

Eutrophisation récente d'un lac de montagne sans occupation humaine (lac de Bastani, Corset : Conséquence d'agents atmosphériques?)

Recent eutrophication of a smart pristine alpine lake (Bastani lake, Corsica - France) as a result of wind stirring and increased atmospheric input

B. Roche and M. D. Loye-Pilot

Volume 2, Number 4, 1989

URI: <https://id.erudit.org/iderudit/705049ar>

DOI: <https://doi.org/10.7202/705049ar>

[See table of contents](#)

Publisher(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (print)

1718-8598 (digital)

[Explore this journal](#)

Cite this article

Roche, B. & Loye-Pilot, M. D. (1989). Eutrophisation récente d'un lac de montagne sans occupation humaine (lac de Bastani, Corset : Conséquence d'agents atmosphériques? *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 2(4), 681–707. <https://doi.org/10.7202/705049ar>

Article abstract

Lake Bastani (Corsica, France), a small alpine lake (2089 m), is located in a pristine rocky watershed. It presents some characteristics of eutrophic lakes, whereas four other similar lakes are oligotrophic or ultraoligotrophic. Moreover, at the beginning of the century it was described as being oligotrophic.

The lake is ice-covered from November to June. Intense phytoplankton activity begins before the ice melts completely and goes on until fall freezing. Consequently Secchi disk transparency is between 3.2 m in June and 1.8 m in August. The algal biomass, as expressed by chlorophyll-a content, is maximum at the bottom. Chlorophyll-a is about 4-5 mg·m⁻³ at ice melting and reaches a maximum of 46 mg·m⁻³ in August. Primary production is highest in the upper levels of water with 41 mg·C·m⁻³·d⁻¹ at - 5 m. These values are 20 to 80 times that of the other Corsican lakes. Regarding the different trophic classifications this lake presents some features of eutrophic lakes.

In 1923 a survey of phytoplankton by Pestalozzi showed that the lake was oligotrophic. This trophic evolution is therefore recent; it is shown by the complete disappearance of *Desmidiaceae*, the near disappearance of Diatoms, the appearance of green algae with *Oedogonium* and *Spirogyra* dominant in summer and autumn, and the development of blue-green algae with *Oscillatoria*.

The seasonal pattern of phytoplankton composition displays diatom development at ice- and snow-melting with the green algae *Oedogonium*. During the summer warmth, green algae are dominant with the blue-green *Oscillatoria*. Green algae *Oedogonium* and *Spirogyra* increase until the fall turnover.

The lake is 2nd-order dimictic with two turnovers in spring and autumn, and two periods of thermal stratification. A strong and frequent wind stirs the lake water inducing homogenisation of the epilimnion and sometimes the disappearance of the hypolimnion. Dissolved oxygen is always present even at the bottom where O₂ saturation is about 50% in winter. Nitrogen is very low - 0.01-0.04 mg·l⁻¹ N-NO₃⁻ and phosphorus (PO₄³⁻) is below the detection level in the epilimnion during summer, due to intense phytoplankton activity. The hypolimnion is richer in NH₄⁺, NO₂⁻ and PO₄³⁻. In spring when the snow begins to melt the surficial waters are enriched with N (NO₃⁻ + NH₄⁺) and P-PO₄³⁻ showing the contribution of concentrated snow water.

In fact atmospheric input is the dominant external loading in such a watershed. Nitrogen atmospheric input is extrapolated from data obtained at Lake Bavella 30 km southwards for 3 years - 1984 to 1986. The dissolved inorganic nitrogen input is about 0.8 g·m⁻²·y⁻¹, equivalent to wastes from some 30 permanent inhabitants for the whole watershed. About 80% of annual rainfall is stored in the snowpack, as are 3% of the dissolved inorganic nitrogen. This nitrogen returns to the lake during a period of about one month which represents 100 kg and a loading of 80 mg·m⁻²·d⁻¹ for 30 days; it is equivalent to wastes from some three hundred capita during one month. Moreover it is known that the first meltwaters are considerably enriched with several ions, especially those of ecological concern, H⁺, SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺. Using findings from literature we can estimate that in the first two weeks of melting, up to half the annual atmospheric input of dissolved inorganic nitrogen reaches the lake with meltwater concentrations of more than 1 mg·N·l⁻¹. The total dissolved nitrogen input is estimated at 1.2 g·m⁻²·y⁻¹ and the total nitrogen input at 1.3 g·m⁻²·y⁻¹.

No data are available for the phosphorus atmospheric input but estimations from literature are about 10 mg·m⁻²·y⁻¹ for orthophosphate and 60 mg·m⁻²·y⁻¹ for total phosphorus. The release of P-PO₄³⁻ from the melting snowcover and from ice, added to the tremendous release of inorganic nitrogen, explains the start of vigorous phytoplankton production before the ice melts completely. By this early start primary production may avoid the flush of nutrients resulting from the flow of melting water.

Trophic conditions in Lake Bastani are a matter of question as the other four lakes studied with the same edaphic conditions are oligo- or ultraoligotrophic. A comparison between Lake Bastani and the ultraoligotrophic Capitelto Lake, which has the same geomorphological and ecological environment, reveals the determining factors of this paradoxical situation, though a nutrient budget is still not available.

A low flushing rate (17 months) cannot be the explanation, as that of Lake Capitelto is similar (12 months).

The external loading (from watershed and atmosphere) being the same, the difference between the two lakes is to be found in the internal loading.

The fact that Lake Capitelto and the other oligotrophic lakes present notable N concentrations in summer (0.2-0.3 mg·l⁻¹), when Bastani displays N⁻ concentrations 10 times lower, is a sign that they are limited in phosphorus. Conversely Lake Bastani is not phosphorus-limited. The determining factor in this situation seems to be windstirring. Lake Bastani is downwind of a pass in the alpine range of Corsica and is submitted to strong frequent winds. Windstirring induces an epilimnion homogenisation, the downward migration of the thermo- and chemoclines. Thus phosphorus from the sediments can be transferred to the photic zone and is not limiting for phytoplankton. Phytoplankton exhausts nitrogen which is very low at the end of summer. In Lake Capitelto as in the other lakes, shielded from the wind by rockwall screens, no mixing occurs, phosphorus cannot be supplied from the sediments and is limiting: nitrogen is not used up and remains at relatively high levels of 0.2-0.3 mg·l⁻¹.

Recent eutrophication cannot be explained by an increase of nutrient availability from the sediments due to windstirring, as no climatic change has occurred in the last century. The probability that internal loading had reached a threshold by progressive accumulation of nutrients in the sediment is very slight if there is no change in the external loading (the unique source of "new" nutrients) and/or the trophic status of the lake. Thus an increase in the external loading seems to be responsible for the eutrophication of Lake Bastani. The atmospheric input is the only external reason for a change in the nutrient rate. An increase in the phosphorus atmospheric input by local (forest fires) and regional (long range pollution) human activities is suspected, but does not seem sufficient to change the trophic status of the lake as it has no effect on other lakes, which remain oligotrophic. Moreover, atmospheric P loading is well below the level of phosphorus release from sediments, as estimated from literature. Conversely, an atmospheric inorganic nitrogen input has increased at least twice due to long range pollution (agricultural, industrial and domestic activities). This was estimated from a typologic classification of rain events in Corsica. This increase in atmospheric nitrogen loading might explain the change in the trophic status of the lake. N having been limiting. In the other P-limited lakes the increased atmospheric N input has only increased the N-NO₃⁻ concentration in lake water. This explanation being the most realistic, it is of great interest to note that long range atmospheric pollution could induce the eutrophication of a pristine oligotrophic lake.

Eutrophisation récente d'un lac de montagne sans occupation humaine (lac de Bastani, Corse) : Conséquence d'agents atmosphériques ?

Recent eutrophisation of a small pristine alpine lake (Bastani lake, Corsica - France) as a result of wind stirring and increased atmospheric input

B. ROCHE(1), M.D. LOYE-PILOT(2)

RÉSUMÉ

Le lac de Bastani (Corse - France), petit lac d'altitude (2089 m) à bassin versant rocheux, est dépourvu de toute implantation ou activité humaine. Ce lac est mésotrophe à eutrophe par certains de ses caractères alors que 4 autres lacs étudiés dans le même contexte sont oligotrophes. De plus, il était décrit au début du siècle comme oligotrophe.

Dans ce type de lacs, les apports atmosphériques constituent la majeure partie de la source externe de nutriments. L'apport d'azote inorganique dissous atmosphérique au bassin versant est important, de l'ordre de $0,8 \text{ g.N.m}^{-2}$ par an, soit l'équivalent du rejet d'une trentaine d'habitants permanents. Les trois-quarts sont relargués à la fonte, pendant environ un mois ; cela représente l'équivalent des rejets d'environ 300 habitants sur le bassin qui, du fait de la faible activité biologique dans les sols à cette température, arrive pratiquement en entier au lac. Ces apports de nutriments à la fonte sont responsables du démarrage très précoce de la production primaire.

(1) SRAE CORSE, Route d'Agliani, BP 605, 20600 Bastia Cedex, France.

(2) Institut de Biogéochimie Marine, ENS, 1, rue Maurice Arnoux, 92120 Montrouge, France.

En l'absence d'un bilan complet des nutriments la comparaison du lac de Bastani avec les autres lacs oligotrophes et en particulier avec celui de Capitello, aux caractéristiques voisines, permet de cerner les facteurs responsables de la différence de leur niveau de trophie. Bastani et Capitello recevant une charge externe semblable, la source interne est probablement responsable de la situation de Bastani. Les concentrations estivales de N-NO₃ notables (0,2-0,3 mg.l⁻¹) des lacs oligotrophes sont un indice de la limitation de leur production primaire par le phosphore. Par contre à Bastani, l'azote étant pratiquement entièrement consommé en été le lac ne semble pas limité par le phosphore. Le vent violent et fréquent qui règne à Bastani semble le facteur déterminant de son niveau trophique supérieur : il assure le brassage de l'eau du lac et la remontée du phosphore (et aussi de l'azote) libéré des sédiments jusque dans la zone photique. Le phytoplancton consomme presque entièrement l'azote, alors que dans les lacs oligotrophes abrités du vent où le phosphore est limitant, les nitrates restent à des teneurs notables.

