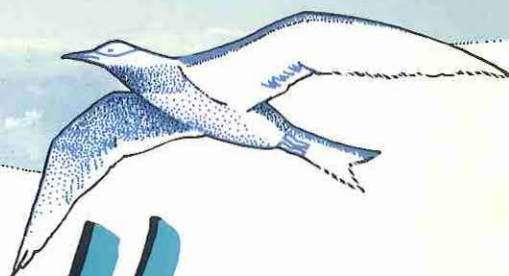




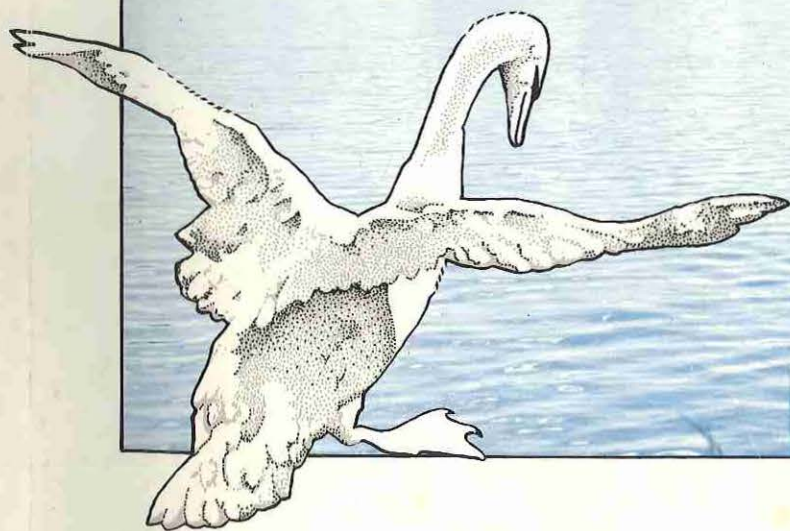
agence de bassin
rhône.méditerranée.corse

300
ANENAG
ENR
93

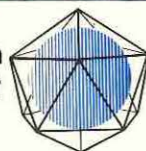


Rans d'eau

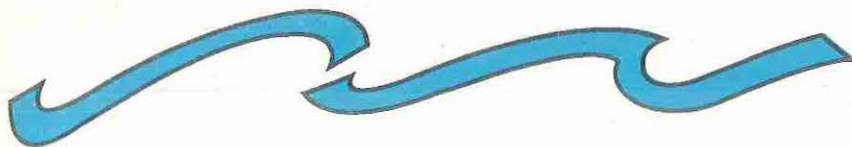
De l'autre côté du miroir



Institut International de Gestion
et de Génie de l'Environnement



Document technique réalisé par un groupe
de travail de l'IIGGE - Novembre 1988



Irstea Bordeaux
DOCUMENTATION

EDITORIAL

Doc ANENAG 295x 93
Irstea Bordeaux
Bibliothèque n° **PX00019016**
Date **5/8/14**

Les plans d'eau sont le siège de nombreuses activités de loisirs et constituent par ailleurs une ressource en eau importante. Il convient de bien les connaître pour mieux les protéger, et en préserver la qualité et les potentialités.

L'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse, qui compte sur son domaine d'intervention la moitié des grands plans d'eau français de plus de 500 hectares et près du tiers des plans d'eau supérieurs à 100 hectares, y consacre des moyens importants.

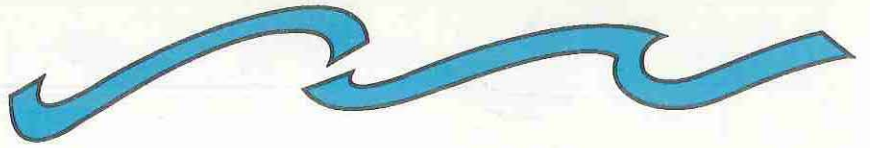
Elle a ainsi constitué un fichier informatisé des plans d'eau du bassin, largement ouvert aux utilisateurs extérieurs, et engagé depuis 1987, en Rhône-Alpes, puis en Franche-Comté, avec la participation des Services Régionaux de l'Aménagement des Eaux et l'appui scientifique du CEMAGREF, des investigations systématiques sur des lacs et retenues de qualité mal connue.

Parallèlement au renforcement de cette connaissance de base, l'Agence apporte, conformément à sa vocation, un soutien financier et technique à la réalisation d'études et de travaux visant à la protection des milieux lacustres.

Elle ne pouvait donc que souscrire et participer à la démarche de l'IIGGE et de son groupe de travail destinée à éclairer les gestionnaires non spécialistes sur le fonctionnement des plans d'eau, leurs équilibres, l'influence directe ou indirecte des activités humaines qui s'exercent sur eux-mêmes ou leur bassin versant.

Puisse cet ouvrage contribuer à une gestion raisonnée et bien maîtrisée de ces milieux fragiles, privilégiant la prévention à l'action curative, lourde et d'issue plus incertaine.

Patrick Guilhaudin :
Directeur
de l'Agence de Bassin
Rhône-Méditerranée-Corse



AVANT-PROPOS

LE MOT DE L'IIGGE

L'une des formes les plus fréquentes sous laquelle se traduit la vocation de carrefour de l'Institut International de Gestion et de génie de l'Environnement est le groupe de travail pluridisciplinaire dans lequel se retrouvent tous les acteurs concernés par un thème déterminé pour mettre en commun leurs compétences, leurs expériences, leurs préoccupations et apporter une contribution à la progression de ce thème.

Dans certains cas, cette contribution peut être un ensemble de propositions concrètes déposées sur la table des décideurs concernés. Dans d'autres, elle peut prendre la forme d'un outil destiné à aider les utilisateurs confrontés au thème des déchets : ce fut le cas en 1987 du Guide : "l'A...Z des Résidus Urbains", destiné aux Collectivités. C'est le cas aujourd'hui de ce cahier technique destiné principalement aux responsables de la création et de l'utilisation des lacs, retenues et plans d'eau.

Au nom de l'Association, je tiens à remercier le Président du groupe de travail "Lacs et Retenues" du Secteur eau de l'IIGGE, Monsieur Quetin, et tous les membres du groupe de ce nouvel exemple de collaboration et de travail collectif.

Je remercie également l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse d'avoir permis, en prenant en compte l'édition du document dans le cadre de ses propres objectifs, de lui donner la diffusion qu'il méritait.

Jean Laporte
Vice-Président Délégué de l'IIGGE

ET CELUI DU GROUPE DE TRAVAIL

Avant la fin du siècle dernier, l'ingénieur DELEBECQUE recensait dans un remarquable ouvrage plus de 150 lacs et étangs sur le territoire français. Depuis cette date, la maîtrise technique des constructions des grands barrages a pratiquement doublé ce chiffre. Ainsi, lacs, étangs et retenues

artificielles constituent un incomparable patrimoine national qu'il faut protéger.

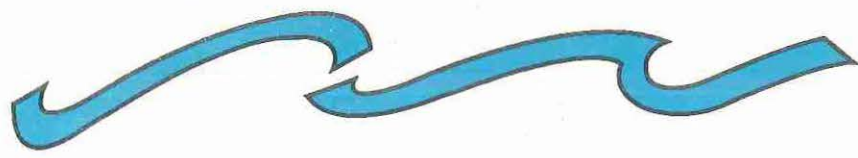
Les intérêts en jeu sont nombreux. Ils s'étendent de l'alimentation en eau potable et de la protection des populations contre les crues, à la production d'énergie électrique, à l'irrigation, à la pêche et aux activités touristiques et sportives. Peut-on oublier l'aspect purement esthétique, la qualité de la vie apportée par l'image apaisante et pleine d'attrait d'un plan d'eau et de son environnement?

Mais les ressources en eau ne sont pas illimitées, tandis que les activités humaines tendent toujours à en dégrader la qualité. Or, par la relative immobilité de leurs eaux et la lenteur de leur renouvellement, les lacs s'avèrent être des milieux fragiles aux agressions polluantes.

Il y a très souvent incompatibilité entre les différents usages des lacs et de leurs eaux. Il appartient aux autorités publiques de faire les choix nécessaires et aux usagers d'en comprendre et d'en accepter les contraintes. Ainsi la baignade peut-elle être dangereuse sur une retenue à usage hydroélectrique ou contraire aux règles d'hygiène si l'eau est destinée à l'alimentation humaine. En matière de pêche, qualité des espèces et quantité pêchée sont incompatibles. Ainsi les aménagements touristiques sur les rives sont-ils susceptibles de créer des agressions ou des pollutions diffuses.

Effectuer ces choix, comprendre ces contraintes suppose une connaissance des principaux problèmes auxquels on risque d'être confronté, et parmi ceux-ci, celui de l'eutrophisation des eaux. Le présent cahier technique voudrait répondre à cet objectif de diffusion des connaissances et offrir aux élus, aux associations d'usagers, aux aménageurs, un panorama simple des liens étroits qui existent entre un lac et l'ensemble des activités humaines le long de ses rives et plus généralement sur tout son bassin versant.

Ce cahier technique est une oeuvre collective, assez spontanément entreprise par un groupe de travail bénévole constitué sous l'impulsion de l'Institut International de Gestion et de Génie de l'Environnement. Ce groupe réunit des chercheurs, des universitaires, des ingénieurs appartenant à de grandes administrations ou à des bureaux d'études privés, des membres du Conseil Supérieur de



la Pêche, des responsables des Syndicats Intercommunaux des lacs du Bourget et d'Annecy. Chacun a apporté sa pierre à l'édifice. Malgré nos efforts, peut-être en résulte-t-il quelques différences de tonalité et d'expression; le lecteur voudra bien nous le pardonner.

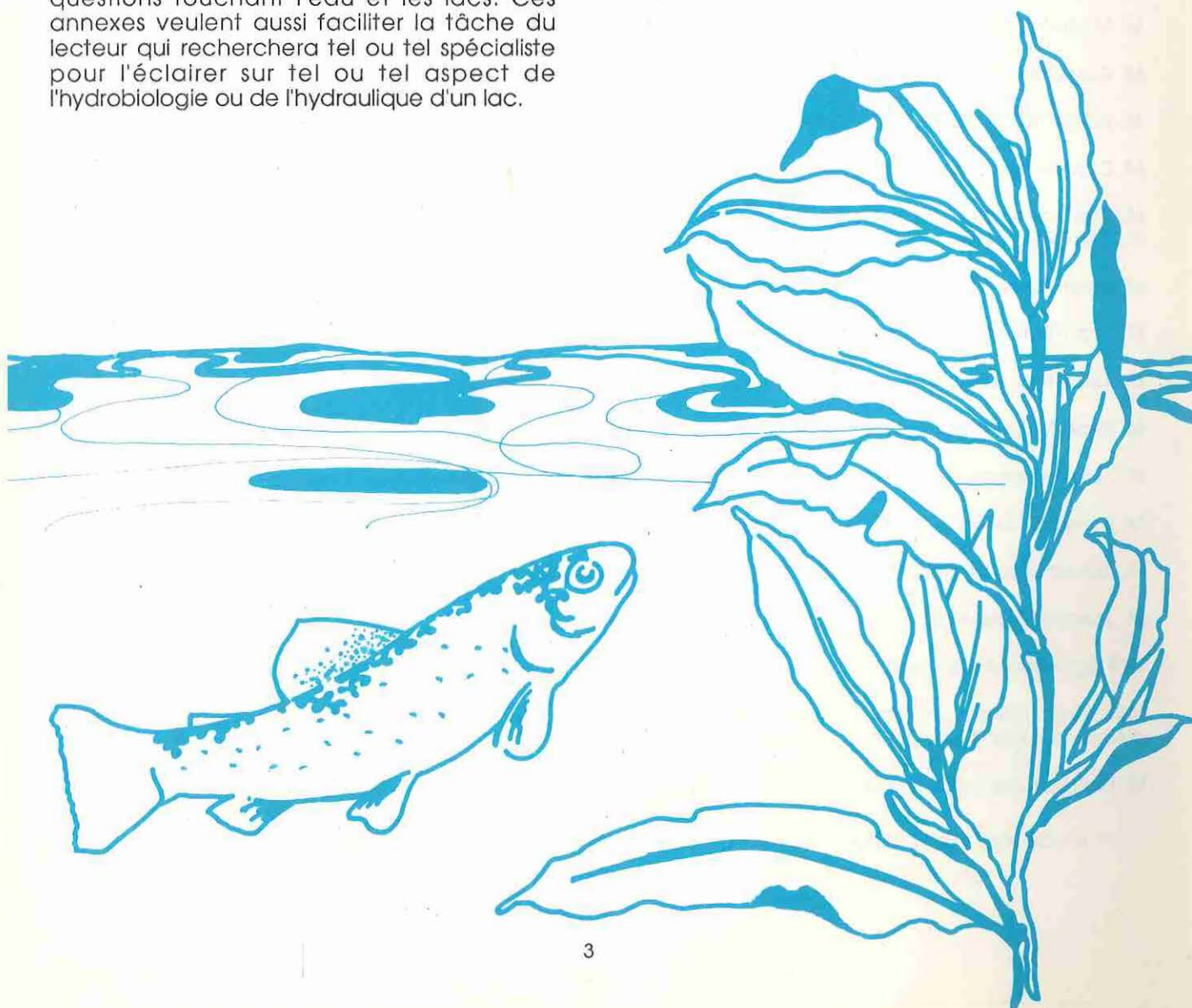
Les thèmes développés dans ce document sont assez généraux pour lui conférer la généralité qui convenait à un travail patronné par une Association à vocation internationale comme l'IGGE. Notre implantation rhône-alpine, les centres d'intérêt professionnel des membres du groupe, militaient toutefois en faveur d'une spécificité "montagne" de ce document.

Un certain nombre d'informations pratiques sont regroupées en annexe, notamment en ce qui concerne les domaines d'action des diverses administrations impliquées dans les questions touchant l'eau et les lacs. Ces annexes veulent aussi faciliter la tâche du lecteur qui recherchera tel ou tel spécialiste pour l'éclairer sur tel ou tel aspect de l'hydrobiologie ou de l'hydraulique d'un lac.

Nos remerciements s'adressent à l'IGGE qui a pris l'initiative de créer notre groupe de concertation sur les lacs et en a facilité le travail, aux administrations et aux sociétés qui ont accordé le temps nécessaire aux membres de notre groupe. Ils s'adressent tout particulièrement à l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse qui, outre sa contribution à l'élaboration du texte, a pris en charge tous les frais d'édition de ce livre technique.

Je remercie personnellement chacun de mes collègues au sein de notre groupe de travail, de leur passion pour les lacs, de leur sens du travail en commun, de leur bonne volonté à corriger ou à améliorer leurs textes.

Je remercie notamment M. Lavergne pour son travail de synthèse et d'homogénéisation des différentes contributions.





MEMBRES DU GROUPE DE TRAVAIL DE L'IIGGE*

Ont participé à la rédaction de ce cahier technique financé par l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse :

Mlle Dominique Vallod, Association pour le développement de l'Aquaculture et de la Pêche en Rhône-Alpes (ADAPRA) - Lyon.

M. Michel Bar, Syndicat Intercommunal des Communes Riveraines du Lac d'Annecy (SICRLA) Annecy.

M. Guy Barroin, Institut de Limnologie, Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) - Thonon-les-Bains.

M. Gérard Blake, Université de Savoie, Laboratoire de Biologie - Chambéry.

M. Frédéric Bonhoure, Institut International de Gestion et de Génie de l'Environnement (IIGGE) Aix les Bains.

M. Robert Bontoux, Institut International de Gestion et de Génie de l'Environnement (IIGGE) Lyon.

M. André Bouclier, Conseil Supérieur de la Pêche (CSP) - Chambéry.

M. William Bouffard, Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse - Lyon.

M. Michel Clair, Electricité de France EDF-GRPH Grenoble.

M. Guy Collillieux, Compagnie Nationale du Rhône (CNR) - Lyon.

M. Arthur Iwema, Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse - Lyon.

M. Claude Lascombe, Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse - Lyon.

M. Eloi Lavergne, Centre d'Etude du Machinisme Agricole du Génie Rural des Eaux et des Forêts (CEMAGREF) - Lyon.

M. Jean-Pierre Martinot, Parc National de la Vanoise (PNV) - Chambéry.

M. Jean-Paul Masson, Service Régional d'Aménagement des Eaux (SRAE) - Besançon.

M. Jean-Paul Meunier, Electricité de France (EDF - REAL) Chambéry.

M. René Millet, Syndicat Intercommunal du Lac du Bourget, (SILB) - Aix les Bains.

M. Jean-François Perrin, Service Régional d'Aménagement des Eaux (SRAE) - Lyon.

M. Bernard Quetin, SOGREAH, Ingénieurs conseils - Grenoble.

M. Robert Rigaud, Station d'Etudes Hydrobiologiques du Lac du Bourget, DDAF de Savoie - Aix les Bains.

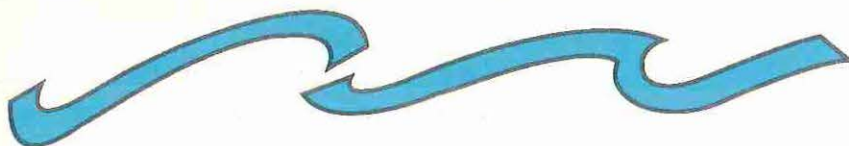
M. Joseph Rivas, Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse - Lyon.

Ont également été consultés :

MM. Marc Favaro, Robert de Rivoire, Michel Tissot, Fédération des Associations de Protection du Lac d'Aiguebelette (FAPLA).

M. François Rapin, Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (CIPEL)

* Voir en annexe V les coordonnées et activités des organismes représentés au groupe de travail.



SOMMAIRE

	Page
Chapitre 1 : Présentation du cahier technique	7
Résumé photographique	8
Chapitre 2 : Vie et fonctionnement des lacs	17
2.1 - Phénomènes thermiques et physiques	19
2.2 - Phénomènes biologiques	24
2.3 - Le plan d'eau et son bassin versant - les apports	29
Chapitre 3 : Dégradation - Protection - Restauration	39
3.1 - Une maladie des plans d'eau : l'eutrophisation	41
3.2 - Les plans d'eau et les eaux usées	44
3.3 - Les traitements curatifs des plans d'eau	50
3.4 - Diagnostic et suivi de la qualité des plans d'eau	61
Chapitre 4 : Quelques usages des plans d'eau	65
4.1 - La diversité des usages	67
4.2 - Principes d'aménagement et de gestion des petits plans d'eau	68
4.3 - Les retenues hydroélectriques en milieu Alpin	76
4.4 - Les aménagements hydroélectriques au fil de l'eau : l'exemple du Rhône	84
4.5 - Réserves d'eau potable	90
4.6 - Les lacs de haute montagne	93
4.7 - Quelques aspects piscicoles	102
4.8 - Activités autour et sur un grand plan d'eau. Protection de son environnement (un exemple : le lac du Bourget)	108
Annexes	115
I - Quelques aspects administratifs	116
II - Les fichiers lacs	119
III - Bibliographie	122
IV - Quelques adresses utiles	123
V - Coordonnées et activités des organismes représentés au groupe de travail de l'IIGGE	125
IV - Glossaire	126



Chapitre 1

PRÉSENTATION DU CAHIER TECHNIQUE



Ce document n'est pas un ouvrage scientifique destiné aux limnologues. Il s'adresse aux personnes qui, à un titre quelconque, gèrent ou utilisent un plan d'eau et pour lesquelles il se veut, non un "mode d'emploi", mais un outil de réflexion.

Il n'est pas une somme, même simplifiée, des connaissances acquises à ce jour sur ce sujet. Oeuvre collective, il exprime les préoccupations de ses rédacteurs. D'autres aspects auraient pu, pourront être abordés, d'autres chapitres y être ajoutés.

Même si certains points qu'il examine ont un caractère assez spécifique, notre souci a été d'y traiter de tous les types de plans d'eau, quelle que soit leur origine, quels que soient leurs usages.

Il n'existe pas de terminologie universellement admise en la matière. Nous suggérons la suivante, en rappelant qu'assez souvent, en tout cas ici, le terme général de "lac" englobe parfois toutes les catégories de plans d'eau.

- **Lacs** : plans d'eau d'origine naturelle pour lesquels une durée de séjour des eaux relativement longue et une profondeur suffisante permettent de définir une zone pélagique* où s'établit, à certaines époques de l'année, une stratification thermique stable.

- **Retenues** : plans d'eau d'origine artificielle à vocation prioritaire spécifique : hydroélectricité, écrêtement des crues, soutien des étiages, irrigation, alimentation en eau potable, loisirs. Elles peuvent être aménagées sur des cours d'eau (barrages), à la sortie d'un petit bassin (retenues collinaires), ou être alimentées artificiellement (réservoirs). La dynamique des eaux peut s'y apparenter à celle des lacs (profondeur et temps de séjour suffisants) ou présenter des caractéristiques bien particulières (faible profondeur, marnage important, temps de séjour bref). Dans la plupart des cas elles comportent une vidange par le fond.

- **Etangs d'eau douce** : plans d'eau de faible profondeur excluant une stratification thermique stable. Ils sont le plus souvent d'origine artificielle et utilisés à des fins piscicoles.

- **Etangs d'eau saumâtre** : plans d'eau d'origine naturelle en liaison plus ou moins directe avec la mer et les eaux continentales ce qui leur confère une salinité très variable et supérieure à 0,5 ‰.

- **Gravières** : plans d'eau d'origine artificielle créés par extraction de granulats et alimentés essentiellement par la nappe souterraine.

Ce document comportera trois parties et des annexes.

Dans la première on s'efforcera d'observer comment vivent, fonctionnent les lacs, qu'ils soient resserrés dans leur cuvette, avec des phénomènes thermiques et physiques biologiques qui s'y déroulent ; ou qu'on les considère dans le cadre plus vaste de leur bassin versant.

Constatation évidente et très actuelle, les lacs sont menacés, leur qualité se dégrade : il faut les protéger, éventuellement les restaurer. Dans la seconde partie, nous nous intéresserons à cet aspect du problème, en traitant successivement de leurs "maladies" et plus particulièrement d'une des plus répandues, "l'eutrophisation" ; leur agent polluant le plus actif, les eaux usées ; des procédures de restauration ; et enfin, des modes de diagnostic qui leur sont applicables.

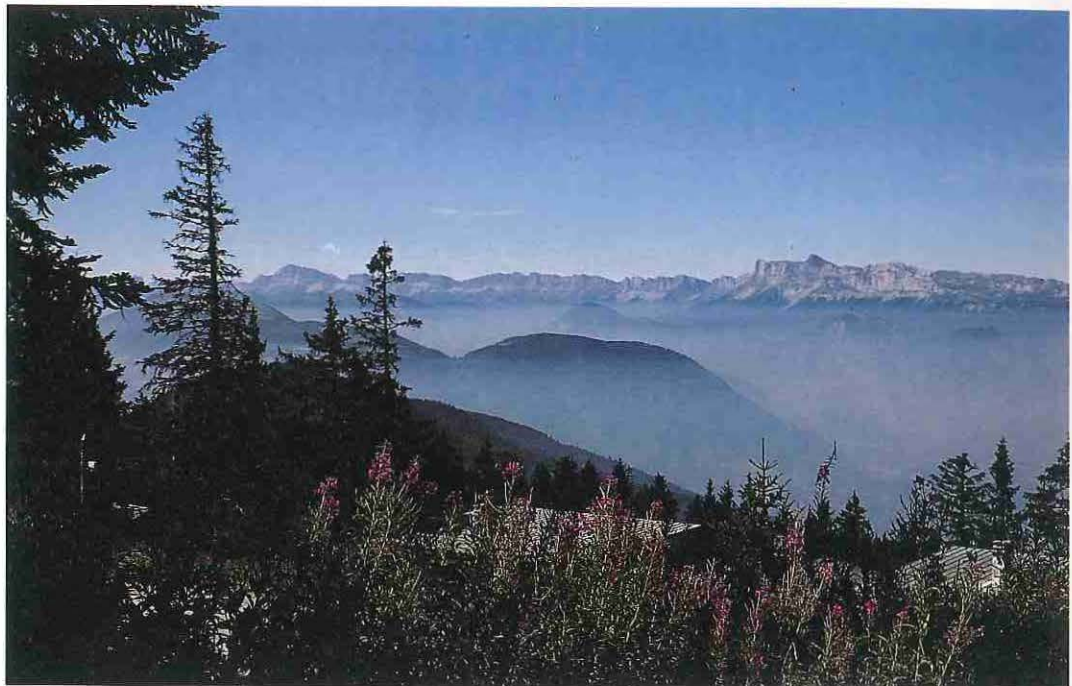
La dernière partie, après avoir évoqué la qualité totale de leurs usages, examinera plus en détail quelques-uns des plus courants : les petits plans d'eau à vocation surtout touristique ; les retenues hydroélectriques, en particulier en milieu alpin (celles au fil de l'eau des grands cours d'eau du Rhône) et leur incidence sur le milieu ; les réserves d'eau potable ; les lacs de haute montagne ; les aspects piscicoles et enfin les activités autour et sur un grand plan d'eau en relation avec la protection de son environnement.

Les annexes apporteront des informations complémentaires sur des sujets divers : réglementation, les fichiers "plans d'eau", bibliographie, les adresses utiles... ainsi qu'un glossaire permettant aux lecteurs de se familiariser avec certains termes spécifiques d'utilisation fréquente.

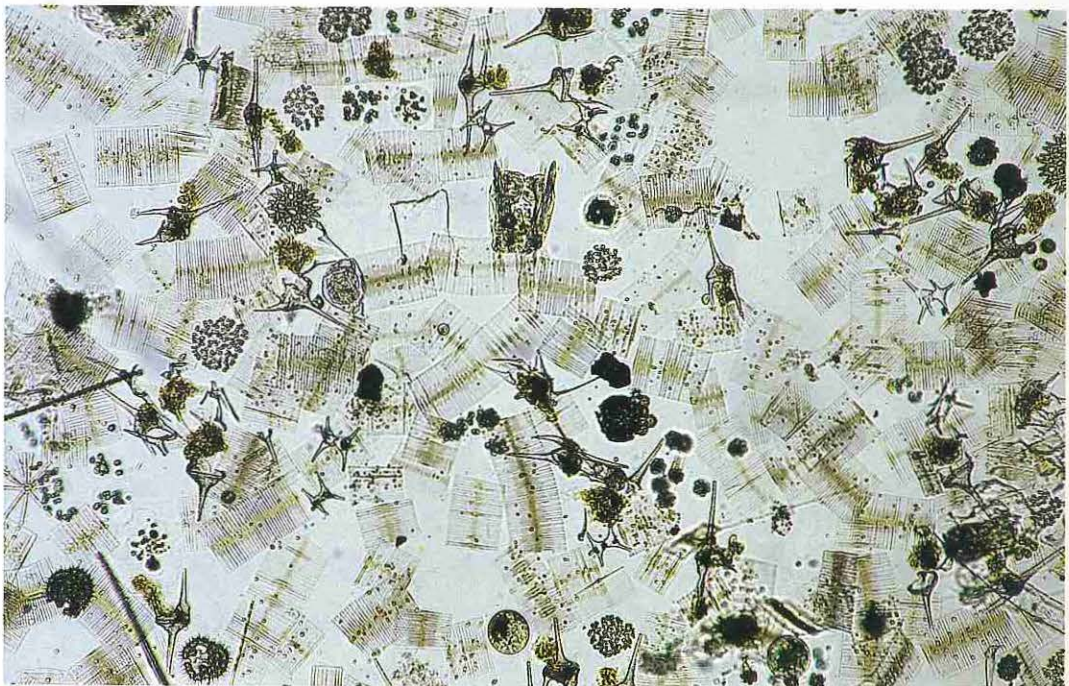
* Les astérisques placés après certains termes techniques renvoient au glossaire en annexe.



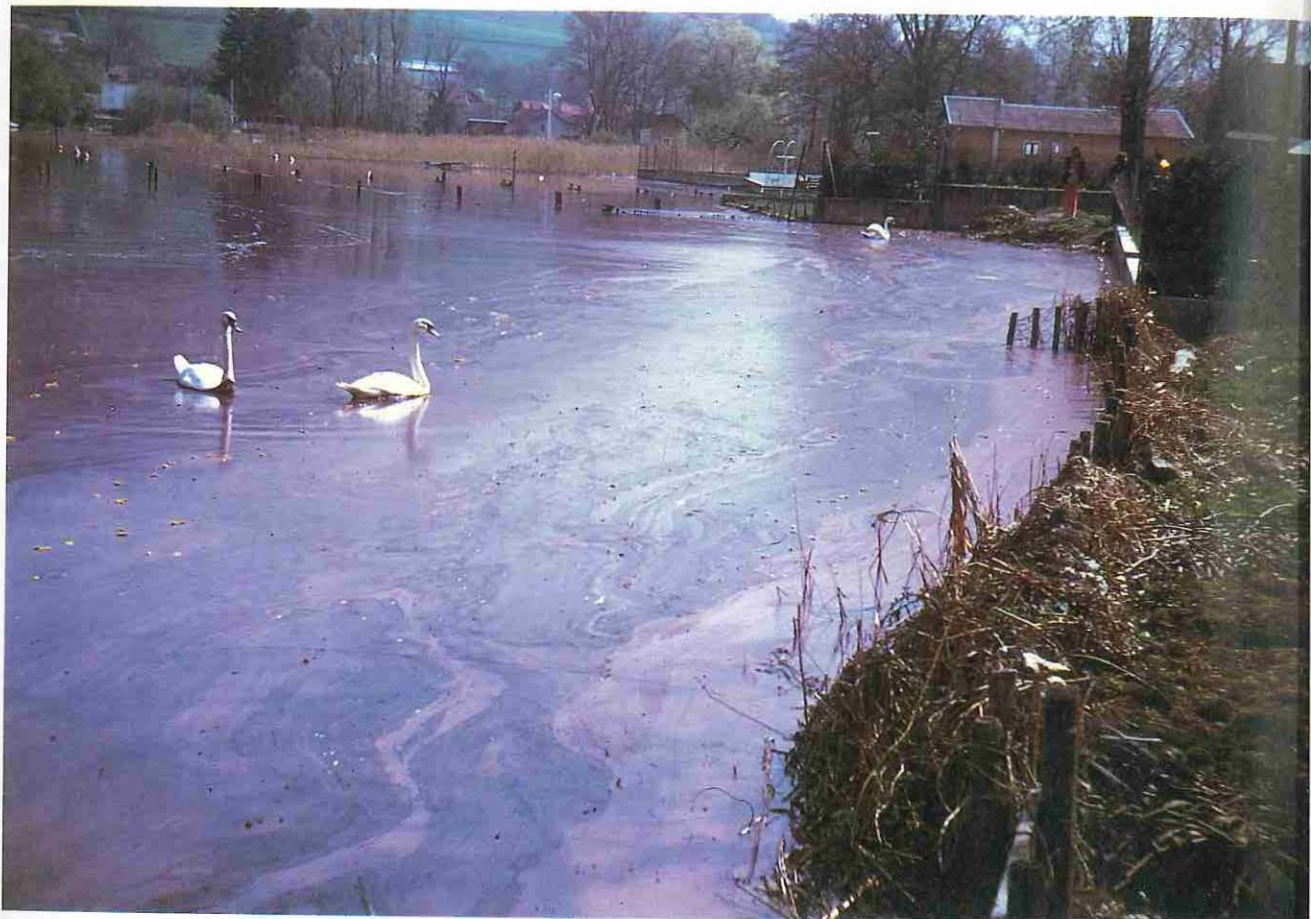
RÉSUMÉ PHOTOGRAPHIQUE



Vie et fonctionnement des lacs. L'atmosphère nous donne l'image de stratifications thermiques tout à fait analogues aux thermoclines des lacs. (Photo B. Quéfin).



