

Les lacs montagnards : indicateurs de la qualité du milieu.
Application aux lacs d'altitude des réserves de Haute-Savoie
M. Thierry Winiarski

Citer ce document / Cite this document :

Winiarski Thierry. Les lacs montagnards : indicateurs de la qualité du milieu. Application aux lacs d'altitude des réserves de Haute-Savoie. In: Revue de géographie alpine, tome 88, n°3, 2000. pp. 9-22;

doi : <https://doi.org/10.3406/rga.2000.2998>

https://www.persee.fr/doc/rga_0035-1121_2000_num_88_3_2998

Fichier pdf généré le 22/04/2018

Résumé

Résumé : L'impact des activités humaines sur les milieux récepteurs que sont les écosystèmes montagnards a été maintes fois décrit. La difficulté est de mesurer des paramètres qualitatifs illustrant ces perturbations. Les lacs de montagnes peuvent être des indicateurs de perturbation d'un bassin versant provoquée par des activités de surface. L'analyse d'échantillons liquides représentatifs de la qualité physico-chimique globale des eaux, montre l'intérêt descripteur de ces lacs. Ceux-ci sont choisis dans le département de la Haute-Savoie. Un suivi de la qualité des eaux (température, pH, conductivité électrique, NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, Chlorophylle a) a été effectué durant cinq ans au sein d'un observatoire sur cinq sites : lac du Brévent, lac Cornu, lac de Pormenaz, lac d'Anterne et lac Jovet. Les résultats montrent qu'il est possible de mettre en évidence des dysfonctionnements (eutrophie). Cette méthode est limitée, elle ne permet pas de caractériser les causes de ce dysfonctionnement.

Abstract

Abstract : Mountain lakes : indicators of environmental quality. The example of the mountain reservoirs of Haute Savoie, France. The impact of human activities on mountain ecosystems has been well documented. The main difficulty is in measuring the qualitative parameters illustrative of such activities. Mountain lakes may be used as indicators of the changes to a catchment area caused by surface activities. Physical and chemical analyses of water samples taken from a number of lakes in Haute Savoie illustrate the capacity of such lakes to provide an indication of changes to the milieu. Water quality (temperature, pH, electrical conductivity, NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, chlorophyll a) was monitored over a five-year period at an observatory covering five sites : lac du Brévent, lac Cornu, lac de Pormenaz, lac d'Anterne and lac Jovet. The results show that it is possible to identify malfunctions (eutrophy). The method is limited, however, in that it does not enable the causes of such malfunctions to be determined.

Les lacs montagnards : indicateurs de la qualité du milieu

Application aux lacs d'altitude des réserves de Haute-Savoie

Thierry Winiarski

Laboratoire des Sciences de l'Environnement, École Nationale des Travaux Publics de l'État,
rue Maurice-Audin, 69518 Vaulx en Velin, France - E-mail : thierry.winiarski@entpe.fr

Introduction

Les lacs de montagne des Alpes françaises sont nés, pour la plupart, pendant le retrait des derniers grands glaciers de l'ère quaternaire, ils sont apparus au cours du Tardiglaciaire et après le Dryas récent. Plus récemment, quelques lacs proglaciaires sont liés au retrait glaciaire contemporain (depuis 1860). Ces glaciers vont modeler l'espace en agissant de manière différentielle sur la lithologie, ce qui se traduit par l'exploitation par le glacier des zones de faiblesse de la roche : intersections de failles et de diaclases, filons de roche plus tendres (amphibolites, par exemple) d'où la formation d'une cuvette avec une contre-pente en aval. Les axes de ces lacs ou de ces bras seront en général orientés selon des accidents tectoniques ou des filons. En haute montagne, ces surcreusements glaciaires forment de nombreux petits lacs qui sont souvent proches les uns des autres et situés en paliers successifs (Sesiano, 1994). Ils sont alimentés directement par les précipitations sous forme de pluie et de neige.

À la différence des lacs de piémont ou de vallées alluviales, les lacs d'altitude se distinguent par leur bassin versant de surface modeste, peu exploité par l'Homme, dont les eaux de ruissellement sont peu chargées en sels minéraux dissous. Leurs eaux sont pauvres en éléments nutritifs disponibles pour la flore et la faune aquatiques, en particulier en phosphore et en azote, ce qui leur confère un statut de milieu oligotrophe. Les peuplements aquatiques sont peu diversifiés et comptent des effectifs faibles au regard de ceux des milieux de plaine. Les longues périodes d'englacement hivernal que subissent ces lacs contribuent aussi largement à cette pauvreté de la vie aquatique (Chacornac, 1986). De plus, les chaînes trophiques sont réduites et rendent l'écosystème fragile (Druart *et al.*, 1999 ; Bouvet, 1989 ; Sesiano, 1986).

Ces lacs sont alimentés par les eaux de précipitation (neige et pluie) et les eaux de ruissellement provenant de leur bassin versant, ils peuvent donc enregistrer des perturbations au niveau de cette surface. L'hypothèse de travail adoptée se base sur le caractère intégrateur de ces retenues d'eau naturelles. En effet, la nature physique (diamètre des particules, teneur en eau, cohésion) et la chronique des apports sont déterminées par l'ensemble des caractéristiques du bassin versant (lithologie, relief, végétation...) et de la

cuvette lacustre (morphologie, âge) (Pourriot et Meybeck, 1995). Ainsi, ces lacs peuvent être utilisés comme des outils permettant de mesurer un impact lié aux activités humaines de surface (fréquentation touristique, pollution atmosphérique, élevage...). De plus, les travaux de Haubert (1976) ont montré l'importance des apports atmosphériques dans le bilan hydrogéochimique d'un bassin versant, notamment sous forme d'éléments dissous dans les pluies et liés aux poussières (Si O_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , P). Des variations de qualité des eaux ont été mesurées dans des lacs éloignés de toute source de pollution directe. Ainsi des études faites au Québec ont montré l'impact des dégagements de SO_2 dans l'atmosphère sur l'acidité des lacs et la biodisponibilité des métaux (Tessier *et al.* 1990 ; Dupont, 1990). Des concentrations en métaux lourds (Zn, Pb, Cu, Cd...) différentes du fond géochimique naturel ont été mesurées dans des lacs suédois, suisse, irlandais et anglais (Brännvall *et al.*, 1997 ; Shotytk, 1996 ; Fott *et al.*, 1998 ; Bowman and Harlock, 1998 ; Rose and Harlock, 1998). Les auteurs s'accordent à penser que ces valeurs sont liées aux rejets industriels et à la combustion de minerais fossiles.

