

Un indice biologique lacustre basé sur l'examen des oligochètes

An environmental index based on lacustrine oligochaetes

M. LAFONT¹, J. JUGET² et G. ROFES¹

Reçu le 9 février 1990, accepté le 14 novembre 1990*.

RÉSUMÉ

L'utilisation des indices oligochètes relevés dans la littérature pose un certain nombre de problèmes conceptuels et pratiques lorsque l'on étudie des lacs de taille réduite, le rôle des sédiments dans la distribution des oligochètes étant la plupart du temps ignoré.

A partir d'analyses en composantes principales normées (ACP) comprenant, comme variables actives, 12 variables physico-chimiques des sédiments profonds de 12 lacs situés dans le Jura et les Vosges, nous avons projeté, en données supplémentaires, la physico-chimie des eaux et des variables biologiques (nombre d'espèces et effectifs d'oligochètes).

Les analyses mettent en évidence un premier facteur F1, commun aux sédiments de tous les lacs étudiés et caractérisé par un antagonisme entre la matière organique (C, N, P) et les carbonates. Ce facteur est considéré ici comme exprimant une capacité métabolique des plans d'eau à minéraliser la matière organique. Les variables physico-chimiques des eaux se projettent sur cette structure et ne contredisent pas la signification accordée au facteur F1. Les variables biologiques ne se révèlent fortement corrélées qu'avec F1, et s'opposent aux variables décrivant les teneurs en matières organiques.

Par une régression multiple où la variable à expliquer est constituée par la première coordonnée factorielle des stations d'échantillonnage, on obtient l'indice $EOLA = \text{nombre d'espèces d'oligochètes} + 3 \cdot \log_{10} \text{des effectifs d'oligochètes}/0,1 \text{ m}^2$, qui est corrélé avec la structure physico-chimique mise en évidence dans les ACP. Cet indice est considéré comme une potentialité

1. CEMAGREF, 3, quai Chauveau F-69009 Lyon, France.

2. Université Claude Bernard, URA CNRS n° 367, 43, boulevard du 11 novembre 1918, F-69622 Villeurbanne, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 décembre 1991.

biologique liée à la capacité des lacs à minéraliser la matière organique, capacité qui peut se révéler faible en raison de la présence d'apports d'origine autochtone ou allochtone (en particulier les rejets humains).

Mots clés : *lacs, sédiments, oligochètes, indice biologique.*

SUMMARY

Oligochaetes are often considered as good descriptors of the ecological situation in lakes. Unfortunately, the role of sediments in the distribution of species is not well known, particularly in small lakes. This problem needed re-examination, the importance of the sediments being emphasized. Twelve physico-chemical variables of the sediments (*table 2*) were taken into account and analysed by means of a standardized principal component analysis (PCA). The physico-chemical variables of the waters as well as the biological variables (species richness and abundance of oligochaetes, *table 2*) were projected as supplementary data in the PCA.

The first principal component is characterized by an opposition between the organic matter (C, N, P) and the CaCO_3 contents of the sediments (*table 3*). The second factor represents the total phosphorus. Lakes from crystalline area (Longemer and Gérardmer) are very contributive to the factor 2 as the total phosphorus contents of their sediments are very high (*fig. 1 and table 6*). When these lakes are removed from the data set, the second PCA indicates no changes in the signification of factor 1 (*table 4*). In both analyses, physico-chemical variables of waters are correlated with the first factor, and do not contradict its signification. Biological variables are only correlated with factor 1 and show an opposite direction to organic matter (*fig. 2*).

It is suggested that the first factor represents the capacities of the lakes to mineralize the organic matter. The first co-ordinates of sampling stations (COF1), the mean number of oligochaete species (NSPS) and the mean \log_{10} of their abundance/0.1 m² (EFFE) were compared by means of a multiple regression (*table 5*). The following biological index is obtained: $\text{EOLA} = \text{NSPS} + 3\text{EFFE}$. This oligochaete index is related to the factor 1 and it is suggested that it gives an assessment of the biological potentialities of lakes, these potentialities being related to the mineralizing capacities. Low values of the index EOLA are obtained both from human and natural organic enrichment.