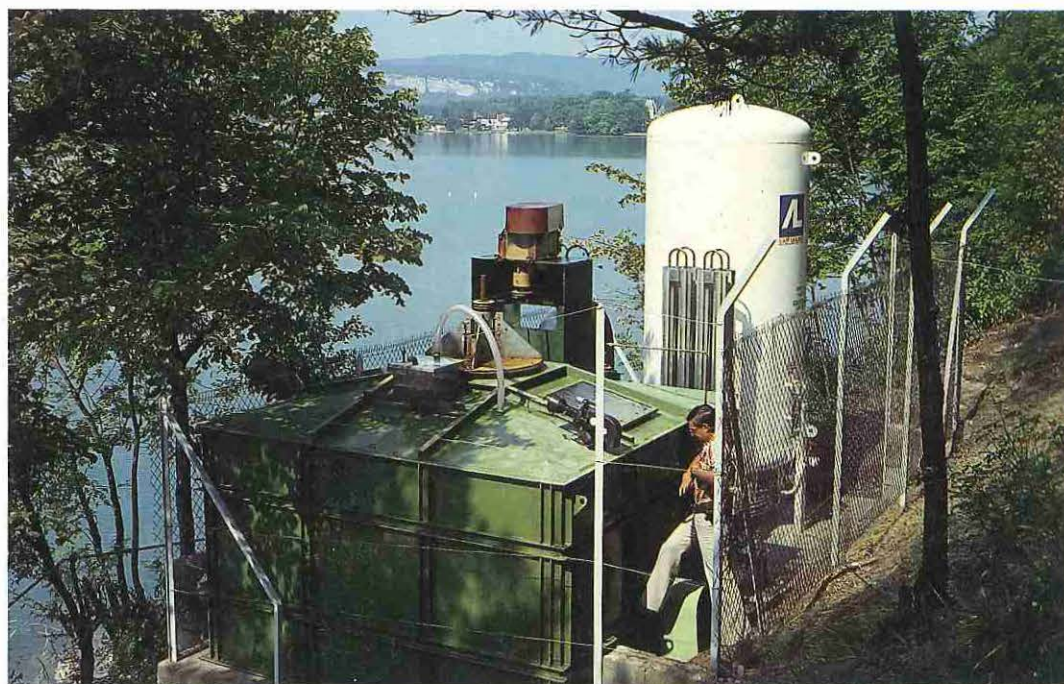
Vie et fonctionnement des lacs. Les micro-organismes végétaux en suspension dans l'eau (phytoplancton) dégagent de l'oxygène par photosynthèse pendant leur vie, durant la journée. Ils en consomment par minéralisation après leur mort (Photo G. Paolini, Aquarium du lac du Bourget).



Dégradation - Protection - Restauration. Séquence typique d'une fleur d'eau à Oscillaires (couleur rouge), résultat d'un phénomène d'eutrophisation (Paladru, Isère - Photo d'archives SRAE Rhône Alpes).



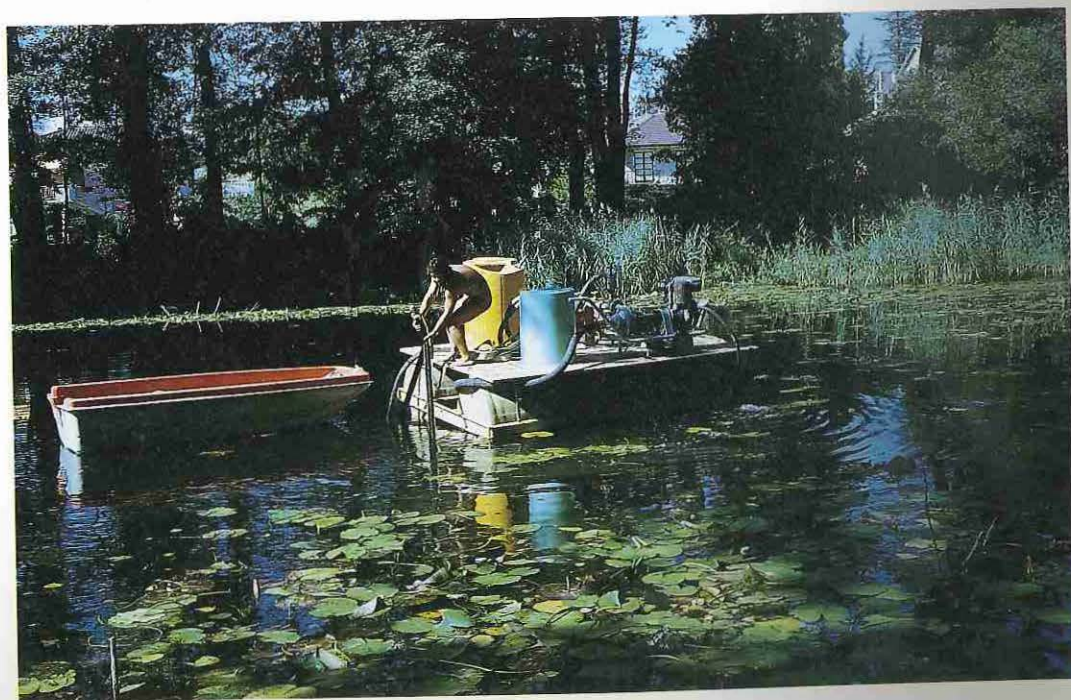
Vie et fonctionnement des lacs. Les lacs et plans d'eau reçoivent de leur bassin versant de nombreux apports polluants d'origine organique ou nutritionnelle. (Photo G. Paolini, d'après une carte en relief de l'IGN, Aquarium du lac du Bourget).



Dégradation - Protection - Restauration. Dispositif d'injection de sulfate d'aluminium dans les sédiments d'un lac expérimental des environs de Thonon-les-Bains, Haute Savoie (Photo INRA).



Dégradation - Protection - Restauration. Station d'épuration de Thonon-les-Bains protégeant le lac Léman de la pollution. Premier plan, cloche à gaz; second plan, décanteur; à gauche, bassin d'aération pour le traitement biologique des boues (Photo Agence de Bassin RMC).



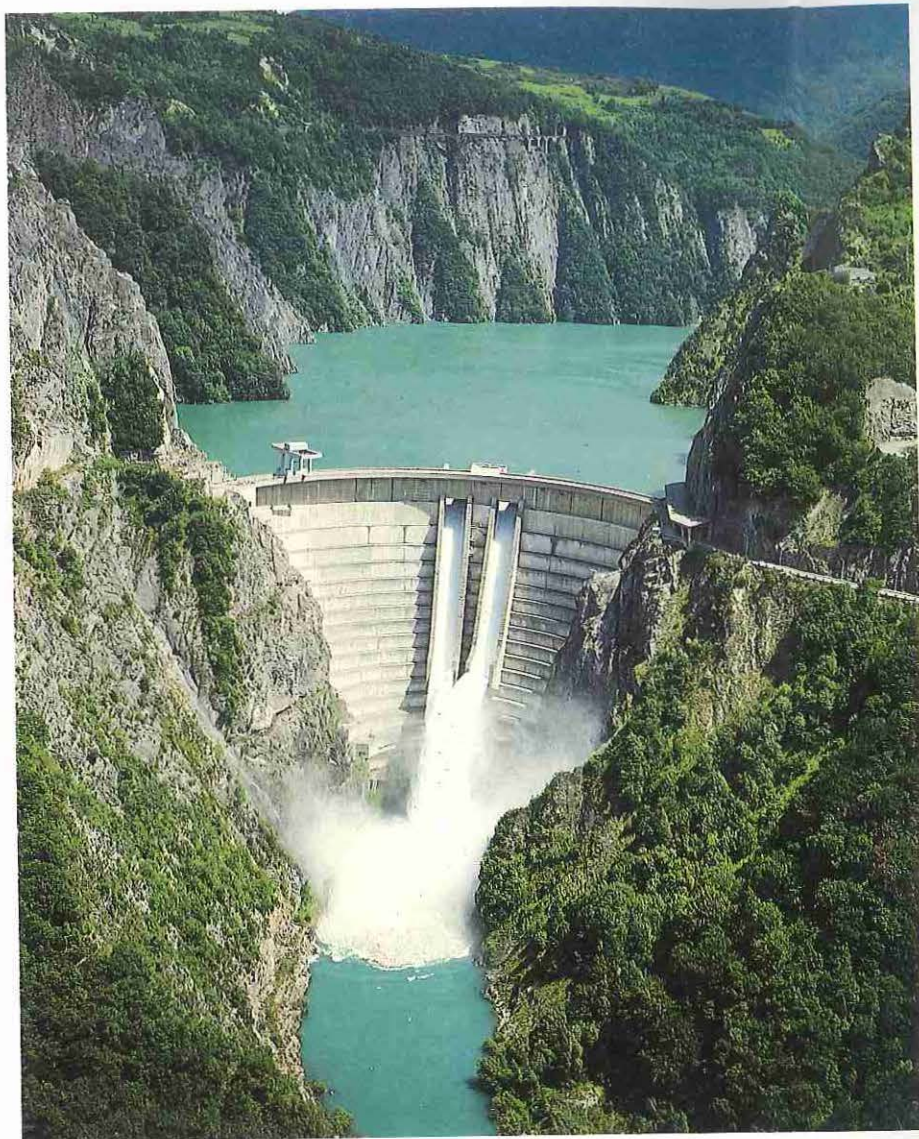
Dégradation - Protection - Restauration. Traitement curatif d'un plan d'eau par injection d'oxygène. (Lac de Nantua - Ain) (Photo INRA).



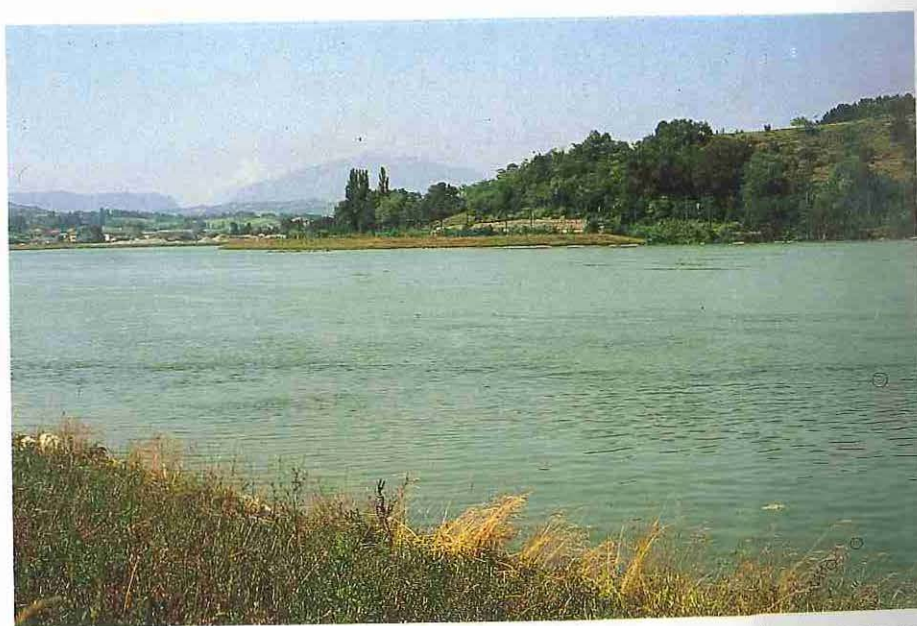
Dégradation - Protection - Restauration. Le diagnostic et le suivi de la qualité des eaux s'opèrent sur le terrain ou, pour les analyses complexes, en laboratoire (Photo G. Paolini, Aquarium du lac du Bourget).



Usages des plans d'eau. Les petits ou grands plans d'eau ont souvent une vocation touristique qui attire la foule des promeneurs et des baigneurs (Lac du Bourget - Photo R. Millet).



Usages des plans d'eau. Des lacs artificiels sont créés en amont d'ouvrages de retenues comme dans cet exemple du barrage de Monteynard (Electricité de France - GRPH Alpes - Grenoble - Photo Picardy).



Usages des plans d'eau. Aménagement hydroélectrique au fil de l'eau vu de la retenue de la chute de Chautagne sur le haut-Rhône (Photo CNR).



Usages des plans d'eau. Pompage dans le lac du Bourget en vue de l'alimentation en eau potable de la commune de Tresserve. (Photo CGE).



Usages des plans d'eau. Nautisme, baignade, bronzage : des activités courantes sur les grands lacs comme le lac du Bourget. (Photo R. Millet).



Usages des plans d'eau. Les plans d'eau abritent un grand nombre de poissons et représentent une richesse halieutique d'importance. Banc de perches soleil (Photo G. Paolini, Aquarium du lac de Bourget).



Usages des plans d'eau. Les lacs de montagne intéressent, malgré leurs spécificités d'altitude, pêcheurs juilletistes comme le montre cette vue du lac de Savine, (Savoie, 2447 m.) (Photo F. Bonhoure).



Chapitre 2 :

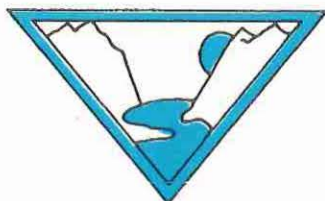
VIE ET FONCTIONNEMENT DES LACS



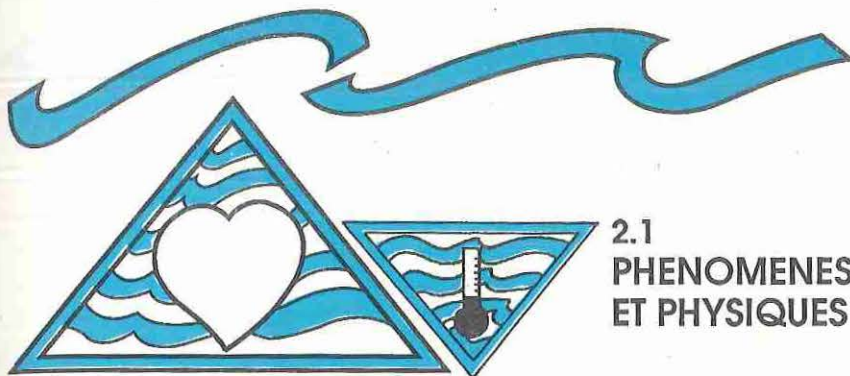
2.1- Phénomènes thermiques et physiques



2.2- Phénomènes biologiques



2.3 - Le plan d'eau et son bassin versant - les apports

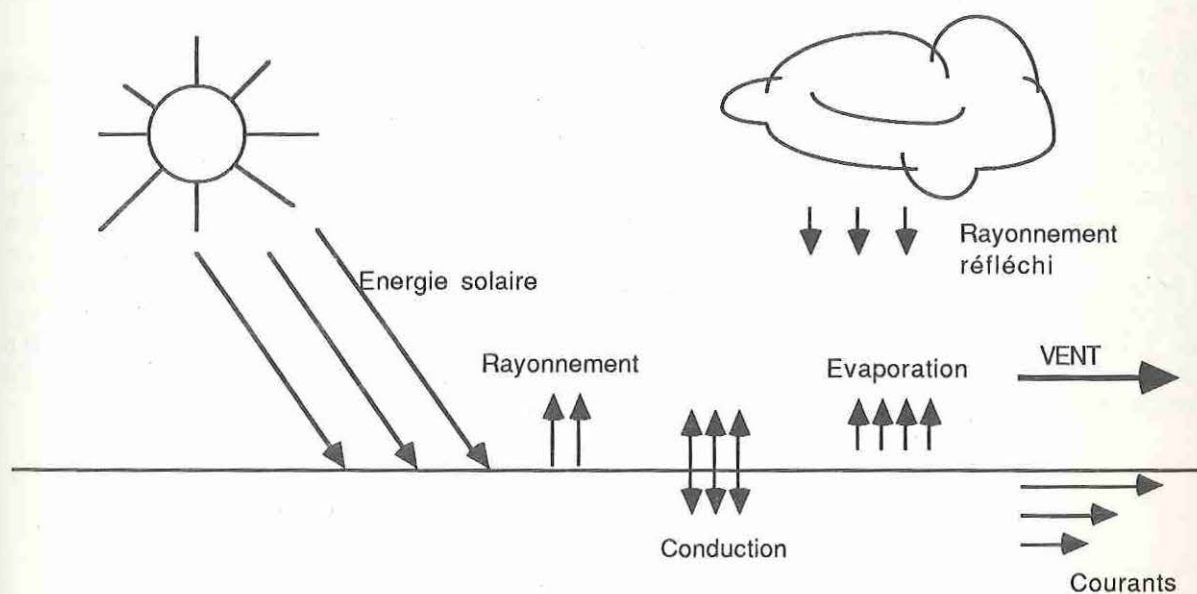


2.1 PHENOMENES THERMIQUES ET PHYSIQUES

Parce que l'écoulement des eaux est considérablement ralenti dans un lac, celui-ci donne au profane une image apaisante d'immobilité qui peut faire ignorer une réalité plus complexe. De l'eau arrive dans un lac, de l'eau en sort, de l'eau s'évapore ou s'infiltré dans le sol environnant. Entrées et sorties ne se compensent pas toujours immédiatement, et le niveau de l'eau varie dans tous les lacs.

Cela est nécessaire dans les retenues des barrages régulateurs. Par contre, des variations de l'ordre de 1 à 2 m dans le lac du Bourget ont motivé la création d'un vannage sur son exutoire.

Beaucoup de phénomènes physiques influencent l'évolution des masses d'eau d'un lac ou d'une retenue artificielle, et agissent sur l'écologie dans l'eau et sur les berges. Ces phénomènes résultent d'interactions entre l'eau et l'atmosphère, dont les principaux acteurs, mais non les seuls, sont le soleil et les vents. Ce sont ces mécanismes que l'on se propose de décrire dans les quelques pages qui suivent car ils expliquent bien les aspects, non seulement de l'évolution des masses d'eau, mais aussi de la vie aquatique.



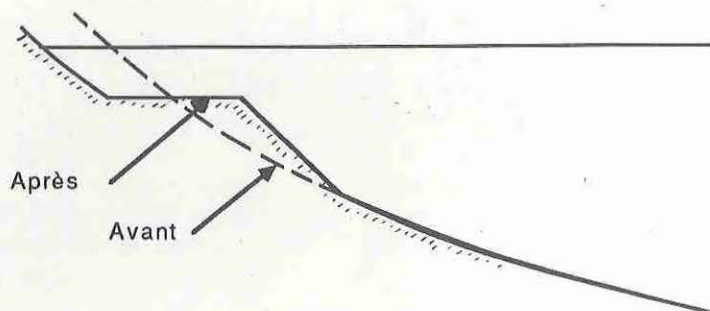
Echanges thermiques et mécaniques entre l'eau et l'atmosphère.

ROLE DES VENTS

La plus évidente manifestation de l'action des vents est sans doute la création d'une agitation superficielle, de vagues plus ou moins fortes, voire même de houles structurées avec une périodicité régulière. Hormis les difficultés de navigation, les vagues ont souvent une action destructrice importante sur les berges dites "au vent". Comme en mer, l'érosion est d'autant plus intense que les berges sont abruptes. Seuls résistent les rochers et blocs suffisamment lourds pour opposer une inertie importante aux déferlements.

Sur les berges à pente très douce, souvent formées de plages sableuses, les vagues s'amortissent très progressivement par frottement sur le fond et l'érosion est pratiquement nulle.

Si le niveau du lac varie peu, de telles berges sont parfois recouvertes de plantes aquatiques enracinées qui améliorent encore l'amortissement des vagues et stoppent l'érosion. Mais cet équilibre est parfois très fragile et les aménagements anodins comme un simple muret construit en haut de plage peuvent entraîner la disparition de cette dernière.



Formation des beines par érosion des berges

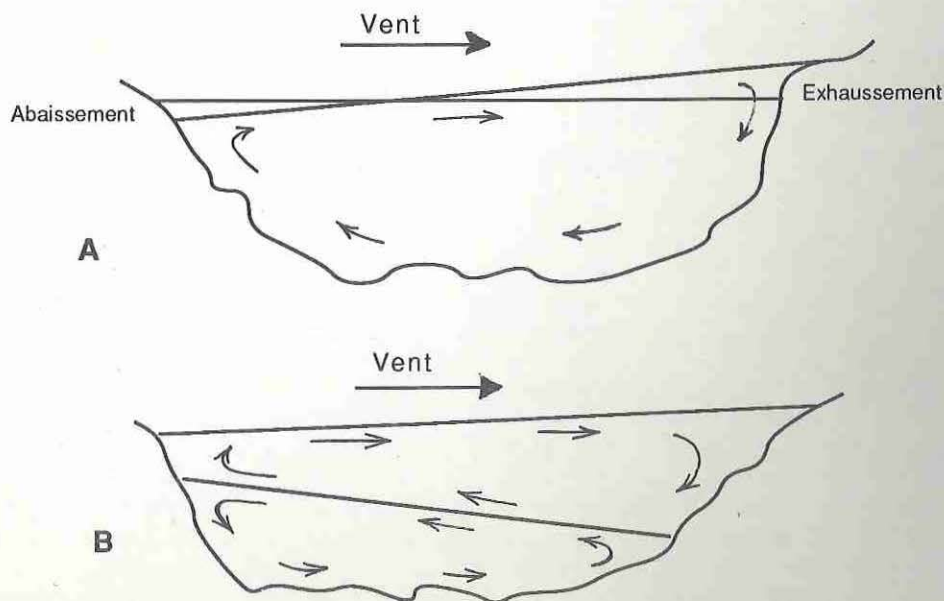
L'érosion des berges conduit en général à la formation de ce que l'on appelle les "beines" qui tendent à stabiliser l'érosion et peuvent favoriser le développement de roselières. Inversement, celles-ci freinent l'action des vagues et protègent contre une érosion plus intense.

Les vents agissent par frottement sur la surface de l'eau et génèrent des courants qui ont une grande importance pour la vie des lacs et la qualité de leurs eaux. En toute première approximation, la vitesse de ces courants est 100 fois plus faible que celle du vent. Ainsi par exemple, une petite brise de 15 à 20 km/h crée un courant de 0,15 à 0,20 km/h. Cette vitesse peut paraître négligeable ; elle déplacera néanmoins les masses d'eau de 3 à 4 km par jour. Ces distances sont à l'échelle des dimensions de nombreux lacs. Ainsi une telle brise entraînera les masses d'eau d'un bord à

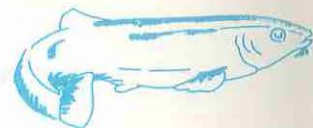
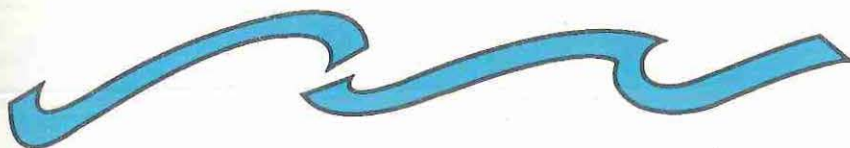
l'autre du lac du Bourget en moins de vingt quatre heures dans le sens de sa largeur, et quelques jours dans celui de sa plus grande longueur.

Ces courants contribuent à homogénéiser la qualité des eaux, à disperser les éventuels effluents qui s'y déversent, à propager l'oxygène dissous en provenance de l'atmosphère.

Si les vents entraînent les eaux superficielles d'un lac, cet écoulement tend à abaisser le niveau du lac le long de la rive sous le vent et à l'exhausser sur la rive au vent. Cet exhaussement se produit effectivement, mais il est relativement faible dans les lacs profonds. A titre d'exemple, un vent de 100 km/h provoque un exhaussement de niveau de 5 cm sur un lac profond comme celui du Bourget. Sur l'étang de Berre dont la profondeur moyenne est de 1 m, ce même vent entraîne un exhaussement de l'ordre du mètre.



Courants induits dans un lac homogène (A) ou stratifié (B).



Ce phénomène d'inclinaison de la surface libre d'un plan d'eau s'accroît avec l'intensité du vent (il croît comme le carré de la vitesse du vent). Des textes précis rapportent ainsi quelques faits exceptionnels. Le 19 décembre 1645, il souffla un vent si violent sur le lac Léman que, pendant quelques heures l'extrémité ouest du lac fut mise à sec et que, à Genève, des personnes purent traverser à pied le bras du Rhône.

L'intérêt de cet exhaussement de la surface libre sous l'action du vent est surtout la création de courants de retour dans les couches profondes d'un lac. Ce mécanisme contribue à réoxygéner les eaux de fond, du moins tant que celles-ci sont homogènes en densité. Cette circulation générale des eaux d'un lac est parfois visible en décembre ou en janvier et fait dire aux riverains que le lac se "retourne". Les eaux profondes des lacs, chargées de matières organiques en décomposition sont souvent plus sombres et mettent en évidence les courants remontant le long de la rive.

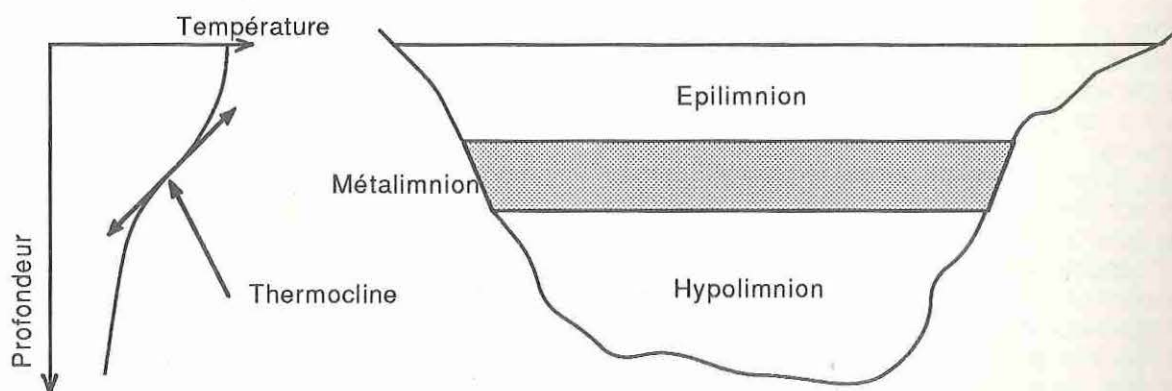
Dès que la profondeur d'un lac atteint ou dépasse 15 à 20 m, les eaux se stratifient durablement sous nos climats pendant l'été comme on l'expliquera un peu plus loin. Les circulations induites par le vent n'intéressent plus alors que la seule couche superficielle. Les couches profondes ne sont pas renouvelées et la qualité des eaux s'y appauvrit lentement.

ROLE DU SOLEIL

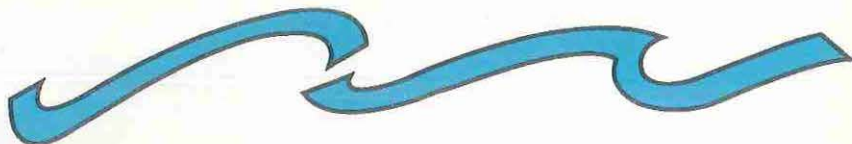
Le soleil est le deuxième acteur de la vie d'un lac. Par son rayonnement il apporte de l'énergie calorifique et réchauffe les eaux. Cette énergie est en partie reperdue soit par évaporation soit par rayonnement direct de l'eau elle-même. Ainsi le bilan des échanges de chaleur entre l'eau et l'atmosphère dépend de l'alternance jour-nuit et du rythme des saisons. Au printemps et au début de l'été ce bilan est positif et l'eau s'échauffe plus qu'elle ne se refroidit. Il s'inverse vers la fin août et les eaux se refroidissent lentement.

Le minimum de température se situe fin janvier, début février, du moins sous nos latitudes où le climat est tempéré.

Ces échanges de chaleur mettent en jeu un certain nombre de phénomènes physiques qui conduisent à la formation de ce que l'on appelle une "thermocline", et à la stratification des eaux d'un lac profond en deux couches principales appelées "épilimnion" et "hypolimnion". Le rayonnement solaire pénètre plus ou moins profondément dans l'eau selon les longueurs d'onde. L'échauffement se produit donc dans la masse sur une certaine épaisseur, de 10 à 30 m, avec une intensité décroissante avec la profondeur. A contrario, les pertes de chaleur par évaporation et rayonnement de l'eau elle-même n'intéressent que la pellicule superficielle des lacs.

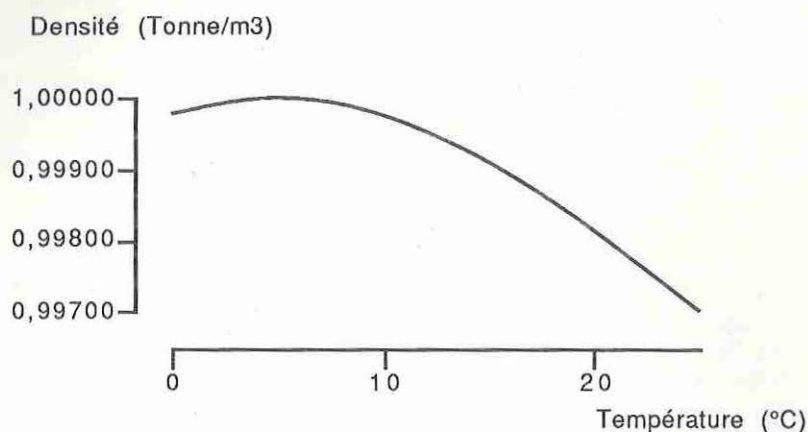


Stratification estivale des eaux d'un lac
et répartition verticale des températures



La densité de l'eau décroît quand la température augmente, après être passée par un maximum, aux environs de 4 ° C. On remarquera pour fixer les idées qu'un m³ d'eau à 20 ° C pèse 200 g de moins qu'un m³ à 19 ° C. On conçoit que les eaux plus froides ne peuvent

que s'écouler vers le fond d'un lac et que les eaux plus chaudes s'étalent en surface. Ainsi, la seule solution d'équilibre stable des eaux d'un lac est-elle faite d'un classement naturel en couches horizontales et de températures décroissantes avec la profondeur.