D'autres études sur les apports azotés atmosphériques ont montré des risques d'eutrophisation sur les milieux montagnards corses (Roche et Loye-Pilot, 1989).

Afin d'étudier l'impact des activités anthropiques au travers de l'évolution de la qualité physico-chimique des retenues d'eaux d'altitude sur la Haute-Savoie, cinq lacs ont été choisis suivant des critères géographiques et géologiques. Un suivi, se déroulant pendant une période de cinq ans, a permis l'étude de leur évolution physico-chimique. L'objectif général de cet article est de valider le caractère intégrateur de ces lacs au moyen d'un suivi qualitatif simple et si possible de mettre en évidence des dysfonctionnements.

Choix et description des lacs étudiés

CRITÈRES DE CHOIX

À partir des lacs de montagne se trouvant dans le département de Haute-Savoie le choix des sites s'est basé sur des descripteurs invariants issus des travaux de Chacornac (1986), c'est-à-dire échappant à la variabilité temporelle d'un cycle annuel (tableau 1).

Il s'agit de caractères géographiques ou morphométriques concernant le lac et son bassin versant : altitude moyenne et surface du bassin versant, altitude et surface du lac, profondeur maximum et durée du gel. L'analyse typologique met en évidence 6 groupes de lacs. Le choix s'est porté sur des lacs ayant une altitude voisine de 2000 m avec une altitude moyenne du bassin versant supérieure à 1950 m (excluant les lacs des groupes G2 et G3). La bathymétrie est aussi un critère important, en effet une profondeur importante tend à diminuer les brusques variations de température (excluant les lacs G2 de trop faible profondeur).

Outre cette typologie, le choix de ces cinq sites d'échantillonnage a aussi été déterminé par leur accessibilité, leur situation géographique, leur éloignement d'un centre industriel et leurs conditions acérolologiques. Les cinq lacs choisis et répondant aux critères précédents sont (tableau 2) :

Variabes	G1	G2	G3	G4	G5	G6
Altitude du bassin versant (m)	1950 100	1870 140	1900 130	2440 180	2390 140	2200
Surface du bassin versant (ha)	93,5 26,1	13,5 14,9	7,4 4,6	11,5 9,5	3,6 2,4	25
Altitude du lac (m)	1600 240	1620 140	1710 260	2260 170	2300 150	2060
Surface du lac (ha)	3,3 1,5	2,3 1,7	1,6 1,1	1,4 2,4	3,8 1,3	11,5
Profondeur maximum (m)	7,7 1,6	4,9 2,6	6,1 2,9	5,5 3,0	20,2 1,3	12,5
Durée du gel (mois)	6,3 0,4	5,9 1,3	6,2 1,1	7,8 0,4	8,7 0,4	8

Tableau 1 : Interprétation des groupes de lacs basée sur la moyenne et l'écart type (en gras) des descripteurs invariants

G1 : lac Benit, lac de Pormenaz, lac de Flaîne ; G2 : lac d'Arvouin, lac des Confins, lac Damoz des Moulins, lac de Darbon, lac de Gers, lac Lessy, lac d'Oche, lac de Petetoz, lac de Roi ; G3 : Laouchet, lac de Tavaneuse, lac de Vernant, lac Vert ; G4 : lac de l'Aiguillette, lac Blanc, lac Bleu, lacs des Cheserys, lac du Creux aux Marmottes, lac Jovet, lac du Plan du Buet, lac de Remuaz ; G5 : lac du Brévent, lac Cornu, lacs Noirs ; G6 : lac d'Anterne (d'après Chacornac, 1986)

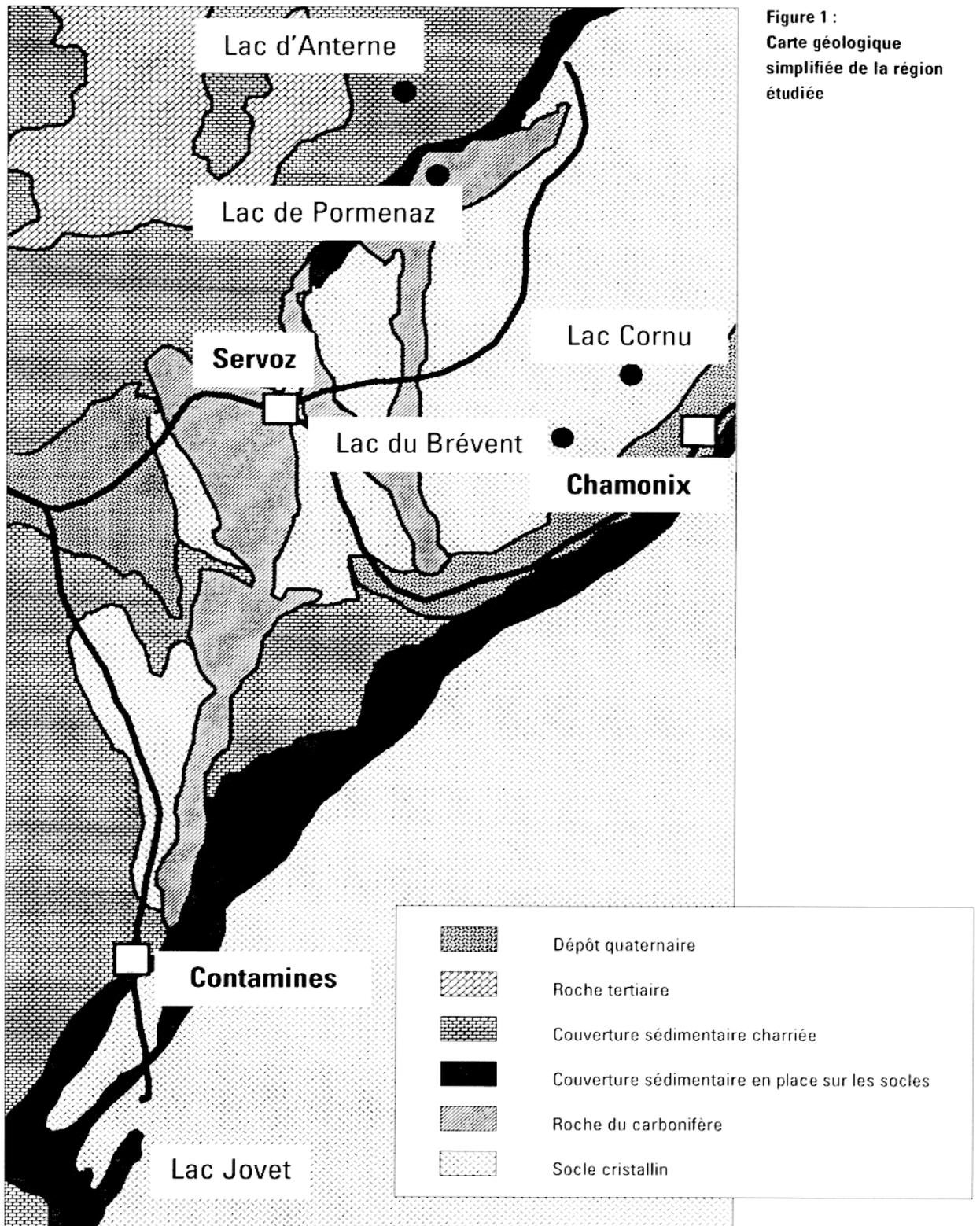
- Le lac de Pormenaz sous les Rochers des Fiz, appartenant au groupe G1.
- Le lac Jovet dans le Haut Val Monjoie, appartenant au groupe G4.
- Deux lacs du groupe G5 dans le massif cristallin des Aiguilles Rouges : le lac du Brévent proche d'une remontée mécanique (téléphérique du Brévent) avec un faible bassin versant et le lac Cornu caractérisé par son altitude, sa profondeur importante et sa plus faible fréquentation.
- Le lac d'Anterne dans le massif du Haut Faucigny, seul représentant du groupe G6, mais caractéristique d'une superficie importante de la retenue d'eau et de son bassin versant.