Key-words : *lakes, sediments, Oligochaeta, biological index.*

1 - INTRODUCTION

La mise au point d'indices biologiques décrivant l'état écologique des lacs à partir de la prise en considération des peuplements d'oligochètes soulève un certain nombre de problèmes, tant pratiques que conceptuels. En premier lieu, certains indices nécessitent, pour leur calcul, la prise en considération de relevés mensuels sur un cycle annuel complet. Un tel protocole s'avère indispensable pour connaître avec précision le pourcentage exact d'espèces indicatrices du degré de trophie des lacs, espèces dont les formes immatures ne sont pas déterminables. A de tels indices, on peut rattacher ceux de

HOWMILLER et SCOTT (1977), MILBRINK (1980, 1983), PROBST (1987) et LANG (1989). En second lieu, la valeur indicatrice des espèces est définie à partir du degré de trophie de la masse d'eau, basé principalement sur la prise en considération du phosphore total et de la chlorophylle a. Les sédiments sont considérés implicitement comme n'ayant pas d'influence prépondérante sur la distribution des espèces. Or, il s'avère incontestable que la nature des sédiments et le contexte pédologique dans lequel ceux-ci évoluent jouent un rôle important dans la répartition des oligochètes (JUGET et GIANI, 1974, LAFONT, 1982, 1989, GRIGELIS, 1984, JUGET, 1984, LAFONT et JUGET 1981, 1985). Ceci pourrait expliquer en grande partie les incertitudes que l'on relève généralement dans la littérature sur le statut trophique d'espèces très communes (MILBRINK, 1980 ; BAZZANTI et LAFONT, 1985 ; SÄRKKÄ, 1987, 1989). En dernier lieu, les listes mentionnant les espèces et leur valeur indicatrice font le plus souvent référence à des taxons plus communs dans les grands lacs nordiques ou subalpins que dans les systèmes de taille plus réduite, comme les lacs du Jura français par exemple (LAFONT, 1989).

En conséquence, la mise au point d'indices basés sur la prise en compte des peuplements d'oligochètes, provenant de lacs de petite à moyenne importance, nécessitait des clarifications conceptuelles et des aménagements pratiques.

L'objectif des recherches présentées ici était donc multiple :

1. Connaître les relations existant entre la physico-chimie des eaux et des sédiments et les peuplements d'oligochètes inféodés aux sédiments de la zone profonde.
2. Etablir, à partir de ces relations, un indice numérique, calé sur la physico-chimie des sédiments et des eaux, l'indice devant être simple à calculer et ne pas nécessiter un cycle annuel complet de prélèvements.
3. Dresser les bases d'une typologie du fonctionnement des lacs de petite et moyenne importance. Une démarche similaire a d'ailleurs été suivie avec les peuplements de mollusques (MOUTHON, 1986, 1990).

2 - MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les douze lacs étudiés (*tableau 1*) sont situés dans l'est de la France (Jura et Vosges). Les protocoles d'échantillonnage retenus ont été décrits en détail dans plusieurs travaux (JUGET et LAFONT, 1982 ; LAFONT, 1989). Nous rappellerons brièvement que les échantillons de benthos, récoltés à l'aide d'une benne, ont été fixés sur le terrain dans une solution de formaldéhyde à 4-6 %, puis tamisés au laboratoire (maille minimale = 0,160 mm). L'extraction des oligochètes s'est effectuée à la pince sous une loupe binoculaire. Lorsque les effectifs de vers dépassaient 130 spécimens par échantillon de sédiment, nous avons eu recours à des techniques de sous-échantillonnage.