Variation de la densité de l'eau avec la température.

CONSEQUENCES POUR L'EVOLUTION PHYSIQUE DES EAUX

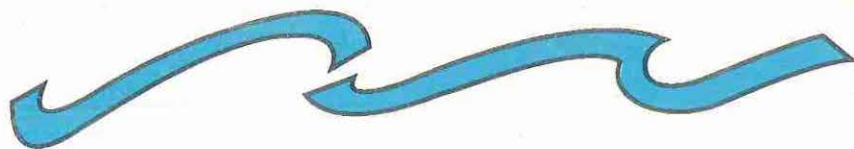
Cette propriété physique de l'eau, l'action du soleil et des vents, le rythme des saisons expliquent la stratification thermique et densimétrique des eaux dans les lacs profonds et la déstratification hivernale.

Dans la journée, le rayonnement solaire est prépondérant, il réchauffe l'eau dont la densité diminue. Par contre, le refroidissement nocturne augmente la densité d'une mince couche liquide superficielle. Cette eau, alors plus lourde que les couches sous-jacentes, va s'enfoncer jusqu'à trouver sa cote d'équilibre au sein du lac. Cet écoulement a pour effet d'homogénéiser les eaux sur une certaine épaisseur et contribue à former l'épilimnion. L'épaisseur de cet épilimnion est en grande partie fonction du degré de pénétration de la lumière dans l'eau.

Les vents, par la création de courants, mais aussi par celle de turbulences internes au lac, contribuent à cette homogénéisation de l'épilimnion (l'image d'une fumée de cigarette se déplaçant dans une pièce donne une idée de ces turbulences internes).

Dans la couche de transition appelée "métalimnion" (ou parfois thermocline), les variations de densité vont pratiquement inhiber les turbulences. Tout déplacement vertical de masses d'eau suppose en effet de vaincre des forces de pesanteur et exige une énergie non disponible à cette profondeur dans les courants ou turbulences engendrés par les vents. Ce ralentissement des mouvements explique la grande stabilité des thermoclines dans les lacs profonds. Seuls les vents très forts et soufflant assez longtemps peuvent modifier cette stabilité et, soit réduire, soit enfoncer, soit à la limite détruire, la stratification.

En hiver, le refroidissement superficiel étant plus important que l'échauffement solaire, l'écart de température et de densité entre l'épi- et l'hypolimnion se réduit lentement. Dès que l'égalité est atteinte, rien ne s'oppose plus à des mouvements ascendants : le lac se "retourne". Les eaux s'homogénéisent dans tout le lac. Les limnologues* (ou spécialistes de l'étude des lacs) disent que celui-ci est "monomictique" (un mélange par an). Il existe d'autres types d'évolution des lacs sous



d'autres latitudes dans le monde.

Les eaux de rivières affluentes à un lac ont leur propre température et leur densité. Elles s'étaleront dans la couche du lac où elles trouvent leur équilibre densimétrique. Ce phénomène est parfois visible comme par exemple à l'entrée des eaux du Rhône dans le lac Léman. Plus blanches, car plus turbides, les eaux du Rhône paraissent ne pas pouvoir pénétrer dans le lac ; le phénomène est d'ailleurs localement appelé la bataille. En fait le Rhône s'enfonce en profondeur.

Tous ces mécanismes, purement physiques, ont des conséquences importantes sur l'écologie lacustre. Circulation des eaux et turbulences propagent et diffusent toutes les propriétés attachées à l'eau : température mais aussi oxygène ou sels dissous, éventuellement matières polluantes.

Une première évidence est la suivante : la croissance du plancton*, élément de base de la chaîne alimentaire, nécessite de l'énergie lumineuse, de la chaleur et des nutriments (sels d'azote et de phosphore). Cette croissance est favorisée dans l'épilimnion.

L'hypolimnion accumule toutes les matières qui décantent et notamment les déchets organiques issus du plancton, des eaux affluentes, de la présence de poisson... La dégradation de ces déchets absorbe l'oxygène dissous. Cet oxygène ne peut se renouveler que par diffusion depuis l'atmosphère ; or la thermocline inhibe cette diffusion verticale. La vie aquatique sera perturbée si l'excès de matières dégradables entraîne la consommation de tout l'oxygène de l'hypolimnion.

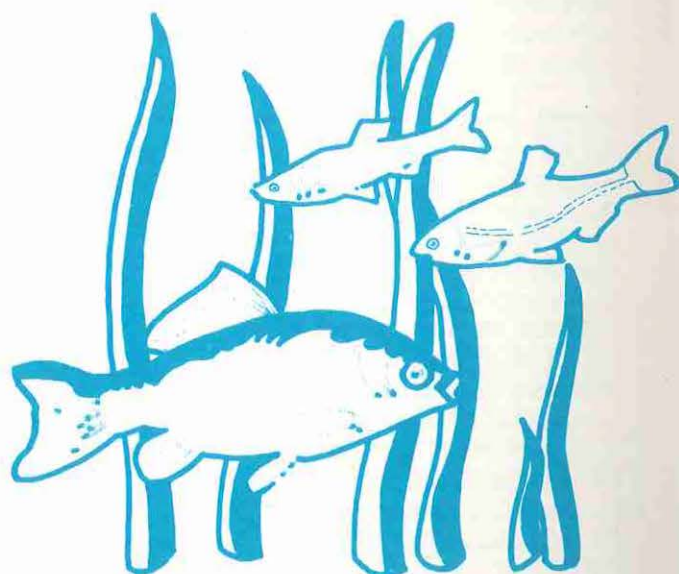
Le bel édifice que l'on vient de décrire, l'ordonnement des eaux en trois grandes couches horizontales est parfois rompu, soit par des vents forts, soit par des crues. La réalité est donc toujours complexe. On rencontre des répartitions verticales de température mettant en évidence plusieurs thermoclines séparant des couches homogènes, et souvent aussi une décroissance quasi continue de la température, comme si la thermocline remplissait tout le lac. Cette situation a des conséquences similaires sur la vie des lacs et l'absence d'échanges verticaux stoppe la pénétration de l'oxygène en profondeur.

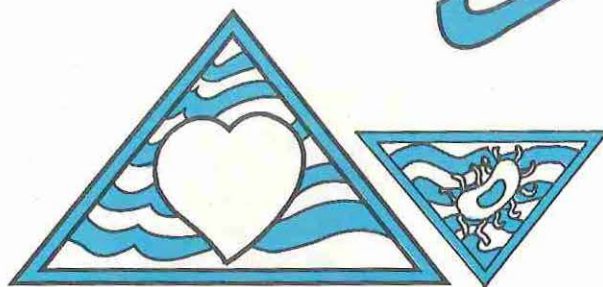
Une crue très abondante peut provoquer la vidange totale de l'épilimnion d'un lac. Ceci met en évidence les comportements très différents des lacs selon le rapport entre les

volumes d'eau qu'ils contiennent et ceux apportés par les rivières affluentes. Il y aurait lieu de prendre en considération le rapport entre la superficie du lac qui détermine chaleur et lumière reçues (donc photosynthèse* possible), et le volume de l'hypolimnion qui limite sa réserve d'oxygène dissous.

Les mécanismes d'échange eau-atmosphère sont évidemment identiques dans tous les lacs très peu profonds, mais le mélange vertical est plus facilement atteint et la stratification des eaux en très grandes couches n'apparaît plus. Mais il peut y avoir, par temps très calme, mise en place très rapide d'une stratification par suite de la moindre inertie thermique de la masse d'eau. Les eaux sont plus rapidement chaudes, ce qui accélère les réactions chimiques de photosynthèse ou de biodégradation. Ces lacs sont plus sensibles aux vents et aux crues ; ils sont donc beaucoup plus changeants ou peut-être fragiles. Ils peuvent correspondre à des lacs anciens en voie de comblement ; leur évolution est alors liée à une masse importante de sédiments vaseux et organiques, à des échanges d'eau douce avec les nappes souterraines ... Les règles générales s'estompent devant les cas particuliers.

Pour les grands barrages, se pose, aujourd'hui, la question de gérer la qualité des eaux. Après ce qui a été dit, on comprend qu'il n'est pas indifférent de vidanger les retenues par la surface ou par le fond. Les stratégies peuvent nettement différer si l'on privilégie la qualité des eaux dans la retenue elle-même ou dans la rivière aval. Mais les solutions ne sont pas encore bien maîtrisées à ce jour.





2.2

PHENOMENES BIOLOGIQUES

QUELQUES NOTIONS GENERALES

Pour constituer leurs tissus, les végétaux puisent dans le milieu environnant les éléments qui leur sont indispensables. L'analyse chimique de ces tissus permet d'en connaître la composition, et montre que celle-ci varie assez peu d'une espèce à l'autre. Ces éléments sont, pour l'essentiel : le carbone, l'azote, le phosphore, l'eau, et à des teneurs beaucoup plus faibles et plus variables selon les algues : la silice, le magnésium...

Il est aisément compréhensible, que si l'un de ces éléments disparaît du milieu environnant, la croissance des végétaux sera stoppée.

On dit d'un tel élément qu'il est "limitant". Dans la grande majorité des lacs naturels le premier élément limitant est le phosphore. Peuvent venir ensuite l'azote et le carbone.

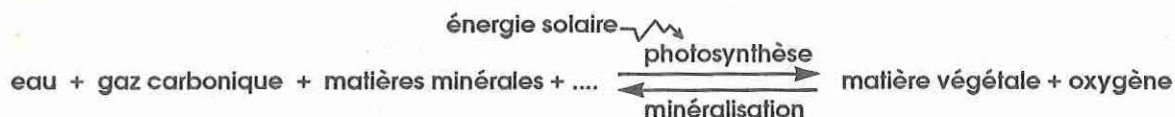
Un certain nombre de réactions chimiques traduisent la transformation des éléments minéraux dissous dans l'eau en matières constitutives

de la cellule végétale. Ces réactions sont consommatrices d'énergie, et essentiellement d'énergie lumineuse, d'où leur nom de photosynthèse*. Mais la chaleur joue aussi un rôle accélérateur.

Il faut bien noter que ces réactions sont réversibles et que la décomposition lente des cellules végétales mortes, oeuvre de micro-organismes, restitue progressivement les molécules de gaz carbonique et d'acide phosphorique : c'est la minéralisation. On soulignera encore que la photosynthèse fabrique du végétal en libérant de l'oxygène dissous et qu'à contrario la minéralisation en consomme.

Rappelons enfin que la matière végétale entre sa naissance (photosynthèse) et sa mort (minéralisation) vit, donc respire, en consommant de l'oxygène et en produisant du gaz carbonique.

D'une façon générale, l'ensemble des réactions chimiques de la photosynthèse et de la minéralisation s'écrivent :

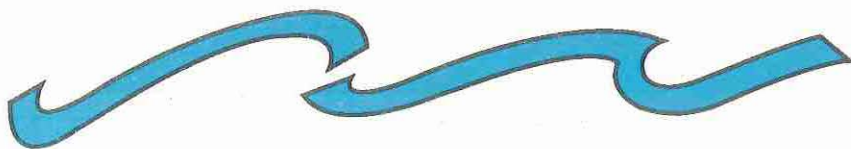


LA ZONE PELAGIQUE* OU DE PLEINE EAU

A la stratification thermique déjà décrite, basée essentiellement sur la distribution des températures, se superpose une stratification fonctionnelle biologique, liée aux phénomènes de photosynthèse et de minéralisation.

En été, lorsque la température est suffisante en surface, dans la couche accessible au rayonnement solaire (une vingtaine de mètres au maximum sous nos latitudes), intervient la photosynthèse : production de micro-organismes végétaux en suspension dans l'eau (phytoplancton) à partir d'éléments minéraux (nitrates et phosphates notamment ou fertilisants) et dégagement d'oxygène. Son intensité, donc la quantité de biomasse* et d'oxygène produite, est proportionnelle en particulier à la lumière reçue et aux fertilisants disponibles. Cette couche active, productrice de matière organique nouvelle, est dite trophogène* (ou euphotique*) ; on peut la comparer à l'épilimnion* avec lequel elle se confond parfois.

Comme toute végétation, le phytoplancton ainsi produit meurt. Il tombe alors lentement vers le fond du lac. Tout au long de cette descente, il se décompose, se minéralise, consomme donc de l'oxygène. Dans les couches profondes que n'atteint pas la lumière (on les dit tropholytiques*), la photosynthèse ne concurrence plus ce phénomène et ne remplace donc pas l'oxygène consommé. De plus, la stratification thermique y empêche tout échange avec la surface, tarissant aussi cette source. Les teneurs en oxygène baissent régulièrement et plus ou moins rapidement de l'été à l'automne où un nouveau mélange viendra reconstituer, du moins de façon partielle, son approvisionnement. Si l'activité biologique du lac est suffisante, la biomasse produite importante, autrement dit si le lac est eutrophe*, la consommation de l'oxygène est intense, surtout près des sédiments où la végétation morte s'accumule et où les bactéries sont particulièrement concentrées. Les teneurs en oxygène peuvent y être faibles ou nulles sur une épaisseur et durant un temps plus ou moins importants.



Si le manque d'oxygène se poursuit au cours du temps, les processus de fermentation de la matière organique se développent et des composés chimiques à l'état réduit s'accumulent dans les eaux profondes, au niveau des sédiments.

LA ZONE BENTHIQUE* OU DE FOND

Les sédiments constituent, en zone littorale comme en zone profonde, un compartiment du système trophique* lacustre qui accumule les éléments nutritifs : le phosphore précipite et se piège dans les vases oxydées ; la matière organique provenant du plancton se stratifie sur les fonds sous des formes chimiques plus ou moins bien minéralisées.

Ces fonds sont peuplés par des communautés d'organismes décomposeurs (bactéries, champignons) qui s'accommodent des conditions physicochimiques particulières (manque d'oxygène et présence de composés sous forme réduite). Ces organismes sont concentrés dans les premiers centimètres de la vase. Les consommateurs de la matière organique et des bactéries sont les larves d'insectes telles que les Chironomes, les Nématodes et les Mollusques.

LA ZONE LITTORALE

En bordure des lacs, à faible profondeur, les mécanismes biologiques sont fondamentalement les mêmes qu'en zone pélagique, mais les populations d'organismes sont plus complètes. Au plancton microscopique, se rajoutent des végétaux de grande taille, fixés, à feuilles flottantes ou immergées, les macrophytes* et les algues filamenteuses qui leur sont en général associées.

Ces végétaux s'étendent, lorsque la transparence de l'eau le permet, jusqu'à des profondeurs d'une vingtaine de mètres.

Les deux figures des pages suivantes montrent leurs distributions relatives en fonction de la profondeur.

De même, le tableau ci-dessous présente les principales espèces poussant habituellement en zone littorale et leurs caractéristiques essentielles.

Ces plantes comportent en général une partie souterraine pérenne (rhizome) qui leur permet d'accumuler des réserves et de développer au printemps de chaque année des pousses qui croissent ensuite grâce à la lumière et au mécanisme de photosynthèse.

Certains macrophytes utilisent en période de croissance de fortes quantités d'éléments nutritifs minéraux (phosphates, nitrates ou ammoniacale). Cette propriété explique que l'on utilise ces espèces en épuration des eaux usées. Macrophytes et algues filamenteuses sont des éléments importants de la vie du lac et participent de façon intense au réseau nutritif de l'écosystème. La disponibilité en eau, sous des conditions physiques (étendues de la zone peu profonde, température élevée, luminosité abondante) et biologiques (abondance d'éléments nutritifs) favorables, permet un développement parfois exubérant de cette végétation.

A la différence du phytoplancton qui est consommé en grande partie par les crustacés du zooplancton*, il y a peu de consommateurs directs des végétaux supérieurs que sont les roseaux (Phragmite) ou les massettes

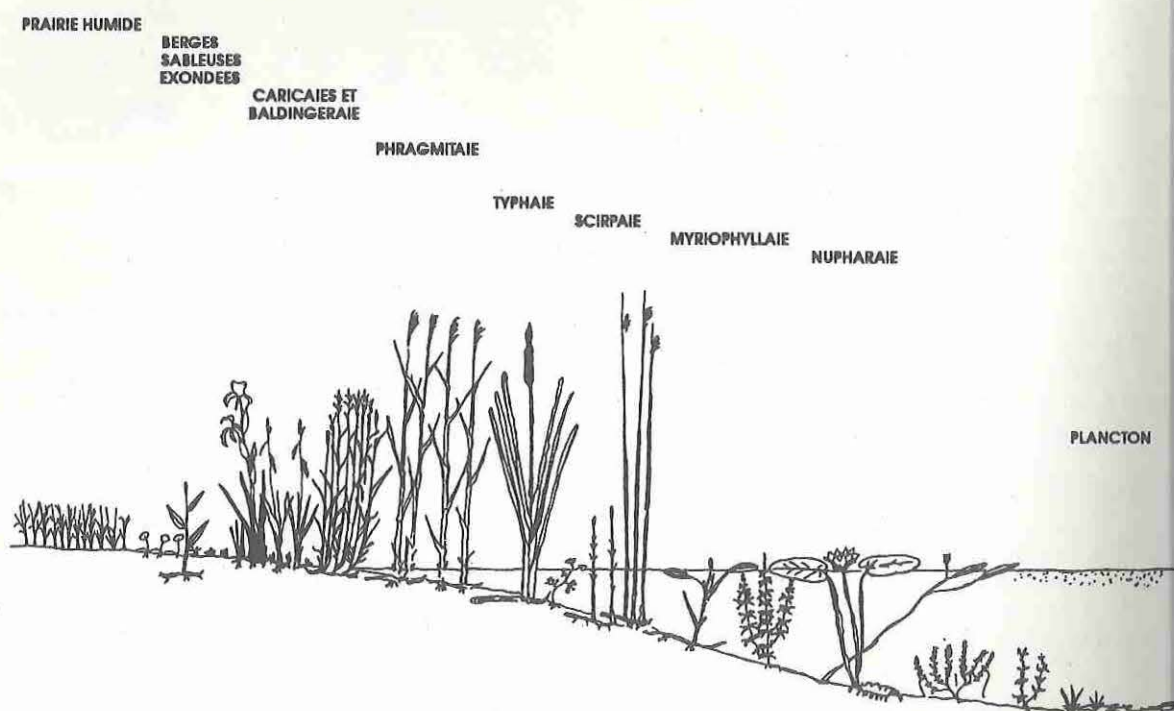
Types de plantes (formation)	Implantation	Habitat Profondeur eau	Intérêt biologique	Caractéristiques et évolution	Espèces typiques
Plantes semi-aquatiques (roselières)	Enracinées (rhizome) Feuilles, fleurs et graines émergentes	Interface eau-terre jusqu'à 1m de profondeur	Support (périphyton) abris (poissons, oiseaux)	Eléments de protection des rives. Absorption des éléments nutritifs	Roseaux Massettes (Typha)
Plantes aquatiques flottantes	Enracinées ou à feuilles et à graines flottantes	Plus au large que les précédentes	Idem mais obscurcissent le fond	Restent à l'abri du vent et des vagues. Evolution très rapide	Nénuphars Châtaigne Lentilles
Herbiers submergés	Entièrement submergées sauf les fleurs parfois	Jusqu'à 20m suivant la transparence	Nourriture (poisson), frayère. Forte activité photosynthétique	Tendance à l'envahissement dans les sites favorables (zones portuaires, plages)	Potamots Characées Elodées
Algues filamenteuses	Se développent au contact des macrophytes ou rochers	Abondantes au printemps et en été	Sans intérêt ou nocives en grande quantité	Parfois abondantes si pollution des eaux par éléments nutritifs	Cladophora Spirogyre

(Typha), si bien que la matière végétale produite au cours des saisons peut s'accumuler, participant à la transformation des bordures en marais.

Dans les sédiments littoraux cette matière est tout de même lentement dégradée par les bactéries, champignons et larves d'insectes

(détritivores, décomposeurs).

En général, les échanges entre la zone pélagique et la zone littorale du lac permet d'équilibrer ces processus de synthèse ou de décomposition, car une partie de la matière organique produite sur le littoral est entraînée vers le large.

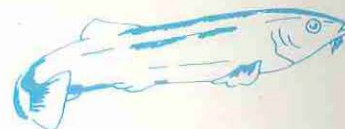
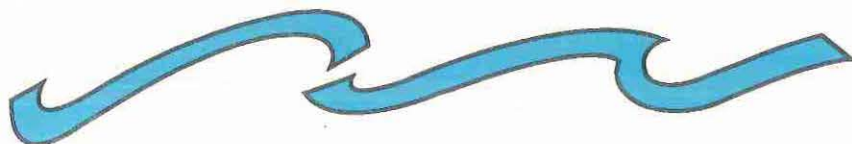


Distribution de la végétation littorale

Un développement excessif de la végétation littorale qu'entraîne l'augmentation constante en nitrates ou phosphates des eaux de surface pose souvent des problèmes aux gestionnaires de lacs ou de plans d'eau.

En effet, la masse végétale limite l'accès à l'eau libre (limitation du déplacement des poissons, activités de loisirs réduites), cause des nuisances lors des phases de décomposition de la matière végétale (manque d'oxygène, odeurs). L'extension de l'utilisation des plans d'eau comme base de loisirs (baignade, nautisme...) rend plus aiguës ses nuisances.

Mais la présence de cette végétation n'a qu'un caractère négatif. Il faut en effet rappeler qu'elle est importante pour la vie piscicole ; certaines espèces de poissons dépendent étroitement de l'abri créé par ces plantes, des larves d'insectes qu'elles supportent ou simplement des conditions de milieu favorisées par cette végétation. Il y a donc lieu parfois de prendre des mesures pour la protéger, menaçant qu'elle est par les agressions mécaniques de certaines activités de loisirs, le nautisme en particulier. Le lac d'Annecy avec ses zones de végétation protégées par des ceintures de piquets est un bon exemple.



LE RESEAU TROPHIQUE ET LES NICHES ECOLOGIQUES OU VIE ET MORT DES ESPECES VEGETALES ET ANIMALES LACUSTRES

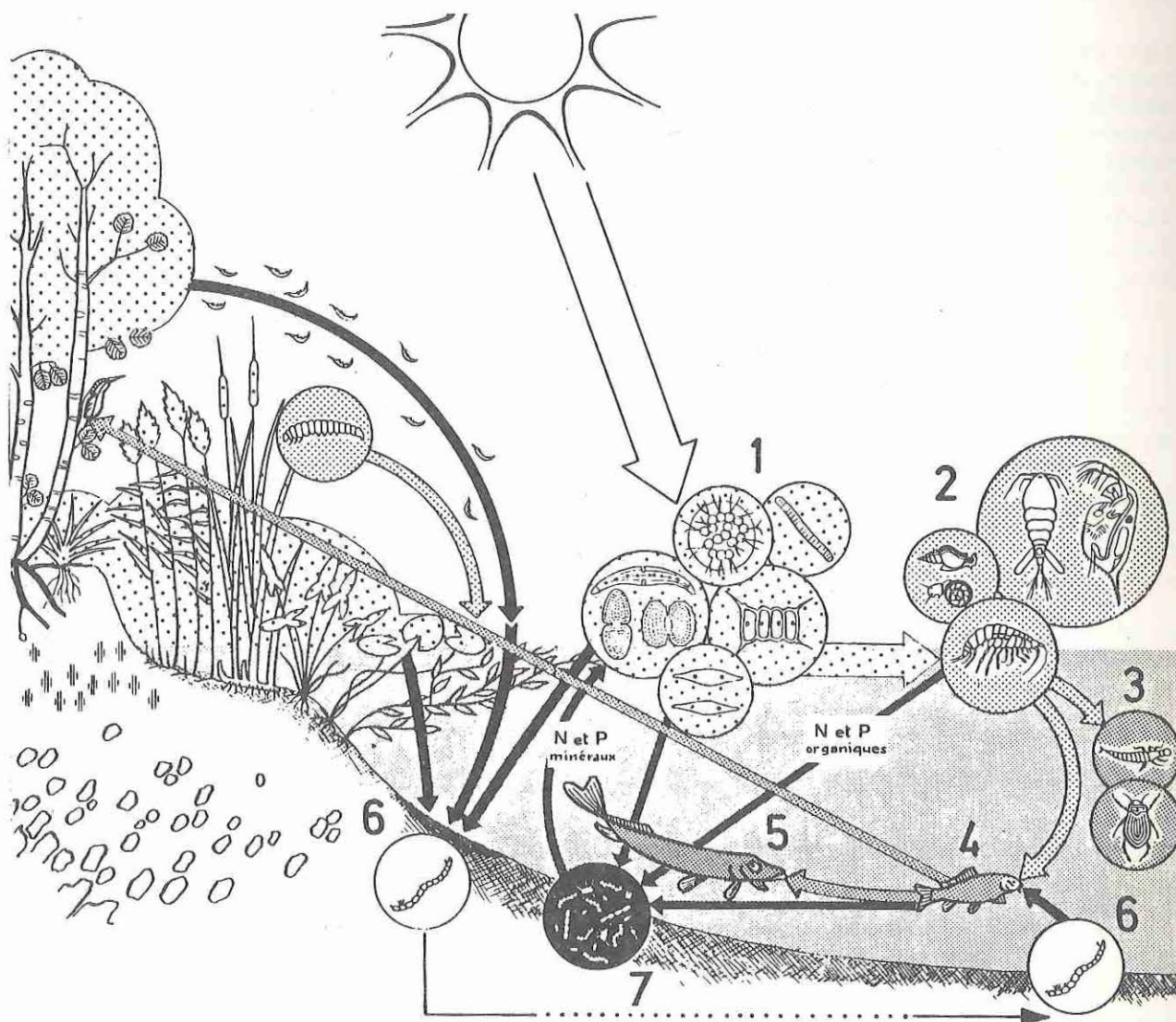


Schéma fonctionnel d'un rivage lacustre (d'après Duvigneaud, 1974)

L'ensemble des échanges de matière organique entre producteurs primaires (phytoplancton (1), végétaux supérieurs), consommateurs (Crustacés (2), larves d'insectes (3), poissons (4,5) et détritivores (6,7) (bactéries, champignons, larves d'insectes...) constitue un réseau trophique d'autant plus complexe qu'il y a de niches écologiques dans le lac, c'est-à-dire que le lac est riche en sites et en espèces différentes. Cette situation se rencontre notamment dans les lacs qui possèdent une zone littorale développée par rapport

à la zone de pleine eau.

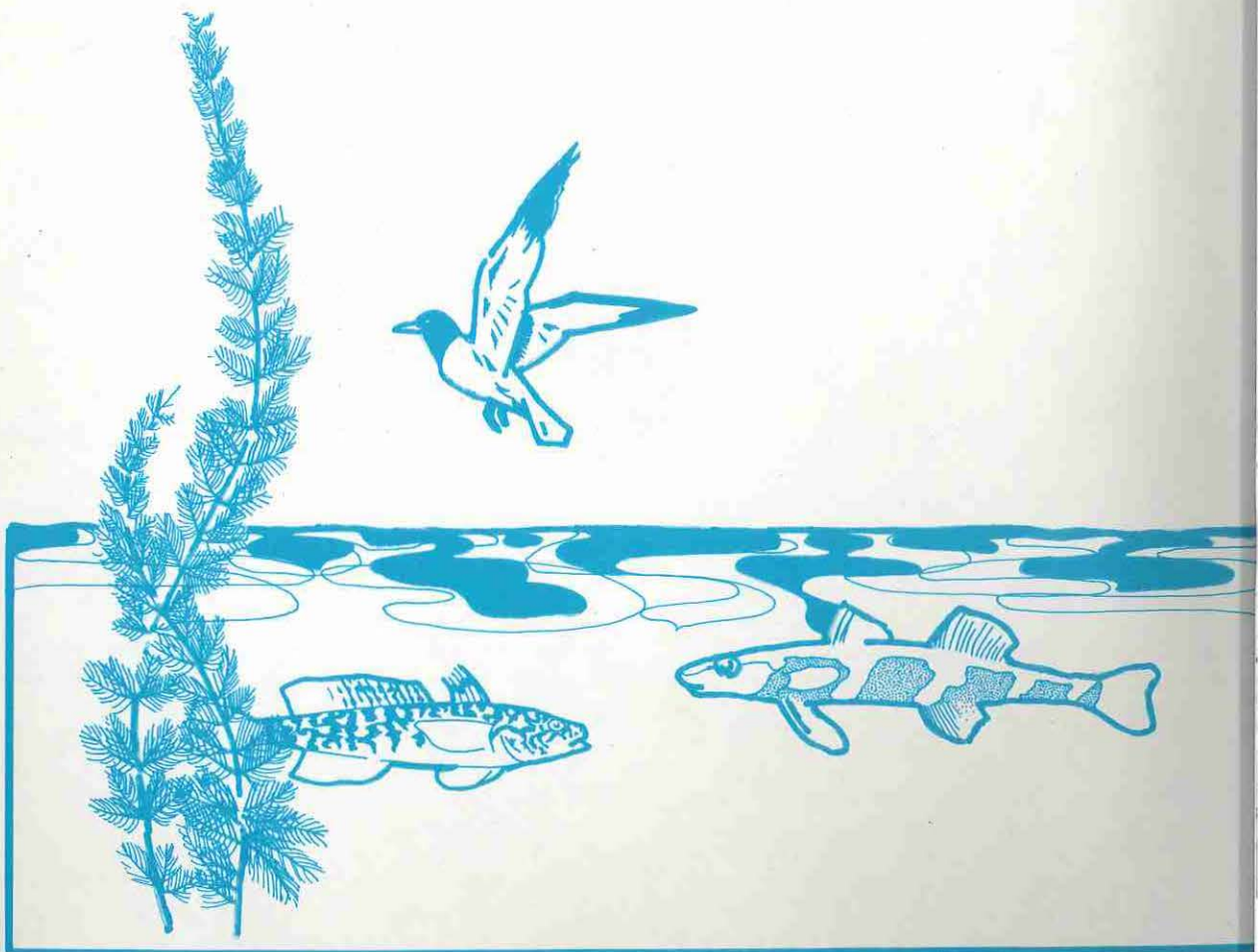
Les derniers maillons de ce réseau sont constitués par les poissons carnivores et parfois les oiseaux qui exportent du lac ou de l'étang une quantité non négligeable de matière organique. Le nombre d'espèces de poissons ou d'oiseaux est lié à la richesse du réseau trophique et à la diversité des habitats offerts. Une grande richesse écologique représentée par un réseau trophique complexe permet au lac d'être moins sensible aux perturbations dues aux facteurs externes.

