

DFO - Library / MPO - Bibliothèque



12038803

# L'Homme, les lacs et la prolifération des algues

**John R. Vallentyne**

QL  
626  
C314F  
#22 F



Pêches et Environnement  
Canada

Fisheries and Environment  
Canada

Service des pêches  
et de la mer

Fisheries  
and Marine Service

D

LIBRARY  
FISHERIES AND OCEANS  
245 GERRARD ST. 8th FLOOR WEST  
OTTAWA, ONTARIO, CANADA  
K1A 0E6

QL  
626  
C314f  
#22.  
D

**L'HOMME,  
LES LACS ET  
LA PROLIFÉRATION DES ALGUES**

En plus de la série des *Publications diverses spéciales*, le Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement, publie le *Journal de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada* en volumes annuels de douze numéros et une série de *Bulletins*. Ces publications sont en vente à Imprimerie et Édition, Approvisionnement et Services Canada, Ottawa K1A 0S9. Les chèques ou mandats-postes, payables à l'avance en monnaie canadienne, doivent être faits à l'ordre du Receveur général du Canada.

---

*Rédacteur et  
directeur de l'information  
scientifique* J.C. STEVENSON, PH.D.

*Sous-rédacteur* J. WATSON, PH.D.

*Rédacteurs adjoints* JOHANNA M. REINHART, M.SC.  
D.G. COOK, PH.D.

*Production et documentation* J. CAMP  
G.J. NEVILLE  
MADELEINE PILON

Ministère des Pêches et de l'Environnement  
Service des pêches et de la mer  
Direction de l'information et des publications scientifiques  
Ottawa, Canada  
K1A 0E6

« Un lac est parmi les traits les plus expressifs et les plus admirables d'un paysage. C'est l'œil de la terre; en y plongeant ses regards, celui qui le contemple mesure la profondeur de sa propre nature. »

(extrait de *Walden ou la vie dans les bois*  
par Henry David Thoreau)

©Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1978

En vente par la poste à

Imprimerie et Édition  
Approvisionnement et Services Canada  
Ottawa, Canada K1A 0S9

ou chez votre libraire.

Un exemplaire de cette publication a été déposé, pour référence,  
dans les bibliothèques partout au Canada.

Canada: \$3.75  
Autres pays: \$4.50

N° de catalogue Fs 4-31/22F  
ISSN 0701-7669  
ISBN 0-660-01629-X

*Prix sujet à changement sans avis préalable*

Ottawa 1978

Conception graphique de la couverture: Peggy Steele Kitcher

Imprimé par:

Friesen Printers  
Altona, Manitoba

N° du contrat: OKT7-3372



L'eutrophisation dans l'Arctique canadien (août 1970): *en haut*, cours d'eau non pollué se jetant dans le lac Meretta (île Cornwallis), à 75° de latitude Nord; *en bas*, cours d'eau pollué par les algues et tributaire du même lac. La pollution est causée par les eaux usées de Resolute, localité d'une centaine d'habitants. Photographies de D.W. Schindler.



**À Ann Vallentyne**



PUBLICATION DIVERSE SPÉCIALE 22F

(Traduction française  
de la publication diverse spéciale de J.R. Vallentyne  
intitulée « The algal bowl: lakes and man »,  
publiée en 1974.)

**L'HOMME,  
LES LACS ET  
LA PROLIFÉRATION DES ALGUES**

**John R. Vallentyne**  
*Centre canadien des eaux intérieures*  
*Burlington (Ontario)*

MINISTÈRE DES PÊCHES ET DE L'ENVIRONNEMENT  
SERVICE DES PÊCHES ET DE LA MER  
*Ottawa 1978*

## **AVERTISSEMENT**

Les opinions exprimées dans ce livre sont celles de l'auteur, pas nécessairement celles du Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement. L'utilisation de noms de marque de commerce ne signifie aucunement une sanction du produit en question ou de la compagnie qui le fabrique. Il est interdit de faire mention du Ministère des Pêches et de l'Environnement ou de ce livre dans toute annonce publicitaire qui laisserait croire que le Ministère approuve, recommande ou sanctionne tout produit, substance ou marque de commerce cités dans ce livre, ou qui auraient pour but, directement ou indirectement, d'utiliser cette publication afin de promouvoir la vente de leur produit.

# TABLE DES MATIÈRES

Note biographique,	3
Avant-propos,	4
Résumé,	6
Abstract,	7
Aux lecteurs,	8
Chapitre 1	
L'envahissement des algues,	9
Chapitre 2	
Les lacs et l'Homme,	25
Chapitre 3	
Les lacs sont faits d'eau,	41
Chapitre 4	
La respiration des lacs,	57
Chapitre 5	
Le phosphore, étoile du matin,	79
Chapitre 6	
Guérir l'environnement,	93
Chapitre 7	
Les détergents et les lacs,	111
Chapitre 8	
L'année du NTA,	131

Chapitre 9

Symptômes ou éléments de solution?, 153

Remerciements, 165

Glossaire des termes scientifiques, 167

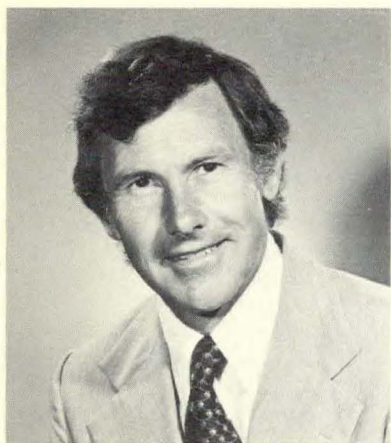
Références, 173

Lectures supplémentaires, 175

Appendice

Bilan de la situation en 1974, 177

Tableaux et figures, 180



## NOTE BIOGRAPHIQUE

Monsieur John R. Vallentyne est chercheur au Centre canadien des eaux intérieures à Burlington (Ontario). En tant que membre du Conseil de rédaction du rapport de la Commission mixte internationale de 1969 sur la pollution dans les Grands lacs, il a été mêlé à la controverse au sujet des phosphates détergents et de leurs effets sur les

lacs. Né au Canada, il s'est spécialisé en limnologie à l'Université Queen's de Kingston (Ontario) et à l'Université Yale à New Haven (Connecticut). Il a été professeur de biologie et d'écologie à l'Université Queen's, de 1952 à 1958, puis à l'Université Cornell, de 1958 à 1966. À son arrivée à l'Institut des eaux douces en 1966, il a collaboré à la formation d'un groupe d'experts en limnologie dont le but premier fut d'accroître nos connaissances sur les causes de l'eutrophisation liée aux activités humaines. En moins de deux ans, Winnipeg devint un centre de réputation internationale en limnologie. Récipiendaire du Journal Fund Silver Pen Award (de 1955 à 1959) pour ses écrits scientifiques, il est l'auteur de plus d'une soixantaine de textes scientifiques sur les lacs. En 1956-1957, il a été membre visiteur du laboratoire de géophysique du Carnegie Institution de Washington et a bénéficié, en 1964-1965, de la bourse d'études John Simon Guggenheim, en Italie. M. Vallentyne est président de l'Association internationale de limnologie (1974 à 1980).

## AVANT-PROPOS

En sous-titre de ce livre, on aurait été en droit d'inscrire: « Neuf essais par un schizophrène en quête d'un lecteur inexistant ». Chacun des chapitres tend à constituer un tout. J'ai de plus emprunté une personnalité double pour écrire ce livre, car je voulais m'adresser au profane tout en conservant une démarche scientifique.

Deux événements sont à l'origine de la rédaction de cet ouvrage. Le premier est la réaction très positive manifestée à la suite de la parution, en 1957, de mon article « The Principles of Limnology » dans *American Scientist*. Des chercheurs dans d'autres disciplines ont ainsi fait connaître leur intérêt pour les lacs et les phénomènes qui s'y rattachent. L'autre événement a été ma participation comme conseiller scientifique à la Commission mixte internationale, au cours des audiences de 1970 sur la pollution du bassin inférieur des Grands lacs. C'est là que j'ai découvert combien les industriels et le public étaient peu renseignés sur les lacs. En écoutant les exposés de ménagères, de maires, d'étudiants, de banquiers, de fermiers, de responsables de marinas, de chefs d'associations touristiques et de différents représentants de l'industrie et du gouvernement, j'ai pu constater l'étendue du manque d'information de toutes ces gens. Personne ne semblait avoir la moindre idée de ce que pouvaient être la « limnologie » et « l'eutrophisation », encore moins de ce qu'on avait pu en dire! Les principaux représentants de l'industrie des détergents ont fait preuve d'une ignorance de l'environnement qui m'a particulièrement déconcerté. Je me suis trouvé dans l'incapacité de me mettre honnêtement à leur place.

Le trait frappant de la controverse n'a pas été l'ignorance répandue de façon générale, mais bien la répartition inégale des connaissances parmi les différentes couches de la société. Les limnologues savent depuis une cinquantaine d'années que l'addition de deux éléments, le phosphore et l'azote, peut à elle seule causer une poussée de croissance végétale et d'autres signes d'eutrophisation dans les eaux naturelles. Le problème est que

personne d'autre ne le savait. Quand, en 1947, les détergents phosphatés furent mis sur le marché, il était impossible de deviner qu'en 1969, la consommation de triphosphate de sodium (TPS) s'élèverait, aux États-Unis seulement, à plus de 1 000 millions kg par année.

Il faut faire une distinction nette entre les connaissances nécessaires à la compréhension du phénomène de l'eutrophisation et celles qui sont utiles pour le contrôler. Les représentants de l'industrie des détergents ont sans cesse confondu les deux en insistant sur la complexité du problème, sans rappeler combien il était facile de le régler. Ils ne voulaient pas admettre que les phosphates de leurs produits étaient une des causes de l'eutrophisation et ils évitaient de reconnaître l'importance des phosphates dans la lutte contre elle.

Ce livre est un amalgame de sujets scientifiques et profanes. Si, en tant que public, nous voulons porter un jugement, nous devons être à même de comprendre le raisonnement qui le sous-tend. C'est pourquoi j'ai tenu à donner des explications claires et détaillées, tout en m'efforçant de rendre le texte lisible et intéressant. De plus, je n'ai pas hésité à faire état de mon opinion sur nombre de sujets qui, selon moi, méritent d'être exposés sur la place publique.

Mon lecteur virtuel fait partie du groupe social intéressé par les questions d'environnement pour qui les traités scientifiques sont trop fastidieux à lire et les ouvrages illustrés sur la nature, trop superficiels pour le renseigner adéquatement sur les dangers qui le menacent. J'espère que les experts de réputation internationale en limnologie, en géochimie et en biologie des eaux douces encourageront la diffusion de ce livre qui s'appuie sur leurs découvertes et celles de leurs prédécesseurs. Je souhaite également qu'il soit d'accès facile pour le grand public et qu'il serve aux étudiants en limnologie et autres disciplines connexes.

John R. Vallentyne

## RÉSUMÉ

VALLENTYNE, J.R., 1978, L'Homme, les lacs et la prolifération des algues, *Fish. Res. Board Can. Misc. Spec. Publ.* 22F: 196 p.

Cet ouvrage, préparé à l'intention des non-spécialistes, traite des lacs et de la façon dont ils sont affectés par les apports de matières nutritives découlant des activités humaines (eutrophisation due à l'Homme). Ses neuf chapitres examinent les sujets suivants: 1° la classification biologique des lacs et l'influence des composés de phosphore et d'azote sur la croissance des algues et des herbes aquatiques; 2° l'histoire de l'eutrophisation due à l'Homme dans le lac de Zurich, le lac Érié et une chaîne de quatre lacs dans le voisinage de Madison (Wisconsin); 3° le mode d'action du soleil et du vent sur la circulation verticale de l'eau des lacs; 4° les interactions de l'acide carbonique, de l'oxygène et de la matière organique dans les eaux naturelles; 5° le phosphore dans la biosphère; 6° les méthodes de lutte contre l'eutrophisation due à l'Homme; 7° les phosphates détersifs, cause de l'eutrophisation et la lutte contre cette dernière; 8° la controverse de 1970 sur l'usage du nitrilotriacétate (NTA) en remplacement du triphosphate de sodium dans les détersifs; 9° le problème de l'eutrophisation due à l'Homme vu comme un symptôme qui cache une signification plus profonde, de la nature même du drame de Faust. Alors que le thème central de l'ouvrage porte sur le phosphore en tant que clé de la lutte contre l'eutrophisation due à l'Homme, une analyse des causes réelles fait ressortir la nécessité de limiter la croissance démographique\*. Le lecteur trouvera en fin de volume un glossaire des termes scientifiques, des références suivies d'une liste de lectures supplémentaires ainsi qu'un appendice comprenant un bilan de la situation en 1974 et une série de tableaux et de figures.

---

\* Voir note 39, p. 149.



## ABSTRACT

VALLENTYNE, J.R., 1978, L'Homme, les lacs et la prolifération des algues, *Fish. Res. Board Can. Misc. Spec. Publ.* 22F: 196 p.

This is a book for nonspecialists about lakes and how they are affected by nutrients derived from human activities (man-made eutrophication). The nine chapters cover the following topics: (1) the biological classification of lakes and the role of phosphorus and nitrogen compounds in stimulating the growth of algae and aquatic weeds; (2) historical accounts of man-made eutrophication of the Lake of Zürich, Lake Erie, and a chain of four lakes in the vicinity of Madison, Wis.; (3) how the vertical circulation of water in lakes is regulated by the action of sun and wind; (4) interrelationships among carbon dioxide, oxygen, and organic matter in natural waters; (5) phosphorus in the biosphere; (6) methods for control of man-made eutrophication; (7) detergent phosphates in the cause and control of man-made eutrophication; (8) the 1970 controversy over nitrilotriacetate (NTA) as a replacement for sodium triphosphate in detergents; (9) a view that man-made eutrophication is better regarded as a sign of a deeper, Faustian problem than as a problem in itself. While the central theme of the book is that phosphorus is the key to the control of man-made eutrophication, an analysis of ultimate causes shows the need to control demographic (population  $\times$  technological) growth. A list of scientific terms and definitions is included, suggestions for additional reading, an appendix with an updating of events to 1974, and a sequence of tables and figures for the scientifically inclined reader.

## AUX LECTEURS

Nous suggérons aux lecteurs qui ont peu de connaissances scientifiques de débiter au Chapitre 7 et de poursuivre avec les autres chapitres dans l'ordre suivant: 8, 1, 2, 5, 6, 9, en s'aventurant à l'occasion dans les Chapitres 3 et 4 qui contiennent certaines notions importantes de limnologie. Il serait également utile de consulter de temps à autre les figures et les tableaux regroupés entre les pages 180 et 188.

N'oublions pas que, pour garder les lacs propres, nous devons tous faire notre part.

# CHAPITRE 1

## L'envahissement des algues

Classification biologique des lacs et exposé des facteurs inhérents au phénomène de l'eutrophisation liée aux activités humaines.

Peu avant l'an 2000, si rien n'est fait pour freiner la prolifération des algues, nous devons faire face à un problème aussi grave que celui des grandes tempêtes de poussière qui, lors des années 30, avaient envahi l'Amérique du Nord. Découlant de la surexploitation, au cours d'une période de sécheresse et de dépression prolongées, des terres peu productives des grandes plaines à l'ouest du Mississippi, ces tempêtes ont été favorisées par la diminution du couvert végétal et l'érosion du sol par le vent. Ces tourbillons voilaient le ciel et recouvraient tout d'argile et de sable; ils aveuglaient les animaux, endommageaient les moteurs et dévastaient les terres fertiles sur des centaines de kilomètres. Au centre de la région soumise à ce fléau, des barbiers refusèrent de raser leurs clients, alléguant qu'en moins de deux coups, le rasoir s'émoussait à cause des particules de sable incrustées dans la peau. Jusqu'au 12 mai 1934, la situation empira, culminant en ce qui a probablement été la pire tempête de poussière de l'histoire de la terre, où plus de 300 millions de tonnes de terre arable furent entraînées vers l'est du continent nord-américain.

Tout comme ces tempêtes de poussière sont attribuables à un mauvais usage des terres, la prolifération des algues provient de la mauvaise utilisation de l'eau. On en retrouve les foyers dans des régions fortement peuplées et industrialisées. Les eaux d'égout riches en phosphore et en azote, les eaux naturelles, le soleil et la chaleur conjuguent leurs effets pour accentuer le problème de l'eutrophisation liée aux activités humaines.

« L'eutrophisation » est le mot employé par les limnologues pour décrire le processus complexe des transformations qui surviennent dans les écosystèmes aquatiques et qui sont provoquées par l'augmentation des déversements dans l'eau des éléments dont se nourrissent les plantes. La réaction immédiate de l'écosystème se traduit par un accroissement de la photosynthèse et de la flore. Ceci provoque: une augmentation de la productivité à tous les niveaux de la chaîne alimentaire (y compris celui du poisson); des changements successifs chez les espèces habitant ces écosystèmes; enfin, des réductions en teneur d'oxygène dissous dans les eaux les plus profondes.

L'eutrophisation est un problème dans les régions riches qui vivent à l'heure des progrès techniques, car l'eau y est plus appréciée pour des motifs d'esthétique, les loisirs qu'elle favorise et la ressource qu'elle constitue par elle-même, que comme source de production de nourriture. Dans les régions qui ne sont pas aussi riches, la situation est exactement à l'opposé: on estime l'eau pour la nourriture qu'elle produit. Afin de comprendre l'évolution, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, du phénomène de l'eutrophisation liée aux activités humaines, il est nécessaire de dégager brièvement les fondements biologiques de la classification trophique (relative à la production de nourriture) des lacs.

La classification biologique des lacs repose sur leur productivité. Les plantes vertes constituent le premier chaînon du cycle alimentaire en transformant l'énergie solaire en calories qu'on retrouve dans les aliments; leur abondance et leur taux de production déterminent la productivité à tous les échelons supérieurs de la chaîne alimentaire. Dans les eaux peu colorées (les matières brunes du sol colorent les lacs marécageux), on distingue généralement trois types de lacs, selon une échelle de productivité croissante: ce sont les lacs *oligotrophes*, les lacs *mésotrophes* et les lacs *eutrophes*.

Les lacs *oligotrophes* ont une faible teneur en éléments nutritifs. En règle générale, ce sont les lacs d'une profondeur moyenne de plus de 15 m et d'une profondeur maximale de plus de 25 m.

Les eaux y sont claires. La croissance végétale se situe à différentes profondeurs et non uniquement près de la surface. Ces lacs ont des teneurs en oxygène dissous élevées dans l'hypolimnion (couche inférieure et froide des lacs stratifiés thermiquement). En été, la truite, le corégone de lac, le doré et d'autres espèces de poissons fort appréciées des pêcheurs vivent en eaux froides, profondes et riches en oxygène.

Parmi les lacs oligotrophes les plus grands et les mieux connus au monde, on compte le Grand lac de l'Ours et le Grand lac des Esclaves, dans le Nord-Ouest du Canada, les lacs Supérieur et Huron, dans le bassin du Saint-Laurent, le lac Tahoe, aux États-Unis, le lac Léman en Europe et le lac Baïkal en U.R.S.S.

En résumé, les lacs oligotrophes sont plutôt profonds, transparents et ils ont une faible densité de vie végétale en surface. Un disque de Secchi<sup>1</sup> peut y être aperçu jusqu'à une profondeur de 3 m ou plus en été.

Les lacs *eutrophes* se situent à l'opposé. Ils sont riches en matières nutritives, ce qui favorise la croissance d'algues bleues dans les eaux de surface. Dans les cas extrêmes, ces lacs ont l'apparence et la consistance d'une épaisse soupe aux pois. Un enchevêtrement de plantes enracinées et d'algues filamenteuses peut également tapisser le fond des eaux peu profondes, dû à la lutte qui existe entre le plancton (en suspension dans l'eau) et le benthos végétal (fixé au fond), pour la lumière. En été, les eaux deviennent généralement si embrouillées à cause de la croissance végétale, qu'un disque de Secchi y disparaît à une profondeur d'un mètre ou moins.

En règle générale, les lacs naturellement eutrophes sont peu profonds; les profondeurs moyennes étant inférieures à 10 m et les profondeurs maximales, inférieures à 15 m. La teneur en oxygène dissous tend à s'amenuiser dans les couches inférieures au

---

1. Disque blanc de 20 cm de diamètre utilisé pour mesurer la turbidité de l'eau. Le premier à s'en servir fut le commandant Cialdi, amiral en chef de la marine papale, en 1865. À bord de *L'Immacolata Concezione* et accompagné du professeur Secchi, il fit une série d'essais conduisant à la mise au point et à la normalisation du disque de Secchi.

cours des périodes de circulation restreinte des eaux, ainsi qu'en été, s'il y a stratification thermique du lac et en hiver, si la neige et la glace le recouvrent. Les faibles concentrations en oxygène dissous et d'autres facteurs font qu'un poisson comme la truite ne peut survivre dans ces lacs. Les espèces dominantes sont plutôt des espèces d'eau chaude, membres des familles des cyprins et des achigans (la carpe étant, en certains cas extrêmes, un des représentants les plus typiques).

La partie sud du lac Winnipeg dans le centre du Canada, la partie ouest du lac Érié dans le bassin du Saint-Laurent, le lac Balaton en Hongrie et le lac Victoria en Afrique sont des exemples de lacs eutrophes. De vastes réserves de matières nutritives, une production élevée à tous les échelons de la chaîne alimentaire, une faible profondeur et une transparence réduite par la croissance excessive des plantes en surface les caractérisent.

Les lacs *mésotrophes* occupent une place intermédiaire entre les deux extrêmes déjà décrits. Cette catégorie englobe tous les lacs dont la teneur en matières nutritives, la profondeur, la productivité biologique, la pureté de l'eau et la quantité en oxygène dans l'hypolimnion se situent entre celles des lacs oligotrophes et des lacs eutrophes. La perchaude est l'une des nombreuses espèces de poissons qui atteignent une abondance maximale dans les lacs mésotrophes.

À l'origine, cette classification biologique des lacs se faisait à partir des espèces qui constituaient la faune benthique (animaux vivant sur le fond) présente dans les sédiments des profondeurs. On a observé que certaines espèces étaient plus sensibles que d'autres aux faibles concentrations en oxygène. C'est pourquoi, même de nos jours, il n'est pas rare de classer les lacs d'après les espèces de larves d'insectes qu'on y trouve. Par exemple, un lac à *Chironomus plumosus* est eutrophe, un lac à *Sergentia coracina*, mésotrophe et un lac à *Tanytarsus lugens*, oligotrophe.

Ainsi, un simple échantillon d'invertébrés, prélevé au fond d'un lac, pourrait témoigner des conditions antérieures d'appauvrissement en oxygène. Ceci servirait ensuite à une classification des lacs selon les trois catégories déjà mentionnées. Il semble

pourtant qu'on ait confondu deux facteurs lors de l'évaluation de l'état trophique des lacs. L'un d'entre eux était l'apport d'éléments nutritifs déterminé par les événements se produisant sur la terre ferme. L'autre était la concentration en oxygène dans les eaux profondes due principalement à la forme de la cuvette lacustre puis à l'apport d'éléments nutritifs.

À mesure que l'on comprit les causes à l'origine de la classification biologique des lacs, il devint évident que trois facteurs déterminaient la productivité et, par conséquent, la position d'un lac sur l'échelle trophique. On les définit maintenant comme étant l'apport de matières nutritives, la forme et la profondeur de la cuvette lacustre et le climat (plus particulièrement la lumière et la température).

Dans une certaine zone climatique, on a observé que les lacs situés dans des régions à sol riche en éléments nutritifs étaient plus productifs que les lacs de forme et de dimension similaires situés dans des régions de rocs ignés. Dans des régions climatiquement et géologiquement comparables, on a remarqué que les lacs peu profonds étaient plus productifs que les lacs profonds. On a aussi noté que, annuellement, les lacs tropicaux étaient plus productifs que les lacs situés en altitude ou près des pôles.

La classification biologique des lacs une fois terminée, nous devons étudier leur évolution. Les lacs ne sont que des accidents géographiques temporaires. Peu à peu, ils s'emplieront de sédiments et seront remplacés par des étendues herbeuses ou boisées. L'exception à cette règle se retrouve dans des régions où le sol s'abaisse comme, par exemple, les fossés d'effondrement des grands lacs africains. Au cours de longues périodes géologiques, ces lacs ont pu conserver, quelquefois même accroître leur profondeur.

La plupart des lacs actuels sont récents en termes d'évolution terrestre. Ils ont été formés par l'action de déblayage et l'abandon de débris des vastes glaciers qui recouvraient les terres des hémisphères nord et sud, il y a 10 000 ou 15 000 ans. Là où un bassin imperméable apparaissait par déblayage ou verrouillage, un lac naissait. En comparant des cartes illustrant la distribution

primitive des glaciers et la distribution actuelle des lacs naturels, on voit facilement la relation qui existe entre la glaciation et la naissance des lacs.

Les sédiments s'accumulent dans ces lacs à raison d'environ un millimètre par année. Ceci paraît minime mais, après les 10 000 ou 15 000 ans qui se sont écoulés depuis le retrait des derniers champs de glace, cela représente une accumulation moyenne de 10 à 15 m de sédiments.

Les secrets du passé gisent dans ces sédiments qui se sont déposés, particule à particule, pendant de longues périodes. Les renseignements sont là: il suffit de savoir quelles questions poser, comment y répondre et comment interpréter les résultats. Les limnologues (spécialistes de l'étude scientifique des eaux continentales) peuvent le faire à partir d'analyses détaillées des vestiges biologiques et biochimiques ainsi conservés. On peut même y trouver des traces de pollen des arbres, des arbustes et des herbes qui poussaient dans la région.

Sachant que les lacs profonds sont plutôt oligotrophes et les lacs peu profonds, eutrophes, les limnologues en ont déduit que les lacs oligotrophes devenaient eutrophes avec le temps. Ceci a en effet été prouvé au cours des années 30 et 40 par les fossiles d'organismes présents dans les longues carottes de sédiments prélevées au fond des lacs. Les fossiles d'insectes trouvés dans les sédiments les plus profonds (donc, plus anciens) correspondaient à des formes telles que *Tanytarsus*, caractéristique des lacs oligotrophes. Aux niveaux supérieurs (plus récents), on retrouvait des fossiles de lacs mésotrophes tel *Sergentia*, puis de lacs eutrophes tel *Chironomus*. Ces découvertes ont été confirmées et généralisées grâce à l'analyse des vestiges de diatomées, de cladocères (puces d'eau, groupe zooplanctonique) et de pigments d'origine végétale. Ces données ont indiqué qu'un processus naturel d'eutrophisation lente va de pair avec le vieillissement des lacs et leur remplissage par les sédiments.

Plus récemment, quelques limnologues ont supposé qu'on avait peut-être exagéré l'importance du processus naturel de l'eutrophisation en choisissant sciemment des lacs maintenant eutro-



phes. À cause des changements de forme du bassin lacustre entraînés par la sédimentation, on a confondu les conséquences de l'appauvrissement en oxygène avec les variations dans l'apport de matières nutritives. Lors de l'eutrophisation naturelle, le renouvellement des espèces peuplant un lac provenait avant tout d'un appauvrissement en oxygène causé par la forme du bassin plutôt que de variations de la teneur en matières nutritives. (L'hypolimnion disparaît quand un lac devient si peu profond que les courants créés par le vent entretiennent une circulation des masses d'eau à toutes les profondeurs à longueur d'année.) On a aussi des preuves que certains lacs profonds et oligotrophes ont déjà été eutrophes. Dans les régions sensibles aux variations climatiques, l'état trophique d'un lac peut être déterminé par le climat seulement.

L'eutrophisation naturelle est donc un processus plus compliqué et peut-être plus lent qu'on a d'abord pu le croire. Le fait que, depuis la fin des dernières glaciations, plusieurs lacs profonds soient continuellement demeurés oligotrophes porte à croire que l'eutrophisation naturelle est un processus incommensurablement long.

À l'opposé, l'eutrophisation liée aux activités humaines constitue un processus beaucoup plus rapide, agissant dans des milliers de lacs depuis quelques décennies. Elle est directement causée par l'enrichissement des eaux en matières nutritives, principalement des composés du phosphore et de l'azote. Ces matières nutritives proviennent des eaux usées municipales et, dans une proportion moindre, de l'exploitation agricole et de l'élevage.

À la suite de cet enrichissement, de nombreuses nappes d'eau ont commencé à se couvrir d'algues ou à être envahies d'herbes et d'algues enracinées et filamenteuses. L'Homme n'a mis que quelques années ou décennies à créer un phénomène qui, sans lui, en aurait nécessité des milliers ou qui ne se serait peut-être jamais produit.

Ces chaînes de réactions biologiques et chimiques obéissent à un modèle qui se répète, indépendamment du temps ou de l'en-

droit. L'histoire du lac de Zurich, premier cas d'eutrophisation causée par l'Homme sur lequel nous sommes bien renseignés, s'est fidèlement reproduite dans des milliers de lacs, de réservoirs et d'estuaires partout dans le monde. De nos jours, l'eutrophisation liée aux activités humaines peut survenir dans une petite nappe d'eau près d'une localité isolée du nord du Canada, comme au lac Meretta près de Resolute sur l'île Cornwallis, tout comme elle a pu se produire, il y a des millénaires, près des sites occupés par les anciennes civilisations. Le comportement humain n'a apparemment pas changé depuis qu'il a été dit dans l'Ancien Testament: « Je vous ai introduits dans un pays de vergers pour en manger les fruits et en goûter les biens; en y entrant, vous avez souillé ma terre et fait de mon héritage un lieu qui me fait horreur. » (Jérémie 2,7.)

L'eutrophisation causée par l'Homme entraîne la détérioration de la qualité de l'eau. L'eau potable qui était claire et pure a dorénavant un goût étrange et elle se trouble quand les algues l'infestent. On doit nettoyer plus souvent les filtres des circuits municipaux et industriels d'approvisionnement en eau. Plusieurs plages où il était agréable de se baigner sont maintenant recouvertes d'algues visqueuses ou même, parfois, encombrées d'algues bleues ou d'autres plantes aquatiques accumulées par les orages. Profitant de la production accrue de la nourriture constituée par les végétaux et les invertébrés, les poissons se multiplient, mais les espèces changent. La truite et le corégone de lac, s'ils sont présents, voient leur nombre diminuer au profit d'espèces qui ont un intérêt économique moindre. La perche peut connaître une certaine multiplication temporaire, mais elle sera remplacée par des poissons plus résistants comme la carpe.

Pour la plupart des gens, ces changements passent inaperçus; ils permettent toutefois au spécialiste de faire des extrapolations et de déterminer le sens et la vitesse de l'évolution. L'apparition de certaines algues bleues, comme *Oscillatoria rubescens*, ou le passage d'une communauté benthique composée de larves de chironomidés à une communauté de sangsues (oligochètes aquatiques) peut suffire à caractériser les transformations antérieures et à prévoir celles qui viennent.

Plus fréquemment, c'est le bouleversement total dans la composition des espèces de l'écosystème aquatique qui caractérise l'eutrophisation. Dans une telle situation, l'expérience, le jugement et l'intuition sont nécessaires à l'interprétation des données. Cela ne relève pas plus du profane que la médecine, par exemple.

Les eaux eutrophes et naturellement productives sont généralement localisées dans des régions où le sol est fertile. Les cas d'eutrophisation causée par l'Homme, d'autre part, suivent les activités et les établissements humains. Toutefois, il existe tant de ressemblances entre les résultats de ces deux processus qu'on pourrait facilement se méprendre sur leurs origines respectives. De fait, c'est précisément cette confusion qui en a amené plusieurs à se tromper alors qu'ils tentaient de relier les états trophiques à l'eutrophisation.

C'est sous deux aspects, la vitesse et la réversibilité du processus, que l'eutrophisation naturelle et l'eutrophisation causée par l'Homme diffèrent l'une de l'autre. L'eutrophisation naturelle est un processus lent, quasi irréversible dans certaines conditions climatiques données. Elle est causée par un changement de la forme et de la profondeur du bassin à mesure que ce dernier s'emplit de sédiments. Afin de renverser le processus, il faudrait nettoyer le bassin, ce qui n'est pas une mince tâche.

D'autre part, l'eutrophisation causée par l'Homme est rapide et réversible. Elle est causée par un accroissement de l'apport et de la teneur en matières nutritives dans une masse d'eau à peu près constante, sans qu'il y ait de modification notable de la forme ou de la profondeur du bassin. On peut renverser le processus en éliminant cet apport. L'inversion du processus ne signifie rien d'autre que le retour aux conditions qui prévalaient avant que l'Homme n'intervienne. Un lac qui était eutrophe ne deviendra pas oligotrophe à la suite de l'élimination des matières nutritives produites par les activités humaines. Il ne peut que revenir à son niveau d'eutrophisation primitif.

Là où des mesures ont été prises en vue d'une telle élimination, on a constaté que les lacs pollués montraient, après quelques années à peine, des signes de guérison et de retour à leur état ori-

ginal. Dans la plupart des cas toutefois, on ne s'attaque pas à toutes les sources et les résultats sont inférieurs à ceux qu'on escomptait. Même quand toutes les dispositions sont prises, il faut attendre quelques années avant de pouvoir faire une distinction précise entre une véritable guérison et les fluctuations annuelles causées par le climat ou d'autres facteurs.

Les éléments nutritifs les plus importants à l'origine de l'eutrophisation sont le phosphore et l'azote. Pour juger de leur effet sur la croissance des plantes aquatiques, on n'a qu'à tenir compte des quantités de phosphore (P), d'azote (N) et de carbone (C) dans certains tissus végétaux caractéristiques, relativement à leur poids sec et à leur poids humide. Pour une communauté ordinaire d'algues, le poids sec est d'environ 1P:7N:40C:100 et le poids humide, de 1P:7N:40C:500. Ceci veut dire que si l'un des trois éléments limite la croissance des plantes dans un lac et que tous les autres éléments présents sont en quantités excédant les besoins physiologiques, le phosphore peut, en ce qui a trait aux algues, produire 500 fois son propre poids en matière vivante, l'azote 71 (500:7) fois et le carbone, 12 (500:40) fois.

Le phosphore et l'azote sont deux facteurs qui limitent la croissance des plantes. Ils sont 1 000 fois plus concentrés dans les eaux usées que dans les eaux des lacs non encore perturbées par l'Homme. Il n'est donc pas surprenant que leur addition aux eaux naturelles ait l'effet d'un coup de fouet, quant à la croissance des plantes. Un apport relativement modeste produit des résultats très spectaculaires.

Ceux qui s'occupent de l'élevage du poisson en étang connaissent cette réaction depuis aussi longtemps que les cultivateurs qui, eux, ont pu l'observer sur leurs terres. Dans les étangs d'élevage, on ajoute des fertilisants à base de phosphates et de nitrates afin de stimuler la croissance des algues, provoquant ainsi un transfert d'énergie à tous les échelons de la chaîne alimentaire, y compris celui du poisson.

Le rapport existant entre les quantités relatives des différents éléments nécessaires à la croissance des plantes et les quantités

déjà disponibles dans le milieu aquatique est comparable à celui de l'offre et de la demande utilisé en économie.

Les plantes ont besoin des éléments contenus dans l'eau afin de pouvoir se reproduire; cette demande est en relation directe avec les concentrations des éléments chimiques présents dans les cellules des plantes. Quand le taux de l'apport des différents éléments correspond exactement aux quantités présentes dans la communauté végétale, le système fonctionne comme une fabrique bien administrée. La quantité de matières brutes en réserve sera alors proportionnelle à celle contenue dans le produit fini.

D'autre part, si une ou plus d'une matière première est en quantité limitée par rapport aux autres, le taux global de production sera ralenti. L'écart entre l'offre et la demande nous révèle quel élément peut limiter le plus la production. Ainsi, plus l'écart sera grand pour un élément donné, plus ce dernier limitera la croissance.

On a calculé les rapports entre l'offre et la demande pour les 15 ou 20 éléments nécessaires à la croissance des différentes espèces de plantes d'eau douce<sup>2</sup>. En divisant le pourcentage de la composition chimique des plantes par celui de la composition chimique moyenne des eaux fluviales du monde, on a obtenu les chiffres suivants pour la fin de l'hiver (avant le début de la croissance des algues) et le milieu de l'été (au sommet de l'abondance des plantes):

Demande:offre  
(% des plantes:%des eaux fluviales)

Élément	Demande:offre (% des plantes:%des eaux fluviales)	
	Fin de l'hiver	Milieu de l'été
Phosphore	80 000	jusqu'à 800 000
Azote	30 000	jusqu'à 300 000
Carbone	5 000	jusqu'à 6 000
Fer, silicium	généralement faibles, mais variables	
Tous les autres éléments	moins de 1 000	

2. Le lecteur trouvera un tableau complet de ces données à la page 180.

On dégage à partir de ce tableau que le phosphore et l'azote sont les deux éléments qui, le plus souvent, limitent la croissance des plantes des écosystèmes aquatiques. Leur importance peut varier d'une région à l'autre mais, pour favoriser la croissance, ils doivent y être présents en même temps. Là où le phosphore et l'azote sont en abondance, comme dans les étangs de stabilisation, il arrive que ce soit le carbone qui limite la croissance des plantes. Toutefois, ce dernier est souvent absorbé par le dioxyde de carbone présent dans l'air. Pour ce qui est des autres éléments nécessaires à la croissance végétale, il n'y a aucun indice permettant de croire qu'ils jouent un rôle comparable à ceux du phosphore et de l'azote. (Néanmoins, les diatomées, espèces d'algues à parois siliceuses, peuvent dépendre des réserves existantes de silicium pour leur croissance; on a aussi observé que le fer pouvait limiter la croissance végétale dans certaines eaux.)

En 1970, l'Américain moyen a déversé 1,6 kg de phosphore et 4,5 kg d'azote dans l'eau, sous forme de déchets municipaux. À son insu, il a en plus déversé un dixième de cette quantité de phosphore et deux fois celle de l'azote par son apport à la production nationale de denrées agricoles et d'animaux de boucherie.

Par conséquent, si, en une année, une personne déverse 2 kg de phosphore et 12 kg d'azote dans l'eau, contribuant ainsi à la croissance d'une tonne de matière vivante végétale, une ville d'un million d'habitants y déversera 2 millions kg de phosphore et 12 millions kg d'azote, contribuant ainsi à la croissance d'un million de tonnes de matière vivante végétale.

Un problème différent, engendré par l'agriculture, est celui des animaux domestiques qui sont rassemblés et engraisés dans des parcs avant leur expédition sur le marché. Sachant que les déchets animaux produits à la ferme excèdent normalement de 10 fois les déchets humains dans la plupart des pays, on comprend facilement dans quelle mesure le cheptel vif peut contribuer à l'eutrophisation. Étant donné qu'une vache produit autant de déchets que 16 humains adultes, un parc d'engraissement de 1 000 têtes peut produire autant de déchets qu'une petite ville.

On pourrait donc supposer, à partir de ce qui a été dit jusqu'à maintenant, qu'il existe une relation directe entre les quantités avec lesquelles les lacs sont approvisionnés en composés phosphorés et azotés et la production de matière végétale qui en résulte. Ceci est vrai, mais seulement d'un point de vue superficiel et statistique. Plusieurs facteurs modifient le degré de participation des éléments nutritifs à la croissance des végétaux. En plus de la quantité de matières nutritives fournies au milieu, il nous faut considérer les facteurs suivants:

- 1) la quantité de lumière disponible pour les plantes vertes (réglée par la lumière solaire et la concentration des matières en suspension ou des matières colorantes dissoutes dans l'eau);
- 2) la concentration et la disponibilité des éléments nutritifs (variant selon la nature et l'emplacement des sources);
- 3) la forme et la profondeur du lac (dont on traitera en détail plus loin);
- 4) la température (régie par la géographie et le climat et dont l'action sur les différentes espèces végétales varie);
- 5) la formation de sédiments par les algues et les particules en suspension enrobées d'éléments nutritifs (variant avec la turbulence des eaux et la dimension des particules);
- 6) l'évacuation des algues et des matières nutritives dans l'eau de décharge du lac (influencée par la durée de renouvellement de l'eau d'un lac);
- 7) l'activité du zooplancton filtreur, des herbivores vivant sur le fond et des poissons (qui consomment la nourriture végétale à mesure qu'elle est produite);
- 8) le parasitisme par les bactéries, les champignons microscopiques et autres micro-organismes (qui accroissent la mortalité des plantes par la maladie);
- 9) la régénération des matières nutritives à partir de la décomposition, dans l'eau et les sédiments, des débris végétaux et animaux;

- 10) le mélange des eaux du lac par l'action du vent (qui, quelquefois, transporte les algues sous la couche euphotique ou provoque la remontée des eaux du fond, riches en éléments nutritifs).

L'interaction de tous ces facteurs invite le limnologiste à simplifier et à y mettre un peu d'ordre.

L'eutrophisation n'est évidemment pas le propre des lacs, mais les phénomènes qui s'y rattachent sont plus apparents dans les masses d'eau stagnante comme les lacs, les réservoirs et les estuaires que dans les rivières. Ceci est dû à la pénétration de la lumière, à la circulation de l'eau et à l'aération.

Pour nombre de raisons la production végétale est plutôt faible en amont des rivières. Les rives y sont assez fortement boisées, ce qui filtre la lumière; les éléments nutritifs sont entraînés avant que les plantes n'aient le temps de les utiliser au complet; enfin, les concentrations de ces éléments nutritifs sont généralement faibles. En se rapprochant de l'embouchure où les concentrations en éléments nutritifs peuvent être élevées, les limons et argiles en suspension s'opposent fréquemment à la pénétration de la lumière.

Les lacs et les réservoirs sont des bassins de sédimentation. À cause de leur étendue, ils sont plus exposés à la lumière solaire. La plus grande transparence de l'eau et son exposition aux radiations solaires permettent une meilleure utilisation des éléments nutritifs.

Le second facteur en importance, le temps de renouvellement des eaux du lac, peut facilement être compris si l'on fait une petite expérience dans sa cuisine. D'abord remplir de lait un coquetier ou un petit verre à cocktail. Placer ensuite un verre dans un gros récipient dans l'évier. Le lait joue le rôle de polluant à introduire dans le jet d'eau du robinet; le verre, lorsque rempli d'eau, tient lieu de lac. Le récipient est uniquement là pour recueillir le trop-plein qu'on peut par la suite mesurer.

D'abord on fait couler le robinet à débit moyen. Lorsque l'eau remplit le verre et commence à déborder, verser le lait doucement



dans le jet d'eau. On observera que le jet d'eau se purifie immédiatement du lait; mais, pour ce qui est du verre, cela prend de 8 à 10 remplacements de son volume avant que le liquide qu'il contient soit aussi transparent qu'au début.

Cela prouve que les produits chimiques en solution dans l'eau des lacs ne sont pas éliminés aussi rapidement ou complètement que dans les cours d'eau. Pendant ce temps, les matières nutritives provenant des déversements dus aux activités humaines s'accumulent. C'est à ce moment-là que surgissent les problèmes.

Ceci complète la question de la classification biologique des lacs en rapport avec l'eutrophisation. Le prochain chapitre insistera particulièrement sur l'histoire détaillée de trois lacs que l'Homme a fertilisés sans le savoir et sur le rôle des égouts dans l'eutrophisation.



## CHAPITRE 2

### Les lacs et l'Homme

L'historique de l'eutrophisation, du rejet et du traitement des eaux usées, illustré à l'aide de trois exemples.

L'enrichissement des eaux naturelles par les éléments nutritifs amène des changements chimiques et biologiques dans la qualité de l'eau. On peut les juger comme étant bénéfiques ou nuisibles, selon l'usage auquel on destine les eaux en question. Du point de vue des loisirs, de l'approvisionnement en eau potable ou de l'esthétique, ces changements ne sont généralement pas souhaités. Pour la production du poisson, ils le seront plus ou moins, tout dépend si le poisson qui vit dans ces conditions eutrophes est source de nourriture ou non. C'est notre situation financière qui nous fait voir l'eutrophisation comme un mal ou comme un bienfait. Après tout, il est peut-être équitable que, dans notre civilisation de gaspillage, les éléments nutritifs présents dans nos déchets reviennent à la surface sous forme de végétaux dont nous ne désirons nullement la croissance.

Trois exemples illustrent bien la succession des événements qu'entraîne le déversement d'éléments nutritifs dans les lacs. Le premier est celui du lac de Zurich en Suisse où, en 1896, on observa des faits qui ont alors paru anodins mais qui se sont avérés être les signes avant-coureurs de changements importants. Le deuxième concerne quatre lacs de la région de Madison (Wisconsin) où des proliférations d'algues et d'autres phénomènes inhabituels pour les habitants de cette région sont survenus entre 1914 et 1958. Le troisième touche le onzième plus grand lac en superficie au monde, le lac Érié.

La région entourant le lac de Zurich est habitée depuis des millénaires; elle a connu les villages lacustres préhistoriques, l'oc-

cupation romaine et le Moyen Âge. Aujourd'hui, quand, de la haute et vieille partie de Zurich, on regarde le lac et son décor parsemé de villages et de maisons isolées, le spectacle est impressionnant. À cette distance, on ne peut se douter que le lac a été pollué par les éléments nutritifs pendant la plus grande partie du XX<sup>e</sup> siècle. Personne non plus ne saurait imaginer que la partie inférieure du lac est eutrophe, car sa profondeur moyenne y est de 50 m et sa profondeur maximale, de 143 m.