L'eutrophisation récente du lac de Bastani peut s'expliquer par l'accroissement des apports atmosphériques, les seuls qui aient varié. Le phosphore étant disponible la production primaire devait être limitée auparavant par l'azote. Les apports d'azote inorganique dissous ont été dans cette région multipliés par 2 au moins par la pollution à longue distance. Cette dernière pourrait entraîner à elle seule l'évolution trophique d'un lac de haute montagne, dans un site vierge de toute occupation humaine, lorsque le brassage par le vent assure la mobilisation du phosphore des sédiments.

Mots clés : Lac de montagne, eutrophisation, pollution atmosphérique, bassin versant naturel, Corse.

SUMMARY

Lake Bastani (Corsica, France), a small alpine lake (2089 m), is located in a pristine rocky watershed. It presents some characteristics of eutrophic lakes, whereas four other similar lakes are oligotrophic or ultraoligotrophic. Moreover, at the beginning of the century it was described as being oligotrophic.

The lake is ice-covered from November to June. Intense phytoplankton activity begins before the ice melts completely and goes on until fall freezing. Consequently Secchi disk transparency is between 3.2 m in June and 1.8 m in August. The algal biomass, as expressed by chlorophyll-a content, is maximum at the bottom. Chlorophyll-a is about 4-5 mg.m⁻³ at ice melting and reaches a maximum of 46 mg.m⁻³ in August. Primary production is highest in the upper levels of water with 41 mg.C.m⁻³. d⁻¹ at - 5 m. These values are 20 to 80 times that of the other Corsican lakes. Regarding the different trophic classifications this lake presents some features of eutrophic lakes.

Lake Bastani and the ultraoligotrophic Capitello Lake, which has the same geomorphological and ecological environment, reveals the determining factors of this paradoxical situation, though a nutrient budget is still not available.

A low flushing rate (17 months) cannot be the explanation, as that of Lake Capitello is similar (12 months).

The external loading (from watershed and atmosphere) being the same, the difference between the two lakes is to be found in the internal loading.

The fact that Lake Capitello and the other oligotrophic lakes present notable N concentrations in summer ($0.2-0.3 \text{ mg.l}^{-1}$), when Bastani displays N- concentrations 10 times lower, is a sign that they are limited in phosphorus. Conversely Lake Bastani is not phosphorus-limited.

The determining factor in this situation seems to be windstirring. Lake Bastani is downwind of a pass in the axial range of Corsica and is submitted to strong frequent winds. Windstirring induces an epilimnion homogeneisation, the downward migration of the thermo- and chemoclines. Thus phosphorus from the sediments can be transferred to the photic zone and is not limiting for phytoplankton. Phytoplankton exhausts nitrogen which is very low at the end of summer. In Lake Capitello as in the other lakes, shielded from the wind by rockwall screens, no mixing occurs, phosphorus cannot be supplied from the sediments and is limiting : nitrogen is not used up and remains at relatively high levels of $0.2-0.3 \text{ mg.l}^{-1}$.

Recent eutrophication cannot be explained by an increase of nutrient availability from the sediments due to windstirring, as no climatic change has occurred in the last century. The probability that internal loading had reached a threshold by progressive accumulation of nutrients in the sediment is very slight if there is no change in the external loading (the unique source of "new" nutrients) and/or the trophic status of the lake. Thus an increase in the external loading seems to be responsible for the eutrophication of Lake Bastani. The atmospheric input is the only external reason for a change in the nutrient rate. An increase in the phosphorus atmospheric input by local (forest fires) and regional (long range pollution) human activities is suspected, but does not seem sufficient to change the trophic status of the lake as it has no effect on other lakes, which remain oligotrophic. Moreover, atmospheric P loading is well below the level of phosphorus release from sediments, as estimated from literature. Conversely, an atmospheric inorganic nitrogen input has increased at least twice due to long range pollution (agricultural, industrial and domestic activities). This was estimated from a typologic classification of rain events in Corsica. This increase in atmospheric nitrogen loading might explain the change in the trophic status of the lake, N having been limiting. In the other P-limited lakes the increased atmospheric N input has only increased the N-NO_3 concentration in lake water. This explanation being the most realistic, it is of great interest to note that long range atmospheric pollution could induce the eutrophication of a pristine oligotrophic lake.

Key-words : *Alpine lake, eutrophication, atmospheric pollution, pristine watershed, Corsica.*

In 1923 a survey of phytoplankton by Pestalozzi showed that the lake was oligotrophic. This trophic evolution is therefore recent ; it is shown by the complete disappearance of *Desmidiaceae*, the near disappearance of Diatoms, the appearance of green algae with *Oedogonium* and *Spirogyra* dominant in summer and autumn, and the development of blue-green algae with *Oscillatoria*.

The seasonal pattern of phytoplankton composition displays diatom development at ice- and snow-melting with the green algae *Oedogonium*. During the summer warmth, green algae are dominant with the blue-green *Oscillatoria*. Green algae *Oedogonium* and *Spirogyra* increase until the fall turnover.

The lake is 2nd-order dimictic with two turnovers in spring and autumn, and two periods of thermal stratification. A strong and frequent wind stirs the lake water inducing homogenisation of the epilimnion and sometimes the disappearance of the hypolimnion. Dissolved oxygen is always present even at the bottom where O_2 saturation is about 50 % in winter. Nitrogen is very low - $0.01-0.04 \text{ mg.l}^{-1}$ N-NO_3^- - and phosphorus (PO_4) is below the detection level in the epilimnion during summer, due to intense phytoplankton activity. The hypolimnion is richer in NH_4^+ , NO_2^- and PO_4 . In spring when the snow begins to melt the surficial waters are enriched with N ($\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) and P- PO_4 , showing the contribution of concentrated snow water.

In fact atmospheric input is the dominant external loading in such a watershed. Nitrogen atmospheric input is extrapolated from data obtained at Lake Bavella 30 km southwards for 3 years - 1984 to 1986. The dissolved inorganic nitrogen input is about $0.8 \text{ g.m}^{-2} \text{ .y}^{-1}$, equivalent to wastes from some 30 permanent inhabitants for the whole watershed. About 80 % of annual rainfall is stored in the snowpack, as are $3/4$ of the dissolved inorganic nitrogen. This nitrogen returns to the lake during a period of about one month which represents $\approx 100 \text{ kg}$ and a loading of $80 \text{ mg.m}^{-2} \text{ .d}^{-1}$ for 30 days ; it is equivalent to wastes from some three hundred capita during one month. Moreover it is known that the first meltwaters are considerably enriched with several ions, especially those of ecological concern, H^+ , SO_4^{--} , NO_3^- , NH_4^+ . Using findings from literature we can estimate that in the first two weeks of melting, up to half the annual atmospheric input of dissolved inorganic nitrogen reaches the lake with meltwater concentrations of more than 1 mg.N.l^{-1} . The total dissolved nitrogen input is estimated at $1.2 \text{ g.m}^{-2} \text{ .y}^{-1}$ and the total nitrogen input at $1.3 \text{ g.m}^{-2} \text{ .y}^{-1}$.

No data are available for the phosphorus atmospheric input but estimations from literature are about $10 \text{ mg.m}^{-2} \text{ .y}^{-1}$ for orthophosphate and $60 \text{ mg.m}^{-2} \text{ .y}^{-1}$ for total phosphorus. The release of P- PO_4 from the melting snowcover and from ice, added to the tremendous release of inorganic nitrogen, explains the start of vigorous phytoplankton production before the ice melts completely. By this early start primary production may avoid the flush of nutrients resulting from the flow of melting water.

Trophic conditions in Lake Bastani are a matter of question as the other four lakes studied with the same edaphic conditions are oligo- or ultraoligotrophic. A comparison between

L'eutrophisation récente des lacs est un phénomène bien étudié, due à l'augmentation au cours des dernières décennies des rejets de nutriments (directs ou diffus) liés à l'activité humaine. Des lacs naturellement eutrophes se rencontrent dans des contextes géomorphologiques, et édaphiques particuliers. Les lacs de haute montagne sur substrat granitique, à bassin versant essentiellement rocheux et dépourvus d'occupation humaine sont réputés oligotrophes à ultra-oligotrophes. Cependant au cours d'une étude générale des lacs de montagne corses, réalisée de 1980 à 1983 à l'initiative du Parc Naturel Régional de la Corse, il est apparu que sur 5 lacs étudiés dans ce contexte écologique, tous présentent une activité phytoplanctonique caractéristique des lacs oligotrophes, sauf un, le lac de Bastani ayant certains caractères d'un lac eutrophe ; or il était décrit au début du siècle, avec l'ensemble des lacs corses, comme un lac oligotrophe (PESTALOZZI, 1925).

Cette évolution trophique récente du lac, en dehors de toute influence humaine directe, nous a amené à effectuer une étude complémentaire en 1986 et 1987 (ROCHE, 1987). Elle a montré un enrichissement en azote par les apports atmosphériques qui, en association avec un brassage permanent des eaux, permettrait d'expliquer l'eutrophisation du lac.

SITE ET MÉTHODES D'ÉTUDE

Site d'étude (tableau 1, figure 1)

Tableau 1.

Altitude	2 089 m
Coordonnées :	
Latitude	42° 4' N
Longitude	9° 8' E
Superficie du lac.....	4,4 ha
Superficie du bassin versant	19,0 ha
Profondeur moyenne	10 m
Profondeur maximale	24 m
Périmètre	925 m
Volume	450 000 m ³
Temps de renouvellement des eaux théorique.....	17 mois
Superficie lac/superficie du bassin versant	23 %

Le lac de Bastani (42° 4'N, 9° 8'E - 2089 m), situé dans le massif du Monte Renoso (2352 m) est d'origine glaciaire. Il s'est formé derrière un verrou qui ferme le cirque abandonné par le glacier à l'époque tardiglaciaire, postérieurement à 14 000 ans avant l'actuel.

