

caractérisation
et
essais de restauration
d'un écosystème dégradé :
le Lac de Nantua



COLLECTION

**Caractérisation et essais de restauration
d'un écosystème dégradé :**

Le lac de Nantua

HYDROBIOLOGIE ET AQUACULTURE

Collection dirigée par R. BILLARD

Déjà parus dans la même collection :

- La Pisciculture en étang

Arbonne-la Forêt, 11-12-13 mars 1980

R. Billard, éd.

1980, 406 p.

- Le Brochet : gestion dans le milieu naturel et élevage

Grignon (France) 9-10 sept. 1982

R. Billard éd.

1983, 374 p.

- L'Aquaculture du Bar et des Sparidés

Sète (France) 15-16-17 mars 1983

G. Barnabé et R. Billard éd.

1984, 542 p.

sous presse :

- Gestion piscicole des lacs et retenues artificielles

Aups (France) 15-16 nov. 1983

**Caractérisation et essais de restauration
d'un écosystème dégradé :**

Le lac de Nantua

Incidences du détournement des eaux usées
et d'une oxygénation hypolimnique,
sur les eaux et la biocénose d'un lac
à *Oscillatoria rubescens* D.C.

J. FEUILLADE éd.
INRA, Station d'Hydrobiologie lacustre
F-74203 Thonon-les-Bains

Couverture (fig. 1) : *Le lac de Nantua vu de l'est.*
La ville récente s'étend entre la vieille ville et la rive du lac.

Liste des collaborateurs

G. BALVAY
G. BARROIN
P. BLANC
J. FEUILLADE
M. FEUILLADE
A. ORAND
J. PELLETIER

Institut de Limnologie
INRA, Station d'Hydrobiologie lacustre
75, avenue de Corzent
F-74203 Thonon les Bains Cedex

F. CHAHUNEAU

INRA, CNRZ, Station de Biométrie
Domaine de Vilvert
F-78350 Jouy en Josas

Sommaire

AVANT-PROPOS	5
I - Introduction	7
II - Cadre de l'étude	9
1. Le lac et son bassin versant	9
2. L'organisme caractéristique : <i>Oscillatoria rubescens</i> D.C.	16
3. Les travaux de protection et de traitement du lac	24
III - Résultats	29
1. Météorologie et hydrologie	29
2. Physico-chimie des eaux	36
3. Phytoplancton	47
4. Zooplancton	74
IV - Discussion et conclusions	81
1. Aspects dominants du fonctionnement du lac	81
2. Comparaison avec les grands lacs alpins	107
3. Evolution du lac	110
4. Hypothèses sur les facteurs expliquant la présence d' <i>Oscillatoria rubescens</i> dans le lac de Nantua	112
5. Les traitements	113
V - Modélisation	123
1. Les modèles	123
2. Les modèles empiriques	124
3. La modélisation rationnelle ou déterministe	127
VI - Annexes - Méthodes et Techniques	145
1. Microclimatologie	145
2. Hydrométrie	146
3. Prélèvements et mesures physico-chimiques <i>in situ</i>	147
4. Analyses physico-chimiques	148
5. Mesures des paramètres biologiques	150
6. Equations empiriques utilisées dans les calculs météorologiques	152
VII - Références bibliographiques	155

Avant-propos

L'eau est sans conteste l'élément naturel le plus nécessaire à la Vie apparue à l'aube des temps, dans les premiers océans. Actuellement, l'eau douce est irremplaçable pour l'alimentation de l'homme et des animaux ainsi que pour l'irrigation des cultures. L'homme lui a trouvé d'autres usages dont beaucoup en relation avec les activités de loisirs peuvent être considérés comme un luxe par les populations qui en sont privées. Dans nos régions tempérées les ressources hydriques sont si abondantes que nous avons négligé la valeur de l'eau en l'employant systématiquement pour recevoir nos déchets : elle les a longtemps cachés en les diluant et en les transportant en aval. Maintenant nous avons de plus en plus de difficulté à trouver l'eau convenant à nos besoins fondamentaux, que nous ne pouvons satisfaire qu'au prix de traitement de plus en plus coûteux. Même son usage à des fins de loisir a été compromis du fait de son aspect souvent peu engageant et de son état sanitaire parfois douteux. En conséquence le respect de l'eau mais aussi la restauration des ressources dégradées sont des impératifs actuels.