Les échantillons de faune benthique ont été réalisés sur 24 stations provenant de divers points de la zone profonde des 12 plans d'eau considérés (*tableau 1*).

Les prélèvements pour analyses physico-chimiques des sédiments et des eaux ont été réalisés sur les mêmes emplacements que les relevés de faune benthique. Nous avons distingué trois types de prélèvements d'eau :

- prélèvements d'eau effectués à l'aide d'une bouteille à renversement, sur une verticale à l'aplomb du point le plus profond du lac (eau profonde sur verticale, analyses effectuées par le SRAE Franche-Comté). Dans ce cas, seules les tranches d'eau correspondant aux profondeurs d'échantillonnage des oligochètes ont été prises en considération ;

- prélèvements d'eau effectués à l'aide d'une bouteille Friedinger au voisinage de l'interface eau-sédiment, (eau de contact, mêmes points que les prélèvements de sédiments) ;

- prélèvements d'eau interstitielle par centrifugation sur la couche des 10 premiers centimètres des sédiments récoltés au moyen d'un carottier ROFES et SAVARY (1981).

En général, les analyses du sédiment, des eaux interstitielles et des eaux de contact ont été réalisées par le CEMAGREF. Dans le cas de quelques plans d'eau (Grand Clairvaux, Abbaye, Saint-Point), les résultats des analyses physico-chimiques ont été puisés dans un rapport de synthèse (Université Franche-Comté, 1987).

3 - TRAITEMENT DES DONNÉES

Les variables physico-chimiques et biologiques ayant retenu notre attention (*tableaux 2, 4, 5 et 6*) ont fait l'objet d'un traitement à l'aide de trois analyses multivariées : l'analyse en composantes principales normée (ACPN), la classification ascendante hiérarchique (CAH) et la régression multiple de type stepwise. Ces trois méthodes font appel à des programmes diffusés par l'Association pour le Développement et la Diffusion de l'Analyse de Données (ADDAD), programmes implantés sur un miniordinateur VAX 8250 de Digital.

En ce qui concerne l'ACPN, les variables actives sont constituées par les variables physico-chimiques du sédiment (phases solide et liquide), les variables biologiques et les variables physico-chimiques des eaux (eaux de contact, eau profonde sur verticale, transformées en \log_{10}) étant projetées en données supplémentaires.

Dans le cas des lacs de Chalain et de Saint-Point, nous ne disposons que d'une seule analyse chimique du sédiment pour deux relevés biologiques. En conséquence, un coefficient de pondération de 0,5 a été attribué aux lignes correspondantes.

Lorsque deux analyses physico-chimiques du sédiment concernaient le même point, seule la valeur moyenne a été retenue.

Tableau 1 Liste des lacs étudiés avec leurs codes d'identification (codes), les saisons et les profondeurs d'échantillonnage retenues. (1) département du Jura ; (2) département des Vosges.

Table 1 List of lakes with their identification codes (codes), depths studied and sampling seasons. (1) Jura mountains ; (2) Vosges mountains.

Lacs	Codes	Profondeur (m) des 24 stations étudiées	Altitude (m)	Superficie (ha)	Profondeur maximale (m)	Mois et années de récoltes
Petit Maciu (1)	M404	- 11	779	6,4	11	05, 07, 09 1983-84
Grand Ethal (1)	G404	- 9	796	16	9,5	05, 07, 11 1985
Bonifeu (1)	C404	- 15	803	20,9	15	05, 07, 11 1985
Grand Maciu (1)	M404	- 26	779	24,4	26	05, 07, 09 1983-84
Grand Chailvaux (1)	E403, E404	- 15	525	56,5	20	04, 07, 10 1982
Ilay (1)	J403, J404	- 18	779	72,6	30	05, 07, 10 1984
Longemer (2)	K403, K404	- 15	750	76,2	29,5	05, 08, 1976
Abbaye (1)	B433, B434	- 10	879	80	19,5	10 1980
Les Rousses (1)	P403-P404	- 15	1 059	89,8	18	05, 07, 10 1975-80
Gérardmer (2)	I403, I404	- 15	660	115,5	36	05, 08 1976
Chalain (1)		- 30	500	232	30	
(Zone amont)	D103, D104	- 18				05, 07 10 1984
(Zone aval)	D303, D304	- 18				05, 07, 10 1984
Saint-Point (1)			850	419	43	
(St-Point)	Q313-Q314	- 10				05 1978
(Les Grangettes)	Q113-Q213	- 10				05 1978