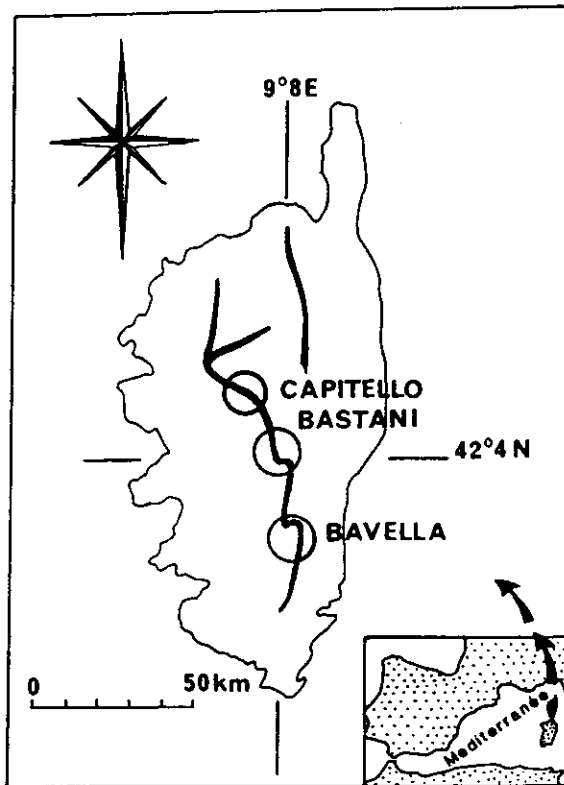


Figure 1.

Situé dans l'étage subalpin, l'environnement végétal est peu abondant et ras, dominé par la présence d'espèces xérophytes épineuses et par place, à l'abris des gros blocs morainiques, de quelques aulnes odorants nains (*Alnus viridis* subsp. *suabveolens*).

Aucune activité humaine n'existe dans le bassin versant, en dehors d'une faible fréquentation par les randonneurs, le lac étant situé hors des circuits balisés.

La période de gel dure environ 6 à 7 mois (novembre à juin) et la couche de glace a atteint au maximum 1,70 m d'épaisseur sur la période d'observation. Dès le dégel, l'activité phytoplanctonique est importante ; elle témoigne d'un démarrage avant la fonte des glaces comme cela a déjà été observé (HOBBIE, 1964, PECHLANER, 1971) et d'une croissance de la biomasse algale rapide, à tendance exponentielle déjà remarquée dans d'autres lacs de montagne (CAPBLANCQ, 1972, CHACORNAC, 1986).

Il faut signaler la présence d'un vent violent quasi permanent dû à la position topographique du lac, dans l'axe du col ouvert sur l'arête centrale de l'île. Il reçoit directement les vents dominants (en fréquence et en intensité) d'Ouest-Nord Ouest. Les conséquences de ce vent violent sur la physicochimie du lac sont analysées et son rôle dans l'eutrophisation est discuté.

Echantillonnage et méthodes analytiques

Le lac

L'étude exploratoire des lacs corses réalisée au cours de missions estivales en 1980, 1981, 1982, 1983 a été complétée par un suivi spécifique du lac de Bastani, grâce à 6 campagnes de mesures en 1986 et une en fin d'hiver (période de gel) en 1987.

L'échantillonnage aux différentes profondeurs est effectué à l'aide d'une bouteille à renversement (type Friedinger). Un certain nombre de paramètres physicochimiques sont mesurés sur le terrain : température, pH, oxygène dissous, ammonium et nitrites. Les autres paramètres sont mesurés au laboratoire, suivant les normes AFNOR, le lendemain du prélèvement.

Le dosage des deux formes d'azote présentant une évolution rapide NH_4^+ et NO_2^- est effectué immédiatement sur place. L'ammonium est dosé par la méthode au bleu d'indophénol, le temps de réaction est de 8 heures et la coloration est stable plusieurs heures ; les nitrites sont dosés par la méthode de GRIESS, la coloration est stable aux faibles teneurs. Les mesures spectrophotométriques sont effectuées quelques heures après (2 à 3 heures, les déplacements étant accomplis en hélicoptère). Les orthophosphates mesurés le lendemain (stockage au froid en flacon de polyéthylène) sont peut-être légèrement sous-estimés. Ils sont dosés par la méthode au molybdate + acide ascorbique.

L'activité phytoplanctonique a été appréciée par la mesure de la biomasse (Chlorophylle *a* : méthode fluorimétrique de LORENZEN) et de la production primaire (méthode au ^{14}C de STEEMANN NIELSEN) (GAUTHIER *et al.*, 1984).

Les précipitations

Les apports d'éléments majeurs par les précipitations ont été mesurés de 1979 à 1986 sur un bassin versant proche, celui de la Solenzara (LOYE-PILOT, 1984, LOYE-PILOT *et al.*, 1986, 1987). Les apports d'azote ont fait l'objet d'un suivi à Bavella (bassin de la Solenzara) pendant 3 ans de 1984 à 1986 (LOYE-PILOT *et al.*, 1988). Les précipitations ont été collectées dans un pluviomètre en plastique de 400 cm^2 d'ouverture restant ouvert en permanence. Le pas d'échantillonnage est variable, de quelques heures en cas de forte pluie à une semaine par temps de neige. Les échantillons sont filtrés sur filtre Nucléopore 0,4 μ après mesure du pH, sur le terrain, et conservés à 4° C à l'obscurité. Les dosages des éléments majeurs et des ions nitrates et ammonium ont été effectués dans les deux mois au laboratoire de Biologie-Géologie de l'ENSJF à Montrouge. Des tests ont montré que la conservation des échantillons est très satisfaisante pour les nitrates, mais on a constaté dans quelques cas (pluies à $\text{pH} > 7$) une légère perte d'ammonium (jusqu'à 15 %). D'autre part, le dosage des nitrites n'est pas effectué en routine, leur contribution étant généralement inférieure à 1 % ; les valeurs d'azote ainsi fournies sont très légèrement sous-estimées.

Les flux annuels d'azote sont obtenus en sommant les apports de chaque événement ; les flux ainsi mesurés correspondent théoriquement au dépôt total (sec + humide) ; mais des tests effectués en 1985 et 1986 ont montré que ce type de pluviomètre est impropre à la collection

du dépôt sec. Les flux d'azote obtenus correspondent en fait au dépôt humide d'azote inorganique.

RÉSULTATS

Niveau trophique (tableaux 2, 3 et 4, figures 2 et 3)

Le lac est caractérisé par une activité phytoplanctonique intense dès la fonte des glaces se maintenant toute l'année jusqu'au gel. Elle se traduit par une transparence de l'eau au disque de Secchi faible comprise entre 3,20 m (juin) et 1,80 m (août).

La biomasse algale appréciée par la mesure de la chlorophylle a (tableau 2), est au minimum de l'ordre de 3 à 5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ au dégel ; elle augmente régulièrement pour atteindre son maximum en août (30 à 46 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ entre 7 et 15 m de profondeur). La production primaire, mesurée en août 1980, (GAUTHIER *et al.*, 1984) est maximale dans les couches supérieures et atteint 41 $\text{mg}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$ à - 5 m (tableau 2). Comparativement aux autres lacs étudiés dans la montagne corse, ces valeurs sont de 20 à 80 fois plus élevées. Le calcul d'un indice trophique planctonique, (BARBE, 1987) basé sur les valeurs maximales de la chlorophylle a et la composition du phytoplancton au cours de deux campagnes de mesures, indique avec une valeur de 73,5 le caractère eutrophe du lac - l'eutrophie étant définie par un indice compris entre 50 et 100 (ROCHE, 1987).

Tableau 2.

Mois	Profondeur - m.	Chlorophylle a - $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$			Production primaire $\text{mg}\cdot\text{C}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{j}^{-1}$ (1980)
		1980	1981	1986	
Juin	0		3,30	5,2	
	2			8,5	
	4		4,37	9,7	
	7			8,8	
	10		4,37	7,5	
	15		5,46	7,5	
Août	0	21,7	16,5	38,7	22,6
	2	-		40,5	-
	4	20,9	38,5	40,5	41,5
	7			44,5	
	10	30,8	40,7	46,2	17,3
	15	30,1	45,7	38,7	2,5
	18	-	-	20,2	-
Novembre	0			22,5	
	2			25,2	
	4			25,6	
	7			24,3	
	10			25,1	
	15			20,2	
	20			18,0	

En période d'activité phytoplanctonique maximale, on constate donc, suivant que l'on se réfère aux valeurs de la chlorophylle *a* ou de la production primaire que le lac s'apparente au type mésotrophe ou eutrophe (figures 2 et 3) (FINDENEGG, 1964 ; CAPBLANCQ *et al.*, 1972 ; VOLLENWEIDER, 1974 ; RESTITUITO et LAIR, 1976 ; MILLERIOUX et RESTITUITO, 1976 ; DEVAUX, 1976 ; PELLETIER, 1978, VERNEAUX *et al.*, 1979 ; FRALEIGH *et al.*, 1981 ; OCDE, 1982). En été, l'allure générale de la courbe de production primaire en fonction de la profondeur ressemble à celle d'un lac eutrophe (figure 3).

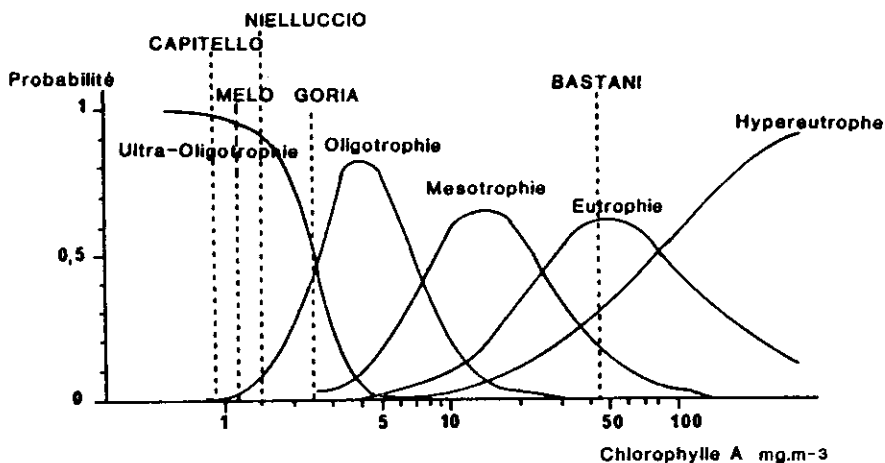


Figure 2.