Les eaux sont peuplées de nombreux êtres vivants entre lesquels existent des interrelations que nous sommes loin de connaître parfaitement. En intervenant sur ces écosystèmes, l'homme a souvent joué à l'apprenti sorcier par méconnaissance de leur fonctionnement. Du fait du grand pouvoir de dispersion de l'eau toute modification locale se répercute sur l'ensemble de l'écosystème. En outre, les écosystèmes aquatiques sont rarement clos et réagissent sur ceux situés en aval ; les perturbations sont transmises de proche en proche jusqu'aux océans qui, malgré leur immensité, montrent déjà des signes évidents d'altération.

Il découle de cette complexité que l'on dispose rarement de la solution immédiate aux problèmes créés par l'évolution perturbée des écosystèmes aquatiques. La recherche scientifique, à défaut de connaître d'emblée la réponse à donner à chaque cas particulier, dispose de méthodes d'investigation adaptées. Mais les résultats ne peuvent être qu'exceptionnellement immédiats. A la complexité de l'écosystème s'ajoutent les variations d'une année à l'autre, notamment celles en relation avec la climatologie, il en résulte la nécessité de suivre son fonctionnement sur plusieurs années.

Une fois le diagnostic posé, une intervention peut être envisagée. Il ne peut s'agir que de recommandations car le scientifique dispose rarement, pour des raisons éthiques, financières, juridiques, voir politiques, du pouvoir d'intervention directe sur un milieu naturel aussi vaste qu'un lac ou une rivière. Comme ces recommandations doivent être fiables, il est souvent nécessaire de les tester, soit sur des modèles physiques à échelle réduite, soit sur des modèles mathématiques. Toute étude et correction d'écosystème aquatique est donc une oeuvre de longue haleine.

L'exemple du lac de Nantua présenté ci-après, concerne un lac de taille moyenne. Néanmoins, la complexité du sujet est telle que l'équipe pluridisciplinaire qui l'a étudié et en a exploité les résultats n'a pas eu la possibilité d'en couvrir tous les aspects et a dû faire un choix motivé par la nature du problème rencontré. Les auteurs ont souhaité donner une forme didactique à la présentation de ce document.

* *

Ce texte a été rédigé par une équipe de chercheurs de la Station d'Hydrobiologie Lacustre de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Thonon-les-Bains. L'équipe a été secondée dans le travail de terrain et de laboratoire par les techniciens de la Station, son ouvrage n'aurait pas été mené à bon terme sans leur participation active, ils ne peuvent être cités tous ici, qu'ils nous en excusent.

Le Ministère de l'Environnement a apporté son concours à l'étude par l'intermédiaire efficace de J. GARANCHER. L'édition a été réalisée avec les conseils amicaux et l'appui bienveillant de R. TOMASSONE, J. LECOMTE, B. HURPIN de l'INRA et de P. NIVAL de Paris VI.

Les dessins sont dus à R. ROUSSO de l'atelier de l'INRA à Versailles.

I - Introduction

Le lac de Nantua (fig. 1)* est souvent cité en France comme un exemple caractéristique de l'influence néfaste de l'activité humaine sur l'environnement. Le nom d'*Oscillatoria rubescens* D.C. apparaît alors pour décrire les proliférations algales qui en sont la manifestation la plus importante. Les premières descriptions et études remontent à DELEBECQUE (1898), puis LEGER (1927). Ce lac est considéré eutrophe depuis l'étude de HUBAULT (1947). Le premier suivi régulier a été réalisé de 1963 à 1969 (SERRUYA & al., 1965 ; SERRUYA & SERRUYA, 1966 ; SERRUYA & al., 1966 ; VIVIER & SERRUYA, 1966 ; VIVIER, 1967 ; VIVIER & al., 1967 ; BROUARDEL & SERRUYA, 1968 ; ORAND & GAGNAIRE, 1969 ; VIVIER & al., 1970 ; VIVIER & ORAND, 1971). A partir de 1969 l'étude du lac a été poursuivie par les chercheurs de la Station d'Hydrobiologie Lacustre (INRA) de Thonon-les-Bains (FEUILLADE, 1972 ; FEUILLADE & FEUILLADE, 1972 ; FEUILLADE & FEUILLADE, 1975a ; ORAND, 1973 ; FEUILLADE & ORAND, 1974). Ces études ont confirmé l'état eutrophe du lac et ont conduit à proposer plusieurs méthodes de restauration : chaulage du lac et siphonage de la moitié du débit de l'émissaire (rapport MOL, non publié) siphonage égal au débit de l'émissaire (rapport FEUILLADE, non publié), aération hypolimnique (projet MEYER, non publié). Seule une technique de restauration, l'oxygénation hypolimnique (TORRES & BONNEAU, 1977) a été réellement appliquée, à titre expérimental il est vrai.