Caractéristiques \ Lacs	Anterne	Brévent	Cornu	Jovet	Pormenaz
Altitude (m)	2060	2127	2275	2173	1947
Altitude moyenne du bassin versant (m)	2200	2215	2400	2420	2100
Superficie du bassin versant (ha)	25	2,2	7,1	29,8	68,1
Superficie du lac (ha)	11,5	2,9	5,3	7,55	1,31
Profondeur maximum (m)	12,5	20	22	8,5	9,4

Tableau 2 : Caractéristiques invariantes des cinq lacs choisis

DESCRIPTION SOMMAIRE ET CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES DES CHOISIS

Deux lacs se trouvent sur un substratum et un bassin versant essentiellement cristallins (lac du Brévent, Cornu) dans le massif des Aiguilles Rouges (figure 1). Le lac Jovet se trouve aussi sur un socle cristallin, avec dans ce synclinal de fond une unité charriée de cargneules triasiques (Balvay & Blavoux, 1979, figure 1). L'alimentation en eau de ces trois lacs provient essentiellement des eaux de ruissellement et des précipitations.



Le substratum du bassin versant du lac de Pormenaz est formé d'éléments cristallins (micaschistes, gneiss, migmatites à filon acide) avec sur sa base des conglomérats, des grès et des schistes houillers, ainsi que des dolomies, des cargneules et des gypses du Trias.

Le lac lui-même se trouve sur un substratum entièrement houiller. Son origine est due à l'action des glaciers sur une zone de faille majeure et d'un synclinal de la couverture sédimentaire, actuellement ceci est souligné par de nombreuses roches moutonnées et polies autour du lac. Outre les précipitations et le ruissellement, l'alimentation de ce lac est aussi tributaire de filets d'eau issus de névés situés sur le flan de la Pointe Noire et de tourbières. Une forte fréquentation est à signaler du fait de la proximité d'un refuge et d'un chemin carrossable en véhicules tout terrain. Enfin, le lac d'Anterne se situe essentiellement dans un bassin dont la lithologie est entièrement calcaire et schistocalcaire. Ce lac se situe sur une formation karstique ce qui rend difficile l'estimation des apports en eau.

Matériels et méthodes

Chaque système lacustre est étudié d'une manière verticale dans la zone pélagique. Durant la durée de l'étude, un point de prélèvement est retenu. Il s'agit du point vertical de plus grande profondeur c'est-à-dire le point intégrant l'ensemble des variations de l'axe vertical.

La date de prélèvement se déroule durant la fin de la période estivale (août-septembre). Cette période a été choisie pour ses propriétés d'inertie et de représentativité du milieu étudié (Chacornac, 1986).

Ainsi sur chaque site un prélèvement d'un échantillon d'eau est obtenu à partir d'une colonne d'eau de la surface à la proximité du fond par la méthode du tuyau souple immergé en polyéthylène (Balvay et Blanc, 1975). Sur cet échantillon plusieurs mesures sont effectuées : conductivité, pH, oxygène dissous, température, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} . Ces mesures sont effectuées sur place grâce à des sondes et des méthodes chimiques nécessitant un spectrophotomètre de terrain (tableau 3). Un prélèvement d'eau filtrée à $0,45 \mu\text{m}$ est conservé pour être analysé en laboratoire afin d'obtenir les concentrations en Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} . Le filtre est ensuite congelé pour être traité en laboratoire pour effectuer les mesures de chlorophylle a.

Ces paramètres sont essentiels pour connaître le fonctionnement global de l'écosystème. Le pH intervient directement sur le métabolisme et la physiologie des organismes vivants, notamment en ce qui concerne leur reproduction et leur développement. Il conditionne indirectement les autres paramètres physicochimiques qui lui sont directement liés, notamment le pouvoir tampon, la dureté, la teneur en éléments nutritifs assimilables (azote, phosphore), la teneur en métaux et métalloïdes ainsi que la forme sous laquelle ils sont présents, et donc leur biodisponibilité. Le pH peut varier naturellement, Dussart (1990) rappelle les cinq mécanismes impliqués dans l'acidification des eaux naturelles : l'acidification des précipitations au cours de leur trajet dans l'air ; l'acidification géochimique des eaux au cours de leur percolation dans les terrains du bassin de drainage ; la consommation des acides réduits par le bassin de drainage ; l'acidification limnobiologique ; la consommation des acides réduits par les sédiments lacustres. En ce qui concerne les causes d'acidification artificielles résultant de l'activité de l'homme, dans le cas des lacs de haute montagne, on peut citer les précipitations acides (eau de

pluie, neige). Ces précipitations peuvent renfermer des teneurs élevées en oxydes de soufre (SO_2 , SO_3) et oxydes d'azote (NO , NO_2 , NO_3) polluants émis lors de la combustion d'énergie fossile ou émis par la circulation automobile. On observe également dans certains cas des teneurs non négligeables en acide chlorhydrique résultant par exemple de l'incinération d'ordures ménagères ou de déchets industriels (Cabridenc, 1990).