L'histoire du lac de Zurich débute vers 1890, avec la prolifération de deux espèces d'algues planctoniques: la diatomée *Tabellaria fenestrata* et l'algue bleue *Oscillatoria rubescens*. Ceci annonçait une suite d'événements qui, de 1900 à 1970, devaient amener la croissance massive de diatomées et d'algues bleues, l'élévation des teneurs en ions chlorure et en matière organique dissoute, une diminution de la transparence de l'eau en été, la précipitation du carbonate de calcium (marne) à la suite d'une protosynthèse accrue, des proliférations d'algues filamenteuses comme *Cladophora* et *Ulothrix* sur les fonds près de la berge, un appauvrissement en oxygène dans les profondeurs, la disparition de la truite et du corégone ainsi qu'une augmentation parallèle de l'abondance de la perche et des membres de la famille des cyprins.

L. Minder, l'un des premiers limnologues suisses, observa plusieurs changements chimiques. Pendant qu'il se consacrait à cette étude, un autre savant suisse, Fritz Nipkow, pharmacien de profession mais limnologue de coeur, examinait des carottes de sédiments arrachées aux parties les plus profondes du lac. Nipkow découvrit que les sédiments contenaient des couches très minces et bien conservées témoignant de la succession saisonnière des événements, année après année, depuis les premières manifestations des fleurs d'eau. Le pollen et les frustules des diatomées correspondant au début du printemps étaient recouverts par les formes caractéristiques de fin de printemps et d'été, lesquelles étaient recouvertes par les espèces types de fin d'été et d'automne. La même disposition se répétait couche après couche. Ceci fournit des réponses à nombre de questions dont celle qui porte sur l'abondance des algues bleues.

La prolifération des algues bleues dans le lac de Zurich avait accéléré depuis les années 1890, mais il en restait peu de traces dans les sédiments. À la différence des diatomées qui ont de solides parois cellulaires siliceuses, ces algues se conservent mal. En 1959 toutefois, un chimiste suisse, Hans Züllig, rapportait la découverte d'un pigment caractéristique des algues bleues dans les sédiments. Il s'agissait de la myxoxanthophylle. En dosant la myxoxanthophylle à différentes profondeurs dans le sédiment et en s'aidant des couches de Nipkow, Züllig put retracer l'incidence de ces algues jusqu'en 1890 environ.

Les études entreprises après la Seconde Guerre mondiale par E.A. Thomas et d'autres chercheurs suisses ont montré qu'une accumulation de phosphates et de nitrates avait eu lieu dans les eaux sous-jacentes à la zone euphotique. En même temps, la fréquence et la durée des fleurs d'eau avait commencé à s'accroître. Quand, en été, les algues appauvrissaient considérablement les eaux de surface en éléments nutritifs essentiels, les fleurs d'eau persistaient à cause de l'apport continu de ces éléments par la terre et l'atmosphère.

Alors que s'opéraient ces transformations dans la partie inférieure et densément peuplée du lac de Zurich, le bassin supérieur, peu profond et séparé par un étranglement entre les deux berges, était épargné. Il est à peu près demeuré ce qu'il était, constituant un témoin de l'expérience que l'Homme avait faite sans le savoir sur la partie inférieure du lac.

Pour pallier ces transformations, on construisit un barrage, faisant ainsi dériver les rejets riches en matières nutritives vers la rivière Limmat qui, à la sortie du lac, les transportait vers le Rhin et, de là, vers la mer du Nord. Vers le milieu des années 60, à la suite d'une longue controverse sur les meilleurs moyens à prendre pour lutter contre l'eutrophisation, un programme d'élimination du phosphore des rejets municipaux débuta afin de régler les problèmes associés à la croissance végétale accélérée. L'Homme commençait enfin à remplir son devoir.

Au début des années 70, il était évident que le lac de Zurich se remettait de sa longue maladie causée par les éléments nutritifs

contenus dans les rejets municipaux et agricoles. Dans 50 ou 100 ans d'ici un limnologiste retracera peut-être ces événements dans des carottes de sédiments, à l'instar des limnologistes et des ingénieurs sanitaires contemporains.

Le tableau suivant présente quatre lacs de la région de Madison (Wisconsin), énumérés dans l'ordre où ils se déversent l'un dans l'autre.

Lac	Profondeur (m)		Superficie (km <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )
	maximale	moyenne		
Mendota	25,6	12,1	39,4	478 000 000
Monona	22,5	8,4	14,1	119 000 000
Waubesa	11,1	4,9	8,2	40 000 000
Kegonsa	9,6	4,6	12,7	59 000 000

À part la mention d'une fleur d'eau survenue sur le lac Mendota en 1850, les premiers comptes rendus du phénomène datent de 1882 pour les lacs Mendota et Monona. Nul ne sait si cette situation a été provoquée par des conditions climatiques anormales ou par le déversement d'eaux usées brutes dans le lac Mendota par les 10 000 habitants de Madison. La région étant naturellement fertile, on pouvait néanmoins s'attendre, avec les fluctuations climatiques annuelles qu'on y connaît d'habitude, à des proliférations d'algues.

Le premier essai de traitement des eaux usées à Madison remonte à la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle. Plus tard, en 1914, une nouvelle usine d'épuration entra en service afin de répondre à l'accroissement de la population. L'effluent traité était déversé dans la rivière Yahara, juste en amont du lac Monona. Comme de coutume, on épurait les eaux usées des matières facilement décantables et du carbone organique, mais non de leur phosphore ou de leur azote. Moins de deux ans après l'installation de l'usine, la population locale s'est vue confrontée avec un problème inattendu. Des proliférations d'algues bleues, surtout *Anabaena* et *Aphanizomenon* couvraient le lac avec une fréquence et une intensité jamais égalées. Au début des années 20, les épaisses mas-

ses d'algues bleues flottantes, accumulées sur le rivage par le vent, dégageaient une odeur tellement intolérable que les riverains se barricadaient derrière leurs fenêtres closes, même par nuits chaudes et humides.

Entre 1912 et 1953, on répandit sur le lac Monona du sulfate de cuivre, poison contre les algues, afin d'en débarrasser la surface. Entre 1926 et 1936, de 27 000 à 45 000 kg de sulfate de cuivre furent ainsi utilisés annuellement. Ils gisent maintenant dans des couches de sédiments, rappelant aux générations à venir qu'il est inutile d'essayer de résoudre les problèmes causés par l'eutrophisation due à l'Homme sans s'attaquer directement à la source du mal: les eaux usées chargées de matières nutritives.

En 1928, la ville de Madison terminait la première étape de la construction d'une nouvelle installation de traitement des eaux usées. L'effluent issu de cette installation contournait le lac Monona et se jetait dans la rivière Yahara, entre les lacs Monona et Waubesa. En fait, on ne faisait qu'envoyer l'effluent vers le lac suivant, en aval. Les lacs Waubesa et Kegonsa commencèrent bientôt à montrer des signes d'eutrophisation. On appliqua aussi du sulfate de cuivre sur ces lacs afin d'y réduire la croissance des algues. L'état du lac Monona s'améliora, mais moins rapidement qu'on l'escomptait. Peut-être était-ce dû au déversement continu, quoique réduit, d'eaux résiduaires (on ne les avait pas toutes dirigées ailleurs) et de déchets provenant de l'exploitation agricole, des eaux d'égouts pluviaux et des effluents industriels, dans les lacs Monona et Mendota.

Le récit de ces événements n'est pas aussi détaillé que pour le lac de Zurich, mais ce que l'on en sait permet d'affirmer que les causes et les effets étaient semblables dans les deux cas. En 1944, Claire N. Sawyer et James B. Lackey ont démontré que le phosphore et l'azote causaient l'eutrophisation des lacs de la région de Madison.

Des travaux ultérieurs ont montré que la rivière Yahara, en aval des quatre lacs, était également touchée. En 1954, une prolifération d'*Aphanizomenon flos-aquae*, une algue bleue, entraînait la mort de tous les poissons en aval du point de déversement

de l'effluent des eaux usées. La consommation biologique nocturne de l'oxygène dissous se faisant à une vitesse supérieure à celle avec laquelle l'air pouvait réoxygéner l'eau, les poissons moururent d'asphyxie. Seules quelques carpes survécurent, protégées dans une petite poche en amont du point de déversement.

En 1952, une brasserie exploitée depuis nombre d'années cessa de déverser ses déchets dans le lac Monona. En 1958, on termina un projet de nouvelle dérivation des eaux usées, conçu d'abord en 1942, mais dont la réalisation avait dû être retardée de quinze ans à cause de batailles légales pour acquérir le terrain nécessaire. Depuis, cet effluent, toujours aussi riche en matières nutritives, se déverse dans le ruisseau Badfish après avoir évité les lacs. Ce ruisseau, qui est maintenant un étang de stabilisation mobile, se jette dans la rivière Yahara où les éléments nutritifs deviennent le problème de quelqu'un d'autre.

L'état des lacs s'est amélioré de beaucoup. Il n'est plus nécessaire d'y ajouter du sulfate de cuivre en quantités élevées et probablement dangereuses. Bien qu'ils ne soient pas exempts d'algues, situation impossible et même indésirable, les lacs sont débarrassés des fleurs d'eau qui leur donnaient auparavant l'apparence d'une soupe aux pois. Toutefois, on raconte que le lac Mendota, qui est le plus en amont de ce chapelet de lacs, s'enrichit graduellement des effluents d'une localité avoisinante.

Aussi intéressante que puisse être l'histoire de ces lacs de la Suisse et du Wisconsin, celle du lac Érié, quatrième des cinq Grands lacs avec sa superficie de 26 000 km<sup>2</sup>, la réduit à des proportions plus modestes. Assez ironiquement, ce lac fut le dernier des Grands lacs à être exploré par l'Homme Blanc mais le premier, victime de ses actes<sup>3</sup>.

Quand, de leurs canots lourdement chargés, Louis Jolliet et son successeur La Salle aperçurent les abords du lac Érié, ils

---

3. Le lac Érié a été découvert en 1669 quand Louis Jolliet, guidé par un Iroquois allié, y pénétra à l'ouest, par la rivière Sainte-Claire et la rivière Détroit. La principale raison de cette découverte tardive est la présence d'Iroquois belliqueux qui détenaient les portages entre les lacs Ontario et Érié.



trouvèrent que ses eaux étaient aussi poissonneuses que pouvait être giboyeuse, en bécasses, cailles, dindes sauvages et cerfs, la forêt luxuriante qui l'entourait. Lorsque Cadillac parvint à l'emplacement actuel de Détroit, les canots durent se frayer un passage au travers des oies et des cygnes sauvages pour accoster. Aujourd'hui disparue, la tourte y obscurcissait alors saisonnièrement le ciel, tellement elle était abondante.

À mesure que les explorations et le commerce des fourrures du XVIII<sup>e</sup> siècle cédaient le pas à la colonisation et à l'industrialisation, la détérioration de l'environnement par l'Homme commençait à s'étendre des ports et des baies à l'ensemble du lac. Les événements qui en sont à l'origine remontent à la formation de gisements de charbon en Pennsylvanie, dans le Kentucky et l'Ohio, il y a 300 millions d'années et à celle, il y a plus de 1 000 millions d'années, d'énormes gisements de minerai de fer le long de la rive méridionale de ce qui est maintenant le lac Supérieur.

À la suite de la découverte de ces gisements, le lac Érié devint le centre naturel de l'industrie américaine de l'acier. Les raisons en étaient: la facilité du transport par voie d'eau et le rapport de 4:1 charbon-minerai de fer préconisé alors pour la fabrication de l'acier. Les facteurs économiques du rapport 4:1 favorisaient l'installation de l'aciérie dans cette région plutôt que dans celle du lac Supérieur. À mesure que le tonnage brut de minerai de fer empruntant les écluses du Sault-Sainte-Marie augmenta (de quelques milliers de tonnes en 1855 à des centaines de millions de tonnes en 1973), la pollution du lac Érié causée par l'industrie et la population s'aggrava<sup>4</sup>.

---

4. Quand William Francis Butler visita les Grands lacs en 1870, alors qu'il se rendait dans l'Ouest canadien pour participer à la répression de la révolte de la Rivière Rouge, il nota: « Ce réseau qui emprunte des lacs si nombreux et dont les noms sont si variés, est toujours de cette eau cristalline et pure des sources du lac Supérieur. De grandes villes s'étalent sur ses rives, mais elles sont incapables d'en troubler la transparence des eaux. Les bateaux à vapeur sillonnent ses lacs et ses estuaires; mais ils ne perturbent pas plus la beauté de ses eaux que les flottes du monde entier ne marquent les vagues des océans. »

(extrait traduit de *The great lone land*, William Francis Butler, 1872.)

Ce n'est qu'à partir des années 60 que les gouvernements du Canada et des États-Unis fourniront l'aide nécessaire aux études limnologiques détaillées des Grands lacs. Avant cette date, au cours des années 30 et 40, Paul R. Burkholder, Charles C. Davis et David C. Chandler, pour ne nommer que trois pionniers, avaient dû faire leur travail en employant des moyens de fortune.

Quand l'aide financière arriva vers les années 60, il était un peu tard; des changements si profonds avaient eu lieu qu'il était difficile de déterminer l'état d'origine du lac. L'information scientifique disponible, recueillie avec des moyens de fortune par une poignée de savants dévoués, était très réduite.

Des bouleversements jamais observés s'étaient produits chez les poissons. Entre 1930 et 1965, les prises commerciales de ciscos, de corégones, de dorés noirs, de dorés jaunes et de dorés bleus avait baissé les unes après les autres. En 1970, on pouvait déclarer que le doré bleu, espèce autrefois abondante avait disparu du lac. La perchaude, l'éperlan et l'achigan blanc, quant à eux, y voyaient leurs effectifs s'accroître.

Le manque de données limnologiques et de renseignements sur la pêche rend impossible la reconstitution des causes de ces changements. La surpêche, l'appauvrissement en oxygène des eaux en profondeur, les fluctuations de l'abondance des organismes qui servent de nourriture aux autres, les espèces introduites, les polluants toxiques et la dévastation des frayères y ont probablement tous contribué. Le seul facteur réellement identifiable est *l'Homme*.

En consultant de vieux relevés de populations d'algues à une usine municipale d'approvisionnement en eau, Charles C. Davis, alors à l'Université Case Western Reserve à Cleveland (Ohio), découvrit que leur nombre était en progression constante et rapide depuis 1930. Les résultats normaux, de 1927 à 1930, indiquaient de 100 000 à 200 000 organismes par litre. Entre 1946 et 1948, ils passèrent à 1 200 000 et, entre 1960 et 1964, on en compta de 1 300 000 à 2 400 000. On observa des diatomées et des algues bleues, en différents secteurs du lac, en quantités sans précédent.

Cet ouvrage, préparé à l'intention des non-spécialistes, traite des lacs et de la façon dont ils sont affectés par les apports de matières nutritives découlant des activités humaines (eutrophisation due à l'Homme). Ses neuf chapitres examinent les sujets suivants: 1° la classification biologique des lacs et l'influence des composés de phosphore et d'azote sur la croissance des algues et des herbes aquatiques; 2° l'histoire de l'eutrophisation due à l'Homme dans le lac de Zurich, le lac Érié et une chaîne de quatre lacs dans le voisinage de Madison (Wisconsin); 3° le mode d'action du soleil et du vent sur la circulation verticale de l'eau des lacs; 4° les interactions de l'acide carbonique, de l'oxygène et de la matière organique dans les eaux naturelles; 5° le phosphore dans la biosphère; 6° les méthodes de lutte contre l'eutrophisation due à l'Homme; 7° les phosphates détersifs, cause de l'eutrophisation et la lutte contre cette dernière; 8° la controverse de 1970 sur l'usage du nitrilotriacétate (NTA) en remplacement du triphosphate de sodium dans les détersifs; 9° le problème de l'eutrophisation due à l'Homme vu comme un symptôme qui cache une signification plus profonde, de la nature même du drame de Faust. Alors que le thème central de l'ouvrage porte sur le phosphore en tant que clé de la lutte contre l'eutrophisation due à l'Homme, une analyse des causes réelles fait ressortir la nécessité de limiter la croissance démographique\*. Le lecteur trouvera en fin de volume un glossaire des termes scientifiques, des références suivies d'une liste de lectures supplémentaires ainsi qu'un appendice comprenant un bilan de la situation en 1974 et une série de tableaux et de figures.

Vers le milieu des années 50, la partie occidentale du lac Érié, peu profonde et chargée des déchets des villes américaines comme Toledo, Détroit et plusieurs autres, se trouva dans une situation précaire: tout changement pouvait dorénavant déplacer l'équilibre naturel de façon imprévisible. Tout débuta avec une période inhabituelle de beau temps qui dura du 1<sup>er</sup> au 5 septembre 1953. À cause de la stagnation de l'eau et de l'appauvrissement en oxygène des boues du fond, presque toute la population de la nymphe d'un éphémère, *Hexagenia*, fut réduite à néant. Cette mortalité massive d'une importante source alimentaire de plusieurs poissons était le résultat de l'enrichissement, par la nature et par l'Homme, des eaux et des sédiments en éléments nutritifs.

Après un regain timide, *Hexagenia* disparut définitivement de la partie ouest du lac vers 1960 et ses effectifs furent sévèrement réduits dans les autres secteurs. Pour les riverains, ce fut un demi-mal, car ils n'étaient plus envahis par les éphémères qui, la nuit, s'agglutinaient aux moustiquaires et autour des lumières. Mais cela ne fit pas l'affaire des poissons, ni celle des pêcheurs qui dépendent de ces derniers pour leur subsistance.

Au début des années 60, Alfred Beeton, alors du U.S. Bureau of Commercial Fisheries, démontra que les caractéristiques chimiques du lac Érié avaient fortement évolué depuis le début du siècle. En comparant les résultats rapportés par différents chercheurs, il montra que les teneurs en sodium, chlorures et sulfates y avaient plus que doublé depuis 1910. Ces changements avaient également touché les eaux du lac Ontario, en aval. Les eaux du lac Supérieur (le plus en amont, le plus étendu et le plus sauvage des Grands lacs) n'avaient toutefois pas changé au cours de la même période.

En 1961, John Carr et James Hiltunen, également du U.S. Bureau of Commercial Fisheries, comparèrent les espèces et l'abondance des invertébrés du fond de la partie ouest du lac Érié avec les résultats communiqués en 1930. Ils découvrirent que la zone polluée de cette partie du lac avait quadruplé en superficie, passant de 263 km<sup>2</sup> en 1930, à 1 020 km<sup>2</sup> en 1961. Au cours des années 60, les autorités de l'U.S. Coast Guard

avertirent les navires battant pavillon international de ne pas s'approvisionner en eau potable près de la berge de la partie ouest du lac Érié, à cause des dangers qu'elle pouvait constituer pour la santé.

Les changements biologiques et chimiques des lacs Érié et Ontario ont été plus prononcés qu'ailleurs. Cela s'explique par le fait que le lac Érié est relativement peu profond et volumineux (c'est le plus petit des Grands lacs) et qu'une population de 12 000 000 d'habitants, dont 10 400 000 en territoire américain, occupait son bassin de drainage en 1966. Ce lac, que le Canada et les États-Unis se partagent à peu près également, ne constitue pas un heureux exemple de coopération internationale.

Beaucoup ont à tort condamné le lac Érié. En réalité, ses bassins ouest et central regorgent de vie, mais malheureusement sous forme de micro-organismes indésirables et de poissons communs. Andrew Hamilton de l'Institut des eaux douces de Winnipeg a montré par l'analyse de carottes de sédiments, que le bassin ouest était eutrophe avant l'implantation de l'industrie sur ses rives. Cependant, il a aussi montré que depuis ce temps, l'eutrophisation s'était accélérée. Cet excès a été entièrement amené par l'Homme.

Le déversement plus qu'intermittent de barils d'huile et de graisse (1 000 barils par jour, dans la rivière Détroit en 1967 seulement), les insecticides organochlorés, les phosphates détersifs, le mercure et les déchets des municipalités, des industries et des bateaux, convertissaient peu à peu le lac en un énorme étang de stabilisation. Toutefois, la partie est du lac demeurait relativement propre à cause de son plus gros volume et de sa plus grande profondeur. Quand, en 1969, suite à la présence d'huile en surface, la rivière Cuyahoga à Cleveland prit feu, il était évident que le malade, c'était *l'Homme* bien plus que le lac et à un degré inimaginable.

En retraçant l'histoire des différentes méthodes utilisées par l'Homme pour se débarrasser de ses excréments, nous serons en mesure d'approfondir les facteurs à l'origine de ces phénomènes qui touchent actuellement des dizaines de milliers de lacs, de réservoirs et d'estuaires dans le monde.

Le plus ancien procédé consiste à mélanger ces déchets au sol; cette coutume est d'ailleurs encore suivie dans plusieurs pays dont le Canada et les États-Unis. C'est la même méthode que Moïse conseilla aux Hébreux quand il dit: « Dans tes bagages, tu auras une pelle dont tu te serviras pour creuser un trou lorsque tu te rendras à l'écart: en partant, tu recouvriras ce que tu as fait. » (Deutéronome 23, 13.)

En même temps, on avait appris les bienfaits de l'addition du fumier aux sols arables et aux étangs à poissons pour compenser les éléments nutritifs puisés par les récoltes. Une partie des excréments humains dont se débarrassaient les villes du Moyen Âge était destinée à engraisser la terre.

L'urbanisation, intensifiée par la révolution industrielle, amena des maladies contagieuses tels le choléra et la fièvre typhoïde, faisant nombre de victimes. On peut en trouver les descriptions dans des documents historiques aujourd'hui ignorés, dans notre monde exempt de la maladie et ayant résolu ses problèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des déchets.

Ce n'est que vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, suite à l'épidémie de choléra (et implicitement des autres maladies), que s'imposa le besoin d'améliorer les systèmes d'approvisionnement en eau et d'évacuation des déchets. Découvrant que l'eau potable des puits était contaminée par les déchets des personnes malades, les grandes villes des pays développés commencèrent à installer des conduits pour amener l'eau d'un point en amont (il y en existait déjà) et d'autres pour déverser les déchets en aval (menant habituellement à des égouts pluviaux déjà en place). Entre-temps, l'invention par sir John Harington de la toilette à chasse d'eau trouva une application pratique<sup>5</sup>.

Les égouts pluviaux, d'abord utilisés pour transporter l'apport brut d'eau de pluie des rues, devinrent des conduits d'évacuation de rejets d'aspect plutôt douteux, les eaux usées

5. Sir John Harington inventa le principe du cabinet à chasse d'eau en 1596. Toutefois, son invention ne trouva une utilisation répandue qu'au début du XIX<sup>e</sup> siècle.

municipales. Les puits disparurent des villes et le cri familier des vendeurs d'eau ne retentit plus dans les quartiers populaires<sup>6</sup>.

Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, la raison première du traitement des déchets municipaux et industriels était l'élimination des organismes pathogènes et des composés organiques. Il n'est plus nécessaire maintenant d'expliquer la lutte contre les organismes pathogènes, alors qu'à cette époque, à cause du peu de connaissances médicales, il fallait justifier les mesures prises. On cherchait principalement à éliminer les matières organiques car les déchets qui en contiennent beaucoup sont infects, fétides et tuent le poisson à cause de l'appauvrissement en oxygène des eaux naturelles. Les gens, vivant en aval du point de déversement et se servant de l'eau pour le lavage ou pour se désaltérer, souffraient de cet état de choses mais les améliorations ne se faisaient que s'ils étaient de riches propriétaires terriens.

La plupart des méthodes d'épuration qu'on a créées pour éliminer les matières organiques de l'eau fonctionnent grâce à l'aptitude des micro-organismes à les décomposer. Au cours de ce processus d'épuration biologique, les atomes de carbone, d'hydrogène et d'azote sont oxydés. Le carbone se transforme en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>); l'hydrogène, en eau (H<sub>2</sub>O); l'azote en ion nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

L'oxydation biologique est avant tout une combustion lente et dirigée des composés organiques, dont le principe est le même que celui de la combustion plus rapide des hydrocarbures dans un moteur à combustion interne. Les organismes réussissent cette oxydation dirigée à basses températures, à l'aide de catalyseurs appelés enzymes. On peut dire que la vie fait du feu dans l'eau, en brûlant des composés organiques à basses températures et en utilisant l'énergie dégagée pour la croissance et la régénération

---

6. Jadis, en Europe et en Amérique du Nord, on vendait de l'eau dans les rues, comme on le fait encore dans les vieux quartiers de plusieurs villes d'Asie et d'Afrique. Depuis peu, une version moderne de vendeurs d'eau a fait son apparition dans la plupart des plus grandes villes du monde. Les compagnies de distribution d'eau embouteillée dans les centres urbains, à cause de la croissance et de l'expansion rapide de ces derniers, ont leur nom sur la liste des actions dont l'achat est fortement recommandé par les courtiers.

cellulaire. Les micro-organismes du sol et de l'eau oxydent nos déchets gratuitement. Si nous étions privés de ces services, nous ne pourrions pas survivre.

La première utilisation de l'oxydation microbienne des matières organiques contenues dans les déchets municipaux furent les champs d'épandage; ainsi, on mettait à contribution les micro-organismes du sol pour améliorer l'agriculture. Un peu plus tard sont apparus les étangs de stabilisation, où l'oxydation des eaux usées permettait leur auto-épuration.

Au cours de la deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle, on commença à employer des lits bactériens. Ce sont d'épais lits de gravier non compact, permettant une bonne aération et au travers desquels on fait passer les eaux usées. Des boues microbiennes, riches en bactéries, en protozoaires et en invertébrés recouvrent le gravier et effectuent l'oxydation.

Le traitement des eaux usées au moyen des boues activées, dont on parle encore comme étant une méthode moderne, a été décrite pour la première fois en 1913. Par ce procédé, les boues riches en microbes (activées), qui se multiplient au cours du traitement, sont retournées au point d'admission des eaux usées pour que les micro-organismes chargés de la décomposition puissent se mettre immédiatement à l'oeuvre. Le méthane produit par la fermentation des boues contribue au chauffage de l'installation de traitement.

Un système à débit constant peut, en 4 à 12 heures, oxyder 90% de la matière organique qui y entre. En 1972, malgré leur utilité, ces systèmes traitaient moins de 15% des déchets municipaux produits aux États-Unis et au Canada. Actuellement, les installations de traitement les plus courantes diffèrent peu de celles dont on se servait il y a cent ans: elles consistent en tamis épurateurs pour arrêter les matériaux grossiers et en un bassin de stabilisation permettant la décomposition organique, avant l'évacuation des déchets dans les cours d'eau.

L'eutrophisation s'est produite malgré le traitement des eaux usées pour en enlever les composés organiques, parce que le phos-



phore et l'azote n'étaient pas éliminés en quantités suffisantes. En tant qu'atomes, le phosphore et l'azote peuvent se recombinaisonner et les molécules dont ils font partie peuvent se réorganiser, mais non se détruire. L'oxydation de la matière organique au cours du traitement des eaux usées peut même augmenter le pouvoir stimulant des phosphates et des nitrates sur la croissance, en éliminant les substances qui ralentissent la croissance des végétaux.

Il aura fallu près d'un demi-siècle à la plupart des ingénieurs sanitaires pour apprendre que le déversement d'éléments nutritifs dans l'eau provoque une autre synthèse de la matière organique dans les lacs et les cours d'eau et annule le travail fait au cours du traitement. Toutefois, en synthétisant de nouveaux composés organiques, les plantes produisent de l'oxygène. Cela a aussi pris cinquante ans aux limnologues pour constater qu'ils avaient intérêt à prendre part à ce qui se passe dans les usines de traitement. Heureusement, les limnologues et les ingénieurs collaborent plus étroitement que jamais.

On a exposé les causes et les conséquences générales de l'eutrophisation liée aux activités humaines et donné un aperçu historique de ce phénomène, du milieu du XIX<sup>e</sup> siècle jusqu'à nos jours. Si on avait à dégager un facteur parmi tous ceux qui ont précipité le cours des événements, il faudrait souligner l'apparition des conduites d'eau, des toilettes à chasses d'eau et des égouts. D'un seul coup, cela a préparé la voie à tout ce qui devait s'ensuivre: l'accroissement de la pollution de l'eau par les excréments humains à cause de la non-utilisation du sol comme agent d'épuration; une production accrue d'engrais pour remplacer les éléments nutritifs extraits du sol à la récolte; des coûts accrus du traitement des déchets constitués à 99,99% d'eau; enfin, l'eutrophisation.

Le résultat du système dont nous avons hérité (personne ne contestera les avantages qu'il apporte à la santé publique) est le transport à sens unique des éléments nutritifs du sol vers l'eau. Ces derniers, en effet, sont tirés du sol sous forme de produits agricoles et cheptel et, après s'être arrêtés momentanément,

ment dans les intestins et les reins de l'homme, ils sont rejetés dans les cours d'eau, les lacs, les sédiments et la mer.

Comme le besoin d'une production accrue de nourriture pour répondre à l'augmentation de la population se fait de plus en plus sentir, la perte des éléments nutritifs au profit des écosystèmes aquatiques est appelée à s'aggraver. La culture de nouvelles variétés de graminées hautement protéiques par exemple, amènera un plus grand déversement d'engrais à base d'azote dans la mer et les sédiments.

Pour pousser plus loin notre analyse, il nous faudrait comprendre plus en détail les processus biologiques, chimiques et physiques qui ont lieu dans les lacs. Sinon nous serions comme les habitants de Madison qui pouvaient donner un nom à tous les phénomènes dont ils étaient témoins, mais qui étaient incapable de les expliquer. Des renseignements utiles seront fournis au chapitre suivant, où il sera question de la circulation de l'eau dans les lacs.



## CHAPITRE 3

### Les lacs sont faits d'eau

Explication du phénomène de la circulation verticale de l'eau des lacs par la température, la densité de l'eau et l'action du soleil et du vent.

L'eau est une substance tellement répandue que, tout comme l'air que nous inspirons 30 000 fois chaque jour de notre vie, nous la croyons à notre entière disposition. Arrêtons-nous et considérons son importance.

Expulsée du sein de la terre par les volcans, les geysers et les fumerolles pendant 5 milliards d'années de l'histoire géologique, l'eau s'est accumulée au point de maintenant couvrir 70 % de la surface du globe. L'épaisseur moyenne des mers est de 3,8 km. Les forêts et les déserts ont été façonnés selon la distribution et l'abondance des pluies dans le passé. En quatre occasions au cours des deux derniers millions d'années, d'épaisses masses d'eau, sous forme de nappes de glace, ont recouvert les continents, comprimant le sol, sculptant les vallées, abandonnant de longues traînées de gravier, obturant des lacs, remodelant le tracé des cours d'eau et faisant descendre le niveau des océans de plus de 100 m.

Comme moyen de transport naturel, l'eau a grandement favorisé l'expansion du commerce et des échanges culturels. Sur la terre ferme, l'eau est synonyme de nourriture et de survie; si elle y fait défaut, c'est la famine. Elle fournit l'électricité qui alimente nos nombreux appareils domestiques et agrmente nos loisirs consacrés à la natation, à la pêche et à la navigation. Les émotions que suscitent une descente en skis ou une partie de hockey, nous les devons aussi à l'eau.

Cependant, c'est pour le corps humain que l'eau se montre le meilleur serviteur. Sa température spécifique élevée et le fait qu'elle constitue un composant important du sang permettent une distribution égale de la chaleur essentielle à la vie. En été, nous nous rafraîchissons en évaporant l'eau par les milliers de glandes sudoripares de notre peau. Sans eau, nous mourrions; elle constitue les deux tiers de notre poids. C'est le meilleur solvant pour le transport des substances nutritives dans le corps et l'élimination des déchets par les reins et les poumons. Enfin, en tant qu'agent nettoyant, elle empêche la diffusion des infections et des maladies.

Bref, l'eau est le support chimique de la vie et, d'après plusieurs, la condition unique de son éclosion et de sa perpétuation. Les techniques modernes n'ont fait qu'accentuer notre dépendance envers elle. La consommation élevée d'eau dans un foyer américain typique, équivalant à 380 l par personne par jour (soit un poids de 380 kg par personne par jour), l'illustre bien. Aucune autre substance n'est autant utilisée par l'Homme.

La répartition de l'eau dans la nature est très inégale. La distribution en pourcentage qui suit nous le prouve:

	Pourcentage (%)
Océans	de 97,1 à 97,6
Calottes glaciaires et glaciers	2,1
Eau souterraine	de 0,3 à 0,8
Lacs d'eau douce	0,009
Lacs salés	0,008
Humidité du sol et du sous-sol	0,005
Vapeur d'eau atmosphérique	0,000 9
Cours d'eau	0,000 09

Par rapport au volume total, la fraction de l'eau que l'on retrouve dans les lacs et les cours d'eau est très minime. Malgré cela, les eaux continentales jouent un rôle important, car nous vivons à proximité d'elles. Les rivières et les fleuves ont toujours connu une grande activité, servant d'abord au transport de produits et maintenant principalement à l'évacuation de déchets. Les lacs, quant à eux, sont appréciés pour la paix et la tranquillité qu'ils

procurent à l'esprit. C'est là que les paysages atteignent leur plus grande beauté.

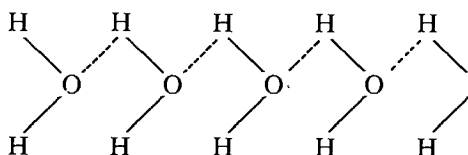
Mais sous cette surface miroitante apparemment calme, se cache une tout autre réalité: l'agitation d'une infinité de molécules d'eau. Des forces invisibles les retiennent ensemble dans cette architecture mouvante et agissent à une plus grande échelle pour doter les lacs et même les océans de particularités si importantes, qu'aucun traité de limnologie ne serait complet s'il n'en tenait compte. C'est pourquoi il nous faut comprendre comment les propriétés chimiques de l'eau déterminent plusieurs aspects de son comportement dans les lacs.

L'eau est un composé où il y a deux fois plus d'atomes d'hydrogène que d'oxygène; sa simplicité n'est qu'apparente. En fait, c'est seulement après avoir accumulé des connaissances précises sur d'autres composés chimiques que l'on a compris à quel point l'eau était unique. En fait, si on avait eu à en prédire les propriétés, à la manière de Mendeleïev au XIX<sup>e</sup> siècle, avec sa classification d'éléments chimiques alors inconnus, on aurait supposé qu'à température ambiante, l'eau devait être un gaz.

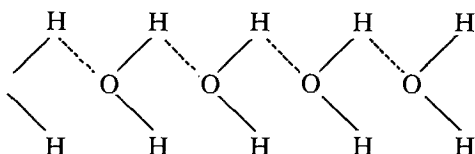
Par comparaison au sulfure d'hydrogène et à d'autres substances, le point de congélation de l'eau devrait être de  $-100^{\circ}$  et son point d'ébullition, inférieur au point de congélation ( $0^{\circ}\text{C}$ ). On ne pourrait s'attendre à aucune des caractéristiques de l'eau telles que son pouvoir dissolvant, sa capacité calorifique et sa tension superficielle. On en déduit donc que des forces subtiles, cachées dans la structure du liquide, retiennent les molécules d'eau ensemble. Autrement, comment pourrait-on expliquer la quantité exceptionnelle d'énergie qu'il faut lui appliquer pour la transformer en vapeur?

Ces forces qui agissent au sein du liquide sont les liaisons hydrogène. Se faisant et se défaisant avec plus de rapidité que les battements d'ailes d'une guêpe, elles créent une association tremblotante entre les molécules d'eau. Ce mouvement incessant donne au liquide son aspect continuellement changeant. Si nos yeux pouvaient le contempler, nous verrions à un moment donné

quatre d'entre elles ainsi unies (les liaisons hydrogène étant représentées par les traits hachurés)



et l'instant d'après leur configuration serait



Parmi les propriétés de l'eau qui ont fasciné les chimistes, il y en a une qui, plus que toutes les autres, détermine la circulation verticale de l'eau dans les lacs. Il s'agit du comportement bizarre de la densité de l'eau avec la température. De tous les liquides étudiés jusqu'ici, deux seulement ont démontré une densité maximale à une température supérieure à leur point de congélation. L'un est l'eau, l'autre, le chlorure de césium, curiosité de laboratoire n'existant à l'état liquide qu'à des températures très élevées.

Cette propriété va de pair avec une autre tout aussi singulière: l'eau est plus dense à l'état liquide qu'à l'état solide. Ces deux propriétés, on s'en doute bien, sont reliées par un facteur commun.

Imaginons ce que pourrait être la terre si la glace était plus dense que l'eau. Les glaciers couleraient au fond des océans et les étangs gèleraient par le bas au lieu de geler en surface. Les océans se réduiraient peut-être en une mince couche d'eau très salée recouvrant un genre de roc sédimentaire qui ne serait pas autre chose que de la glace. La pression atmosphérique serait plusieurs fois supérieure à celle que nous connaissons, l'air étant

chargé de gaz normalement dissous dans la mer. Finalement, la vie n'aurait probablement jamais connu d'évolution.

La glace a une densité de  $0,92 \text{ g/cm}^3$  comparativement à environ  $1 \text{ g/cm}^3$  pour l'eau. Cette faible densité est due à la disposition des molécules d'eau dans sa forme solide. Des lacunes s'y répètent à intervalles réguliers à cause de la position figée des molécules. La plus grande souplesse des molécules dans le liquide favorise un arrangement plus dense.

À l'état liquide, l'eau devient plus dense à  $4^\circ\text{C}$ , c'est-à-dire à quelques degrés seulement au-dessus de son point de congélation. Deux forces contraires sont à l'origine de ce fait. La première, commune à tous les liquides et à tous les gaz, fait que la distance intermoléculaire augmente avec la température. En ne se fiant qu'à cela, on pourrait imaginer que l'eau a une densité maximale au point de congélation, densité qui diminuerait avec l'augmentation de la température. L'autre force est la tendance qu'ont les molécules d'eau à se grouper pour former des figures qui ressemblent à de la glace à mesure que la température du liquide approche du point de congélation. À cause de ce dernier processus, on pourrait s'attendre à ce que l'eau ait une densité minimale au point de congélation, densité qui augmenterait avec la température. L'action simultanée des deux processus donne un resserrement maximal des molécules à  $4^\circ\text{C}$ .

La relation entre la température et la densité de l'eau n'est pas directement proportionnelle. La variation de la densité en fonction d'un degré de température diffère selon la température. Par exemple, la différence de la densité entre des échantillons d'eau à  $10$  et  $11^\circ\text{C}$ , est 12 fois plus grande que celle existant entre des échantillons à  $4$  et  $5^\circ\text{C}$  ( $0,000\ 095 \text{ g/cm}^3$  contre  $0,000\ 008 \text{ g/cm}^3$ ). Quant à la différence de densité entre des échantillons d'eau dont la température est de  $20$  et  $21^\circ\text{C}$ , elle est 26 fois plus grande que celle d'échantillons à  $4$  et  $5^\circ\text{C}$  ( $0,000\ 211 \text{ g/cm}^3$  contre  $0,000\ 008 \text{ g/cm}^3$ ).

Ainsi, on peut tirer la règle générale suivante: *la variation de densité de l'eau accompagnant celle d'un degré de tempéra-*



*ture augmente à mesure que la température s'éloigne de 4°C, en s'élevant ou en s'abaissant.*

Cette règle est importante et vaut bien le temps de la mémoriser. Elle permet de relier plusieurs caractéristiques communes aux grandes masses d'eau et de les expliquer simplement. Grâce à elle, on peut comprendre pourquoi l'oxygène dissous tend à se raréfier dans les eaux profondes des lacs eutrophes (productifs), au cours de l'été; pourquoi les truites de lac disparaissent des lacs pollués par l'Homme; enfin, comment la circulation verticale dans les lacs des tropiques peut être ralentie suite à des variations minimales de température. Sans cette règle, on pourrait considérer ces phénomènes comme étant intéressants, mais sans grand rapport les uns avec les autres.

On pourrait donc savoir si les eaux d'un lac donné ont une circulation complète, à partir des mesures de leurs températures. *La stratification thermique implique un mélange vertical incomplet des eaux.* La logique est simple: là où il y a un gradient vertical de température, il doit aussi y avoir un gradient vertical de densité; l'existence de ce dernier est, à prime abord, une preuve que la circulation ne se fait pas complètement.

Vous avez peut-être déjà constaté, en plongeant dans un lac, au début de l'été ou par une journée plutôt calme et ensoleillée, que l'eau près de la surface en était beaucoup plus chaude que l'eau sous-jacente. Le soleil avait réchauffé l'eau de surface plus rapidement que le vent n'avait pu la mélanger aux eaux des couches inférieures. Les couches avaient persisté parce que l'eau plus chaude est plus légère (moins dense) que l'eau froide à des températures supérieures à 4°C. Plus tard dans la saison, ou après une bonne brise, quand les eaux réchauffées auraient été mélangées et déportées à de plus grandes profondeurs, on aurait pu plonger sans déceler de variation brusque de température. Si vous avez jamais observé ce phénomène, vous en savez probablement plus long sur les lacs que vous ne le pensez.

À la mi-été, alors que la stratification thermique est la plus prononcée, les températures présentent, à différentes profondeurs, l'une des deux conformations suivantes. Dans les lacs peu pro-

fonds, bien exposés à l'action du vent, les températures seront pratiquement identiques, différant en général par moins de 2°C. Cette uniformité relative indique que les eaux ont bien été mélangées.

Dans les eaux dont les profondeurs maximales dépassent 5 ou 10 m, on observe trois couches caractéristiques: 1° l'*épilimnion*, couche supérieure où la température est assez uniformément chaude; 2° le *métalimnion*, couche intermédiaire où la température décroît rapidement avec la profondeur; 3° l'*hypolimnion*, couche inférieure où la température est assez uniformément froide (fig. 1). L'étymologie de ces termes nous en facilitera la mémorisation: épi- (sur); méta- (parmi); hypo- (en-dessous); -limnion, de limnê (étang, lac).

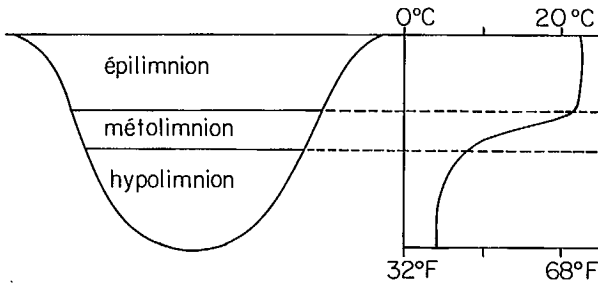


Fig. 1 Exemple de stratification thermique dans un lac de la zone tempérée, en été.

On appelle souvent le métalimnion « thermocline », signifiant gradient thermique. Bien que plusieurs limnologues les emploient indifféremment, « métalimnion » désigne la couche d'eau tandis que « thermocline », la variation de température qui la caractérise.

On peut calculer le gradient de densité à l'intérieur d'eaux stratifiées thermiquement, à condition de connaître les températures du lac et de se servir d'une table de conversion qui donne la densité de l'eau pure en fonction de la température<sup>7</sup>. Ceci revient à dire que le seul facteur qui exerce une influence sur la

7. Voir le tableau A3 (p. 182).

densité des eaux d'un lac est la température. Cette supposition est juste pour la plupart des lacs, sauf les lacs méromictiques dont les eaux du fond chargées de sel se mélangent rarement avec les eaux des couches supérieures.

Conséquemment, le gradient de densité par unité de profondeur, dans l'épilimnion et l'hypolimnion, sera petit ou nul à cause de l'uniformité de la température. Cependant, dans le métalimnion, le gradient de densité augmentera pour atteindre son maximum un peu au-dessus du point où le taux de variation de la température avec la profondeur est maximal.

Le gradient de densité dans le métalimnion constitue une barrière qui empêche le mélange des eaux de l'épilimnion et de l'hypolimnion. Le mélange de couches d'eau de densités différentes nécessite, au même titre que le mélange de crème et de lait ou d'huile et de vinaigre, un certain travail physique. Toutefois, les eaux d'un lac, une fois mélangées, ne peuvent plus se séparer, contrairement aux liquides aqueux et huileux. Enfin, la quantité de travail requise pour mélanger des couches d'eau de densités différentes est proportionnelle à la différence de densité et à l'épaisseur de la couche qui les sépare.

Assez curieusement, les variations minimales de densité qui accompagnent les variations de température dans la thermocline sont suffisantes pour empêcher le vent de mélanger complètement les eaux de l'épilimnion et de l'hypolimnion. À cause de la réduction prononcée, avec la profondeur, de la turbulence et de la vitesse des courants, l'épaisseur de l'épilimnion créée par les vents même les plus forts, est limitée. Une thermocline bien établie peut être une barrière aussi efficace aux courants descendants que le rivage ou le fond du lac. La variation caractéristique de la température de la thermocline est ainsi un reflet secondaire de la barrière de densité opposée au mélange des eaux.

Étant donné qu'il est plus facile de mesurer la température que la densité des eaux, les limnologues concluent normalement à l'existence d'une barrière de densité à partir uniquement d'observations de la température. Cette pratique est si courante que les étudiants débutant en limnologie ont des difficultés à compren-

dre pourquoi les limnologues semblent tellement obsédés par l'étude de la température. En fait, ce qui intéresse ces derniers, c'est la barrière physique qui s'oppose au brassage des eaux. Pour eux, la thermocline est une barrière de densité plutôt que de température.