Tableau 2 Variables physico-chimiques et biologiques étudiées avec leur code d'identification.

Table 2 Physico-chemical and biological variables with their identification codes.

Phase solide des sédiments		Codes
% de particules dont le diamètre moyen est $\leq 50 \mu\text{m}$:		GRAN
Perte au feu (%) :		PERF
Carbone organique (%) :		CARB
Azote Kjeldahl (%) :		NTKJ
Rapport carbone organique/azote Kjeldahl :		CDIN
Indice carbone organique x azote Kjeldahl :		CMUN
Phosphore total (en P205) (%) :		PHOS
Carbonates (%) :		CACO
Phase liquide des sédiments (eau interstitielle)		
NH ₄ ⁺	(mg/l) :	NH4E
NO ₃ ⁻	(mg/l) :	NO3E
PO ₄ ⁻⁻⁻	(mg/l) :	PO4E
HCO ₃ ⁻	(mg/l) :	HCO3
Eau de contact		
NH ₄ ⁺	(mg/l) :	SNH4
NO ₃ ⁻	(mg/l) :	SN03
PO ₄ ⁻⁻⁻	(mg/l) :	SPO4
Potentiel rédox (exprimé en unités rH) :		SRHM
Eau sur verticale		
pH moyen :		PHMO
O ₂ dissous	- valeur minimale (mg/l) :	O2MI
O ₂ dissous	- valeur maximale (mg/l) :	O2MX
NH ₄ ⁺	- valeur moyenne (mg/l) :	NH4M
NO ₃ ⁻	- valeur moyenne (mg/l) :	NO3M
PO ₄ ⁻⁻⁻	- valeur moyenne (mg/l) :	PO4M
Dureté totale - valeur moyenne Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ (mg/l) :		DUMO
Variables biologiques (oligochètes)		
Nombre moyen d'espèces/relevé :		NSPS
Nombre total d'espèces/relevé :		NSPT
log ₁₀ des effectifs/0,1 m ² (valeur moyenne) :		EFPE

4 - RÉSULTATS

4.1 Résultats de l'analyse en composantes principales (ACPN)

Les deux premières composantes principales expliquent 80 % de la variance totale. La première (F1 = 45,7 %) est corrélée négativement avec les variables représentatives de la charge organique de la fraction particulaire des sédiments (carbone organique, azote Kjeldahl, phosphore total, CARB, NTKJ, PHOS, *tableau 3A*), ainsi qu'avec les sels ammoniacaux de l'eau interstitielle (NH4E). Ces variables s'opposent au carbone minéral de la fraction solide (carbonates, CACO) et de l'eau interstitielle (bicarbonates, HCO3, *tableau 3A*).

