la prise de conscience des pouvoirs publics ainsi que de la population permet de prendre les mesures nécessaires contre une avancée supplémentaire de l'eutrophisation.

Ces mesures consistent en premier lieu à réduire les apports de nutriments vers les réserves d'eau, par traitements des eaux usées, par déviation ou traitement des apports trop chargés, ou par des modifications des pratiques agricoles.

Dans un deuxième temps, les nuisances liées à l'eutrophisation peuvent être éliminées par des interventions directes dans les lacs : plusieurs techniques existent aujourd'hui et peuvent être efficaces.

Dans tous les cas, la connaissance du milieu doit être poussée : le bassin versant, l'écosystème présent dans le lac, les sources des apports de nutriments, la morphologie du lac, etc.

L'exemple du lac de Nantua, au niveau expérimental, prouve que certaines mesures peuvent être inefficaces si toutes les hypothèses ne sont pas envisagées. Les coûts de telles interventions étant élevés, tous les paramètres doivent être étudiés et pris en compte, pour une plus grande efficacité des interventions.

Pour une meilleure gestion de l'eutrophisation, les réseaux de surveillance doivent être poussés, au niveau des lacs, des rivières, des eaux souterraines et des eaux marines. D'autres études sur les impacts des nutriments doivent aussi être menées, sur le devenir des nutriments dans les divers écosystèmes, ou sur leurs effets cumulatifs par exemple.

## 6. Références bibliographiques

Association pour la promotion industrie agriculture, 1991, *L'azote en question*, Annales du colloque, Paris, les 29-30 janvier 1991, 213p.

R.Carignan, P.D'Arcy, S.Lamontagne, 2000, *Comparative impacts of fire and forest harvesting on water quality in Boreal Shield lakes*, Canadian Journal of Fisheries and Aquatic science, v57, suppl 2, pp105-117.

J.Feuillade, 1985, *Caractérisation et essais de restauration d'un écosystème dégradé : Le lac de Nantua*, INRA, 165p.

G.R.Ironside et W.Bond, 2001, *Les éléments nutritifs dans l'environnement canadien : rapport sur l'état de l'environnement au Canada*, Environnement Canada, Ottawa, 77p.

Institut français de l'environnement (IFEN), 1999, *L'eutrophisation des rivières en France : où en est la pollution verte?*, N°48, octobre 1999, 4p.

J.C.Lacaze, 1996, *L'eutrophisation des eaux marines et continentales*, Ellipses, 191p.

J.B.Leroy, 1984, *La pollution des eaux*, Que sais-je? N°983, Presses universitaires de France, Paris, 125p.

Ministère de l'environnement du Québec, 2001, *Critères de qualité de l'eau de surface au Québec*, document disponible sur : [www.menv.gouv.qc.ca](http://www.menv.gouv.qc.ca).

Organisation de coopération et de développement économiques, 1982, *Eutrophisation des eaux : méthodes de surveillance, d'évaluation et de lutte*, Paris, 164p.

S.O.Ryding et W.Rast, 1994, *Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs*, Masson, Unesco, 294p.

UNEP International Environmental Technology Centre, 2000, *Planning and management of lakes and reservoirs : an integrated approach to eutrophication*, Technical publication series, 67p.

R.G.Wetzel, 1975, *Limnology*, Philadelphie, 743p. 