Cependant, par le biais de la température, elle consiste en une barrière biologique agissant sur la répartition et sur la croissance des divers organismes aquatiques. En été, les plantes vertes et plusieurs formes de vie animale comme les larves d'éphémères et de phryganes, les mollusques, le crapet-soleil et l'achigan, résident dans les eaux chaudes de l'épilimnion. Les poissons d'eau froide comme la truite, le cisco, le corégone de lac et le petit crustacé *Pontoporeia* s'éloignent rarement de la fraîcheur de l'hypolimnion. D'autres plantes et animaux sont plus à l'aise dans la métalimnion. Adoptant un style de vie complètement différent, certains organismes des profondeurs effectuent des migrations journalières verticales, atteignant la surface au cours de la nuit et restant en profondeur pendant la journée. Ainsi les possibilités de croissance et de reproduction dans les différentes couches varient selon les habitudes de chacune des espèces.

Afin de comprendre comment les caractéristiques thermiques des lacs varient tout au long de l'année, il est nécessaire de faire la distinction entre l'action du soleil et celle du vent. Étant donné que ces deux facteurs agissent toujours de concert, nous ne pourrions que schématiser. Nous examinerons d'abord le comportement de l'eau pure face au rayonnement solaire, puis nous expliquerons ce qui se passe dans les lacs.

Il n'y a que trois parties du spectre de la lumière solaire qui touchent directement la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. Ce sont: 1° le rayonnement ultraviolet, composé de longueurs d'ondes plus courtes que celles qui sont visibles par l'œil humain<sup>8</sup>; 2° le rayonnement visible; 3° le rayon-

---

8. Le spectre électromagnétique est communément divisé en bandes de longueurs d'ondes ou de fréquences, un peu comme les radiofréquences sont divisées en bandes réservées à la radiodiffusion commerciale, à la police et aux radioamateurs.

nement infrarouge, composé de longueurs d'ondes plus longues que celles qui sont visibles par l'œil humain.

Le rayonnement ultraviolet — Certains insectes, crustacés aquatiques et autres organismes perçoivent les rayons ultraviolets et ont élaboré, à partir d'eux, des comportements fort complexes. L'être humain est aveugle à ce rayonnement, mais il y reste sujet, comme en témoignent le bronzage et les coups de soleil. La plus grande partie des rayons ultraviolets est absorbée par la couche d'ozone de la haute atmosphère. Le peu qui atteint la surface de la terre contribue à la production de vitamine D et influe sur le comportement de certains organismes, mais on ne lui connaît pas d'effet important sur les lacs.

Le rayonnement visible — Le rayonnement visible émis par le soleil franchit l'atmosphère sans subir de forte atténuation, sauf quand le ciel est couvert. Les couleurs que nous pouvons distinguer dans le spectre visible en ordre croissant de longueurs d'ondes sont le violet, le bleu, le vert, le jaune, l'orange et le rouge. Une partie de la lumière violette et bleue est dispersée au cours de son passage à travers l'atmosphère par les molécules et les particules de poussière, selon un plan perpendiculaire à sa direction, ce qui donne au ciel sa couleur. Si les couchers de soleil nous semblent rouges, c'est qu'une partie de la lumière bleue est déviée en d'autres directions et permet aux longueurs d'ondes correspondant au rouge d'être relativement plus nombreuses que les autres.

Le rayonnement infrarouge — Aussi connu sous le nom de rayonnement thermique, le rayonnement infrarouge est invisible, sauf pour le hibou qui perçoit ses proies dans la noirceur, grâce à la chaleur émise par leur corps. Nous ne sentons le rayonnement infrarouge que par les terminaisons nerveuses de notre épiderme. Il est émis par tout corps chaud; le soleil et les radiateurs électriques en sont des exemples.

De tout le rayonnement émis par le soleil et atteignant la surface de la terre, environ la moitié est constituée de rayonnement infrarouge et l'autre, de rayonnement visible. Malgré ce que peut en penser une personne atteinte d'un coup de soleil, la quantité

de rayonnement ultraviolet est insignifiante. Il en va autrement à la surface de la lune. Dépourvue d'atmosphère, elle est constamment bombardée par le rayonnement ultraviolet. Sans la protection de costume et de visière imperméables, les astronautes seraient brûlés.

Quand le rayonnement solaire frappe un plan d'eau, une partie en est réfléchi, une autre est absorbée et convertie en énergie thermique; enfin, la dernière pénètre dans l'eau avec une intensité variant selon l'épaisseur de celle-ci et la longueur d'onde de la lumière.

L'eau absorbe les longueurs d'ondes lumineuses de façon sélective; le rayonnement infrarouge, par exemple, est absorbé plus fortement que le rayonnement visible<sup>9</sup>. De plus, le pourcentage d'absorption de la lumière visible par unité de profondeur diminue constamment, du rouge au bleu du spectre. Pour les ondes plus courtes, le processus est renversé: l'ultraviolet, le violet et le bleu de longueur d'onde plus courte sont absorbés plus efficacement que la lumière bleue d'onde plus longue. On peut penser que l'eau est bleue à cause de sa transparence à la lumière bleue, mais en réalité, elle l'est à cause du bleu du ciel qu'elle réfléchit.

Dans les lacs, d'autres facteurs que l'eau modifient la pénétration de la lumière solaire. Il s'agit des particules d'argile et de vase, des matières humiques dissoutes et des végétaux microscopiques. Pour le moment toutefois, nous nous attarderons à étudier l'action de l'eau.

Au XVIII<sup>e</sup> siècle, J.H. Lambert énonça une loi très utile sur l'absorption lumineuse par les liquides et les solides homogènes. Il observa que, lorsque la lumière d'une longueur d'onde donnée franchit un liquide ou un solide homogène, le pourcentage absorbé par chacune des unités de distance qui se suivent est constant.

---

9. Les gens qui ignorent que l'eau est plus perméable au rayonnement ultraviolet qu'au rayonnement infrarouge, risquent de prendre de graves coups de soleil, les journées où une légère brume couvre le ciel. Ne sentant pas la chaleur directe des rayons du soleil, ils croient, à tort, que le rayonnement solaire est réduit également pour toutes les longueurs d'ondes du spectre.

Dans le cas de l'infrarouge, si 90 % sont absorbés par une épaisseur d'eau d'un mètre, deux mètres en absorberont 99 %. (Le premier mètre absorbe 90 % des 100 unités lumineuses originales et le mètre suivant, 90 % des 10 unités restantes. Il ne reste plus qu'une seule unité lumineuse pour franchir l'épaisseur totale de deux mètres.)

Une relation semblable prévaut pour la lumière à différentes longueurs d'ondes, la quantité réelle d'absorption variant selon les caractéristiques d'absorption de l'eau pour chacune d'entre elles. Ainsi, si 2 % de la lumière incidente de la couleur verte du spectre sont absorbés par une couche d'eau d'un mètre d'épaisseur, une couche de deux mètres en absorbera un peu moins de 4%. (Le premier mètre absorbe 2% des 100 unités et le mètre suivant, 2% des 98 unités restantes.) Etant donné que l'eau n'absorbe pas la lumière de différentes longueurs d'ondes avec la même intensité, la couleur du soleil dans les lacs d'eau pure passe de l'orange jaunâtre, en surface, au bleu, en profondeur.

Sachant que l'énergie lumineuse se transforme en énergie thermique par l'absorption et que la plus grande absorption se produit près de la source lumineuse, on peut supposer que les lacs doivent être plus intensément réchauffés par le soleil dans les couches supérieures, là où se produit la plus grande absorption. En effet, si on pouvait garder un lac dans des conditions de calme total et d'éclairage continu, les températures seraient les plus élevées à la surface et décroîtraient rapidement avec la profondeur. Les variations de température les plus brusques se produiraient immédiatement sous la surface de l'eau.

On peut facilement le vérifier en installant, au-dessus d'un aquarium rempli d'eau, une lampe infrarouge (ou une lumière qui dégage beaucoup de chaleur) représentant le soleil<sup>10</sup>. Une heure après, à l'aide d'un thermomètre ordinaire, on pourra observer que la distribution de la température est exactement telle que prévue.

---

10. Le lecteur intéressé trouvera la description complète de cette expérience et de quelques autres dans Vallentyne (1967).

Dans les lacs naturels, la situation est tout autre: les eaux de l'hypolimnion ont une température uniforme sur une grande profondeur, fréquemment de 3 à 20 m, selon la grandeur des lacs. La différence entre l'aquarium et les lacs naturels provient surtout de l'action du vent. Ce dernier, beaucoup plus que le soleil, est responsable de la distribution de la chaleur dans les régions profondes des lacs, car elle se fait au moyen des vagues et des courants. L'action du soleil se limite principalement à la surface et aux quelques mètres d'eau immédiatement sous-jacents, où presque tout le rayonnement du rouge et de l'infrarouge du spectre est transformé en chaleur.

Dans le cas d'eaux très troubles, à forte teneur de matières en suspension, les rayons peuvent être totalement arrêtés dès les premiers centimètres supérieurs. Par contre, dans les eaux extrêmement transparentes comme celles du lac Tahoe, à la frontière de la Californie et du Nevada, la lumière bleue peut pénétrer jusqu'à des profondeurs supérieures à 100 m.

Les lacs méromictiques ont un comportement plutôt bizarre: les températures de leurs eaux les plus profondes sont souvent supérieures à celles de leurs eaux de surface. Cela s'explique par la teneur élevée en substances chimiques des eaux les plus profondes<sup>11</sup>. La forte densité due à la présence de ces substances dissoutes crée une barrière permanente qui s'oppose au mélange et qui est aussi efficace que celle de la thermocline en été. Dépendant de la profondeur et de la transparence des eaux des zones supérieures, l'eau du fond chargée de sels tend à accumuler de la chaleur tout comme le fait une automobile fermée, exposée au soleil. La chaleur est facilement gagnée par absorption, mais elle se perd difficilement. Le lac Hot de l'état de Washington aux États-Unis en constitue un exemple extrême. À cause de son peu de profondeur (3 m seulement), la température de l'eau du fond riche en sels y atteint 50°C en été, tandis qu'en hiver, elle se maintient aux environs de 30°C sous la glace.

---

11. Les deux facteurs à l'origine de cet état de choses qui, normalement, agissent de concert sont l'apport de sources salées profondes et l'absence de vent.



La température des eaux profondes des lacs tropicaux se situe généralement entre 15 et 25°C. En surface, elle augmente de 5 à 10°C. La stratification de la densité des lacs tropicaux ressemble à celle des lacs tempérés, quoique les différences de température dans les eaux tropicales soient plus petites. Ceci est dû aux fortes différences de densité qui, à haute température, accompagnent les variations de température. Au sujet des lacs, on retient la règle générale suivante: les températures des eaux profondes sont rarement inférieures à la température moyenne de l'eau lors du mois le plus froid de l'année. Évidemment, car la température de l'air doit être basse pendant longtemps pour pouvoir refroidir une masse importante d'eau.

Bien que la thermocline se maintienne tout au long du printemps et de l'été, elle abandonne souvent sa position horizontale quand un vent prolongé pousse les eaux de l'épilimnion vers la rive sous le vent. Dans les cas extrêmes, l'angle d'abaissement de la thermocline peut être suffisant pour lui permettre de faire surface du côté d'où provient le vent. Quand le vent tombe, il y a déséquilibre. La thermocline se met alors à osciller en bloc, jusqu'à ce que des forces contraires, exercées par le vent ou la perte d'énergie due à la friction, la stabilise. Ces mouvements, connus sous le nom de seiches<sup>12</sup>, font naître des turbulences dans l'hypolimnion et sont importants pour nombre de raisons. Vous avez sans doute déjà remarqué le rapport étrange qui existe entre la température de l'air et celle de l'eau des plages. Il arrive que l'eau soit anormalement froide pour la saison même si le soleil brille et que l'air est chaud. Parfois, c'est le contraire qui se produit. Ces phénomènes surviennent habituellement à la suite d'une seiche interne mise en branle par un coup de vent.

On peut faire l'expérience de ce mécanisme à l'aide d'un verre, du whisky, de l'eau et de la glace. Emplir tout d'abord le verre d'un tiers d'eau; après l'avoir penché, ajouter lentement le whisky voulu, de sorte qu'il forme une couche au-dessus de l'eau, à l'hypolimnion. Entre les deux se trouve un gradient de

---

12. Le mot « seiche », probablement d'origine franco-suisse, désigne l'abaissement du niveau de l'eau d'un lac, à la suite d'une période prolongée de vent.

densité équivalent à celui associé à la thermocline. Faire osciller le verre deux ou trois fois, en cadence avec le mouvement imprimé à la couche de whisky. Tenir ensuite le verre en sa position normale afin d'observer la seiche interne. Enfin, ajouter de la glace et savourer! (Les non-buveurs peuvent tenter l'expérience avec de l'eau et du thé sucré.)

Pour mieux décrire les fluctuations saisonnières de température et de densité dans les lacs, nous prendrons l'exemple d'un lac tempéré. Quand, en hiver, la glace couvre un tel lac, on dit que celui-ci est inversement stratifié du point de vue thermique. L'eau froide à 0°C se trouve directement sous la glace, superposée à l'eau plus chaude et plus dense dont la température se situe entre 0 et 4°C.

À l'arrivée du printemps, la glace fond et les eaux se mélangent grâce à l'action du vent. Peu après, les eaux circulent librement et les températures y sont presque uniformes, à environ 4°C. Le réchauffement par le soleil et le brassage par le vent permettent à la stractification estivale d'avoir lieu en divisant le lac en épilimnion, métalimnion et hypolimnion.

Vers la fin de l'été et au commencement de l'automne, alors que le lac se refroidit en même temps que le milieu environnant, les courants de convection d'eau froide apparus durant la nuit s'enfoncent pour rejoindre leur niveau de densité propre, en se mélangeant aux eaux plus chaudes qu'ils rencontrent pendant la descente. À cause du refroidissement persistant et de la turbulence amenée par le vent, la thermocline se déplace de plus en plus vers les profondeurs. La température de l'épilimnion se rapproche graduellement de celle de l'hypolimnion. Enfin, le gradient de densité associé à la thermocline devient si ténu qu'il cesse d'être un obstacle aux courants descendants. Le lac acquiert la même température à toutes les profondeurs et ses eaux circulent sans entrave. Le refroidissement continu amène la formation de glace à la surface et le cycle annuel est ainsi complété.

C'est ici que prend fin notre exposé des propriétés et du comportement de l'eau. En reliant des forces infimes agissant au sein de ce liquide et les propriétés des lacs, nous avons tâché d'éclair-

cir quelques-uns des mystères de l'eau. Nous avons expliqué le détail des phénomènes que le simple observateur n'est pas en mesure de constater; cela nous a permis de voir comment l'action concertée du soleil et du vent détermine plusieurs caractéristiques thermiques des lacs. Mais ne pourrait-on pas dire que la molécule d'eau est le véritable protagoniste d'une pièce où ces forces ne tiennent que des rôles de figurants?

## CHAPITRE 4

### La respiration des lacs

Aperçu des facteurs régissant l'équilibre du dioxyde de carbone, de l'oxygène et de la matière organique.

La rotation des aiguilles d'une horloge, l'inspiration et l'expiration de l'air des poumons, le calme du matin changé en brise l'après-midi, le mouvement alterné des pistons d'un moteur, l'évaporation et la précipitation de l'eau, la perpétuation de la vie, tous ces processus cycliques relèvent de l'énergie solaire. Parcourant 300 000 kilomètres à la seconde sous forme de rayonnement continu, cette énergie ne prend que 8 minutes 20 secondes pour parvenir à la terre. À son arrivée, la plus grande partie est transformée directement en chaleur. L'autre portion, mise en réserve, dure plus ou moins longtemps et finit par se dégrader en chaleur uniformément distribuée.

Pourtant, sans elle, les techniques n'auraient jamais pu atteindre leur degré de perfection actuel. Les calories que nous ingérons tous les jours proviennent du soleil. L'éclairage électrique est fourni par l'énergie solaire qui, des jours ou des semaines auparavant, a évaporé l'eau d'une mer avoisinante. Les nuages ainsi formés se sont ensuite déplacés au-dessus de la terre ferme, à un niveau plus élevé que celui de la mer. Le charbon, le gaz naturel et le pétrole libèrent, par combustion, l'énergie que le soleil a prodiguée à la terre il y a des dizaines et des centaines de millions d'années. Aucun ingénieur ou scientifique moderne ne songerait à se demander pourquoi nos ancêtres adoraient le soleil car, dans la pléthore des techniques où nous vivons, nous avons tout oublié de notre dépendance à son égard. On en observe peut-être les dernières manifestations chez l'enfant qui, la nuit,

pleure pour garder une lumière allumée ou une porte entrouverte de peur de rester seul dans le noir.

Le soleil est la source de presque toute l'énergie utilisable à la surface de la terre. Située à 150 millions km de lui, la terre intercepte moins de 1/2 000 000 000 de son rayonnement dont environ 1/1 000 seulement est converti annuellement par photosynthèse pour permettre la croissance des plantes.

Au cours de ce processus, les plantes vertes emmagasinent des substances organiques énergétiques qu'elles fabriquent à partir du dioxyde de carbone et de l'eau. L'oxygène est libéré comme sous-produit. À l'inverse, au cours de la respiration cellulaire, les végétaux et les animaux utilisent l'oxygène pour transformer les composés organiques en dioxyde de carbone et en eau, libérant ainsi l'énergie solaire accumulée chimiquement<sup>13</sup>. Globalement, le maintien de la vie repose sur l'équilibre qui s'établit entre ces deux processus importants. Les perturbations survenant dans les eaux naturelles influent sur toutes les formes de vie, de la plus insignifiante des bactéries ou algues, jusqu'aux larves d'insectes ou aux poissons. Ainsi, on peut dire qu'un lac ou la biosphère respirent.

Les transformations chimiques et biologiques prenant part à la régulation de cette respiration sont excessivement compliquées. Heureusement, on peut dégager les principaux phénomènes auxquels elles donnent lieu, sans avoir à s'attarder aux détails. Mais il y a un danger à négliger ces derniers. Nous vivons présentement à une époque où l'Homme peut provoquer des changements considérables dans la biosphère. S'il devait se tromper et porter atteinte à l'environnement, ce serait probablement parce qu'il ne comprend pas parfaitement les rouages compliqués des écosystèmes naturels ou encore, comment une modification mineure à l'échelle humaine peut engendrer des cataclysmes qui échappent à notre contrôle. Quand de telles situations se pro-

---

13. Dans le présent ouvrage, le terme « respiration » s'applique à la décomposition chimique des substances organiques dans les cellules des êtres vivants. C'est la respiration cellulaire. Pour l'échange de gaz au niveau des poumons, on parlera de respiration pulmonaire.

duisent, et elles sont de plus en plus graves et fréquentes, il faut alors s'arrêter et réfléchir.

Dans ce mouvement ininterrompu d'échanges et d'équilibre entre les entités vivantes et non vivantes de la biosphère, les changements qui touchent l'une des parties du système se répercutent sur les autres. Les écosystèmes ont continuellement évolué dans le temps, comme la plupart des êtres. Ne citons qu'un exemple: on reconnaît généralement que tout l'oxygène de l'atmosphère terrestre provient de la photosynthèse. Suite à ce seul processus, la terre est totalement différente de ce qu'elle aurait pu être. L'érosion géologique, la composition chimique des eaux naturelles et la désagrégation des roches se sont modifiées de façon radicale depuis qu'il y a de l'oxygène dans l'atmosphère. Enfin, ni l'être humain ni les animaux ne pourraient respirer sans ce legs laissé par ces organismes que nous qualifions souvent d'inférieurs. Une description de la manière dont la biosphère a commencé à respirer peut donc servir d'introduction à la description de la respiration dans les lacs.

Chez les anciens, la vie était la matière ordinaire animée d'esprits vitaux. Ignorants les processus qui se déroulaient à l'échelle microscopique, ils étaient convaincus que les vers et les larves connaissaient une génération spontanée dans des milieux tels que la bouse ou le sol. N'étaient-ils pas à même de le constater? Même au XVII<sup>e</sup> siècle, Van Helmont, l'un des savants les plus réputés de son temps, croyait que des grains de blé et une chemise sale pouvaient, après une incubation de 21 jours, produire spontanément des souris. Il n'était que surpris de leur parfaite ressemblance avec les souris communes.

Avec une meilleure vision des choses qui suivit l'invention du microscope et les expériences de Redi, Spallanzani et Pasteur, on en vint à admettre que toute forme de vie provenait d'une forme antérieure. Cela souleva bientôt la question de l'origine de la vie.

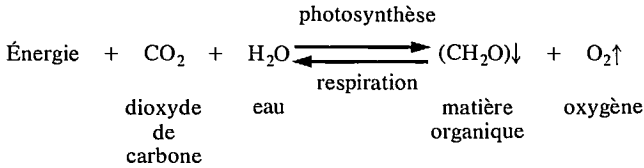
On a fait peu de progrès en ce sens bien qu'il ait été démontré qu'une mixture de substances organiques existait probablement avant l'apparition de la vie sur la terre. À cette époque,

l'atmosphère était exempte d'oxygène et la lumière ultraviolette pouvait se rendre jusqu'à la surface du globe. Des expériences ont montré que plusieurs des constituants chimiques de la vie sont créés quand on irradie à la lumière ultraviolette quelques-uns des gaz simples présents dans l'atmosphère primitive.

On croit que par un lent processus d'évolution chimique, les molécules se sont rassemblées pour créer des formes de vie initiale qui se nourrissaient de l'énergie chimique présente dans cette mixture. Lorsque ce milieu s'est tari en constituants essentiels à la croissance, certaines formes aberrantes sont devenues aptes à synthétiser les molécules manquantes, à mesure que ces dernières disparaissaient du milieu. Des végétaux photosynthétiques pouvant constituer leur propre mixture dans une cellule sont ensuite apparus. Les organismes incapables de le faire sont disparus ou sont devenus dépendants des organismes photosynthétiques.

L'apparition des organismes photosynthétiques a peut-être été l'événement le plus déterminant de l'histoire biologique de la terre. Du même coup, elle permettait l'utilisation de ressources naturelles abondantes comme matière première pour la photosynthèse; elle constituait une réserve d'oxygène qui, comme combustible, permit l'apparition subséquente de formes végétales supérieures et de la vie animale; elle favorisa la production d'ozone à partir de l'oxygène de la haute atmosphère, protégeant ainsi la surface du globe de la lumière ultraviolette nocive pour la vie. Était-ce un accident ou une étape vers un écosystème plus évolué? Qu'importe, ces événements qui ont préparé notre existence il y a quelques milliards d'années n'en sont pas moins fascinants.

L'oxygène est un produit de la photosynthèse. Son accumulation dans l'atmosphère et son utilisation par les formes de vie non photosynthétiques est un exemple frappant de la façon dont la biosphère, à l'opposé de l'Homme, récupère à son profit ses propres déchets. L'oxygène s'est accumulé à cause d'un déséquilibre dans la biosphère entre la photosynthèse et la respiration. On illustre ceci à l'aide de l'équation suivante:



On constate que seulement une partie de la matière organique provenant de la photosynthèse s'est oxydée pour former du dioxyde de carbone et de l'eau. L'autre partie était déposée dans les sédiments, constituant les composés organiques fossiles tels que les schistes ampéliteux, le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Pour chaque atome de carbone organique fossilisé, une molécule d'oxygène est passée dans l'atmosphère.

Certains savants ont prétendu que l'Homme court maintenant le danger de voir s'appauvrir l'oxygène de l'atmosphère à cause de sa consommation de combustibles. Ils ont même déclaré que nous étions en train de détruire l'équilibre qui a mis quelques milliards d'années à s'établir dans la nature. Cependant, cet équilibre n'est pas près de se déplacer, car la plus grande partie du carbone organique fossile ne peut être exploitée ou brûlée.

D'autres scientifiques ont plus justement affirmé que l'augmentation de la teneur de dioxyde de carbone dans l'air due à la combustion pouvait faire monter la température du globe. Mais les énormes systèmes équilibrants que sont les océans et les plantes photosynthétiques peuvent facilement y contrecarrer puisque pour toute molécule de dioxyde de carbone assimilée, il y a libération d'une molécule d'oxygène. Si les mécanismes naturels de régulation fonctionnent de la manière exposée ci-dessus, il n'y a pas de quoi s'inquiéter. Seulement, nos connaissances de la biosphère ne sont pas suffisantes pour nous permettre de déterminer dans quelle mesure elle peut exercer cette action régulatrice.

Nous ignorons quand exactement la vie et la photosynthèse sont apparues sur la terre, mais si l'on se fie aux fossiles d'algues très bien conservés, découverts dans des dépôts anciens de



la rive nord du lac Supérieur, elles remontent sûrement à plus de 2 500 millions d'années. Des fossiles moins convaincants ont été trouvés dans le roc, en Afrique du Sud; ils auraient 3 300 millions d'années. L'absence de vestiges plus anciens laisse libre cours aux spéculations au sujet de ce qui a pu se passer entre ce moment et celui où la terre s'est formée, il y a environ 5 milliards d'années.

En ce qui concerne la respiration des lacs, il faut d'abord s'arrêter au dioxyde de carbone. Parmi les 15 à 20 éléments chimiques nécessaires à la croissance des différentes plantes aquatiques, le carbone est d'une importance capitale car il comprend environ la moitié du poids de la matière organique des cellules vivantes. Tous les êtres vivants ont un grand besoin de carbone. Cependant, comme on l'a vu au chapitre traitant de l'eutrophisation, le carbone est rarement un facteur limitant la croissance des plantes dans les eaux continentales. Dans presque tous les cas (en excluant les eaux enrichies par les déchets des eaux usées), la quantité de carbone présente dans le milieu est plus que suffisante pour répondre à la demande.

Presque tous les éléments chimiques naturels peuvent être trouvés en concentrations quelconques dans la plupart des eaux continentales. Certains, comme l'uranium ou l'or, sont tellement dilués qu'il faut recourir à des méthodes spéciales pour parvenir à en faire l'analyse. Le calcium et le carbone, quant à eux, sont généralement assez concentrés pour que les analyses ordinaires puissent les déceler. En fait, si l'on avait à donner la composition des eaux continentales au moyen d'une seule formule, on utiliserait celle du bicarbonate de calcium.

À l'intérieur de leur bassin hydrographique, les cours d'eau recueillent les précipitations atmosphériques, les produits de l'érosion des roches et de la synthèse végétale ainsi que les déchets industriels et animaux. Dans les régions de roches granitiques recouvertes d'une mince couche de sol, comme celles des boucliers du Canada, de la Fennoscandie et de l'U.R.S.S., la quantité de matière minérale lessivée du sol est faible. Les lacs et les cours d'eau de ces régions ont par conséquent de faibles teneurs

en sels minéraux dissous et sont constitués d'eau douce. À l'opposé, les lacs et les cours d'eau des régions de rocs sédimentaires ont normalement de fortes teneurs en sels minéraux dissous. Ce sont des eaux dites dures lorsqu'elles contiennent des quantités notables de sels de magnésium et de calcium. La dureté de l'eau est principalement causée par de fortes teneurs en ions calcium, magnésium et d'autres ions à charge double ou triple qui précipitent avec les savons.

Les eaux naturelles sont également chargées de gaz atmosphériques dissous. Les eaux de surface en contact avec l'air contiennent normalement de 15 à 25  $\mu\text{g/g}$  d'azote et de 8 à 14  $\mu\text{g/g}$  d'oxygène. (À pression égale de gaz, l'azote est effectivement moins soluble que l'oxygène. La teneur plus forte en azote dans les eaux naturelles est due au fait que sa pression partielle dans l'atmosphère est plus de trois fois supérieure à celle de l'oxygène.) Quand ces gaz se dissolvent dans l'eau, leur structure chimique ne change pas. Au contraire, quand le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau, il réagit chimiquement avec l'eau pour former un nouveau composé, l'acide carbonique. Cet acide est lui-même en équilibre avec trois autres formes de carbone minéral: les bicarbonates, les carbonates et le carbonate de calcium.

On retrouve donc cinq formes de carbone minéral dans les eaux naturelles: le dioxyde de carbone, l'acide carbonique, les bicarbonates, les carbonates et le carbonate de calcium. Ils sont tous facilement transformables, l'un vers l'autre, selon les conditions du milieu. L'addition d'acide à un échantillon d'eau naturelle amène un déplacement du carbone minéral vers le dioxyde de carbone. L'addition d'une base provoque un déplacement du carbone minéral vers les carbonates et le carbonate de calcium. (La soude caustique et les lessives de soude et de potassium sont basiques. Les acides et les bases se neutralisent mutuellement.)

La transformation du carbone minéral ressemble beaucoup à un échange de devises de pays différents, sauf que dans le système chimique, l'échange doit suivre un ordre établi. Ainsi,

si la série dioxyde de carbone — acide carbonique — bicarbonates — carbonates — carbonate de calcium représentait la série Danemark — Allemagne — Suisse — Autriche — Italie, la couronne danoise ne pourrait être échangée directement en lire italienne. La transaction devrait d'abord passer par le mark, le franc et le schilling. Cela peut sembler très laborieux mais, à l'exception des transformations entre le dioxyde de carbone et l'acide carbonique, les réactions se déroulent à la vitesse de l'éclair. Malgré tout, dans les conditions normales, la conversion entre le dioxyde de carbone et l'acide carbonique se fait à 90 % en quelques minutes. Soulignons que la nature n'impose aucun frais pour opérer ces échanges.

Pour ce qui est de la conversion entre le carbone organique et minéral, la situation est complètement différente. La nature perçoit des frais élevés pour la conversion du dioxyde de carbone en carbone organique. Dans le cas particulier de la photosynthèse, c'est le soleil qui y pourvoit. Une partie de l'énergie qu'il fournit est restituée au cours de la respiration cellulaire, quand les composés organiques se changent en dioxyde de carbone et en eau.

On voit combien il est vain d'analyser le comportement du dioxyde de carbone sans tenir compte des autres formes qu'emprunte le carbone dans les écosystèmes aquatiques. Quand l'une des formes de carbone minéral disparaît ou apparaît dans le système, les autres formes réagissent de façon à s'opposer au changement. La photosynthèse et la respiration cellulaire agissent aussi sur les formes et l'abondance du carbone minéral dans les eaux naturelles. Bref, l'ensemble des composés naturels du carbone doit être étudié en fonction du cycle du carbone. Les définitions qui suivent nous faciliteront la compréhension de ce cycle.

L'ion — Atome ou molécule possédant une charge électrique. Dans les eaux naturelles, on trouve une foule d'ions de nature différente. Plusieurs entrent dans la composition de la matière vivante et sont essentiels à la santé et à la vie. Certains, comme les ions calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ) et les ions hydrogène ( $\text{H}^+$ ), portent

une charge positive, tandis que d'autres, les ions bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ), carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et hydroxyle ( $\text{OH}^-$ ), portent une charge négative. Les ions hydrogène et les ions hydroxyle s'unissent pour donner de l'eau ( $\text{H}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O}$ ).

**Le pH** — Le terme pH se rapporte à la concentration des ions hydrogène exprimée à l'aide d'une échelle logarithmique de zéro (acide) à 14 (basique). Plus le pH est faible, plus la concentration en ions hydrogène est forte et plus la solution est acide. Une baisse d'une unité de pH correspond à un décuplement de la concentration des ions hydrogène.

**Les tampons** — Les tampons stabilisent le pH en neutralisant les ions hydrogène et hydroxyle. Les bicarbonates sont les principaux tampons des eaux naturelles, du sang et de certains mélanges effervescents. Les eaux dites douces sont faiblement tamponnées; les eaux dures le sont fortement. L'eau par elle-même n'a aucune propriété de tampon.

Deux expériences élémentaires peuvent illustrer ces notions et les relier au cycle du carbone. Pour la première, dissoudre une cuillerée à thé de bicarbonate de soude dans un demi-verre d'eau. Ajouter ensuite du vinaigre (acide acétique), un peu à la fois. La solution de bicarbonate bouillonne violemment avec l'addition du vinaigre.

L'explication de ce phénomène est la suivante: la solution aqueuse de bicarbonate de soude contient des ions sodium et bicarbonate. Le vinaigre agit comme source d'ions hydrogène qui transforment les ions bicarbonate en acide carbonique et en dioxyde de carbone. Le dioxyde libéré par la solution provoque le bouillonnement. Une détermination du pH avant et après l'addition du vinaigre n'accuserait aucun changement notable, la solution ayant été tamponnée par le bicarbonate.

La deuxième expérience vous sera probablement familière, si vous vivez dans une région où l'eau est modérément dure. En prenant une vieille bouilloire, vous remarquerez que l'intérieur est recouvert d'un dépôt de carbonate de calcium qui cause aussi l'entartrage des chaudières. Cette couche se forme

à la suite de l'élimination du dioxyde de carbone par le chauffage de l'eau.

On explique ceci de la manière suivante: la solubilité des gaz dans l'eau décroît avec l'augmentation de la température. Le dioxyde de carbone des eaux naturelles se caractérise par le fait que pour chaque molécule qui part, un ion hydrogène et un ion bicarbonate réagissent pour donner de l'acide carbonique alors qu'un ion hydroxyle et un ion bicarbonate réagissent pour donner un ion carbonate et une molécule d'eau. Le résultat net est la formation d'un ion carbonate pour chaque molécule de  $\text{CO}_2$  libérée. Dans les eaux à fortes teneurs en ions calcium (eaux dures), les ions carbonate en excès peuvent précipiter sous forme de carbonate de calcium.

Au cours de l'été, un phénomène semblable à l'entartrage des chaudières survient naturellement dans certains lacs à eau dure, à cause de la photosynthèse et du réchauffement des eaux. Une faible lactescence apparaît dans les eaux, à la suite de la formation de petits cristaux de carbonate de calcium. À cause de l'élimination du dioxyde de carbone pendant la photosynthèse, on retrouve du carbonate sur les herbes et les algues filamenteuses qui poussent sur les pierres proches de la rive.

Les divers facteurs qui influent sur la forme et l'abondance du carbone minéral dans les lacs sont représentés au moyen de l'oiseau schématique de la figure 2. Les équations chimiques montrent comment les différentes formes de carbone minéral sont reliées entre elles et les points témoignent de l'abondance relative des atomes de carbone. Pour une modification donnée du milieu, le flux des atomes de carbone obéit à la loi de gravité et est déterminé par l'angle d'inclinaison des ailes de l'oiseau. L'échappement des atomes de carbone des ailes indique le passage du dioxyde de carbone de l'eau vers l'air ou la précipitation du carbonate de calcium de la solution.

La position de *virage à gauche* de l'oiseau montre ce qui arrive quand des déchets industriels acides sont déversés dans les eaux naturelles: le pH diminue, les atomes de carbone se dirigent du côté du dioxyde de carbone et une partie de ce der-

# LA RESPIRATION DES LACS

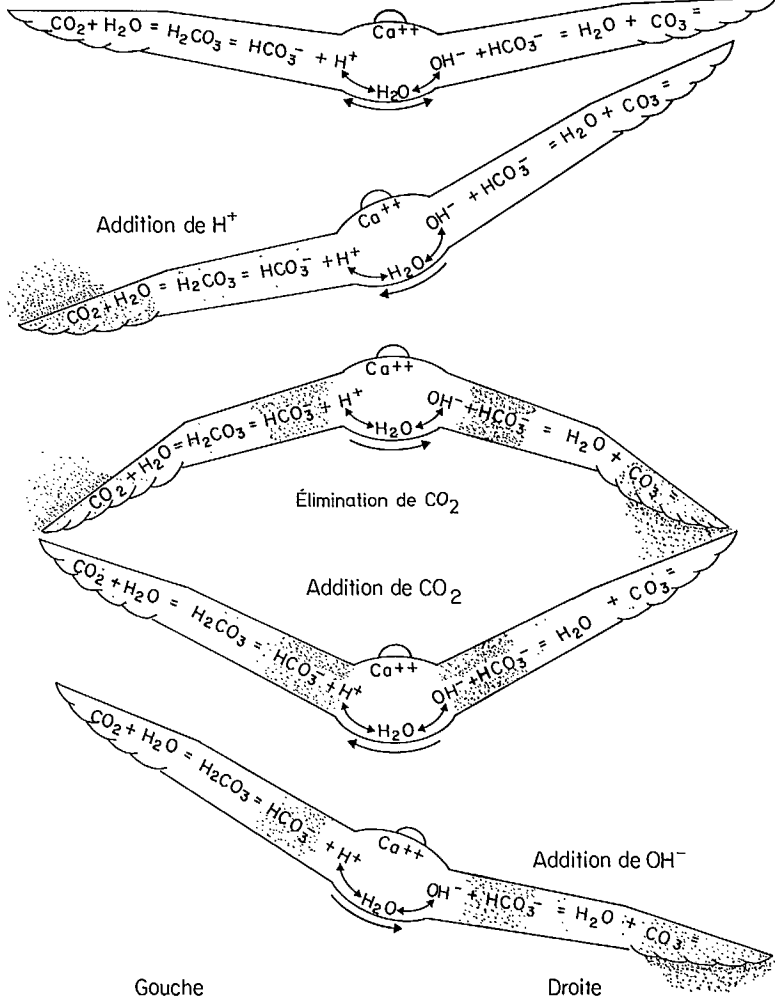


Fig. 2 Oiseau schématique montrant l'équilibre entre les différentes formes de carbone minéral dans l'eau, dans diverses conditions. Les points indiquent l'abondance relative des différentes formes du carbone, les molécules étant animées d'un mouvement descendant qui varie avec l'angle des ailes par rapport à la verticale. Le départ des points (molécules) du bout des ailes correspond au passage du  $CO_2$  de l'eau vers l'air (*aile gauche*) ou à la formation de carbonate de calcium (*aile droite*). Les flèches sous le corps de l'oiseau indiquent la tendance qu'a l'eau ( $H_2O$ ) de produire des ions hydrogène ( $H^+$ ) ou des ions hydroxyle ( $OH^-$ ).

nier est libérée dans l'air. La position de *virage à droite* montre ce qui arrive quand les déchets industriels sont basiques: le pH grimpe, les atomes de carbone se dirigent du côté des carbonates et si les eaux sont assez dures, quelques-uns d'entre eux précipitent sous forme de carbonate de calcium.

La position *ails basses* de l'oiseau correspond à l'élimination du dioxyde de carbone de l'eau due au réchauffement ou à la photosynthèse. Le flux des atomes de carbone se dirige vers l'extrémité des ailes. Dans les eaux dures, le carbonate de calcium précipite souvent en même temps que disparaît le dioxyde de carbone. Les *ails disposées en V* illustrent la situation inverse: l'addition de dioxyde de carbone à l'eau, suite au refroidissement des eaux en automne ou à l'activité respiratoire des organismes vivants au cours de la nuit. Le flux des atomes de carbone se fait de l'extrémité des ailes vers le corps de l'oiseau et la quantité de bicarbonate augmente aux dépens du dioxyde de carbone et des ions carbonate. Si le carbonate de calcium est présent, il tend à se dissoudre, bien que très lentement. Les précipités se dissolvent toujours plus lentement qu'ils ne se forment.

Cet oiseau schématique nous explique la raison pour laquelle les lacs où l'eau n'est pas dure réagissent à l'enrichissement en éléments nutritifs par une augmentation brusque du pH, tandis que dans les lacs à eau dure, il y a précipitation du carbonate de calcium sans variation importante du pH.

Dans toutes les eaux naturelles, les premiers signes d'enrichissement en éléments nutritifs sont une augmentation du taux de production photosynthétique et une multiplication des plantes vertes. Dans les eaux dures, ceci entraîne la précipitation du carbonate de calcium à cause de l'utilisation du dioxyde de carbone par les plantes photosynthétiques, phénomène décrit précédemment. Dans les eaux douces, la teneur en bicarbonates est si faible, qu'elle ne peut agir efficacement comme tampon des ions hydroxyle libérés par le départ du dioxyde de carbone. Par conséquent, les ions hydroxyle deviennent plus nombreux et le pH augmente.

Ces réactions ont été analysées en détail et décrites dans de nombreux lacs. L'un des cas les plus intéressants est le lac 227, un des 46 petits lacs de la région du lac des Bois réservés à des fins d'étude expérimentale de la pollution de l'eau<sup>14</sup>. L'eau de ce lac est non dure. L'addition contrôlée de phosphates et de nitrates pendant une période de deux ans a amené l'augmentation du nombre de plantes photosynthétiques et le pH est passé de 6 à 10, ce qui équivaut à une multiplication par 10 000 de la teneur en ions hydroxyle. Quant à la précipitation du carbonate de calcium résultant de l'eutrophisation liée aux activités humaines, nous l'avons étudiée au chapitre traitant du lac de Zurich en Suisse. Ce phénomène s'inscrit dans une suite d'événements sur lesquels nous sommes bien renseignés et qui sont caractéristiques de tous les lacs du monde enrichis d'éléments nutritifs.

L'équation que les chimistes utilisent pour décrire la réciprocity des réactions de photosynthèse et de respiration cellulaire montre l'eau et le dioxyde de carbone dans l'un de ses membres et la matière organique et l'oxygène dans l'autre. Nous avons déjà traité de l'eau et du dioxyde de carbone. Il ne nous reste plus qu'à parler de la matière organique et de l'oxygène.

Tout comme différents types de communautés végétales se développent sur la terre selon les conditions locales du climat, de la topographie et du sol, il existe des communautés naturelles d'organismes aquatiques qui s'épanouissent dans des conditions données. À deux exceptions près, les facteurs physiologi-

---

14. En 1968, à la suite d'un accord signé entre les gouvernements canadien et ontarien, 46 petits lacs et leur aire de drainage ont été réservés, pour une durée de 20 ans, à la recherche sur l'eutrophisation liée aux activités humaines et les problèmes connexes de pollution d'eau douce. Les lacs sont situés dans une région isolée du nord-ouest ontarien, immédiatement à l'est du lac des Bois. Ce projet a été créé en 1965, par W.E. Johnson de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada (faisant maintenant partie du Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement) et a été réalisé par une équipe de l'Institut des eaux douces du Canada en collaboration avec d'autres organismes et universités, sous la direction de D.W. Schindler. Pour une description générale de cette région, on peut consulter le *Journal de l'office des recherches sur les pêcheries du Canada*, 1971, 28: 121 à 301 et 1973, 30: 1409 à 1552.



ques importants dans les milieux aquatiques sont les mêmes que ceux qui prévalent sur la terre ferme: ce sont la lumière, la température, les courants aquatiques (au lieu du vent) ainsi que la nature chimique et physique du milieu. Les deux exceptions sont l'eau, omniprésente dans les lacs, mais existant en quantités variables sur la terre et l'oxygène qui est partout dans l'air, mais qu'on trouve en concentrations variables dans les eaux profondes des lacs.

Les organismes qui peuplent les écosystèmes aquatiques ont adopté trois modes de vie principaux: deux sont associés à des conditions de vie au sein de l'eau et un, avec les sédiments du fond. Le plancton est la communauté d'organismes dont les moyens de locomotion sont limités et qui vivent au sein de l'eau, plus ou moins indépendamment du fond. La distribution des espèces planctoniques est en grande partie assujettie aux courants aquatiques. L'autre groupe d'organismes vit dans le milieu aquatique proprement dit et comprend les poissons et autres vertébrés qui se meuvent activement. Les organismes vivant en association avec le fond sont désignés sous le nom collectif de benthos.

La plupart des espèces planctoniques sont plus petites qu'un grain de sable. Mais quelques-unes, telles que la larve de corèthre *Chaoborus*, le crustacé *Mysis relicta* et la méduse d'eau douce très répandue mais rarement observée *Craspedacusta* atteignent un centimètre ou plus de longueur. Les organismes benthiques sont généralement plus gros que les organismes planctoniques; ce sont des algues filamenteuses, poussant sur des roches près des berges, des herbes et une foule d'insectes et d'invertébrés aquatiques.

Le plancton erre sans cesse dans l'eau en quête de nourriture ou d'un conjoint, comptant sur ses instincts primitifs pour éviter de s'égarer dans des milieux hostiles. Les proies doivent constamment être sur le qui-vive au cas où surviendrait un prédateur. La réalité de la mort est sans cesse présente; plusieurs espèces pondent des centaines ou des milliers d'oeufs dont seulement deux en moyenne donnent des adultes reproducteurs.

Le nombre total d'espèces végétales et animales vivant dans les écosystèmes est supérieur à ce que l'on serait porté à croire. Dans un lac donné on peut en trouver des milliers, tandis que pour l'ensemble des eaux continentales, il est question de dizaines de milliers d'espèces. On en découvre et on en décrit encore de nouvelles à raison de quelques centaines par année. Les cycles évolutifs détaillés de ces formes et les interactions exercées entre elles sont tellement complexes, qu'une encyclopédie ne suffirait pas à couvrir le peu de matière que nous connaissons. Mais au delà de la trame de ce tableau vivant, il y a un fil conducteur qui permet d'en simplifier le sujet; c'est la loi du plus fort où les ressemblances des rapports prédateur-proie permettent de grouper les organismes en un nombre limité de niveaux trophiques ou de nutrition d'une chaîne alimentaire.

L'utilité de cette classification trophique est qu'elle favorise une compréhension dynamique de la distribution de l'énergie fournie par le soleil à tous les niveaux de la chaîne alimentaire: du soleil aux plantes vertes; des plantes vertes aux herbivores; des herbivores aux carnivores et aux agents de décomposition. Elle nous rappelle comment les organismes de différents niveaux trophiques dépendent les uns des autres. Bref, grâce à elle, on peut évaluer la production des écosystèmes.