Un lac colonisé pendant la plus grande partie de l'année par des Cyanophycées est généralement considéré comme eutrophe. Ces algues que l'on peut rencontrer dans des milieux fort divers comptent parmi elles *Oscillatoria rubescens* dont le nom rappelle la couleur. Les Cyanophycées planctoniques * (fig. 1 en couverture).

sont susceptibles de donner lieu à des pullulations anarchiques telles que leur abondance se révèle simplement par la turbidité et par la coloration communiquée à l'eau qui les renferme (fleurs d'eau ou "bloom" des auteurs de langue anglaise). Elles possèdent des vésicules à gaz dont le nombre varie en fonction de l'état physiologique des cellules ; si ces vésicules se multiplient au moment même où la population d'algues est abondante, ces dernières viennent flotter en surface. Poussées par le vent elles s'accumulent sur le bord du lac. Dans le cas des oscillaires il se forme une pâte couleur lie de vin d'où la légende du sang des Bourguignons (*).

Pour DELEBECQUE (1898), Nantua n'était pas un lac rouge mais un lac jaune, riche en matières humiques. L'oscillaire rouge y a été identifiée pour la première fois en 1921 (LEGER, 1927). Il semble que le lac soit devenu rouge à partir de 1950, phénomène rattaché à un fort enrichissement par les eaux usées. Les nuisances ainsi causées, particulièrement désagréables dans une région à vocation touristique, ont motivé des études dans le but d'apporter une solution sur la base d'une meilleure connaissance du milieu.

Cette publication a pour objet principal d'analyser l'incidence des travaux de restauration sur l'évolution du lac à partir des études conduites de 1970 à 1978. Les auteurs ont souhaité que le lecteur non averti trouve dans leur texte les compléments nécessaires à la compréhension des grands phénomènes limnologiques rencontrés.

(*) On raconte en Suisse que le lac de Morat est devenu rouge après la célèbre bataille contre Charles le Téméraire, dont les armées ont été mises en pièces, en 1476. Le sang des Bourguignons (Burgunder Blut) serait alors remonté à la surface. En fait, la première observation scientifique du rougissement de ce lac n'est vieille que d'un siècle et demi seulement (De CANDOLLE, 1826).

II - Cadre de l'étude

1. Le lac et son bassin versant

a. Situation géographique

Situé dans le Jura français, à 64 km de Genève et 92 km de Lyon, le lac de Nantua occupe une cluse orientée Nord-Ouest Sud-Est. L'altitude du plan d'eau est de 475 mètres. Le lac (fig. 2) a 2,5 km de long, 0,6 km de large et 42 m de profondeur maximum. Les données morphométriques essentielles sont rapportées dans le tableau 1 et la figure 3. On y relève en particulier la superficie de 1,42 km² et le volume total de 40,35 millions de mètres cubes.

Le lac de Nantua est d'origine glaciaire. La moraine terminale barrant la vallée au niveau de Nurieux, à l'Ouest de la Cluse, a créé un lac en amont. Ce lac était beaucoup plus grand que le plan d'eau actuel. Il s'étendait de St Martin du Frêne à Montréal. L'Oignin et l'Ange l'alimentaient et, petit à petit, ont comblé la partie aval de faible profondeur. Le lac s'est ainsi trouvé ramené aux dimensions actuelles strictement circonscrites aux limites de la cluse. Il est alimenté pour l'essentiel (80 %) par trois ruisseaux qui se jettent dans sa partie Sud-Est : la Doye, le Merlot Nord et le Merlot Sud. La Doye (★) est un petit ruisseau de 700 m de long qui prend sa source à proximité de Nantua et débouche dans le lac après un cours souterrain sous la

(★) Le nom de "Doye" qui signifie localement "source" a été souvent utilisé pour désigner une source ou le petit cours d'eau qui en jaillit. Il en résulte une homonymie et une confusion géographique fréquentes.