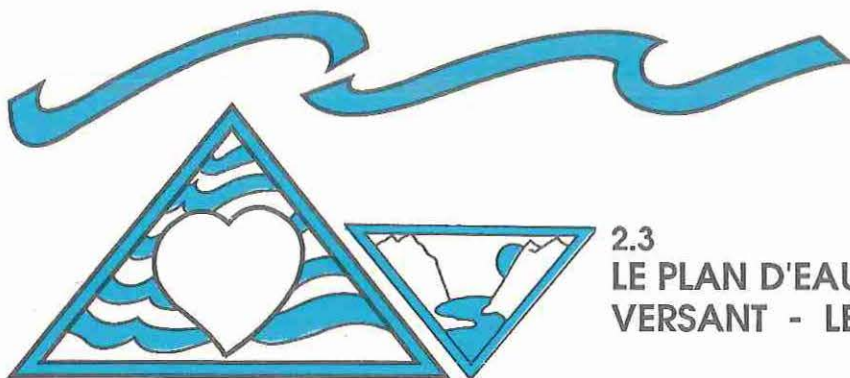
Par contre, la dégradation de la qualité de l'eau, des sédiments littoraux et en particulier des zones de frai est souvent un facteur de raréfaction de la faune piscicole dont les éléments les plus sensibles sont les Salmonidés.

Bien évidemment les activités humaines jouent un rôle majeur dans le déplacement des équilibres qui régissent les biomasses des diverses communautés, soit directement : pression de pêche, chasse, faucardage..., soit indirectement par altération du milieu physique ou de la qualité de l'eau.

On observera finalement que les diverses communautés vivantes s'organisent selon une zonation horizontale (exemple des ceintures végétales successives) et une zonation verticale (faune de pleine eau ou necton* et faune du fond ou benthos*).

A ce propos une particularité du milieu lacustre est d'héberger des poissons vivant et se reproduisant dans les profondeurs (ombles chevalier, corégones) en même temps que des espèces, communes en toutes eaux, qui peuplent la zone littorale surtout.





2.3

LE PLAN D'EAU ET SON BASSIN VERSANT - LES APPORTS.

LE BASSIN VERSANT

Un plan d'eau n'est pas isolé. Il subit les influences de son environnement et effectue avec lui des échanges. Seuls nous intéressent ici ceux qui ont une incidence sur le lac, qui y entrent, les apports ; et plus particulièrement ceux qui sont de nature à détériorer la qualité du milieu, les apports polluants.

Ces apports peuvent venir de très loin. Mais comme la quasi totalité est amenée par les eaux superficielles, l'influence sur le lac des terrains qui le dominent topographiquement, son bassin versant, est prépondérante.

Le principal élément entrant dans un lac est l'eau. Si l'on divise le volume de la cuvette par le débit de l'eau qui y arrive, ou de celle qui en sort, ce qui revient au même et est en général plus facile à mesurer, on obtient un paramètre très important pour le fonctionnement du plan d'eau : la durée moyenne de séjour des eaux. Elle peut varier de quelques jours à plusieurs années (7 ans pour le Bourget), voire plusieurs siècles.

L'inertie du plan d'eau est d'autant plus faible, autrement dit la rapidité et l'intensité de ses réactions à toute activité polluante ou de restauration sont d'autant plus fortes que cette durée est brève.

LES APPORTS POLLUANTS

La nuisance des apports peut varier en fonction de critères divers : vocation du plan d'eau (telle dose de phosphore, excessive dans une eau de baignade sera la bienvenue dans une zone de pêche), sensibilité des riverains, etc... Mais les deux paramètres les plus importants sont la nature et le volume des apports.

Pour la nature, c'est évident. Vis-à-vis de l'état des lacs, certains éléments sont bénéfiques ou neutres. D'autres présentent des dangers plus ou moins graves, et plus ou moins immédiats : pluies acides, micropolluants (pesticides), métaux lourds, éléments radioactifs, micro-organismes pathogènes. Sauf accident (le Rhin - Tchernobyl), ils soulèvent en France peu d'inquiétude ; peut-être parce que les

problèmes qu'ils posent paraissent moins pressants, ou sont plus compliqués à étudier, ou plus difficiles et plus onéreux à traiter. Et sans doute à tort : aujourd'hui il suffirait de prévenir, demain il faudra guérir.

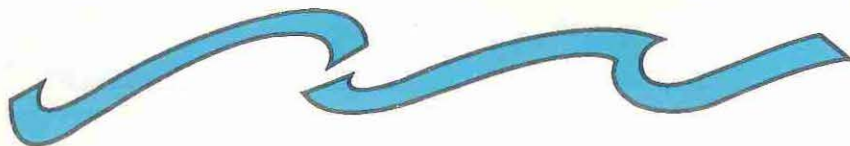
A ce jour, on s'est surtout intéressé à la **pollution organique** et plus récemment à la **pollution par les fertilisants (ou nutritionnelle)**.

La matière organique amenée aux lacs ou qui y est produite se minéralise en consommant un élément indispensable à la vie, l'oxygène. C'est sans doute, historiquement, la première pollution détectée et combattue dans les eaux. Elle se mesure par la demande biologique ou chimique en oxygène (DBO-DCO)*. Si on la néglige ici c'est qu'actuellement elle est assez bien maîtrisée, soit en raison de la capacité d'auto-épuration du milieu, soit surtout grâce aux nombreuses stations d'épuration mises en service au cours des dernières décennies. Ce point sera plus longuement examiné au chapitre 32.

Les fertilisants sont des éléments nécessaires à la croissance du premier échelon de la vie lacustre -on dit production primaire- c'est-à-dire les organismes végétaux comme le phytoplancton* et les macrophytes*. En quantité raisonnable ils sont donc indispensables. Les fortes concentrations et l'accélération des activités humaines, phénomènes relativement récents, les ont multipliés et ont provoqué la plus grave des menaces qui pèsent aujourd'hui sur nos lacs, l'eutrophisation* accélérée (voir chap. 3.1).

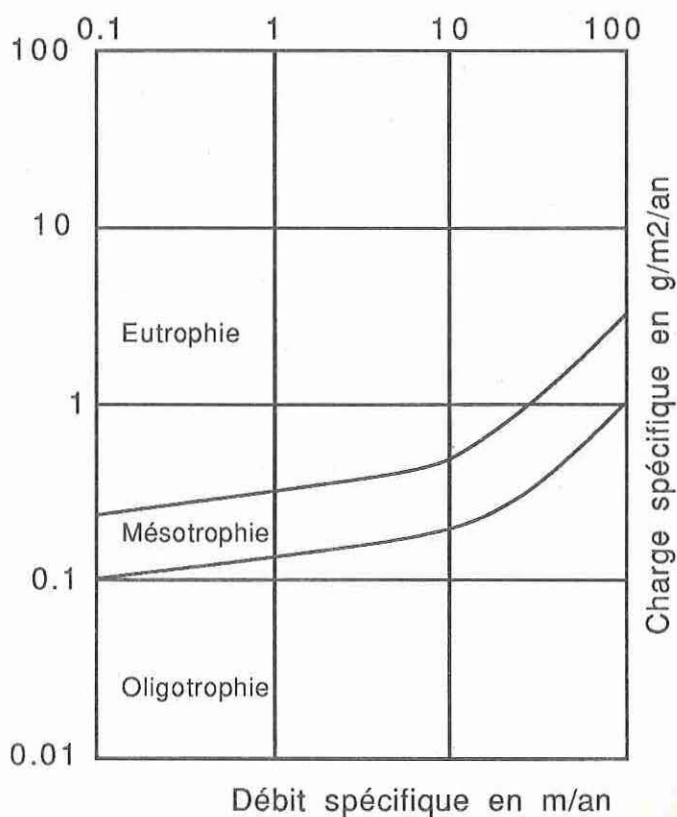
Des nombreux éléments nécessaires à la production primaire, et qui, potentiellement, peuvent donc participer à cette pollution, on ne retient en général, pour de multiples raisons, que le phosphore, l'azote et le carbone ; et encore sous certaines de leurs formes dites biodisponibles, en particulier les nitrates et les orthophosphates.

Pour ce qui est de la **quantité**, la plupart des éléments entrant dans les lacs et en particulier l'azote et le phosphore ne deviennent dangereux, polluants, qu'à partir du moment où leur teneur excède ses capacités d'assimilation normales. Il est difficile, pour ne pas dire



impossible, de préciser où se situe cette limite, tant elle dépend de nombreux facteurs et est variable pour chacun d'eux. La façon la plus simple, mais la plus imprécise, car elle ne fait en rien intervenir les caractéristiques du lac, est de se référer aux concentrations des affluents ; on a avancé comme admissibles et dangereuses des teneurs en phosphore de l'ordre de 0,05 et 0,10 mg/l ; à comparer à quelques valeurs connues : 0,30 mg/l dans la Leyse, 0,45 dans le Sierroz, tous deux affluents du Bourget ; 0,10 dans la Dranse, principal affluent français du Léman.

Une des méthodes les plus employées, due à Vollenweider, fait intervenir les apports en phosphore et la surface du lac par le biais de la charge spécifique (apports par unité de surface), la profondeur moyenne et la durée de séjour des eaux par celui du débit spécifique (quotient des apports hydrauliques annuels par la surface, ou de la profondeur moyenne par la durée de séjour) ; en pratique cela consiste à situer le plan d'eau sur un graphe du modèle ci-joint, divisé en trois zones à niveau de production croissante : oligo-, méso-, eutrophe*.

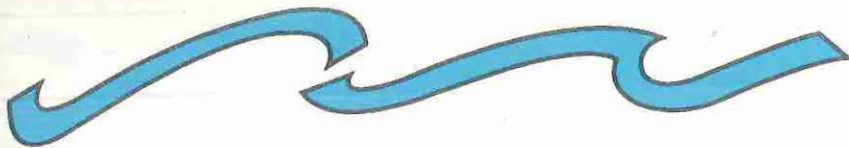


Classement de l'état trophique des lacs d'après le modèle de Vollenweider

LEUR ORIGINE

Nous examinerons surtout le cas du phosphore : parce que c'est le facteur privilégié de la pollution nutritionnelle, et aussi pour ne pas trop compliquer notre exposé. Mais les schémas restent à peu près les mêmes quel que soit l'élément considéré. La nature n'est pas totalement innocente.

On estime de 5 à 50 kg par km² et par an le phosphore que peut céder le sol ou sa végétation naturelle. Mais c'est à coup sûr, sauf cas particulier, négligeable, comparé à ce que produit, directement ou indirectement par ses déchets, l'homme, principal accusé en la matière. Sur les 2,5 à 10 kg de phosphore répandus annuellement à l'hectare pour la fertilisation



agricole, facteur essentiel des rendements culturels, 5 à 15 % seulement sont utilisés par la plante. Le reste se retrouve dans le sol sous forme plus ou moins mobile suivant la nature géologique du terrain, ou la violence du ruissellement. Les sols calcaires favorisent la fixation du phosphore sous des formes chimiques insolubles. Leur transfert aux lacs se fait alors plutôt par le biais de l'érosion. Un à cinq pour cent seulement des quantités utilisées y arriveraient, sauf conditions exceptionnelles. Pour l'azote, plus facilement soluble, ce taux de transfert serait de l'ordre de 10 à 25 %.

La production animale est élevée (8 à 12 kg de phosphore par tête et par an pour les bovins ; 3 à 6 pour les porcins). Le danger de cette pollution a été accru par la concentration de l'élevage. En particulier celui, intensif, dit "hors sol", crée un déséquilibre entre la quantité des déjections et les superficies nécessaires à leur neutralisation.

La source la plus importante des pollutions trophiques, est, sauf cas exceptionnel, à rechercher dans les activités humaines proprement domestiques, en raison surtout de divers facteurs aggravants et relativement récents. L'utilisation, sans doute excessive, de détergents à forte teneur en phosphore, a fait passer la production, naturelle d'un humain de 0,6 à 1,6 kg par an (la production correspondante d'azote est de l'ordre de 5 kg). De cette majoration de 1 kg, plus de la moitié est à attribuer aux lessives ; le reste aux produits pour lave-vaisselle et autres substances de nettoyage. Les fortes concentrations urbaines multiplient les flux polluants en un même point. La collecte des effluents par les réseaux d'égouts élimine pour le phosphore toutes chances de se fixer dans le sol. Et les stations de traitement, lorsqu'elles existent et qu'elles fonctionnent correctement, n'ont en général pas pour mission d'éliminer le phosphore. On peut y ajouter la forte imperméabilisation des sols en zone urbaine (bitume, béton, pavés, toitures) qui accroît le ruissellement gravement pollué par la circulation, le déneigement, les animaux domestiques, etc... Et n'ayons garde d'oublier les décharges publiques.

Les pollutions industrielles peuvent aussi amener du phosphore ; mais elles sont le plus souvent de nature très spécifique. Cela implique, pour chaque cas, un examen particulier. Leur importance relative est très variable d'un bassin à l'autre.

LEUR REPARTITION DANS LE TEMPS ET L'ESPACE

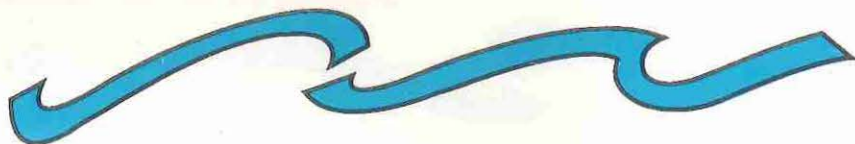
La pollution peut être régulièrement répartie sur l'année ou concentrée à certaines périodes, permanente ou accidentelle, diffuse ou concentrée, due à des apports internes ou externes.

La concentration des apports polluants à certaines époques de l'année est liée à certaines activités humaines (déplacements de populations à l'époque des vacances, travaux agricoles) ou à des épisodes naturels (crues). Elle aggrave sans doute leurs effets sur le lac, mais rend surtout les mesures de protection, les traitements en particulier, plus coûteux et moins efficaces.

Des pollutions permanentes ou accidentelles, les premières sont de loin les plus importantes en volume. Peut-être faudrait-il tenter davantage de prévenir les secondes : leur nature éventuellement très toxique, leur concentration instantanée élevée, peuvent entraîner des conséquences catastrophiques. Sur ce plan, les grandes voies de communication (voies ferrées et autoroutes) qui traversent les bassins versants des lacs sont des pôles privilégiés où les plus grandes précautions devraient être prises.

Doivent être seules considérées comme diffuses les pollutions dont les sources ne peuvent être individuellement et précisément localisées, qu'elles soient naturelles ou dues à quelques activités agricoles : cultures, élevage hors stabulation. Toutes les autres devraient être dites ponctuelles. Cela va de soi pour celles transportées par les cours d'eau, ou amenées par les réseaux d'assainissement. En font aussi partie toutes les évacuations individuelles, souvent non collectées, parfois non répertoriées et qu'on a tendance, à tort, à classer comme diffuses. Les pollutions ponctuelles ont été pratiquement les seules jusqu'ici à faire l'objet d'études. Mais on commence (cf. le Léman, la retenue d'Eguzon, de Serre de la Fare) à s'inquiéter des pollutions diffuses dont l'impact risque de devenir de moins en moins négligeable, à mesure que l'on maîtrise mieux les autres. Leur poids relatif est encore mal cerné et probablement très variable selon les bassins versants.

Les sources externes sont, comme leur nom l'indique, extérieures à la cuvette lacustre et peuvent se situer dans son bassin ou en dehors de celui-ci. Elles nécessitent dans ce dernier cas des vecteurs spécifiques : transports atmosphériques ou eaux souterraines.



Les substances contenues dans les sédiments forment les apports internes. Elles peuvent s'y être accumulées au cours des âges ou avoir été présentes à l'origine pour les retenues artificielles et sont susceptibles de rediffuser dans les eaux du lac par des mécanismes physicochimiques et biologiques complexes qui rendent très difficile l'évaluation de ces échanges et qui dépendent des conditions existantes dans la zone de contact eaux-sédiments : concentration, teneur en oxygène, pH, température...

LEURS VECTEURS

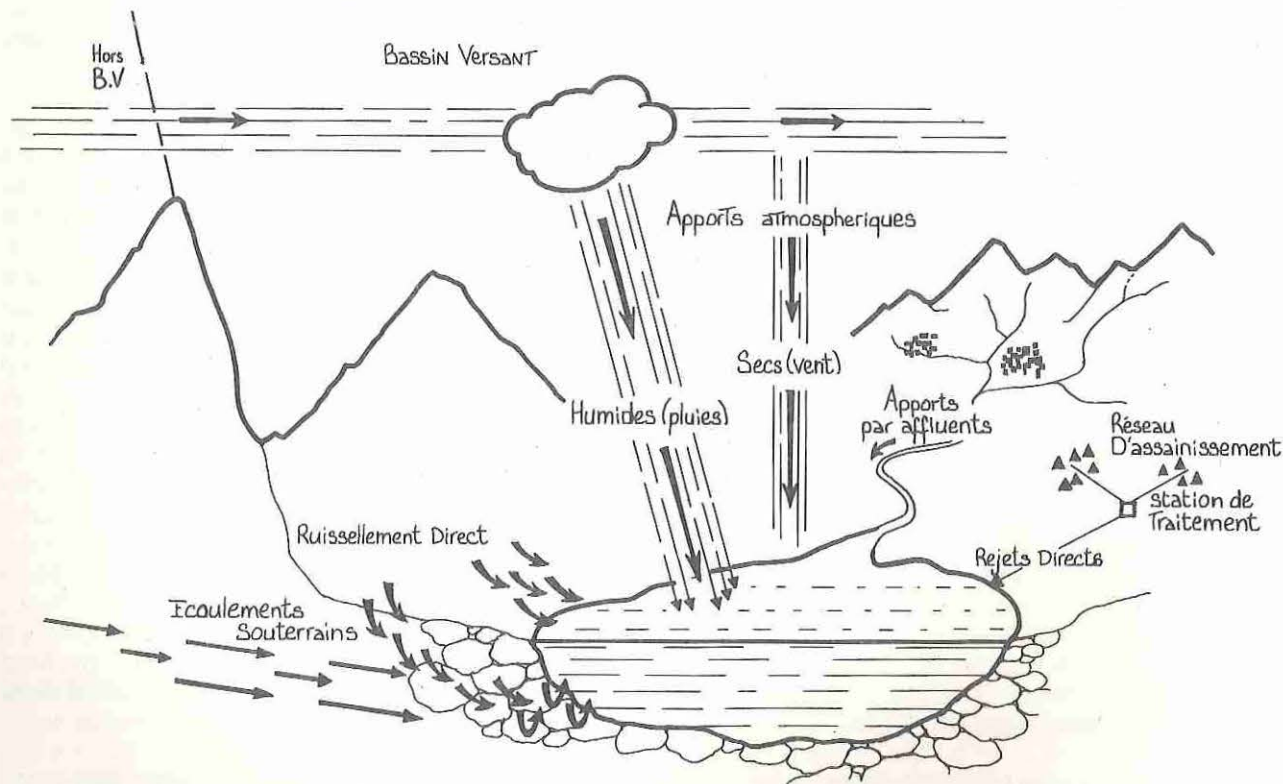
Le dessin suivant schématise le mode d'entrée des apports externes. On y distingue essentiellement deux vecteurs : l'atmosphère, les eaux terrestres, qui restent le véhicule privilégié de la pollution.

Lorsque les apports sont atmosphériques, leur origine peut être extérieure au bassin versant. L'agent du transport est la pluie ou le vent.

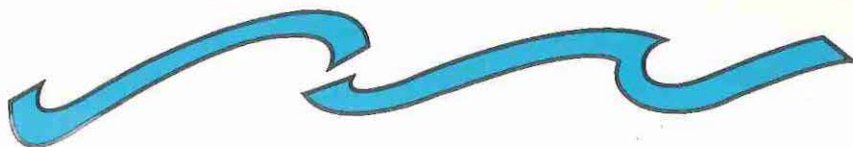
Dans le premier cas, les apports humides sont facilement évalués par l'analyse des eaux recueillies dans les pluviomètres ; dans le second, il est beaucoup plus malaisé de quantifier ces retombées sèches.

Les observations courantes en ont jusqu'ici peut-être à tort assez peu tenu-compte ; comparés aux autres apports, en particulier ceux des affluents, leur masse, sans être négligeable, est relativement faible (voir les évaluations qui suivent pour le Léman).

Les affluents recueillent des éléments provenant de sources diverses et les concentrent en un point de passage obligé, leur embouchure, ce qui en facilite la mesure sinon le traitement. Leur influence relative sur les apports totaux aux lacs est fonction en particulier de la part du bassin versant qu'ils drainent ; elle est en général prépondérante. Pour ces raisons, ils ont toujours été l'objet privilégié des études d'apports.



Circuit d'arrivée des fertilisants dans un lac



Les ruissellements directs sont en général localisés aux abords immédiats des rivages ce qui limite souvent leur importance relative.

Il n'est d'autre part pas aisé, compte-tenu des difficultés de mesure de leurs débits et concentrations, d'évaluer leur impact autrement que par proportionnalité avec les apports des cours d'eau voisins, en fonction des surfaces drainées.

Suivant la nature géologique des régions considérées, les écoulements souterrains peuvent drainer des zones assez peu en rapport avec le bassin versant du lac ou représenter des volumes très variables. Il existe des sources

sous lacustres parfaitement connues (Boubioz à Annecy), voire des lacs à alimentation presque uniquement souterraine.

Dans la majorité des cas, débits et concentrations, donc flux polluants de ces écoulements sont faibles comparés à ceux de surface. Leur évaluation fait appel à des techniques coûteuses.

Les rejets directs des réseaux d'assainissement, avec ou sans traitement, seront plus spécialement évoqués au chapitre 3.2.

A titre documentaire, le tableau ci-après donne, pour le Léman et les années voisines de 1980, la part de chaque source pour les apports en azote minéral et en phosphore :

Sources	Azote minéral		Phosphore total	
	Apports annuels en tonnes	%	Apports annuels en tonnes	%
Atmosphère	600	8	60	5
Affluents	6 300	81	1 100	89
Stations d'épuration	850	11	75	6
Total	7 750	100	1 235	100

LEUR EVALUATION

Le problème essentiel, pour le gestionnaire, consiste à évaluer la quantité d'un élément qui parvient au lac. Deux techniques sont envisageables : la mesure directe sur l'affluent; le recensement des sources sur l'ensemble du bassin. Les difficultés et les nombreuses causes d'erreurs associées à la nécessité de recueillir d'autres paramètres, plaident pour qu'elles soient conduites de pair.

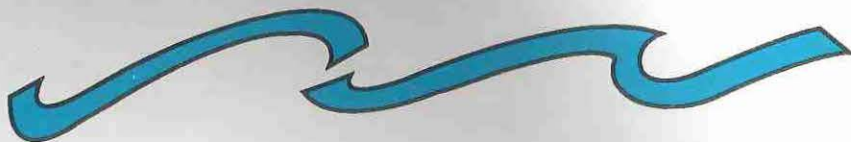
Pour examiner la meilleure stratégie de protection, une bonne connaissance d'autres facteurs est en effet nécessaire :

- l'analyse des sources de pollution : situation géographique, nature, description. Seule la méthode du recensement est ici utilisable ;

- la nature des polluants : on traque le plus souvent le phosphore, ou les autres fertilisants. Mais la méthode est applicable à tout élément transporté par l'eau ;

- répartition des apports dans le temps : sur un cycle annuel, une crue, suivant les saisons, ou, sur plusieurs années ;

- les modalités d'arrivée au lac : une arrivée près de l'exutoire (Annecy) aura un impact moindre que si elle est située à l'opposé (Le Bourget) ; les eaux chaudes resteront en surface où chaleur et lumière entraîneront une utilisation rapide des éléments apportés, tandis qu'en profondeur, où plongent très vite les eaux froides, fraîcheur et obscurité freineront la production.



Le recensement se fait en trois étapes, chacune s'efforçant à une observation aussi détaillée que possible dans le temps et l'espace, avant les regroupements logiques par sous-bassins et bassins, saisons et années. On localise d'abord les "producteurs". En leur associant leur production unitaire, en général fournie par une abondante littérature, on obtient la production brute. Une part seulement, on l'a vu, arrive au lac ; le coefficient de transfert variable avec l'élément et les conditions du milieu, est sans doute le paramètre le plus difficile à préciser.

La quantification directe des apports consiste à mesurer la masse totale des éléments considérés amenés au lac en un temps donné, en général une année : **c'est la charge annuelle**. (Divisée par la surface ou le volume du lac, elle en devient une valeur caractéristique : la charge spécifique surfacique, en $g/m^2/an$, ou volumique, en $g/m^3/an$). Cette grandeur est la somme **des flux**, masses transportées par unité de temps, produits des **débits** (volume d'eau écoulé par unité de temps) par les **concentrations** (masse de l'élément par unité de volume de l'eau qui le contient). C'est donc, en dernière analyse, ces deux paramètres que nous devons appréhender avec le maximum de précision, avant d'aborder les calculs des flux et des charges.

Les débits

La mesure des débits d'un cours d'eau relève de techniques classiques mais qui exigent du temps, de la patience et des moyens financiers. Ces débits sont par nature extrêmement variables en fonction de la pluviométrie. Ils sont évalués indirectement en multipliant la "section mouillée" du cours d'eau par la vitesse moyenne d'écoulement.

Pour obtenir un enregistrement continu, on utilise dans la majorité des cas des appareils à flotteur fournissant la hauteur d'eau. La traduction de cette hauteur en débit passe par un patient travail d'"étalonnage", à savoir une large série de mesures de vitesse bien réparties des plus petits aux plus forts débits.

Les ponts, les anciens barrages... constituent des singularités souvent favorables à la mise en place d'une station de jaugeage.

Les grandes crues sont peu fréquentes et il est difficile d'intervenir à temps pour faire des mesures de vitesse. Il faut souvent "extrapoler" la loi d'étalonnage, opération qui relève de

spécialistes et dont le résultat comporte une bonne marge d'incertitude.

En France, existent deux réseaux nationaux de stations de jaugeage permanentes correspondant sensiblement au partage des cours d'eau en eaux domaniales et non domaniales. Ils relèvent respectivement des Services Hydrologiques Centralisateurs, et des Services Régionaux d'Aménagement des Eaux (SRAE). Ces mesures systématiques sont archivées en des fichiers d'autant plus précieux qu'ils couvrent un plus grand nombre d'années. Chacun peut s'y adresser en cas de besoin. Des efforts ont été faits pour informatiser et regrouper ces fichiers. Le réseau ARHMA, géré par le Ministère de l'Agriculture, traite et conserve les données recueillies par les SRAE. Il a pour ambition de s'étendre à toutes dans un avenir proche.

Divers organismes, EDF, Compagnie Nationale du Rhône (CNR), Agence de Bassin, peuvent dans leurs zones géographiques respectives procéder à des mesures, amasser des informations. Citons localement le fichier de l'Agence de Bassin Rhône-Méditerranée-Corse qui s'efforce de centraliser toutes les données concernant le réseau hydrographique de son bassin.

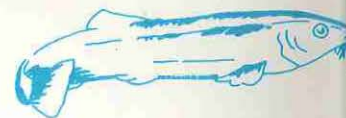
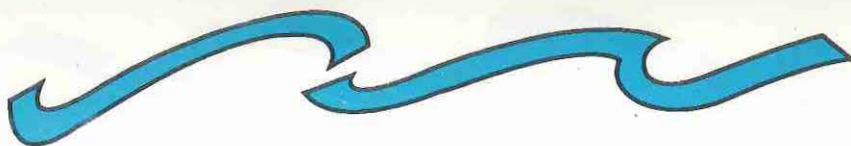
Lorsque l'enregistrement continu des hauteurs d'eau (ou des débits) n'est pas possible ou est jugé trop coûteux, on peut se contenter de mesures ponctuelles.

Reste à la limite l'approche indirecte. De nombreux modèles permettent de déduire le débit de paramètres en principe plus faciles à mesurer comme la pluviométrie, la surface du bassin, sa pente, la nature du sol, etc... Mais si on obtient ainsi des précisions acceptables pour les volumes écoulés sur une certaine durée, l'approche des débits instantanés est aléatoire.

Ces méthodes de mesure ou d'évaluation des débits permettent d'atteindre des précisions diverses en fonction de leur nature. Les précisions obtenues peuvent aller de quelques pour cent dans le meilleur des cas à plusieurs dizaines dans les pires.

Les concentrations

De la prise d'échantillon à son analyse en laboratoire se dressent divers écueils à éviter ou à amortir : la représentativité de l'échan-



tillon, sa conservation, son analyse enfin.

L'échantillon recueilli doit être **l'image fidèle** de la masse totale du fluide écoulé. Pour cela il faut choisir au mieux la section de prélèvement, le point dans la section, le moment du prélèvement et la durée des mesures.

La section d'échantillonnage doit être exactement à l'aval du bassin visé par la mesure des concentrations et aussi près que possible de celle des mesures du débit. Il faut enfin s'assurer d'une bonne homogénéité des eaux sur toute la section, ce qui suppose, en particulier, une certaine distance à l'aval de toute confluence ou de tout point de rejet important.

Si la section choisie était parfaitement homogène sur le plan physico-chimique, le choix du point d'échantillonnage y serait indifférent. Ce n'est pas nécessairement le cas. Suivant les soucis de précision, on peut conseiller diverses solutions : réaliser un échantillon moyen à partir de plusieurs prélèvements répartis sur la section, situer le point dans l'axe du cours d'eau au tiers de sa profondeur à partir du fond, ou dans la partie la plus agitée. Ce n'est malheureusement pas toujours techniquement facile.

Pour ce qui est de la fréquence, l'idéal est le prélèvement continu. Il existe dans le commerce des appareils qui procèdent à ce type d'opération, fournissant même, lorsqu'un asservissement à un dispositif de mesure du débit est possible, des échantillons pondérés par ce paramètre. Cette pondération indispensable peut se faire aussi au laboratoire, à la lecture de limnigrammes, par mélange manuel des échantillons recueillis sur des durées connues.

A défaut on procède souvent à des prélèvements ponctuels. Leur représentativité est fonction en particulier du temps et du volume d'eau écoulés entre eux. Un prélèvement par semaine nous paraît être la fréquence la plus faible admissible, qu'il est conseillé d'ailleurs d'augmenter en période de crue. Aller au-delà, à des prélèvements bihebdomadaires, ou même journaliers est sans doute souhaitable, mais coûteux.

La durée d'une campagne de mesures est au minimum celle du cycle biologique le plus courant : l'année. En s'en tenant là, on prend le risque de mesurer des phénomènes qui pour des raisons diverses, climatiques en général, s'écartent de la moyenne. Trois

années représentent pour certains un minimum. En définitive, il faut aller aussi loin que le permettent les moyens financiers mobilisables.

Certains éléments sont très fugaces, l'oxygène ou certains composés du soufre par exemple. Si on veut mesurer leur teneur exacte, il faut pratiquement procéder à une analyse immédiate après l'échantillonnage ou tout au moins prendre des mesures de conservation très strictes.