Le niveau trophique à la base du cycle alimentaire est occupé par les plantes vertes. Celles-ci utilisent l'énergie solaire pour faire la synthèse des composés organiques qui servent de nourriture aux organismes du niveau suivant. Le rendement annuel net de cette conversion de l'énergie est plutôt faible dans la plupart des écosystèmes d'eau douce. Il constitue de 0,01 à 1% des calories d'énergie radiante reçue par les plantes. Ceci veut dire que 99 à 99,99% de l'énergie solaire n'est pas utilisée pour la photosynthèse. Les causes principales de ces faibles rendements sont les suivantes: 1° la lumière est absorbée par la matière inerte (eau, matières en suspension, matières colorantes dissoutes) avant d'atteindre les cellules des plantes vertes; 2° des déficiences en éléments nutritifs peuvent limiter l'action de la photosynthèse même si la lumière est abondante. Ces rendements

semblent donc très réduits par rapport à ceux des synthèses dirigées par l'être humain. Précisons toutefois que l'Homme omet de tenir compte de la quantité d'énergie consacrée à la récolte, au raffinage, au transport des matières premières sur les lieux de la synthèse, etc.

Ces faibles rendements ne réjouissent peut-être pas les pêcheurs sportifs qui apprécient les lacs pour le poisson qu'ils y prennent, mais les ingénieurs et les citoyens peuvent y trouver motif à consolation. En effet, si les écosystèmes aquatiques étaient plus efficaces au point de vue photosynthétique, l'abondance des plantes dégraderait le goût de l'eau, sa consistance ou son odeur. Les intérêts du pêcheur peuvent aussi être menacés lorsque, par exemple, une augmentation de la croissance végétale amène plus de poissons mais moins de truites.

Le niveau trophique qui vient ensuite dans le cycle alimentaire groupe les herbivores, animaux se nourrissant de plantes vertes. Dans la communauté planctonique, ce sont des formes minuscules qui filtrent les algues au moyen d'appendices velus. Pour bien se rendre compte des variations incroyables que l'évolution a créées, il faudrait suivre un Gulliver moderne dans l'univers de la vie microscopique. Les herbivores benthiques se nourrissent en grattant les algues des roches et les herbes aquatiques ou en broutant les végétaux feuillus. Ils se nourrissent également de déchets, restes de tissus végétaux et animaux.

Le rendement annuel net de la conversion par les herbivores de la matière végétale en nouveau tissu animal varie, mais il est normalement d'environ 10 % dans les lacs. Ce rendement est de beaucoup supérieur à celui de la transformation de l'énergie solaire en nouveau tissu végétal. C'est que l'énergie fournie par les végétaux que les herbivores consomment est sous une forme chimique facilement assimilable.

Les carnivores, qui vivent aux dépens des herbivores, occupent le niveau trophique suivant. Plusieurs insectes, crustacés et poissons prédateurs entrent dans cette catégorie. Vient ensuite de plus gros carnivores, avec des gueules plus grandes, qui se nourrissent des carnivores plus petits. C'est le

cas du brochet et de la truite. Le rendement annuel net de la conversion de l'énergie accumulée par les herbivores en tissu animal est à peu près le même que celui de la conversion de l'énergie renfermée dans le tissu végétal en nouveau tissu animal, c'est-à-dire environ 10 %.

Conséquemment aux énormes pertes d'énergie associées à la distribution de l'énergie à chaque niveau du cycle alimentaire, la quantité de matière végétale nécessaire à la production d'un poids donné de poisson carnivore peut être très considérable. Afin d'ajouter une unité de poids à une truite de lac, par exemple, il faut un passage dans le cycle alimentaire d'une quantité d'énergie équivalente à quelques centaines d'unités semblables de poids de matière végétale. La même situation prévaut pour le cycle alimentaire terrestre où le fourrage nourrit le bétail qui à son tour, alimente l'Homme.

La matière organique produite par les végétaux qui n'est pas absorbée par les herbivores est transformée à un autre niveau du cycle alimentaire par des agents de décomposition comme les bactéries, les champignons microscopiques et les protozoaires. Ces micro-organismes rendent un service essentiel à l'écosystème, un peu comme le fait un aspirateur dans une maison ou au bureau. Nous sommes rarement conscients de leur existence, mais nous le deviendrions rapidement s'ils cessaient de jouer leur rôle. Les déchets décomposables que nous jetons à la poubelle ou aux égouts s'accumuleraient dans la nature et constitueraient bientôt un fléau.

Quand nous évaluons des objets, nous avons tendance à leur attribuer une importance en proportion directe avec leur taille, sans trop attacher d'importance à leur fonction. Il est donc surprenant d'apprendre que des êtres minuscules et presque invisibles comme les algues des lacs peuvent produire autant, sinon plus, de matière organique au cours d'une année que des arbres occupant une superficie comparable dans une forêt avoisinante. Ils y parviennent en reconstituant rapidement leurs populations.

Règle générale, plus l'organisme (ou son stade de croissance) est petit, plus le taux de croissance par unité de poids est élevé. Ainsi, quand les conditions sont favorables, les bactéries peuvent reproduire leur poids original en quelques minutes ou quelques heures et les algues unicellulaires, en quelques heures ou quelques jours; pour une larve d'insecte, cela prendra des jours ou des semaines et pour les gros poissons et les plantes fixées, des mois ou des années. La même règle s'applique aux processus qui accompagnent la respiration. En passant des petits organismes aux gros organismes vivants, le taux de métabolisme par unité de poids décroît de façon logarithmique avec l'augmentation du poids de l'organisme. C'est pour ces raisons que l'on peut considérer les espèces microscopiques comme étant les principaux organismes qui régularisent la respiration des lacs.

Les algues sont ordinairement les plus importants producteurs primaires de matière organique et d'oxygène. Les bactéries, les champignons microscopiques et les autres petits organismes sont les plus importants agents de décomposition, consommant de l'oxygène au cours de la décomposition de la matière organique et produisant du dioxyde de carbone. Leur taille ne laisse aucunement deviner le rôle important qu'ils jouent dans l'écosystème.

Dans les lacs, la profondeur jusqu'où s'opère la production de l'oxygène par photosynthèse varie selon la transparence des eaux. Dans les eaux très troubles, elle ne sera que de quelques centimètres, mais dans les eaux très claires comme celles du lac Baïkal en U.R.S.S. ou du lac Crater en Orégon, elle pourra atteindre 30 m ou plus. Cependant, pour la plupart des lacs, le gros de toute la photosynthèse se fait dans l'épilimnion, alors que dans l'hypolimnion il se produit surtout de la décomposition<sup>15</sup>.

---

15. La plus grande partie de la décomposition de la matière organique dans les lacs se fait en réalité dans l'épilimnion, là où la vie est abondante et active à des températures plus élevées que celles de l'hypolimnion. La caractéristique de l'hypolimnion est que le taux de décomposition l'emporte nettement sur le taux de photosynthèse.

La frontière entre les zones de photosynthèse et de décomposition coïncide fréquemment avec la thermocline. Coupé de tout contact avec l'atmosphère par cette barrière et dépourvu de la lumière suffisante à la photosynthèse, l'hypolimnion est donc une zone où l'oxygène se consomme sans être par la suite efficacement régénéré. C'est pourquoi la teneur en oxygène dissous a tendance à y baisser avec le temps.

Le degré d'appauvrissement de l'hypolimnion en oxygène dépend de nombreux facteurs. Les plus importants sont la vitesse avec laquelle la matière organique descend dans l'hypolimnion et le volume de l'hypolimnion par rapport aux dimensions et à la forme de la cuvette lacustre. Le premier facteur est avant tout déterminé par le taux de production photosynthétique de matière organique dans l'épilimnion et le deuxième, par la façon dont la cuvette sert d'entonnoir en concentrant le plancton mort ou moribond qui provient des couches supérieures. Cela ressemble à la préparation d'une tasse de thé: plus il y aura de feuilles de thé (plancton mort ou moribond) et moins il y aura d'eau (volume de l'hypolimnion), plus le produit final sera foncé (ou plus fortes seront la teneur en matières organiques et la consommation d'oxygène dans l'hypolimnion). Dans les lacs très étendus et profonds, l'appauvrissement en oxygène dans les eaux profondes n'est pas important à cause du volume imposant de l'hypolimnion et de la forte teneur initiale en oxygène.

L'appauvrissement en oxygène et la formation de dioxyde de carbone dans les eaux profondes des lacs eutrophes s'intensifient au cours de l'été. Les bactéries et la matière organique étant concentrées à la surface des sédiments, l'épuisement de l'oxygène commence là pour gagner le haut. Quand la teneur en oxygène dissous tombe à moins d'un milligramme par litre, juste au-dessus de la couche de sédiments, une nouvelle série de réactions chimiques a lieu. Celle-ci a été exposée par Wilhelm Einsele, en Autriche et Clifford Mortimer, en Angleterre. L'hydroxyde de fer insoluble, présent dans les sédiments, passe de la forme ferrique ( $\text{Fe}^{+++}$ ), à ferreuse ( $\text{Fe}^{++}$ ), ce qui provoque

un changement du brun au noir de la couleur des sédiments<sup>16</sup>. En même temps, diverses substances chimiques sont libérées dans l'eau par les sédiments et se distribuent horizontalement et verticalement à la suite de la turbulence provoquée par les seiches internes. Dans ces conditions, les organismes ayant besoin d'oxygène disparaissent de la surface des sédiments par migration, enkystement ou tout simplement parce qu'ils meurent. Si la région pauvre en oxygène gagne le haut jusqu'à la thermocline, il peut s'ensuivre une forte mortalité du poisson qui vit en eaux profondes.

En automne, avec la disparition de la thermocline, un processus contraire commence. À mesure que les eaux du lac sont mélangées et réoxygénées, l'hydroxyde de fer précipite. La plupart des autres substances libérées par les sédiments voient leur concentration baisser, soit à cause de la dilution qui accompagne le mélange des eaux profondes avec les eaux de surface, soit par précipitation. Certains éléments nutritifs libérés des sédiments demeurent dans l'eau et serviront de nourriture pour la prochaine génération d'algues. L'importance de la régénération des éléments nutritifs des sédiments pour la croissance végétale fait l'objet de débats animés entre les limnologues. Certains affirment sa très grande importance; d'autres restreignent sa portée aux lacs très peu profonds. Pour trancher la question, il faudrait disposer de données supplémentaires.

La plupart des changements décrits pour les eaux profondes des lacs eutrophes en été se produisent aussi sous la couche de glace et de neige des lacs des zones tempérées et polaires. Dans les eaux eutrophes et peu profondes, ces changements peuvent amener la mort des poissons en hiver à cause de l'épui-

---

16. Le mot latin pour fer est *ferrum*. Sous sa forme ionique, le fer peut passer de l'état ferrique ( $Fe^{+++}$ ) à l'état ferreux ( $Fe^{++}$ ) selon le pH et la concentration en oxygène dissous dans le milieu. En présence de fortes concentrations en oxygène dissous, le fer existe sous la forme d'oxyde ferrique de couleur rouille; sous sa forme réduite (ferreuse) existant dans les sédiments, le fer réagit souvent avec le sulfure d'hydrogène pour former un précipité noir de sulfure de fer ( $FeS$ ). Il est souvent possible de deviner sous quelle forme se présente le fer dans les sédiments, par la couleur de ces derniers.

sement de l'oxygène dans toute la masse d'eau. Un aperçu de l'élevage de la truite arc-en-ciel dans les lacs où toute manifestation de vie cesse avec les froids de l'hiver illustrera de quelle manière les lacs dépourvus d'oxygène peuvent être utilisés et exploités par l'Homme.

Dans les prairies de l'Ouest canadien, on trouve de nombreux étangs et lacs naturellement productifs dont le peu de profondeur, les quantités d'éléments nutritifs et les taux élevés de productivité causent leur appauvrissement en oxygène sous leur couche de glace et de neige. Cet épuisement entraîne, à la fin des longs hivers de la prairie, la mort certaine des poissons. Les pisciculteurs s'abstiennent évidemment d'y ensemençer les jeunes poissons.

L'absence de prédateurs dans ces lacs et les conditions favorables à la croissance qui prévalent au cours de l'été encouragent la multiplication et la croissance de certains invertébrés du fond. C'est justement le cas de *Gammarus*, crustacé ressemblant à une crevette, qui peut survivre à l'hiver et aux conditions de pauvreté en oxygène qui l'accompagnent. De plus, les eaux y sont riches en algues à cause des fortes teneurs en éléments nutritifs.

Un groupe de scientifiques canadiens a décidé de voir si ces lacs pouvaient servir à l'élevage commercial du poisson. Il s'agissait d'y introduire au printemps, du poisson à croissance rapide au stade d'alevin, et de le pêcher en automne, sous forme de poisson propre à la mise en marché. L'espèce choisie fut la truite arc-en-ciel. Au printemps de 1968, on mit des truitelles de 5 à 7 cm dans le lac et, quand on les repêcha à l'automne, elles mesuraient de 22 à 35 cm. Leur poids variait de 0,3 à 0,45 kg.

De ces modestes débuts est née une industrie en pleine expansion qui produit autant par unité de superficie que la culture du blé dans les prairies. Avec l'amélioration génétique des individus producteurs, comparable à celle du maïs hybride, les plaines de l'Ouest canadien pourront un jour devenir célèbres grâce à leur truite arc-en-ciel.



Ceci met fin à la question de la régulation du dioxyde de carbone, de l'oxygène et de la matière organique dans les écosystèmes aquatiques ainsi qu'à la parenthèse que nous avons ouverte sur la limnologie et qui a débuté avec un aperçu de l'importance de l'eau dans les lacs. Le prochain chapitre portera sur le rôle du phosphore dans la biosphère, introduction à une analyse systématique de la manière dont on peut vaincre l'eutrophisation liée aux activités humaines.

## CHAPITRE 5

### Le phosphore, étoile du matin

L'importance du phosphore pour la nature, la vie et l'Homme.

Comme la plupart des alchimistes du XVII<sup>e</sup> siècle, Hennig Brand de Hambourg était obsédé par le désir de découvrir le principe secret de la pierre philosophale, cette pierre magique dont on disait qu'elle avait le pouvoir de transmuter les métaux vils en or. Ses démarches en ce sens restèrent infructueuses mais en 1669, à partir d'un mélange, Brand obtint un étrange produit. Contrairement aux autres substances alors connues, ce corps brillait dans l'obscurité d'une lumière qui lui était propre et, exposé à l'air, il s'enflammait spontanément. Brand l'appela phosphore, ce qui signifie porte-lumière ou Lucifer, nom donné par les astronomes grecs et romains de l'Antiquité à la planète Vénus, l'étoile du matin.

On peut facilement imaginer les répercussions d'un tel événement à cette époque: cela renforça la croyance de tout alchimiste en la découverte imminente de la pierre philosophale et de l'élixir de longue vie. Mais la chimie d'alors était plus un art qu'une science. Il faudra attendre un siècle avant que l'eau ne soit considérée comme un composé d'hydrogène et d'oxygène plutôt que comme un élément et un siècle et demi avant la première synthèse chimique d'un composé organique. En 1669, le tableau périodique des éléments chimiques restait à établir, la structure des atomes et des molécules demeurait inconnue et on attribuait des caractères mâles et femelles aux acides et aux

bases. Deux mille ans après Aristote, on considérait encore l'air comme étant une substance simple.

Le fait que Brand ait utilisé de l'urine comme produit de départ pour la synthèse du phosphore est un élément de plus au dossier de l'eutrophisation liée aux activités humaines. En évaporant une grosse quantité d'urine jusqu'à l'obtention d'un résidu sec qu'il a ensuite chauffé en présence de sable blanc et fin, Brand a pu voir de mystérieuses vapeurs passer dans un second récipient où le phosphore élémentaire s'est solidifié en cristaux jaune pâle, sous une couche protectrice d'eau. Incapable de résoudre l'énigme de la pierre philosophale, Brand ne se doutait pas qu'il avait accidentellement découvert un élément chimique qui, 300 ans plus tard, passerait pour être le fondement de la vie et l'un des facteurs de la régulation de la croissance végétale. Profitons du recul que donne le temps et retraçons quelques-uns des événements qui ont mené, lentement mais inéluctablement, à la reconnaissance du rôle essentiel du phosphore dans la vie.

Après le regain d'activité qui suivit la découverte de Brand, les progrès enregistrés dans l'éclaircissement des propriétés biochimiques des composés du phosphore ont été lents à venir. La première démonstration de sa présence dans les organismes fut faite en 1771 par le suédois Karl Wilhelm Scheele qui l'identifia comme un constituant important des os.

L'événement marquant qui suivit eu lieu en 1840 quand Justus von Liebig, le père de la chimie organique, montra que l'effet fertilisant de l'humus sur la croissance végétale était dû à la présence de sels minéraux de phosphore et d'azote, plutôt qu'à la matière organique, comme on le pensait alors. Cette découverte ouvrit la voie aux études de la chimie du sol en rapport avec la nutrition des plantes, études qui ont donné naissance à l'agronomie moderne.

Le XIX<sup>e</sup> siècle fut une époque où les questions sur la nature et la signification de la vie passèrent au premier plan. Vers la fin du siècle précédent, une découverte importante avait été faite par Antoine Lavoisier, le père de la chimie moderne, pour qui

la récompense d'une vie consacrée au service de la France fut la guillotine<sup>17</sup>.

Lavoisier et Pierre Laplace avaient montré que la quantité de chaleur produite par les animaux après la consommation d'une quantité donnée de nourriture s'approchait de celle produite par oxydation chimique de la même quantité de matière en laboratoire. Cette démonstration était d'une telle importance qu'il a fallu attendre plus de 150 ans avant de pouvoir recueillir tous les renseignements sur les processus biochimiques intermédiaires.

L'isolation et l'identification des composés organiques présents dans les êtres vivants se fit lentement mais sûrement au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. L'intérêt fut accru à la suite de la synthèse de l'urée par Friedrich Wöhler en 1828. C'était la première synthèse chimique reconnue d'un composé organique. On fit des généralisations et des découvertes biologiques poussées. On reconnut la cellule comme étant l'unité fondamentale de la vie. On classifia de nouvelles espèces végétales et animales et on catégorisa leur structure morphologique. Il devenait de plus en plus évident que la complexité architecturale de la vie cachait un fil conducteur.

En 1859, Darwin confirma cette hypothèse avec la publication de son livre *De l'origine des espèces par voie de sélection*

---

17. Antoine Lavoisier servit le gouvernement français en faisant partie de diverses commissions intéressées à l'agriculture, aux poudres et salpêtres, aux conditions des prisons et des hôpitaux, à l'éducation et aux poids et mesures. (La dernière mena à la création du système métrique.) Lavoisier fut aussi élu membre de l'assemblée provinciale de l'Orléanais.

Son arrestation au cours de la Révolution fut causée par les associations financières qu'il avait entretenues avec la Ferme générale, organisme chargé de ramasser les impôts. Après cinq mois d'emprisonnement au cours desquels aucune accusation n'avait été portée, Lavoisier et vingt-sept autres membres ou anciens membres de la Ferme générale furent, en moins de vingt-quatre heures, accusés de conspiration, jugés et trouvés coupables par un Tribunal révolutionnaire. Le 8 mai 1794, ils étaient guillotins. Le lendemain, un associé remarqua qu'il n'avait fallu qu'un instant pour trancher une tête qu'un siècle ne suffirait probablement pas à remplacer. Les biens de Lavoisier, confisqués à sa mort par le gouvernement français, furent envoyés deux ans plus tard à « la veuve de l'homme injustement condamné ».

*naturelle*. Il attira l'attention sur les changements provoqués par l'Homme sur les espèces végétales et animales domestiquées et cultivées. Si la sélection faite par l'Homme pouvait produire en si peu de temps de telles différences chez de nombreuses races de chevaux, de pigeons, de chiens, de chats et chez de multiples variétés de plantes cultivées, quelle variété la sélection naturelle pourrait-elle produire en de plus longues périodes de temps?

Avec la parution de cet ouvrage, ceux qui croyaient que l'Homme avait une origine unique et divine durent réévaluer leur conception. Si l'Homme descendait d'un ancêtre simien, comme le proposait Darwin, quel était alors son sens? Au déclin du XV<sup>e</sup> siècle, Galilée avait heurté de front les idées du temps en affirmant que la terre n'était pas le centre du système solaire. Giordano Bruno mourut sur le bûcher en 1608, pour avoir exprimé ces idées et affirmé que la vie n'était pas un phénomène exclusif à la terre. Et voilà que Darwin, au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, en insinuant que l'*Homo sapiens* était apparu à la suite de lois parfaitement naturelles d'une série continue d'êtres remontant aux formes de vie les plus insignifiantes, le dépouillait de son âme pour de bon.

*De l'origine des espèces par voie de sélection naturelle* raviva une vieille querelle scientifique qui portait sur le sens de la vie. Les vitalistes prétendaient que des forces spéciales agissaient au sein des cellules vivantes; ces forces étaient inexplicables à l'aide des lois de la physique et de la chimie. Les mécanistes, de leur côté, considéraient plutôt les êtres vivants comme étant des machines auto-régulatrices très compliquées dont le fonctionnement interne s'expliquerait un jour par des lois purement mécaniques.

La découverte qui permit de trancher ces querelles fut faite par Eduard Buchner en 1897. Buchner avait obtenu un extrait de levure exempt de cellules, capable d'accomplir le processus de la fermentation alcoolique. Avec cette démonstration de l'action des enzymes (protéines spécialisées qui accélèrent la

vitesse des réactions biochimiques), naissait la science de la biochimie.

Dans les années qui suivirent cette découverte, on isola des enzymes de divers tissus et organismes et on les étudia afin de découvrir les mécanismes de leur action catalytique. À mesure que l'on progressa, il devint évident que des enzymes et des cycles biochimiques semblables étaient présents dans des organismes aussi différents que les levures et l'Homme. Ainsi, on convint que la vie était dotée de certaines caractéristiques biochimiques fondamentales sur lesquelles reposaient toutes les différences anatomiques et structurales connues.

Il devenait de plus en plus clair, à mesure que les découvertes se succédaient, que les composés phosphorés jouaient un rôle unique et essentiel dans toutes les réactions biochimiques fondamentales de la vie, telles la photosynthèse, la respiration cellulaire, la fermentation, la contraction musculaire, la division cellulaire et l'hérédité. Enfin, le phosphore devint, avec l'hydrogène, l'oxygène, le carbone, l'azote et le soufre, un des six éléments indispensables à la vie.

Parmi les centaines de composés phosphorés isolés à partir des cellules vivantes, trois méritent une attention particulière. Deux d'entre eux, l'ADN (acide désoxyribonucléique) et l'ARN (acide ribonucléique) ne sont pas réellement des composés, au sens habituel du mot, mais des classes générales de polymères. Le troisième est une petite molécule, l'ATP (adénosine triphosphate) qui fonctionne comme un combustible pour les réactions de synthèse endothermique qui ont lieu dans les cellules.

L'ADN est situé dans les chromosomes, à l'intérieur du noyau cellulaire, où il constitue la plus petite unité de l'hérédité, le gène. Bien que l'ADN et les gènes aient fait l'objet d'études depuis la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, ce n'est qu'au cours des années 50 que l'on a solidement démontré que les gènes étaient des molécules d'ADN.

L'ADN est peut-être le plus remarquable de tous les composés que l'Homme ait découverts. Sans lui, aucune cellule,

individu, ou espèce ne pourrait se reproduire exactement dans tous ses détails. Jean-Sébastien Bach n'aurait pas pu, même en vivant un million de vies, inventer des variations musicales en nombre égal aux variations produites par la sélection naturelle pour l'ADN des chromosomes des espèces vivantes. Une série de ces filaments délicats, enfermée dans un espace un million de fois plus petit qu'un grain de sable contient toute l'information nécessaire à la création d'un organisme adulte, à partir d'une seule cellule. Quand la chaîne d'ADN d'une espèce donnée est interrompue par la mort de son dernier représentant, comme ce fut le cas pour la tourte, le loup de Tasmanie et plusieurs autres centaines d'espèces anéanties au cours des 200 dernières années, rien ne peut la reconstituer telle qu'elle existait auparavant.

Contrairement à l'ADN, l'ARN est surtout présent dans le cytoplasme des cellules, c'est-à-dire ailleurs que dans le noyau. Il en existe plusieurs sortes. Certaines transmettent l'information sous forme de code chimique à partir de l'ADN jusqu'à l'emplacement de la synthèse des protéines. D'autres interviennent dans l'élaboration des protéines cellulaires en y participant et en les différenciant. Les divers types de molécules d'ARN agissent comme des contremaîtres d'usine, surveillant l'installation et la fabrication des parties de sorte que de nouvelles cellules soient produites. Par leur « connaissance » des instructions enfermées dans les chromosomes, qui sont particulières à chaque individu et espèce, ils supervisent et surveillent la synthèse et le fonctionnement des enzymes.

Bien avant la formation des sociétés humaines, les organismes ont découvert l'utilité d'alimenter une foule de mécanismes avec une seule forme d'énergie. Dans les cellules, cette énergie est chimique: c'est l'ATP (adénosine triphosphate). Quand le groupement phosphate terminal est enlevé de l'ATP, il y a production d'énergie qui peut être utilisée pour la contraction musculaire, la synthèse de composés riches en énergie ou la synthèse de nouveaux tissus (croissance). Au cours de la réaction, l'ATP est transformé en ADP (adénosine diphosphate) et un ion phosphate. Le cycle est complété quand divers hydrates de carbonés, graisses et protéines sont décomposés pour

lacs et de la façon dont ils sont affectés par les apports de matières nutritives découlant des activités humaines (eutrophisation due à l'Homme).

Alors que le thème central de l'ouvrage porte sur le phosphore en tant que clé de la lutte contre l'eutrophisation due à l'Homme, une analyse des causes réelles fait ressortir la nécessité de limiter la croissance démographique\*. Le lecteur trouvera en fin de volume un glossaire des termes scientifiques, des références suivies d'une liste de lectures supplémentaires ainsi qu'un appendice comprenant un bilan de la situation en 1974 et une série de tableaux et de figures.



donner du dioxyde de carbone et de l'eau, au cours de la respiration cellulaire. L'énergie libérée au cours de cette décomposition est utilisée pour reconstituer l'ATP à partir de l'ADP et d'un ion phosphate. De cette façon, d'innombrables combustibles organiques se convertissent en une seule forme d'énergie qui alimente les diverses réactions endothermiques qui ont lieu dans les cellules. À l'exemple de la plupart des systèmes biologiques, les réactions où interviennent l'ATP et l'ADP sont cycliques, les produits d'une réaction servant de réactif à une autre qui redonne les premiers.

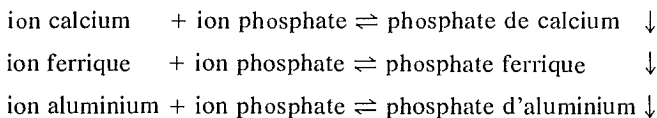
Le cycle du phosphore dans la biosphère est avant tout régi par trois facteurs: la consommation biologique, les réactions de précipitation avec certains ions positifs et l'écoulement à sens unique vers les sédiments et la mer. Dans la plupart des cas au sein de la nature, les atomes de phosphore sont complètement combinés aux atomes d'oxygène pour former des ions phosphate<sup>18</sup>.

L'acide phosphorique ( $H_3PO_4$ ) se dissocie en ions hydrogène et en plusieurs sortes d'ions phosphate selon sa concentration et le pH du milieu. Étant donné que toutes les sortes d'ions phosphate sont interchangeableables selon le pH, on ne s'attardera pas à leur nomenclature.

En général, les composés phosphatés sont solubles dans l'eau, sauf en présence d'ions calcium, fer, aluminium et quelques autres. En effet, ceux-ci réagissent avec les ions phosphate, à pH neutre ou élevé, pour donner des précipités qui ont une faible solubilité dans l'eau. Les réactions se font de la façon suivante.

---

18. On connaît certains composés organiques où le phosphore est combiné au carbone. On a émis la supposition selon laquelle la phosphine ( $PH_3$ ), gaz qui s'enflamme spontanément dans l'air, pouvait être la cause des feux follets ou *ignis fatuus* que certains ont dit avoir vus à la surface des marais, au cours de nuits sans lune. Bien que cela relève de la spéculation, ce n'est pas complètement impossible. Certaines bactéries peuvent transformer l'ion phosphate en phosphine, en laboratoire.



La première réaction prédomine dans les sols calcaires (sols riches en chaux). Elle est plus complexe qu'on ne le pense car elle mène à la formation d'apatites, cristaux complexes qui contiennent aussi d'autres ions<sup>19</sup>. Dans les sols pauvres en chaux, les ions phosphate réagissent surtout avec les ions de fer et d'aluminium pour donner des sels de faible solubilité. Bref, les propriétés chimiques du phosphore dépendent de l'abondance naturelle des ions dans les sols, surtout ceux de calcium, de fer et d'aluminium qui réagissent avec les ions phosphate pour donner des précipités.

Les êtres vivants jouent aussi un rôle important pour ce qui est de la régulation des concentrations naturelles du phosphore. Les phosphates sont rapidement absorbés par les micro-organismes du sol et, en même temps que d'autres sels nutritifs, par les cellules de la zone pilifère des plantes terrestres. Avec l'azote et le potassium, le phosphore compte parmi les éléments qui manquent le plus aux sols cultivés suite aux récoltes. C'est pourquoi on en retrouve une si grande quantité dans les fertilisants.

Dans les eaux superficielles des lacs des régions tempérées, la concentration des phosphates dissous connaît des variations saisonnières selon l'insolation, la température et l'activité des plantes vertes. Les phosphates dissous s'accumulent au cours de l'hiver alors que la photosynthèse est à son plus bas. Plus tard, au printemps et en été, la teneur en phosphates dissous dans l'épilimnion devient difficilement décelable à cause des prélèvements faits par les plantes photosynthétiques.

Quelquefois, le profane est surpris d'entendre dire que la teneur en phosphates dissous est souvent faible avant l'apparition des fleurs d'eau. Il est porté à croire que le phosphore doit

---

19. Les apatites entrent dans la composition du squelette des vertébrés (sous forme d'os ou dans l'émail des dents) ainsi que dans la coquille des brachiopodes et d'autres animaux.

être présent en quantités suffisantes, puisque les fleurs d'eau surviennent malgré sa faible concentration. Ce qu'il oublie ou ignore peut-être, c'est que les végétaux amassent des réserves de phosphore excédant à leurs besoins immédiats afin de pouvoir les utiliser en période de disette. Les lacs ont une faible teneur en phosphates avant la prolifération des algues, parce que ceux-ci sont précisément dans les algues.

Le rythme d'utilisation des phosphates dissous montre bien le rôle qu'ils jouent dans les lacs. Si on ajoute des phosphates radioactifs aux eaux superficielles, ils sont absorbés par les algues en moins de quelques minutes. Plus tard, la mort et la sédimentation des algues amènent un lent transport du phosphore de l'eau vers les sédiments. Contrairement à l'absorption par les végétaux qui est rapide, le processus de la sédimentation prend de quelques semaines à quelques mois.

Le cycle du phosphore dans la nature est essentiellement un mouvement irréversible de celui-ci vers la mer. Il n'y a pas de composé volatil qui permette son retour à la terre ferme par transport dans l'atmosphère et précipitation, comme c'est le cas pour le carbone et l'azote. Le faible recyclage existant est dû au lent soulèvement des sédiments marins et, dans un laps de temps plus court, à la pêche faite par l'Homme et les oiseaux prédateurs.

Les réserves mondiales de minéraux phosphatés de haute qualité sont actuellement évaluées à environ 50 milliards de tonnes, la plus grande partie se trouvant sous forme d'apatites, minéraux complexes de phosphates de calcium qui contiennent aussi des ions hydroxyle et fluorure. Les principaux gisements se trouvent au Maroc et dans les régions voisines, en U.R.S.S., à l'ouest des montagnes de l'Oural ainsi que dans le nord-ouest et le sud-est des États-Unis. Certains de ces gisements ont été formés par des processus ignés qui sont survenus dans les profondeurs de la terre. Ailleurs, ils consistent en rocs sédimentaires marins. On n'a pas trouvé dans les océans modernes de processus semblables à ceux qui ont donné, à l'origine, ces dépôts sédimentaires de phosphates.

Ces réserves sont suffisantes pour répondre à la demande actuelle pendant encore des centaines d'années ou peut-être même pendant un nombre indéterminé d'années, selon certains. Ce sursis, quel qu'il soit, sera déterminé par le progrès des techniques et la façon d'envisager cette ressource non renouvelable.

Les phosphates jouent plusieurs rôles dans l'économie. En 1967, leurs principales utilisations aux États-Unis se répartissaient comme suit: 70 % dans les fertilisants, 13 % dans les détergents, 8 % dans la nourriture pour les animaux. Les derniers 9 % servaient à une foule d'applications telles que: agent de levure pour la poudre à pâte et les mélanges à gâteau; agent anticorrosif pour les carrosseries d'automobiles; l'ignifugeage des matériaux; agents chimiques pour certains types d'adoucisateurs d'eau; bombes fumigènes et incendiaires; insecticides; poisons contre les rongeurs et toxiques de la transmission nerveuse; additifs dans l'essence, les boues de forage, les boissons gazeuses et les sodas, les pâtes dentifrices, les ciments dentaires, les allumettes et les plastifiants. Notez l'éventail des produits, variant des fertilisants aux poisons mortels contre les rongeurs, les insectes et l'Homme. Une goutte de sarin, toxique de la transmission nerveuse contenant du phosphore, doit être immédiatement lavée de la peau, car elle peut tuer un homme aussi rapidement qu'une balle dans la tête.

Pour clore la discussion sur l'importance du phosphore pour la nature, la vie et l'Homme, faisons un retour au début du chapitre ayant trait à Hennig Brand et à sa synthèse du phosphore élémentaire, en 1669. Un procédé industriel moderne, issu de cette découverte, fut à l'origine d'un cas désastreux de pollution industrielle opposant le comportement de l'Homme à la bonne marche de la nature et à la magie de la vie. La plus grande partie du phosphore en question était destinée à la production de détergents.

L'histoire remonte aux années 60 à Long Harbour, sur la rive est de la baie de Plaisance, à Terre-Neuve. Une entreprise canadienne y avait établi une usine qui devait produire du phosphore élémentaire à partir de minerais phosphates importés de

Floride. L'entreprise avait choisi de s'installer à Terre-Neuve, à cause des tarifs d'électricité réduits offerts par cette province qui voulait diversifier son économie.

À leur grand étonnement, les pêcheurs de l'endroit s'éveillèrent le matin du 12 décembre 1968 pour découvrir du hareng flottant ventre à l'air, avec des traces d'hémorragie près des ouïes et des nageoires. Ce sang valut bientôt aux harengs le surnom de « harengs rouges ». Les inspecteurs des pêches furent avertis, mais comme ils n'avaient jamais eu à traiter de cas semblables, ils ne savaient trop que faire sauf explorer les environs de l'usine. Les échantillons prélevés furent congelés et envoyés à des biologistes qui, à leur tour, se montrèrent perplexes. On ne reconnaissait aucun des facteurs généralement associés à la mort des poissons.

L'eau où l'on avait trouvé les poissons morts (à Long Harbour, à proximité de l'usine) était saturée d'oxygène et ne contenait pas de quantités excessives de déchets organiques. Dans les poissons, il n'y avait ni organismes pathogènes, ni parasites. Les seuls symptômes visibles étaient l'hémorragie autour des ouïes et des nageoires et le sang plus ou moins clair à l'intérieur du poisson. Rien de semblable n'avait été rapporté dans le passé, mais un fait important fut établi par des plongeurs, le 27 janvier 1969. Le fond des eaux de Long Harbour, jusqu'à une profondeur de 4,5 m, était dépourvu de toute forme de vie animale. Soupçonnant le danger, on interdit la pêche dans la région et on conseilla aux pêcheurs de détruire toute prise de hareng rouge.

On ne parla plus du hareng rouge jusqu'en février 1969, alors qu'on en aperçut à l'embouchure de Long Harbour. Par la suite, leur apparition s'étendit avec une rapidité surprenante à des endroits éloignés. Tout au long de la côte, en aval et en amont, on observait des bancs de harengs qui erraient aveuglément dans les eaux de surface. Les pêcheurs craignaient de manger leur poisson et des rumeurs d'un déversement de gaz empoisonnés dans les eaux de la baie, peu après la fin de la Seconde Guerre mondiale, commencèrent à courir. Rien n'était encore sûr, mais l'opinion publique soupçonnait l'usine.

Les soupçons des spécialistes chargés des investigations étaient aussi dirigés vers l'usine. Les coïncidences étaient trop nombreuses pour être accidentelles. Premièrement, le 12 décembre 1968, une foule d'organismes vivants en plus du hareng étaient morts; deuxièmement, cela s'était passé à Long Harbour, au voisinage immédiat de l'usine; troisièmement, le 12 décembre (on l'apprit plus tard) coïncidait avec la première période d'activité de l'usine, c'est-à-dire du 10 au 16 décembre; enfin, des faits identiques suivirent la réouverture de l'usine, le 10 janvier 1969. (L'intervalle d'un mois entre les deux mortalités était probablement dû à la diffusion du poison, des eaux du havre à celles de la baie.) Le problème n'était pas tant d'établir la source des empoisonnements que de constituer un dossier du cas avec des preuves à l'appui. Aucun gouvernement ou organisation ne peut exiger l'arrêt d'une entreprise dont le chiffre d'affaires s'élève à des millions de dollars, sans risquer d'être poursuivi en justice, surtout si ses accusations ne se fondent que sur des présomptions. Et n'oublions pas que, dans le cas qui nous occupe, la cause réelle de la mort des poissons demeurait inconnue.

Les chercheurs établirent que l'effluent de l'usine était toxique pour la vie animale. On identifia trois poisons possibles: l'acidité, les cyanures et le phosphore élémentaire. Les essais expérimentaux montrèrent que seul le phosphore pouvait entraîner le phénomène des harengs rouges.

L'étape suivante consistait à prouver que la concentration de phosphore élémentaire présente était suffisante pour provoquer la mort des poissons. À cette fin, on mit au point une nouvelle méthode pour analyser les quantités des traces de phosphore élémentaire dans les tissus des poissons. On l'appliqua ensuite à des échantillons normaux et gelés de poissons ramassés lors des mortalités antérieures ainsi qu'à des poissons élevés en laboratoire, en présence de concentrations données de phosphore élémentaire. Les résultats montrèrent que, chez les poissons touchés, les teneurs en phosphore étaient très élevées dans le foie, moins élevées dans la graisse et encore plus réduites dans les muscles. Cette preuve rendait désormais possible la tenue

d'un procès. Déclinant toute responsabilité dans l'affaire, la direction de l'entreprise décida volontairement, le 2 mai 1969, de fermer l'usine pour permettre l'installation de matériel anti-pollution.

Les pertes encourues par la compagnie, suite à la fermeture de l'usine, aux remboursements versés aux pêcheurs, au nettoyage du fond de Long Harbour et à d'autres causes furent évaluées à \$5 000 000. L'usine fonctionne toujours. Les 450 kg de phosphore élémentaire qui jadis étaient quotidiennement déversés dans les eaux du havre, sont maintenant récupérés à l'intérieur de l'usine ou oxydés avant leur évacuation.

On connaissait des cas d'empoisonnement par le phosphore élémentaire industriel depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle, mais c'était la première fois que l'on en notait les effets sur l'environnement. L'équipe canadienne chargée de l'enquête n'a découvert qu'une seule étude expérimentale publiée antérieurement, portant sur la toxicité du phosphore élémentaire chez le poisson. Par la suite, on a appris qu'un cas comparable de pollution de l'environnement par le phosphore élémentaire était survenu en Suède et avait fait l'objet d'une étude (en suédois) dans des rapports gouvernementaux, sans toutefois connaître une grande diffusion.

Les inspecteurs du gouvernement qui avaient approuvé les plans de l'usine de la baie de Plaisance en ignoraient malheureusement les conséquences néfastes pour l'environnement. L'industrie était au courant de la toxicité du phosphore jaune pour l'Homme, mais elle supposa que dans la nature il pourrait s'oxyder et devenir inoffensif.

Il s'avéra que, dans sa forme colloïdale, le phosphore élémentaire ne s'oxydait pas immédiatement dans l'eau, particularité dont on aurait pu se rendre compte au moyen d'expériences préliminaires. C'est la mort des poissons qui a sonné l'alarme.

Sans les harengs rouges et la vigilance des pêcheurs, des inspecteurs et de l'équipe de recherche, des dommages irréparables auraient été commis. Il suffit d'aussi peu que 0,6 mg de phosphore élémentaire, c'est-à-dire une quantité équivalant à

quelques grains de sel, pour provoquer l'hépatite chez l'Homme. Une dose de 100 mg entraîne la mort.

Ainsi se termine le présent chapitre. Le prochain s'attachera à la question du phosphore et de la lutte contre l'eutrophisation liée aux activités humaines.



## CHAPITRE 6

### Guérir l'environnement

Les méthodes utilisées contre l'eutrophisation liée aux activités humaines.

Le deuxième chapitre faisait remarquer que les égouts devaient être considérés comme étant la cause de l'eutrophisation au XX<sup>e</sup> siècle. Présentement, ils ne constituent qu'un moyen détourné de déverser des fertilisants dans l'eau. Le cycle débute par l'application de fertilisants riches en phosphore et en azote dans les champs, remplaçant ainsi les quantités enlevées avec les récoltes. Ces dernières alimentent l'Homme qui rejette ses déchets sous forme d'urine, d'excréments et de dioxyde de carbone<sup>20</sup>. Les éléments nutritifs présents dans l'urine et les excréments s'en vont dans les rivières, les lacs et les estuaires par les égouts. Arrivés à destination, ils favorisent la croissance des végétaux aquatiques. Les détergents à base de phosphates, introduits sur le marché après la Seconde Guerre mondiale, n'ont fait qu'augmenter les éléments nutritifs qui se perdent dans les sédiments et la mer, sans espoir de recyclage immédiat.

Dans le présent chapitre, notre attention portera sur les méthodes de lutte contre l'eutrophisation liée aux activités humaines. Certaines d'entre elles, qui utilisent des substances toxiques pour tuer les plantes, s'attaquent à l'effet et négligent la cause. D'autres déplacent tout simplement le problème vers une autre région, comme c'est le cas des travaux de dérivation des égouts. Dans les endroits où la valeur des propriétés est éle-

---

20. Tout comme les reins, les poumons sont des organes excréteurs. Un adulte de poids moyen rejette 0,25l d'air vingt fois par minute. Cet air contenant 5 % de dioxyde de carbone, la quantité de dioxyde de carbone rejetée à l'air s'élève à 0,67 kg après 24 heures.

vée et la terre plus chère qu'ailleurs, la solution la plus raisonnable peut être d'enlever les phosphates des eaux usées par précipitation chimique et d'employer la boue riche en phosphates qui en provient pour fertiliser le sol. La solution la plus en harmonie avec les besoins de l'écosystème est celle qui suit un schéma cyclique: elle utilise les effluents des installations de traitement des eaux usées comme fertilisants permettant d'accroître le rendement de certains produits de récolte. Toutefois, il faut prendre soin d'empêcher le transport des maladies et la contamination du cycle alimentaire par les substances toxiques industrielles.

Les coûts varient selon la nature des traitements, la population desservie (le coût par habitant décroît avec l'augmentation de la population) et divers facteurs économiques. À court terme, la méthode la moins coûteuse est l'utilisation d'un herbicide pour végétaux aquatiques. Ses effets secondaires sont toutefois très dangereux et, à long terme, cette méthode est fort coûteuse car elle n'attaque pas la source du problème. Quant à la dérivation des égouts, elle est excessivement onéreuse (même pour les grands centres urbains) dès que les distances dépassent 25 km. Bien que le coût de la construction puisse être élevé à cause de la nature du sol, les frais d'entretien et d'exploitation d'un tel système sont faibles. Pour l'élimination des éléments nutritifs, à partir du recyclage ou de la précipitation chimique des phosphates, ils sont normalement de 0,1 à 1 cent par personne, par jour (de \$0.50 à \$5 par personne, par année environ) selon la population desservie, le prix local des produits chimiques, le coût d'enlèvement des boues, etc. Au début des années 70, un cent par jour suffisait à la plupart des Américains et des Canadiens pour combattre l'eutrophisation.

La plupart d'entre nous préférerions ne pas avoir à déboursier d'argent pour le traitement des eaux usées; nous aimons mieux penser que les choses peuvent se régler d'elles-mêmes. Avouons-le, le traitement des eaux usées n'est pas à proprement parler un sujet captivant.

Ne concevoir le traitement des eaux usées qu'en fonction des coûts, c'est comme aller au restaurant pour un bon repas et ne commander que les plats les moins chers. Quand on examine les bénéfices accrus et les dépenses qu'on devrait autrement encourir, le traitement des eaux usées se révèle très bon marché. Le coût de l'enlèvement des éléments nutritifs équivaut à l'achat d'un litre d'eau embouteillée par mois ou d'un verre d'eau minérale par semaine, par personne.

Il existe une ressemblance fonctionnelle très marquée entre le corps humain et les parties de la biosphère régies par l'Homme. Les deux constituent en quelque sorte des écosystèmes; l'un est soumis à la volonté d'un individu et l'autre, à la volonté de la société. Dans les deux cas, mises à part les limites imposées par la nature, c'est la volonté humaine qui détermine le comportement et la santé du système. Quand le corps humain est blessé ou fonctionne mal, l'individu va consulter un médecin. De même, quand l'écosystème souffre ou qu'une de ses parties (une espèce nuisible, par exemple) échappe au contrôle de l'Homme, on fait appel à un médecin de l'environnement, c'est-à-dire un écologiste. Dans les deux cas, le spécialiste fait tout ce qu'il peut avec les outils dont il dispose: il prescrit des médicaments, donne des conseils ou même propose « l'hospitalisation ». Mais, il ne peut aucunement obliger le patient à faire quoi que ce soit même si ce dernier est mourant. Le patient devra manifester le désir de recouvrer la santé.