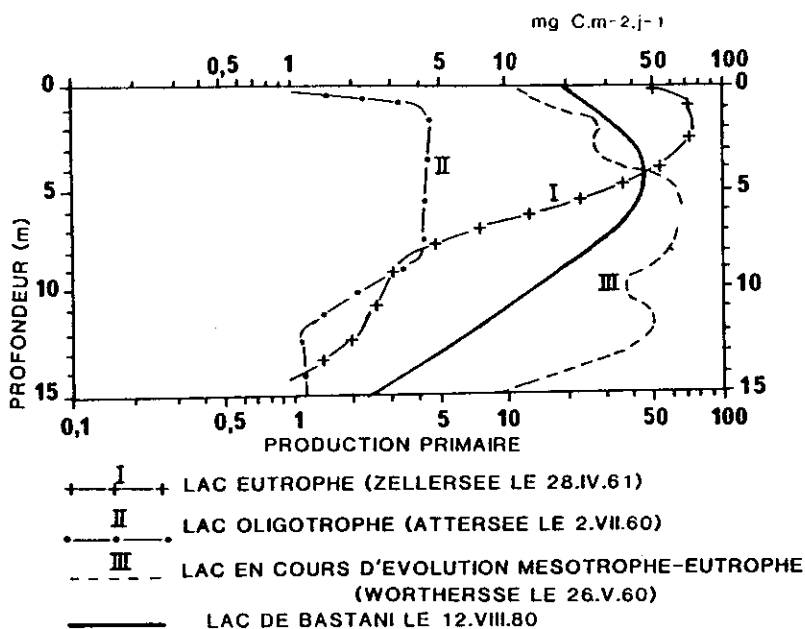


Figure 3.

Cette eutrophisation est récente, puisqu'au début du siècle la description des espèces phytoplanctoniques permettait de dire : "es ist die Schwebel flora eines oligotrophen Sees" (PESTALOZZI, 1925). Elle s'est manifestée par (tableau 3) :

Tableau 3.

	Août 1923	Août 1980	Août 1986
DESMIDIÉES :			
Staurastrum gracile	*		
Closterium S. romanum	*		
Micrasterias americana	*		
DIATOMÉES :			
Tabellaria fenestrata	*		
Tabellaria flocculosa	*		*
Fragillaria crotonensis	*		
Synedra longissima	*		
CHLOROPHYCÉES :			
Sphaerocystis schroeteri	*		*
Oedogonium ssp.		*	*
Spirogyra sp.			*
Eudorina elegans			*
Actinotaenium sp.		*	
CYANOPHYCÉES :			
Oscillatoria ssp.		*	*
Microcystis sp.		*	
Merismopedia sp.		*	
PERIDINIENS :			
Peridinium ssp.		*	*
Peridinium cinctum	*		
Ceratium hirundinella	*		
BACTERIES :			
Sphaerotilus natans		*	*

- La disparition totale des *Desmidiées* : *Staurastrum gracile*, *Closterium S. romanum*, *Micrasterias americana*, caractéristiques des milieux oligotrophes.
- La quasi disparition des *Diatomées*, dont une seule espèce *Tabellaria fenestrata*, se maintient au printemps.
- L'apparition des *Chlorophycées*, qui composent l'essentiel du peuplement planctonique en été avec deux genres particulièrement abondants, *Oedogonium sp.* atteignant 34.10^5 filaments. l^{-1} en août et 52.10^6 filaments. l^{-1} en novembre, et *Spirogyra sp.* dont l'effectif est maximal à l'isothermie d'automne.
- Le développement de *Cyanophycées*, représentées par trois genres parmi lesquels *Oscillatoria sp.* est la plus abondante ($7,2.10^4$ filaments/l).

en août 1986), et qui certaines années avec la disparition de la stratification thermique et l'épuisement du stock d'azote prolifère jusqu'à l'isothermie automnale.

Evolution saisonnière du phytoplancton (tableau 4)

L'activité phytoplanctonique démarre bien avant le dégel complet du lac. L'évolution de la composition du phytoplancton jusqu'à l'isothermie automnale (tableau 4), se traduit par le développement des diatomées après le dégel, dont une espèce *Tabellaria fenestrata* domine largement en association avec une Chlorophycée *Oedogonium sp.* En période de réchauffement estival les Chlorophycées dominent à leur tour avec la Cyanophycée *Oscillatoria sp.* ; seuls les deux genres *Spyrogira sp.* et *Oedogonium sp.*, prolifèrent jusqu'à l'isothermie d'automne, pour y atteindre leur densité maximale.

La succession : Diatomées-Chlorophycées associées aux Cyanophycées, traduit la tendance eutrophe du lac, de même que la présence pendant toute la période chaude de la bactérie filamenteuse *Sphaerotilus natans*, qui semble atteindre son maximum de développement à l'isothermie d'automne. Cette bactérie, colonise les filaments des espèces mortes (*Oedogonium*, *Spyrogira*) ; ce phénomène a été également observé sur un lac à la suite d'une fleur d'eau à *Dinobryon* (ROCHE, 1978).

On remarque que les genres *Spyrogira* et *Oedogonium* qui ne sont pas communément planctoniques, prolifèrent dès le mois d'août et dominent très largement la composition du phytoplancton en novembre (tableau 3).

Evolution saisonnière des principaux paramètres physico-chimiques (tableaux 5 et 6, figures 4 à 8)

Une température peu élevée et une minéralisation excessivement faible résultent de la situation géographique du lac et de son contexte géologique.

La température (figure 4)

Le lac est dimictique de 2ème ordre, et recouvert de glace pendant six mois environ. L'évolution thermique pendant la saison du dégel est soumise à l'influence d'un vent violent, pratiquement permanent, qui certaines années, arrive à brasser l'ensemble de la masse d'eau du lac, homogénéisant entièrement sa température. En août 1986 l'épilimnion est entièrement homogénéisé (12,4° C) et représente 80 % du volume du lac. D'autres années, le brassage affecte l'ensemble du lac et l'hypolimnion disparaît presque entièrement (août 1981).

L'oxygène dissous (figure 5)

C'est en période hivernale, alors que la couche de glace prive le lac d'échanges avec l'atmosphère, que le déficit en O₂ est maximal. La saturation diminue fortement dès la cote - 5 m, mais reste supérieure à 50 % au fond (5,7 mg.l⁻¹ O₂). En période de réchauffement estival, la distribution d'oxygène est également clinograde, et le déficit, de moindre importance, s'établit dès la cote - 10 m. Cette consommation

Tableau 4.

	Mai	Juin	Août	Novembre
DIATOMÉES :				
Melosira varians	*			
Diatoma vulgare	*			
Pinnularia sp.	*			
Tabellaria fenestrata		+++	+	
Tabellaria flocculosa		*		*
Melosira ambigua		*		
Stephanodiscus capucina		*		
Meridion circulare			*	
CHLOROPHYCEES :				
Staurodesmus ssp.	*			
Oedogonium sp.		++	++	++++
Spyrogyra sp.			*	++++
Dictyosphaerium pulchellum				*
Eudorina elegans			+	
Cosmarium sp.				*
Xanthidium sp.				*
Sphaerocystis schroeteri			*	
EUGLENOPHYCEES :				
Trachelomonas sp.	*			
CYANOPHYCEES :				
Oscillatoria ssp.			+	
Merismopedia sp.			*	
Microcystis sp.			*	
PERIDINIENS :				
Peridinium ssp.				+

Abondance :

*	Présence
+	Classe 1
++	Classe 2
+++	Classe 3
++++	Classe 4

Tableau 5.

Date	18 juillet 1980		12 août 1980		31 octobre 1980				16 juin 1980		27 août 1981				
Profondeur (m)	0	9	19	0	10	0	10	16	0	5	10	20	0	10	17
Conductivité ($\mu\text{s.}$)	24	24	23	24	25	27	27	27	25	25	24	23	21	22	22
pH	6.3	5.4	5.8	7.3	6.3	6.4	6.4	6.4					6.5	6.5	6.1
SiO ₂	2.4	1.9	2.8	0.9		0.9	0.9	0.9	2.9			3.2	0.8		1.0
N-NO ₃	0.174	0.124	0.169	0.067		0.010	0.010	0.010	0.152	0.147	0.113	0.135	0.017	0.018	0.064
N-NO ₂	**	**	**	**	**	**	**	**	**			**	**		**
N-NH ₄	*	*	*	*	*	*	*	*	*			*	*		*
P-PO ₄	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**

Concentrations en mg.l^{-1} , pH mesurés au laboratoire

* : $< 0,015 \text{ mg.l}^{-1}$, ** : $< 0,006 \text{ mg.l}^{-1}$

d'oxygène au fond du lac, traduit la minéralisation de la matière organique des sédiments dont l'impact est plus grand en période de gel, tout en restant modeste ; si Bastani par son phytoplancton a des caractères eutrophes, cette eutrophie reste faible et ne se traduit pas encore au niveau des sédiments.

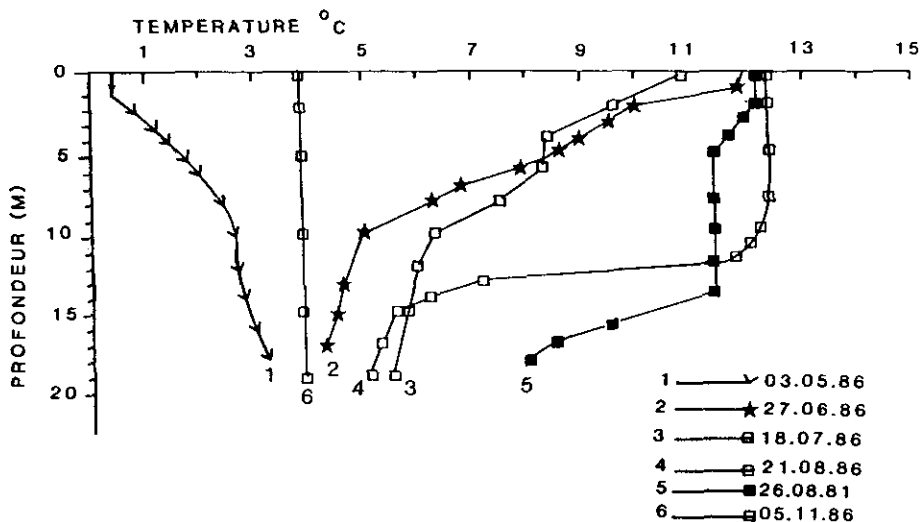


Figure 4.

L'azote et le phosphore (tableaux 5 et 6, figures 6, 7 et 8)

En période estivale, les teneurs en nitrates dans l'épilimnion sont très faibles en raison de l'intensité de l'activité phytoplanctonique ; elles varient de 0,01 à 0,04 mg.l^{-1} N-NO_3 . L'hypolimnion est plus riche (0,14 mg.l^{-1} N-NO_3) et présente de faibles teneurs en ammonium (0,02 mg.l^{-1} N-NH_4) et nitrites (0,006 mg.l^{-1} N-NO_2) (figures 6 et 7).