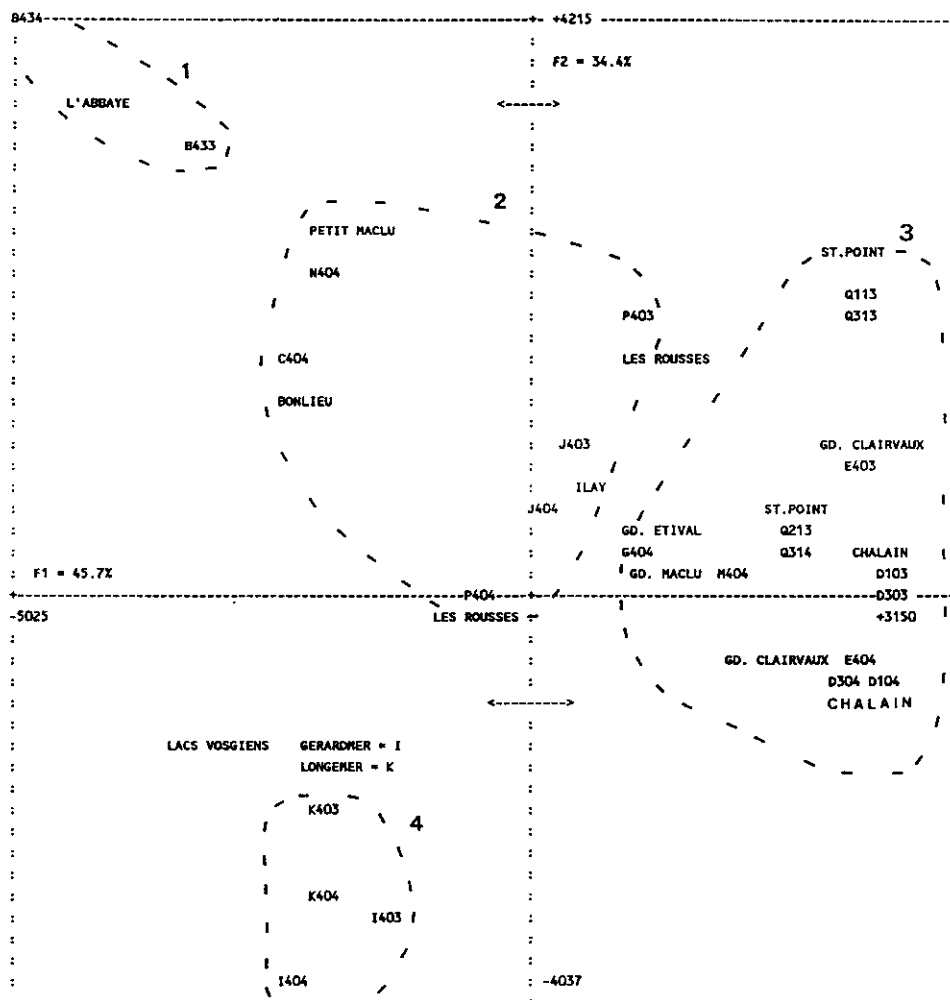


Figure 1 Position des stations d'échantillonnage dans le premier plan de l'ACP (facteurs F1, F2).

Plots of the sampling stations in the first plane of the PCA (factors F1, F2).

La deuxième composante principale (34,4 % de la variance totale) associe le phosphore total particulaire et dissous (PHOS, PO₄E) au pourcentage de particules fines du sédiment (GRAN), ces variables s'opposant aux teneurs en sels ammoniacaux, en nitrates et en carbone minéral des eaux interstitielles (NH₄E, NO₃E, HCO₃, *tableau 3A*).

La troisième composante principale (7,6 % de la variance totale) associe le pourcentage de particules fines (GRAN) et le rapport C/N (CDIN). Les composantes 4,5 et 6 ne présentent pas de signification bien tranchée, et les variables sont peu corrélées avec celles-ci.

L'examen de la carte factorielle des stations sur le plan F1-F2 (fig. 1) permet d'individualiser quatre groupes de relevés lacustres, dont l'existence est confirmée par une classification ascendante hiérarchique (CAH) sur les trois premiers facteurs de l'ACPN.

Le premier groupe comprend les sédiments les plus chargés en matières organiques (2 stations sur le lac de l'Abbaye), le deuxième groupe englobe des lacs moyennement chargés, le troisième est représenté par les sédiments lacustres les plus riches en carbonates et les plus pauvres en carbone organique, azote et phosphore (Chalain, Saint-Point, etc.). Le quatrième groupe individualise les sédiments des lacs vosgiens, caractérisés par leurs fortes teneurs en phosphore, leurs faibles concentrations en nitrates et des déficits en calcium.