La comparaison entre l'écosystème et le corps humain est bien choisie. Toutefois, nous devons nous rappeler que notre connaissance actuelle des écosystèmes est comparable à celle que nous avons du corps humain à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle. À cette époque, on ne connaissait que les détails les plus grossiers de l'anatomie interne du corps; on ignorait tout de la physiologie, sauf la circulation sanguine décrite par William Harvey. On avait vu des bactéries, mais on ne les avait pas reconnues comme agents de maladies; on ne savait absolument rien des vitamines, des hormones et des antibiotiques; enfin, on n'avait pas encore ressenti le besoin de recourir à des méthodes aseptiques pour les opérations chirurgicales.

Ainsi, ne soyons pas trop surpris si, vers la fin du XX<sup>e</sup> siècle, nous sommes affligés de maux qui s'attaqueront à l'environnement et qui rappelleront les grandes épidémies de typhoïde, de choléra et de peste bubonique qui ont sévi dans le passé. Par ignorance, nous les attribuerons à des forces incontrôlables, comme on l'a fait pour les maladies, au XVIII<sup>e</sup> siècle.

Cependant, les écologistes du XXIII<sup>e</sup> siècle profiteront du recul voulu pour relier nos erreurs à notre ignorance. Ils pourront dire qu'à notre époque, l'environnement restait un domaine méconnu.

L'écologiste pourra conseiller à son patient de cesser de « fumer » (c'est-à-dire, combattre la pollution de l'air), de « suivre un régime » (abaisser le taux de natalité), de « réduire ses activités » (ralentir le progrès technique) ou de « boire avec modération » (éviter de consommer trop d'hydrocarbures) mais, il ne peut pas l'y obliger. Le patient a le choix; s'il suit ces conseils, il verra vraisemblablement sa santé s'améliorer. D'autre part, s'il se montre irresponsable, le docteur ne peut escompter de progrès qu'en tentant de l'éduquer.

Examinons maintenant certains des remèdes utilisés contre l'eutrophisation liée aux activités humaines, suivant leur ordre d'ancienneté (sauf le recyclage, qui est la plus vieille des méthodes). On traitera tout d'abord des remèdes dits de charlatan (comme le sont les cachets contre les maux de tête pour l'appendicite). On passera ensuite à la dérivation des égouts (ou comment pratiquer la politique de l'autruche). Suivra un aperçu général du rôle des éléments nutritifs dans la lutte contre l'eutrophisation, puis on abordera les solutions qui s'attaquent à la cause: l'élimination des éléments nutritifs des eaux usées, le recyclage naturel pour se débarrasser des éléments nutritifs et la lutte contre les déchets agricoles. Enfin, l'histoire du lac Washington, aux États-Unis, qui met en lumière le rôle de premier plan joué par le phosphore dans un programme de dérivation des effluents d'eaux usées, terminera le chapitre.

## Le traitement des lacs

L'une des plus vieilles méthodes, encore utilisée pour débarrasser les étangs et les lacs des algues et des plantes, consiste en l'application de produits chimiques nuisibles à leur croissance. Cependant, rien n'est fait pour remédier aux causes réelles de celle-ci.

Le traitement chimique des eaux naturelles est dangereux, car l'addition excessive de substances toxiques peut avoir des effets secondaires néfastes. Dans certaines régions, il faut être détenteur d'un permis pour l'opérer; des règlements gouvernementaux en régissent les conditions d'application et les quantités. La plupart du temps, toutefois, c'est une politique de laisser-aller qui prévaut. Étant donné que nous ignorons les effets à long terme de ces produits, nous ne devrions pas tolérer cette façon de faire. Si une telle politique existe dans votre entourage, mettez-y fin.

L'une des méthodes les plus efficaces contre la prolifération des algues bleues est le sulfate de cuivre. Le cuivre ionique ( $\text{Cu}^{++}$ ) est toxique pour toute forme de vie. Cependant, une application judicieuse en quantités relativement faibles peut détruire les algues sans faire souffrir le poisson ou les invertébrés aquatiques. Ce fut la méthode utilisée entre 1912 et 1958 pour le chapelet des lacs de Madison (Wisconsin) dont nous avons parlé au Chapitre 2. Durant cette période, on a déversé des milliers de tonnes de sulfate de cuivre pour finalement s'apercevoir que c'était inutile: on ne pouvait pas avoir de l'eau claire dans un lac continuellement pollué par les éléments nutritifs.

La plus grande partie du cuivre avait précipité presque immédiatement au contact de l'eau, par réaction avec les ions carbonate et bicarbonate. Maintenant, il gît emprisonné dans les sédiments des lacs pollués. Pendant un certain temps, le cuivre a joué le rôle qui lui était assigné et il continue d'ailleurs à servir aujourd'hui en traitant les eaux. Mais on ne devrait sous aucun prétexte envisager de l'utiliser autrement que comme

mesure provisoire, car une seule application n'a d'effet que pour quelques semaines.

Un autre produit chimique utilisé pour le traitement temporaire des eaux polluées naturellement ou à cause de l'Homme est l'alun (sulfate double d'aluminium et de potassium). Contrairement au cuivre, l'alun n'est pas un poison mais plutôt un agent de coagulation. Il forme un floc d'hydroxyde d'aluminium qui agit comme un piège pour les ions phosphate et les matières organiques. Ceux-ci sont éliminés des eaux avec la clarification du précipité. La présence d'hydroxyde d'aluminium à la surface des sédiments peut aussi aider à emprisonner les phosphates dans les sédiments des étangs et des lacs peu profonds. À cause de son mode d'action, l'alun ne convient pas dans les cours d'eau où, à tout moment, se jettent des eaux riches en éléments nutritifs.

Parmi les autres produits utilisés pour empêcher la croissance des algues et des herbes aquatiques, il y a l'arsenic et le mercure, le 2,4-D et une foule de substances organiques aux noms curieusement abrégés. Certaines d'entre elles sont de dangereux produits toxiques non spécifiques. De plus, on ignore les effets possibles de ces produits sur l'écosystème. On devrait demander aux organismes de lutte contre la pollution et aux responsables de la santé publique d'approuver par écrit tout projet d'application de produits chimiques toxiques dans l'environnement.

Une méthode non polluante, proposée récemment en vue de réduire l'incidence des fleurs d'eau dans les lacs, est la circulation et l'aération dirigées des eaux par l'introduction de bulles d'air à un niveau inférieur à la thermocline. Ceci est un prolongement de la méthode plus ancienne d'aération en surface qui accélère l'oxydation biologique des déchets organiques dans les cours d'eau naturels. On suppose qu'elle peut empêcher la formation de zones riches en éléments nutritifs à partir desquelles les algues contaminent les autres parties d'un lac. De plus, comme les algues se concentrent normalement là où leur reproduction est favorisée, l'effet de répartition provoqué par le brassage des éléments nutritifs peut empêcher la photosynthèse

et la croissance. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle n'emploie pas de produits chimiques; cependant, son efficacité n'a pas été prouvée.

Pour lutter contre la croissance des herbes aquatiques enracinées au fond, on s'est servi de dispositifs mécaniques semblables aux instruments aratoires. Pour plus d'efficacité, on devrait étendre les plantes récoltées sur le sol, dans des conditions qui permettent l'absorption et la rétention des éléments nutritifs. Brûler les restes sur la rive du lac ne suffit pas, étant donné que les sels de phosphore et d'azote sont concentrés dans les cendres. On devrait donc déposer les restes humides sur un terrain plat qui ne s'irrigue pas en direction du lac pollué, si l'on veut atteindre le résultat escompté.

### **Dérivation des égouts**

Des travaux de dérivation des égouts ont été réalisés en certaines régions afin d'empêcher les effluents des installations de traitement des eaux usées de se jeter dans les réservoirs naturels d'eau potable ou dans les eaux qui servent à des fins récréatives. C'est ainsi qu'ont été protégés les lacs d'Annecy, en France; de Zurich, en Suisse; les lacs Schliersee et Tegensee, en Allemagne ainsi que le lac Washington et les lacs de Madison, aux États-Unis.

La dérivation des effluents ne constitue pas à vrai dire un mode de traitement. Elle ne fait que diriger le mal vers l'aval. À condition que personne n'y habite et que les éléments nutritifs ne soient pas transportés vers un autre site déjà utilisé à cette fin, cela peut constituer une solution avantageuse. Cependant, ce n'est souvent qu'une solution temporaire à cause de l'accroissement de la population et de la mise en valeur progressive des terres.

Selon les ingénieurs, les mers et les océans sont, à cause de leur volume considérable et de leur étendue inhabitée, tout à fait propices au déversement des déchets. Ils considèrent aussi qu'un accroissement de la productivité profiterait à plusieurs

régions océaniques. Cependant, même les eaux marines peuvent mal réagir à l'enrichissement en éléments nutritifs, surtout dans des régions comme les estuaires et les échancrures du littoral où la circulation de l'eau est restreinte. La mer Baltique montre déjà des signes d'eutrophisation à la suite du déversement de matières organiques et d'éléments nutritifs par les pays qui l'entourent. Toutes les eaux des plateaux continentaux risquent le même sort.

L'histoire des lacs de Madison au Wisconsin, rapportée au Chapitre 2, constitue le meilleur exemple qu'on puisse citer au sujet de cette dernière méthode. Dans ce cas, la première dérivation n'a réussi qu'à faire passer les problèmes du lac en amont, au lac en aval. Les seconds travaux de dérivation ont permis de contaminer les deux derniers lacs en aval. Les troisièmes travaux ont permis de se débarrasser des eaux usées en évitant les quatre lacs, par le ruisseau Badfish, dans la rivière Yahara. Le résultat des travaux a été positif. Toutefois, les citoyens de Madison ont mis du temps à comprendre la différence entre la dérivation et le traitement. Nous en avons encore beaucoup à apprendre à ce sujet.

Une méthode intéressante combine la dérivation avec la récupération des eaux et des éléments nutritifs. Elle montre ce qu'il est possible de faire quand on allie un peu d'imagination à des conditions géographiques favorables. Il s'agit du cas de Mexico, ville de sept millions d'habitants qui ne traite pas ses eaux usées, mais en élimine le plus gros des déchets à l'aide de tamis.

Les déchets de la ville sont pompés par un conduit souterrain de 7 m de diamètre et de 70 km de longueur, jusqu'à un réservoir situé dans un autre bassin hydrographique, celui de la rivière Montezuma qui, après un long parcours, se déverse dans la mer. Le rôle du réservoir est d'emmagasiner les eaux usées et d'éliminer les microbes pathogènes humains qui, autrement, pourraient causer des épidémies. Les habitants de ce bassin aride et peu peuplé utilisent l'eau et ses éléments nutritifs, qu'ils appellent « eau noire », pour tirer le meilleur rendement possi-



ble du sol. Le seul coût de traitement des eaux usées est celui du pompage. C'est le recyclage idéal.

## **Importance des éléments nutritifs pour la lutte contre l'eutrophisation**

Les méthodes de lutte contre l'eutrophisation déjà mentionnées n'essaient pas de réduire la quantité des éléments nutritifs provenant des activités humaines et déversés dans l'eau. En abordant la description de méthodes qui permettent l'élimination des éléments nutritifs et leur recyclage dans le sol, il peut être utile de donner un aperçu de l'importance relative du phosphore par rapport aux autres éléments nutritifs.

Au premier chapitre, nous avons identifié le phosphore et l'azote comme étant les deux éléments nutritifs les plus importants qui participent au déclenchement des processus de croissance végétale dans les lacs. Logiquement, l'un ou l'autre de ces éléments devrait être à l'origine de la lutte contre l'eutrophisation.

Pourquoi attachons-nous plus d'importance au phosphore qu'à l'azote ou même qu'à tout autre élément nutritif? De tous les éléments chimiques nécessaires aux plantes, le phosphore est le plus facilement contrôlable par l'Homme; il a aussi une très grande influence sur la croissance des plantes. La coïncidence entre ces deux caractéristiques n'est pas accidentelle. Elle provient de ce que l'action de l'Homme et celle de la nature partent des mêmes principes. Elle est fondée sur l'abondance naturelle des ions de calcium, de fer et d'aluminium et sur leur pouvoir de former des précipités avec les ions phosphate.

L'élimination des phosphates est essentielle dans la lutte contre l'eutrophisation liée aux activités humaines pour les raisons énumérées ci-dessous.

- 1) Des expériences en laboratoire et sur le terrain ont montré que l'élimination chimique des phosphates détruit la plus grande partie du pouvoir fertilisant des effluents produits par les installations de traitement des eaux usées.

On peut obtenir l'effet contraire en ajoutant uniquement des phosphates aux eaux traitées, ce qui prouve que c'est bien l'élimination du phosphate qui abaisse le pouvoir fertilisant.

- 2) Les techniques permettant d'éliminer les phosphates des eaux usées existent déjà et sont économiquement réalisables. Celles qui permettraient l'élimination des autres éléments nutritifs, y compris l'azote, n'ont pas été mises au point d'une façon aussi perfectionnée.
- 3) Dans la plupart des lacs non pollués par l'Homme, c'est le phosphore qui limite le plus souvent la croissance des plantes. Ainsi, la diminution de l'apport de phosphore dans les lacs permettrait à la nature de remplir pleinement son rôle.
- 4) Dans les lacs pollués par les eaux usées, l'apport de phosphore est normalement supérieur à celui de tout autre élément limitant la croissance. L'Homme se trouve en mesure d'éliminer le phosphore puisqu'il en est la principale source.
- 5) Le phosphore est mieux retenu dans le sol que l'azote. En comptant sur ce moyen naturel de lutte contre l'eutrophisation, en plus de l'élimination du phosphore des eaux usées, on peut être assuré d'un rendement maximal.
- 6) Quand il se produit un appauvrissement en phosphates immédiatement disponibles dans l'eau, au point d'empêcher toute croissance ultérieure, on ne peut compter sur aucun apport supplémentaire de l'atmosphère. Quant à l'azote, constituant principal de l'air, il peut passer dans l'eau sous forme gazeuse ( $N_2$ ) et sous forme d'ammoniac ( $NH_3$ ). La plupart des organismes sont incapables d'utiliser l'azote tel quel; toutefois, certaines algues bleues et certaines bactéries le peuvent. Elles transforment l'azote en ammoniac et en composés azotés organiques qui deviennent ensuite disponibles comme matières nutritives dans les écosystèmes aquatiques.

Mentionnons de plus qu'il nous faut réduire l'apport agricole de phosphore dans les régions où il est considérable. De fait,

il est toujours sage de déterminer les quantités relatives de phosphore qui proviennent de différentes sources, naturelles ou humaines. Si le phosphore provient de l'agriculture, le traitement des eaux usées peut n'avoir qu'un effet minime dans la lutte contre l'eutrophisation.

La première question présente à l'esprit de ceux qui ne sont pas familiers avec les écosystèmes aquatiques est de savoir si la réduction de l'apport d'un seul élément nutritif peut empêcher la croissance accélérée des plantes aquatiques. Certains croient que l'eutrophisation est un phénomène tellement complexe et tellement peu connu, qu'on ne peut le contrôler efficacement en luttant seulement contre le phosphore. Ils avancent que la lumière solaire, l'azote, le carbone et une foule d'autres facteurs limitent également la croissance des plantes aquatiques dans la nature. Ces gens ne font pas la distinction entre les causes de l'eutrophisation et les mécanismes de la lutte qu'il faut lui opposer.

Le cas du choléra illustre bien cette assertion. Cette maladie est maintenant restreinte à l'Inde, mais elle était répandue à l'échelle mondiale avant le XX<sup>e</sup> siècle. Ce n'est qu'en 1883 que Robert Koch fit la découverte de l'organisme à l'origine du choléra. Pourtant, trente ans auparavant, on en connaissait déjà le remède; il suffisait tout simplement de séparer les eaux usées de l'eau destinée à la consommation.

Les limnologues croient que le processus de l'eutrophisation liée aux activités humaines peut être inversé puisque chaque application de fertilisants riches en phosphates n'a que des conséquences temporaires sur les lacs, un peu comme l'alcool sur l'Homme; l'organisme est dérangé pendant un certain temps, mais il revient rapidement à son état normal. On peut relier l'eutrophisation et l'alcoolisme, puisque dans les deux cas il s'agit de l'absorption continuelle d'une substance qui crée et entretient un état de perturbation. Si la volonté est assez forte, la guérison sera possible.

En définitive, une véritable lutte contre l'eutrophisation ne peut se faire sans l'arrêt de l'apport de phosphore dans l'eau.

## Élimination des éléments nutritifs des eaux usées

Pour éliminer les phosphates des eaux usées par précipitation chimique, on peut compter sur trois méthodes principales. Elles sont fondées sur la réaction avec la chaux (oxyde de calcium), le fer (sous différentes formes) ou l'aluminium (ordinairement sous forme d'alun ou sulfate double de potassium et d'aluminium). Toutes ces méthodes ont l'avantage de pouvoir éliminer les substances organiques et une partie de l'azote, en même temps que les phosphates.

Les coûts des différentes méthodes de traitement varient selon le prix local des produits chimiques utilisés, les techniques, le capital nécessaire, etc. Parfois, un déchet peut constituer une ressource comme c'est le cas des liquides de décapage produits par les aciéries. Riches en acide et en fer, ils peuvent être ajoutés aux eaux usées pour en éliminer les phosphates, l'acidité et le fer.

Un des problèmes qui se posent est l'évacuation des boues. C'est particulièrement vrai pour l'addition de chaux, à cause du volume de boues produites par la précipitation du carbonate de calcium. Cela nous rappelle que les méthodes de précipitation nécessitent l'addition de produits chimiques aux eaux usées. Le calcium, le fer ou l'aluminium qui sont ajoutés se concentrent dans les boues; les ions sulfate avec lesquels ils forment habituellement des sels passent dans l'eau. Bien que cette méthode semble accroître le problème de la pollution, l'échange est en fait profitable.

G.V. Levin et Joseph Shapiro ont mis au point une méthode qui permet l'élimination des phosphates des eaux usées sans l'addition de produits chimiques. Cette méthode s'appuie sur le fait que les micro-organismes qui vivent dans les boues des eaux usées absorbent les phosphates excédentaires quand l'oxygénation est satisfaisante et en libèrent, lorsque l'oxygène est absent.

En ce qui concerne la lutte contre l'eutrophisation, il est inutile d'enlever les composés azotés des eaux usées si les phosphates ont déjà été éliminés. Un seul facteur suffit pour empê-

cher la croissance des plantes. L'azote peut toutefois être un problème en contribuant aux teneurs élevées en nitrates dans l'eau ou en consommant l'oxygène dissous, comme dans l'oxydation de l'ammoniac en nitrate<sup>21</sup>.

Il existe plusieurs méthodes pour éliminer l'azote, dont la distillation de l'ammoniac à pH élevé, la dénitrification biologique (conversion en azote qui passe ensuite à l'air) ou l'élimination par échange de résines d'ions semblables aux zéolites utilisés pour l'adoucissement de l'eau. Les méthodes qui consistent à dépouiller l'eau de son ammoniac et à le libérer dans l'air ne font que déplacer le problème, à moins que l'ammoniac ne soit concentré et éliminé avant la libération des gaz dans l'atmosphère.

### **Recyclage naturel pour l'élimination des éléments nutritifs**

L'élimination des éléments nutritifs par l'épandage sur le sol des effluents traités ou non, constitue la plus ancienne méthode d'élimination des déchets; elle est encore utilisée dans plusieurs parties du monde mais on la compare rarement aux méthodes plus modernes de traitement des eaux usées. Pourtant, c'est peut-être la meilleure façon de tenir compte de l'écosystème dans sa totalité. À l'heure actuelle, son usage semble renaître dans certaines régions du Canada et des États-Unis. La ville de South Tahoe (sur le bord du lac Tahoe, dans le sud-ouest des États-Unis) pompe l'effluent produit par son installation de traitement des eaux usées (d'une valeur de \$19 000 000) de l'autre côté d'une ligne de partage des eaux, dans un réservoir d'où il sert à irriguer les terres. En certaines parties de la Pennsylvanie et du Michigan, les effluents riches en éléments nutritifs produits par les usines d'épuration servent à améliorer le rendement des forêts. Dans l'aride vallée de l'Okanagan en Colombie-Britannique, on les utilise à titre expérimental pour accélérer la production du grain. En principe, cela ne diffère guère de l'emploi du fumier pour fertiliser les terres.

21. La principale forme d'azote minéral dans les eaux usées est l'ammoniac.

Les déchets d'une société peuvent servir à l'accroissement de la productivité agricole ou forestière, à condition que les microbes pathogènes humains ne soient pas ainsi répandus. Cette méthode trouve sa meilleure application dans les régions tropicales ou subtropicales où la croissance végétale a lieu durant toute l'année. Aux latitudes plus tempérées, son utilité est restreinte par le gel du sol en hiver.

Il arrive que les étendues d'eau stagnante servent à l'élimination des éléments nutritifs, quand elles se prêtent à cette fin et que le climat permet la croissance des plantes aquatiques à longueur d'année. Dans les régions à climat chaud, les lagunes qui reçoivent les eaux usées sont souvent des étangs à carpe; on doit donc transférer la carpe dans de l'eau propre, quelques semaines avant sa pêche. Dans certaines parties du sud-est de l'Asie, il n'est pas rare de voir les latrines et les basses-cours donner directement sur les étangs à carpe. Les déchets produits à un niveau sont utilisés par celui qui suit. La ville de Munich en Allemagne évacue ses déchets dans des bassins spécialement aménagés pour la production du poisson.

Dans les régions tempérées, les lagunes sont peu profondes et les eaux y restent très peu longtemps. Par conséquent, les lagunes se comportent plus souvent comme des rivières que comme des lacs. Ces conditions ne permettent pas aux sédiments d'absorber et de retenir les éléments nutritifs. En hiver, les lagunes sont totalement inefficaces, car l'insolation réduite limite la croissance des algues. Elles peuvent même être des sources de pollution en libérant les éléments nutritifs fixés dans les sédiments.

Ces méthodes naturelles peuvent sembler peu efficaces comparativement aux techniques modernes; elles contribuent toutefois à l'économie. Leur avantage principal n'est pas de produire une ressource, mais de résoudre un problème de pollution tout en ayant un effet secondaire bénéfique. Quand on parle de recyclage, on ne devrait pas tendre principalement à une augmentation du rendement. Il nous faudrait considérer cette question du point de vue écologique, non économique. Il est intéressant de

noter que la plus importante usine naturelle, les plantes opérant la photosynthèse, ne nécessite qu'une fraction infinitésimale d'énergie solaire.

## Élimination des déchets agricoles

Dans la plupart des pays, le poids des déchets produits par les animaux de la ferme est dix fois supérieur à celui des déchets humains. Sans l'incorporation directe de la plupart des excréments animaux au sol, l'eutrophisation dans les régions agricoles serait plus grave que celle qui est causée par les eaux usées municipales.

Les effets néfastes de l'agriculture proviennent de deux pratiques: la première concerne les parcs d'engraissement où dindes, poulets, bétail et autres animaux domestiques sont élevés en grand nombre, sans qu'on utilise ou traite leurs déchets. Ces lieux ressemblent à une ville dépourvue d'usine d'épuration.

L'autre problème provient du gaspillage des fertilisants. Dans certaines régions, le fumier et les fertilisants artificiels sont épandus à la fin de l'automne ou même en hiver, sur du sol gelé. Selon la vitesse de la fonte des neiges au printemps et la pente du terrain, des fractions importantes d'éléments nutritifs peuvent être entraînées en solution ou en suspension.

Les déversements d'éléments nutritifs provenant de l'agriculture et de l'élevage ne sont pas considérables, sauf dans le cas des parcs d'engraissement. Il s'agit d'éduquer les gens en fonction des besoins des écosystèmes plutôt que ceux des individus. Il faudrait revenir aux principes admis il y a des siècles, c'est-à-dire le recyclage des déchets animaux et leur utilisation en tant que fertilisants du sol. Malheureusement, le progrès a fait disparaître ces pratiques artisanales et plusieurs autres, tel l'art de ferrer un cheval. Nous devrions les faire renaître.

## L'histoire du lac Washington

Un cas de dérivation des eaux usées s'est révélé d'importance capitale pour la compréhension du rôle du phosphore dans la lutte contre l'eutrophisation. C'est celui du lac Washington, nappe d'eau de 128 km<sup>2</sup> et d'une profondeur maximale de 59 m et moyenne de 18 m. Ce lac est situé près de Seattle (Washington), aux États-Unis.

La plupart des maux touchant le lac Washington sont reliés à l'augmentation de la population et aux déversements accrus des eaux usées. En 1865, la population de Seattle était d'environ 300 habitants, mais elle était de plus de 1 200 000 habitants en 1965. La première poussée de population s'est fait sentir entre le lac Washington et le Puget Sound, bras de mer de l'océan Pacifique. En 1922, la pollution causée par les trente points d'évacuation des eaux usées brutes devint si grave que l'on dirigea les eaux usées vers le Puget Sound. Le lac retrouva bientôt son état primitif.

En 1930, d'autres effluents provenant de localités plus éloignées commencèrent à s'y déverser. En 1962, le débit des déversements atteignait 76 000 000 l par jour. Les eaux usées recevaient un traitement pour en éliminer les matières organiques mais non les éléments nutritifs minéraux.

Dès le milieu des années 50, W.T. Edmondson, limnologue réputé de l'Université de Washington, constata que l'histoire du lac de Zurich était en train de se répéter. *Oscillatoria rubescens* et d'autres algues bleues commençaient à proliférer. La transparence de l'eau au milieu de l'été, mesurée à l'aide du disque de Secchi, passa de 3 à 4 m en 1950, à moins de 2 m en 1957. Edmondson prévint les responsables de la ville de la suite des événements. Ceux-ci se montrèrent inquiets.

En 1958, les citoyens de Seattle décidèrent par un vote spécial de faire quelque chose pour sauver le lac. En 1961, on commença des travaux de dérivation des effluents riches en éléments nutritifs vers la mer. À la fin de 1963, le débit du déversement des effluents dans le lac était passé de 76 000 000 à



55 100 000 £ par jour. En 1965, il était réduit à 41 800 000 £ par jour, puis à 760 000 £ par jour en 1967 et il devenait nul en 1968.

Pendant que s'opéraient ces changements, Edmondson et ses étudiants mesuraient les concentrations des divers produits chimiques et dressaient un inventaire des algues et des autres micro-organismes présents dans le lac. Le projet de dérivation n'était pas à moitié terminé que l'état du lac commença à s'améliorer. La teneur en phosphates dissous à la fin de l'hiver baissait et la quantité des algues planctoniques au milieu de l'été diminuait. La transparence des eaux s'accroissait également.

En 1970, le lac avait retrouvé l'apparence qu'il avait en 1950 en ce qui a trait à la croissance des plantes et aux autres signes d'eutrophisation. Une guérison rapide et remarquable s'était produite. Les citoyens et les dirigeants de la cité étaient enchantés des résultats. En réagissant à temps, ils avaient empêché que la situation devienne intolérable, voire désastreuse<sup>22</sup>.

Les travaux d'Edmondson et de ses collaborateurs de l'Université de Washington ont permis d'établir un rapport direct entre la teneur en phosphates dissous à la fin de l'hiver et l'abondance des algues planctoniques au milieu de l'été. Aucun autre des éléments nutritifs mesurés ne montra un changement semblable à celui des algues.

Les conclusions étaient évidentes. La dérivation des effluents avait eu pour résultat de diminuer l'apport de phosphore dans le lac, ce qui a entraîné la réduction de la croissance des plantes. Cependant, une question subsistait: est-ce que les lacs Érié et Ontario pourraient réagir à l'élimination des phosphates des eaux usées aussi rapidement et efficacement que le lac Washington avait répondu au procédé de dérivation.

Richard A. Vollenweider, limnologue réputé d'origine suisse attaché au Centre canadien des eaux intérieures en Ontario, a proposé une théorie de l'eutrophisation fondée sur l'ap-

22. Les travaux de W.T. Edmondson ont été financés par le U.S. National Science Foundation. Cet organisme fédéral appuie les recherches scientifiques dont la contribution est plus culturelle qu'économique.

port annuel de phosphore et d'azote dans les lacs<sup>23</sup>. Il a montré que plusieurs lacs du monde ont été gravement touchés au cours des dernières décennies, dû à un excès en éléments nutritifs. On doit surtout à ce chercheur d'avoir établi un fondement scientifique pour la lutte internationale contre l'eutrophisation. Sachant quelles quantités de phosphore sont déversées dans un lac, il est possible de prévoir comment ce dernier réagira aux mesures de lutte contre l'eutrophisation. Les travaux de Vollenweider ont été utiles dans le cas des lacs Érié et Ontario.

Dans le présent chapitre, nous n'avons pas parlé de l'importance des détergents phosphatés au regard de l'eutrophisation. Pourtant, en 1970, ceux-ci étaient à l'origine de plus de la moitié du phosphore contenu dans les eaux usées municipales<sup>24</sup>. Le prochain chapitre traitera de la controverse au sujet des détergents qui a eu lieu en 1969 et 1970.

---

23. Voir Vollenweider (1968).

24. Il est peu probable que les rejets domestiques de maisons isolées ou de petites localités soient traités pour en éliminer les phosphates, à cause du peu d'efficacité et du coût élevé du traitement à petite échelle. À cet égard, il y a une différence marquée entre l'utilisation du chalet d'été en Amérique du Nord et en Europe. Dans le premier cas, le chalet est pourvu de toutes les commodités de la ville, y compris les machines à laver la vaisselle ou le linge qui se vident ordinairement dans l'eau plutôt que dans des fosses septiques ou dans le sol. En Europe, on apprécie surtout le chalet pour le dépaysement qu'il procure; son apport à la pollution due aux éléments nutritifs y est par conséquent plus réduit.

## CHAPITRE 7

### Les détergents et les lacs

Compte rendu de la controverse des années 1969 et 1970 au sujet de l'emploi des phosphates dans les détergents; évaluation de leur pouvoir nettoyant et mesures à prendre pour réduire leur utilisation.

Le 7 octobre 1964, en vertu des dispositions énoncées en 1909 par le Traité sur les eaux limitrophes internationales, les gouvernements des États-Unis et du Canada demandaient à la Commission mixte internationale de faire une enquête et de rédiger un rapport sur trois questions relatives à la pollution dans le bassin inférieur des Grands lacs. La création de la Commission (organisme permanent composé de trois représentants du Canada et autant des États-Unis) date de 1911, suite à la signature du Traité de 1909. Depuis, les commissaires ont résolu de nombreux problèmes qui sont survenus le long de la frontière de 8 763 km et ce, à l'avantage des populations des deux côtés.

Évitant tout mot ou phrase pouvant être mal interprété, les deux gouvernements posèrent trois questions à la Commission.

- 1) Les eaux des lacs Érié et Ontario et celles de la partie internationale du fleuve Saint-Laurent sont-elles polluées d'un côté ou l'autre de la frontière, au point de constituer ou de pouvoir constituer une menace à la santé et aux biens des gens qui vivent de part et d'autre de la frontière?
- 2) S'il y a pollution, quelle en est l'étendue, quelles en sont les causes et où précisément exerce-t-elle ses ravages?
- 3) Si la Commission devait constater l'existence de pareille pollution, quelles solutions pratiques du point de vue



Fig. 3 Les détergents sont la cause de la mousse de cette fontaine située en face de la U.S. National Gallery of Art, à Washington (D.C.). Cette photo a été prise en 1959, alors que les détergents non biodégradables étaient d'un emploi courant. En 1965, sous la pression des gouvernements, l'industrie des détergents mit au point des surfactifs biodégradables. Ces scènes font désormais partie du passé.

économique, hygiénique et autre recommanderait-elle et quels en seraient les coûts d'application?

Au début de 1965, la Commission créa deux comités consultatifs pour superviser les investigations nécessaires: un pour le lac Érié et l'autre pour le lac Ontario et la partie internationale du fleuve Saint-Laurent. Ces comités se composaient de représentants des gouvernements des états ou des provinces et des gouvernements fédéraux de chacun des pays concernés. Ces personnes conjugèrent leurs talents et leurs ressources pour réaliser ces longues et fastidieuses recherches. Les travaux de ces comités devaient conduire à la publication, en novembre 1969, d'un rapport comportant un résumé des observations et des recommandations. Au printemps 1970 devaient paraître deux rapports plus volumineux et plus détaillés<sup>25</sup>.

Parmi les 19 recommandations relatives aux différents aspects de la pollution du bassin inférieur des Grands lacs, il y en avait une qui causa plus de remous que toutes les autres ensemble. Elle proposait un programme de lutte contre le phosphore afin de mettre un terme à l'accroissement possible de l'eutrophisation liée aux activités humaines. Les comités faisaient les recommandations suivantes:

- a) réduire immédiatement et le plus possible la teneur en phosphates dans les détergents et remplacer ces derniers par des substances moins dommageables pour l'environnement, avant 1972;
- b) diminuer d'au moins 80 % la teneur en phosphates résiduels des effluents municipaux, dans des délais fixés entre 1972 et 1978 pour différentes parties des bassins hydrographiques et continuer ensuite cette réduction dans la mesure où c'est économiquement possible;
- c) élaborer des programmes pour réduire l'apport de phosphore dans l'eau par l'agriculture;

25. *Rapport à la Commission mixte internationale sur la pollution des lacs Érié et Ontario, et de la partie internationale du fleuve Saint-Laurent*, vol. 1, Résumé, (1969); vol. 2, Lac Érié, (1970); vol. 3, Lac Ontario et partie internationale du fleuve Saint-Laurent, (1970), Ottawa et Washington.

- d) soumettre à une réglementation tout changement important dans l'addition de phosphore à l'eau des bassins hydrographiques.

C'est la première recommandation qui devait alimenter toute la controverse, à cause de la réaction hostile de l'industrie des détergents. On proposait une telle mesure car, en 1969, plus de la moitié des phosphates contenus dans les eaux usées municipales était attribuable aux détergents; c'était là une situation qui durait depuis 1947. Les fabricants savaient que les gouvernements voulaient faire disparaître les phosphates des détergents, mais cette recommandation les prit de court.

Dans son rapport final, la Commission mixte internationale devait admettre qu'il y avait de bonnes raisons pour attaquer séparément le problème des détergents et celui du traitement des eaux usées. D'abord, l'élimination des phosphates des détergents réduirait, de façon permanente et relativement rapide, au moins 50 % du phosphore des eaux usées municipales. Cette élimination entraînerait de plus une diminution substantielle des coûts de traitement dans les installations d'épuration. (Dans le rapport technique présenté à la Commission, on estimait les économies annuelles du coût du traitement chimique des eaux du bassin inférieur des Grands lacs à \$22 000 000.) Enfin, en éliminant les phosphates des détergents, on réduirait de moitié la quantité de phosphates déversés dans l'eau en provenance des habitations et des petites communautés isolées, là où aucune autre forme de lutte contre la pollution ne pouvait réussir. Il est évident que l'application d'une telle mesure ne profiterait pas seulement au bassin inférieur des Grands lacs.

En même temps qu'elle diffusait le rapport sommaire des comités consultatifs, la Commission organisait des audiences publiques dans six localités du bassin inférieur des Grands lacs. Ces audiences avaient pour but de connaître les réactions des autres secteurs de la société au rapport en question. Elles étaient prévues pour la fin de janvier et le début de février 1970, donnant ainsi amplement le temps aux parties intéressées de faire leur propre critique du rapport.

Les 15 et 16 décembre 1969 eut lieu à Washington (D.C.) une autre série d'audiences sur un sujet très semblable. Ces audiences étaient tenues par un sous-comité du comité de la Chambre des représentants des États-Unis sur les activités gouvernementales, sous la présidence de l'honorable Henry S. Reuss (démocrate du Wisconsin). On cherchait à savoir pourquoi l'organisme fédéral faisant partie du groupe de travail sur l'eutrophisation qui réunissait des représentants de l'industrie et du gouvernement américains, n'était pas parvenu à accélérer la recherche pour le remplacement des phosphates dans les détergents. Tout ce que M. Reuss pouvait constater, c'est que le résultat de trois ans de travail acharné du gouvernement se limitait à une subvention de recherche de \$99 896, à la mise au point de méthodes provisoires pour l'analyse des algues et à un quelconque projet de film sur l'eutrophisation.

L'une des parties les plus révélatrices du témoignage présenté aux séances du comité Reuss a été une série de questions adressées par M. Reuss à M. Carl L. Klein, secrétaire adjoint de l'intérieur pour la qualité de l'eau et la recherche pendant les premières années de l'administration Nixon<sup>26</sup>:

*M. Reuss* — N'est-il pas vrai que seulement 15 % de la population du pays bénéficie de services d'installations modernes pour le traitement des eaux usées?

*M. Klein* — Je ne crois pas qu'il y en ait autant que cela.

*M. Reuss* — La proportion est alors plus faible?

*M. Klein* — Oui.

*M. Reuss* — En gros, les phosphates qu'on retrouve dans les installations d'épuration des eaux usées proviennent de deux sources, les détergents ménagers et les déchets humains, n'est-ce pas?

*M. Klein* — Oui, monsieur.

*M. Reuss* — Et ces détergents sont produits par trois principaux fabricants?

*M. Klein* — C'est juste.

---

26. Voir Chambre des représentants dans les références.

*M. Reuss* — Et les déchets d'origine humaine sont produits par une couple de centaines de millions d'individus; est-ce vrai?

*M. Klein* — Oui, monsieur.

*M. Reuss* — Il ne vous est jamais venu à l'esprit qu'il est plus facile de s'occuper de trois fabricants que de deux cent millions?

M. Klein était d'accord, mais il poursuivit en disant qu'indépendamment de la question des détergents, il faudrait construire des installations dans les plus grandes villes afin d'éliminer les phosphates produits par les déchets humains. M. Reuss partageait cette opinion, mais il souligna le manque de temps, considérant le nombre de personnes en cause et le besoin d'éliminer les phosphates à la source la plus importante.

Le mémoire adressé par l'U.S. Soap and Detergent Association au comité Reuss (et présenté plus tard aux séances de la Commission mixte internationale) faisait valoir le rôle nettoyant essentiel des phosphates et la complexité du processus d'eutrophisation. La question n'était pas de savoir si les gens pouvaient avoir du linge et des lacs propres, mais si la société nord-américaine pouvait conserver ses normes de propreté et d'hygiène sans phosphates dans les détergents.

Le point culminant du débat fut atteint au cours de la première semaine de février 1970, lors d'une séance de la Commission mixte internationale, quand de hauts fonctionnaires des organismes fédéraux de lutte contre la pollution de l'eau des deux pays annoncèrent leur intention d'éliminer les phosphates des détergents. Quand les trois gros fabricants de détergents et leurs fournisseurs en phosphates apprirent cette nouvelle, ils surent que leur cause était perdue. Pour la deuxième fois en dix ans, on identifiait l'industrie des détergents comme étant un responsable international de pollution. Cela avait débuté avec la mousse produite par les détergents non biodégradables qui avaient transformé certaines régions en vastes machines à laver; maintenant,



c'était les phosphates auxquels on attribuait la cause de l'eutrophisation liée aux activités humaines<sup>27</sup>.

Ces déclarations eurent peu d'écho, car le public mit du temps à se rendre compte qu'une querelle grave opposait l'industrie des savons et des détergents aux deux gouvernements. Dans la confusion qui suivit, les représentants de la presse, de la radio et de la télévision assaillirent les écologistes afin de découvrir ce qu'était l'eutrophisation. Les ménagères, qui avaient pris soin de n'acheter que les détergents étiquetés biodégradables, eurent la surprise de découvrir, en 1970, que la question des phosphates n'avait rien à voir avec la notion de biodégradabilité; les agents tensio-actifs non biodégradables avaient été remplacés depuis des années. Les citoyens ignoraient pourquoi on employait des phosphates et quelle était leur répercussion sur les lacs et les cours d'eau; d'ailleurs, peu d'entre eux savaient que les détergents employés dans les machines à laver le linge ou la vaisselle en contenaient. Toutefois, certains organismes publics contre la pollution étaient très renseignés. Ils entreprirent des campagnes d'information visant l'adoption de lois destinées à bannir les phosphates des détergents.

Pendant ce temps, de nouveaux développements survenaient en coulisses. Les fabricants et leurs fournisseurs de phosphates exerçaient des pressions auprès des deux gouvernements afin d'éviter toute action risquant de bouleverser l'industrie. Les fabricants déclaraient que les phosphates étaient absolument nécessaires pour assurer le pouvoir nettoyant des détergents. Ils ajoutaient qu'en dépit des travaux de recherche, on n'avait trouvé aucun produit pouvant jouer le même rôle vital que les phosphates sans agir négativement sur la qualité de l'eau. Les deux gouvernements ignoraient que l'industrie allait bénéficier d'un appui inattendu.

---

27. La persistance de la mousse produite par des agents tensio-actifs synthétiques causa des problèmes graves en Amérique du Nord et en d'autres parties du monde vers la fin des années 50 et le début des années 60. L'introduction sur le marché, en 1965, d'agents tensio-actifs biodégradables permit de les résoudre.

Dans une série d'articles parus dans *Canadian Research & Development*<sup>28</sup>, deux journalistes canadiens, Robert F. Legge et Douglas Dingeldein, attaquent la Commission mixte internationale, les comités consultatifs et un membre du comité de la rédaction. Ces auteurs, rapidement devenus des autodidactes en matière de lacs et d'eutrophisation, prétendaient divulguer un nouvel aspect de la situation voulant que ce soit le carbone et non le phosphore qui détermine le taux de la production des fleurs d'eau.

Le fondement scientifique des articles en question provenait des investigations menées par trois chercheurs: Willy Lange de l'Université de Cincinnati, L.E. Kuentzel de la Wyandotte Chemicals Corporation et Pat C. Kerr de l'U.S. Environmental Protection Agency<sup>29</sup>. Tous trois déclaraient que le dioxyde de carbone était le principal facteur limitant la production des fleurs d'eau.

Legge et Dingeldein débutaient leurs articles en se demandant si la Commission mixte internationale ne tentait pas de discréditer les recherches et le témoignage de savants réputés, de biaiser à des fins politiques les données accumulées par le gouvernement, de faire abstraction de violations au Traité du 11 janvier 1909 (auquel elle devait d'ailleurs sa propre existence), prenant ainsi part à ce qui pourrait être la farce scientifique et politique de l'histoire des relations du Canada et des États-Unis.

Ces articles connurent tout de suite un succès foudroyant dans le monde de l'industrie des détergents qui en commanda des réimpressions et qui les distribua parmi les magnats industriels et les responsables gouvernementaux de la lutte contre la pollution. En quelques semaines, on en trouvait des exemplaires dans tous les pays du bloc occidental où on débattait la question des détergents; il y en avait même dans certains pays derrière le Rideau de fer.

---

28. Voir Legge et Dingeldein (1970).

29. Voir Lange (1967); Kuentzel (1969); Kerr *et al.* (1970).

Les responsables se mirent à craindre que la question des détergents soit reléguée aux oubliettes à cause de la confusion qui régnait auprès du public. Mais les déclarations à l'emporte-pièce, faites sous le coup de l'émotion, sombrèrent graduellement dans l'oubli et les choses retournèrent à leur état initial. Vers la fin de l'année 1970, la plupart des fabricants semblaient prêts à suivre la politique gouvernementale du Canada et des États-Unis, c'est-à-dire à enlever les phosphates des détergents. Avant de passer à l'examen détaillé de l'attitude prise par l'U.S. Soap and Detergent Association dans cette controverse, définissons clairement ce qu'est un détergent.

Un détergent est un produit nettoyant dont l'ingrédient de base est le surfactif. En plus du surfactif, le détergent peut contenir des agents d'adoucissement et de neutralisation qui ont peu ou pas de pouvoir détersif, mais qui augmentent l'efficacité du surfactif en agissant sur les ions calcium et magnésium responsables de la dureté de l'eau. On y trouve aussi des charges, ingrédients qui servent à réduire les coûts de fabrication, ainsi qu'une variété d'autres substances tels les agents blanchissants et les parfums qui donnent bonne apparence au produit.

Dans la plupart des détergents synthétiques des années 60, le surfactif était le sulfate d'un alcool gras, tiré de produits pétroliers. Dans les savons, le surfactif est le sel de sodium d'un acide gras, dérivé du suif animal ou d'huiles végétales. Cet agent disperse les particules et les taches des surfaces maculées, les mettant ainsi en suspension et permettant leur évacuation avec l'eau de lavage. Dans les détergents solides, conçus pour les machines à laver le linge ou la vaisselle, le surfactif ne constitue que 15 à 20 % du poids du produit. Le reste comprend principalement des agents d'adoucissement et de neutralisation. En 1969, il s'agissait surtout d'ingrédients à forte teneur en phosphates qui totalisaient 30 à 70 % du poids du produit. À cette époque, on utilisait le triphosphate de sodium dans les détergents destinés aux lessiveuses et d'autres types de phosphates (pyrophosphates et métaphosphates), dans les produits conçus pour les lave-vaisselle automatiques.

Les détergents doux comme les détergents liquides sont prévus pour le lavage manuel de la vaisselle et des tissus fragiles. Ils ne contiennent pas d'additifs d'adoucissement et de neutralisation phosphatés en concentration appréciable, car ceux-ci ne sont pas nécessaires dans la plupart des cas. Lors du lavage manuel, l'oeil peut repérer les taches et le frottage les fait partir. Mais les machines sont aveugles; il leur est impossible d'appliquer leur énergie mécanique là où elle est le plus nécessaire. Ainsi, on incorpore des additifs au produit afin d'en augmenter l'action détergente. Il y a aussi une explication technique à l'absence de phosphates dans les détergents liquides: les polymères phosphatés se dégradent lentement en présence d'eau, perdant ainsi leurs propriétés d'agents d'adoucissement et de neutralisation.