L'isothermie automnale homogénéise la teneur en azote sur toute la colonne d'eau entre 0,03 et 0,04 mg.l^{-1} N-NO_3 , en 1986 et à 0,01 mg.l^{-1} N-NO_3 en 1981, les valeurs en N-NO_2 et N-NH_4 restant très faibles.

Les mesures effectuées en fin de période hivernale montrent qu'après six mois de gel, il existe au fond du lac un enrichissement en azote essentiellement sous forme ammoniacale (0,05 mg.l^{-1} N-NH_4). Cependant nous avons observé également un enrichissement bien plus marqué des couches superficielles (0,25 mg.l^{-1} N-NO_3 et 0,15 mg.l^{-1} N-NH_4). L'échantillonnage de la glace provenant de la transformation de la neige qui tombe sur le lac a révélé des teneurs maximales de 0,52 mg.l^{-1} N-NO_3 et 0,31 mg.l^{-1} N-NH_4 . Ceci est un indice de l'enrichissement des eaux du lac en azote en surface, par la fonte de la neige stockée pendant l'hiver sur le lac et son bassin versant.

La courte période d'isothermie printanière qui suit le dégel homogénéise la teneur en azote du lac autour d'une valeur minimale estimée à environ 0,20 mg.l^{-1} N-NO_3 . Cette estimation est calculée à partir de l'apport total dû à la fonte de la glace et du manteau neigeux recou-

vrant le lac, et d'une partie du bassin versant (70 %) en considérant que l'isothermie qui intervient avant la fonte totale de la glace, dilue dans le lac l'ensemble de cet apport. Les valeurs enregistrées sur d'autres lacs où les teneurs en azote évoluent peu en raison d'une faible activité phytoplanctonique semblent confirmer nos calculs (exemple : Capitello : 0,16 à 0,22 mg.l⁻¹ N-NO₃⁻).

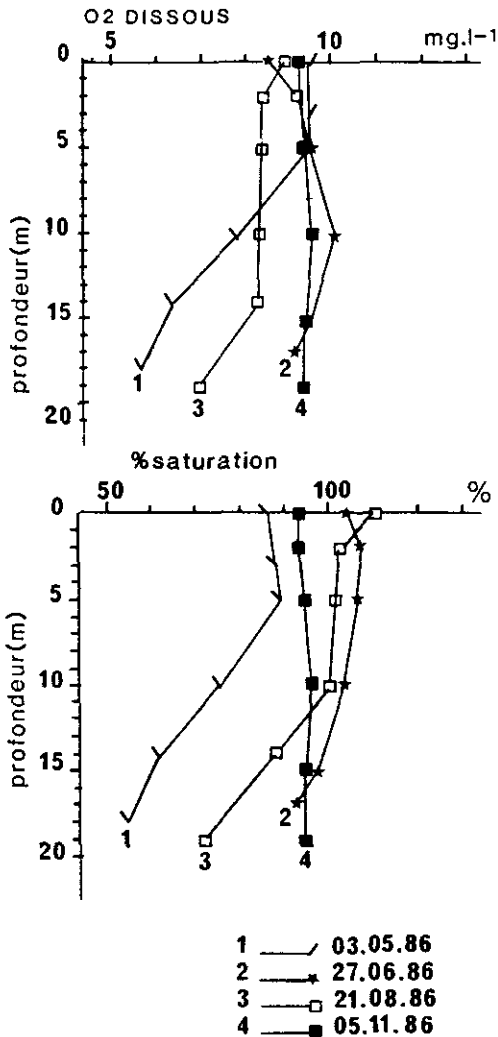


Figure 5.

Le phosphore est présent au fond du lac en période estivale (0,013 mg.l⁻¹ P-PO₄) dans l'hypolimnion ; sa présence jointe à celle de NH₄ et de NO₂ et au déficit (faible) en oxygène semble indiquer un relargage par les sédiments. Le phosphore est entièrement consommé par le phytoplancton dans l'épilimnion. En période d'isothermie d'automne, il est diffusé dans l'ensemble du lac (0,006 mg.l⁻¹ P-PO₄). En fin de

période de gel, les sédiments ne semblent pas diffuser cet élément, par contre, la teneur de surface en 1986 ($0,013 \text{ mg.l}^{-1}$ P-PO) indique un enrichissement par les eaux de fonte. A la même période, en 1987 il n'est pas détecté, ce qui tendrait à montrer la grande variabilité de cet élément dans les apports atmosphériques.

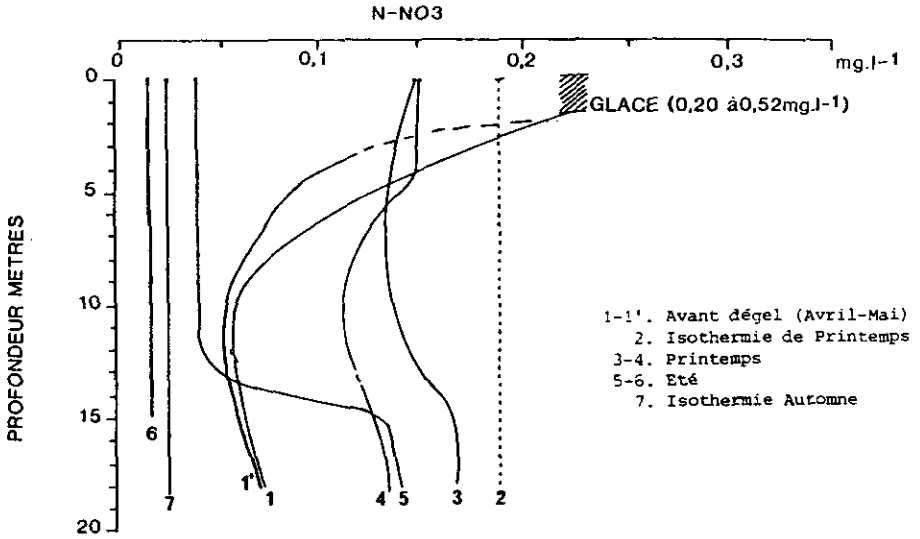


Figure 6.

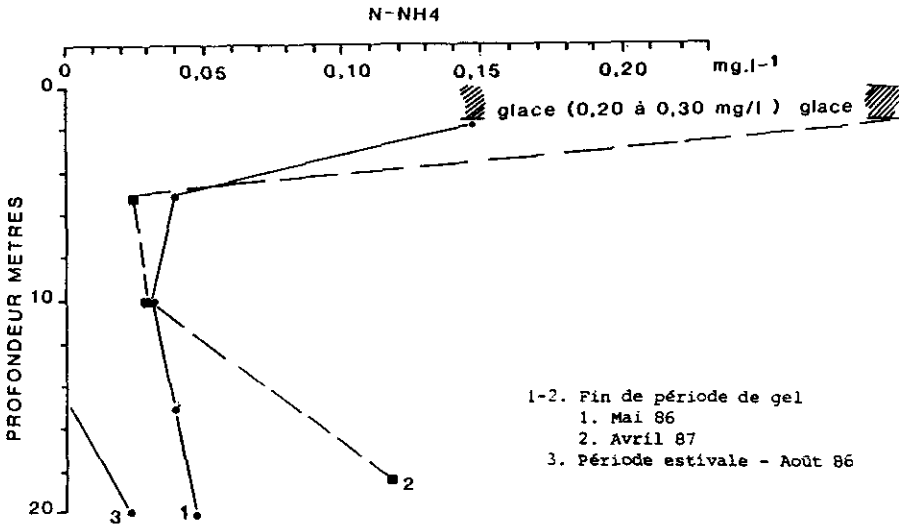


Figure 7.

Tableau 6.

Date	5 mai 1986					27 juin 1986					21 août 1986					5 novembre 1986					5 avril 1987						
Transparence Secchi (m)	Lac gelé					3.20 m					1.80 m					2.60 m					Lac gelé						
Profondeur (m)	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20	0	5	10	15	20	0 ₁	0 ₂	0 ₃	0 ₄ *	5	10	18
Conductivité (µS.)	34	25	22	24	24	20	20	20	20	20	19	19	19	20	20	21	27	34	22	22	23	25	36	20	24	22	25
pH	5.9	5.9	5.8	5.7	5.6	7.3	7	6.8	6.6	6.6	6.7	6.7	6.7	5.8	5.7	6.8	8.3	7.6	6.5	6.3	5.4	6.7	6.5	6.3	6	5.9	5.7
SiO ₂	0.6	1.6	1.7	1.7	1.7	1.8	1.9	1.9	1.9	1.9	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7							
N-NO ₃	250	129	61	66	71	147	137	139	169	169	40	40	40	137	144	40	28	24	28	28	532	203	485	81	85	48	74
N-NO ₂	0	12	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	3	3	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
N-NH ₄	148	39	31	39	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	4	4	4	0	0	311	194	428	70	23	31	155
P-PO ₄	13	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	13	13	6	6	6	6	13	0	0	0	0	0	0	0

Concentrations en µg.l⁻¹, sauf pour SiO₂ en mg.l⁻¹
 Eau* : eau de fusion partielle, incluse dans la glace

0₁ Glace en surface
 0₂ Glace à - 0,90 m
 0₃ Eau intersticielle
 0₄ Glace noire

Les sources de nutriments : importance des apports atmosphériques (tableau 7)

L'objectif de départ de l'étude des lacs corses était limité à un inventaire et une caractérisation sommaire de leur niveau trophique ; le bilan complet des nutriments n'a donc pas été effectué jusqu'ici. Cependant la comparaison du lac de Bastani avec les autres lacs, oligotrophes, et en particulier avec le lac de Capitello, ultra-oligotrophe, permet en l'absence de données complètes sur les nutriments de discerner l'importance de leurs différentes sources pour le fonctionnement du lac.

Les sources externes

Elles sont de deux types : les apports du bassin versant et les apports atmosphériques.

. Les apports du bassin versant :

Ils n'ont pas été chiffrés. Mais on peut d'ores et déjà suspecter leur faible importance du fait des caractères du bassin versant : surface à peine trois fois supérieure à la surface du lac, substrat rocheux, couvert végétal très réduit, pas d'écoulements permanents, absence d'activités humaines.

Par ailleurs la comparaison avec le lac de Capitello dont le bassin versant est semblable, permet d'éliminer cette source de nutriments comme responsable de la différence de niveau trophique des deux lacs.