Paramètres	Méthodes utilisées
pH	pHmètre WTW de type pH-96-B équipé d'une sonde WTW de type Sentix 96
Oxygène / Température	Oxymètre WTW du type OXI-96-B équipé d'une sonde WTW EO 96
Conductivité / Température	Conductimètre WTW du type LF95 équipé d'une sonde WTW Tétracon 96T
Nitrates	Méthode HACH, Cadmium Reduction Method
Nitrites	Méthode HACH, Diazotization Method
Ammonium	Méthode HACH, Salicylate Method
Sulfates	Méthode HACH, SulfaVer IV Method
Orthophosphates	Méthode HACH, PhosphoVer III Method
Alcalins et Alcalino-terreux	Chromatographie ionique, Analyseur QIC Dionex
Chlorophylle a	Filtration sur place, conservation des filtres par congélation, méthode STRICKLAND and PARSONS (1960)

Tableau 3 : Méthodes et appareils utilisés lors des cinq campagnes

La conductivité est une mesure de la minéralisation, elle est proportionnelle à la quantité de sels ionisables dissous. La minéralisation est considérée comme très faible si la conductivité des eaux est inférieure à $50 \mu\text{S} / \text{cm}$ et faible à modérée si elle se situe entre 50 et $200 \mu\text{S} / \text{cm}$. Une augmentation de ce paramètre global peut être un indice de pollution (Nisbet et Verneaux, 1970).

La teneur en pigments chlorophylliens permet d'approcher la quantité d'algues présentes dans un échantillon, son excès peut être le signe d'un milieu qui s'eutrophise. En effet, les perturbations se manifesteront par une désoxygénation par accumulation de matière organique en décomposition en profondeur et une diminution de l'éclairement (Bremont et Perodon, 1976).

L'analyse des composés azotés et phosphatés donne des renseignements sur l'état de santé du plan d'eau, mais peut aussi apporter des informations sur les apports atmosphériques comme l'apport éventuel d'azote inorganique dissous atmosphérique (Roche et Loye-Pilot, 1989). Ce sont ces facteurs limitants du milieu qui vont imposer un état trophique au milieu.

TRAITEMENT DES DONNÉES

Les 14 paramètres physico-chimiques mesurés au cours des cinq années et sur les cinq sites sont représentés sous forme graphique : pour chaque paramètre, la moyenne des 25 mesures est calculée et leurs variations sont représentées par des cercles (valeur > moyenne) et des carrés (valeur < moyenne) proportionnels. L'intérêt de cette représentation est de souligner la stabilité ou la forte variation dans le temps et l'espace des paramètres mesurés. Ces valeurs relatives permettent de mieux apprécier l'évolution des

paramètres choisis. Le lecteur pourra consulter les valeurs obtenues dans le tableau situé en Annexe.

Afin d'appréhender l'importance de la variation temporelle et spatiale des paramètres, une analyse multivariée a été choisie : l'analyse en composante principale (ACP) (Auray *et al.*, 1990). En effet les procédés classiques de la statistique descriptive à une dimension, permettent de résumer l'information recueillie sur chaque caractère pris isolément ; en revanche, ils ne fournissent aucune méthode visant à décrire l'information globale dont on dispose quand on considère les caractères étudiés dans leur ensemble. Celle-ci a pour objet de révéler les interactions entre caractères et de proposer une description, apte à suggérer une structure. Une telle méthode est particulièrement adaptée à des mesures quantitatives et constituées de variables de natures différentes. Mais les résultats d'une ACP sont influencés par l'ordre de grandeur des variables. Afin de remédier à cet inconvénient, les données obtenues sur les cinq lacs et pendant les années 92, 93, 94, 95 et 96 ont subi deux opérations : un centrage par rapport à la moyenne et une réduction par rapport à l'écart type des valeurs obtenues pour chaque paramètre. Afin de mieux décrire ces résultats, une ACP plus performante a été utilisée, il s'agit d'une ACP inter-intra (Doledec et Chessel, 1989 ; Thioulouse et Chessel, 1987). L'analyse utilisée (ACP inter lacs) amplifie les différences entre les lacs (variabilité interlacs).

Résultats et discussion

ÉVOLUTION DES PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES

La figure 2 montre une stabilité des cations alcalins et alcalino-terreux. Le magnésium (Mg^{2+}) et le calcium (Ca^{2+}) sont représentatifs de la qualité des eaux du lac d'Anterne durant les cinq années d'étude, pour les autres lacs, les teneurs de ces éléments sont peu importantes. Ces cations sont caractéristiques de la lithologie de son substratum essentiellement calcaire. La concentration en potassium (K^+) en 1993 et en 1995 est particulièrement importante au lac du Brévent, pour les autres lacs, ce paramètre ne présente pas une concentration particulière. Les teneurs en sodium (Na^+) les plus importantes se trouvent essentiellement dans les eaux des lacs situés sur un substratum secondaire tel que le lac d'Anterne ou proche d'unité charriée telle que les cargneules triasiques au lac Jovet. Par contre il est surprenant de trouver une quantité de sodium en augmentation au lac du Brévent.

En ce qui concerne la température (T) et le pH, bien qu'une variabilité des mesures soit observée (figure 2), celle-ci peut être expliquée par des facteurs naturels. Les lacs Jovet et Cornu sont les plus froids. Leurs températures semblent être stables, ce sont les deux lacs situés aux altitudes les plus hautes. Les fortes variations de ce paramètre au lac de Pormenaz sont dues à la faible profondeur de ce lac. Le pH, pendant les cinq années d'étude, semble diminuer aux lacs du Brévent et Cornu, tandis que pour les autres lacs il y a quasi-stabilité (lac Jovet) et même augmentation de ce paramètre (Pormenaz). Cependant, il faut rester prudent quant à l'acidification de certains lacs. L'interprétation des mesures de pH est difficile, car, bien que cette mesure soit effectuée sur la colonne d'eau, ce paramètre peut varier très rapidement dans ce milieu très peu tamponné en fonction de l'ensoleillement (photosynthèse, température, etc.).