Après avoir précisé l'utilité des additifs et leur rapport avec l'automatisation, nous devons examiner dans quelle mesure les composés phosphatés polymériques utilisés en 1969 ont rempli leurs rôles d'agents d'adoucissement et de neutralisation. Dans son exposé devant le comité Reuss et la Commission mixte internationale, l'U.S. Soap and Detergent Association énumérait sept propriétés des phosphates dans les détergents. On affirmait qu'ils pouvaient:

- 1) accroître l'efficacité des surfactifs;
- 2) garder les particules de saleté en suspension;
- 3) pourvoir à l'alcalinité nécessaire à un bon lavage;
- 4) tamponner la solution de lavage contre les variations de l'alcalinité;
- 5) émulsifier les taches d'huile et de graisse;
- 6) adoucir l'eau en neutralisant les minéraux causant sa dureté (fer, calcium, magnésium);
- 7) désinfecter partiellement le linge.

Une telle liste semblait signifier qu'on ne pourrait remplacer les phosphates. Cependant, un examen sérieux réduisit à trois leurs rôles essentiels, c'est-à-dire

- a) adoucir l'eau (numéros 1 et 6);

- b) créer et maintenir une forte alcalinité (numéros 3 et 4);
- c) enlever les particules de saleté (numéros 2 et 5).

On avait probablement attribué un rôle désinfectant aux phosphates afin de provoquer un effet psychologique. S'ils avaient réellement été essentiels à l'élimination des microbes, ils auraient servi en médecine plutôt que dans les détergents.

La principale fonction des phosphates est donc d'adoucir l'eau, empêchant ainsi la formation de complexes neutres entre les surfactifs et les ions de calcium et de magnésium, et de précipités par l'action de ces ions sur les savons. Somme toute, les phosphates sont des agents d'adoucissement d'eau efficaces. En cela, ils n'ont rien d'exceptionnel, pas plus d'ailleurs en ce qui a trait à leur capacité de créer et de maintenir une forte alcalinité. Ils se distinguent cependant en mettant les particules de saleté en suspension, mais les fortes concentrations utilisées à cette fin en 1969 étaient tout à fait inutiles.

Il nous faut comprendre qu'un agent d'adoucissement n'a pas à être aussi puissant. Un agent ordinaire d'adoucissement (ou de l'eau douce) peut donner les mêmes résultats. L'un des facteurs à l'origine du problème des phosphates est que les fabricants voulaient s'assurer de la qualité de leur produit, même dans les pires conditions. Ainsi, afin d'en garantir l'efficacité dans les régions où l'eau est très dure, ils avaient ajouté plus d'agents d'adoucissement que cela n'était nécessaire. Nous en reparlerons plus loin. Auparavant, quelques arguments invoqués par l'industrie des détergents méritent qu'on s'y arrête.

Au cours des audiences du Comité Reuss et de la Commission mixte internationale, l'U.S. Soap and Detergent Association et quelques experts avaient avancé des arguments sur l'environnement. Ils tendaient à minimiser l'importance des phosphates (spécialement ceux des détergents) dans le phénomène de l'eutrophisation. En examinant de plus près ces affirmations, on peut penser qu'au moment des audiences, les fabricants étaient complètement ignorants de l'action de leurs produits sur l'environnement ou alors ils la connaissaient, mais avaient choisi de l'ignorer. Pour illustrer ceci, citons quelques exemples caracté-

ristiques, suivis d'un exposé des erreurs qu'ils contiennent et d'une réfutation.

*Le premier argument* faisait valoir qu'on n'avait pas encore prouvé que les phosphates des détergents étaient la cause première de l'eutrophisation rapide liée aux activités humaines. Une masse croissante de données scientifiques permettait de croire que d'autres éléments nutritifs ou certaines combinaisons d'éléments nutritifs étaient peut-être plus importants dans le déclenchement de l'eutrophisation et probablement plus faciles à éliminer. Il était utopique de tenter de lutter contre la prolifération des algues et les autres manifestations de l'eutrophisation, à partir d'un seul élément nutritif tel que les phosphates.

*Erreur* — Le fond du problème n'était pas tant la cause même de l'eutrophisation liée aux activités humaines mais bien la façon de contrôler ce phénomène. Étant donné qu'en 1970 les détergents à lessive contenaient des phosphates, ils contribuaient autant à la cause de l'eutrophisation qu'à son contrôle. L'association confondait cause et solution et créait la fausse impression que les phosphates des détergents avaient quelque chose de spécial par rapport à l'eutrophisation. Elle ajoutait à la confusion en faisant inutilement cas d'exceptions. C'était faire preuve de peu de sens des responsabilités dans un tel domaine d'intérêt public.

*Réfutation* — L'objet de la discussion était la lutte contre l'eutrophisation et non sa cause (sauf dans la mesure où elle était reliée à la lutte). Parmi les différents éléments nutritifs nécessaires aux plantes aquatiques, seul le phosphore est contrôlable par l'Homme et peut réduire jusqu'à un certain point la fréquence des fleurs d'eau. Indépendamment du fait qu'au départ le phosphore soit ou non un facteur limitant la croissance des algues, il en deviendra un si l'Homme réduit son apport dans les lacs. Enfin, dans la plupart des eaux de réception, l'élimination des phosphates des eaux usées a le même effet sur la croissance des algues que l'élimination de tous les autres éléments nutritifs réunis.

*Un second argument* affirmait que l'élimination complète du phosphore contenu dans les détergents, les eaux d'égout et les rejets industriels déversés dans le lac Érié continuerait de produire des concentrations moyennes de 40 microgrammes de phosphore par litre soit quatre fois la concentration acceptable pour lutter contre la prolifération des algues.

*Erreur* — La personne qui a fait ce calcul n'a pas tenu compte que 85 % du phosphore déversé chaque année dans les eaux du lac Érié sont éliminés par des processus naturels et se déposent en sédiments. De plus, la concentration en phosphore généralement acceptable pour freiner la croissance des algues est de 10 microgrammes de phosphore minéral par litre. La concentration correspondante en phosphore *total* (faisant l'objet du calcul) est de deux à trois fois cette valeur.

*Réfutation* — Si on tient compte de ces deux erreurs, le calcul de la concentration du phosphore minéral dans le lac Érié aurait dû être de 3 microgrammes par litre, ce qui est bien au-dessous de la concentration acceptable. (En réalité, il est peu probable qu'à la fin de l'hiver, la concentration puisse être aussi faible dans le bassin occidental).

*Le troisième argument* suggérait que, dans les lacs peu profonds, les phosphates libérés des sédiments stimuleraient la croissance des algues, même après l'élimination des phosphates des détergents et des eaux usées.

*Erreur* — Cet argument était une erreur de tactique car il reconnaissait l'importance des phosphates pour la croissance des algues. De plus, il faisait preuve d'ignorance en ce qui a trait à l'action du phosphore dans les lacs.

*Réfutation* — Normalement, l'échange du phosphore s'opère à partir de l'eau vers les sédiments, non dans le sens inverse. Si, toutefois, la quantité de phosphore libérée par les sédiments est aussi importante qu'on l'affirme, cela ne fait qu'accroître la nécessité d'un programme de lutte contre le phosphore. C'est logique: plus il y a de phosphore qui pénètre dans le lac, plus il s'en dépose dans les sédiments, prêt à être

libéré dans l'eau. Tout cela signifie que la lutte contre l'eutrophisation liée aux activités humaines en sera d'autant plus longue.

*Le quatrième argument* tenait le raisonnement suivant: l'addition d'éléments nutritifs à des échantillons d'eau prélevés à l'extrémité occidentale du lac Érié révélait que le phosphore n'était pas l'unique et principal facteur limitant la croissance des algues. L'azote avait une action déterminante plus prononcée que le phosphore sur la croissance des algues. L'élimination du phosphore des détergents et des eaux usées ne résoudrait pas les problèmes causés par l'eutrophisation dans le lac Érié, car les phosphates n'y constituaient pas le principal facteur limitatif.

*Erreur* — On confond la cause de l'eutrophisation (l'enrichissement en éléments nutritifs) avec le traitement proposé (l'élimination graduelle des phosphates). De plus, le fait que dans la partie occidentale du lac Érié, l'azote soit plus déterminant que le phosphore pour la croissance des algues peut être une preuve de pollution par les phosphates.

*Réfutation* — La teneur en phosphore dans les effluents est très forte comparativement à celle des autres éléments nutritifs nécessaires à la croissance des végétaux aquatiques. Conséquemment, l'une des réactions caractéristiques des lacs non pollués à l'addition d'eaux usées est le passage d'une carence en phosphore à une carence en azote. Ceci s'explique par le rapport élevé phosphore minéral/azote minéral dans les eaux usées (1P:4N en poids) relativement aux besoins des plantes (1P:7N en poids) et à l'apport naturel (1P:14N en poids). Si, en 1969, la croissance des algues dans la partie occidentale du lac Érié était plus déterminée par l'azote que par le phosphore, cela prouvait que la région était fortement polluée par le phosphore qui provenait probablement des détergents<sup>30</sup>. L'élimination de l'apport de phosphore dû aux activités humaines ne réglerait

---

30. Les carences en éléments nutritifs dans les cas de lacs pollués peuvent porter à confusion et ne devraient jamais servir de base aux mesures correctives. Ce qui importe, c'est de savoir quel était le facteur limitant la croissance des plantes avant que ne se déclare la pollution par les éléments nutritifs et dans quelle mesure l'Homme peut restreindre sa teneur totale dans l'eau.



pas tous les problèmes soulevés par l'eutrophisation du lac Érié, mais elle réduira sûrement ceux dont l'Homme est responsable.

D'autres arguments pourraient servir à illustrer la déplorable attitude de l'industrie des détergents; toutefois, les quatre exemples déjà cités suffisent amplement. L'industrie n'avait alors aucune notion de ce qui touchait de près ou de loin l'environnement.

Il reste maintenant à savoir comment nous pouvons obtenir du linge propre tout en conservant nos lacs propres. Depuis la dernière guerre, à l'occasion de semblables controverses concernant l'environnement, nous avons réussi à mettre un terme aux explosions nucléaires dans l'atmosphère et à l'utilisation du mercure et du DDT. Les fabricants de détergents eux-mêmes sont au courant d'un cas où les dommages causés à l'environnement ont pu être réparés. Il s'agit de la biodégradabilité des surfactifs contenus dans les détergents.

Dès leur apparition sur le marché, à la fin de la Seconde Guerre mondiale, les surfactifs synthétiques furent très utilisés. Contrairement aux savons, ils permettaient un bon nettoyage de la vaisselle et du linge, sans formation de précipités insolubles et de mousses grasses. Au cours des années 50, cependant, des effets négatifs se manifestèrent: près des installations d'épuration et dans les eaux en aval des agglomérations importantes, partout où l'eau subissait un brassage, s'accumulaient de grandes quantités de mousse. Dans certaines régions, le vent dispersa même sur quelques milles à la ronde une mousse sale et brune qui constituait une menace pour la santé et une atteinte à la beauté du paysage (fig. 3).

À la suite de pressions exercées par le gouvernement des États-Unis, l'industrie résolut le problème. On effectua un petit changement dans la structure chimique des surfactifs synthétiques, les rendant ainsi plus facilement biodégradables. Les îlots de mousse disparurent. Le pouvoir nettoyant n'en souffrit aucunement et tout l'écosystème en bénéficia.

Par contre, la biodégradation ne pouvait résoudre le problème occasionné par les phosphates. Les composés polyphosphatés utilisés dans les détergents se décomposent facilement dans l'eau pour donner des ions phosphatés minéraux qui sont ensuite absorbés par les organismes, sans toutefois subir une nouvelle décomposition.

Au Chapitre 6, nous avons vu qu'il était possible de lutter contre l'eutrophisation liée aux activités humaines en éliminant les phosphates par le traitement des eaux usées. Voyons maintenant comment on peut réduire les quantités de phosphore dans les détergents.

De nos jours, nous sommes tellement hantés par l'importance des détergents qu'on néglige souvent trois principaux facteurs qui interviennent lors du nettoyage: l'eau, l'énergie mécanique et l'alcalinité élevée (pH). L'eau agit par effet de solvant; l'énergie mécanique détache la saleté et expose la surface à nettoyer; enfin, l'alcalinité sépare les particules de saleté et les met en solution. Sur les rives du Gange, de nombreuses femmes lavent le linge des gens riches sans utiliser de savon ou de détergent. Elles se servent de carbonate de sodium, un sel alcalin, de l'eau et de leurs bras. Le linge en ressort immaculé.

Au cours des audiences du comité Reuss, on a clairement mis en évidence l'importance de l'eau en tant qu'agent nettoyant, à l'aide de résultats d'expériences réalisées à l'Université Marquette aux États-Unis. Ces essais comparaient le pouvoir nettoyant du produit « B-5 sans phosphates » de Heinecke, du savon « Tide » de Procter & Gamble et de l'eau utilisée seule<sup>31</sup>.

À cette fin, on a utilisé quatre douzaines de couches neuves en coton blanc. On a sali toutes ces couches, sauf trois, avec de l'eau contenant de la terre de jardin, puis on les a fait sécher. Juste avant le lavage, on a taché les coins de toutes les couches avec de la sauce à barbecue et on les a divisées, au hasard, en trois lots de 14 couches. On a conservé trois couches sales comme témoins. On a lavé chacun des lots séparément, dans une

---

31. Voir Chambre des représentants dans les références.

lessiveuse de modèle récent, en utilisant un cycle de lavage à l'eau chaude de 14 minutes suivi d'un rinçage à l'eau tiède. L'un des lots a été lavé à l'eau claire (la dureté de l'eau, à Milwaukee est d'environ 120 milligrammes de  $\text{CaCO}_3$  par litre), l'autre, à l'aide d'une tasse de « Tide » (77 g) et le dernier avec la même quantité de « B-5 ». Après le lavage, le linge a été mis à sécher pendant 40 minutes dans une sècheuse au gaz. On a comparé les trois lots entre eux, avec les couches neuves et les trois couches témoins.

Il faut admettre que les données dont nous disposons sont insuffisantes pour évaluer de façon définitive le pouvoir nettoyant. Une comparaison visuelle des trois lots différents avec les couches neuves et les couches sales donne cependant le tableau qui suit, à partir d'observations faites par six personnes (trois hommes et trois femmes) en éclairage naturel, incandescent et fluorescent. Le plus petit indice correspond aux meilleurs résultats.

	Eau	« Tide »	« B-5 »
Blancheur (nous n'avons en aucun cas retrouvé la blancheur initiale)	2	1	3
Propreté générale (élimination de la saleté)	1	1	1
Enlèvement des taches	1	3	2

On aurait probablement obtenu des résultats tout différents si les essais avaient porté sur des taches de graisse ou des souillures sur des collets ou des manchettes de chemises. Néanmoins, les résultats illustrent bien l'importance de l'eau comme agent nettoyant.

Aux trois facteurs que sont l'eau, l'énergie mécanique et l'alcalinité, on ajoute un surfactif qui disperse et émulsifie les

matières grasses et huileuses. Vient ensuite l'agent d'adoucissement et de neutralisation, agissant sur les ions qui nuisent à l'efficacité du surfactif. Ainsi, le problème causé par les phosphates ne semble pas difficile à résoudre. On trouvera ci-dessous quelques-unes des solutions possibles.

- 1) Cesser d'utiliser les machines à laver automatiques puisque ce sont les seules qui emploient des agents d'adoucissement et de neutralisation sur une grande échelle. (Solution inutile qui créerait autant, sinon plus, de problèmes qu'elle n'en réglerait.)
- 2) Adopter des lessiveuses semblables à celles qui sont employées en Europe. Elles fonctionnent à températures plus élevées et consomment moins d'eau et de détergent.
- 3) Revenir au savon (seuls les maniaques de l'écologie et certaines mères avec des enfants portant la couche seraient généralement en faveur).
- 4) Emballer les agents d'adoucissement et de neutralisation à part, permettant ainsi l'utilisation des quantités nécessaires pour remédier à la dureté de l'eau dans chaque foyer.
- 5) Dans les régions où l'eau est dure, utiliser un agent ordinaire d'adoucissement pour l'eau utilisée dans les machines à laver automatiques.
- 6) Employer un détergent liquide avec du carbonate de soude pour le lavage, qu'il soit automatique ou pas. (Alan Prince, Directeur général aux eaux intérieures d'Environnement Canada en 1970, a affirmé que sa femme le faisait depuis des années.)
- 7) Réduire à moins de 5 % la teneur en phosphates ( $P_2O_5$ ) dans les détergents à lessive. Ceci aurait des conséquences minimales pour les foyers alimentés en eau douce, mais réduirait l'efficacité du détergent dans les régions où l'eau est dure.

- 8) Mettre au point d'autres agents d'adoucissement et de neutralisation qui seraient moins dommageables pour l'environnement<sup>32</sup>.
- 9) Négliger notre hygiène (ce qui ne ferait certainement pas l'unanimité).

L'industrie aux prises avec le problème opta pour la huitième solution. Bien qu'on ait éprouvé des centaines de produits de remplacement pour le triphosphate de sodium, seuls quelques-uns ont paru répondre à toutes les exigences. Ils étaient économiques, efficaces et inoffensifs pour le linge et les machines à laver, acceptables pour l'environnement et sans danger pour la santé. En 1970, un composé appelé NTA ou nitrilotriacétate de sodium était le candidat le plus prometteur. On parlera de ce composé au chapitre suivant.

---

32. Les gouvernements ont fait preuve de sagesse en évitant de laisser croire qu'ils approuvaient tout produit en remplacement des phosphates détersifs. Ceci est particulièrement vrai pour la Grande-Bretagne, plusieurs pays européens et certaines régions des États-Unis où le recyclage de l'eau peut être important à cause de la forte densité démographique. Dans certains endroits, il n'est pas rare de constater que 3 à 30 % de l'eau du robinet proviennent des rejets domestiques et industriels déversés en amont. Dans ces conditions, la toxicité et la biodégradabilité deviennent des facteurs de la plus haute importance.



## CHAPITRE 8

### L'année du NTA

L'utilisation du NTA et ses effets sur l'environnement, la santé et le milieu politique.

Dans les milieux scientifiques, on plaisante à moitié quand on dit que tout composé chimique qui connaît aujourd'hui une certaine vogue scientifique ou industrielle, a été isolé ou synthétisé par un chimiste allemand au XIX<sup>e</sup> siècle. L'acide nitrilotriacétique (NTA) n'échappe pas à ce principe, l'Allemand W. Heintz ayant été le premier à l'isoler et à rendre compte de ses travaux dans un article paru dans *Annalen der Chemie*, en 1862.

Heintz étudiait alors les produits de la réaction de l'ammoniaque et de l'acide chloroacétique. Il en identifia quatre, tous des dérivés de l'acide acétique: les acides hydroxyacétique, aminoacétique, iminodiacétique et nitrilotriacétique (NTA). Pendant 73 ans, aucun chimiste (pas plus que Heintz d'ailleurs) ne s'est douté de l'importance industrielle d'aucun de ces dérivés.

En 1935, F. Muntz qui travaillait pour la I.G. Farbenindustrie, à Mainkur en Allemagne, commença à étudier l'utilité possible des acides aminopolycarboxyliques comme le NTA dans les industries de la teinture et du textile. Quand Muntz répéta l'expérience de Heintz, il observa un phénomène inhabituel qui allait devenir d'une importance capitale pour les intérêts commerciaux de la I.G. Farbenindustrie. Muntz remarqua que quelque chose dans le mélange de réaction empêchait la précipitation des sels de calcium et de magnésium.

L'importance de cette observation réside dans le fait que les ions porteurs d'une charge double ou triple comme les ions de calcium, de magnésium, de fer et d'aluminium, empêchent

la coloration des tissus par la formation de précipités insolubles avec les agents de teinture. Si ces ions ou d'autres ions métalliques se retrouvent en concentrations importantes dans les bains de teinture, la coloration peut être inégale et inattendue. Obéissant au dicton qui prétend qu'il vaut mieux prévenir que guérir (ceci s'avérant être aussi vrai en chimie industrielle qu'en médecine), la Farbenindustrie était à la recherche de produits contre la précipitation.

Dès que Muntz eut découvert que le principal composé du mélange de réaction qui avait une affinité avec le calcium était le NTA, la Farbenindustrie obtint un brevet pour son utilisation dans l'industrie de la teinture et du textile. La production débuta en 1936 et, en 1937, le produit apparut sur le marché sous le nom de « Trilon A ».

Vers la même époque, la Farbenindustrie mit sur le marché un autre composé dont la structure chimique ressemblait à celle du NTA. D'abord appelé « Trilon B », il est maintenant plus connu sous le nom de EDTA ou acide éthylène-diamine-tétra-acétique. En raison de son coût de production inférieur et de son pouvoir complexant supérieur, l'EDTA éclipsa rapidement le NTA dans ses utilisations scientifiques et industrielles.

Le NTA et l'EDTA font partie d'une catégorie de substances chimiques appelées acides aminopolycarboxyliques. Ils sont semblables aux acides aminés qui constituent les protéines; leur importance primordiale réside dans le fait qu'ils peuvent complexer les ions métalliques dans l'eau. Ces complexes métalliques ressemblent à une main retenant une balle, la fonction amine du NTA correspondant au pouce; les groupements carboxyle, à trois doigts et l'ion métallique, à la balle.

La formation d'un complexe abaisse la concentration des ions métalliques libres en solution, empêchant leur participation dans d'autres réactions chimiques. Par exemple, le NTA et l'EDTA empêchent l'entartrage des chaudières (par le carbonate de calcium) ou des appareils de brassage de la bière (par l'oxalate de calcium). Ils peuvent aussi servir à dissoudre les précipités.



D'abord utilisé dans l'industrie de la teinture et du textile, l'EDTA fut employé dans la galvanoplastie, mise au point par H. Brintzinger, en Allemagne, vers le début de la Seconde Guerre mondiale. Peu après, Gerold Schwartzenbach de Zurich commença une série de travaux sur la structure et les propriétés des acides aminopolycarboxyliques. Depuis, l'EDTA a trouvé toute une gamme d'applications: agent d'adoucissement de l'eau; détartrage des chaudières; industrie des produits cosmétiques et pharmaceutiques; fabrication du caoutchouc, des polymères et des plastiques; tannerie; études de la nutrition des végétaux; photographie; agent de conservation des viandes; additif dans la nourriture et dans les boissons. Le rôle principal de l'EDTA dans ces différentes utilisations est de complexer les ions métalliques, empêchant ainsi la formation de précipités indésirables ou des réactions d'oxydation catalysées par ces ions.

Contrairement à l'EDTA, le NTA était demeuré un composé spécial à cause du coût de revient comparativement élevé par rapport à son pouvoir complexant. En 1959, la situation changea quand la Hampshire Chemical Corporation des États-Unis, appelée à devenir une division de W.R. Grace & Co., mit au point un procédé qui réduisit le coût de fabrication et augmenta la pureté du NTA. Sa première utilisation commerciale fut comme agent d'adoucissement et de conditionnement de l'eau.

Quand, en 1966, l'agrandissement des installations de la Hampshire Chemical accrut le pouvoir de production du NTA aux États-Unis, on étudia d'autres possibilités, comme remplacer le triphosphate de sodium (TPS) dans les détergents. En quantités industrielles, le NTA revenait plus cher que le TPS, soit de \$0.12 à \$0.14 comparativement à \$0.08 la livre (en monnaie américaine) mais, par unité de poids, il était de 1,4 à 1,8 fois plus efficace que le TPS pour adoucir l'eau. Du point de vue industriel, la différence de coût favorisait encore le TPS, mais on ne pouvait savoir à combien s'élèverait le coût total pour l'écosystème, compte tenu de tous les facteurs humains et naturels.

L'une des premières compagnies à employer le NTA comme agent d'adoucissement et de neutralisation associé aux détergents fut Procter & Gamble. Cet événement n'a rien d'accidentel. Il illustre un principe qui est aussi vrai dans l'industrie que dans la vie: dès qu'un nouveau produit connaît le succès, on cherche à le substituer par d'autres produits plus efficaces.

En 1947, Procter & Gamble mit sur le marché le produit « Tide » qui reçut un accueil extraordinaire de la part des consommateurs. Le secret de « Tide » était la combinaison d'un surfactif synthétique avec le TPS. On produisait industriellement ces deux composés depuis les années 30 mais à des fins différentes. Les chimistes de Procter & Gamble découvrirent que leur union donnait un super-détergent. Lors de la création de « Tide », on ne disposait pas de TPS en quantités suffisantes. Il fallut construire de nouvelles fabriques et faire de nombreuses dépenses avant que le produit ne devienne une réalité commerciale. Tout en misant sur le succès énorme de « Tide », la compagnie continua à chercher de nouvelles formules améliorées.

Lorsque la controverse sur les phosphates survint en 1969 et 1970, Procter & Gamble avait déjà préparé quelques centaines de composés pouvant remplacer le TPS comme agent d'adoucissement et de neutralisation. Chacun de ces produits, seul ou combiné avec d'autres ingrédients des détergents, devait subir des essais de présélection conçus pour répondre à quatre exigences fondamentales: l'amélioration du pouvoir nettoyant; la protection des tissus et des machines à laver; une utilisation domestique sûre et l'absence de danger pour la santé; enfin, un effet non dommageable sur l'environnement. Même si aucun des produits ne réussit à répondre à tous les critères comme l'avait fait le TPS, un d'entre eux se distingua des autres: c'était le NTA.

Au printemps 1970, d'après les renseignements fournis par Procter & Gamble devant le sous-comité sur la pollution de l'air et de l'eau présidé par le sénateur Edmund Muskie, il ressortit que la compagnie travaillait sur le NTA depuis 1961, un an avant que la Hampshire Chemical Corporation n'obtienne son brevet.

De plus, Procter & Gamble déclara au sous-comité qu'entre 1965 et 1969, elle avait investi plus de \$11 000 000 dans la mise au point et les essais de produits de remplacement du TPS. Pour l'année 1970, elle estimait le budget consacré à cette fin à \$3 500 000.

En dépit du fait que Procter & Gamble, plus que toute autre entreprise, possédait une grande masse d'information sur toutes les caractéristiques du NTA, elle ne fut pas la première à lancer un produit détersif qui en contenait. Cet honneur ou ce déshonneur, tout dépend de la façon dont on voit les choses, revient à A.B. Helios de Suède qui, en 1967, mettait sur le marché des détergents contenant du NTA en remplacement partiel du TPS.

Dans quelle mesure A.B. Helios avait-il éprouvé l'innocuité du NTA pour la santé et l'environnement? On l'ignore, mais ce devait sûrement être moins que Procter & Gamble. En 1970, grâce à une campagne publicitaire bien menée, à l'efficacité des produits et à la sensibilisation du public au problème des phosphates, les détergents contenant du NTA accaparaient 15 % du marché suédois.

Procter & Gamble a mis beaucoup de temps à étudier deux produits légèrement additionnés de NTA. Ce délai est principalement dû à la nature du NTA qui, même mélangé à d'autres ingrédients ou dilué, avait tendance à devenir plus collant que du sel dans une salière par une journée humide<sup>33</sup>. Le problème n'était pas insoluble, mais il occasionnait des difficultés au cours de la fabrication et de l'emballage. D'autre part, et cela poura surprendre plus d'un écologiste, la compagnie jugeait alors insuffisants les renseignements dont elle disposait sur les dangers du NTA pour l'environnement et la santé. Il lui fallait en savoir davantage, probablement parce qu'étant une grande entreprise, Procter & Gamble ne pouvait se permettre de faire preuve d'irresponsabilité.

33. Étant donné que le TPS se décompose sous l'action de l'eau (c'est-à-dire, qu'il s'hydrolyse), son utilisation est limitée aux détergents solides. Le NTA ne s'hydrolyse pas facilement et peut être employé dans les produits liquides.

Dans les annales de l'histoire des détergents, on parlera de l'année 1970 comme étant celle du NTA puisqu'elle dura de février à décembre. À la suite de la controverse que l'utilisation de ce produit a suscitée et de l'attention que lui ont accordée les plus hauts échelons des gouvernements américain, suédois et canadien, il est probable qu'on n'entende plus jamais parler du NTA. Le cas du NTA est particulièrement intéressant car, plus que pour tout autre produit chimique synthétique, on en a étudié les effets sur la santé et l'environnement. Une analyse de la façon dont la question était perçue en 1970 par les gouvernements, l'industrie et le public montre combien l'opinion sur l'environnement avait changé depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale.

Cette année-là, vers la fin de janvier et le début de février, il y avait eu les audiences de la Commission mixte internationale sur la pollution des lacs Érié et Ontario. Ceux qui assistèrent aux six séances, constatèrent qu'il était inutile d'attendre la parution du rapport final de la Commission pour connaître ses recommandations. D'après les déclarations faites par les représentants des deux gouvernements, il semblait que le Canada, les États-Unis et la Commission exigeraient dans un très court délai, sinon pour la fin de 1972, une teneur nulle en phosphates dans les détergents. Le Canada annonça qu'il adopterait, dans les six mois à venir, un règlement provisoire sur les phosphates détersifs.

Avant même que les représentants des gouvernements et de l'industrie aient le temps de rentrer chez eux, leurs dirigeants respectifs avaient pris des mesures en vue des étapes à venir. Reconnaissant enfin que les règles du jeu avaient changé, certains fabricants se mirent au travail afin de s'adapter aux nouvelles conditions. Parmi les produits de remplacement, on retrouvait le NTA, l'acide citrique, les polycarboxylates, les carbonates et les silicates. Prévoyant que le NTA pourrait devenir un produit chimique important, les chercheurs du gouvernement préparèrent immédiatement une évaluation globale de ses effets sur l'environnement.

Consciente des variations de composition des différents produits chimiques qu'elle fabriquait, l'industrie fournit une tonne de NTA provenant de diverses sources pour servir aux nombreuses expériences scientifiques. Cette quantité fut mélangée et subdivisée en paquets par un organisme gouvernemental américain, pour être ensuite distribuée à différents organismes canadiens, suédois et américains.

Les plans élaborés par les gouvernements recommandaient un ensemble diversifié de tests étudiant l'action du NTA sur le poisson et les autres formes de vie aquatique; la photosynthèse et la reproduction des algues; la libération de métaux lourds par les sédiments; les méthodes de traitement des eaux usées; le comportement global des écosystèmes d'eau douce; le transport des ions métalliques dans les eaux souterraines; les sols et, enfin, la santé.

De plus, on fit des études sur la vitesse de décomposition de la molécule de NTA, dans diverses conditions naturelles; les périodes d'adaptation des micro-organismes avant de métaboliser le NTA; la résistance des divers complexes NTA-métaux lourds dans différentes conditions.

L'un des incidents les plus amusants, quoique frustrant, survenus au cours de ces études, fut la ruine complète par une population locale de rats musqués d'une expérience à long terme utilisant vingt enclos flottants en plastique, sur le lac Clear au Manitoba. Robert D. Hamilton, alors en charge de l'étude du NTA par l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada (faisant maintenant partie du Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement) ne put le croire quand il apprit la nouvelle. Ayant foui dans les flotteurs du radeau qui supportait les tubes expérimentaux, une famille de rats musqués avait trouvé que le styromousse répondait à leurs besoins en matériau de construction. Il était facile à mâcher et très calorifuge. Les rongeurs étaient plus que réjouis de cette amélioration de leurs conditions de vie.

Un jour, quand l'équipe de recherche se rendit sur les lieux pour prélever ses échantillons hebdomadaires dans les tubes,

elle trouva tout en désordre. En jouant sur le radeau, certains rats musqués étaient tombés dans les tubes ouverts et ils en avaient gratté et mordu les minces parois pour s'échapper. Tous les enclos étaient brisés. Pour couronner le tout, les rats avaient rompu les quatre lignes d'amarrage des flotteurs, faisant ainsi dériver le radeau sur le lac. En constatant les dégâts, Hamilton ne put s'empêcher de penser au magnifique manteau de \$50 000 qu'il aurait pu tirer de la fourrure de ces animaux, soit l'équivalent des dommages qu'ils avaient causés.

Au début de 1970, l'une des lacunes les plus importantes concernant le NTA était l'absence de méthodes d'analyse sensibles, spécifiques, précises et utilisables dans la nature. La seule méthode dont on disposait était fondée sur la capacité du NTA de former des complexes avec les ions métalliques. Dans les sols naturels, les sédiments et l'eau, il existe plusieurs agents naturels qui peuvent former des complexes et, dans les conditions normales d'analyse, il était impossible de les distinguer du NTA.

Heureusement, avant que la plupart des études débutent, Peter Goulden et B.K. Afghan de la Direction de la qualité des eaux, Environnement Canada, mirent au point une méthode polarographique sensible et spécifique. En l'espace de quelques mois, on put compter sur d'autres méthodes qui reposaient sur la chromatographie en phase gazeuse des dérivés du NTA. Sans ces méthodes, plusieurs questions d'importance majeure seraient demeurées sans réponse. Au début de 1970, la méthode employée n'était pas spécifique; elle ne servait que pour les concentrations en NTA supérieures à 0,2 mg/l d'eau. À la fin de la même année, les méthodes mises au point permettaient la détection du NTA en concentrations de 0,01 à 0,02 mg/l d'eau. Les méthodes actuelles peuvent déceler aussi peu que 0,001 mg/l de NTA dans l'eau.

Alors que les chercheurs des divers organismes gouvernementaux, des industries et des universités mettaient au point des tests pour déterminer dans quelle mesure le NTA était acceptable pour l'environnement, de nouveaux produits étiquetés

« sans phosphates » faisaient leur apparition dans les supermarchés. Personne ne pouvait dire ce que ces produits contenaient car, à ce moment-là, il n'y avait pas de loi réglementant l'étiquetage, ni au Canada, ni aux États-Unis. Quelques-uns contenaient du NTA, d'autres du borax et du carbonate de sodium (agents d'adoucissement utilisés autrefois), à la place du TPS. Une analyse chimique dévoila qu'un de ces produits contenait 50 % de sel ordinaire servant uniquement à augmenter le poids du produit en fonction du prix exigé.

Les rapports du comité Reuss et de la Commission mixte internationale parurent au début du printemps 1970 et recommandèrent l'élimination des phosphates des détergents pour 1972. Procter & Gamble les devança en faisant paraître une page publicitaire complète dans plusieurs grands journaux canadiens et américains où la compagnie déclarait qu'elle était prête à collaborer. Ne mentionnant aucune preuve du rapport entre les phosphates et l'eutrophisation due aux activités humaines, elle appuyait néanmoins sa publicité sur la possibilité d'un tel lien. Procter & Gamble devait bientôt mettre sur le marché un produit dont 25 % du TPS avaient été remplacés par du NTA.

D'autres fabricants présentèrent aussi des produits et des emballages nouveaux. De petites compagnies connurent leur heure de gloire grâce à une publicité tapageuse, alors que d'autres plus importantes se voyaient dans l'obligation de s'excuser de mettre sur le marché des produits qui, quoique bons, étaient considérés comme étant inférieurs aux précédents. Des compagnies dont on n'avait jamais entendu parler auparavant se mirent également de la partie. Il courait même des bruits à l'effet que la mafia se mêlait de l'affaire. Pendant quelque temps, il sembla que l'intérêt général se centrait sur l'environnement (comme en témoignent certains noms de produits: « Concern », « Ecolo-G » et « Un-Polluter »). De nouveaux produits remplaçant le TPS, dont le NTA, pénétraient graduellement dans la nature.

À mesure que l'année du NTA avançait, les raisons pour lesquelles on attachait de l'importance à ce dernier comme nouvel agent d'adoucissement et de neutralisation devenaient plus

évidentes. Dans un témoignage fait en mai au sous-comité Muskie sur la pollution de l'air et de l'eau (du comité sénatorial sur les travaux publics), William C. Krumrei de Procter & Gamble révéla l'ampleur des tests subis par le NTA en rapport avec la sécurité de l'Homme et de l'environnement. La possibilité d'interactions avec d'autres composés rendit nécessaires une foule d'essais, non seulement avec le sel trisodique de NTA (la formule probable du NTA dans les mélanges détersifs) mais aussi avec d'autres composés du NTA susceptibles d'être utilisés dans les détergents. La liste des essais effectués par la compagnie à l'égard de l'Homme est reproduite plus bas à partir du témoignage de William C. Krumrei. Elle montre quelques-uns des nombreux critères auxquels doit répondre de nos jours une compagnie responsable avant de lancer un produit sur le marché. L'étude de la toxicité chronique après absorption portait sur trois concentrations de NTA dans la nourriture donnée à des rats pendant deux ans.

William C. Krumrei mentionnait entre autres des études d'usage sur les réactions des animaux (toxicité orale aiguë, action émétique, irritation des yeux, toxicité par voie cutanée); des études des effets sur la peau humaine (essais de sensibilisation; essais en laboratoire sur la peau, essais cliniques sur la douceur et sur les couches de bébé); des études du métabolisme; des études sur la reproduction et des études embryogéniques; des études de la toxicité subaiguë après absorption (excrétion de minéraux, manifestations de toxicité); une étude de la toxicité chronique après absorption; une évaluation des concentrations maximales de NTA des détergents ingérées par l'être humain (quantités résiduelles provenant des ustensiles de cuisine et de l'eau potable); une détermination des facteurs de sécurité (toxicité chronique, tératogénèse); l'apport possible du NTA à l'augmentation des concentrations en nitrates; des études d'inhalation; des essais sur le pouvoir cancérigène; des essais sur le pouvoir mutagène; des études enzymologiques. De plus, Procter & Gamble avait fait suffisamment de tests pour s'assurer que le NTA était biodégradable (au cours du traitement des eaux usées et dans l'environnement) et qu'il ne constituait pas un risque



pour la santé ou l'environnement, à un taux de remplacement de 25 % du TPS. Dans un communiqué émis en mai 1970, la compagnie déclarait qu'afin d'atteindre ce taux de remplacement du TPS, elle avait commandé du NTA pour un montant de \$167 000 000. De plus, elle avait investi \$6 800 000 afin de modifier des installations déjà existantes.

Le docteur Samuel S. Epstein de la Children's Cancer Research Foundation Inc. et de la Harvard Medical School témoigna également devant le sous-comité Muskie en mai 1970. Docteur Epstein souleva plusieurs questions au sujet du NTA. L'une avait trait à l'apport possible du NTA à l'augmentation des concentrations de nitrates dans l'eau. (Les nitrates et les nitrites interviennent dans la méthémoglobinémie, affection où le pouvoir de transport de l'oxygène par le sang est réduit à cause de l'inactivation de l'hémoglobine par les nitrites. Les enfants y sont particulièrement exposés.) Il releva de plus la possibilité que les produits de transformation du NTA soient des agents cancérogènes, tératogènes (causant des défauts congénitaux) ou mutagènes (provoquant des mutations dans le noyau cellulaire). Enfin, le NTA favorisait peut-être la diffusion des métaux lourds ou augmentait leur pouvoir toxique sur l'Homme.

Pourtant, à l'encontre de cette dernière hypothèse, on avait suggéré d'utiliser le NTA afin de réduire la toxicité chez les poissons par des métaux tels que le zinc et le cuivre. John Sprague, qui travaillait à la station biologique de St. Andrews, de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada (faisant maintenant partie du Service des pêches et de la mer, Ministère des Pêches et de l'Environnement), avait démontré que le NTA protégeait le saumon de l'Atlantique et d'autres poissons contre les effets toxiques de ces métaux libérés à la suite de l'exploitation minière<sup>34</sup>. Pour le poisson, le NTA était apparemment bon, mais était-ce le cas pour les êtres humains?

---

34. L'objet de ces premières études du NTA était la protection du poisson. Le choix des ingrédients des mélanges détersifs devrait se faire à partir de leurs bienfaits possibles pour l'environnement.

Vers la fin de l'été 1970, on commença à préparer une réunion à huis clos pour les chercheurs des gouvernements du Canada, de la Suède et des États-Unis afin d'évaluer les aspects positifs du NTA pour l'environnement. La réunion était prévue pour les 8, 9 et 10 décembre 1970, au Centre canadien des eaux intérieures à Burlington (Ontario).

À la veille de la réunion, on pouvait pressentir que quelque chose allait se produire. Le lendemain, Dale Chernoff et Diane Courtney, deux chercheurs de l'U.S. National Institute of Environmental Health Science (NIEHS) présentèrent des résultats qui montraient que le NTA avait augmenté la toxicité et le pouvoir tératogène du cadmium et du méthyl-mercure administrés à des rats et à des souris.

La question était de savoir si les expériences correspondaient à une utilisation domestique normale des détergents au NTA. Les expériences sur le cadmium avaient été faites en injectant des solutions à des cobayes, en concentrations fortes. De plus, on avait fait varier de façon non systématique quelques composés soi-disant inertes des substances à l'essai, ce qui infirmait certaines conclusions des chercheurs. Ces derniers eux-mêmes ignoraient dans quelle mesure les résultats correspondaient à la réalité. Bref, les expériences avaient été mal conçues et leurs résultats n'étaient pas pertinents à l'utilisation prévue du NTA.

Après la présentation de résultats obtenus par d'autres chercheurs qui ne condamnaient pas le NTA, la plupart des scientifiques présents en vinrent à penser que l'usage de ce produit serait interdit jusqu'à ce que les résultats du rapport du NIEHS soient correctement interprétés. On devait faire connaître ce rapport à cause de son importance possible. Mais le temps manquait pour se documenter et étudier la question sous tous ses angles et on ne pouvait, officiellement, que s'opposer au NTA. D'un autre côté, cela risquait de nuire de façon irrémédiable au NTA. À toutes fins pratiques, il valait peut-être mieux enterrer toute la question, plus pour des motifs psychologiques que par égard pour l'environnement ou la santé.

Dans la perspective d'une politique sans risque, il n'y avait qu'une seule solution: arrêter l'utilisation du NTA jusqu'à ce que l'aspect sanitaire de la question soit mieux défini. Ce fut du moins l'attitude du gouvernement américain. Nous verrons plus tard que le Canada et la Suède en adoptèrent une toute différente.

Après la réunion de Burlington, les événements se précipitèrent à Washington. Le mercredi 16 décembre, à la suite de discussions au sommet, une note était expédiée aux fabricants de détergents et de savons. On y invitait simplement les représentants des différentes compagnies, le jeudi 17 décembre à 16 heures, à une réunion où une décision importante serait prise au sujet du NTA.

À l'heure fixée, le *Surgeon General* et l'Administrateur de l'U.S. Environmental Protection Agency (EPA) faisaient part des résultats obtenus par Chernoff et Courtney aux manufacturiers. Sans prendre le temps de les analyser, les trois plus gros fabricants acceptaient de cesser toute production de détergents à base de NTA. Ils furent surpris d'apprendre que les fonctionnaires du gouvernement américain avaient discuté des résultats avec des chercheurs d'autres pays avant de les leur révéler.

Le 18 décembre 1970, le *Surgeon General* et l'Administrateur de l'EPA déclaraient conjointement qu'ils approuvaient les mesures prises par les fabricants, en attendant la tenue d'autres essais et analyses<sup>35</sup>.

Dans certains secteurs de l'industrie, cette déclaration eut des répercussions jusqu'en 1972 et même davantage. Ceux qui ont été touchés se rappellent encore des vives réactions qu'elle a suscitées et des pressions exercées par le gouvernement. La production du NTA de la Hampshire Chemical et de la Monsanto cessa avant même que les représentants de compagnies ne reviennent de Washington. Les ventes des détergents sans phosphates et sans NTA commencèrent à grimper. Il en coûta d'énormes montants à certaines entreprises. Il paraîtrait que Procter &

35. Si le TPS avait subi autant de tests que le NTA, il n'aurait probablement pas survécu à tous les essais de présélection.

Gamble résilia des contrats l'engageant à l'achat de NTA pour une somme de \$7 100 000.

Puisque le gouvernement fédéral américain s'abstenait de passer un règlement officiel pour limiter la teneur en phosphates dans les détergents, les états et les municipalités en prirent l'initiative. Les états de New York et de l'Indiana adoptèrent des règlements semblables à ceux du Canada et, en 1972, des projets de loi attendaient d'être votés en d'autres parties du pays. Le 15 septembre 1971, Russell Train, chef du Council on Environmental Quality et Charles C. Edwards, chef du Food and Drug Administration se joignirent à MM. Steinfeld et Ruckelshaus, respectivement *Surgeon General* et Administrateur de l'EPA pour une autre déclaration importante. Sans posséder de preuve précise et malgré la réfutation des travaux de Chernoff et Courtney, ils recommandèrent que le NTA ne soit pas utilisé dans les détergents, à cause de ses effets inconnus à long terme sur la santé et l'environnement. Tout en dénonçant l'utilisation accrue de détergents contenant des matières caustiques en remplacement des phosphates, ils conseillèrent aux états de réexaminer les politiques restreignant indûment l'utilisation des phosphates détersifs. On semblait donc approuver l'emploi des phosphates dans les détergents et préconiser leur élimination dans les installations municipales de traitement.

Un éditorial dans le *Toronto Globe and Mail* qualifia cette déclaration de véritable volte-face. Pour H.W. Poston, commissaire à la lutte pour la protection de l'environnement à Chicago, et Jerome Kretchmer, directeur de l'administration de l'environnement à New York, la manoeuvre fédérale constituait une subvention à l'industrie des détergents, à même l'argent des contribuables de ces deux villes.