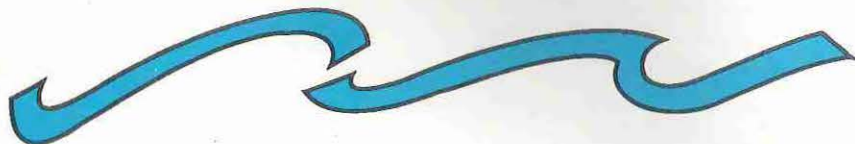
Nos éléments, et surtout les deux principaux, nitrates et phosphates, sont heureusement plus stables. Il faut tout de même prendre quelques précautions : conserver les échantillons dans l'obscurité et en atmosphère fraîche, de l'ordre de 4° C ; procéder aux analyses le plus rapidement possible, dans la semaine par exemple ; veiller à la propreté des récipients utilisés et parfois à leur nature (verre Pyrex en lieu et place de "plastiques" pour les très faibles concentrations).

Dans un souci d'atteindre une plus grande précision, ou tout au moins d'évaluer l'erreur que l'on risque, on peut procéder à des campagnes d'essais de conservation en analysant un même échantillon conservé dans les conditions de l'étude sur une période prolongée et en observant la dispersion des résultats.

Au dernier échelon du processus, la précision des analyses dépend de la qualité du laboratoire et de la méthode qu'il peut ou choisit d'utiliser. Citons, pour fixer les idées, deux seuils qu'il est nécessaire d'atteindre, souhaitable de dépasser, respectivement pour le phosphore et l'azote : 10 et 100 mg/m³ comme limite de détection ; plus ou moins 10 et 100 mg/m³ comme précision.

Le calcul des flux

Pour cette partie, purement mécanique, il a été proposé de multiples méthodes, plus ou moins basées sur l'utilisation de moyens informatiques. Elles visent toutes à affiner la somme annuelle des flux, (produit des concentrations par les débits). Si ces deux éléments sont mesurés en continu, la procédure est immédiate ; on utilise leurs moyennes calculées sur des espaces de temps appropriés et aussi courts que l'on veut. En général, seuls les débits le sont ; on peut alors interpoler les valeurs ponctuelles des concentrations, utiliser leurs moyennes par classes de débits ou



périodes homogènes, ou tenter de pallier ces approximations par l'application de lois concentration-débit ou flux-débit. Plus rarement, les mesures de débits sont aussi ponctuelles ; ce sont alors les flux qu'on interpole ; ou on utilise les moyennes des débits et des concentrations.

La précision des résultats dépend davantage de la qualité et de la représentabilité des données que de la méthode adoptée pour le calcul des flux. Cette précision n'est jamais très élevée, parce que dans l'état actuel des choses on ne peut pas toujours consacrer aux mesures nécessaires l'effort financier suffisant. Cette pénurie de moyens est d'autant plus ressentie que de telles études devraient s'étendre sur plusieurs années, puis être reprises pour tenir compte des évolutions des activités humaines sur le bassin versant.

LES PROTECTIONS

Pour ce qui est des **apports internes**, le problème est de supprimer ou de réduire les relargages de fertilisants, du phosphore surtout, à partir des sédiments. Les principales méthodes : élimination (dragage), isolement physique (interposition de matériaux neutres) ou neutralisation chimique (réoxygénation artificielle, déstratification, élimination des eaux de fond, fixations aux sels d'aluminium) font partie de l'arsenal de restauration des lacs, examiné plus loin (chap. 3.3).

Pour les **apports externes**, on aura compris que l'objectif est de les réduire. Et pour cela tous les moyens, même les plus drastiques, seront bons. Le seul problème qui se posera aux responsables, une fois évalués les apports de leurs effets, sera d'abord d'établir une priorité dans les interventions en optimisant le couple efficacité-prix, de décider ensuite jusqu'où ils veulent aller, quel prix ils acceptent de payer pour leur environnement.

Comme pour la santé de l'homme, on pensera d'abord à la prévention, ensuite au traitement, même si dans la pratique la priorité des deux facteurs est souvent inversée.

Dans le cadre étroit du bassin versant, et pour ce qui concerne le phosphore, la mesure de **prévention** la plus simple -ce qui ne veut pas dire que son application soit facile- et peut-être la plus efficace, vise la suppression ou la réduction des teneurs en phosphore des lessives (ce qu'on fait certains de nos voisins comme l'Allemagne ou la Suisse), ou la limitation de l'emploi des détergents à un niveau

juste nécessaire, en particulier dans les bassins dominant les lacs. Des améliorations peuvent aussi intervenir dans les méthodes d'élevage (choix et entretien des prairies, recueil, traitement et épandage des lisiers) et de culture (choix judicieux des engrais, de leur dosage, des périodes d'épandage et des profondeurs d'enfouissement, fossés anti-érosion, drainage adapté). Sans oublier la surveillance des dépôts d'ordures, tas de fumier, etc... quelle que soit leur importance.

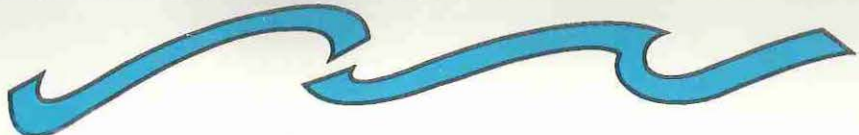
Une mention toute spéciale doit être faite à la prévention des pollutions accidentelles ; la seule méthode possible semble être d'empêcher le flux polluant d'atteindre les milieux sensibles. Cela doit être plus facile, sinon bon marché, pour les sources fixes. Les incidents récents (l'usine SANDOZ sur le Rhin, l'usine PROTEX sur la Loire) montrent que le danger subsiste. Pour les capacités mobiles, en circulation sur les routes, autoroutes ou voies ferrées, le détournement du flux potentiel, ou mieux son recueil dans les bassins de rétention qu'on s'efforce de plus en plus d'aménager, n'est pas toujours envisageable ou efficace à cent pour cent. Beaucoup de nos lacs régionaux, Aiguebelette et le Bourget par exemple, sont sous la menace permanente de voies à grande circulation.

A un niveau plus large, national, européen ou même mondial, des efforts sont faits, sans doute irréguliers et insuffisants, pour réduire les pollutions atmosphériques, qu'elles soient d'origine industrielle ou dues à des activités plus individuelles, circulation, chauffage domestique, etc...

Le traitement est réservé en général aux effluents très concentrés, domestiques pour la plupart, individuels ou collectés par un réseau d'assainissement. Cette procédure sera examinée au chapitre 3.2.

Elle peut atteindre, pour la dépollution organique et la déphosphatation, des rendements élevés, supérieurs à 90 %. Elle pourrait donc être très efficace et serait, comme en Suède, la méthode privilégiée de protection des plans d'eau, si les taux de recueil des effluents par les réseaux d'assainissement étaient supérieurs et ne laissaient pas une partie encore trop importante s'écouler sans traitement dans le milieu naturel.

Quant aux autres apports, ceux en particulier amenés par les eaux de ruissellement - ceux dus aux ruissellements directs du fait de leur dispersion, ceux dus aux rivières du fait de leur volume - on connaît peu de moyens pratiques de les traiter.

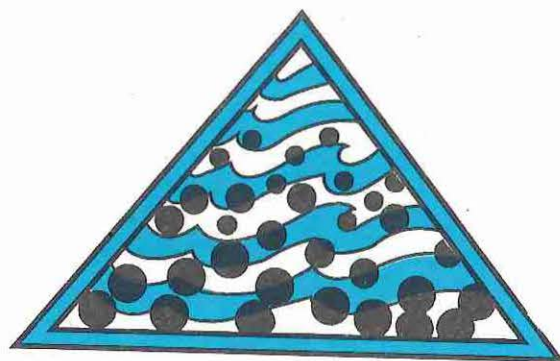


On signale toutefois quelques exemples de précipitations du phosphore par injection de sulfate d'alumine dans les cours d'eau : de telles solutions ne peuvent qu'être provisoires et dictées par l'urgente nécessité de protéger une réserve d'eau potable. En effet, les produits de traitement utilisés ne sont jamais totalement inoffensifs, surtout si le "provisoire" tend

à durer. Quant aux écoulements pluviaux urbains, la tendance actuelle est de les collecter dans des réseaux séparatifs.

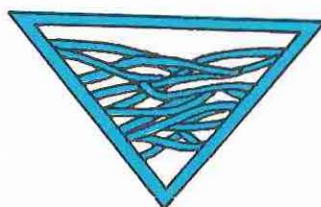
Les bassins aménagés à l'aval sont destinés à régulariser leur débit ; ils sont peu efficaces pour en réduire les pollutions, en particulier nutritionnelles.



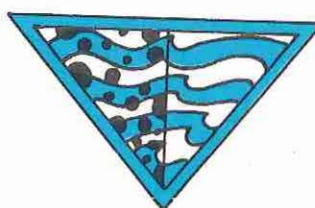


Chapitre 3 :

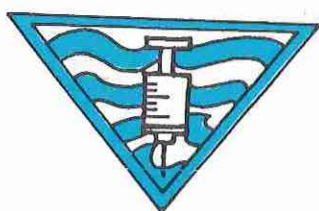
DÉGRADATION - PROTECTION - RESTAURATION



3.1- Une maladie des plans d'eau :
l'eutrophisation



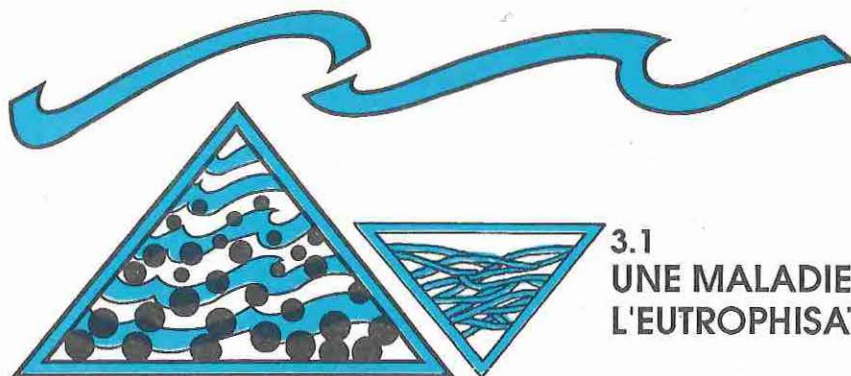
3.2- Les plans d'eau et les eaux
usées



3.3- Les traitements curatifs des
plans d'eau



3.4- Diagnostic et suivi de la qualité
des plans d'eau



3.1

UNE MALADIE DES PLANS D'EAU : L'EUTROPHISATION*

QUELQUES GENERALITES

Une maladie se définit comme une dégradation par rapport à un état normal de référence. Parmi de nombreux critères de "normalité" nous retiendrons ceux liés aux intérêts de l'homme. Sera donc "normal" ou en "bonne santé" tout lac parfaitement apte à l'usage auquel l'homme le destine. Une telle définition est séduisante en théorie. Son application pratique ne sera pas sans poser quelques problèmes, ne serait-ce qu'en raison des conflits d'usage : pour le baigneur, l'eutrophisation du lac Léman est désagréable ; elle est une aubaine pour le pêcheur de gardons. On s'efforcera alors de tendre vers un équilibre entre le plus grand nombre d'usages.

Pour les plans d'eau, une maladie est causée par un type de pollution. Nous avons vu au chapitre 2.3 qu'il y en avait de plusieurs sortes. A chacun d'eux correspond une dégradation spécifique de l'état du lac, avec ses effets propres.

Celle qui nous intéresse ici, parce que la plus menaçante en France est due à la pollution nutritionnelle, c'est l'eutrophisation.

En fin de chapitre nous aborderons succinctement quelques-unes des plus préoccupantes parmi les autres : pollutions routières (et autoroutières), pesticides et autres composés organiques de synthèse d'utilisation courante, pluies acides.

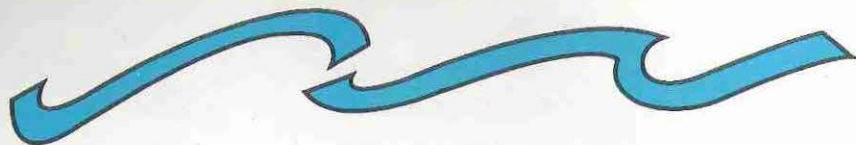
L'EUTROPHISATION : SES DEFINITIONS

Suivant le contexte et (ou) l'auteur, le terme d'"eutrophisation" et ses dérivés "eutrophie", "eutrophe", peut prendre des significations différentes. Il est hors de notre propos de les passer toutes en revue. Dans ce cahier technique on pourra le rencontrer sous deux acceptions : l'une se rapportera à l'évolution naturelle d'un lac, sans connotation péjorative, l'autre à son état "pathologique" découlant d'un excès de fertilisant, d'une pollution nutritionnelle.

Dans le premier cas l'eutrophisation désigne une augmentation de productivité d'un écosystème aquatique due à un enrichissement en fertilisant. Un lac peut ainsi passer par plusieurs stades, d'une productivité quasi nulle, à une très élevée avec de nombreux individus (abondance forte) et peu d'espèces (diversité faible), en passant par un optimum écologique (que d'aucuns appellent eutrophe) avec un équilibre production-consommation sans déchets, une abondance optimale dans une diversité maximale.

Les limnologues* font référence aux travaux d'un groupe d'experts internationaux réunis il y a quelques années à l'initiative de l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Economique). Ce groupe d'experts a proposé de classer l'état des lacs à partir de quelques paramètres caractéristiques. Cette classification est reproduite dans le tableau ci-dessous.

Paramètres	Phosphore mg/m ³	Chlorophylle a		Transparence	
		Moyenne mg/m ³	Maximum mg/m ³	Moyenne m	Minimale m
Ultra Oligotrophie	4	1	2,5	12	6
Oligotrophie*	4 - 10	1 - 2,5	2,5 - 8	12 - 6	6 - 3
Mésotrophie*	10 - 35	2,5 - 8	8 - 25	6 - 3	3 - 1,5
Eutrophie*	35 - 100	8 - 25	25 - 75	3 - 1,5	1,55 - 0,7
Hyper Eutrophie	100	25	75	1,5	0,7



Il existe toujours un enrichissement naturel des eaux lacustres en éléments fertilisants. L'état trophique d'un lac, son évolution en fonction du temps, dépendent alors de facteurs géologiques, climatiques..., de la végétation naturelle sur le bassin versant... Cet enrichissement peut devenir artificiel, par suite des activités humaines, parfois même volontaire pour favoriser une production piscicole.

Depuis quelques décennies, on a constaté dans plusieurs milliers de lacs une accélération de ce processus naturel. C'est par référence à ce phénomène que le terme d'eutrophisation définit souvent un état dégradé, pour tout dire pollué. Cette accélération est due aux activités de l'homme. Elle est involontaire, donc incontrôlée, ce qui implique inévitablement un dépassement du pouvoir "tampon" et d'assimilation du lac.

SES CAUSES - L'ACTION DES FERTILISANTS - NOTIONS D'ELEMENT LIMITANT

On a vu au chapitre 2.2 que les végétaux se constituaient à partir de minéraux contenus dans l'eau, dénommés fertilisants, et que celui d'entre eux, généralement le phosphore, qui était consommé le plus rapidement, était dit élément limitant. Plus les teneurs en fertilisants dans les eaux d'un lac seront élevées, toutes choses égales par ailleurs, plus la production des tissus végétaux, on dit production primaire, sera forte, et l'eutrophisation importante.

Les teneurs naturelles en phosphore dans les eaux sont faibles, moins de 0,01 mg/l environ dans un lac oligotrophe. Les activités humaines en mobilisent des quantités considérables, que les réseaux d'assainissement concentrent et soustraient au pouvoir fixateur du sol. Dans les rejets d'eaux usées on arrive ainsi à des concentrations très élevées, plus de mille fois supérieures à celles généralement rencontrées dans les eaux naturelles.

Un litre d'effluent contenant 10 mg de phosphore peut générer une quantité de matière végétale dont la minéralisation mobilisera la quantité d'oxygène contenue dans 150 litres d'eau. Cela montre clairement la nocivité des teneurs excessives en phosphore dans les effluents déversés dans les lacs, et l'intérêt de leur déphosphatation énergique, allant bien au-delà des rendements de 20 à 30 % des filières biologiques classiques, pour atteindre les 90 % et plus des filières spécifiques.

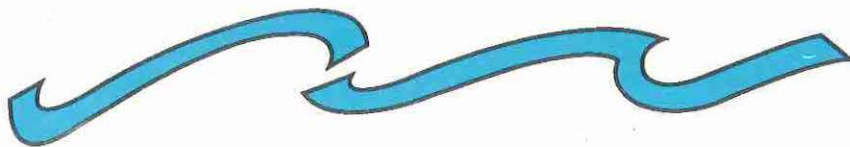
Si le rapport des concentrations de l'azote à celles du phosphore dans les eaux d'un lac tombe au-dessous de 10, ce qui est quelquefois le cas, au Bourget par exemple, c'est l'azote qui risque de faire défaut aux végétaux, devenant ainsi l'élément limitant. Il faut dans ce cas tenir compte d'un phénomène particulier. Certaines espèces d'algues microscopiques, les cyanophycées, sont capables de fixer l'azote atmosphérique, réserve inépuisable, "tournant" ainsi le caractère limitant de l'azote. Et c'est d'autant plus grave que pour diverses raisons, en particulier parce qu'elles ne sont pas consommées comme les autres espèces du phytoplancton* par les organismes animaux, les cyanophycées sont particulièrement nuisibles. Aussi peut-on préférer parfois rétablir dans un plan d'eau riche en phosphore une carence relative en cet élément en y ajoutant des nitrates ; on augmente ainsi la productivité générale mais on empêche l'apparition des cyanophycées.

D'autres limitations trophiques peuvent se manifester, notamment celles provoquées par le manque de carbone ou de silice. Sans oublier les facteurs qui induisent des limitations d'ordre énergétique comme la température et surtout la lumière, qui peut d'ailleurs finir par manquer du fait de la présence du phytoplancton. Il s'agit là d'une sorte d'autolimitation.

SES EFFETS

Les flux de fertilisants, de phosphore en particulier, qui parviennent en zone trophogène* entretiennent une forte production algale qui diminue la transparence de l'eau, lui donne un caractère désagréable à la vue et au contact et peut être gênante ou même dangereuse pour certains usages (eau potable). La diversité phytoplanctonique diminue au profit à la limite d'une seule espèce, les cyanophycées.

La production dépasse les capacités de consommation. Le phytoplancton non consommé sédimente, amorçant à l'interface eau-sédiment un processus de dégradation qui gagne peu à peu toute la zone tropholytique*. La décomposition de la matière organique consomme de l'oxygène dont le renouvellement est empêché par la stratification thermique. Les teneurs en oxygène diminuent, puis s'annulent, entraînant le remplacement des poissons "nobles" par d'autres moins exigeants, puis la raréfaction des espèces au



profit des plus résistantes, enfin leur disparition. Les phénomènes aérobies de transformation de la matière (consommation-minéralisation) sont remplacés par des phénomènes anaérobies (fermentation) avec apparition d'éléments nocifs (azote ammoniacal, sulfures). La réduction des oxydes ferriques libère une quantité de phosphore capable de participer à l'enrichissement de la zone trophogène.

A la limite, la raréfaction du nombre des espèces s'accompagne de la raréfaction du nombre des utilisations jusqu'à ce qu'il n'en reste plus qu'une seule : le lac dépotoir.

QUELQUES AUTRES POLLUTIONS

Pollution routière

Les eaux de ruissellement des chaussées, chargées de micropolluants divers (hydrocarbures, métaux,...) constituent un risque potentiel à long terme pour les plans d'eau qui reçoivent et accumulent cette pollution, comme le montrent par exemple les études récentes sur le lac d'Aiguebelette (influence de l'autoroute A 43 sur les teneurs en plomb et zinc des sédiments et de la végétation lacustre). Les sels de déneigement utilisés en hiver à titre préventif et curatif représentent de leur côté des tonnages annuels d'apports considérables, peut-être pas sans effets sur le milieu.

Composés organiques de synthèse

- Les pesticides

D'usage de plus en plus répandu en agriculture, mais aussi dans la vie quotidienne, ils peuvent s'accumuler dans les organismes végétaux et animaux et atteindre des teneurs susceptibles d'engendrer des effets négatifs sur l'équilibre biologique des milieux aquatiques, indépendamment des problèmes sanitaires liés à la consommation par l'homme des poissons contaminés.

- Les polychlorobiphényles (PCB)

D'utilisation très large (plastifiants, fluides de refroidissement, isolants dans les conducteurs et transformateurs...) ils appartiennent à la même famille chimique que de nombreux pesticides (organochlorés). Ce sont des contaminants majeurs des milieux aquatiques, s'accumulant eux aussi dans les organismes vivants.

La Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman (CIPEL) a mené une étude spécifique à ce problème dans ce lac.

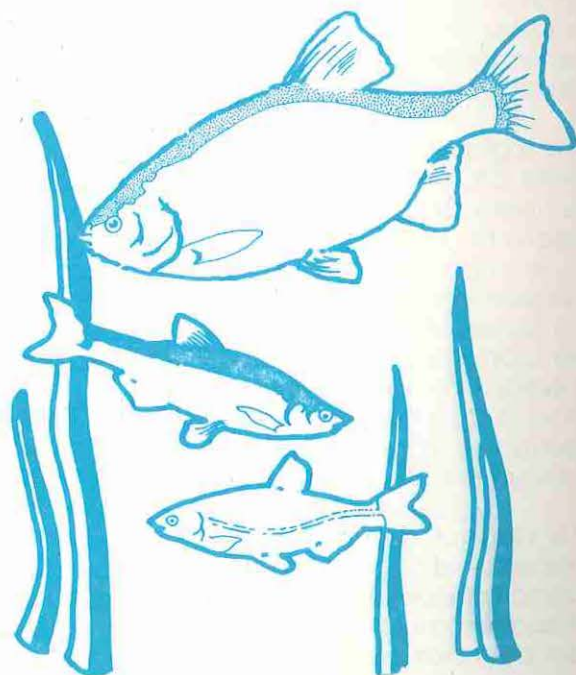
Les pluies acides

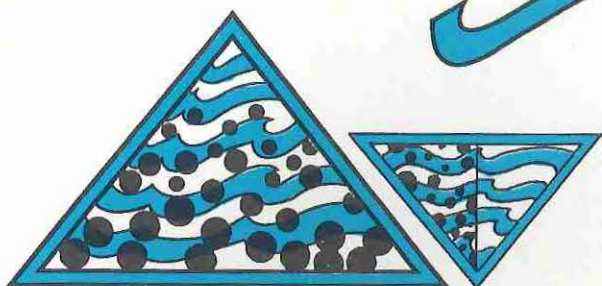
Les Canadiens et les Scandinaves ont été les premiers à constater les méfaits de ce nouveau fléau : dépérissement des forêts et acidification des lacs.

Les causes principales sont le fait des retombées acides de la pollution atmosphérique d'origine locale ou lointaine (on parle alors de pollution transfrontière ou à longue distance).

En France les vents d'Est et de Nord-Est, en liaison avec les grands bassins sidérurgiques de la Rhur, nous apportent une partie de cette pollution transfrontière.

Les plans d'eau sur substrat cristallin, aux eaux naturellement acides et peu tamponnées, sont évidemment les plus vulnérables et une surveillance doit s'exercer sur certains lacs alpins susceptibles d'être concernés (massif du Mont Blanc, de Belledonne...). Le chaulage des affluents et du lac lui-même, permet de lutter contre les conséquences de cette acidification, en attendant de s'attaquer efficacement aux causes.





3.2

LES PLANS D'EAU ET LES EAUX USEES

QUELQUES NOTIONS PRELIMINAIRES

L'eau source de vie a toujours été utilisée par l'homme à des fins multiples sans que ce dernier se pose vraiment la question de sa qualité. De nos jours, l'évolution démographique grandissante associée à un essor industriel et économique indispensable font de l'eau un patrimoine précieux qu'il convient à tout prix de gérer, économiser et protéger si l'on veut conserver une certaine qualité de vie.

Les plans d'eau et en particulier les lacs et retenues, qui nous concernent ici, représentent un intérêt socio-économique majeur par la ressource en eau qu'ils mobilisent et les activités de loisirs qu'ils accueillent.

Malheureusement, du fait en particulier de l'immobilisation parfois très longue qui est imposée à l'eau, ils sont plus difficiles à protéger que les cours d'eau, en raison surtout de leur sensibilité aux effets des fertilisants, phosphore et azote (voir chapitre 3.1).

Les eaux usées, essentiellement domestiques, constituent à coup sûr pour ces milieux la principale source de pollution. Elles leur apportent en particulier les deux éléments qu'il faut considérer comme les plus immédiatement dangereux (chap. 2.3) : les matières organiques oxydables et les fertilisants. Il importe donc de prendre le maximum de précautions avant le rejet de ces effluents au milieu naturel.

La logique impose d'adapter la qualité du rejet à celle du milieu, et le réalisme de tenir compte des possibilités financières de la collectivité. Une réglementation assez souple, que chacun pourra consulter auprès des services compétents de l'administration (Annexe 1) ou des Agences de Bassin, permet la prise en compte de ces critères. Elle prescrit divers niveaux de teneurs maximales ou d'abattelements pour l'un ou l'autre des trois éléments suivants : la matière organique, l'azote et le phosphore.

Le respect de ces règles, une fois choisies, suppose d'abord le recueil des eaux usées avec l'efficacité la plus élevée possible : c'est l'assainissement. Il faudra ensuite les débarrasser du maximum d'éléments polluants, les traiter : c'est l'épuration.

Les travaux de protection réalisés, il est conseillé de mettre en place un dispositif de suivi permettant d'apprécier l'évolution de l'état du plan d'eau et d'en tirer, au besoin, des conclusions opérationnelles pour compléter les mesures de protection. Au chapitre 3.4 on examinera quelques techniques opérationnelles de suivi.

L'ASSAINISSEMENT

L'assainissement individuel

Il englobe les deux processus, assainissement et épuration, en réalisant cette opération à la source, à la sortie de l'habitation ou d'un petit ensemble.

La méthode s'avère intéressante dans les zones d'habitat dispersé. Un sol assez perméable, tout au moins en surface, lui est favorable. La technique en est bien au point. On peut trouver documentation et conseils auprès de toutes les Agences de Bassin.

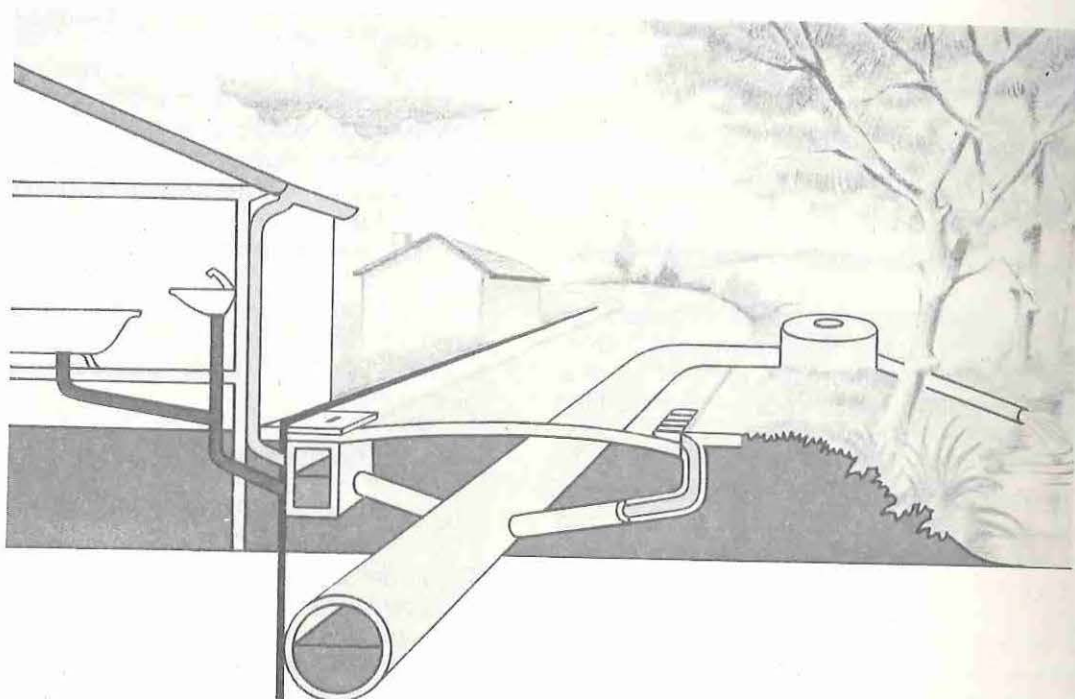
L'assainissement collectif

Il permet la collecte, le transport et l'évacuation des eaux usées et pluviales par des réseaux unitaires ou séparatifs.

- Réseaux unitaires

Généralement les plus anciens, ils visent l'évacuation au loin de toutes les eaux. Ce sont les réseaux de la plupart des centres urbains (villes de Paris, Rouen, Reims, Lyon...). Ils ne comportent qu'une seule conduite où sont admis tous les effluents, notamment les eaux pluviales et les eaux usées.

Par pluies intenses ou lors d'orages, d'énormes volumes d'eau sont collectés et les débits dans ces égouts deviennent considérables. La totalité de ces eaux ne peut pas être acheminée vers les stations d'épuration, il faudrait des tuyaux d'un diamètre irréaliste, ni y être traitée, car les ouvrages d'épuration actuels ne sont pas conçus pour accepter ces très fortes pointes. Les déversoirs d'orage permettent de délester les eaux et de protéger les stations ; mais ils rejettent au milieu naturel, et sans traitement une part importante des effluents.