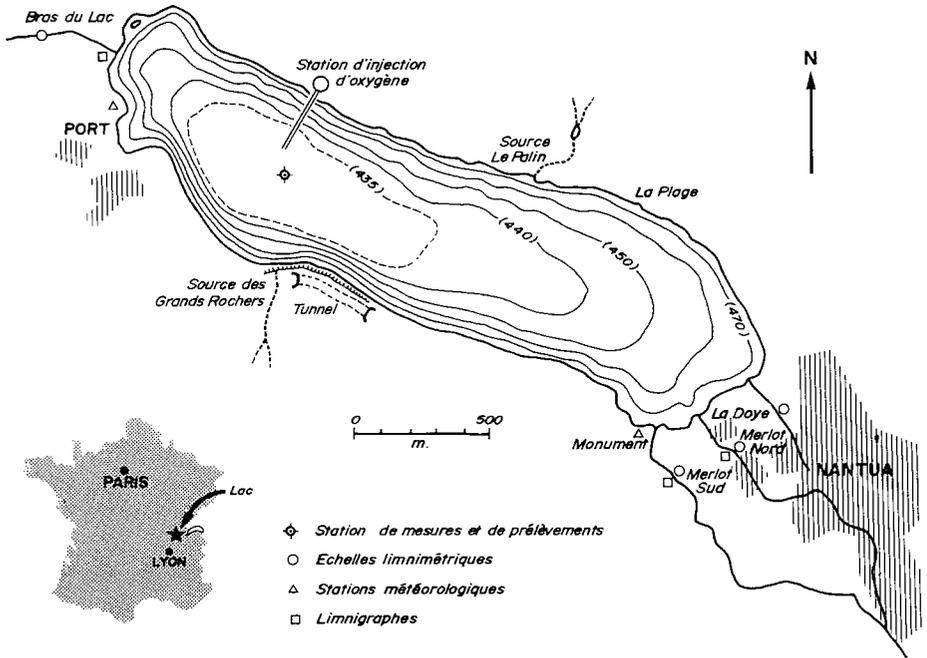


Fig. 2 - Carte du lac avec la localisation des principaux points de mesures. Les apports sont concentrés à l'est ; l'émissaire est à l'ouest.

Tableau 1 - Données morphométriques du lac de Nantua.

Latitude Nord	46,10	degrés
Longitude Est	5,35	degrés
Altitude moyenne du plan d'eau	475	m
Surface du bassin versant	50,3	km ²
Longueur	2,5	km
Largeur	0,650	km
Longueur de la côte	6,120	km
Volume	0,04035	km ³
Profondeur maximum	42,8	m
Profondeur moyenne	28,4	m
Surface du lac	1,421	km ²
Surface du lac / Surface du bassin versant	1/35.4	
Débit moyen à l'exutoire (moyenne 66 - 72)	1,946	m ³ .s ⁻¹
Temps de rétention moyen (66 - 72)	251	jours

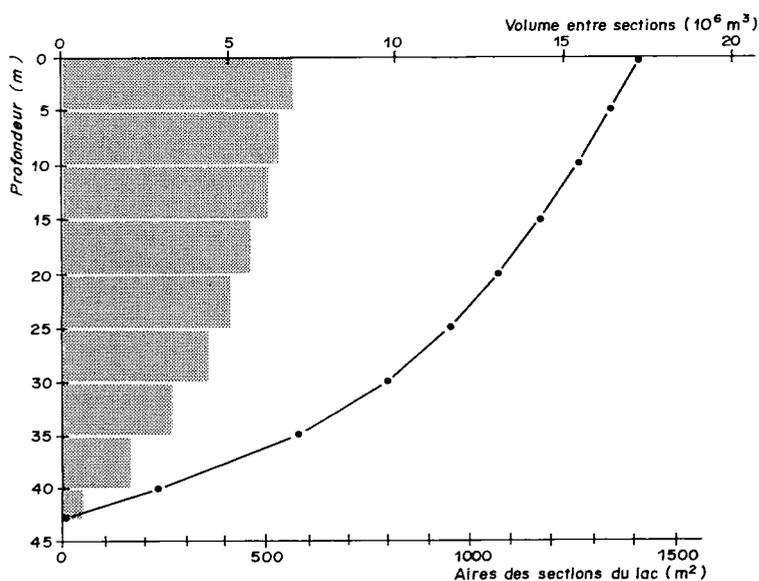


Fig. 3 - Courbe cumulative des aires des sections du lac de 5 en 5 m. Histogramme des volumes des couches d'eau de 5 en 5 m.