. Les apports atmosphériques :

Les apports d'azote sont estimés à partir des résultats obtenus à Bavella à 30 km au sud de Bastani où les apports d'azote inorganique par les précipitations ont été mesurés de 1984 à 1986 (LOYE-PILOT *et al.*, 1988). Les deux sites, situés sur la crête axiale de la Corse sont très comparables en ce qui concerne la répartition spatiale et temporelle des précipitations. Par contre la pluviométrie à Bastani (2089 m) est supérieure à celle de Bavella (1200 m) et peut être estimée à 2000 mm par an. L'effet du gradient pluviométrique dû à l'altitude sur les flux en éléments majeurs a été étudié dans le bassin versant de la Solenzara (LOYE-PILOT, 1984) : les flux augmentent avec la pluviométrie, mais avec un gradient plus faible que le gradient pluviométrique. L'extrapolation des résultats de Bavella à une pluviométrie de 2000 mm donne donc une bonne estimation des apports d'azote inorganique par les précipitations à Bastani.

Les apports atmosphériques de phosphore sont estimés à partir des données de la littérature.

L'azote

. Azote inorganique dissous

Les apports spécifiques annuels d'azote inorganique par les précipitations à Bavella sont significatifs, de 0,64 à 0,76 g.N.m⁻² par an et une moyenne de 0,73 g.N.m⁻² pour les trois années étudiées.

L'extrapolation à Bastani donne des apports spécifiques d'azote inorganique par les précipitations de l'ordre de $0,8 \text{ g.m}^{-2}.\text{an}^{-1}$.

Le lac reçoit directement environ 35 kg d'azote par an soit l'équivalent des rejets annuels de huit personnes (rejet équivalent - habitant : $4,5 \text{ kg N.an}^{-1}$) ; le bassin versant reçoit environ 120 kg d'azote par an, dont une grande partie, dans cet environnement rocheux et à végétation rare, arrive dans les eaux du lac. L'ensemble bassin - lac reçoit l'équivalent des rejets annuels d'une trentaine d'habitants.

La dynamique des apports permet de comprendre pourquoi l'azote est disponible en grande quantité dans le lac avant même qu'il ne soit complètement libéré de la glace. De novembre à début juin, la plupart des précipitations tombent sous forme de neige ; l'azote est donc stocké dans le manteau neigeux et dans la glace. Il est libéré à la fonte de la neige qui est généralement accompagnée par les importantes pluies de printemps, elles-mêmes très riches. En fin de printemps, d'avril à mai, environ 80 % de l'eau des précipitations totales annuelles arrive au lac en même temps que les $3/4$ des apports d'azote inorganique. Si l'on considère que la fonte de la neige accompagnée par les pluies de printemps se fait durant un mois, l'azote inorganique dissous ainsi livré au bassin et au lac ($\approx 100 \text{ kg}$) représente l'équivalent des rejets durant un mois de près de 300 habitants.

De plus les premières eaux de fonte sont très enrichies en azote inorganique. Ceci a été bien montré dans les régions du nord des Etats-Unis, du Canada et de Scandinavie où les premières eaux de fonte du manteau neigeux exportent une grande partie des éléments stockés en particulier H^+ ; JOHANNESON et HENRIKSEN, 1978 ; BEDARD et JONES, 1987 ; CADLE *et al.*, 1987 ; HOHANNESON et HENRIKSEN, 1978, CADLE *et al.*, 1987 ; ont montré que pendant les 8 à 15 premiers jours de fonte, environ 20 % de l'eau et 50 à 60 % de l'azote inorganique stockés sont évacués du manteau neigeux, les premières eaux de fonte étant 4 à 5 fois plus concentrées que la moyenne du manteau neigeux.

Si on extrapole ces résultats au lac de Bastani et à son bassin versant, les eaux sortant du manteau neigeux (fonte + pluie) pendant les 10 à 15 premiers jours de fonte exportent environ 60 % du stock d'azote inorganique dissous, soit la moitié des apports atmosphériques annuels : $\approx 75 \text{ kg}$ pour le bassin versant. Etant donné le très faible volume de sol du bassin versant et l'absence d'activité biologique qui y règne à une température proche de zéro, pratiquement tout l'azote de l'eau de fonte se retrouve au lac. L'eau de fonte, avec des concentrations proches de 1 mg.N.l^{-1} , parcourt le lac en surface (BEDARD et JONES, 1987) là où la lumière commence à arriver. C'est ce qui explique l'augmentation des concentrations des nutriments (figures 6 et 7, tableau 6) et la diminution de la silice (tableau 6) dans l'eau du lac sous la glace. Il y a donc dans les premiers jours de fonte un véritable choc azoté dans les eaux de surface du lac.

. Autres formes d'azote : azote organique dissous et azote particulaire

L'azote inorganique dissous représente, dans les régions tempérées, de 16 à 56 % de l'azote inorganique dissous (d'après MEYBECK, 1982). En estimant l'apport d'azote organique dissous à la moitié de l'inorganique dissous, l'azote atmosphérique apporté annuellement au bassin versant et au lac sous forme dissoute est de l'ordre de $1,2 \text{ g.N.m}^{-2}$. Les apports d'azote particulaire, non pris en compte, peuvent être estimés à environ 10 % d'après les chiffres donnés par NICHOLLS et COX, 1978.

L'azote atmosphérique représente donc un apport d'environ $1,3 \text{ g.m}^{-2} \cdot \text{an}^{-1}$, équivalent aux rejets d'une cinquantaine d'habitants permanents sur le bassin versant (tableau 7).

Tableau 7.

		Dissous		Total
		Inorganique	Org. + inorg.	Particulaire + dissous
N	g.m^{-2}	0,8	(1,2)	(1,3)
	10^3g.	150	(220)	(250)
	éq.hab.	35	(50)	(53)
P	mg.m^{-2}	(10)	(20)	(60)
	10^3g.	(2)	(4)	(12)
	éq.hab.	(1)	(3)	(8)

Le phosphore

Aucune mesure systématique n'a été faite mais les analyses de plusieurs échantillons de neige montrent des concentrations de 0 à $26 \mu\text{g.l}^{-1}$ de P-PO_4 . Si on se réfère à la teneur moyenne des précipitations en P-PO_4 citées par MEYBECK, 1982, $5 \mu\text{g.l}^{-1}$, l'apport est de 10 mg.m^{-2} soit $1,5 \text{ kg}$ de P-PO_4 pour le bassin versant et $0,44 \text{ kg}$ pour le lac seul. On peut supposer que comme l'azote inorganique dissous, 70 à 80 % du P-PO_4 est stocké dans le manteau neigeux, soit $1,3$ à $1,5 \text{ kg}$ pour le bassin entier, qui seront libérés à la fonte. En effet, les eaux de surface sous la glace montrent aussi un enrichissement en phosphore (figure 8 et tableau 6). Si on admet pour les orthophosphates une dynamique de relargage à la fonte identique à celle des autres ions, les 10 à 15 premiers jours de fonte apporteront de 800 à 900 g de P-PO_4 au lac, soit l'équivalent du rejet d'une quinzaine d'habitants pendant 15 jours (rejet équivalent habitant = 4 g.P.j^{-1}).

Les apports de phosphore organique dissous peuvent être aussi estimés, d'après MEYBECK, 1982, égaux aux apports de P-PO_4 dissous : l'apport de phosphore total dissous au lac est alors de 20 mg.m^{-2} par an. Les apports particulaires de phosphore sont plus importants. Les flux annuels atmosphériques de phosphore total sont de l'ordre de 50 à 80 mg.m^{-2} dans l'hémisphère nord en région montagneuse tempérée à froide : (INOUE *et al.*, 1981, DILLON, 1975 ; NICHOLLS et COX, 1978). Ceci représente de 2 à 3 kg de phosphore arrivant directement au lac et de 10 à 15 kg pour l'ensemble du bassin et du lac (tableau 7).

Il faut noter que comme pour l'azote, il y a un apport important de phosphore directement assimilable à la surface du lac à la fonte, qui explique le démarrage brutal de la production phytoplanctonique avant que la glace ne soit entièrement fondue.

Ce démarrage très précoce de la production primaire permet sans doute la fixation dans la biomasse d'une grande partie des nutriments livrées par la fonte du manteau neigeux et de la glace, évitant leur évacuation à la purge hydrologique résultant de la fonte, et permettant leur recyclage (en particulier celui du phosphore) pendant toute la période d'activité biologique. Cette hypothèse devra être confirmée par un bilan hydrochimique.

Les apports atmosphériques équivalent pour le lac de Bastani à la présence sur le bassin d'une cinquantaine d'habitants pour l'azote et d'une dizaine pour le phosphore.

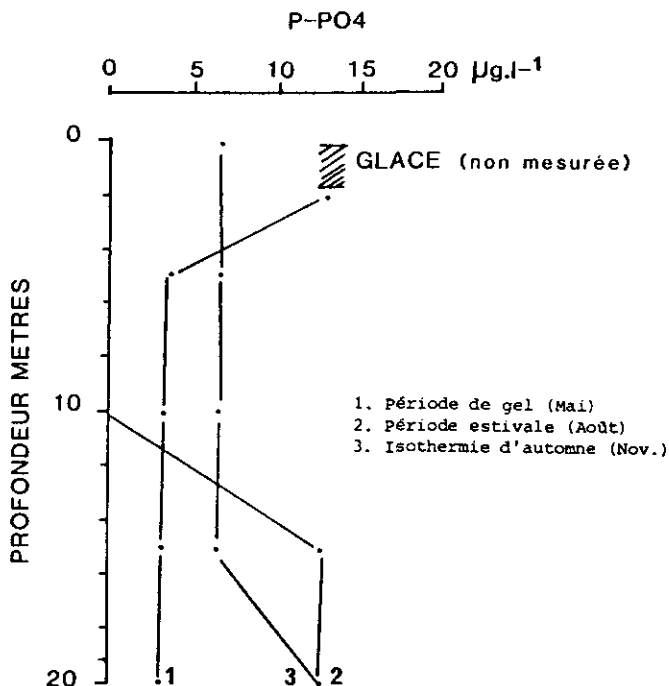


Figure 8.

La source interne

Les profils de nutriments dans le lac en été (figures 6 à 8) semblent montrer que le sédiment relargue du phosphore et de façon moins nette de l'azote. Par contre, dans les autres lacs oligotrophes le phosphore est toujours inférieur à la limite de détection au niveau du fond.