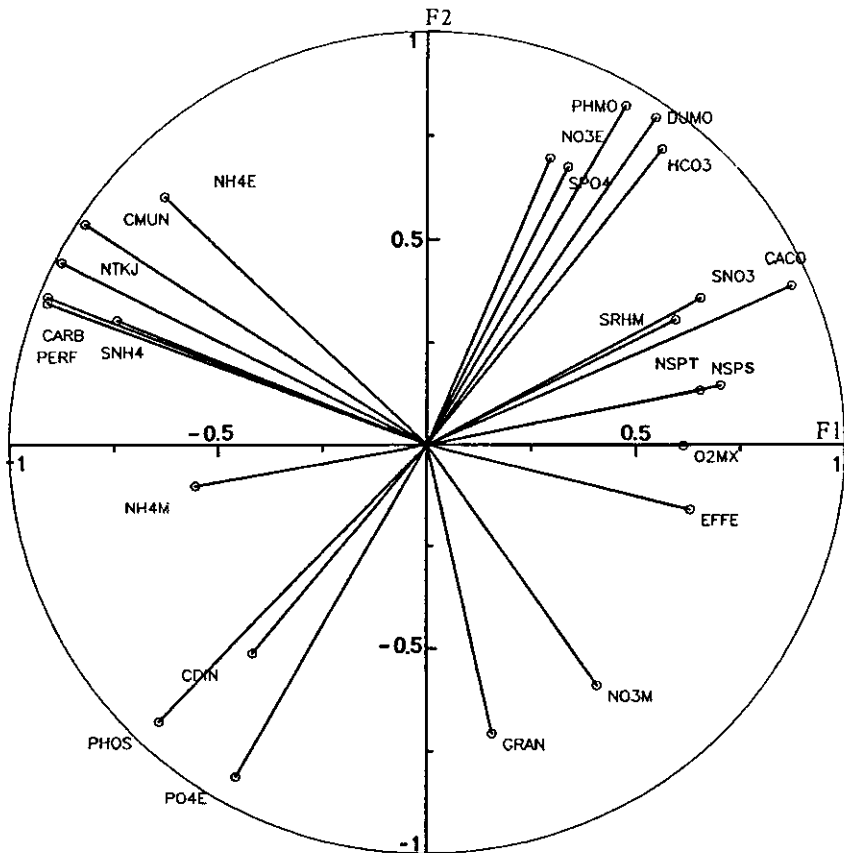


Figure 2 Cercle des corrélations entre les deux premiers facteurs (F1, F2) de l'ACP et les variables (actives et supplémentaires) ; pour la signification des codes des variables, se reporter au tableau 2.

Correlations of the first two factors (F1, F2) of the PCA with active and supplementary variables : correlations circle ; codes are explained in table 2.

Les deux premiers facteurs expriment incontestablement un facteur trophique qui transparait également au niveau des variables physico-chimiques des eaux (*tableau 3A et fig. 2*). Les variables qui décrivent un état de charge organique des eaux (sels ammoniacaux des eaux profondes sur verticale, NH_4M , ou des eaux de contact, SNH_4) se projettent négativement sur le premier facteur, celles qui décrivent la minéralité des eaux (dureté, pH, DUMO, PHMO) ou un degré d'oxydation de celles-ci (rH, SRHM, nitrates, SNO_3) suivent la même direction que le pourcentage de carbonate de calcium (CACO). On notera enfin que seules les teneurs maximales en oxygène dissous des eaux profondes se montrent corrélées positivement avec le premier facteur (*tableau 3A*). En effet, les lacs les plus pauvres en matières organiques (Chalain, Saint-Point, Grand Clairvaux), peuvent également subir des déficits accusés en oxygène dissous, mais sembleraient plus aptes que les autres plans d'eau à reconstituer leur stock de gaz dissous.