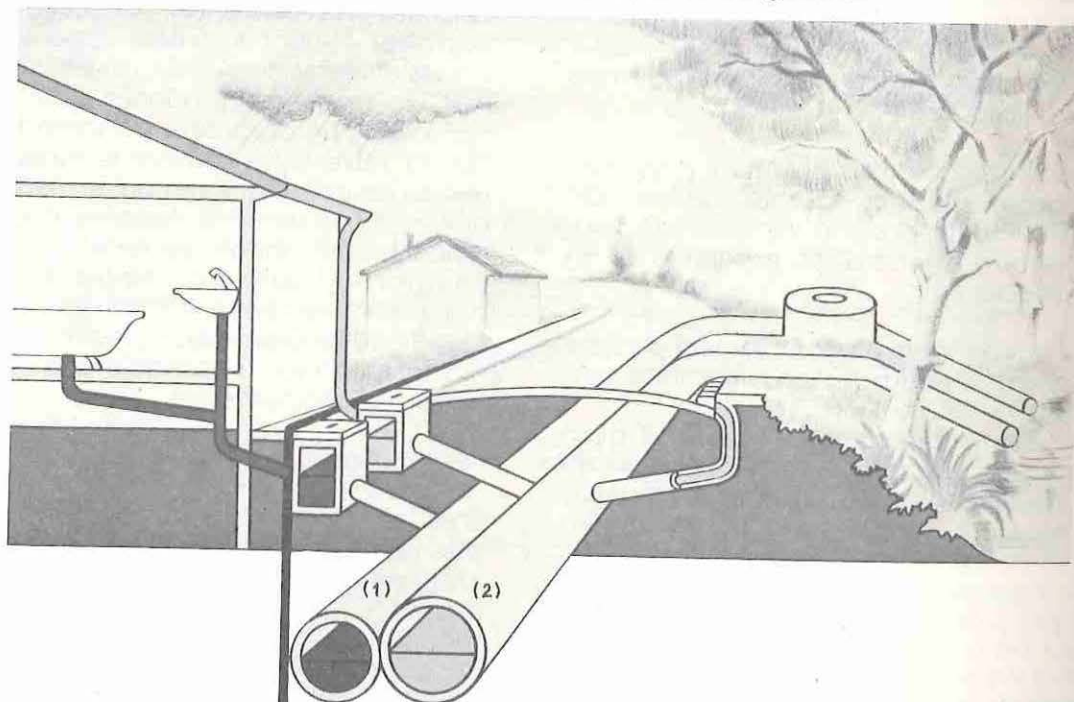
Assainissement collectif : le réseau unitaire

Lorsque le rapport des débits de temps de pluie à ceux de temps sec reste raisonnable (2 à 3) il est possible d'envisager le traitement de la totalité du flux (effluents domestiques et eaux de pluie). Lorsque ce rapport devient supérieur à 3, on peut en stocker une partie,

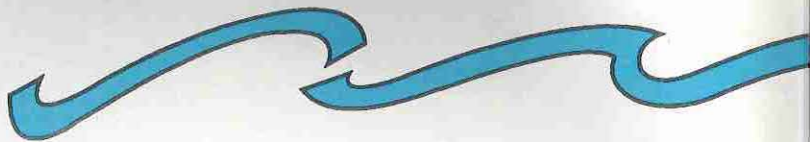
- Réseaux séparatifs

pour traitement ultérieur, dans des bassins tampons aménagés à l'amont des stations d'épuration.

Ce type de réseau est donc mal adapté aux bassins des lacs où l'efficacité du recueil est un critère important. Le réseau séparatif y est quasiment obligatoire.



Assainissement collectif : le réseau séparatif



Ils comportent deux conduites séparées, éventuellement parallèles, collectant :

- l'une les eaux usées "polluées" (1)
- l'autre les eaux "propres" : pluviales, écoulements urbains, etc (2)

Ce type de réseau a été imaginé pour acheminer vers la station d'épuration les eaux usées, à concentration et débit réguliers, et directement, ou après traitement sommaire, les eaux "propres" vers le milieu naturel. Le plus souvent, en milieu rural, seul le réseau des eaux polluées est nécessaire.

Afin de respecter la conception de ces réseaux, il convient de veiller strictement à la bonne séparation des eaux polluées et des eaux "propres". Pour cela il faudra compter sur la fiabilité et la cohérence du réseau depuis la station d'épuration jusqu'aux branchements particuliers. Cela suppose une bonne maîtrise de fonctionnement de la "collecte" et du "transport" dans le réseau, un contrôle des branchements particuliers, la suppression des eaux parasites et la surveillance permanente des postes de relèvement.

L'EPURATION

La description des techniques d'épuration est hors de notre propos. Elles sont assez variables et reposent en général sur deux modes de traitement : biologique ou physicochimique.

Il est plus important d'examiner les divers niveaux d'épuration :

- Le niveau primaire. Il est purement physique : dégrillage, dessablage, deshuilage, etc... On peut difficilement parler à son sujet d'épuration. Il vient en général en préalable et en amont des autres.

- Le niveau secondaire généralement de type biologique traite la pollution organique oxydable (DBO5 - DCO - MST*).

Convenablement conçu et géré, il peut atteindre en ce domaine des rendements de 90 %. Par contre l'élimination des fertilisants y est faible. Dans certains cas (fortes variations saisonnières de population par exemple), on peut faire appel à un procédé physico-chimique de floculation-décantation. Le rendement sur les matières oxydables est inférieur, mais leur élimination s'accompagne d'une précipitation des deux tiers environ de phosphore.

- Le niveau tertiaire ou traitement de finition pour mission spécifique d'éliminer les fertilisants et tout particulièrement le phosphore. Pour le dernier il procède comme pour le physico-chimique secondaire, par précipitation mais optimisant le rendement au regard du phosphore. Le procédé est décrit en détail ailleurs. Dans de bonnes conditions d'exécution et de gestion, il permet d'atteindre pour cet élément des rendements de 95 %. Ce niveau devrait dans tous les cas être considéré comme un minimum en cas de rejets dans le plan d'eau.

Deux techniques particulières

- Le détournement

Quelque soit le niveau choisi et la technique utilisée, l'épuration n'est jamais complète. Dans les cas de plus en plus fréquents où pour les plans d'eau l'élimination totale des rejets de polluants devient nécessaire, on peut choisir de les détourner hors de la cuvette lacustre.

Cette solution a été adoptée pour le lac d'Annecy et plus récemment pour celui de Bourget où les effluents de Chambéry, Aix-Bains et le Bourget sont, après traitement secondaire, transférés dans le Rhône par une galerie creusée sous la montagne.

C'est renvoyer le problème dans un autre écosystème, il est vrai peut-être moins fragile que celui des eaux courantes. Son efficacité, vu de près du lac, et concernant les apports véhiculés par les effluents détournés, est en théorie totale. Cela risque de lui donner, pour un public non averti, un caractère de remède miracle que lui retire assez souvent le rendement réel du réseau de collecte. On a pu, en 1982, évaluer aux environs de 50 % seulement le taux de réduction des apports en fertilisants du lac de Bourget entraîné par les installations de détournement, pour un taux souhaitable de plus de 90 %. Ces valeurs pessimistes peuvent malheureusement s'appliquer à la plupart des réseaux d'assainissement.

- Le lagunage

C'est une forme plus rustique et en général plus économique de l'épuration biologique réservée en général aux petites collectivités rurales. En principe il se limite à un niveau secondaire. Toutefois, sur des installations bien conçues et bien gérées, on a relevé des rendements d'élimination du phosphore de 50 à 90 %.

LA DEPHOSPHATATION

L'action de dépollution sur le phosphore s'appuie sur le traitement classique des effluents avec en complément un poste de déphosphatation.

Traitement physicochimique

C'est la méthode actuellement la mieux connue et la plus courante.

Le problème le plus délicat reste celui du choix du réactif à utiliser et l'intégration de la précipitation dans la filière de traitement en regard des exigences imposées au rejet traité en matière de concentration résiduelle en phosphore. Le réactif le plus intéressant est le fer ferreux (Fe_2^+) en raison de son coût peu élevé.

On utilise aussi le fer ferrique (Fe_3^+), l'aluminium (Al_3^+), et à titre expérimental le calcium (Ca_2^+). Les différentes filières de traitements associées à l'épuration biologique sont examinées ci-après :

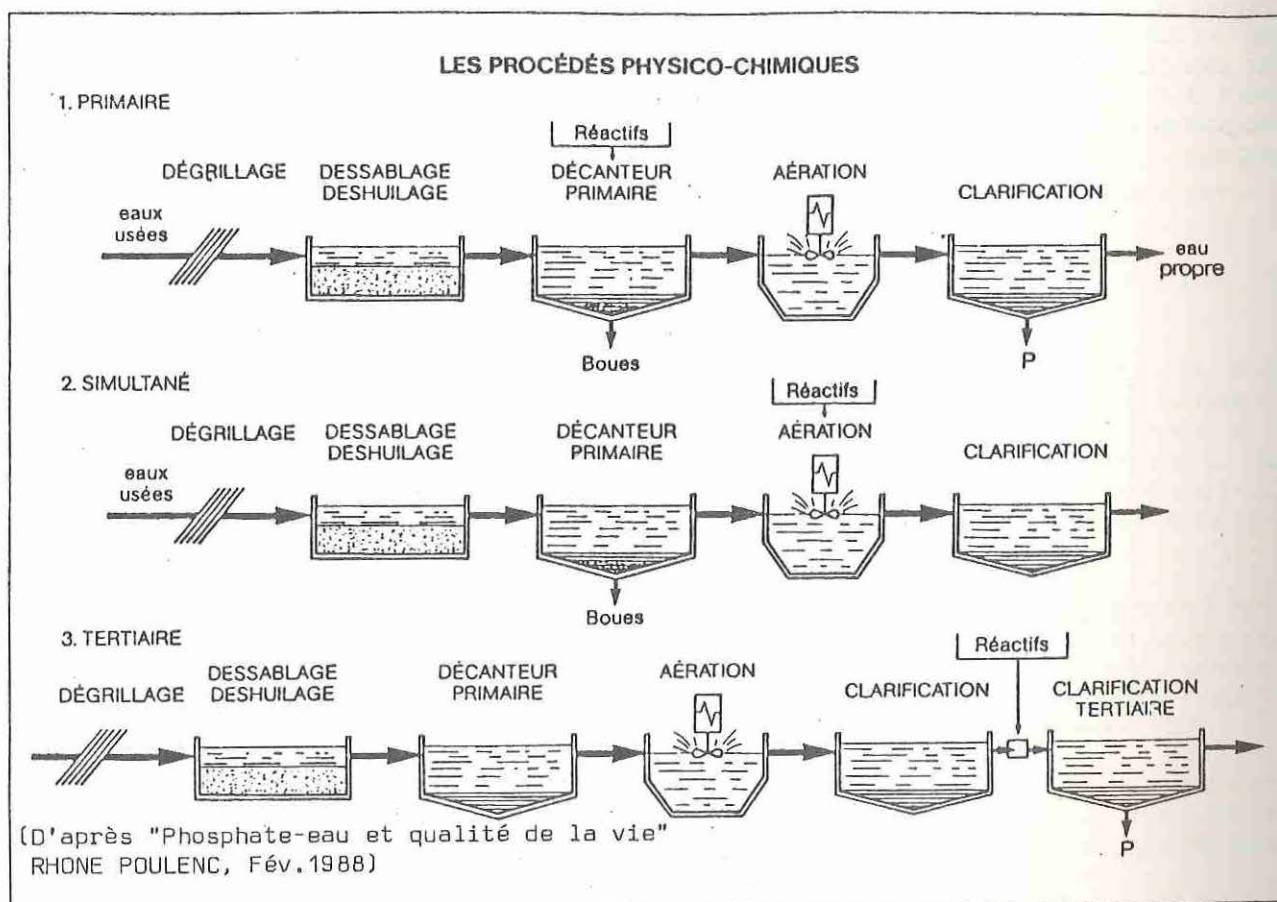
- Précipitation primaire

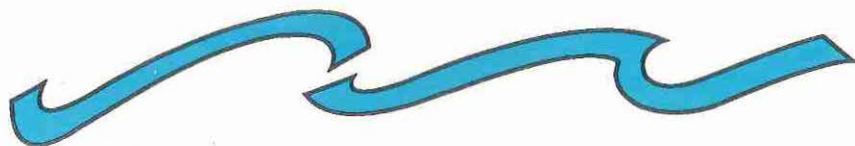
On opère sur effluent brut, généralement après traitement primaire. On peut selon les cas considérer le procédé comme partie intégrante d'un traitement dit "physico-chimique" ou comme une première étape en amont d'une épuration biologique.

Dans le premier cas il se superpose un phénomène de coagulation de la pollution colloïdale à la précipitation des éléments chimiques phosphatés du fait que ce sont les mêmes réactifs (sels de fer et d'aluminium, chaux) qui sont utilisés pour la coagulation des colloïdes et la précipitation des phosphates.

- Précipitation simultanée

Le procédé consiste à précipiter les phosphates dans le bassin de boues activées par adjonction de réactifs en solution. Cette technique de précipitation utilise des sels de Fe_2^+ , Fe_3^+ ou Al_3^+ de préférence à la chaux dont les effets s'avèrent insuffisants pour un déphosphatation efficace.





- Post-précipitation ou précipitation tertiaire

La post-précipitation consiste à ajouter un étage supplémentaire de coagulation-floculation-décantation tertiaire à une station de traitement biologique conventionnelle. La précipitation s'effectue sur l'effluent de sortie du traitement biologique.

Les réactifs utilisés pour la précipitation sont du même type que ceux de la précipitation simultanée.

En cas d'exigence plus poussée (teneur résiduelle en phosphore inférieure à 1 mg/l) c'est la seule solution envisageable, avec toutes les implications économiques en matière d'investissement et de fonctionnement. Il n'est d'ailleurs pas sûr que cela soit suffisant pour protéger nos lacs.

Certains pays envisagent déjà une limite à 0,2 mg/l de phosphore et un traitement complémentaire.

- Elimination biologique du phosphore

La mise au point de cette méthode est relativement récente.

Elle consiste à créer dans les stations d'épuration des conditions favorables au développement d'un type de bactérie capable d'emmagasiner une quantité importante de phosphore.

Les boues biologiques ordinaires retiennent 2,5 % du phosphate, celles des stations de déphosphatation biologique de 6 à 8 %. Son avantage est essentiellement d'ordre économique : pas d'achat de réactif, moins de boues à traiter et à évacuer. Elle est par contre un peu moins efficace ; la teneur en phosphore dans l'effluent pourra difficilement être inférieure à 2 mg/l. On peut améliorer son rendement par une légère adjonction de sels ferreux dans le bassin d'aération. Une solution consiste à regrouper les deux méthodes dans des stations mixtes (ROANNE). On vise ainsi l'amélioration du rendement et l'abaissement des coûts de fonctionnement.

LES COÛTS

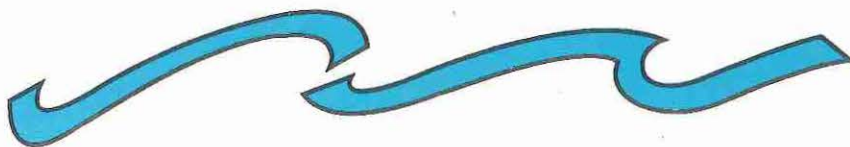
C'est un sujet difficile, complexe et sans doute mal connu. On se limitera à quelques exemples et quelques commentaires.

La protection des lacs LEMAN, d'ANNECY, du BOURGET

Pour le Léman s'est généralisée la technique des traitements tertiaires ; et l'exemple ci-après est limité aux réseaux tributaires de la station de Thonon qui est équipée d'une filière de déphosphatation simultanée. A Annecy et au Bourget les effluents sont détournés à l'aval du lac, après traitement secondaire.

Lacs	Population raccordée (nbre d'hab)	Coût en Millions de francs 1986	
		Réseau	Station d'épuration
Léman	72 000	-	30
Annecy	118 000	260	70
Le Bourget	124 000	440	60

Les coûts de l'assainissement et de l'épuration



La déphosphatation

Nous avons emprunté à l'Institut de Recherche Hydrologique (IRH) de Nancy quelques chiffres établis en 1984 à partir d'une station de

40 000 équivalents habitants.

Il faut les considérer comme des ordres de grandeur susceptibles de s'inscrire dans une fourchette de variation importante.

Filière \ Coûts	Investissement en F./hab	Prix de revient annuel en F./hab.			Prix de revient total/an en F./m ³ d'eau traitée
		Annuités	Fonctionnement	Total	
Biologique conventionnelle	400	12,54	28	40,54	0,56
Déphosphatation simultanée sur biologique	430	13,62	36,5	50,12	0,69

Les coûts de la déphosphatation (IRH Nancy)

Par rapport à un traitement secondaire classique, la majoration de prix due à la déphosphatation, est de l'ordre, pour ce cas particulier, de 25 %.

Sur cet exemple on peut greffer un certain nombre de remarques.

- Concernant les investissements : les deux premières filières -primaire et simultanée- entraînent, par rapport aux investissements nécessaires à une épuration biologique conventionnelle, des dépenses relativement faibles, de l'ordre de 5 à 10 % supplémentaires.

Elles concernent essentiellement le stockage des réactifs, l'équipement de dosage et le traitement des boues.

Il en va tout différemment bien sûr de la post-précipitation qui exige des investissements importants. Malheureusement, nous manquons encore de données nous permettant d'avancer des montants contrôlés.

- Concernant les frais de fonctionnement : les coûts supplémentaires proviennent essentielle-

ment des réactifs de précipitation et de la nécessité de traiter un plus grand volume de boues.

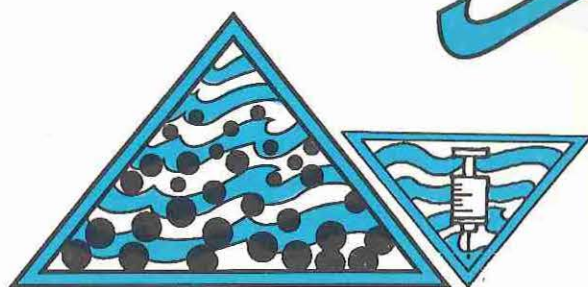
Il est difficile de donner un coût moyen, car celui-ci dépend beaucoup :

- . des doses de réactifs nécessaires, elles-mêmes fonction de la qualité de l'effluent à traiter, du rendement d'élimination visé et du temps de fonctionnement nécessaire sur l'année (continue dans le cas de rejets en lacs, plusieurs mois par an dans le cas de certains rejets en rivières) ,

- . du type de réactif choisi : sulfate ferreux, chlorosulfate ou chlorure ferrique, dont les prix sont très différents (investissements proportionnels à la facilité de leur emploi et donc aux coûts de manipulation sur place), sels d'aluminium ,

- . de la distance de la station au lieu de production du réactif (les coûts de transport sont une part non négligeable des coûts de fonctionnement) ,

- . de la filière existante de traitement des boues.



3.3 LES TRAITEMENTS CURATIFS DES PLANS D'EAU

QUELQUES PRELIMINAIRES

Améliorer la qualité d'un plan d'eau consiste par définition à modifier ce que l'on a pour obtenir ce que l'on veut ; encore faut-il que l'un et l'autre soient très exactement définis en termes objectifs, et selon un vocabulaire commun.

Un plan d'eau peut être utilisé à des fins diverses : approvisionnement en eau à usage domestique ou industriel, maintien d'un cheptel piscicole, sports aquatiques au contact plus ou moins direct de l'élément, cadre de vie, bien être et santé publique.

La qualité de l'eau requise diffère d'un usage à l'autre, et la première démarche du gestionnaire est de fixer les valeurs des paramètres correspondant à la qualité nécessaire, en réduisant d'éventuelles incompatibilités.

L'amélioration de la qualité du plan d'eau, en vue de satisfaire aux besoins de l'utilisateur, nécessite un traitement de l'écosystème lacustre qui se décompose en trois phases successives :

- éducation, information, incitation de la population d'Homo (prétendu) sapiens,
- traitement du bassin versant,
- traitement du plan d'eau proprement dit.

Seule la dernière phase sera examinée ici. La première, présentée sous une forme volontairement provoquante, est une oeuvre de longue haleine, mais sans aucun doute essentielle. La seconde a été évoquée aux chapitres précédents.

Si l'on s'en tient à cette succession logique, le traitement du plan d'eau ne devrait intervenir qu'en dernier lieu et avoir pour objectif, soit de déclencher, d'accélérer ou de parfaire le processus d'autorégénération, soit d'aménager au "moins mal" les conséquences du flux de pollution résiduel incontrôlé.

En fait, à cet ordre logique, se substitue bien souvent un ordre inverse d'urgence. Il n'en reste pas moins vrai que cette dernière phase est d'autant plus lourde et coûteuse que les deux premières n'ont pas été efficacement

réalisées, et que le pouvoir d'autorégénération du plan d'eau est faible.

Quel que soit le type de traitement envisagé, il lui faut être :

- adapté au problème limnologique* posé,
- réalisable techniquement et financièrement,
- efficace pour l'effort technique et financier consenti,
- dépourvu de réactions indésirables et irréversibles de tout ou partie de l'écosystème lacustre et de ceux qui lui sont associés.

Ces deux dernières conditions n'étant pas forcément remplies, il est bon de prendre deux précautions :

- présenter le traitement comme expérimental,
- proposer un suivi post-opératoire des réactions de l'écosystème.

Les techniques de traitement mettent en oeuvre des procédés physiques et chimiques, des substances biocides et des manipulations biologiques.

PROCEDES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

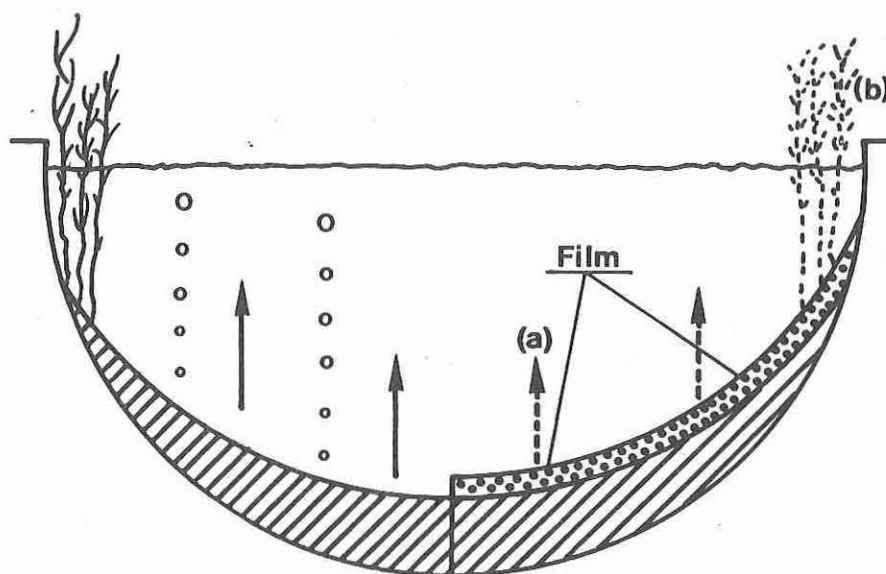
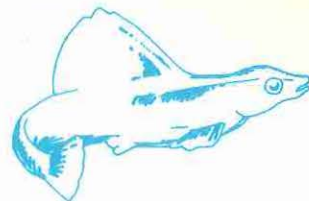
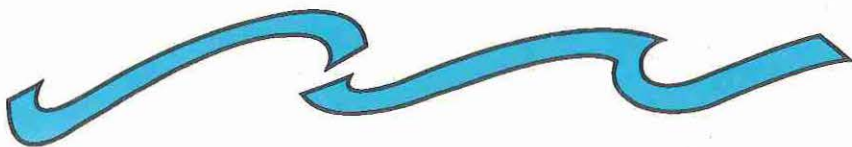
Dragage

Le procédé vise à :

- rendre au plan d'eau sa profondeur d'origine (a),
- éliminer les végétaux fixés (b)
- éliminer un sédiment, riche en substances indésirables, dont les nutriments, susceptibles de migrer vers l'eau surnageante (c).

Deux précautions essentielles sont à prendre :

- éviter l'emploi d'un matériel susceptible de mettre en suspension une partie des sédiments. Les dragues pneumatiques sont préférables aux dragues à godets et même aux suceuses,
- disposer le sédiment dragué de manière à éviter des nuisances graves à l'environnement (retour direct des eaux au lac ou au réseau



hydrographique aval en particulier). Une déphosphatation pourra être éventuellement appliquée aux eaux de ressuyage. Une analyse des impacts est en tout cas indispensable.

Assèchement

- Les trois phases en sont :
 - . la vidange
 - . le maintien en assèchement
 - . le remplissage.

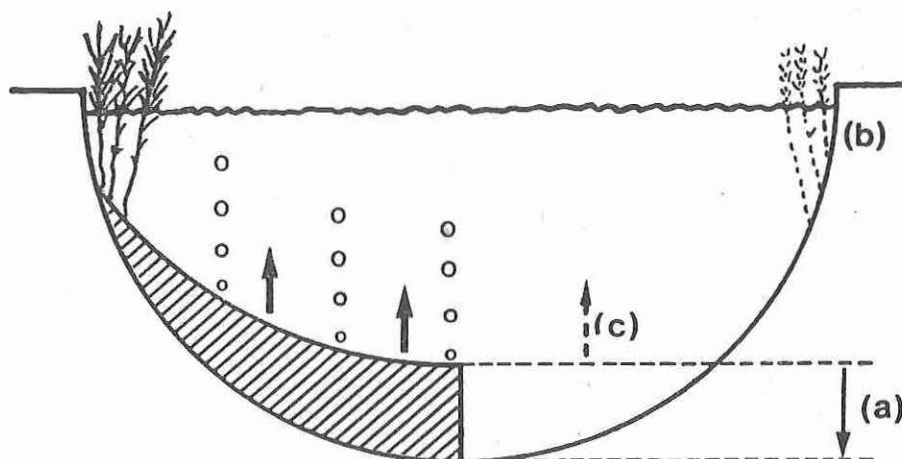
- Son but est de :
 - . combattre la migration des nutriments du sédiment vers l'eau surnageante, en consolidant par dessiccation l'interface eau/sédiment et en oxydant les sels ferreux (fixation du phosphore),

- . favoriser la minéralisation et l'oxydation de substances indésirables (matières organiques, sulfures) ,
- . augmenter la profondeur ,
- . éliminer les macrophytes.

- Mais attention :
 - . l'utilisation de cette technique peut abaisser le niveau de la nappe phréatique et provoquer l'affaissement des berges et l'assèchement de puits
 - . les processus de minéralisation peuvent accroître la fertilité potentielle du sédiment.

Isolation

- Ses buts sont :
 - . combattre les migrations de substances indé-





sirables, dont les nutriments, du sédiment vers l'eau surnageante (a),
 . éliminer les macrophytes (b).

- Quelques remarques :

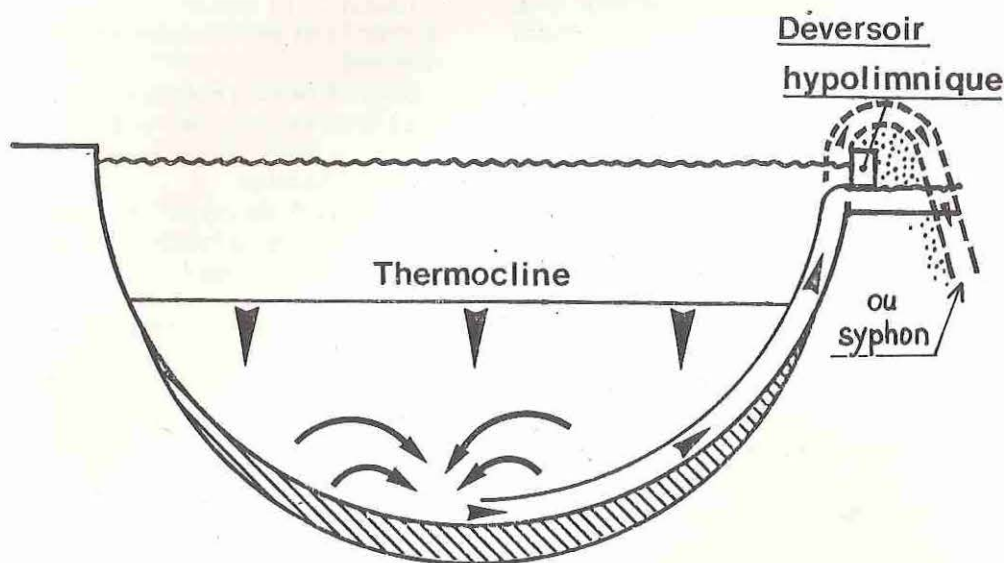
- . le film utilisé peut être de continuité et d'épaisseur variables allant du film de polyéthylène à la couche de graviers (dépourvus de nutriments) ,
- . dans le cas d'un film continu léger, mieux vaut prévoir des trous pour l'échappement éventuel des gaz de fermentation, ainsi qu'un lestage par du gravier ,

. si le lac gèle suffisamment l'hiver, on peut étendre le film et le lest sur la glace et attendre le dégel.

Décharges sélectives

Il s'agit d'éliminer les substances indésirables, dont les nutriments, contenues dans l'hypolimnion*.

Mais l'efficacité de cette technique se mesure à la quantité de nutriments que l'on peut éliminer au cours de la période de stratification par rapport au stock restant dans le lac.



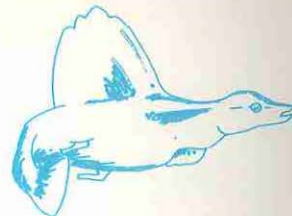
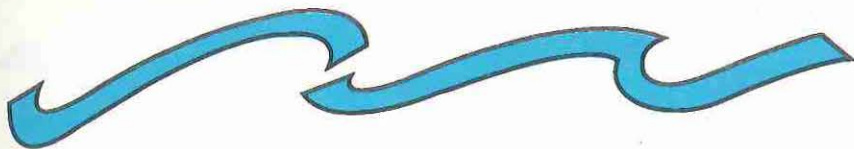
Il en résulte que :

- + seuls, les lacs présentant un hypolimnion individualisé et un temps de rétention relativement court sont susceptibles de réagir à ce traitement ,
- + la prise d'eau doit être située impérativement au point le plus profond de la cuvette, là où les eaux ont leur densité maximale
- + la prise d'eau doit être construite de manière à effectuer un appel horizontal de l'eau, et

éviter l'aspiration des eaux susjacentes ,

- + la décharge doit être munie d'un dispositif de vannes lui permettant de fonctionner selon un programme défini : en continu, par périodes, en chasse, en siphon, etc...

- La contrepartie de l'efficacité de la technique est la diminution de la masse d'eau froide hypolimnique*, et ses conséquences sur la faune, les processus de minéralisation et la sta-



bilité physique de l'ensemble du plan d'eau ,

- En aval de la décharge peuvent se manifester des nuisances dues, en particulier, à la présence de sulfures (toxicité, odeurs) et d'hydroxydes réduits de fer et de manganèse (précipitation dans les branchies des poissons après oxydation).

Ces nuisances sont limitées dans l'espace et peuvent être combattues, soit en faisant fonctionner la décharge avant que les substances nocives n'apparaissent dans l'hypolimnion, soit en oxydant l'eau déchargée (air, oxygène, perhydrol).