La réaction du Canada, à la suite de la présentation du rapport de Chernoff et Courtney, trancha sur celle des États-Unis<sup>36</sup>. En effet, une équipe d'experts des Ministères de la San-

---

36. Le Canada avait déjà adopté un règlement en vertu de la loi sur les ressources en eau du Canada, limitant la teneur en phosphates dans les détergents à un maximum de 20 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (8,7 % de P) après le 1<sup>er</sup> août 1970. C'était la première fois qu'une telle mesure était prise en Amérique du Nord.

té nationale et du Bien-être social et de l'Environnement fut d'abord dépêchée au NIEHS, à Chapel Hill (Caroline du Nord), où l'on discuta en détail des résultats.

Puis, le 6 janvier 1971, une réunion de chercheurs du gouvernement eut lieu afin de discuter du fondement scientifique des recommandations à faire à Jack Davis, titulaire désigné du nouveau ministère canadien de l'Environnement. D'après les personnes présentes, les expériences de Chernoff et Courtney ne correspondaient pas à la réalité, le principe en était imparfait et les résultats des injections de NTA chez les cobayes, quoique intéressants, ne renseignaient guère sur l'utilisation de ce produit. Il y avait matière à aborder prudemment la question du NTA mais, d'après les spécialistes canadiens, ce n'était pas suffisant pour en interdire l'emploi<sup>37</sup>.

En fait, les scientifiques canadiens affirmaient qu'il n'existe pas de politique sans risque. Dans la vie, toute décision, même celle de s'abstenir de faire quelque chose, comporte un élément d'incertitude. Si, du point de vue de l'environnement et de la santé, une fraction de partie par million de NTA dans les eaux naturelles pouvait être dangereuse, la présence de quelques centaines de parties par million d'EDTA comme additif dans certains produits alimentaires semblait pire encore. Le groupe proposa de répéter les expériences de Chernoff et de Courtney, d'élargir leur portée et d'interpréter les résultats selon la réalité; d'étudier les répercussions possibles de l'EDTA comme additif dans la nourriture; de ne pas ignorer la question du NTA mais de s'abstenir de faire des recommandations, qu'elles soient pour ou contre son emploi.

Une fois informé, J. Davis fixa une réunion pour le 17 février 1971 avec les principaux manufacturiers canadiens liés de près ou de loin à l'industrie des savons et des détergents. Manifestant son intention d'annoncer une politique gouvernementale sur les

37. Au moment de la rédaction de ce livre, aucun gouvernement n'avait interdit ou restreint l'utilisation du NTA. Les mesures américaines forçaient simplement les trois principaux fabricants de détergents à arrêter la mise en marché de détergents au NTA, jusqu'à ce qu'on ait complété d'autres essais concernant ses effets sur la santé.

concentrations maximales en phosphates dans les détergents, il demanda aux industriels d'exprimer leur opinion à ce sujet, soit lors de la réunion, soit par écrit. Les représentants de l'industrie firent les deux. Tel qu'é convenu, le ministre désigné traita de façon confidentielle les différentes vues exposées.

Le 8 avril 1971, J. Davis fit paraître un communiqué indiquant que les concentrations maximales de phosphates permises dans les détergents, fixées à 20 % de  $P_2O_5$  (8,7 % de P) depuis le 1<sup>er</sup> août 1970, seraient de 5 % de  $P_2O_5$  (2,2 % de P) à compter du 31 décembre 1972. Malgré les demandes pressantes de différents secteurs de l'industrie, il n'aborda pas la question du NTA. Après avoir examiné de nouvelles données et tenu une autre réunion avec les représentants de l'industrie le 11 mai 1972, J. Davis réaffirma sa position et, le 1<sup>er</sup> janvier 1973, le règlement entrait en vigueur.

Qu'advient-il alors du NTA? Cela relève désormais des spécialistes et du public. Jusqu'à maintenant je n'ai rien observé qui me permette de croire que le NTA ou ses métabolites peuvent causer des mutations, le cancer, des malformations de l'embryon ou augmenter la toxicité des métaux lourds plus que le TPS, dans les mêmes conditions. Certains effets nocifs pourraient se manifester, mais le NTA a subi plus d'examen que la plupart des composés synthétiques utilisés présentement. Finalement, on ne peut qu'exercer une surveillance étroite au fur et à mesure que l'utilisation du NTA se répandra. Cette forme de contrôle a débuté en Suède, en 1967 et au Canada, en 1970.

Dans un rapport daté du 1<sup>er</sup> avril 1972, Arthur D. Little Inc. énumérait les concentrations de NTA trouvées dans des échantillons d'eau de robinet de certaines communautés de Long Island (New York) et de certaines villes de l'Ontario. La moyenne des résultats se situait au-dessous de 0,025 mg/l (le niveau de détection), certaines eaux ayant une teneur située entre 0,025 et 0,10 mg/l. Ces valeurs correspondaient à celles qui avaient été prévues et étaient en deçà des limites tolérables du facteur de sécurité de 100. (Ce facteur suppose une absorption quotidienne pouvant être 100 fois supérieure à la quantité maximale

prévue, sans comporter de danger.) Le rapport concluait qu'il existait une probabilité très faible de danger pour la santé ou l'environnement, mais il conseillait le maintien d'un contrôle et des recherches.

En définitive, peut-être que les attitudes du Canada et des États-Unis étaient toutes deux sages. Une faible population et l'abondance de ses ressources en eau accordait plus de souplesse au Canada qu'aux États-Unis en ce qui a trait aux effets des produits chimiques sur l'environnement, particulièrement ceux des déchets véhiculés par l'eau. Les deux pays ont le même taux de production de déchets par habitant, mais les déversements dans le milieu se font dans la proportion de un pour le Canada contre dix pour les États-Unis. En 1970, relativement au NTA en remplacement du TPS, cela signifiait 50 millions kg au Canada contre 500 millions kg aux États-Unis. Si la population de ces deux pays devait doubler entre 1970 et 2010, l'accroissement du NTA au Canada serait seulement de 50 millions kg comparativement à 500 millions kg aux États-Unis.

L'étude du NTA nous fait déborder sur d'autres sujets intéressants. J'aimerais souligner ici les plus importants.

- 1) Avant 1960, tout représentant du gouvernement qui, sans preuves solides, aurait fait des déclarations contre un produit industriel important, aurait certainement connu des déboires politiques. En 1970, dans le cas du NTA du moins, c'est le contraire qui s'est passé. Dans tous les pays, on a eu la sagesse de se méfier d'un produit chimique qui, par la suite, aurait pu se révéler tératogène. Cette métamorphose des défenseurs inconditionnels du progrès en conservateurs de l'environnement est un signe de santé. Autrefois, l'Amérique du Nord devait se développer; maintenant il est temps d'adopter une attitude plus pondérée.
- 2) La société a besoin de gens comme le docteur Samuel S. Epstein qui a attiré l'attention sur les effets possibles de l'utilisation massive de produits chimiques synthétiques. Même si jusqu'en 1973, aucune de ses assertions

(à savoir que le NTA ou ses produits de décomposition sont mutagènes, tératogènes ou cancérogènes) ne s'est avérée exacte, elles ont contribué à nous laisser sur nos gardes. Qui sait, peut-être aura-t-il raison un jour? Quand on étudie en détail un produit chimique quelconque et ses répercussions sur l'écosystème, on est presque assuré de lui trouver quelque propriété dangereuse. Avant tout, nous devons apprendre à être plus minutieux dans nos analyses et à examiner de près les avantages en fonction des risques, en prenant soin de préciser les risques qu'on est prêt à endosser.

- 3) En définitive, l'élément le plus important de la biosphère est l'Homme qui, fondamentalement, ne change guère. Quand on parle des produits chimiques, on considère tout d'abord leurs effets sur l'être humain puis sur la propriété et, en dernier lieu, sur l'environnement naturel. Malgré tout, l'environnement est d'une importance capitale pour l'Homme. À mesure que ce dernier en comprendra les richesses, il sera appelé à les protéger aussi jalousement que sa propre personne.
- 4) Dans son livre *L'encerclement*<sup>38</sup>, Barry Commoner observe qu'entre 1945 et 1970, les techniques ont plus contribué à la pollution que l'accroissement de la population ou du niveau de vie. Pour illustrer cette affirmation, il cite les utilisations suivantes: le mercure dans les fabriques de chlore, les bouteilles non consignées, l'azote dans les engrais, les détergents et les plastiques. Le NTA entre dans cette catégorie de nouveaux produits de l'évolution technologique. Dans les déclarations faites aux représentants du gouvernement américain, on a dit que les quantités totales de NTA en jeu avaient grandement influé sur les décisions prises. Les hauts fonctionnaires du gouvernement auraient dû les multiplier par 100 et relier les résultats obtenus à l'effet démographique.

---

38. Voir Commoner (1972).



- 5) Nous devons toujours tenir compte du facteur de croissance démographique quand nous avons affaire à des produits chimiques aussi importants que le NTA<sup>39</sup>. Aux États-Unis, le remplacement du TPS par le NTA a mis en cause environ 500 millions kg de NTA. Cela touchait 211 millions de personnes vivant dans une civilisation de technique avancée et mue par les combustibles fossiles. Si une décision semblable avait été prise en 1870, elle n'en aurait touché que 40 millions, vivant encore à l'époque du cheval. Ceci nous fait penser à la différence qui existe entre prendre un même virage à 10 km/h en voiture et à 100 km/h, à bord d'un camion de 20 tonnes. Les États-Unis ont perdu beaucoup de souplesse dans la prise de telles décisions, non seulement à cause de leur progrès technique mais aussi du rapport démographique qu'ils connaissent.
- 6) On doit établir une réglementation concernant les nouveaux produits chimiques afin de protéger l'écosystème. Cela comprendrait la description des différents tests auxquels une industrie aurait à soumettre ses produits avant que le gouvernement en autorise l'emploi. Il existe des normes pour les drogues, les médicaments et les additifs dans les aliments. Nous en avons maintenant besoin pour les produits chimiques qui ont un effet sur l'environnement. À propos du NTA, on peut retenir qu'une méthode sensible et spécifique d'analyse en milieu naturel doit servir de base à tout plan d'action ayant trait à l'écosystème.

---

39. Dans la version originale, l'auteur introduit deux néologismes (*demophora* et *demophoric*) qui traduisent l'effet des facteurs démographiques avec le degré d'achèvement technique atteint par une société, c'est-à-dire le rapport entre la production et la consommation. En français, on utilise parfois l'expression « combinaison population-machine » pour rendre compte de cette notion. Selon l'auteur, « explosion démographique » décrirait plus adéquatement le phénomène qui a lieu depuis 200 ans que les expressions « explosion démographique » et « révolution technologique » prises séparément. Voir Vallentyne (1972).

- 7) Il en coûte cher pour obtenir de nombreuses données avant l'approbation préliminaire d'un produit chimique dangereux pour l'environnement (de 1 à 10 millions de dollars par produit). Il faudrait recourir à une certaine forme de collaboration internationale. Tel n'est pas le cas des accords actuels (1974).
- 8) Grâce à des controverses comme celles des phosphates et du NTA, les citoyens en viendront à comprendre que les spécialistes et les scientifiques ont pour rôle de fournir de l'information, non de porter des jugements à la place du public ou d'être les gardiens de la morale. Peu important les faits, les opinions et les interprétations de spécialistes n'appartiennent qu'à ces derniers. Les citoyens et les spécialistes des autres domaines doivent se rendre compte que s'ils s'en remettent totalement à un spécialiste, celui-ci fera nécessairement valoir son point de vue.
- 9) Notre obsession de la propreté, du rendement et de la rentabilité nous porte à penser que, lorsqu'une bonne chose disparaît elle doit être remplacée par une autre aussi bonne. Avec le NTA, les gouvernements s'apercevront peut-être que cela n'est pas toujours vrai, spécialement dans un pays ou une région où le rapport démographique est important. On peut être appelé à utiliser plus d'un produit en remplacement du TPS. La diversification des déchets peut se révéler aussi primordiale pour la santé de l'environnement que la diversification de la production peut l'être pour la stabilité de l'économie à l'échelle d'un pays ou d'une entreprise<sup>40</sup>. Au cours des années 60, l'industrie des savons et des détergents n'avait pas beaucoup de solutions à apporter au problème du TPS. Elle était alors aussi exposée qu'un pays dont la survie aurait reposé entièrement sur la culture et l'exportation d'une seule denrée.

---

40. Pour les spécialistes canadiens de l'environnement, cela revient à ne pas mettre tous ses oeufs dans le même panier.

On pourrait penser que le scepticisme manifesté par les gouvernements au sujet du NTA en 1970 était le début d'une ère nouvelle caractérisée par un jugement pondéré à l'égard des produits de notre civilisation.

Rien ne saurait être plus éloigné de la vérité. Le NTA n'a défrayé l'actualité que comme bombe politique. D'autres produits chimiques synthétiques continuent à être employés quotidiennement. Leurs conséquences à long terme sont peu connues, ou connues mais ignorées comme celles du chlore des piscines sur les yeux des enfants, de l'EDTA (un additif communément employé dans les aliments) sur la santé, des cosmétiques sur la peau, des drogues sur le cerveau et de l'alcool sur l'organisme.

En 1971, tandis que les recherches se poursuivaient sur les effets nocifs possibles du NTA et que les fonctionnaires du gouvernement américain exprimaient leur inquiétude face à l'emploi dans les détergents de certains produits caustiques en remplacement du TPS, un autre produit de notre civilisation était responsable de 56 000 décès, 250 000 blessures graves et 2 000 000 de blessures légères dans ce pays. Il s'agit de l'automobile qui est mortelle, surtout lorsque combinée à la jeunesse et à l'alcool. Il n'était cependant pas question de la condamner. Nous pouvons nous passer plus facilement des phosphates ou du DDT que de l'automobile.



## CHAPITRE 9

### Symptômes ou éléments de solutions?

L'eutrophisation, signe manifeste que notre instinct de conservation menace nos chances de survie.

La biographie la plus détaillée, quoique la plus romancée, de Faust, dit Johannes Faustus, Georg Faust et Georg Sabellicus, se trouve dans *Historia von Johann Fausten* publié par Johann Spies en 1587, une cinquantaine d'années après la mort du nécromancien. S'appuyant sur des documents que lui aurait fournis le serviteur de Faust, un dénommé Wagner, l'auteur raconte comment, après avoir obtenu un diplôme en théologie de l'Université de Heidelberg, Faust fut convaincu par Méphistophélès, de fuir Dieu et de se consacrer au mal. Par un billet écrit et signé de sang, Faust consentit à donner son corps et son âme au Diable après 24 ans, à condition que celui-ci et Méphistophélès exaucent tous ses désirs, comme ils en avaient fait le serment<sup>41</sup>.

Immortalisé plus tard par les écrits de Marlowe et de Goethe, Faust symbolise dans le monde occidental l'être humain assoiffé de pouvoir et de connaissances mais qui reste impuissant à saisir l'absolu. De fait, Faust n'a jamais résolu de problèmes; il n'a fait que les remplacer par d'autres.

Dans un article intitulé « Faustian Power and Human Choices », deux futurologues, Herman Kahn et Anthony J. Wiener exposent quelques-uns des problèmes auxquels l'humanité aurait à faire face entre 1970 et 2040<sup>42</sup>. Ils proposent d'étranges

---

41. Voir Bates (1969).

42. Voir Kahn et Wiener (1968).

visions de l'avenir: hibernation de l'homme, travaux de terrassement à l'échelle de la planète, manipulations génétiques, détermination du sexe des enfants avant la conception, stimulation électronique des centres du plaisir dans le cerveau, narcissisme outré, etc.

Une autre de ces prédictions est passée plutôt inaperçue: elle affirme que la production *accrue* de denrées alimentaires pourrait constituer un problème majeur. En effet, disent ces prophètes modernes, la disparition du spectre de la famine dans certains pays pourrait réduire à néant toute tentative sérieuse de limiter les naissances. Cela aurait pour effet de rendre inutiles les mesures destinées à améliorer l'instruction et les conditions économiques, tant que la stabilité démographique n'aurait pas été atteinte. Si aucun effort n'est fait pour employer de façon constructive la main-d'oeuvre supplémentaire, il surviendra un désastre politique, social et économique.

Pour les auteurs de l'article, cette situation de surpopulation où l'on retrouve des ventres pleins plutôt que vides est l'inverse du problème malthusien. Contrairement à la famine qui règle le problème de la surpopulation, l'accroissement des réserves alimentaires ne fait que l'aggraver. Or, au cours du XX<sup>e</sup> siècle, l'application de techniques modernes à l'agriculture a précisément eu pour effet d'augmenter la production de nourriture. Grâce aux combustibles fossiles, un cultivateur américain nourrit maintenant plus de 40 personnes, tandis qu'il y a 100 ans il ne répondait qu'aux besoins alimentaires de 4 personnes; en 1972, de nouvelles variétés de céréales permettaient à l'Inde de subvenir à ses besoins.

---

L'analyse des causes de l'eutrophisation liée aux activités humaines nous confirme la ressemblance de l'Homme avec le personnage de Faust. Ce phénomène nous apparaît dès lors comme étant la preuve de problèmes non résolus. À l'instar de Faust, nous n'avons fait que les remplacer par d'autres, car nous sommes incapables de distinguer les symptômes de la ma-

ladié. Ce n'est que maintenant, au dénouement du drame, que nous commençons à saisir le sens de l'engagement auquel nous avons étourdiment lié le sort de notre espèce.

En traitant de l'eutrophisation liée aux activités humaines, nous avons insisté sur l'apport des éléments nutritifs dans l'eau et les transformations biologiques qui ont eu lieu dans les lacs. Les composés phosphorés et azotés ont été identifiés comme étant la cause de l'eutrophisation et l'élimination du phosphore, comme étant la clé de la lutte contre ce phénomène. S'en tenir à cela ne serait pas faux, mais incomplet.

Si nous voulons approfondir l'étude du problème, il nous faut examiner les forces qui agissent sur le comportement des sociétés humaines et qui influent indirectement sur la forme et l'ampleur de la circulation des éléments nutritifs. Il serait absurde de prétendre comprendre le phénomène de l'eutrophisation sans la connaissance détaillée de ces forces et de leur mode d'action. Nous n'ignorons pas que l'interprétation de ces analyses est parsemée de difficultés et d'incertitudes. Même en connaissant les causes physiques, on ne peut en général que conjecturer sur les motivations humaines qui leur ont donné naissance. Malgré tout, nous nous devons de savoir, sinon notre avenir en tant qu'individus ou même en tant que civilisation techniquement avancée sera menacé.

Dans cette perspective, il nous faut remonter à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle alors qu'on introduisait l'usage courant des égouts. Ces derniers furent la cause première de l'eutrophisation car ils accrurent l'apport des éléments nutritifs dans l'eau. La figure 4 montre les changements apportés au cycle des éléments nutritifs dans la nature.

Nous avons vu au Chapitre 2 que l'installation d'égouts a eu quatre conséquences directes: 1<sup>o</sup> l'accroissement de la pollution de l'eau par les excréments humains à cause de la non-utilisation du sol comme agent d'épuration; 2<sup>o</sup> une production accrue de fertilisants pour remplacer les éléments nutritifs extraits du sol à la récolte, absorbés par l'être humain et excrétés par lui pour aboutir à la mer et dans les sédiments; 3<sup>o</sup> l'accroisse-

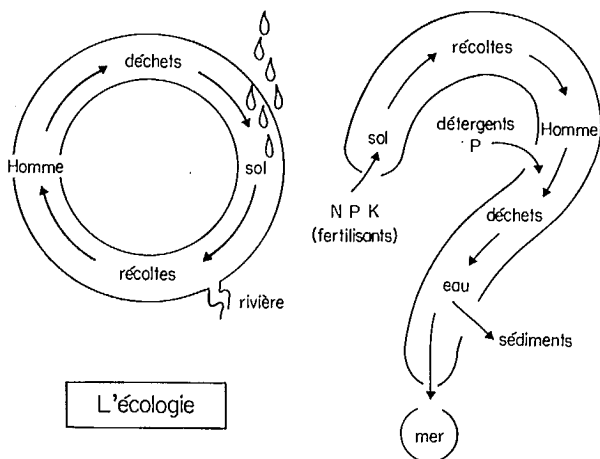


Fig. 4 Cycles des éléments nutritifs: à gauche, cycle d'autre-fois; à droite, situation présente.

ment des coûts du traitement des déchets constitués à 99,99 % d'eau; 4° l'eutrophisation. L'apparition sur le marché des machines à laver automatiques et des détergents phosphatés, au lendemain de la Seconde Guerre mondiale, a eu pour effet de doubler l'apport annuel de phosphates dans les eaux usées, ajoutant ainsi au problème de l'eutrophisation. Actuellement, on produit et on utilise beaucoup de fertilisants phosphatés et azotés, mais ceux qui sont sensibles au phénomène de l'eutrophisation savent que ce n'est pas là une solution.

Connaissant tous ces inconvénients, il reste à se demander si le jeu en vaut la chandelle au point de vue économique. La réponse est évidente: les égouts doivent améliorer la santé publique, peu importe le prix.

Pour comprendre à quel point l'amélioration des conditions d'hygiène était nécessaire au XIX<sup>e</sup> siècle, il faut connaître ce qu'était la situation d'alors, surtout dans les régions fortement peuplées. Les taux de mortalité infantile dans les villes d'Europe et d'Amérique du Nord étaient généralement le double de ceux



des régions rurales et étaient de 10 à 20 fois plus élevés que ceux d'aujourd'hui. Dans les grosses villes, un enfant sur quatre mourait avant d'atteindre l'âge d'un an. Parmi les trois autres, un devait mourir avant l'âge de 5 ans. Quant à ceux qui survivaient avec des incapacités physiques ou une santé débile, ils auraient peut-être mieux fait de mourir.

Deux passages traduits du livre de Henry Jephson, *The Sanitary Evolution of London*, nous rappelleront les conditions de vie à Londres, capitale florissante de l'Empire britannique, vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle<sup>43</sup>. Jephson, membre du conseil civique de Londres, rapporte les paroles de J. Phillips qui, en 1847, comparaisait comme témoin devant la Commission des égouts de la Métropole:

« Dans l'accomplissement de mes fonctions, il m'est arrivé de visiter plusieurs endroits où la saleté était répandue dans les pièces, les caves, les caveaux et les cours; elle était si épaisse qu'il était presque impossible de s'y mouvoir. J'ai aussi vu des gens vivre et dormir dans des chambres remplies d'immondices provenant du débordement des fosses d'aisances, suintant au travers des murs et dégoulinant sur le plancher. Les effets des miasmes, des odeurs nauséabondes et des gaz toxiques qui se dégageaient de ces dépôts étaient visibles dans le comportement hagar et maladif, ainsi que dans les membres affaiblis des pauvres créatures qui vivaient dans ces lieux de pollution et de misère. »

En traitant de la médiocrité des services d'eau (tous fournis par des compagnies privées à cette époque), Jephson puisa abondamment dans des rapports inédits de différents responsables médicaux de la santé publique:

« De Shoreditch (1860), le responsable écrivait qu'il lui était rarement arrivé d'exposer un échantillon d'eau de source de cette ville à la chaleur d'une journée estivale sans observer, au bout de quelques heures, qu'elle devenait putride. À St. Giles (1858-1859), l'eau des puits n'était pas assez bonne, d'après les analyses, pour arroser les rues. À St. Marylebone, quarante-quatre puits publics fournissaient de l'eau qui, la plupart du temps, déplaisait au goût et à l'odorat. À Kensington, toutes les eaux de puits de la paroisse étaient impures. À Rotherhithe (1857), l'eau des puits à marée semblait sortir des égouts. Le responsable médical de

43. Voir Jephson (1907).

Lambeth (1856) déclarait que les eaux des puits peu profonds de Londres réunissaient les pires caractéristiques (. . .) elles sont le résultat du drainage d'un vaste lit de fumier.

« Les gens étaient réduits à employer l'eau de ces puits à cause du peu de service fourni par les différentes compagnies distributrices d'eau (. . .) un ravitaillement de moins d'une heure par jour, au moyen d'un seul tuyau, dans une cour où s'entassaient des centaines de personnes (. . .) à tous les deux ou trois jours et jamais le dimanche, journée où la demande était la plus forte; les propriétaires n'avaient pourvu leurs maisons d'aucune citerne ou réservoir de capacité convenable et les conseils de paroisse ne les avaient pas forcés à le faire.

« Dans certaines paroisses, des centaines de maisons n'avaient aucune prise d'eau. Dans les maisons qui en étaient pourvues, les occupants ne pouvaient guère s'en servir car le propriétaire n'avait pas payé son dû aux compagnies distributrices d'eau. »

Après avoir pris connaissance de ces faits, qui serait assez dénué de pitié envers son prochain pour s'opposer à l'adoption de mesures visant à l'amélioration des conditions de vie<sup>44</sup>?

Ces mesures ont eu une autre conséquence, plus fâcheuse que les quatre déjà mentionnées: l'*urbanisation*, source de problèmes qui ne s'est pas encore manifestée pleinement. En permettant l'accroissement de la population, ces mesures ont ouvert la voie à toutes les forces économiques et instinctives qui favorisent l'agglomération humaine. En ce sens, une large part des conséquences indésirables de l'urbanisation (les taudis, la pollution de l'air, la surpopulation, le bruit, les embouteillages, les meurtres, les émeutes, l'aliénation et l'empoisonnement par le plomb chez les enfants réduits à manger des morceaux de peinture se détachant des murs) est attribuable à l'adoption de dispositions visant à l'amélioration de l'hygiène publique.

Mais rejeter le blâme sur l'installation d'égoûts ou toute autre mesure adoptée depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle reviendrait à reprocher aux armes d'être agressives ou aux ordures de produire les mouches. Bien que ces assertions soient plus qu'un semblant de vérité, les causes réelles résident plutôt dans les

---

44. Jephson nota que certains s'opposèrent: des marchands et des conseillers municipaux et de comtés qui ne voulaient pas payer des taxes plus élevées.

motivations humaines qui sont à l'origine de tout acte. La véritable erreur de l'Homme est d'avoir négligé l'équilibre naturel, en ne limitant pas les naissances en même temps qu'il faisait échec à la mortalité. La prolongation de la vie ou l'amélioration de la santé, sans la limitation des naissances, entraîne inévitablement un accroissement de la population.

Pourquoi ne reconnaissons-nous pas ce besoin d'équilibre? Ne savons-nous pas que l'eau débordera du bain si nous maintenons le même débit de remplissage en réduisant continuellement celui de l'évacuation? Ne savons-nous pas qu'une réduction de la production d'une fabrique nécessite une baisse dans l'achat de matières premières, sinon les entrepôts s'emplieront et les créanciers viendront frapper à la porte?

Pourquoi tant de gens s'opposent-ils à l'avortement en début de grossesse, quand le fœtus est incapable de vivre par lui-même? Pourquoi le Congrès vote-t-il à chaque année, en vue de la recherche sur le cancer, des sommes supérieures à celles qui sont demandées par le Department of Health, Education and Welfare? Pourquoi les budgets consacrés à la défense sont-ils si élevés dans plusieurs pays? Pourquoi avons-nous peur de mourir?

Il ne peut y avoir qu'une réponse à ces questions complexes. Nous agissons ainsi, de façon rationnelle ou irrationnelle, en bien ou en mal, parce que nous voulons vivre. Ces actes sont les produits de forces intérieures que nous ne pouvons ni comprendre complètement, ni maîtriser, des forces biologiques qui, dans les conditions de vie primitive, ont permis à nos ancêtres de survivre. Mais les conditions se sont améliorées et ces instincts profondément enracinés menacent maintenant notre existence, en provoquant un accroissement de la population et du progrès technique. Ainsi peut-on dire que notre instinct de conservation réduit nos chances de survie.

Le mal réside en partie dans le fait que nous éprouvons des difficultés à relier les individus que nous sommes à l'humanité en évolution. La préoccupation instinctive de notre propre survie nous empêche de voir que nous n'existons qu'en tant que partie d'un tout plus vaste. Nous semblons aussi incapables de

comprendre comment la répétition d'un même geste par tous les individus d'une population peut entraîner des résultats désastreux.

Nous ne nous rendons pas compte non plus qu'au point de vue démographique, les changements peuvent prendre près d'un siècle pour se manifester ou pour être corrigés. L'un de ces phénomènes est la présente vague de chômage qui, depuis 1968, sévit en Amérique du Nord et qui est due à l'accroissement du taux de natalité après la Seconde Guerre mondiale. À ce moment-là, personne ne s'est préoccupé de savoir quels effets cela pourrait avoir plus tard sur la main-d'oeuvre. On a construit des écoles primaires puis, secondaires. Enfin, les universités connurent un grand essor sans que l'on s'inquiète des problèmes de main-d'oeuvre à venir. À l'origine, ni les citoyens, ni les politiciens n'étaient prêts à se prononcer pour ou contre le droit de concevoir. Et aujourd'hui, qui s'attarde à penser que, dans 40 ans, ces nombreux jeunes gens deviendront des vieillards infirmes, entassés dans des taudis à plusieurs étages?

Cela en surprendra plusieurs et les politiciens seront porter à le nier, mais presque tous les pays ont une politique démographique. Dans la plupart des cas, elle favorise la croissance démographique résultant de l'amélioration de la santé publique et elle adopte une attitude de laisser-aller ou de liberté individuelle pour ce qui est de la natalité. Certains pays comme le Canada encouragent même les naissances en distribuant des chèques mensuels d'allocations familiales.

Les gouvernements, plus encore que les citoyens n'ont pas réussi à comprendre le principe de l'équilibre naturel. Quand on s'abstient de limiter les naissances, une réduction du taux de mortalité amène l'augmentation de la population tant que le taux de mortalité n'atteint pas celui des naissances. Cet équilibre peut être momentanément déplacé, mais il doit se rétablir. Si l'Homme n'y pourvoit pas, la nature s'en chargera.

Notre étude de l'eutrophisation liée aux activités humaines nous a montré que la détérioration de l'environnement ne résulte pas uniquement de la population, mais bien du rapport entre

la population et la technique. Tous ces effets s'ajoutent les uns aux autres comme la force de gravité et l'inclinaison d'une pente se combinent pour accélérer le mouvement d'une avalanche ou d'un train aux freins défectueux. À cet égard, l'*Homo sapiens* doit être considéré comme une espèce dont les éléments sont à la fois internes (biologiques) et externes (reliés aux techniques). Cela devient apparent avec la notion d'« explosion démographique », où l'explosion de la population et des moyens techniques ont des conséquences multiples.

À cause de l'accroissement démographique et du perfectionnement des techniques, les événements se succèdent tellement vite dans notre monde moderne qu'ils échappent à l'histoire. Notre notion du temps s'est modifiée à mesure que l'espace rétrécissait avec l'apparition des moyens de transport et de communication plus rapides. On s'étonne aujourd'hui qu'il y a 150 ans à peine, les avions, les automobiles et la télévision n'existaient pas et que des navires à voiles sillonnaient les mers. Il paraît incroyable que Napoléon, lors de sa retraite de Moscou vers Paris en 1812, ne put, même en empruntant les meilleures routes et en changeant de cheval à chaque étape, aller plus vite que ne l'aurait fait César à son époque.

Depuis le début du XIX<sup>e</sup> siècle, la vitesse de locomotion a augmenté plus que pendant tous les autres siècles. Cette augmentation s'applique aussi à la population et à la plupart des techniques, y compris la production d'énergie et l'utilisation de fertilisants.

En prenant l'année 1780 comme point de départ à l'explosion démographique (deux ans avant que James Watt n'obtienne un brevet pour sa machine révolutionnaire), le tableau 1 indique qu'en Europe et en Amérique du Nord, la vitesse a doublé à tous les 20 ans<sup>45</sup>. La progression commence en 1780, alors qu'un homme et une femme se promènent tranquillement sur un tandem à la campagne. Elle se termine en l'an 2000 alors que 15 à 20

---

45. Observer que la vitesse moyenne des cyclistes d'avant 1900 leur permettait de s'arrêter souvent pour se reposer et prendre le thé.

personnes sont entassées dans une immense voiture roulant sur une route pavée à la vitesse de 200 km/h.

TABLEAU 1 Cet exemple illustre l'ampleur de l'évolution en fonction du moment (moment = masse  $\times$  vitesse).

Année	Masse (tonnes)	Vitesse (km/h)	Moment (t·km/h)
1780	0,15	0,1	0,015
1800	0,2	0,2	0,04
1820	0,3	0,4	0,12
1840	0,4	0,8	0,32
1860	0,6	1,6	0,96
1880	0,8	3,2	2,6
1900	1,2	6,3	7,6
1920	1,6	12,5	20
1940	2,4	25	60
1960	3,2	50	160
1980	4,8	100	480
2000	6,4	200	1280

Ces données sont effrayantes quand on constate l'accroissement du moment dû à l'effet combiné de l'augmentation de la masse et de la vitesse. Si pour une raison ou une autre, le véhicule devait freiner, il échapperait sûrement au contrôle du conducteur.

Peut-être pouvons-nous, comme le pensent plusieurs politiciens, économistes et chefs d'entreprises, laisser aller les choses pendant une autre génération sans grand risque. Mais, nous ignorons tout de ce qui nous attend et de nos réactions possibles. La voie que nous empruntons est celle de l'avenir; elle n'a pas encore été parcourue. Nous ressemblons à l'ingénieur qui conçoit un gratte-ciel sans rien connaître des forces auxquelles il sera soumis.

Quelle est la solution à ce dilemme qui s'amplifie à un rythme plus effarant que celui que nous imaginions il y a dix ans à peine? Aurait-il mieux valu ne pas tenter de découvrir les causes à l'origine de l'eutrophisation liée aux activités humaines et en

rester à la situation telle qu'elle se présentait à la fin du chapitre sur le NTA? Existe-t-il une solution logique au problème?

Il y en a une, mais nous ne savons pas encore si nous pourrions l'appliquer avant qu'il ne soit trop tard. Cette solution fait appel à la participation des individus, des groupes et des pays; une telle collaboration n'est pas facilement réalisable car nous sommes tous préoccupés par notre survie personnelle. Les mesures prises en ce sens permettraient: 1° d'améliorer nos connaissances des écosystèmes dépendants de l'Homme, en observant ces derniers de l'intérieur plutôt que comme des entités séparées et isolées; 2° d'admettre que l'élimination des effets ne règle rien sans un véritable contrôle des causes; 3° de cesser d'utiliser le surplus d'énergie pour des fins de croissance et de s'en servir pour la protection et l'amélioration de ce que nous avons déjà réalisé. Si nous échouons dans cette entreprise, nous risquons de tout perdre.

Mais, avant toute chose, il faut réduire le taux de croissance démographique et technique. Il n'est toutefois pas question d'arrêter totalement, car cela serait du suicide. Nous ne pouvons guère non plus approuver une vitesse de croissance constante. En fait, cette vitesse pourrait s'accroître, à condition que cela soit à un degré moindre que maintenant. Quoiqu'il en soit, nous devons ralentir cette progression.

Tout cela repose sur la volonté de chacun à reconnaître qu'il appartient à un tout. Si nous en arrivons à voir comment nos vies, notre travail et nos aspirations sont menacés par la croissance démographique, nous interviendrons. Notre instinct de conservation nous permettra de distinguer les symptômes des causes réelles, ce que Faust n'a jamais su faire.

Si, par ignorance des conséquences possibles ou à cause d'événements imprévus, nous devons ne pas appliquer les bonnes mesures, l'avenir nous réserve un bien triste sort.

Nos fronts seront oints de pétrole et d'algues quand nous nous baignerons et nos coupes déborderont parce que personne ne voudra y tremper les lèvres. La paix et la miséricorde seront

dans la maison du Seigneur, mais nous serons enlisés dans l'enfer de nos débris pour l'éternité.



## REMERCIEMENTS

J'aimerais en débutant remercier tous ceux qui, au cours des cent dernières années, ont fait progresser nos connaissances en limnologie. Sans leurs efforts, il m'aurait été impossible de traiter simplement et en profondeur de cette science des eaux continentales.

Quatre personnes ont particulièrement contribué à l'élaboration du présent ouvrage. Ce sont: G. Evelyn Hutchinson de l'Université Yale qui, par ses connaissances étendues des lacs, a su m'initier à cette science alors que j'étais étudiant; W.E. Johnson, ex-directeur de l'Institut des eaux douces de Winnipeg, qui m'a appris à aborder simplement et directement un problème; David W. Schindler, chef du projet de la région des lacs expérimentaux de l'Institut des eaux douces et Arnold Nauwerck, anciennement chef de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada pour la section des Grands lacs.

Je tiens à exprimer ma très vive reconnaissance à MM. Hutchinson et Johnson. Je dois d'autre part à MM. Schindler et Nauwerck d'avoir apporté des corrections et des conseils judicieux à l'avant-dernière version du manuscrit.

Lectrices profanes, ma femme Ann et M<sup>me</sup> Betty Lawler m'ont rendu l'immense service de revoir les premières versions du manuscrit et de m'en indiquer les passages trop longs ou trop techniques. Jane Vallentyne, Peter Vallentyne et M<sup>me</sup> Peggy Williams ont ultérieurement rempli ce rôle.

La publication de ce livre n'aurait sans doute pas été possible sans les précieux commentaires que m'ont fournis plusieurs collègues dont Jan Barica, Gregg J. Brunskill, John Flannagan, Andrew L. Hamilton, Robert D. Hamilton, Clive W. Nicol, K. Patalas, Ole Sæther, Mike Stainton et John Stockner, tous de l'Institut des eaux douces de l'Office des recherches sur les pêcheries du Canada à Winnipeg; Robert Wetzel de l'Université de l'État du Michigan; Jaap Kalf de l'Université McGill et Fritz Bartsch de l'U.S. Environmental Protection Agency. Connie

Boyce et Shelly Zettler sont responsables des graphiques et du travail de photographie.

Je remercie également Ernest Benn Limited pour la permission de rapporter certains passages de l'ouvrage *The Sanitary Evolution of London* par Henry Jephson, d'abord publié par T. Fisher Unwin, London.

## GLOSSAIRE DES TERMES SCIENTIFIQUES

### **Algues (n.f.)**

végétaux qu'on trouve en suspension dans l'eau à l'état microscopique (phytoplancton) ou fixés aux rochers sous forme unicellulaire ou filamenteuse. On en connaît environ 15 000 espèces d'eau douce.

### **Ammoniac (n.m.)**

composé azoté qui se présente sous forme de gaz ( $\text{NH}_3$ ) et qui, dissous dans l'eau, donne l'ion ammonium ( $\text{NH}_4$ ).

### **Ammoniaque (n.f.)**

nom de la solution aqueuse du gaz ammoniac.

### **Azote (n.m.)**

élément chimique constituant la molécule d'azote ( $\text{N}_2$ ) qui entre dans la composition de l'atmosphère. L'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), les ions nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) et nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) sont d'autres formes que prend l'azote minéral.

### **Benthos (n.m.)**

ensemble des organismes qui sont en contact avec le fond d'un lac et qu'on divise en phytobenthos (benthos végétal) et zoobenthos (benthos animal).

### **Biosphère (n.f.)**

partie du globe habitée par les organismes vivants. Elle comprend les couches inférieures de l'atmosphère, l'hydrosphère (les lacs, les cours d'eau et les océans) et la lithosphère (le sol et les rochers); son épaisseur est de quelques kilomètres.

### **Carbone (n.m.)**

élément chimique qui se présente sous forme minérale (non combustible) ou organique (combustible) comme les graisses, les huiles, les glucides et les protéines.

### **Celsius**

échelle de température utilisée dans le système métrique où les points de congélation et d'ébullition de l'eau au niveau de la mer sont de  $0^\circ\text{C}$  et de  $100^\circ\text{C}$  respectivement.

**Classification biologique des lacs (n.f.)**

le système de classification le plus souvent utilisé distingue deux catégories de lacs: les lacs dystrophes (dits « lacs bruns », à cause de leurs eaux riches en matières humiques d'origine végétale) ainsi que les lacs oligotrophes et eutrophes dont les eaux sont claires.

**Écosystème (n.m.)**

toute combinaison d'êtres vivants et de matière inerte qui, grâce à un apport de matière et d'énergie, peut se perpétuer pour une durée définie. Selon le cas, il peut s'agir de l'océan, d'un lac, d'un terrain, de toute la biosphère ou d'un aquarium.

**EDTA**

acide éthylène-diamine-tétra-acétique, agent complexant semblable au NTA.

**Enzyme (n.m.)**

type particulier de protéines élaborées dans les cellules et augmentant la vitesse des réactions chimiques.

**Épilimnion (n.m.)**

couche supérieure et chaude d'un lac stratifié thermiquement en été.

**État trophique (n.m.)**

caractéristique d'une masse d'eau pouvant varier de l'oligotrophie à l'eutrophie.

**Euphotique**

se dit de la couche supérieure bien éclairée d'une masse d'eau où a lieu le processus de la photosynthèse.

**Eutrophe**

se dit d'un lac riche en matières nutritives et dont la production en matières organiques est abondante. Les eaux y sont troubles à cause de la prolifération du phytoplancton ou de l'abondance des végétaux aquatiques fixés au fond. Les couches profondes sont pauvres en oxygène dissous quand la circulation des eaux se fait mal. Les lacs eutrophes sont généralement peu profonds; ils ont une profondeur moyenne de moins de 10 m et une profondeur maximale de moins de 15 m.

**Eutrophisation (n.f.)**

évolution complexe de l'état d'un lac amenée par l'enrichissement des eaux naturelles en matières nutritives. Cela commence par l'accroissement des plantes photosynthétiques; il s'ensuit une augmentation de la production biologique à tous les niveaux de la chaîne alimentaire, y compris les poissons. On note plusieurs changements successifs chez les populations des espèces. À l'origine, l'eutrophisation ne signifiait qu'un enrichissement en matières nutritives. Depuis, ce terme englobe autant les résultats du phénomène que sa cause première.

**Fleur d'eau (n.f.)**

prolifération soudaine d'algues planctoniques, particulièrement en surface ou juste au-dessous. Cette abondance modifie la couleur naturelle de l'eau.

**Géochimie (n.f.)**

science qui traite des réactions chimiques qui ont lieu sur la terre.

**Hypolimnion (n.m.)**

couche profonde et froide d'un lac stratifié thermiquement en été.

**Ion (n.m.)**

atome ou molécule qui, après avoir gagné ou perdu un ou plusieurs électrons, porte une charge négative ou positive.

**Limnologie (n.f.)**

science des eaux continentales et plus particulièrement des lacs.

**Mésotrophe**

se dit d'un lac qui se situe entre les lacs oligotrophes et eutrophes. La teneur de ses eaux en matières nutritives est assez faible et la vie végétale y est aussi modérément dense.

**Métalimnion (n.m.)**

couche du milieu aquatique où la variation de température avec la profondeur est rapide pendant la stratification thermique en été. Elle se trouve entre l'épilimnion et l'hypolimnion. Dans l'usage courant, elle correspond au saut thermique ou à la thermocline (voir **Thermocline**).

**Nitrate (n.m.)**

ion négatif constitué d'un atome d'azote et de trois d'oxygène.

**NTA**

acide nitrilotriacétique, agent complexant habituellement vendu sous forme de sel trisodique et utilisé pour fixer les ions positifs.

**Oligotrophe**

se dit d'un lac pauvre en matières nutritives dont la production en végétaux est peu abondante. La productivité biologique y est donc généralement faible et les couches profondes, riches en oxygène tout au long de l'année. Ces lacs sont pour la plupart profonds; ils ont une profondeur moyenne de plus de 15 m et une profondeur maximale de plus de 25 m.

**pH (n.m.)**

cologarithme de la concentration en ions hydrogène. Un pH faible correspond à une forte concentration de ces ions et décrit l'acidité du milieu.

**Phosphate (n.m.)**

( $PO_4$ ), ion négatif composé d'un atome de phosphore et de quatre d'oxygène.

**Phosphates (n.m.)**

sels contenant des ions phosphate.

**Phosphore (n.m.)**

élément chimique. Utilisé seul, le terme se rapporte à l'élément, peu importe sa forme chimique.

**Photosynthèse (n.f.)**

processus par lequel les plantes vertes transforment l'énergie solaire en énergie chimique contenue dans les glucides, les graisses et les protéines.

**Phytoplancton (n.m.)**

voir **Plancton**.

**Plancton (n.m.)**

ensemble de micro-organismes végétaux (phytoplancton) et animaux (zooplancton) habitant l'eau des lacs et des rivières.

**Pouvoir tampon (n.m.)**

mesure quantitative exprimant la résistance d'une solution ou d'un échantillon d'eau à la variation du pH après l'addition d'un acide ou d'une base.

**Profondeur de Secchi (n.f.)**

profondeur à laquelle le disque de Secchi (petit disque blanc de 20 cm de diamètre) cesse d'être visible dans l'eau; mesure de la transparence de l'eau.

**Respiration (n.f.)**

processus par lequel les enzymes décomposent la matière organique des cellules vivantes et permettent ainsi la libération de l'énergie nécessaire à l'accomplissement des diverses fonctions biologiques.

**Seiche (n.f.)**

oscillation de la surface d'un lac (seiche de surface) ou de l'interface des couches d'eau de densités différentes (seiche interne) et dont la durée est de quelques minutes à quelques heures. Les seiches sont souvent provoquées par des vents dominants prolongés ou par des variations de la pression barométrique.

**Tampon (n.m.)**

substance chimique qui absorbe les ions hydrogène et hydroxyle empêchant ainsi les solutions de subir de brusques variations de pH après l'addition d'un acide ou d'une base.