4.2 Variables biologiques globales

Les corrélations linéaires les plus fortes entre les variables biologiques et les facteurs ne se relèvent que sur le facteur F1 (*fig. 2 et tableau 3A*). Le deuxième facteur F2, lié essentiellement à une opposition entre les lacs vosgiens (bassin cristallin) et les lacs jurassiens (bassin calcaire), ne s'avère pas corrélé avec la distribution des variables biologiques. Le premier facteur apparaît en conséquence essentiel, les variables globales telles que le nombre total (NSPT) et moyen d'espèces (NSPS) ainsi que les effectifs moyens (en $\log_{10} \text{N}/0,1 \text{ m}^2$, EFFE) étant corrélés positivement avec F1 (*fig. 2*).

La richesse spécifique (NSPT, NSPS) se projette en direction des carbonates de la fraction solide des sédiments (CACO) et de l'oxygène dissous maximal des eaux profondes (O_2MX), les effectifs (EFFE) s'opposent à la charge organique des eaux et des sédiments. Les oligochètes sont favorisés, dans ce jeu de données, par des sédiments (et des eaux) riches en carbonates et pauvres en matières organiques.

4.3 Analyse complémentaire

Le même type d'analyse (ACPN) a été utilisé en retirant les individus les plus contributifs au premier facteur (point B434 du lac de l'Abbaye) et au deuxième facteur (lacs vosgiens). La signification du premier facteur, qui représente 49 % de la variance totale, reste inchangée (opposition charge organique-carbonates, *tableau 3B*), les lacs du Jura les plus chargés en matières organiques s'avérant les plus déficitaires en calcium (Petit-Maclu, Bonlieu). On observe de même que la projection des variables biologiques globales suit les mêmes tendances que dans l'ACPN précédente, et ces variables s'opposent à toutes les variables décrivant une charge organique en carbone, azote et phosphore.

4.4 Mise au point d'un indice numérique

Les deux analyses en composantes principales ont mis en évidence un premier facteur prépondérant, commun à tous les plans d'eau, qu'ils soient

originaires de bassins calcaires ou cristallins, facteur corrélé avec les variables biologiques. En conséquence, un indice lacustre décrivant de façon optimale la structure physico-chimique a été mis au point à partir des corrélations relevées sur le facteur 1.

Tableau 3 Analyse en composantes principales normée : pourcentage de la variance expliquée par les deux premiers facteurs et coefficients de corrélation linéaire (R1, R2) des variables actives et supplémentaires avec les deux premiers facteurs ;

A : tous les lacs sont pris en considération ;

B : les lacs des Vosges et la zone profonde du lac de l'Abbaye n'ont pas été pris en considération.

Table 3 *Standardized principal components analysis : percentage of the variance explained by the first two factors (F1, F2) and linear correlation coefficients (R1, R2) of active and supplementary variables with the first two factors.*

A : all lakes are taken into account ;

B : the deepest area of lake Abbaye and lakes from Vosges mountains were removed from the data set.