ville ; elle a été, avant la mise en place du réseau d'eaux usées en 1973, le collecteur principal des eaux d'égout de la ville. Le Merlot prend sa source en amont des Neyrolles ; après un parcours de 2,5 km il se sépare en deux bras à l'amont immédiat de Nantua ; le Merlot Nord traverse la ville en son milieu alors que le Merlot Sud la contourne. Ce dernier dont le débit peut atteindre 5 à 6 m³.s⁻¹ est le plus important des trois affluents. Un système de vannes manuelles permet de régler le débit des deux bras du Merlot afin d'éviter l'inondation des caves en période de crue. Des sources situées sur la partie Nord (Le Palin) et Sud (Sources des Grands Rochers) complètent cette alimentation superficielle.

Le lac de Nantua ne possède qu'un seul émissaire, le Bras du lac, d'un débit maximum compris entre 8 et 10 m³.s⁻¹ qui, après un parcours de 1,6 km se jette dans l'Oignin, affluent de l'Ain.

b. Bassin versant et géologie locale

Le bassin versant a grossièrement la forme d'une botte de 14 km de tige et 9 km de pied (fig. 4). A partir du lac Genin au Nord, il s'étire d'abord vers le lac de Sylans au Sud-Ouest puis vers le lac de Nantua au Nord-Ouest. D'une superficie totale de 50,3 km², et d'une altitude moyenne de 850 m, il se développe entre les altitudes de 470 m niveau du lac de Nantua et celle de 1 162 m point culminant de la forêt de Moment dans sa partie Sud. Une de ses originalités est d'être occupé par trois lacs en relation hydrique les uns avec les autres. Ces lacs communiquant par des cours souterrains, chacun a son propre bassin et reçoit en sus les eaux du précédent. Les superficies des bassins versants sont les suivantes :

Lac de Genin	:	3,5 km ²
Lac de Sylans	:	30,7 km ²
Lac de Nantua	:	50,3 km ²

Il s'agit ici de bassins versants topographiques et non de bassins versants géologiques que seule une étude particulière aurait délimités, eu égard à la structure karstique du terrain.

Le lac Genin, situé à 836 m d'altitude, a une superficie de 0,082 km² et une profondeur maximale de 16,6 mètres. Son bassin versant est complètement fermé et les eaux de son émissaire, situé au Sud, se perdent après un parcours de quelques mètres. Elles ressortent vraisemblablement un peu plus bas et contribuent à former le ruisseau de Charix, l'un des principaux affluents du lac de Sylans.