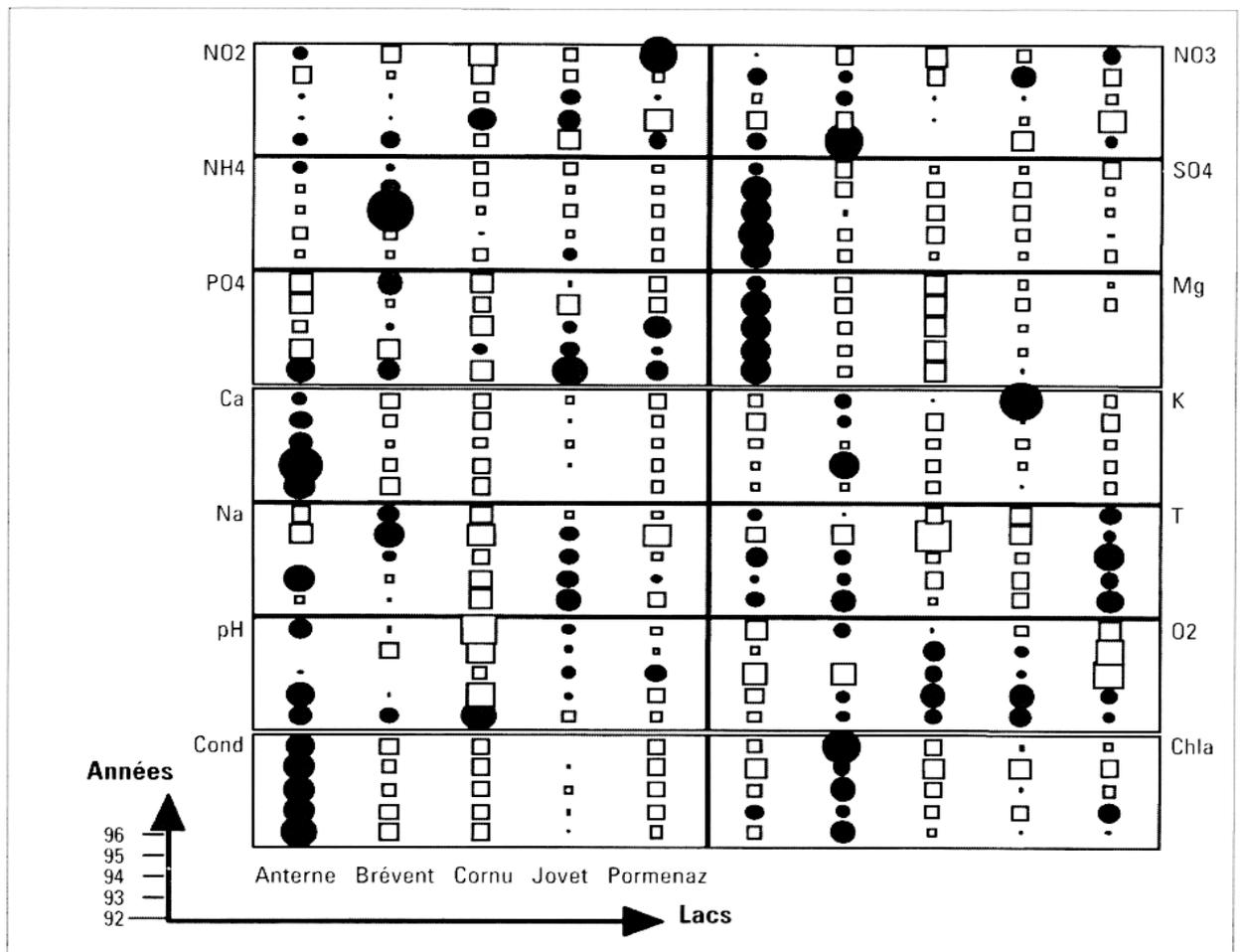


Figure 2 :

Représentation des valeurs des paramètres physico-chimiques centrées sur la moyenne des cinq lacs pour les cinq années
 La surface des cercles et des carrés est proportionnelle aux données (cercle : valeur > moyenne ; carré : valeur < moyenne ; il s'agit de la moyenne des mesures effectuées pour chaque paramètre quels que soient les lacs)

Les principaux facteurs limitants du milieu aquatique varient significativement. Les nitrates (NO_3^-) sont présents surtout dans le lac du Brévent, ils sont marqués par une forte concentration en 1992 puis une diminution de celle-ci en 93 et enfin en 1994 et 95 une nouvelle augmentation. Dans le lac Cornu il y a une faible concentration de cet anion, elle est plus importante dans les lacs d'Anterne et Jovet. L'ammonium (NH_4^+) est surtout présent dans le lac du Brévent, tandis que dans les autres lacs et quelle que soit l'année de prélèvement il y a une quasi absence de ce cation. Les sulfates sont caractéristiques des eaux prélevées dans le lac d'Anterne. Dans les autres lacs, les variations observées sont peu significatives. Les nitrites (NO_2^-) varient peu, l'augmentation sur le lac Jovet observée en 1994 n'est pas vérifiée. Les concentrations en ortho-phosphates (PO_4^{3-}) diminuent dans le lac d'Anterne et le lac Jovet pendant les cinq années de prélèvement. La conductivité électrique (Cond) est pratiquement constante pour chaque lac pendant les trois années d'étude. Enfin, la concentration en chlorophylle a (Chla) est plus importante dans le lac du Brévent. Durant les cinq années d'étude ce paramètre rendant compte de la production primaire d'un plan d'eau est significativement supérieur à la moyenne de ce paramètre de tous les lacs.

Les concentrations les plus importantes en oxygène (O_2) se trouvent dans les lacs les plus froids (Jovet et Cornu). Pour les autres lacs, il y a diminution de la teneur en oxygène, là encore il faut rester prudent, car le protocole expérimental (colonne d'eau) est peu adapté à la mesure de ce paramètre, en effet il peut y avoir une oxygénation lors de la prise de mesure.

En résumé, pour le lac du Brévent la concentration en nitrates, en orthophosphate et en chlorophylle, soulignée durant la campagne de 1992, indiquerait un risque d'évolution de l'oligotrophie à la mésotrophie du lac, à la différence des autres lacs qui gardent leur caractère oligotrophe. La campagne de l'année 93 n'avait pas confirmé cette tendance. En 1994, la concentration en nitrate et surtout en chlorophylle est élevée. En 1995 et surtout en 1996, ces deux tendances sont confirmées. D'autre part une concentration importante en ammonium est observée. Elle peut provenir de plusieurs sources telles que la pluie et la neige, de la réduction des nitrates par des bactéries autotrophes, de déchets végétaux ou animaux contenus dans le sol.