Destratification

On poursuit un double but :

- disperser le plancton* de manière à :
- + entraîner le phytoplancton dans des zones

obscurcs et à rendre la photosynthèse* impossible,

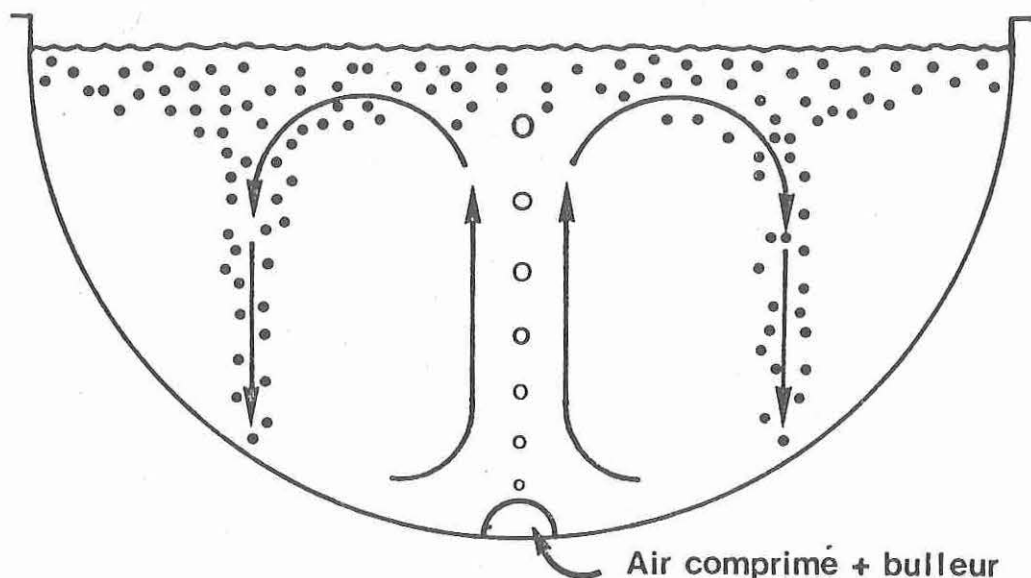
- + entraîner le phytoplancton dans les zones à pH plus bas, nuisible aux cyanophycées,
- + diminuer la compétitivité du phytoplancton flottant (cyanophycées),
- + augmenter l'efficacité du broutage du phyto par le zooplancton*.

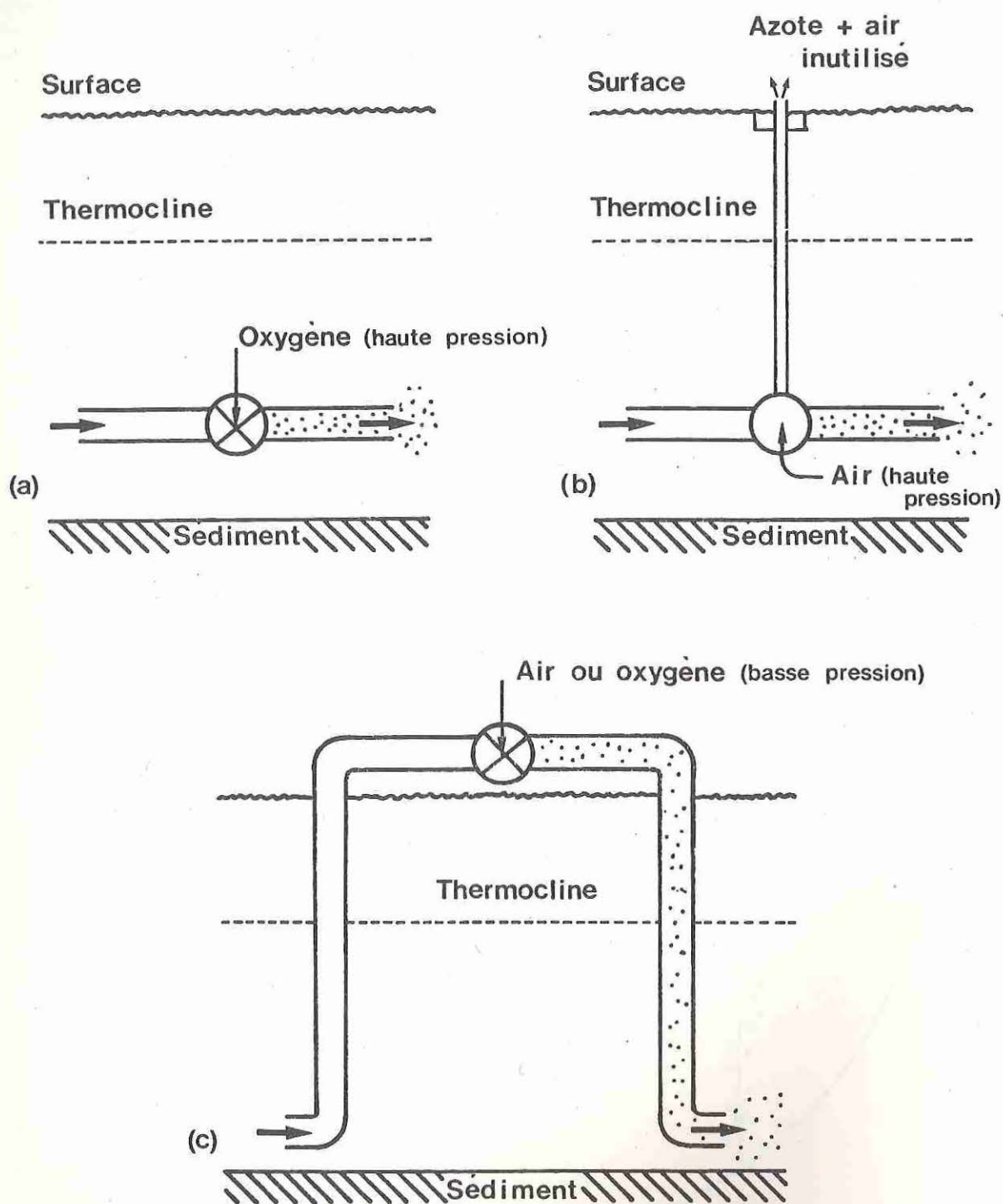
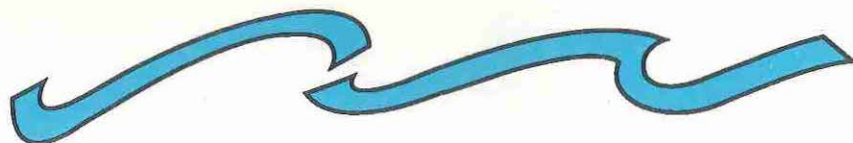
- oxygéner l'hypolimnion.

Et il faut prendre quelques précautions :

- cette technique ne doit pas être employée si l'hypolimnion contient de fortes concentrations de nutriments susceptibles d'accroître la fertilité potentielle de l'épilimnion de façon indésirable,

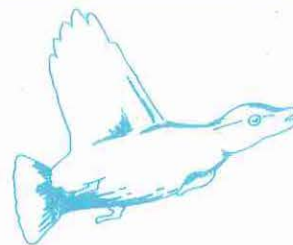
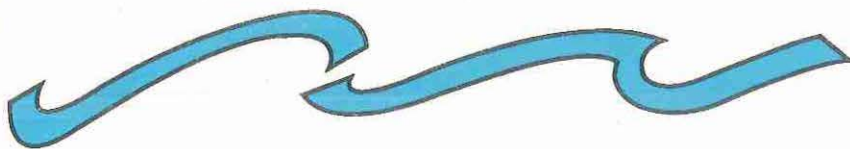
- la destratification accroît la température de l'hypolimnion, et peut nuire à la faune salmonicole.





Principe de fonctionnement des aérateurs hypolimniques

- a) oxygène haute pression (+ pompe)
- b) air haute pression
- c) air oxygène basse pression (+ pompe)



Aération et oxygénation hypolimnique

Il s'agit d'oxygéner l'hypolimnion sans perturber la stratification thermique d'où :

- oxydation des hydroxydes ferreux en hydroxydes ferriques et possibilité de fixation du phosphore,
- amélioration des conditions de milieu pour la faune salmonicole.

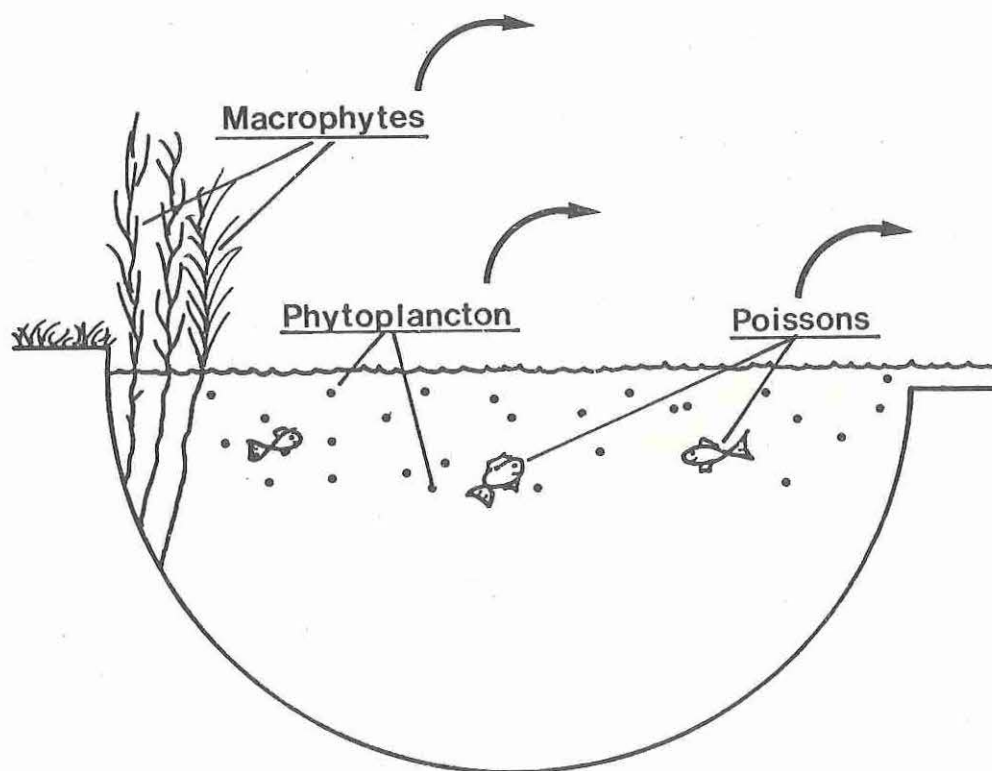
Mais attention :

- une mauvaise conception ou un sous-dimensionnement de l'appareillage peuvent rendre

la technique inefficace,

- l'oxygénation du fond du plan d'eau y stimule les processus de minéralisation, donc les risques de libération du phosphore.

Ces processus d'oxydation de la matière organique seraient même prioritaires sur ceux d'oxydation des hydroxydes ferreux. Finalement, les risques de libération du phosphore peuvent être plus grands que ceux de fixation en raison, soit d'une oxygénation insuffisante, soit de l'existence d'une quantité insuffisante de substances capables de fixer le phosphore, dont les hydroxydes de fer.



Récolte de la biomasse*

L'objectif est :

- d'éliminer des espèces indésirables (phytoplancton, macrophytes, poissons),
- de retirer du lac les nutriments correspondant à ces récoltes.

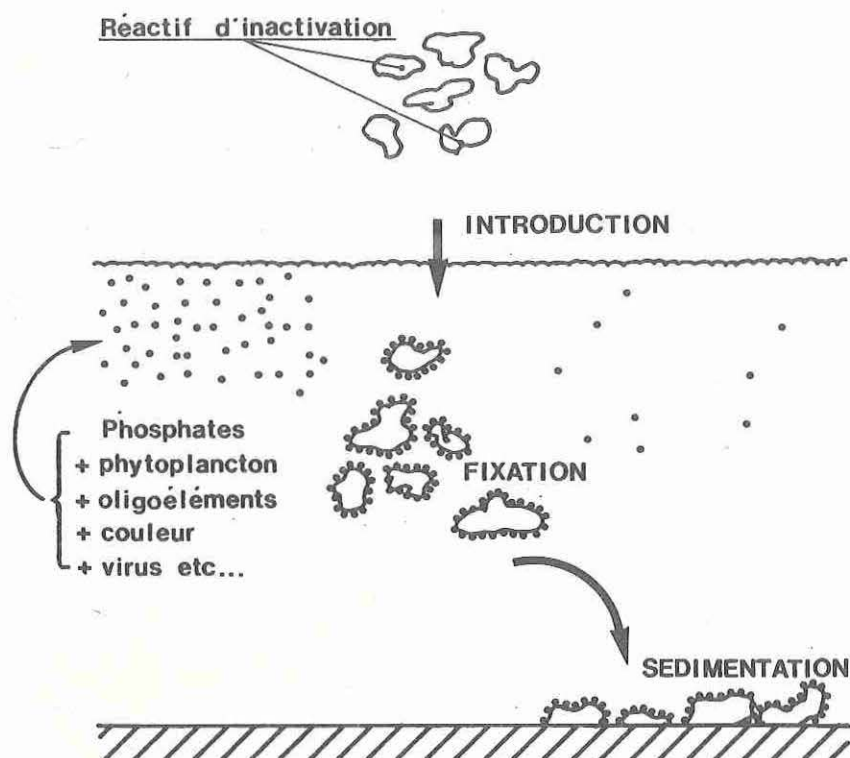
Mais attention :

- une mauvaise conduite de la récolte risque

de stimuler la production, au lieu de la détruire,

- l'utilisation des produits récoltés peut poser plus de problèmes que la récolte elle-même,
- il est illusoire de vouloir modifier le bilan d'un nutriment par des récoltes,
- selon leur intensité les récoltes peuvent modifier le fonctionnement de l'écosystème et doivent être considérées comme des manipulations biologiques (voir plus loin).

Inactivation



Les buts poursuivis sont les suivants :

- fixer le phosphore de façon physico-chimique et le soustraire par précipitation à la consommation phytoplanctonique,
- précipiter le phytoplancton et d'autres substances plus ou moins désirables.

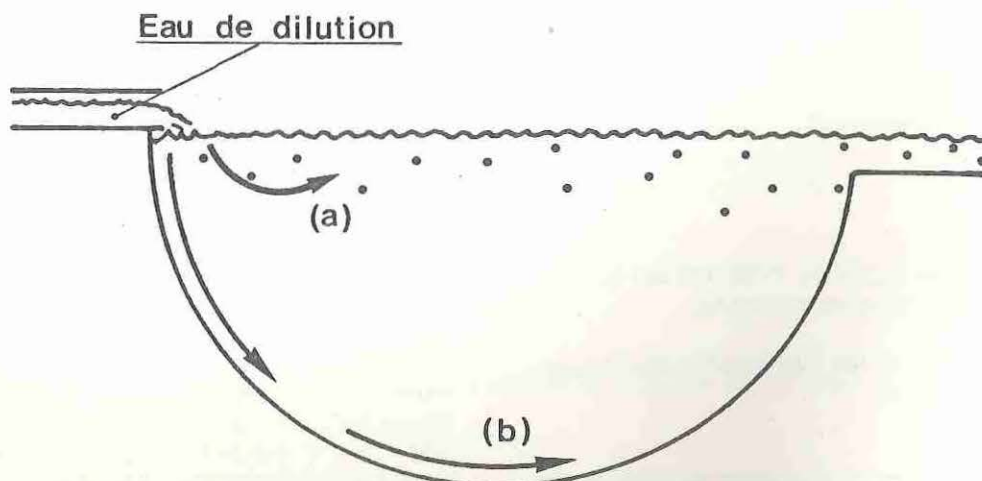
Quelques remarques :

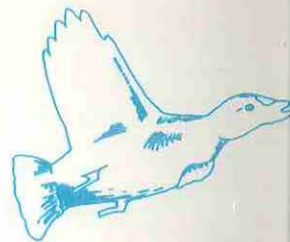
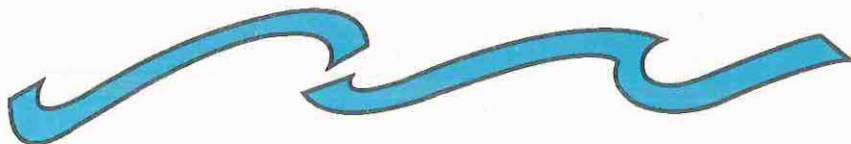
- la durée de l'immobilisation du phosphore sédimenté dépend de la nature du réactif de précipitation utilisé, ainsi que des conditions physico-chimiques de l'hypolimnion. Mieux vaut

utiliser des composés de l'aluminium que du fer, - le dépôt au fond de la matière organique entraînée peut créer ou accentuer les problèmes de désoxygénation. Il est préférable d'agir avant la période de prolifération algale, plutôt que pendant.

Dilution

- diluer le phytoplancton (introduction épilimnique) (a),





- diluer les nutriments (introduction épi- ou hypolimnique),

- améliorer l'oxygénation du fond (introduction hypolimnique) (b).

Mais attention :

- la valeur du résultat dépend de la qualité et de la quantité d'eau introduite, mais aussi de son trajet dans le milieu récepteur,

- les échecs se soldent par l'équation :

eau "propre" + eau "sale" = eau "sale"

Autres procédés

D'autres procédés physiques ou chimiques peuvent être utilisés, soit pour résoudre des problèmes très particuliers, soit à titre expérimental. Parmi ceux-ci :

- modification du niveau de la surface de manière à éliminer certaines espèces de macrophytes modifiant ainsi les populations piscicoles,

- épandage d'encres absorbant les longueurs d'ondes utilisées pour la photosynthèse,

- destruction d'organismes par lasers (macrophytes), explosifs (phytoplancton, poissons),

- traitement des sédiments en place par "labour" subaquatique, et introduction de réactifs provoquant la fixation du phosphore.

SUBSTANCES BIOCIDES

Sont ainsi désignées, toutes les substances algicides, herbicides et piscicides, ayant pour but d'éliminer respectivement le phytoplancton*, les macrophytes et les poissons indésirables. Cette élimination peut intervenir dans le cadre d'une manipulation biologique.

De tels moyens, qui traitent les ultimes conséquences du mal sans traiter le mal lui-même, doivent être réservés à des interventions rapides et puissantes, voire désespérées, ou intervenir comme complément de traitement. Il faut éviter de les utiliser de façon routinière, et avoir bien conscience des problèmes que posent :

- l'extension de toxicité aussi bien dans le

temps (remanence) que dans l'espace (en aval, sur la nappe phréatique), ainsi qu'aux espèces non visées (directement ou par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire),

- la dégradabilité des produits et la toxicité des produits de dégradation.

Algicides

Bien que l'idéal soit de traiter le lac ou au moins l'épilimnion tout entier, le coût de l'opération en limite souvent l'étendue aux eaux littorales, ce qui rend les réussites aléatoires, et le traitement répétitif.

Les doses de réactif nécessaires doivent être déterminées d'après un essai en réduction, car des facteurs du milieu (pH, matière organique...) peuvent modifier l'activité du réactif.

Herbicides

Les traitements sont en général annuels, et les résultats obtenus sont excellents. Mais il n'est pas rare de voir des macrophytes remplacés par une fleur d'eau phytoplanctonique, créant des nuisances encore plus indésirables.

Piscicides

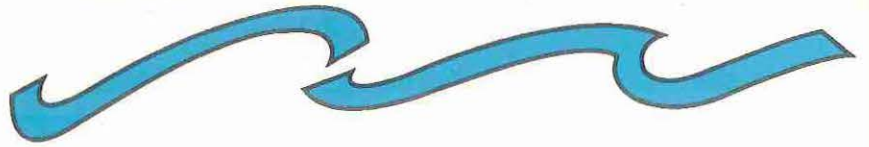
En plus du choix du produit, intervient le choix du mode d'utilisation :

- ne traiter que l'épilimnion, pour épargner les poissons de fond,
- ne traiter qu'une baie,
- utiliser un réactif sélectif,
- éliminer une catégorie d'âge plus sensible,
- détruire toute la population.

Après traitements et réintroduction des nouvelles espèces, les résultats sont bons pendant 1 ou 2 ans, guère plus. Les traitements sont plus délicats à réaliser en lacs eutrophes, et des essais en réduction sont nécessaires. Il ne faut pas oublier qu'une modification de la faune piscicole peut modifier l'écosystème par ses "sous-produits d'activité" que sont la consommation d'une proie, l'excrétion de nutriments, ou même la mise en suspension de sédiments.

MANIPULATIONS BIOLOGIQUES

Sont ainsi désignés les procédés de traitement qui consistent à utiliser des phénomènes de consommation, de compétition et de parasitisme pathogène. La mise en oeuvre de tels



moyens demande que soient prises des précautions, au moins équivalentes à celles concernant l'emploi de substances biocides, visant notamment les extensions d'activité (dans le temps, dans l'espace, à l'égard d'espèces non visées) et les sous-produits d'activité (modifications indésirables du milieu). En intervenant sur les phénomènes de consommation et de compétition la pêche peut constituer une "manipulation biologique" très efficace.

- Phénomènes de consommation : les espèces indésirables du phytoplancton, de macrophytes ou de poissons peuvent être éliminées par des consommateurs spécifiques, introduits en quantité et de façon convenables. Il est indispensable que soient connues les relations de consommation des uns par rapport aux autres, mais également leurs relations de tous types avec les autres organismes et le milieu.

- Phénomènes de compétition :

+ Phytoplancton et macrophytes : la méthode consiste à introduire une espèce végétale capable de rentrer en compétition avec une autre, jugée indésirable, pour des facteurs indispensables (lumière, nutriments). La compétition peut se produire entre deux espèces de macrophytes ou entre le phytoplancton et les macrophytes.

+ Poissons : les interventions sont de deux sortes :

. stérilisation ou changement de sexe : permet de contrôler le développement d'une population,

. élevage sélectif : permet de créer et d'introduire des espèces compétitives.

- Phénomènes de parasitisme pathogène :

Des champignons, des bactéries et des virus peuvent être utilisés pour éliminer des espèces indésirables de phytoplancton et de macrophytes.

En ce qui concerne les poissons, le problème est inverse et consiste à détruire les agents pathogènes. Les traitements à base d'antibiotiques, de floculants, de chlore sont plus efficaces dans les lacs oligotrophes que dans les lacs eutrophes, où des épidémies sont malheureusement plus fréquentes.

L'UTILISATION AGRICOLE DE QUELQUES DECHETS DES TRAITEMENTS

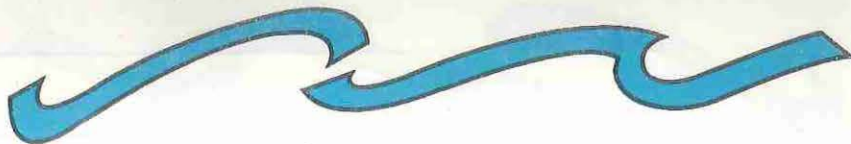
Les divers produits extraits des lacs peuvent être utilisés à des fins agricoles assurant ainsi un recyclage de nature à perpétuer le fonctionnement autonome du système lac-bassin versant et ce de façon d'autant plus adéquate que les apports sont d'origine agricole. Les produits en question sont essentiellement les macrophytes, les sédiments et l'eau hypolimnique.

Les macrophytes

Les végétaux aquatiques peuvent être compostés au même titre que les végétaux terrestres après qu'on les ait hachés et qu'on ait ramené le rapport carbone/azote (C/N) aux environs de 30 par addition de fumure azotée. Le compost de macrophytes présente l'avantage sur les autres composts d'être riche en oligo-éléments et de ne pas contenir de résidus de pesticides ni de métaux lourds (à vérifier quand même). Les utilisateurs de ce type de compost sont les mêmes que les utilisateurs de tourbes et d'autres types d'humus (arboriculteurs, maraîchers, pépiniéristes, champignonnistes...). A Taïwan le compost de paille de riz est utilisé tel quel pour faire fructifier des champignons comestibles (*Pleurotus ostreatus*).

Les sédiments

Du fait de leur richesse en matière organique, en azote, en phosphore et en oligo-éléments, les sédiments peuvent être utilisés comme amendement notamment sur sol sableux, après un éventuel rééquilibrage de leur composition pour satisfaire aux besoins de l'utilisateur. De plus leur forte capacité d'absorption est de nature à réduire substantiellement les pertes des sols et par conséquent les charges externes en nutriments des plans d'eau situés en aval. Selon le type de culture et selon la teneur en eau du sédiment on peut l'épandre sur le sol, soit directement, soit par aspersion comme du lisier, soit en terrasses derrière des lignes de balles de paille si le terrain est en pente ; on peut aussi l'utiliser après épaississement derrière une digue ou dans un bassin de décantation. Il est bien évident que toute utilisation de type agricole doit être précédée d'une analyse des résidus de pesticides et des métaux lourds, qui ont de plus en plus tendance à contaminer les sédiments.



L'eau hypolimnique

Qu'elles proviennent d'un pompage, d'un siphonnage ou d'une décharge hypolimnique, les eaux de l'hypolimnion, riches en azote, en phosphore et en substances organiques dissoutes peuvent être utilisées pour irriguer les terres agricoles. De plus on évite les problèmes qui risquent de résulter de la décharge directe dans l'émissaire de ces eaux de piètre qualité "aquatique". Comme pour les sédiments, des analyses préalables peuvent être nécessaires pour détecter toutes traces de pesticides et de métaux lourds.

CONCLUSIONS

Le tableau ci-après résume les actions des diverses techniques décrites : les unes portent sur les causes de la pollution nutritionnelle, les autres, sur les conséquences que sont l'enrichissement en matière organique, la formation de sulfures, et l'installation d'espèces végétales et animales indésirables. Le choix est délicat : non seulement il n'y a pas de technique universelle, mais un traitement efficace peut nécessiter l'emploi judicieusement combiné de plusieurs d'entre elles.

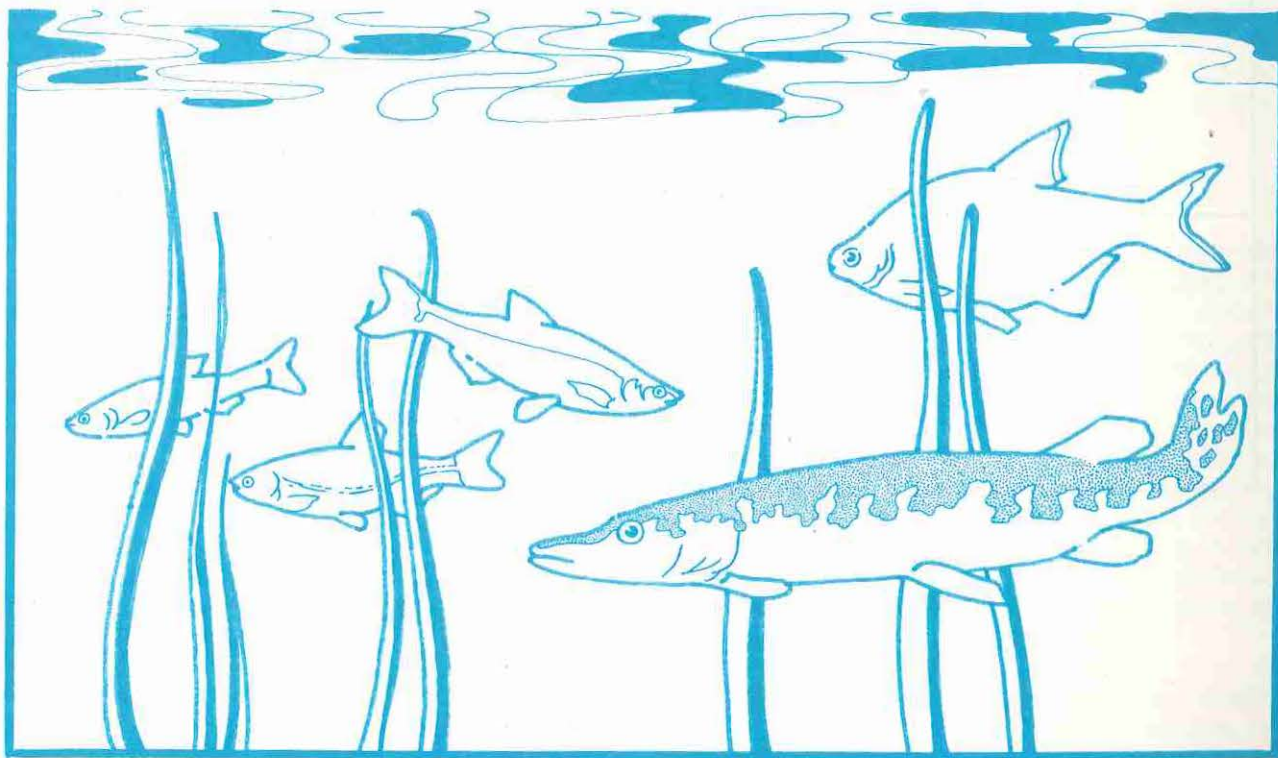
Le nombre important des techniques utilisables, la possibilité de les combiner, les progrès de la recherche dans ce domaine, ne doivent pas faire oublier les limites de leurs possibilités, qui dépendent de la taille du plan d'eau :

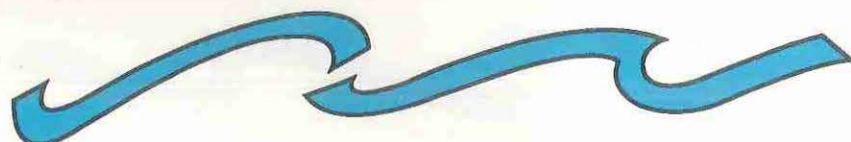
- Les grands plans d'eau (grands lacs, mers) dont la taille rend le traitement peu ou pas réalisable. Seules des mesures de prévention peuvent leur éviter de finir en dépotoirs.
- Les petits plans d'eau (étangs, petits lacs) peuvent être traités, mais risquent justement de devenir les jouets de l'industrie de la dépollution, et d'être traités comme des stations d'épuration.

Comment éviter le plan d'eau-dépotoir ou le plan d'eau station d'épuration ?

En évitant la pollution, ou en la traitant le plus près possible de sa source, en tous cas sur le bassin versant.

Parmi les deux objectifs proposés au traitement des plans d'eau ne devrait donc plus subsister que le premier, à savoir : "déclencher, accélérer, ou parfaire les processus d'autorégénération".