En l'absence de bilans ou de mesures spécifiques, il est difficile de chiffrer cette source. Mais la comparaison du lac de Bastani avec les autres lacs va nous permettre de discerner son importance, surtout en ce qui concerne le phosphore.

DISCUSSION

Niveau trophique du lac de Bastani

Le problème se pose de savoir pourquoi le lac de Bastani présente certaines caractéristiques de l'eutrophie, alors que les quatre autres lacs étudiés dans le même contexte sont oligotrophes.

La comparaison de Bastani avec les autres lacs, et en particulier avec le lac de Capitello permet de pallier dans une certaine mesure à l'absence de bilans des nutriments et de discerner quels sont les facteurs qui expliquent son degré supérieur de trophie.

Un facteur favorable pourrait être le faible taux de renouvellement du lac (DILLON, 1975), qui est de 17 mois. Mais Capitello, ultraoligotrophe, a un temps de renouvellement voisin de 12 mois. Ce n'est donc pas pour le lac de Bastani le facteur principal.

Les traits des bassins versants des lacs de Bastani et de Capitello étant voisins (surface, rapport des surfaces du lac et du bassin, conditions édaphiques), ils reçoivent la même charge externe. Celle-ci ne peut donc être responsable de la différence de niveau trophique entre les deux lacs.

La différence réside donc dans la source interne. Le fait que le lac de Capitello et les autres lacs oligotrophes aient des concentrations estivales d'azote notables ($0,2 - 0,3 \text{ mg.l}^{-1}$) montre que l'azote n'est pas entièrement consommé et que la production primaire est vraisemblablement limitée par le phosphore. A Bastani le phosphore serait suffisant pour épuiser pratiquement tout l'azote et ne serait donc pas limitant.

Le facteur qui paraît être déterminant est le brassage par le vent. Ce vent violent fréquent s'explique par la position du lac dans l'axe d'une échancrure de la crête axiale de la Corse. Le brassage par le vent permet, en remontant les eaux de l'hypolimnion vers l'épilimnion, de transférer le phosphore qui diffuse des sédiments (figure 8), vers la zone photique (MORTIMER, 1974 ; STAUFFER et LEE, 1973, IMBODEN *et al.*, 1988). La diffusion du phosphore est de plus accélérée dans les zones peu profondes du lac par l'agitation des eaux jusqu'à la surface des sédiments (SCHINDLER *et al.*, 1977), qui permet aussi l'utilisation du phosphore par contact direct phytoplancton-particules (GOLTERMAN, 1977).

D'après les données de la littérature, le relargage du phosphore des sédiments est bien supérieur aux apports atmosphériques, et la plupart des auteurs soulignent le rôle du vent pour expliquer que les valeurs déduites des bilans soient supérieures aux mesures de laboratoire (ZICKER *et al.*, 1956 ; STUMM et LECKIE, 1971 ; KAMP-NIELSEN, 1974 ; MOLLER ANDERSEN, 1974 ; RIEMANN, 1977 ; COOKE *et al.*, 1977 ; LEE *et al.*, 1977 ; LIJKLEMA, 1977 ; RYDING et FORSBERG, 1977 ; BOSTROM *et al.*, 1982).

Le phosphore n'est pas, dans ces conditions, limitant pour le phytoplancton qui prospère bien au-delà du bloom printanier et qui épuise l'azote apporté par le relargage des sédiments et surtout par les précipitations. Dans les autres lacs où le phosphore reste limitant, la production primaire reste faible ; le phytoplancton peu développé après un

bloom printanier éphémère ne concerne presque pas l'azote apporté au lac par les précipitations, ce qui explique les teneurs élevées en nitrates des lacs oligotrophes.

Le vent semble donc le facteur qui différencie le fonctionnement du lac de Bastani de celui des autres lacs, et qui explique sa tendance eutrophe. Ce rôle déterminant du vent a été bien mis en évidence par BERTHON (1984) sur un lac marocain qui est eutrophe lorsqu'il est brassé par le vent et sinon reste mésotrophe. De même RYDING et FORSBERG (1977) ont montré sur un lac que la teneur en chlorophylle a été directement corrélée avec la force et la durée du vent.

Eutrophisation récente du lac

Cependant, le vent n'explique pas l'eutrophisation récente du lac.

Le facteur vent n'a certainement pas changé depuis le début du siècle.

D'autre part, un accroissement de la libération de phosphore des sédiments par augmentation progressive de leur teneur en nutriments est peu probable sans changement préalable de l'état trophique du lac.

Par contre, l'apport atmosphérique a changé de façon importante au cours du dernier siècle. Les activités humaines - industrielles, domestiques et agricoles - ont augmenté d'un facteur 2 à 3 les flux d'azote inorganique atmosphérique en Europe du Nord et Amérique du Nord (BRIMBELCOMBE et STEDMAN, 1982), en même temps que les flux d'ions H^+ et de sulfates.

L'augmentation liée aux activités humaines des apports atmosphériques d'azote inorganique dissous au site de Bavella a été estimée en s'appuyant sur une typologie des précipitations (LOYE-PILOT *et al.*, 1986, 1987, 1988). Il en résulte que le flux atmosphérique d'azote inorganique a été environ doublé par la pollution à longue distance. Cette augmentation a certainement connu une accélération notable dans les années soixante, due à l'industrialisation lourde des pays de l'Europe méditerranéenne (sud de la France, Espagne, Italie) et de la côte nord de l'Afrique.

On ne possède pas de données concernant l'impact des activités humaines sur les niveaux de concentration des précipitations en phosphore dissous. On peut cependant suspecter une augmentation des flux avec la pollution, comme l'indique WETZEL (1983) dans la mesure où les concentrations de $P-PO_4$, les plus fortes mesurées en Corse correspondent à des pluies "polluées", (par exemple : $26 \mu g.P.l^{-1}$ et $2,1 mg.N.l^{-1}$, pour une neige à $pH = 3,8$).

Une autre cause d'augmentation des apports de P atmosphérique, locale celle-là, résulte des feux de forêt ; leur nombre et les surfaces brûlées augmentent régulièrement en Corse depuis 25 ans.

Les apports atmosphériques constituant la seule source de nutriments nouveaux, leur accroissement nous paraît être le facteur responsable de l'eutrophisation récente du lac de Bastani. Les autres lacs qui ont reçu cet apport supplémentaire de nutriments ne présentent pas de signes d'eutrophisation : cela prouve que l'apport atmosphérique de phosphore n'est pas suffisant pour augmenter le niveau de la production primaire.

On est ainsi amené à conclure que, le phosphore n'étant pas limitant pour le lac de Bastani, la production primaire était limitée par l'azote jusqu'au début du siècle. L'azote est reconnu classiquement comme facteur limitant dans les eaux marines (RYTHER et DUNSTAN, 1971), il l'est moins dans les lacs quoique son rôle soit évoqué pour expliquer l'oligotrophie de certains (GOLDMAN, 1981 ; GROTERUD, 1972). Les successions de communautés algales au cours de la saison biologique (tableau 4) semblent bien montrer que le rapport N/P, donc ici l'azote, gouverne la structure du peuplement phytoplanctonique (TILMAN, 1982 ; SMITH, 1982, 1983).

Les apports d'azote inorganique dissous atmosphériques ayant été multipliés par 2 au moins, on peut penser que l'azote a cessé d'être limitant, ceci d'autant plus que la dynamique des apports d'azote permet vraisemblablement son stockage dans la biomasse printanière et donc sa rétention dans le lac. L'augmentation d'un facteur 2 au moins des apports d'azote inorganique dissous par la pollution à grande distance serait responsable de l'eutrophisation du lac.

CONCLUSIONS

De par son activité phytoplanctonique, le lac de Bastani peut être classé comme mésotrophe à eutrophe, alors que les autres lacs corses d'altitude, étudiés dans le même contexte sont oligotrophes.

La comparaison avec le lac de Capitello aux caractéristiques analogues et qui présente un temps de renouvellement des eaux légèrement inférieur permet d'éliminer ce facteur comme responsable de l'eutrophisation.

Elle est expliquée par le brassage des eaux sous l'action d'un vent violent et fréquent qui permet la remontée vers la zone photique du phosphore qui diffuse des sédiments. Ainsi le phosphore ne serait pas limitant et pratiquement tout l'azote est consommé par le phytoplancton. Dans les lacs oligotrophes abrités du vent, le phosphore bloqué dans l'hypolimnion serait limitant et l'azote est corrélativement très peu consommé ; les nitrates restent alors à des valeurs de l'ordre de 0,2 à 0,3 mg.l⁻¹.

Dans ce lac, le phosphore étant disponible en quantité suffisante du fait de l'action du vent, l'azote devait être auparavant limitant. Nous sommes donc amenés à émettre l'hypothèse que l'augmentation des apports d'azote inorganique par les précipitations sont responsables de l'évolution trophique récente du lac. On aurait ainsi l'exemple d'un lac qui s'eutrophise, non par l'activité humaine sur le bassin même, mais par la pollution atmosphérique à longue distance.

REMERCIEMENTS

L'étude des lacs corses a été réalisée grâce au concours financier du Parc Naturel Régional de la Corse.