**Thermocline (n.f.) ou saut thermique (n.m.)**

variation de température en fonction de la profondeur des eaux lacustres stratifiées en été. Cette couche est située entre l'épilimnion et l'hypolimnion et elle correspond plus ou moins au métalimnion.

**Zooplancton (n.m.)**

voir **Plancton**.





## RÉFÉRENCES

- BATES, P.A., 1969, *Faust: sources, works, criticism*, Harcourt, Brace and World, New York, N.Y., 218 p.
- BUTLER, W.F., 1872, *The great lone land*, Sampson Low, Martson, Low and Searle, London, réimprimé en 1968 par M.J. Hurtig Ltd., Edmonton.
- CHAMBRE DES REPRÉSENTANTS, 1970, « Phosphates in detergents and the eutrophication of America's waters », *Hearings before a Subcommittee of the Committee on Government Operations*, House of Representatives, Quatrevingt-onzième congrès, première session, 15 et 16 déc. 1969, U.S. Gov. Prin. Off. Washington, D.C.
- COMMONER, B., 1972, *L'encerclement*, traduit de l'américain par Guy Durand, éd. du Seuil, Paris, 300 p.
- JEPHSON, H., 1907, *The sanitary evolution of London*, T. Fisher Unwin, London, 440 p.
- KAHN, H. et A.J. WIENER, 1968, « Faustian powers and human choices: some twenty-first century technological and economic issues », dans *Environment and change. The next fifty years*, W.R. Ewald fils, éd., Indiana Univ. Press, Bloomington and London, p. 101-131.
- KERR, P.C., D.F. PARIS et D.L. BROCKWAY, 1970, « The interrelation of carbon and phosphorus in regulating heterotrophic and autotrophic populations in aquatic ecosystems », U.S. Dep. Inter. Fed. Water Pollut. Control Adm., *Water Pollut. Control Res. Ser.* 16050 FGS 07/70.
- KUENTZEL, L.E., 1969, « Bacteria, carbon dioxide and algal bloom », *J. Water Pollut. Contr. Fed.* 41:1737-1747.
- LANGE, W., 1967, « Effect of carbohydrates on the symbiotic growth of planktonic blue-green algae with bacteria », *Nature* (London) 215:1277-1278.
- LEGG, R.F. et D. DINGELDEIN, 1970, « We hung the phosphates without a fair trial », *Can. Res. Dev.* 3:19-42.
- LIVINGSTONE, D.A., 1963, « Chemical composition of rivers and lakes », *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.* 440-G:1-64.
- THOREAU, H.D., 1967, *Walden ou la vie dans les bois*, traduction de « Walden or life in the woods » par G. Landré-Augier, collection bilingue des classiques étrangers, Aubier, éd. Montaigne, Paris, 578 p.
- TYLER, J.E., 1968, « The Secchi disc », *Limnol. Oceanogr.* 13:1-6.
- VALLENTYNE, J.R., 1967, « A simplified model of a lake for instructional use », *J. Fish. Res. Board Can.* 24:2473-2479.

1972, « Freshwater supplies and pollution: effects of the demographic explosion on water and man », dans *The environmental future*, N. Polunin, éd., Macmillan, London; Barnes and Noble, New York, N.Y., p. 181-211.

VOLLENWEIDER, R.A., 1968, *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*, O.C.D.E., Paris, France.

## LECTURES SUPPLÉMENTAIRES

### Ouvrages semi-spécialisés

- AMOS, W.H., 1967, « The life of the pond », dans *Our world of nature series*, McGraw-Hill Book Co., New York, Toronto, and London, 232 p.
- BROWN, E.S., 1955, *Life in fresh water*, Oxford Univ. Press. London, 64 p.
- KLOTS, E.B., 1966, *A new field book of freshwater life*, G.P. Putnam's Sons, New York, N.Y., 398 p.
- MACAN, T.T. et E.B. Worthington, 1968, *Life in lakes and rivers*, 2<sup>e</sup> éd., Collins, London and Glasgow, 272 p.
- USINGER, R.L., 1967, « The life in rivers and streams », dans *Our world of nature series*, McGraw-Hill Book Co., New York, Toronto, and London, 232 p.

### Ouvrages spécialisés

- COKER, R.E., 1954, *Streams, lakes, ponds*, Univ. North Carolina Press, Chapel Hill, N.C., 327 p.
- RUTTNER, F., 1963, *Fundamentals of limnology*, 3<sup>e</sup> éd., traduit de l'allemand par D.G. Frey et F.E.J. Fry., Univ. Toronto Press, Toronto, Ont., 1953, 295 p.

### Ouvrages très spécialisés

- FREY, D.G., éd., 1966, *Limnology in North America*, Univ. Wisconsin Press, Madison, Milwaukee, and London, 734 p.
- HUTCHINSON, G.E., 1957, *A treatise on limnology*, vol. 1. Geography, physics, and chemistry, 1015 p.; vol. 2. Introduction to lake biology and limnoplankton, 1115 p., John Wiley and Sons, New York, London, and Sydney.
- LIKENS, G.E., éd., 1972, *Nutrients and eutrophication: the limiting-nutrient controversy*, Special Symposium, vol. 1. Amer. Soc. Limnol. Oceanogr., Allen Press, Lawrence, Kansas.
- NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 1969, *Eutrophication; causes, consequences, correctives*, Proceedings of a symposium 1967, Washington, D.C. 661 p.
- WARD, H.B. et G.C. WHIPPLE, 1959, *Fresh-water biology*, W.T. Edmondson, éd., 2<sup>e</sup> éd., John Wiley and Sons, New York and London, 1248 p.



## APPENDICE

### Bilan de la situation en 1974

Le but premier de cet ouvrage était de présenter un aperçu des lacs et de l'eutrophisation qui ferait ressortir les principes et les facteurs régissant les rapports entre l'Homme, les éléments nutritifs et l'eau. Ces facteurs échappent au temps; ils ne donnent aucune indication quant à l'incidence de l'eutrophisation ou à la lutte qu'il faut lui mener. C'est pourquoi une évaluation générale de la situation présente est nécessaire.

L'accroissement du taux d'eutrophisation semble constant. Sous l'effet de l'augmentation de la population et du progrès des techniques, plusieurs plans d'eau qui sont maintenant au seuil de l'eutrophisation, seront appelés à le franchir. À l'heure actuelle, on ne peut être plus précis car nous manquons d'information en ce qui a trait à l'état de ces eaux.

Certaines régions sont plus exposées que d'autres aux problèmes qu'amène l'eutrophisation. C'est particulièrement le cas des régions où les cours d'eau sont arrêtés par des masses d'eau stagnante ou des étendues d'eau. Cette situation se présente souvent au Canada, en Scandinavie et dans les régions d'avant-monts. Dans les régions dépourvues de lacs, on accorde peu d'attention aux problèmes d'eutrophisation.

On admet dorénavant la nécessité d'éliminer les phosphates pour solutionner ces problèmes. La Suède et la Suisse sont les pays qui ont le plus d'expérience dans ce domaine. Le Canada et les États-Unis suivent avec l'élimination du phosphore dans le bassin du Saint-Laurent. Même si dans de nombreux pays, les responsables de la lutte contre la pollution conviennent que la réduction de l'apport des phosphates détersifs dans les eaux naturelles est souhaitable, des réglementations limitant spécifiquement la teneur en phosphates dans les produits détersifs n'ont été adoptées qu'au Canada et dans certains états et municipalités des États-Unis. La Suède, en 1967 et le Canada, en 1970, ont été les premiers à utiliser le NTA à grande échelle

dans les produits détersifs. Dans ces deux pays, on contrôle scrupuleusement les concentrations de ce composé dans les eaux naturelles. À la fin de 1973, le gouvernement américain interdisait toujours l'usage du NTA.

Le 1<sup>er</sup> janvier 1973, on fixait à 2,2 % la concentration en phosphore permise dans les détergents fabriqués ou importés au Canada. Le 1<sup>er</sup> janvier 1974, les États-Unis n'avait pas encore adopté de règlement fédéral semblable. Par contre, le Connecticut, la Floride, l'Indiana, le Maine, le Michigan et un certain nombre de comtés et de villes d'autres états avaient limité la concentration du phosphore dans les détergents à 8,7 %. Au début de 1974, l'emploi de détergents phosphatés fut interdit en Indiana, dans l'état de New York et dans certaines villes ou comtés de la Floride, de l'Illinois, du Maine, du Maryland, du New Hampshire et de l'Ohio.

Les fabricants de détergents poursuivent leurs recherches afin de trouver des produits nouveaux ou améliorés en remplacement du triphosphate de sodium. À l'automne 1970, la compagnie Procter & Gamble annonçait qu'elle avait mis au point un surfactif qui permettait un emploi de quantités moindres d'agents phosphatés d'adoucissement et de neutralisation. Conséquemment, ce produit réduirait de moitié la quantité de phosphates tout en maintenant le même pouvoir nettoyant. Les années 70 amèneront probablement de nouvelles découvertes qui sauront garder nos vêtements et nos lacs propres.

L'événement le plus marquant relativement au problème de l'eutrophisation en Amérique du Nord fut la signature, le 15 avril 1972, de l'Accord sur la qualité des eaux dans les Grands lacs par le président des États-Unis, Richard Nixon et Pierre Trudeau, premier ministre du Canada. À ce moment-là, j'avais déjà rédigé la plus grande partie du livre. L'accord d'une durée de 5 ans attribuait des fonctions précises à la Commission mixte internationale en vue de la création et de la mise en application de programmes coopératifs, conçus pour améliorer la qualité de

l'eau des Grands lacs. M. Trudeau devait déclarer lors de la signature de l'Accord:

« L'importance du geste que nous avons posé ce matin ne saurait être appréciée ou mesurée selon les normes habituelles, car cet accord n'entre pas dans les cadres ordinaires des relations internationales. Il n'apportera pas de contribution matérielle à l'économie de l'un ou l'autre de nos pays; il n'ajoutera pas à la sécurité des rapports que nous entretenons ensemble ou avec le reste du monde; il n'atténuera guère ni n'éliminera aucun des problèmes sociaux qui inquiètent les Américains comme les Canadiens.

« Cependant, cet accord, s'il ne vise à rien de tout cela, accomplit bien d'autres choses. Car il exprime la conscience que nous avons de la fragilité de la vie sur la planète, de la délicatesse de l'équilibre au sein de la biosphère. Cet accord porte sur la question la plus fondamentale de toutes: le processus même de la vie. Et à cet égard, il accroîtra le bien-être de millions de Nord-Américains, parce qu'il permettra l'assainissement d'une immense région que l'avidité et l'indifférence avaient laissé se détériorer lamentablement. »

Espérons qu'il en sera bien ainsi, car le monde a les yeux tournés vers nous.

## Tableaux et figures

TABLEAU A1 Liste des éléments essentiels à la croissance des plantes d'eau douce présents dans leurs tissus (demande) et dans l'eau de rivière (offre)<sup>1</sup>. Le signe < veut dire « moins de ».

Élément	Symbole	Demande (% des plantes)	Offre (% des eaux fluviales)	Demande:offre (rapport approximatif)
Oxygène	O	80,5	89	1
Hydrogène	H	9,7	11	1
Carbone <sup>2</sup>	C	6,5	0,001 2	5 000
Silicium <sup>3</sup>	Si	1,3	0,000 65	2 000
Azote <sup>2</sup>	N	0,7	0,000 023	30 000
Calcium	Ca	0,4	0,001 5	<1 000
Potassium	K	0,3	0,000 23	1 300
Phosphore <sup>2</sup>	P	0,08	0,000 001	80 000
Magnésium	Mg	0,07	0,000 4	<1 000
Soufre	S	0,06	0,000 4	<1 000
Chlore	Cl	0,06	0,000 8	1 000
Sodium	Na	0,04	0,000 6	<1 000
Fer <sup>4</sup>	Fe	0,02	0,000 07	<1 000
Bore	B	0,001	0,000 01	<1 000
Manganèse	Mn	0,000 7	0,000 001 5	<1 000
Zinc	Zn	0,000 3	0,000 001	<1 000
Cuivre	Cu	0,000 1	0,000 001	<1 000
Molybdène	Mo	0,000 05	0,000 000 3	<1 000
Cobalt	Co	0,000 002	0,000 000 005	<1 000

<sup>1</sup> Les concentrations pour les plantes d'eau douce ont été tirées d'une vingtaine de publications scientifiques traitant de la composition des algues et des plantes aquatiques enracinées sur le fond. Les moyennes ont été effectuées de sorte que le rapport de production soit d'environ 7 unités d'algues contre une unité de plantes, avec 30% de diatomées chez les algues. Les teneurs correspondantes des éléments dans l'eau (exception faite du phosphore) ont été tirées d'estimations de la composition moyenne des eaux fluviales du monde (Livingstone 1963). L'évaluation de la teneur en phosphore est purement intuitive.

<sup>2</sup> Les teneurs de l'eau en carbone, en azote et en phosphore sont uniquement données pour les formes minérales.

<sup>3</sup> Le silicium est essentiel à la croissance des diatomées, de certains flagellés et peut-être à celle de certains végétaux supérieurs (*Equisetum*). On ne croit pas qu'il joue un rôle primordial dans la croissance des autres plantes.

<sup>4</sup> Le rapport entre la teneur de la plante et la teneur de l'eau en fer est très faible, étant donné qu'une grande partie du fer présent dans l'eau n'est pas facilement assimilable par les plantes. Dans certains lacs, les proportions peuvent être quelques centaines de fois supérieures à celles que nous indiquons.



TABLEAU A2 Production annuelle moyenne d'azote et de phosphore par habitant et quantités annuelles moyennes déversées dans les eaux naturelles, pour les années 1965 à 1970 (d'après des statistiques américaines).

	Kilogrammes/habitant · an	
	Azote	Phosphore
Eaux usées		
déchets physiologiques	4,5	0,6
détergents	0,0	1,1
industries et autres	0,5	0,1
total des quantités déversées	5,0	1,8
quantité déversée dans l'eau <sup>1</sup>	4,5	1,6
Agriculture		
déchets physiologiques	45	6
fertilisants synthétiques	20	8
total des quantités déversées	65	14
quantité déversée dans l'eau <sup>1</sup>	8	0,3

<sup>1</sup> On suppose que 90% de l'azote et du phosphore contenus dans les eaux usées passent directement dans l'eau et que 2 % du phosphore ainsi que 12 % de l'azote du fumier et des fertilisants artificiels passent du sol à l'eau. Ces chiffres peuvent varier d'un endroit à l'autre.

TABLEAU A3 Densité (D) de l'eau en fonction de la température (T) à pression atmosphérique et différence de densité correspondant à l'abaissement de température d'un degré Celsius ( $\Delta D/\text{deg C}$ ).  
Symboles utilisés: C (Celsius), g (gramme),  $\text{cm}^3$  (centimètre cube),  $\Delta D$  (différence de densité).

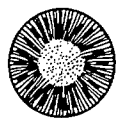
T (°C)	D ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\Delta D/\text{deg C}$ ( $10^{-5}\text{g}/\text{cm}^3$ )	T (°C)	D ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$\Delta D/\text{deg C}$ ( $10^{-5}\text{g}/\text{cm}^3$ )
0	0,999 867		16	0,998 970	15,7
1	0,999 927	6,0	17	0,998 802	16,8
2	0,999 968	4,1	18	0,998 623	17,9
3	0,999 992	2,4	19	0,998 433	19,0
4	1,000 000	0,8	20	0,998 232	20,1
5	0,999 992	0,8	21	0,998 021	21,1
6	0,999 968	2,4	22	0,997 799	22,2
7	0,999 929	3,9	23	0,997 567	23,2
8	0,999 876	4,3	24	0,997 326	24,1
9	0,999 809	6,7	25	0,997 074	25,2
10	0,999 728	8,1	26	0,996 813	26,1
11	0,999 633	9,5	27	0,996 542	27,1
12	0,999 525	10,8	28	0,996 262	28,0
13	0,999 404	12,1	29	0,995 974	28,8
14	0,999 271	13,3	30	0,995 676	29,8
15	0,999 127	14,4			

TABLEAU A4 Pourcentage de la lumière absorbée par une épaisseur d'eau pure de 1 mètre, à température ambiante et pour différentes longueurs d'onde. Le nanomètre équivaut à 0,000 000 001 mètre.

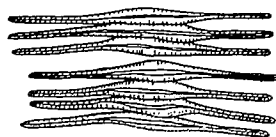
Couleur	Longueur d'onde (nanomètres)	% de lumière absorbée au mètre
Infrarouge (invisible)	820	91,1
	800	89,4
	780	90,1
	760	91,4
	740	88,5
Rouge	720	64,5
	700	45,0
	680	36,6
	660	31,0
Orange	640	26,6
	620	23,5
Jaune	600	19,0
	580	7,0
	560	3,9
Vert	540	3,0
	520	1,6
	500	0,77
Bleu	480	0,52
	460	0,52
	440	0,70
	420	0,92
Violet	400	1,63
	380	2,10

TABLEAU A5 Teneur des eaux fluviales (moyenne mondiale) en ions positifs (cations) et négatifs (anions). Les concentrations sont exprimées en milligrammes par litre et en équivalents par litre.

Cations	Concentration		Anions	Concentration	
	(mg/l)	(é/l)		(mg/l)	(é/l)
Calcium ( $Ca^{++}$ )	15,0	0,75	Bicarbonate ( $HCO_3^-$ )	58,4	0,96
Sodium ( $Na^+$ )	6,3	0,27	Sulphate ( $SO_4^{=}$ )	11,2	0,23
Magnésium ( $Mg^{++}$ )	4,1	0,34	Chlorure ( $Cl^-$ )	7,8	0,22
Potassium ( $K^+$ )	2,3	0,06	Nitrate ( $NO_3^-$ )	1,0	0,017
Total		1,42			1,427



*Cyclotella comta*  
diamètre: 0,03mm



*Fragilaria crotonensis*  
longueur: 0,1mm



*Oscillatoria rubescens*  
diamètre: 0,0007mm

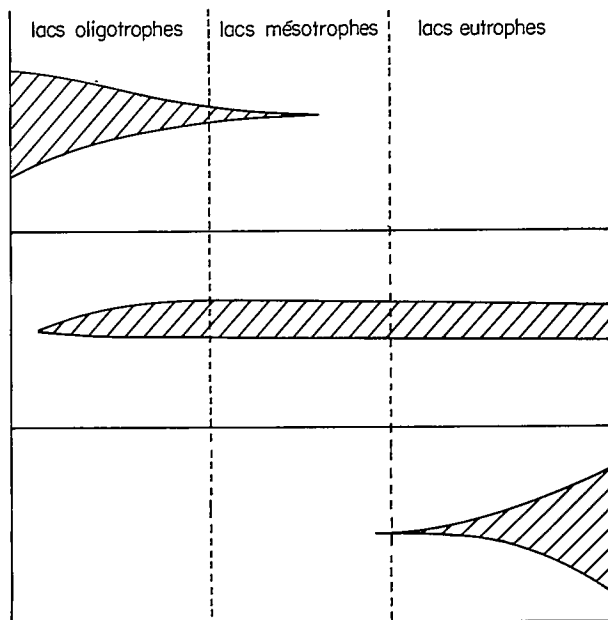


FIG. A1 Abondance relative de trois espèces d'algues planctoniques dans les lacs oligotrophes, mésotrophes et eutrophes: *Cyclotella comta* (diatomée), *Fragilaria crotonensis* (diatomée) et *Oscillatoria rubescens* (algue bleue). D'après K. Patalas.

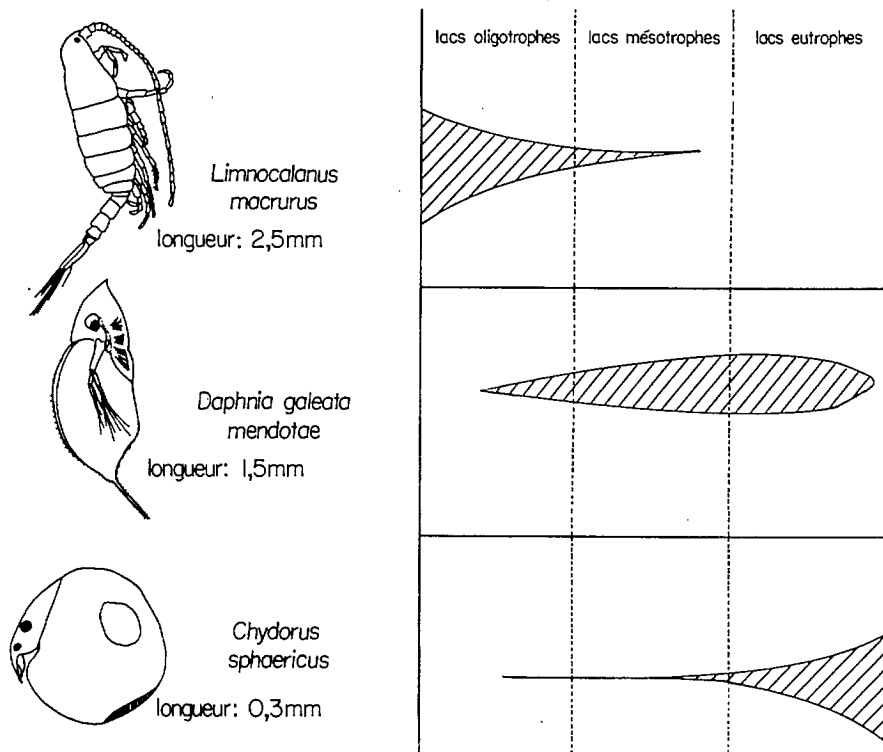


FIG. A2 Abondance relative de trois espèces de crustacés planctoniques dans les lacs oligotrophes, mésotrophes et eutrophes: *Limnocalanus macrurus* (copépode), *Daphnia galeata mendotae* (cladocère) et *Chydorus sphaericus* (cladocère). D'après K. Patalas.

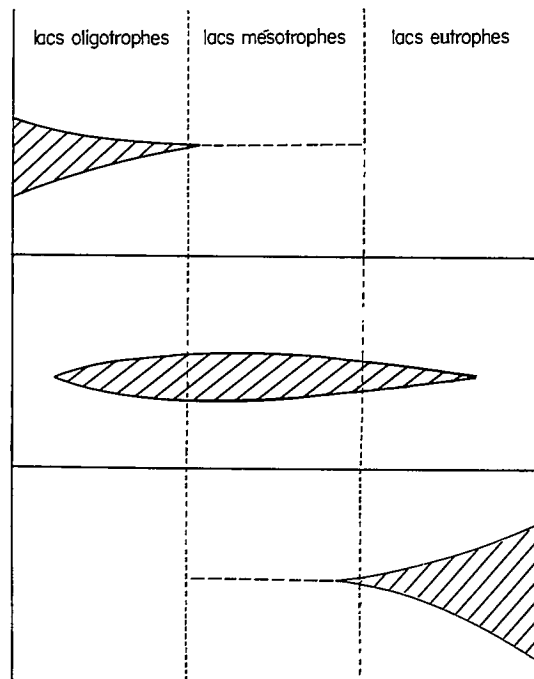
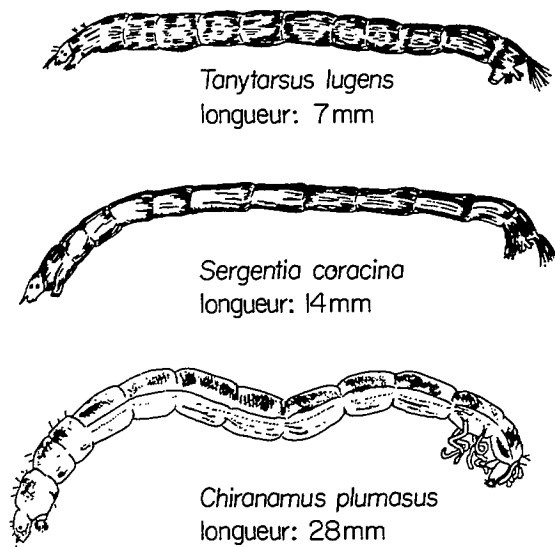


FIG. A3 Abondance relative de trois espèces de larves de moustiques dans les lacs oligotrophes, mésotrophes et eutrophes. Ces larves vivent dans les sédiments du fond en respirant au moyen de branchies. D'après O. Sæther.

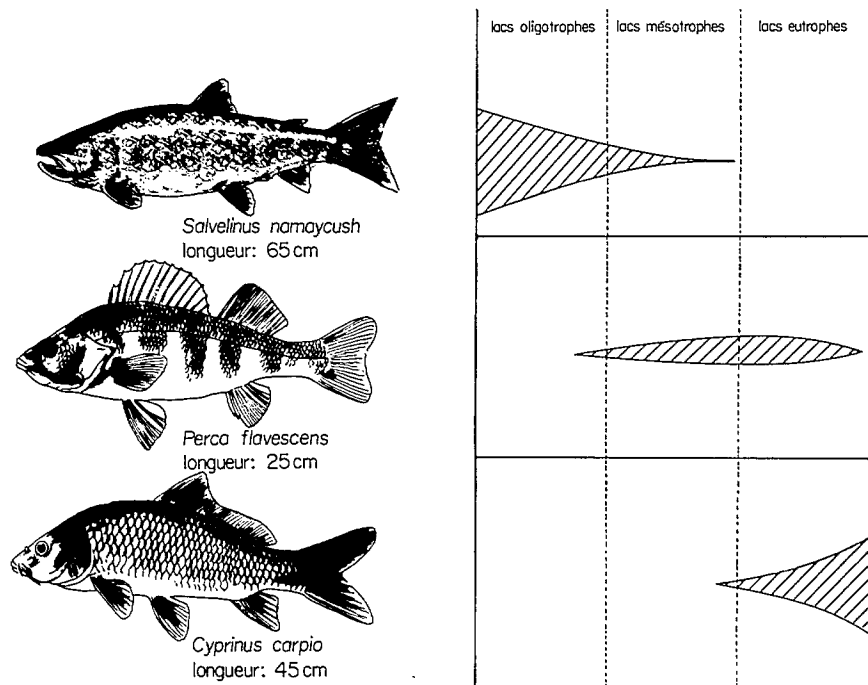


FIG. A4 Abondance relative de trois espèces de poissons dans les lacs oligotrophes, mésotrophes et eutrophes: *Salvelinus namaycush* (truite de lac), *Perca flavescens* (perchaude) et *Cyprinus carpio* (carpe). D'après K. Patalas.



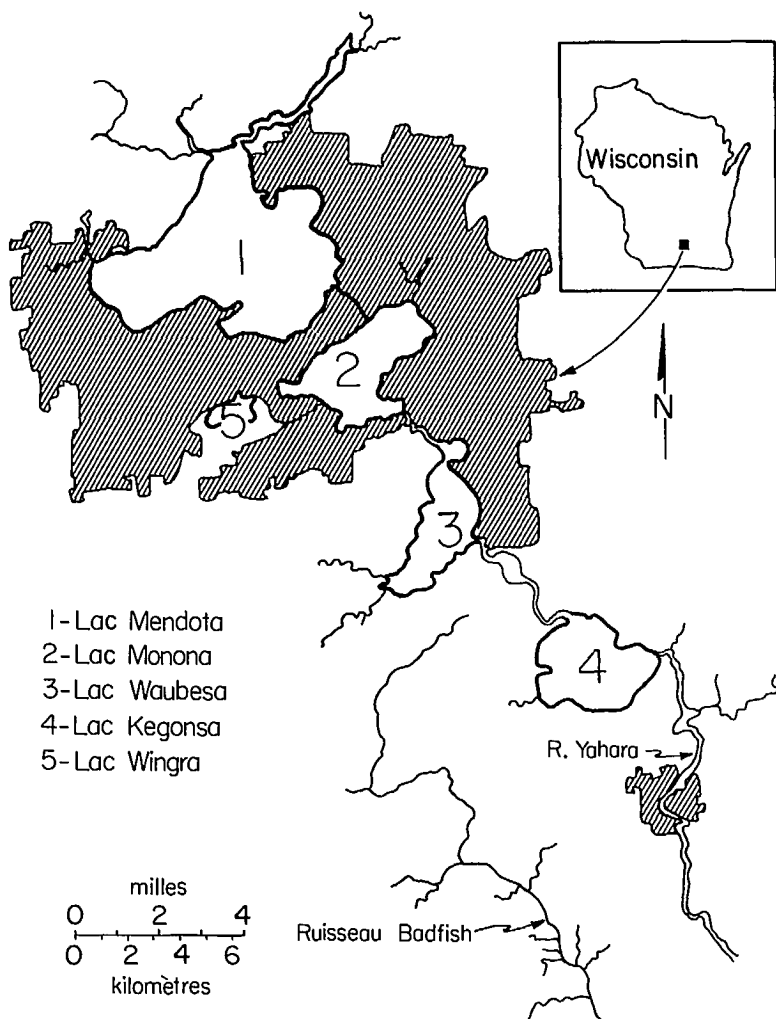


FIG. A5 Carte de cinq lacs aux environs de Madison (Wisconsin) où les agglomérations urbaines sont représentées par des hachures. Les premiers travaux de dérivation ont permis le déversement de l'effluent de l'usine d'épuration de Madison dans la rivière Yahara, entre les lacs Mendota et Monona. Les seconds travaux dirigèrent l'effluent dans la même rivière, mais entre les lacs Monona et Waubesa. Enfin, les derniers travaux l'orientèrent vers le ruisseau Badfish qui se jette dans la rivière Yahara plus loin en aval. Voir p. 28 à 30 pour plus de détails.

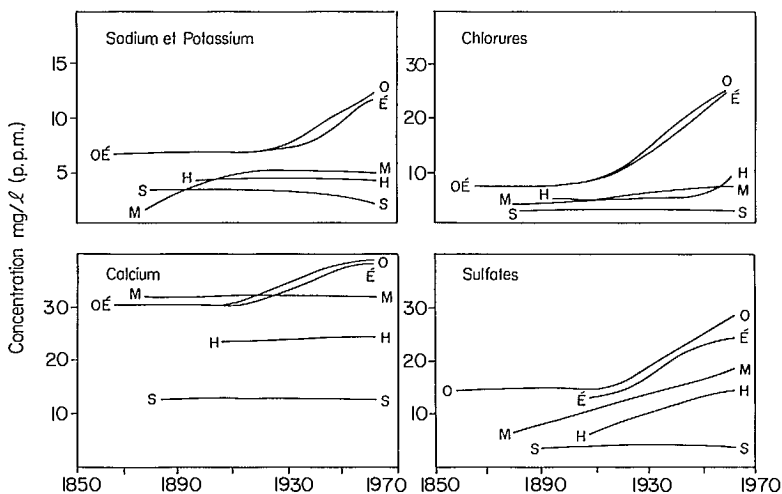


FIG. A6 Variations de la teneur en certains composés chimiques des eaux des Grands lacs, de 1850 à 1967. Abréviations: S, lac Supérieur; M, lac Michigan; H, lac Huron; É, lac Érié; O, lac Ontario. D'après une figure préparée à l'origine par A.L. Beeton. La composition des eaux du lac Supérieur est demeurée relativement constante au cours de la période en question tandis que dans le cas des lacs Érié et Ontario, elle a beaucoup changé. (Le lac Érié se déverse dans le lac Ontario par la rivière Niagara.) Voir p. 30 à 34 pour plus de détails.

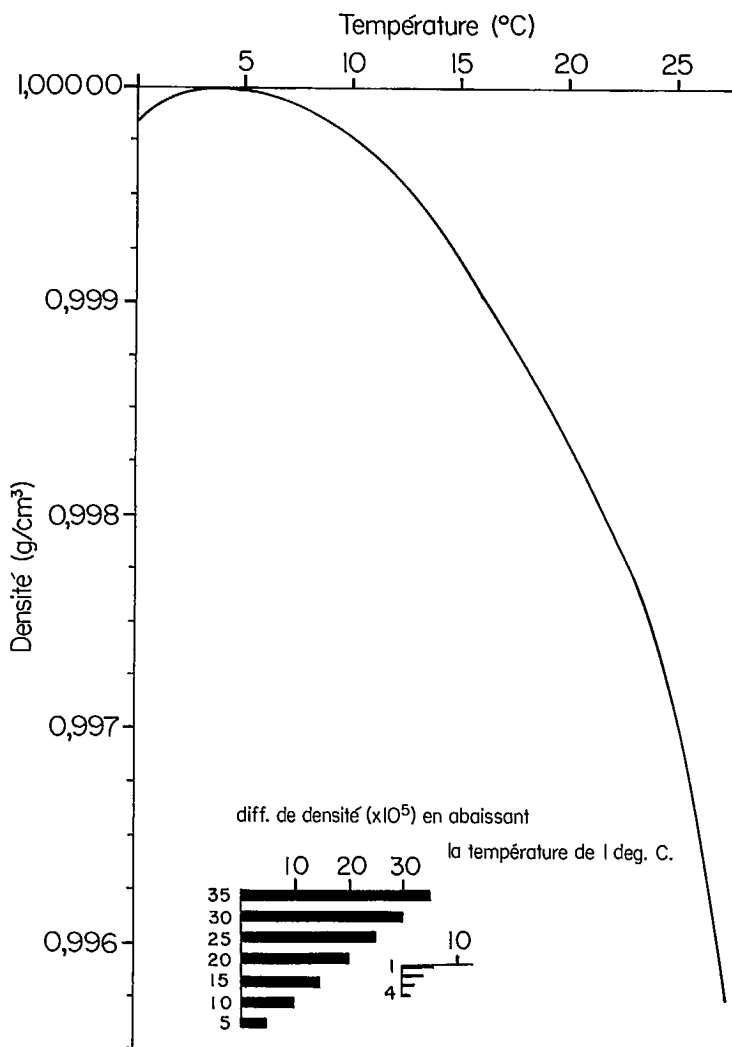


FIG. A7 Variation de la densité de l'eau avec la température. L'échelle dans le bas de la figure montre la différence de densité lors de l'abaissement de la température d'un degré Celsius et ce, à différentes températures. Remarquez que la densité maximale de l'eau est à 4°C et que la variation de densité au-dessous et au-dessus de cette température n'est pas linéaire. Voir p. 44 à 49 pour plus de détails.

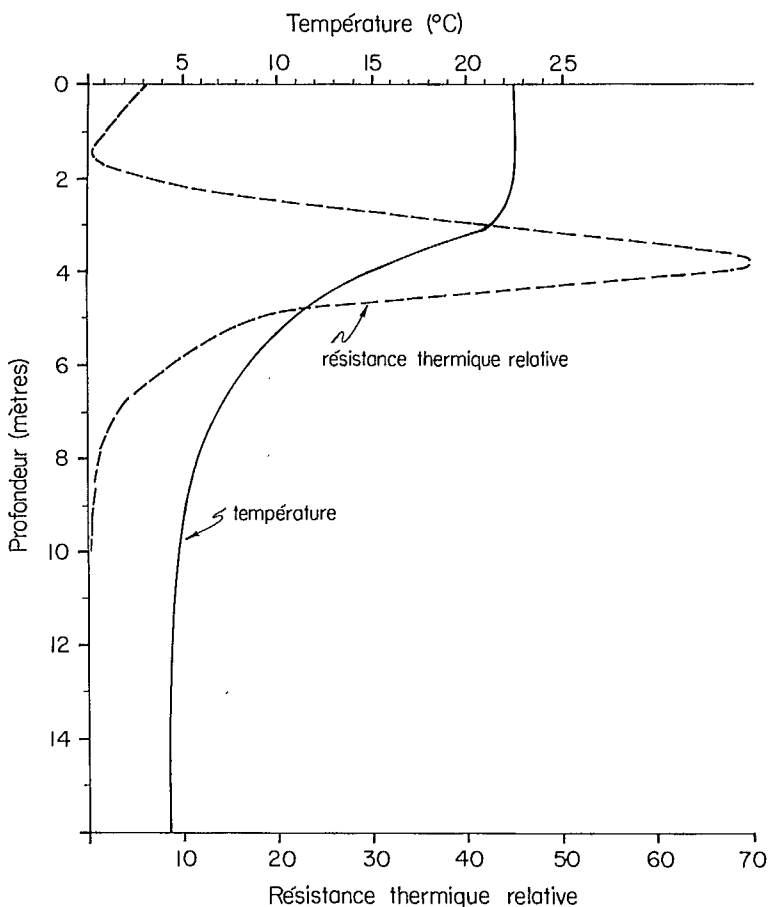


FIG. A8 Température (ligne continue) et résistance thermique relative (RTR) au brassage (ligne discontinue) dans le lac Little Round (Ontario) au cours de l'été. La RTR est exprimée comme étant la différence de densité entre le dessus et le dessous de chaque tranche de profondeur d'un demi-mètre d'épaisseur, calculée d'après la température. Notez que les valeurs de la RTR ont été multipliées par  $10^5$ . Voir p. 47 et 48 pour plus de détails.

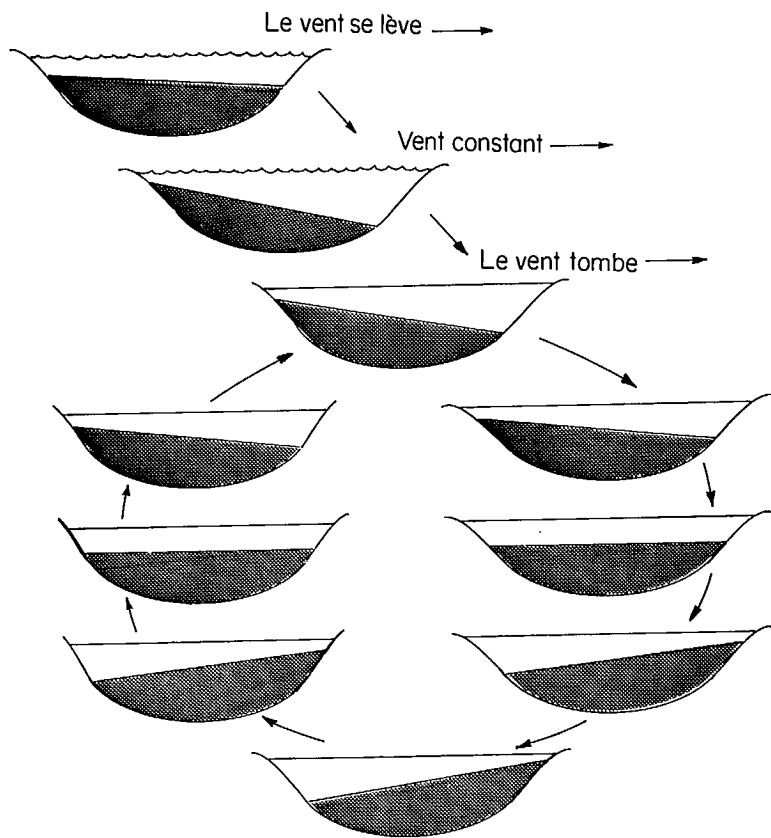


FIG. A9 Schéma montrant les mouvements d'une seiche interne dans un lac soumis à l'action continue du vent. La couche supérieure pâle représente l'épilimnion et la couche obscure inférieure, l'hypolimnion. Remarquez la pente de l'interface entre les deux masses d'eau qui s'élève contre le vent pendant que celui-ci souffle. Voir p. 54 et 55 pour plus de détails.

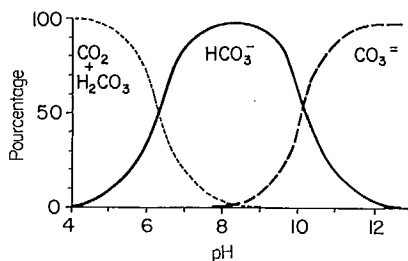


FIG. A10 Abondance relative des différentes formes du carbone minéral dans les eaux douces et selon le pH. À un pH de 4, tout le carbone minéral se présente sous forme de  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$ ; à un pH de 8, sous forme de  $\text{HCO}_3^-$  (ion bicarbonate); à un pH de 12, sous forme de  $\text{CO}_3^{=}$  (ion carbonate). Le pH de la plupart des eaux naturelles est de 6 à 8. Voir p. 63 à 68 pour plus de détails.

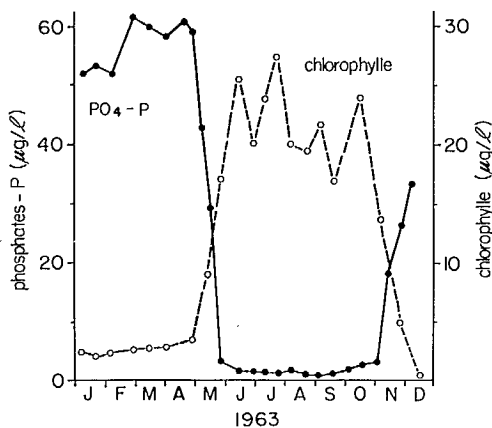


FIG. A11 Variations saisonnières des teneurs en phosphates dissous et en chlorophylle dans l'épilimnion du lac Washington (É.-U.). Notez que les phosphates dissous ont une teneur élevée en hiver alors qu'ils disparaissent presque en été avec la croissance du phytoplancton (mesurée par la chlorophylle). D'après les données fournies par W.T. Edmondson. Voir p. 108 à 110 pour plus de détails.

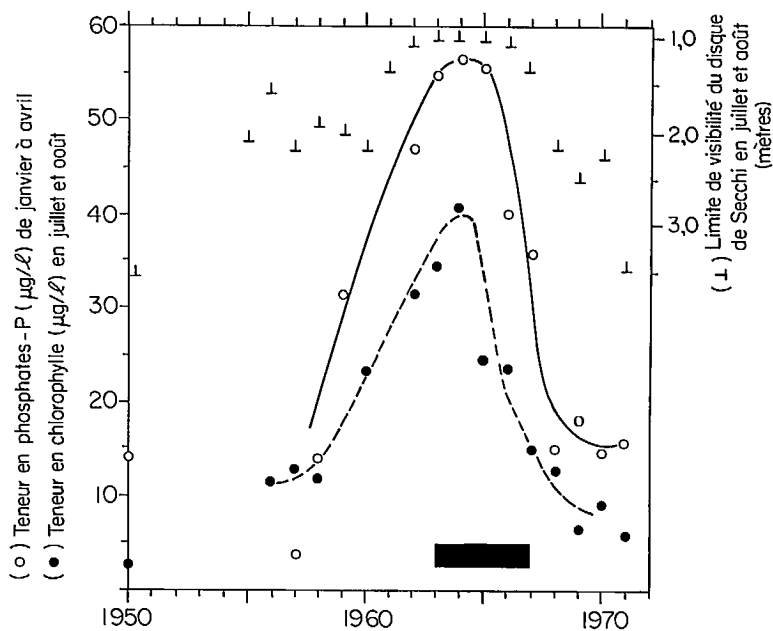


FIG. A12 Variations des valeurs moyennes de la teneur en phosphates dissous (en hiver), de la profondeur limite du disque de Secchi (en été) et de la teneur en chlorophylle (en été) dans les 10 m supérieurs du lac Washington, entre 1950 et 1971. Le trait noir indique la durée des travaux de dérivation des eaux usées: ils ont débuté en 1963 pour se terminer en 1968. L'abondance des algues (la chlorophylle) a diminué et la transparence de l'eau (mesurée par le disque de Secchi) a augmenté à partir de 1963, parallèlement à la teneur en phosphates en hiver. Le résultat des travaux de dérivation sur la prolifération des algues provient principalement de la diminution de l'apport de phosphates. Voir p. 108 à 110 pour plus de détails.

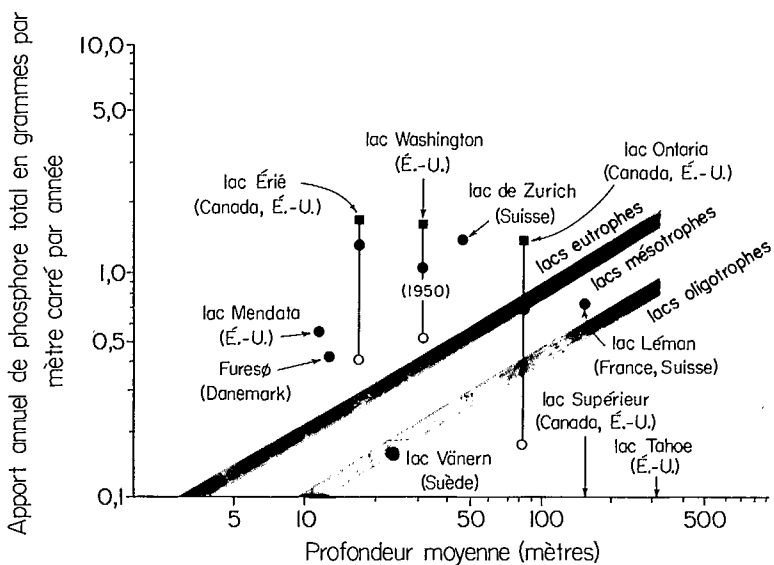


FIG. A13 Apports de phosphore dans quelques lacs d'Europe et d'Amérique du Nord, d'après un diagramme établi par R.A. Vollenweider. Les points noirs indiquent les résultats de 1968. Les carrés montrent les conditions prévues pour les années 1985 à 1990, si rien n'est fait pour limiter l'apport de phosphore. Les cercles montrent les conditions prévues pour la même période si l'apport de phosphore est limité. Les lacs oligotrophes se trouvent au-dessous du trait inférieur; les lacs eutrophes, au-dessus du trait supérieur et les lacs mésotrophes, entre les deux traits. Voir p. 109 et 110 pour plus de détails.