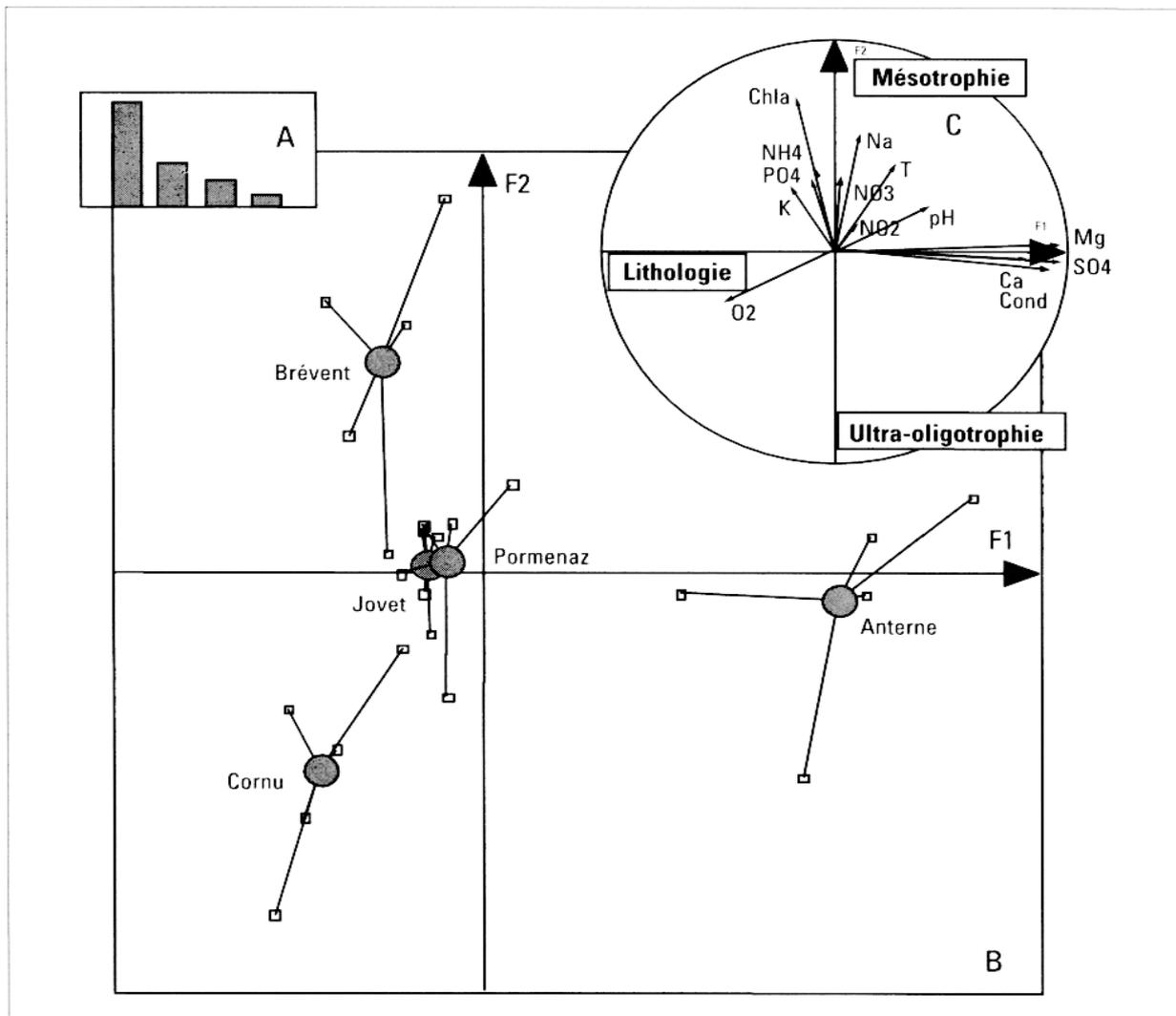


Figure 3 :

Synthèse de l'ACP normée inter lacs selon les axes F1-F2

A : graphe des valeurs propres - B : plan factoriel F1-F2 des échantillons - C : cercle de corrélation des variables

ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

À partir du cercle de corrélation (figure 3.C), les variables les plus liées au premier axe F1 sont celles qui caractérisent la lithologie du substratum (Ca^{++} , Mg^{++} , SO_4^{--}). L'axe F1 souligne les eaux dont la charge ionique est importante. La conductivité est corrélée au calcium, sulfate, magnésium, en fait la conductivité donne une idée générale de la quantité d'ions contenue dans les échantillons. Ces importantes teneurs sont liées à la nature calcaire du substratum, à l'inverse la faible concentration de ces éléments caractérise un substratum moins sensible au milieu tel que les terrains cristallins. En ce qui concerne le deuxième axe factoriel F2, on s'aperçoit qu'il traduit l'importance de l'azote, soit sous forme ammonium, soit sous forme nitrate et les orthophosphates. De plus, ces ions sont corrélés à la chlorophylle a. La présence de nitrate fertilise le milieu, ce qui entraîne une augmentation de la production primaire (chlorophylle a). Parallèlement, les teneurs en ammonium peuvent être dues à la réduction des nitrates par des bactéries et à la décomposition des végétaux. Ces paramètres caractérisent une eutrophisation du milieu.

La carte factorielle (figure 3.B) permet de distinguer la structure des échantillons recueillis. Le premier axe F1 permet de distribuer les lacs selon leurs concentrations en éléments minéraux calcaires. Les eaux du lac d'Anterne sont caractérisées par une conductivité et des concentrations en calcium, sulfate et magnésium élevées (lithologie sous jacente). Les lacs étudiés sont plutôt distribués suivant l'axe F2 qui caractérise le degré d'eutrophisation des milieux aquatiques. Les eaux du lac Cornu ont un caractère ultraoligotrophe, les lacs de Pormenaz et de Jovet ont un caractère oligotrophe avec des qualités assez proches. Les eaux du lac Brévent sont caractérisées par des teneurs en azote et en chlorophylle a élevées, sa situation sur le graphe permet de souligner le caractère mésotrophe de ce plan d'eau. En effet il est situé symétriquement par rapport au lac Cornu, bien qu'il soit sur un substratum identique, ici la lithologie n'explique pas entièrement la qualité du lac.