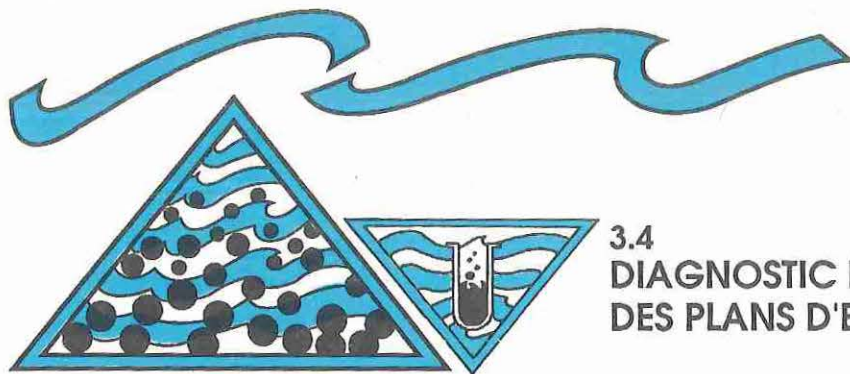




PROCEDES PHYSICO-CHIMIQUES

RESULTATS	INTERVENTIONS													
		Dragage	Assèchement	Isolation	Décharge sélective	Destratification	Aération hypolim.	Récoltes	Inactivation	Dilution	Variation de niveau	Labour du sédiment	Substances biocides	Manip. biologiques
Nutrients	Elimination	*			*			*		*				
	Immobilisation			*					*			*		
	Immobilisation oxydative		*			*	*		*	*		*		
Matière organique	Elimination	*						*		*				
	Immobilisation			*										
	Minéralisation		*			*	*			*		*		
Sulfures	Elimination	*			*					*				
	Immobilisation			*										
	Oxydation		*			*	*			*		*		
Elimination d'espèces indésirables														
	Phyto		*			*		*	*	*			*	*
	Macrophytes	*	*	*				*			*		*	*
	Poissons		*					*					*	*
Stimulation d'espèces désirables														
	Phyto					*								*
	Macrophytes										*			*
	Poissons						*							*

Résumé des actions des divers traitements
sur les conséquences immédiates de la pollution nutritionnelle.



3.4

DIAGNOSTIC ET SUIVI DE LA QUALITE DES PLANS D'EAU

L'étude des milieux lacustres relève de deux approches complémentaires. L'une est axée sur la connaissance de leur état (diagnostic). L'autre procède de la surveillance de leur évolution (suivi) et s'appuie obligatoirement sur la première.

Dans la pratique, la distinction entre les deux approches peut ne pas être très nette. C'est notamment le cas pour les petits plans d'eau. Il est bien évident que, sauf exception (suivi allégé), leur mise en oeuvre est le fruit d'agents sinon de laboratoires spécialisés et ce d'autant plus que les observations sont nombreuses et leur interprétation complexe.

DIAGNOSTIC

Il s'agit de décrire l'état général du lac, de mesurer en particulier son niveau trophique* par ses causes et ses effets, pour aboutir éventuellement à des propositions de traitement.

De telles études ne devraient dépendre que des objectifs poursuivis. Elles sont malheureusement le plus souvent liées aux moyens disponibles. Il ne faut donc pas être trop systématique dans leur description. Mais pour fixer les idées, on peut tenter une présentation sommaire de deux méthodes, situées aux deux niveaux extrêmes : l'étude approfondie, la diagnose rapide.

Etude approfondie

Elle consiste en théorie à observer :

- sur un laps de temps suffisant, au minimum un cycle biologique annuel complet, si possible beaucoup plus pour amortir les effets des conditions circonstancielles et à des fréquences adaptées à la vitesse d'évolution du phénomène,
- en autant de verticales et de niveaux qu'il sera nécessaire pour obtenir une bonne représentativité du milieu,
- tous les paramètres, physicochimiques, biologiques, bactériologiques, de nature à intervenir sur la qualité du milieu et dans tous les

compartiments de l'écosystème : pleine eau, sédiments, éventuellement bassin versant. La liste de ces éléments, l'étude de leurs incidences sur la qualité du lac, la façon d'interpréter leur valeur sont du domaine des traités de limnologie*. Une énumération, même sèche, des plus importants donnera une idée de la complexité du problème.

+ Pleine eau

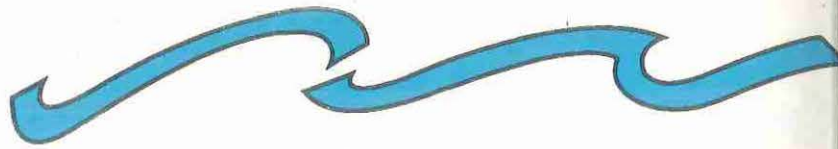
. Physicochimie : éléments à mesurer in situ (transparence, température, oxygène, pH, conductivité) ; fertilisants (phosphore -total et orthophosphates-, azote -total, organique, kjeldahl*, ammoniacal, nitreux, nitrique-, silice, carbone -total, organique total et particulaire- ; matières organiques (DBO5*, DCO*, oxydabilité, carbone organique) ; alcalinité (carbonates et bicarbonates) ; divers éléments chimiques (chlorure, sodium, potassium, calcium, magnésium, sulfates, hydrogène sulfureux) ; micropolluants (fer, manganèse, hydrocarbures, pesticides, polychlorobiphényle -PCB-).

. Hydrobiologie : phytoplancton* (pigments chlorophylliens - chlorophylle a, chlorophylle a active, chlorophylles b et c, phéophytine -production primaire, détermination, abondance, diversité) ; zooplancton* (biomasse, biovolume, détermination, abondance, diversité) ; population piscicole.

+ Sédiments

. Physicochimie : éléments à mesurer ou observer sur place (aspect, odeur, température, pH, rH, EH) ; phase solide (teneur en eau, concentration, granulométrie, perte au feu, carbone organique et minéral, azote kjeldahl, phosphore -total, organique, inorganique non apatitique-, matières humides, acides fulviques et humiques, carbonates, silice, alumine, fer, manganèse) ; eau interstitielle (pH, conductivité, carbone organique, azote -total, ammoniacal, nitreux, nitrique-, phosphore -total, orthophosphates-, bicarbonates, sulfates, chlorures, calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, manganèse).

. Hydrobiologie : ceinture végétale (macrophytes), invertébrés benthiques (insectes, oligochètes, mollusques).



En pratique, les moyens disponibles obligent à faire des choix, en fonction de critères divers, en particulier de la nature supposée des menaces qui pèsent sur le plan d'eau.

Diagnostic rapide

Ici on vise la possibilité d'intervention sur le plus grand nombre de plans d'eau possible selon une demande du type inventaire de qualité, donc un coût modéré.

On se limite à un premier niveau de connaissance, essentiellement descriptif (détection des problèmes, contrôle).

A ce propos, il nous paraît important de signaler une initiative locale intéressante. L'Agence de Bassin Rhône Méditerranée Corse a lancé, avec le concours des Services Régionaux d'Aménagement des Eaux (SRAE), un plan à long terme de "diagnostic rapide" des plans d'eau de son bassin.

Elle utilise un protocole qui se limite à un cycle annuel et à trois interventions sur le terrain, aux périodes de l'année les plus caractéristiques de l'état des lacs considérés, s'intéresse simultanément aux sédiments et à la pleine eau; associe les examens hydrobiologiques aux analyses physicochimiques en faisant éventuellement appel à des techniques d'échantillonnage intégré, et vise, autant que faire se peut et encore partiellement à titre expérimental, une expression synthétique simplifiée des résultats, sous forme d'indices.

Bien qu'opérationnelle en l'état, des ajustements et approfondissements méthodologiques restent encore nécessaires à sa mise au point définitive et surtout à son extension à tous les types de plans d'eau.

SUIVI

L'état du lac supposé connu, le suivi consiste à en apprécier l'évolution.

Il est dans tous les cas utile, quelle que soit l'importance du lac, pour assurer un minimum de surveillance, contrôler à intervalles réguliers son état et vérifier qu'aucune évolution pernicieuse n'est engagée. Sur ceux où des travaux de protection ont été réalisés, il est indispensable pour en tester les résultats et faire apparaître, le cas échéant, la nécessité de les compléter.

Suivi lourd

L'exemple type est celui du Léman sur lequel

des observations systématiques et continues sont effectuées depuis 1957 sous l'égide de la "Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman" (CIPEL), par les laboratoires Suisses et Français. Cette surveillance très lourde malgré certains aménagements apportés, procède par programmes quinquennaux et s'accompagne de recherches sur des thèmes particuliers (cycle du phosphore, modélisation et analyse des données, surveillance des micropollutions pour le programme 1986-1990 en cours). Cette technique s'apparente en fait beaucoup plus à un diagnostic approfondie renouvelée.

Le coût d'un tel dispositif (près de 3 millions de francs par an), adapté à la dimension du Léman et aux moyens financiers mobilisables, en fait évidemment un cas unique, non extrapolable aux autres lacs.

Suivi allégé

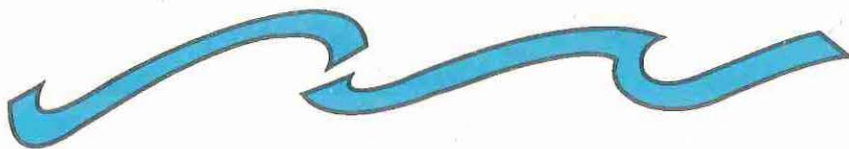
Une méthode en a été proposée pour le lac du Bourget. Elle est basée sur trois principes :

- l'observation d'un faible nombre de paramètres caractéristiques de l'état du lac et faciles à mesurer, à des fréquences adaptées à leur vitesse d'évolution. Les éléments retenus sont la transparence, l'oxygène, les nitrates, les phosphates et la chlorophylle. Ces mesures sont hebdomadaires en été pour la transparence, l'oxygène en surface et la chlorophylle ; mensuelles toute l'année pour les autres paramètres.

- leur transformation simple en une série "d'indices" annuels : moyenne de certaines mesures de transparence, des sursaturations en oxygène en surface, des sous saturation à la thermocline* et au fond, de la chlorophylle d'été, teneurs en nitrates et en phosphates au moment du mélange hivernal. Cette technique met leur interprétation à la portée de non spécialistes ; une évolution dans un sens ou dans l'autre de ces indices annuels est sensée traduire celle de l'état du lac.

- l'utilisation de structures locales, en l'occurrence une cellule technique de deux agents relativement qualifiés, qui disposent de moyens de mesures adaptés et sous la tutelle matérielle et scientifique du Syndicat du Lac du Bourget et de la Direction Départementale de l'Agriculture et des Forêts de Savoie, lui consacrent une partie de leur temps.

Son application depuis 1981 a donné les résultats résumés dans la figure ci-après qui font



apparaître une lente et régulière amélioration de l'état du lac.

Depuis 1988 la cellule technique du lac du Bourget suit parallèlement le lac d'Aiguebelette voisin.

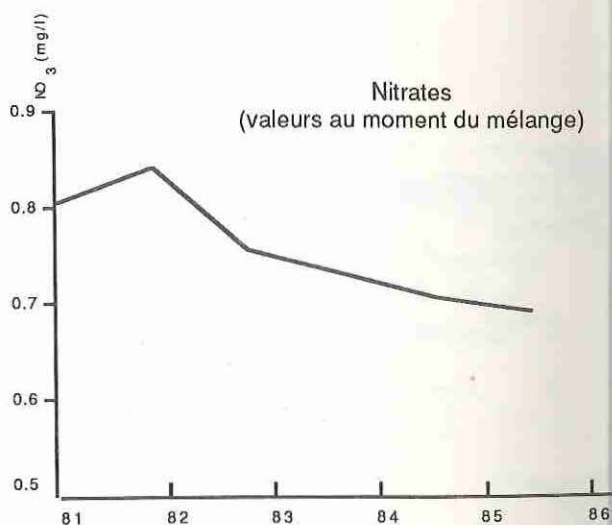
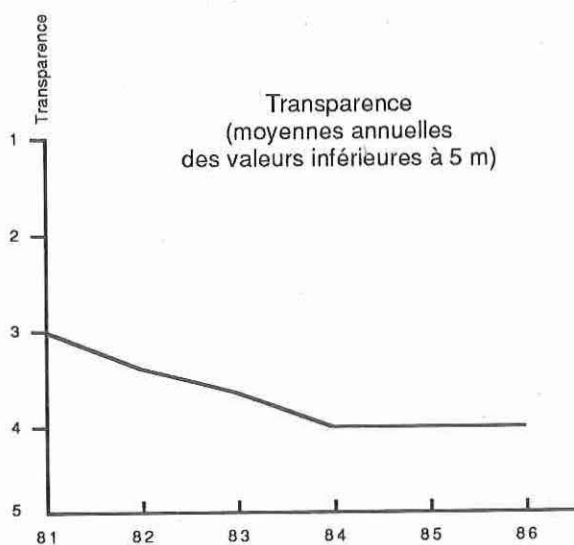
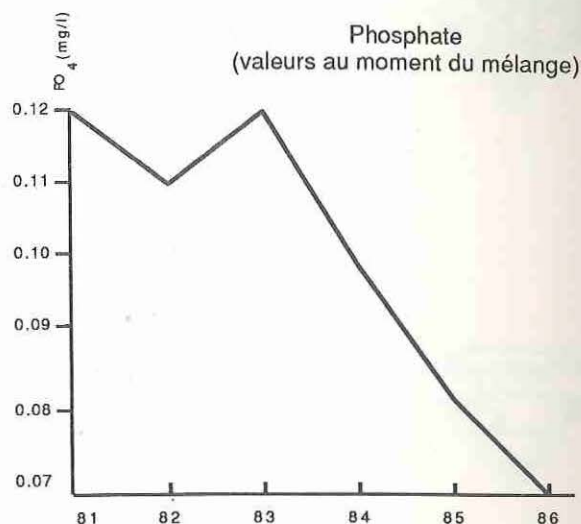
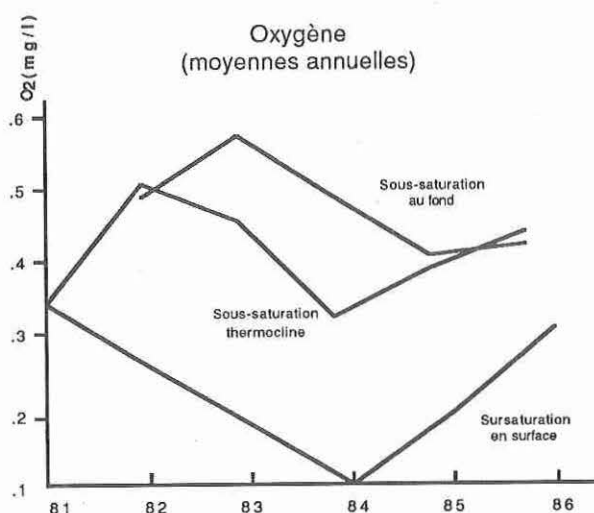
Mais il doit être possible, au prix d'un certain allègement du protocole et parfois du matériel, de former ailleurs des équipes équivalentes, dont la motivation doit être la qualité de base.

Il reste que la méthode demeure encore trop coûteuse et n'est applicable qu'aux lacs d'une certaine importance.

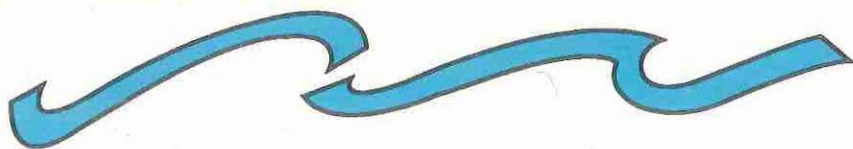
Suivi - divers

Toutes sortes d'autres méthodes peuvent être imaginées, compte-tenu des caractéristiques spécifiques du plan d'eau, des objectifs poursuivis et des moyens disponibles. On peut citer les observations annuelles reprises depuis peu sur le Lac d'Annecy à l'initiative du Syndicat du Lac (SICRLA) après une interruption de plusieurs années.

L'Agence de Bassin Rhône Méditerranée Corse a l'intention de renouveler à un rythme en principe quinquennal la diagnose rapide évoquée plus haut, la transformant en une sorte de suivi.



Lac du Bourget - Suivi allégé.



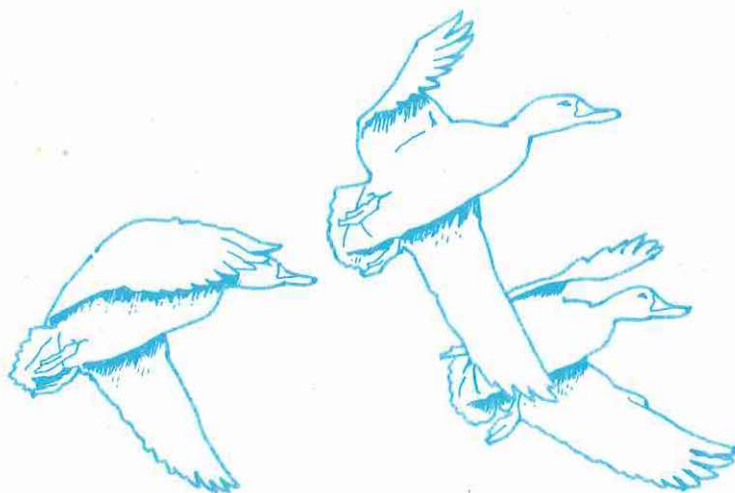
LES PETITS PLANS D'EAU

Il existe enfin un grand nombre de plans d'eau sensibles, notamment ceux utilisés comme réservoirs d'eau potable ou comme bassins récréatifs, mais dont l'importance ne justifie l'application d'aucun des protocoles examinés plus haut, ni pour leur diagnostic, ni pour leur suivi. On s'en tient, et encore pas toujours, à des analyses d'eau sporadiques pour confirmer leur potabilité ou le respect des normes bactériologiques.

L'attention des gestionnaires doit être attirée sur la nécessité d'une auscultation à intervalles réguliers (3 à 5 ans) selon un protocole spécifique à chacun, mais qui pourrait être proche de celui de la diagnose rapide. Il pourra se limiter cependant à deux ou même une seule

campagne en période d'utilisation intense. On incluerait au programme, outre des éléments concernant la qualité de l'eau d'alimentation (pollution organique et bactériologique) et la qualité du sédiment prélevé au fond du plan d'eau, des descripteurs de l'évolution biologique : par exemple cartographie évolutive de la ceinture végétale et des herbiers, étude de la structure d'une population de poissons (par exemple l'espèce dominante) et son état sanitaire.

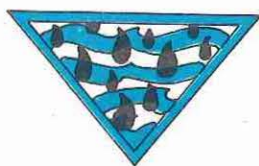
Bien évidemment, en cas de phénomène anormal, des échantillons d'eau, d'algues surnageantes ou de poissons malades devront être acheminés rapidement (et en ambiance réfrigérée) aux laboratoires spécialisés (SRAE, CEMAGREF, Ecole Nationale Vétérinaire, etc).





Chapitre 4 :

QUELQUES USAGES DES PLANS D'EAU



4.1- La diversité des usages

4.2- Principes d'aménagement et de gestion des petits plans d'eau



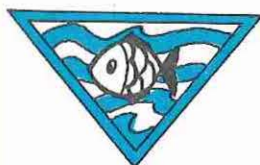
4.3- Les retenues électriques en milieu Alpin

4.4- Les aménagements hydro-élec- triques au fil de l'eau : l'exemple du Rhône



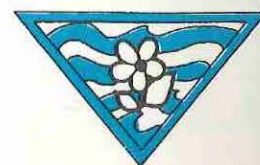
4.5- Réserves d'eau potable

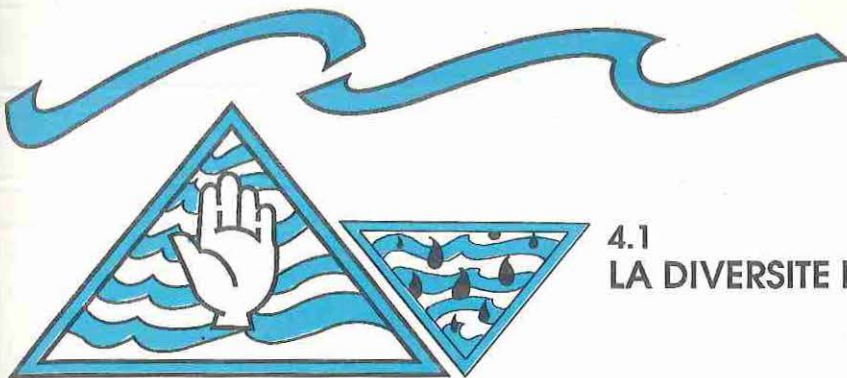
4.6- Les lacs de haute montagne



4.7- Quelques aspects piscicoles

4.8- Activité autour et sur un grand plan d'eau. Protection de son environnement (un exemple : le Lac du Bourget)





4.1

LA DIVERSITE DES USAGES

La finalité d'un plan d'eau est une notion neuve. A l'origine existaient les lacs naturels. Parce que la densité de population était faible, ses besoins limités, ses loisirs inexistants, l'homme avait peu d'influence sur leur évolution et il n'existait pas de conflit d'utilisation.

Trois phénomènes relativement récents ont modifié la situation du tout au tout.

L'urbanisation et l'industrialisation ont multiplié et concentré les pollutions. L'homme, à l'origine de cette agression, ne peut plus se contenter de laisser faire. Il doit intervenir pour protéger, voire restaurer le milieu naturel, et les lacs en particulier.

De nouveaux besoins économiques sont apparus entraînant la création de retenues artificielles à finalité spécifique : hydroélectricité, irrigation, eau potable, régulation des cours d'eau (écrêtement des crues ou soutien des étiages). Puis plus récemment des plans d'eau liés à l'assainissement des agglomérations : lagunes de traitement des eaux usées,

retenues d'eaux pluviales ; ou à leur nourriture : étangs de pisciculture.

Vient enfin **le besoin de loisirs**, certains parlent de civilisation, dont le plan d'eau, succédané local de la mer, est devenu un des facteurs essentiels avec ses trois composantes : le site, pour le plaisir de l'oeil et le repos de l'esprit ; la plage pour baignade, bronzage et activités accessoires ; l'eau et les activités nautiques sous toutes leurs formes. N'ayons garde d'oublier la pêche de loisir qu'on retrouve aux trois niveaux. Et **l'écologie**, dans son acception de sauvegarde de la nature : pour les plans d'eau à finalité économique, elle n'est en général qu'une préoccupation marginale ; elle est une des composantes essentielles de ceux dont les loisirs sont l'objectif principal.

Il serait facile de montrer, et chacun l'a sûrement vécu, que ces divers usages sont antinomiques. Il est non moins évident que tout, des nécessités de la rentabilité économique aux pressions sociales, pousse à les réunir sur un même plan d'eau.





4.2

PRINCIPES D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES PETITS PLANS D'EAU A VOCATION TOURISTIQUE

LE DIFFICILE MOMENT DU CHOIX

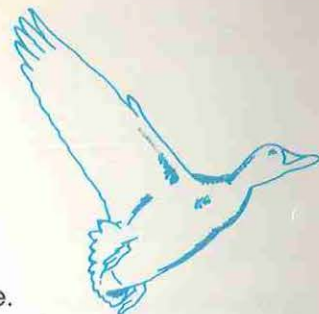
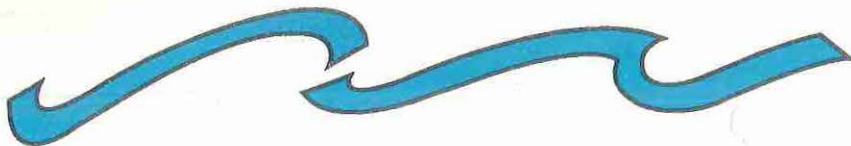
L'intérêt économique, quelquefois surestimé, de l'aménagement d'un plan d'eau près d'une agglomération affirmant sa vocation touristique, incite un nombre sans cesse croissant de collectivités à réaliser leur projet. Or les choix possibles sont très nombreux, par exemple la simple baignade aménagée, le "miroir" recomposant le paysage urbain, la base sportive ou, à l'extrême, le parc de loisirs. Certaines difficultés naissent souvent du simple fait d'une mauvaise définition de l'objectif recherché, conduisant ensuite à négliger l'environnement général, l'insertion de ce pôle attractif dans le paysage existant, son équipement, son urbanisation ultérieure.

Nous savons que des contraintes diverses sont liées à l'utilisation des eaux (irrigation, énergie), à leur qualité (objectifs de qualité, rejets autorisés, évacuation des crues et transport solide...), à leur statut et celui des rives (domaine public ou privé, voiries et servitudes, risques de spéculations foncières...).

De plus, il faut tenir compte du coût de l'entretien de ce nouveau milieu, dont le "gestionnaire" ignore trop souvent qu'il possède une activité biologique, et donc des réactions organiques, jugées indésirables, dès lors qu'elles compromettent un ou plusieurs usages. Il est difficile de rendre compte de la diversité des plans d'eau utilisables pour les loisirs.

Type	Description physique	Origine et qualité de l'eau	Valeur biologique	Valeur touristique	Problèmes spécifiques
1 Retenue en rivière	Seuils de 2 à 12 m sur lit naturel	Débit et qualité de la rivière	Proche de celle de la rivière.	Bonne mais activités réduites.	Obstacle pour poissons Engrèvement et crues Coût élevé. Statut foncier.
2 Sites collinaires (type irrigation)	Petit réservoir sur pente modérée : digue en terre, profil en V.	Ruissellement. Qualité variable dans le temps	Assez faible, sauf pour quelques espèces Berges stériles.	Plutôt faible Pêche surtout.	Marnage et tenue des berges. Evacuation des crues. Esthétique.
3 Sites alluvionnaires (lit majeur ou plaine)	Anciennes sablières, ballastières et emprunts en bordure de fleuve.	Nappe phréatique sauf en forte crue Qualité bonne, stable	Variable selon l'âge, colmatage, T°, gestion spécifique.	Usages variés mais aspect physique à remodeler.	Berges à pic = baignade dangereuse. Aspect minéral.
4 Bras morts, îlots, noues.	Milieux marginaux des grands cours d'eau.	Eau du fleuve Turbidité, T°.	Grande. Zones à protéger.	Grande mais pour une faible densité. Pêche, repos.	Zone naturelle à gestion douce. Colmatage à surveiller, faucardage.
5 Etangs de plaine	Type classique. Peu profond	Variable, mais dominante "drainage"	Bonne à excellente selon gestion Pisciculture surtout	Bonne à forte selon surface et environnement	Propriété. Entretien et contrôle des végétaux. Curage périodique
6 Etangs particuliers	1. Type plat, sur marais ou tourbière 2. Etang en forêt	1. Drainage/pluvial 2. Eau acide, humus	1. Bonne à forte 2. Faible, pauvre	1. Faible, problème d'accès 2. Bonne (cadre)	Berges instables, comblement rapide et gestion difficile (1 et 2)
Pour mémoire					
7 - lacs d'altitude	Glacières, tourbières volcaniques	Eaux pures	Oligotrophie	Forte sauf nautisme	Isolement, gel, site classé
8 - Grands lacs	Type alpin ou côtier	Variable (Cf. exemples traités par ailleurs)	Forte, sous exploitée	Grande (Cf. chapitre spécial)	Réglementation, suivi
9 - Grandes retenues	Grands volumes, profonds	Fonctionnement lac			

Principaux types de plans d'eau à vocation touristique



Dans ce tableau, qui dresse une typologie forcément caricaturale des plans d'eau utilisables pour les loisirs, on voit apparaître, pour chaque modèle, les propriétés les plus caractéristiques.

L'origine de l'eau et son temps de séjour dans le plan d'eau conditionnent pour une bonne part à la fois le fonctionnement et les usages possibles du milieu. Malgré leur diversité évidente, tous les petits plans d'eau s'éloignent du modèle "lac" par un fait essentiel qui est l'homogénéité physico-chimique de la masse de l'eau (absence de stratification), même si la composition de l'eau peut connaître des fluctuations saisonnières importantes.

En pratique le gestionnaire d'un petit plan d'eau, disons de moins de 10 ha, doit prendre conscience du principe de fragilité lié essentiellement à une faible inertie physico-chimique. Comme l'aquariophile il remarquera que les phénomènes sont toujours plus rapides et plus aigus dans les petits bassins que dans les grands ; et les remèdes curatifs nécessairement plus brutaux. D'où l'impérieuse nécessité de bien maîtriser, dès la conception du projet, les paramètres dominants.

Nous tentons donc ici, partant des phénomènes généraux déjà évoqués précédemment et applicables à tous les plans d'eau, de faire apparaître les particularités liées à leur faible superficie et en dégager les règles d'aménagement et de gestion adaptées aux petits plans d'eau de loisirs.

COMMENT ABORDER LOGIQUEMENT LA REFLEXION ?

L'aménagement d'un plan d'eau pour les loisirs commence impérativement par une bonne estimation de ses potentialités, par la connaissance de sa topographie (forme, pente des berges et du fond, bathymétrie...), de la position géographique (géologie, exposition, vents dominants...) et de l'origine et de la qualité des eaux. De ces facteurs physiques primordiaux dépendra, non seulement le fonctionnement écologique, mais aussi la qualité des usages de loisirs pratiqués et de leur pérennité. Un seul exemple suffit : la croissance de la ceinture végétale aquatique et semi-aquatique, conditionnant la pratique des sports nautiques, est bien évidemment sous la dépendance des conditions de milieu

offertes par chaque site.

Bien sûr certains éléments physico-chimiques engendrés par les trois éléments AIR-EAU-SOLEIL ne peuvent être maîtrisés :

- La température, ou plutôt le cycle thermique annuel, est la résultante des actions du climat, de l'origine de l'eau, et de l'environnement du plan d'eau. Les pièces d'eau volumineuses, profondes, ombragées ou alimentées par des eaux souterraines, montreront la plus grande inertie thermique, ce qui est un caractère biologiquement favorable.

La température maximale moyenne du mois le plus chaud est un critère utilisé, par exemple pour définir les aptitudes piscicoles du plan d'eau : 20°C est la limite tolérée par les salmonidés.

Les plus grands froids n'ont que peu d'incidence biologique.

L'ensoleillement et l'alimentation en eau restent donc les deux seuls leviers sur lesquels on peut espérer agir, d'ailleurs très faiblement.

- L'oxygène dissous est le gaz absolument nécessaire à la vie. Il provient surtout de l'air, et pour une part variable de l'activité photosynthétique* des végétaux aquatiques pendant le jour. En se réchauffant, les eaux perdent dans l'atmosphère leur oxygène, au moment même où les êtres vivants voient leur métabolisme et leurs besoins augmenter. Cette situation atteint son point critique en fin de nuit, quand tous les organismes (végétaux compris) ont additionné leurs consommations d'oxygène.

Cette situation de sous-saturation (déficit par rapport à l'équilibre Air-Eau) est limitante pour certains organismes (cas des salmonidés en-dessous de 7 mg d'oxygène par litre). Par contre, une sursaturation modérée (jusqu'à 150 % de la saturation) est habituelle en été, et bien tolérée.

- Le pH et le gaz carbonique sont souvent liés dans l'évolution générale de la réaction acide ou basique de l'eau, qui ne joue qu'un rôle biologique limité au voisinage de la neutralité (6 à 9). Il existe cependant des milieux naturellement acides, généralement en régions cristallines, qui nécessitent un amendement basique (chaulage) pour retrouver une production piscicole satisfaisante.