Les réviseurs anonymes nous ont fait bénéficier de critiques très pertinentes et nous les en remercions.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARBE J. (1987). Dans *Diagnose rapide des milieux lacustres*, CEMAGREF, Lyon, 15-17.
- BARICA J., AMSTRONG F.A.J. (1971). Contribution by snow to the nutrient budget of some small Northwest Ontario lakes. *Limnol. Oceanog.*, 16 : 891-899.
- BEDARD Y., JONES H.G. (1987). Flux des anions d'acides forts dans les eaux de surface lors de la fonte printanière en milieu nordique. *Naturaliste Can. (Rec. Ecol. Syst.)*, 114 : 283-294.
- BERTHON C. (1984). Influence du vent sur le niveau de trophie du lac Dayet el Roumi, Maroc. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22 : 1175-1179.
- BRIMBELCOMBE P., STEDMAN D.H. (1982). Historical evidence for a dramatic increase in the nitrate component of acid rain. *Nature*, 298 : 460-462.
- BOSTROM B., JANSSON M., FORSBERG C. (1982). Phosphorus release from lake sediments. *Arch. Hydrobiol. Beih. Ergebn. Limnol.*, 18 : 5-59.
- CADLE S.H., DASCH J.M., VANDE KOPPLE R. (1987). Composition of snowmelt and runoff in Northern Michigan. *Envir. Sci. Technol.*, 21 : 295-299.
- CAPBLANCQ J., LAVILLE J.M. (1968). Etude morphométrique et physico-chimique de neuf lacs du massif Néouvielle (Hautes-Pyrénées). *Ann. Limnol.*, 4 (3) : 273-324.
- CAPBLANCQ J. (1972). Phytoplancton et productivité primaire de quelques lacs d'altitude dans les Pyrénées. *Ann. Limnol.*, 8 (3) : 331-321.
- CAPBLANCQ J., LAVILLE H. (1983). Le lac de Port-Bielh (Pyrénées) : exemple de fonctionnement d'un système lacustre de haute montagne. In : LAMOTTE M. et BOURLIERE F. (Eds), *Problèmes d'écologie, écosystèmes limniques*, MASSON, Paris, p. 51-79.
- CHACORNAC J.M. (1986). *Laos d'altitude : métabolisme et approche typologique des écosystèmes*. Thèse de Doctorat, Lyon I, 214 p.
- COCKE G.D., Mc COMAS M.R., WALLER D.W., KENNEDY R.H. (1977). The occurrence of internal phosphorus loading in two small eutrophic glacial lakes in northeastern Ohio. *Hydrobiologia*, 56 (2) : 129-135.
- DEVAUX J. (1976). Dynamique des populations phytoplanctoniques dans deux lacs du Massif Central. *Ann. St. Biol. Besse-en-Chandesse Sup.*, 10 : 1-184.
- DILLON P.J. (1975). The phosphorus budget of Cameron Lake, Ontario : the importance of flushing rate to the degree of eutrophy of lakes. *Limnol. Oceanog.*, 20 (1) : 28-39.
- DUSSART B. (1966). *Limnologie. L'étude des eaux continentales*. Gauthier-Villars, Paris, 677 p.
- FRALEIGH P.C., OCEVSKI B.T., CADO I.E., ALLEN H.L. (1981). Primary production (oxygen) and chlorophyll relationships in Lake Ohrid, Yugoslavia. *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 21 : 492-499.
- FINDENEKG I. (1964). Types of planktonic primary production in the lakes of the Eastern Alps as found by the radioactive carbonmethod. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15 : 352-359.
- GAUTHIER A., ROCHE B., FRISONI G.F. (1984). *Contribution à la connaissance des lacs d'altitude de la Corse*. Parc Naturel Régional de Corse, Ajaccio, 230 p.
- GOLDMAN C.R. (1981). Lake Tahoe : two decades of change in a nitrogen deficient oligotrophic lake. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 21 : 45-70.
- GOLTERMAN H.L. (1977). Sediments as a source of phosphate for algal growth. In : H.L. GOLTERMAN (Ed.), *Interaction between sediments and freshwater*. W. Junk Publish., The Hague, p. 286-293.
- GROTERUD O (1972). Ice analyses. Data from three Norwegian lakes. *Hydrobiologia*, 40 (3) : 371-391.
- HAUBERT M. (1976). Importance des apports atmosphériques dans le bilan hydrochimique d'un bassin versant de moyenne montagne. *Arch. Sc. Genève*, 29 : 183-197.

- HOBBIE J.E. (1964). 14 C measurements of primary production in two Arctic Alaskan lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15 : 360-364.
- IMBODEN D.M., STOTZ B., WUEST A. (1988). Hypolimnic mixing in a deep alpine lake and the role of a storm event. *Verh. Intern. Verein. Limnol.*, 23 : 67-73.
- INOUE Y., IWAI S., IKEDA S., KUNIMATSU T. (1981). Eutrophication of lake Biwa. Nutrient loadings and ecological model. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 21 : 248-255.
- JOHANNESEN M., HENRIKSEN A. (1978). Chemistry of snow meltwater : changes in concentration during melting. *Wat. Resour. Res.*, 14 : 615-619.
- JONES H.G., BISSON M. (1984). Physical and chemical evolution of snow packs on the Canadian Shield (Winter, 1970-1980). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22 : 1786-1792.
- KAMP-NIELSEN L. (1974). Mud-water exchange of phosphate and other ions in undisturbed sediment cores and factors affecting the exchange rates. *Arch. Hydrobiol.*, 73 (2) : 218-237.
- LEE G.F., SONZOGNI W.C., SPEAR R.D. (1977). Significance of oxic vs anoxic conditions for lake Mendota sediment phosphorus release. Dans : *Interaction between sediments and freshwater*. H.L. Golterman (Ed.), W. Jung Publish., The Hague, p. 294-306.
- LIJKLEMA L. (1977). The role of iron in exchange of phosphate between water and sediments. In : H.L. GOLTERMAN (Ed.), *Interaction between sediments and freshwater*, W. Junk Publish., The Hague, p. 313-317.
- LOYE-PILOT M.D. (1984). Problèmes soulevés lors de l'établissement du bilan d'érosion chimique du bassin versant de la Solenzara (Corse). *Physio-Géo*, 9 : 153-164.
- LOYE-PILOT M.D., MARTIN J.M., MORELLI J. (1986). Influence of Saharan dust on the rain acidity and atmospheric input to the Mediterranean. *Nature*, 321 : 427-428.
- LOYE-PILOT M.D., MORELLI J., MARTIN J.M., GROS J.M., STRAUSS B. (1987). Impact of Saharan dust on the rain acidity in the Mediterranean atmosphere. In : *Proceeding of the 4th European symposium of physico-chemical behaviours of atmospheric pollutants* - Stresa Italy Reidel Publishing Co. Dordrecht, Holland, 489-499.
- LOYE-PILOT M.D., MARTIN J.M., MORELLI J. (1988). Atmospheric input of inorganic nitrogen to the North Western Mediterranean. *Soumis à Biogeochemistry*.
- MEYBECK M. (1982). Carbon, nitrogen and phosphorus transport by world rivers. *Am. J. Sci.*, 282 : 401-450.
- MILLERIOUX G., RESTITUITO F. (1976). Projet alpin OCDE pour la lutte contre l'eutrophisation - Lacs du Massif Central. IV - Le lac d'Aydat. *Ann. St. Biol. Besse-en-Chandesse*, 10 : 192-232.
- NICHOLLS K.H., COX C.M. (1978). Atmospheric nitrogen and phosphorus loading to Harp Lake, Ontario, Canada. *Wat. Res. Res.*, 14 (4) : 589-592.
- MOLLER ANDERSEN (1974). Nitrogen and phosphorus budgets and the role of sediments in shallow Danish lakes. *Arch. Hydrobiol.*, 74 (4) : 528-550.
- MORTIMER C.H. (1974). Lake hydrodynamics. *Mitt. Int. Ver. Limnol.*, 20 : 124-197.
- O.C.D.E. (1982). *Eutrophisation des eaux ; méthode de surveillance d'évaluation et de lutte*. Paris, 165 p.
- PECHLANER R. (1966). Die Finstertalesseen (Kühtal, Österreich) - 1 : Morphometrie, Hydrographie, Limnophysik und Limnochemie. *Arch. Hydrobiol.*, 62 : 165-230.
- PECHLANER R. (1971). Factors that control the production rate and biomass of phytoplankton in high mountain lakes. *Mitt. Intern. Verein. Limnol.*, 19 : 125-145.
- PELLETIER J.P. (1978). Les paramètres de production primaire en tant que critères de l'état trophique des lacs naturels. *Colloque sur les lacs naturels. AFZ-AFPE. Chambéry, sept. 1988*, p. 78-87.
- PESTALOZZI G.H. (1925). Des Phytoplankton einiges Hochseen Forsikas. *Veröff. Geobotan. Inst. Rübel. Zürich* : 477-493.
- RESTITUITO F., LAIR N. (1976). Projet OCDE pour la lutte contre l'eutrophisation - Lacs du Massif Central : III - Le lac Pavin, inter-relations entre paramètres. *Ann. St. Biol., Besse-en-Chandesse*, 10 : 146-191.
- RIEMANN B. (1977). Phosphorus for a non stratified Danish lake and horizontal differences in phytoplankton growth. *Arch. Hydrobiol.*, 79 (3) : 357-381.

- ROCHE B. (1978). Compte rendu de visites effectuées en juin 1977 sur le barrage de l'Alesani (Haute-Corse). Rapport interne. Service Régional de l'Aménagement des Eaux de la Corse, Bastia, 16 p.
- ROCHE B. (1987). Etude du lac de Bastani (Haute-Corse) : Mise en évidence de l'action complémentaire de deux facteurs climatiques : la pluie et le vent sur l'eutrophisation du lac. Rapport interne, Service Régional d'Aménagement des Eaux, Bastia, 34 p.
- RYDING S.O., FORSBERG C. (1977). Sediments as a nutrient source in shallow polluted lakes. In : H.L. GOLTERMAN (Ed.), *Interaction between sediments and freshwater*. W. Junk Publish., The Hague, p. 227-234.
- RYTHER J.H., DUNSTAN W.M. (1971). Nitrogen, phosphorus and eutrophication in the coastal marine environment. *Science*, 171 : 1008-1013.
- SCHINDLER D.W., HESSLEIN R., KIPPHUT G. (1977). Interactions between sediments and overlying waters in an experimentally eutrophied Precambrian Shield lake. In : H.L. GOLTERMAN (Ed.), *Interaction between sediments and freshwater*. W. Junk Publish., The Hague, p. 235-243.
- SMITH V.H. (1982). The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes : an empirical and theoretical analysis. *Limnol. Oceanog.*, 27 : 1101-1112.
- SMITH V.L. (1983). Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue green algae in lake phytoplankton. *Science*, 221 : 669-671.
- STUMM W., LECKIE J.O. (1971). Phosphate exchange with sediments, its role in the productivity of surface water. *Proc. Fifth Int. Water Poll. Res. Conf.*, Pergamon Press, vol. 2 : 3-26.
- TILMAN D. (1982). *Resource competition and community structure*. Princeton University Press, Princeton New Jersey.
- VERNEAUX J. (1979). *Etude écologique des lacs de Saint-Point et de Remoray (Cura)*. Document Univ. Franche Comté, Besançon, 105 p.
- VOLLENWEIDER R.A. (1974). *A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments*. I.B.P. Handbook n° 12 : Blackwell Scient. Pub., 225 p.
- WETZEL R.G. (1983). *Limnology*, 2nd edition. CBS College Publ., Philadelphia, 768 p.
- ZICKER E.L., BERGER K.C., HASLER A.D. (1956). Phosphorus release from bog lake muds. *Limnol. Oceanog.*, 1 : 296-303.