Conclusion

L'étude confirme que les lacs d'Anterne, Cornu, Jovet et Pormenaz ont conservé leurs caractères oligotrophes au cours des cinq années du suivi. Le lac du Brévent est à surveiller, la tendance à la mésotrophie (eutrophie) semble se confirmer. Le suivi de la qualité des eaux des lacs de montagne peut être un outil de gestion qui permet de diagnostiquer l'état global d'un écosystème. Néanmoins un tel indicateur ne permet pas de connaître les causes précises d'un dysfonctionnement, il permet seulement d'alermer le gestionnaire. Il ne renseigne pas sur l'échelle spatiale de la perturbation : mondiale, régionale ou locale. Ainsi le comité scientifique des réserves de Haute-Savoie et l'Agence Pour l'Étude et la Gestion de l'Environnement (APEGE) poursuivent ce programme par l'intermédiaire d'un observatoire de la qualité des lacs alpins mis en place depuis 1998.

Remerciements

Cette étude a été soutenue par une aide du Comité Scientifique des Réserves de Haute-Savoie et par la présence des gardes des réserves de Haute-Savoie.

Bibliographie

- BALVAY G. et BLAVOUX B., 1979. – Le grand lac Jovet (Haute-Savoie), 11 et 12 septembre 1979. *Rapport INRA et Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les Bains*.
- BALVAY G. et BLAVOUX B., 1981. – Le grand lac Jovet (Haute-Savoie), milieu oligotrophe de haute montagne. *RGA*, Vol. 69, N° 3, pp. 421-442.
- BALVAY G. et BLANC P., 1975. – Méthodologie pour l'inventaire du degré de pollution des lacs et des étangs de France. *Rapport INRA*, (DPPN 75), N° 10, pp. 1-53.
- BALVAY G., 1978. – Un lac oligotrophe de haute montagne : le lac Cornu (Haute-Savoie). *RGA*, Vol. 66, N° 1, pp. 31-41.
- BOWMAN and HARLOCK, 1998. – The spatial distribution of characterised fly-ash particles and trace metals in lake sediments and catchment mosses : Ireland. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 106, N° 3-4, pp. 263-286.
- BOUVET Y., 1989. – La montagne, l'eau, la vie, aperçu hydrobiologique des lacs d'altitude de Haute-Savoie. *Comté Scient. Réser. Nat. Haute-Savoie*.
- BRÄNNVALL M.-L., BINDLERI R., EMTERYD O., NILSSON M. and RENBERG I., 1997. – Stable isotope and concentration records of atmospheric lead pollution in peat and lake sediments in Sweden. *Water, Air, and Soil Pollution*, Vol. 100, pp. 243-252.
- BREMONT et PERODON, 1976. – Paramètres de la qualité des eaux. *Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Direction de la prévention des pollutions*, 259 pages.
- CABRIDENC R., 1990. – Préoccupations françaises concernant l'acidification des milieux aquatiques. *TSM, L'Eau*, février 90, pp. 65-68.
- CHARCORNAC J.M., 1986. – Lacs d'altitude : métabolisme oligotrophe et approche typologique des écosystèmes. *Thèse de doctorat de l'université Claude Bernard*. Lyon I, 189 pages.
- DOLEDEC S. et CHESSEL D., 1987. – Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. *Acta Oecologica, Oecologica Generalis*, Vol. 8, N° 3, 1987, pp. 403-426.
- DOLEDEC S., CHESSEL D., 1989. – Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique – II. Prise en compte et élimination d'effets dans un tableau faunistique. *Acta Oecologica, Oecologica Generalis*, Vol. 10, N° 3, 1989, pp. 207-232.
- DRUART J.-C., DORIOZ J.M., BLANC P. & BALVAY G., 1999. – Un lac à protéger : le lac Bénit (Haute-Savoie). *RGA*, Vol. 87, N° 3, pp. 87-99.
- DUPONT J., 1990. – Étendue de l'acidification des eaux lacustres au Québec. *Techniques Sciences Méthodes*, 85^e année, N° 2, pp. 74-80.
- DUSSART B.-H., 1990. – L'acidification des milieux aquatiques. *TSM, L'Eau*, février 90, pp. 63-64.
- FOIT J., VUKIC J. and ROSE N.L., 1998. – The spatial distribution of characterised fly-ash particles and trace metals in lake sediments and catchment mosses : Czech Republic. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 106, N° 3-4, pp. 241-261.
- HAUBERT M., 1976. – Importance des apports atmosphériques dans le bilan hydrodynamique d'un bassin versant de moyenne montagne. *Arch. Sci.* Genève, Vol. 29, pp. 183-197.
- NISBET M. & VERNEAUX J., 1970. – Composantes chimiques des eaux courantes, discussion et proposition en tant que bases d'interprétation des analyses chimiques. *Annales de Limnologie*, Vol. 6 N° 2, pp. 161-190.
- POURRIOT R. et MEYBECK M., 1995. – Limnologie générale. *Collection d'Écologie 25, Édition Masson*, 956 pages.
- ROCHE B. et LOYE-PILOT M.D., 1989. – Eutrophisation récente d'un lac de montagne sans occupation humaine (lac de Bastani, Corse). *Revue des Sciences de l'Eau*, N° 2, pp. 681-707.

- ROSE and HARLOCK, 1998. – The spatial distribution of characterised fly-ash particles and trace metals in lake sediments and catchment mosses in the United Kingdom. *Water, Air and Soil Pollution*, Vol. 106, N° 3-4, pp. 287-308.
- SESIANO J., 1994. – Monographie physique des plans d'eau naturels du département de la Haute-Savoie (France). Univ. Genève, Conseil Général de Haute-Savoie (imp.), 137 p.
- SESIANO J., 1986. – Paramètres physico-chimiques de quelques lacs d'altitude de Haute-Savoie. *Arve-Léman-Savoie-Nature* 48 : 1-5.
- SHOTYK W., CHEBURKIN A.K., APPLEBY P.G., FANKHAUSER A. and KRAMERS J.D., 1996. – Two thousand years of atmospheric arsenic, antimony, and lead deposition recorded in an ombrotrophic peat bog profile, Jura mountains, Switzerland. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 145, E1-E7.
- STRICKLAND J.O.H. & PARSONS T.R., 1972. – A practical handbook of sea water analysis. *J. Fish. Res. Bd Can.*, Vol. 167, 310 pages.
- TESSIER A., CAMPBELL P.G.C. et CARIGNAN R., 1990. – Influence du pH sur la spéciation et la biodisponibilité des métaux. *Techniques Sciences Méthodes*, 85^e année, N° 2, pp. 69-73.
- THIOULOUSE J. et CHESSEL D., 1987. – Les analyses multitableaux en écologie factorielle - De la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta Oecologica, Oecologica Generalis*, Vol. 8, N° 4, 1987, pp. 463-480.