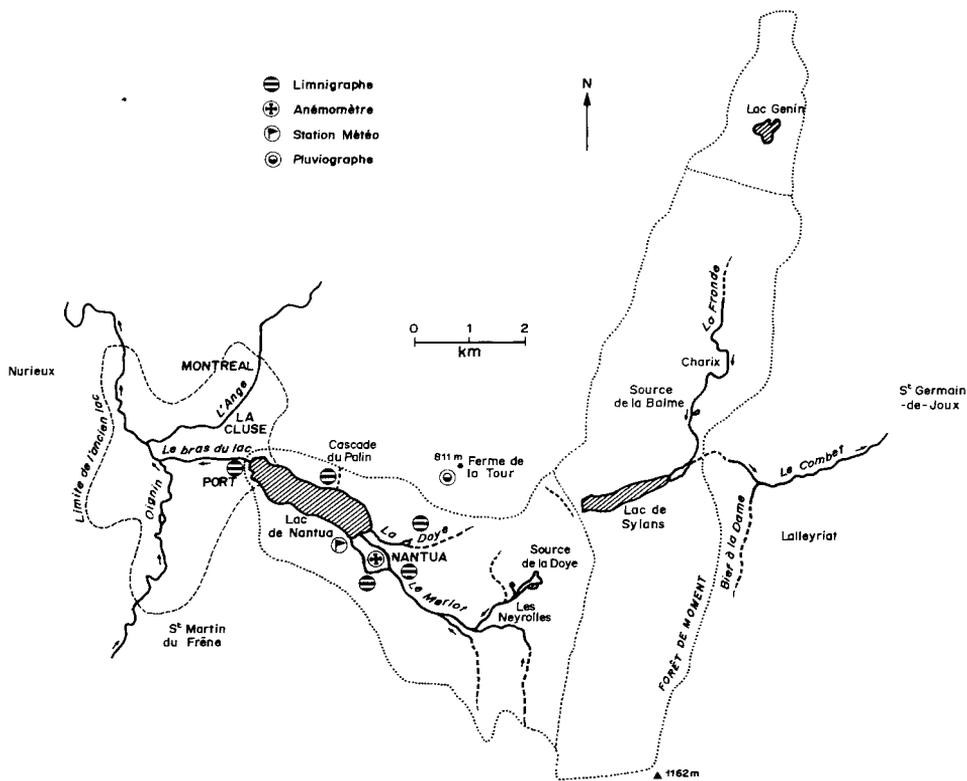


Fig. 4 - Carte du bassin versant du lac de Nantua. Implantations des appareils d'hydrographie et de météorologie. (---) limite aval de l'ancien lac ; (...) limite du bassin versant du lac et des sous-bassins, du lac de Sylans et du lac Genin.

Le lac de Sylans, situé à 584 m d'altitude, a une superficie de 0,497 km² et une profondeur maximale de 22,2 m, il occupe la vallée principale dans la partie Est du bassin. Il s'est formé en arrière d'une zone d'éboulis qui a barré la vallée principale (Charix - Les Neyrolles) dont il occupe la partie Est. L'écoulement initial d'Est en Ouest s'est en partie inversé à la suite du glissement de terrain. Le bassin versant du lac possède de ce fait deux exutoires : un périodique vers la Valserine et le Rhône lors des hautes eaux, l'autre permanent et souterrain à travers la digue d'éboulis en direction du lac de Nantua. Cet exutoire souterrain apparaît 53 m plus bas pour former la résurgence de la Doye et donner naissance au Merlot.

Du point de vue géologique le type de relief local est le pli jurassien caractéristique avec une circulation karstique importante. La dissolution des

calcaires a créé un vaste réseau souterrain rendant difficile l'établissement des bilans hydriques. De plus des failles très importantes sont à l'origine de nombreuses sources (sources du Margiland, des Vignettes, de Lalliat). Ces sources apparaissent aux endroits où le calcaire fissuré repose sur une formation imperméable, à la limite des terrains marneux. Notamment le plateau de Chamoise est partagé par une faille au pied de laquelle prennent naissance des sources sous-lacustres (sources des Grands Rochers) dont on n'a pu évaluer l'importance qu'indirectement (fig. 5 et 6 ; tabl. 2).

Tableau 2 - Bassin versant de Nantua. Caractéristique de forme.

Périmètre P = 44,8 km

Superficie A = 50,29 km²

Dénivelé total Δ = 687 m

Coefficient de compacité de Gravelius (1) :

$$k_c = \frac{P}{2 \sqrt{A}} = 1,77$$

Rectangle équivalent (2) :

$$L = \frac{k_c A}{1,12} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{1,12^2}{k_c}} \right) = 19,86 \text{ km}$$

$$l = \frac{k_c A}{1,12} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1,12^2}{k_c}} \right) = 2,53 \text{ km}$$

Pente moyenne : S = Δ / L = 34,6 m.km⁻¹

Densité de drainage : Dd = $\frac{\sum Li}{A}$ = 0,683 (3)

Notes : (1) Rapport entre le périmètre du bassin et le périmètre d'un cercle ayant la même surface que le bassin.

(2) L'écoulement sur un bassin est approximativement le même que sur un rectangle de même superficie ayant même coefficient de Gravelius et même répartition hypsométrique.

(3) $\sum Li$ = somme des longueurs des affluents au lac et à ses propres affluents. Ici $\sum Li$ = 34,35 km.