	NO ₂ mg / l	NO ₃ mg / l	NH ₄ ⁺ mg / l	SO ₄ ²⁻ mg / l	PO ₄ ³⁻ mg / l	Mg ²⁺ mg / l	Ca ²⁺ mg / l	K ⁺ mg / l	Na ⁺ mg / l	T °C	pH	O ₂ mg / l	Cond µS / cm	Chla µg / l
Ant92	0,149	0,748	0,026	7	0,23	1,8	41,38	0,178	0,22	15,3	7,66	7,8	184,2	1,65
Ant93	0,13	0,44	0	8,33	0,02	1,9	75,8	0,18	0,6	12,9	7,92	7,6	156	4,18
Ant94	0,13	0,57	0,04	7,5	0,07	2	32,4	0,09	0,25	15,8	6,78	6,9	156,2	1,74
Ant95	0,079	0,748	0,032	7,5	0,015	2	27,3	0	0,09	9,2	6,75	7,9	149,1	0,09
Ant96	0,16	0,63	0,13	3	0,03	1,11	19,23	0,13	0,16	14	7,67	7,3	135,7	1,8
Bré92	0,165	1,32	0,039	0,5	0,17	0,35	0,35	0,244	0,241	18	7,4	8,4	14,6	5,54
Bré93	0,13	0,47	0	0,5	0,03	0,39	5,7	1,64	0,22	13,8	6,77	8,4	16	3,57
Bré94	0,13	0,79	0,78	1,5	0,12	0,34	8,18	0,21	0,33	15,5	6,73	6,8	18,8	6,48
Bré95	0,109	0,726	0,155	0	0,08	0,15	2,3	0,58	0,58	7,9	6,1	8,1	18,8	4,44
Bré96	0,08	0,48	0,09	0	0,2	0,26	1,68	0,87	0,43	12,4	6,65	8,8	15	9,71
Cor92	0,099	0,616	0,013	1	0,03	0,088	1,29	0,126	0,106	11,2	8,85	8,6	5,5	2,4
Cor93	0,23	0,64	0,084	0	0,14	0,06	1,05	0,05	0,09	9	5,32	9,4	6	1,51
Cor94	0,1	0,63	0,02	0	0,01	0,048	2,14	0,11	0,13	10	6,32	8,7	5,6	0,78
Cor95	0,04	0,44	0	0	0,04	0	0,7	0	0,03	3	5,36	9,1	10,1	0,17
Cor96	0,025	0,37	0,001	1	0,01	0,03	0,09	0,45	0,11	9,2	4,3	8,2	6,2	1,02
Jov92	0,059	0,394	0,116	1	0,29	0,68	11,26	0,4	0,461	9	6,3	9,1	55	2,83
Jov93	0,2	0,57	0,03	0,5	0,15	0,45	10,6	0,25	0,44	9,9	6,99	9,3	43	1,14
Jov94	0,17	0,64	0,019	0	0,14	0,51	8,68	0,15	0,36	10,1	7,17	8,3	39,4	2,99
Jov95	0,097	0,968	0,019	0	0,025	0,43	10,4	0,33	0,38	7,4	6,88	8,4	41,8	0,4
Jov96	0,087	0,5	0,013	1	0,09	0,51	6,71	3,01	0,21	8,7	7,19	7,8	48,5	2,53
Por92	0,172	0,704	0,013	0,5	0,18	0,63	3,29	0,113	0,165	18,7	6,25	8,4	16,3	2,82
Por93	0,023	0,31	0	1,5	0,12	0,62	4,9	0,1	0,28	14,8	6,07	8,8	15	5,1
Por94	0,13	0,53	0	1	0,2	0,63	5,91	0,09	0,22	19,5	7,59	6,7	15,3	1,91
Por95	0,091	0,44	0,026	1	0,055	0,38	2	0	0,045	14,2	6,64	6,8	14,4	0,89
Por96	0,35	0,79	0,045	0	0,04	0,55	1,72	0,06	0,22	15,7	6,53	7,2	13,6	2,13

Annexe :**Tableau des mesures effectuées lors des campagne de prélèvements 92 à 96**

(Ant : lac d'Anterne, Bré : lac du Brévent, Cor : lac Cornu, Jov : lac Jovet, Por : lac de Pormenaz)

Résumé : L'impact des activités humaines sur les milieux récepteurs que sont les écosystèmes montagnards a été maintes fois décrit. La difficulté est de mesurer des paramètres qualitatifs illustrant ces perturbations. Les lacs de montagnes peuvent être des indicateurs de perturbation d'un bassin versant provoquée par des activités de surface. L'analyse d'échantillons liquides représentatifs de la qualité physico-chimique globale des eaux, montre l'intérêt descripteur de ces lacs. Ceux-ci sont choisis dans le département de la Haute-Savoie. Un suivi de la qualité des eaux (température, pH, conductivité électrique, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Chlorophylle a) a été effectué durant cinq ans au sein d'un observatoire sur cinq sites : lac du Brévent, lac Cornu, lac de Pormenaz, lac d'Anterne et lac Jovet. Les résultats montrent qu'il est possible de mettre en évidence des dysfonctionnements (eutrophie). Cette méthode est limitée, elle ne permet pas de caractériser les causes de ce dysfonctionnement.

Mots-clés : lac de montagne, qualité des eaux, eutrophication, perturbation, Alpes

Abstract : *Mountain lakes : indicators of environmental quality. The example of the mountain reservoirs of Haute Savoie, France.* The impact of human activities on mountain ecosystems has been well documented. The main difficulty is in measuring the qualitative parameters illustrative of such activities. Mountain lakes may be used as indicators of the changes to a catchment area caused by surface activities. Physical and chemical analyses of water samples taken from a number of lakes in Haute Savoie illustrate the capacity of such lakes to provide an indication of changes to the milieu. Water quality (temperature, pH, electrical conductivity, NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , chlorophyll a) was monitored over a five-year period at an observatory covering five sites : lac du Brévent, lac Cornu, lac de Pormenaz, lac d'Anterne and lac Jovet. The results show that it is possible to identify malfunctions (eutrophy). The method is limited, however, in that it does not enable the causes of such malfunctions to be determined.

Keywords : mountain lake, water quality, eutrophication, Alps