% Variance	A		B	
	Facteur 1 45,7 %	Facteur 2 34,4 %	Facteur 1 49,7 %	Facteur 2 15,8 %
Variables actives	R1	R2	R1	R2
GRAN	0,156	-0,708	0,137	0,451
PERF	-0,910	0,346	-0,967	0,181
CARB	-0,910	0,361	-0,972	0,160
NTKJ	-0,877	0,445	-0,983	0,067
CDIN	-0,418	-0,512	-0,172	0,526
CMUN	-0,821	0,537	-0,975	-0,014
PHOS	-0,642	-0,677	-0,714	0,338
CACO	0,872	0,389	0,932	-0,132
HCO3	0,562	0,717	0,358	0,568
NH4E	-0,631	0,603	-0,741	-0,548
NO3E	0,294	0,695	0,228	0,604
PO4E	-0,458	-0,812	0,055	0,480
Variables supplémentaires	R1	R2	R1	R2
PHMO	0,475	0,821	0,310	-0,190
O2MI	0,044	-0,109	0,202	-0,237
O2MX	0,612	-0,002	0,516	-0,124
NH4M	-0,555	-0,102	-0,507	0,309
NO3M	0,407	-0,590	0,812	-0,082
PO4M	0,099	0,399	-0,267	0,669
DUMO	0,546	0,792	0,660	-0,139
SRHM	0,594	0,306	0,130	-0,034
SNH4	-0,745	0,305	-0,835	-0,183
SNO3	0,654	0,359	0,548	-0,667
SPO4	0,336	0,674	-0,065	0,574
EFFE	0,629	-0,159	0,856	-0,003
NSPS	0,701	0,146	0,634	-0,287
NSPT	0,653	0,134	0,564	-0,322

Dans la mesure où les stations d'échantillonnage lacustres peuvent être repérées par la valeur de leur coordonnée factorielle sur l'axe F1 (*tableau 4*), nous avons recherché les relations linéaires existant entre cette coordonnée factorielle (variable à expliquer COF1) et les variables biologiques présentant le coefficient de corrélation le plus élevé (*tableau 3A*), soit le nombre moyen d'espèces (NSPS) et le log₁₀ des effectifs moyens/0,1 m² (EFFE). La technique d'analyse utilisée fait appel au logiciel de régression multiple pas à pas ascendante de type « stepwise », et prend en compte les 24 stations d'échantillonnage.

On obtient après simplification l'équation suivante :

$$\text{COF1} = \text{NSPS} + 3 \text{ EFFE}, (r = 0,76)$$

L'indice lacustre suivant peut alors être défini :

$$\text{EOLA} = \text{NSPS} + 3 \text{ EFFE}$$

Tableau 4 Valeurs de la première coordonnée factorielle (COF1) des stations d'échantillonnage lacustres et variables biologiques oligochètes ; EFFE : log₁₀ des effectifs moyens/0,1 m² ; NSPS, NSPT : nombre moyen et total d'espèces ; EOLA : indice oligochètes.

Table 4 Values of the co-ordinates (COF1) of sampling stations on the first factor of the PCA ; values of oligochaeta variables ; EFFE : log₁₀ of mean number of specimens/0.1 m² ; NSPS, NSPT : mean and total numbers of species ; EOLA : Oligochaeta index.

Lacs	Codes	COF1	EFFE	NSPS	NSPT	EOLA
Abbaye	B434	-5 025	1,6	1,0	1	5,8
Abbaye	B433	-3 265	1,0	2,0	2	5,0
Gerardmer	I404	-2 368	2,9	1,0	1	9,7
Bonlieu	C404	-2 343	1,4	0,7	1	4,9
Longemer	K404	-2 215	2,5	1,0	1	8,5
Petit Maclu	N404	-2 056	1,3	1,0	1	4,9
Longemer	K403	-2 041	2,3	1,0	1	7,9
Gerardmer	I403	-1 736	0,6	1,0	1	2,8
Rousses	P404	-440	2,3	2,0	3	8,9
Ilay	J404	-94	1,5	1,3	2	5,8
Ilay	J403	165	2,5	3,0	5	10,5
Rousses	P403	837	2,4	3,0	3	10,2
Grand Etival	G404	906	2,5	2,7	4	10,2
Grand Maclu	M404	1 607	1,4	1,0	1	5,2
St-Point	Q213	2 117	2,6	4,0	4	11,8
St-Point	Q314	2 125	2,7	3,0	3	11,1
G. Clairvaux	E404	2 631	3,0	3,7	4	12,7
Chalain	D104	2 655	2,7	3,0	4	11,1
Chalain	D304	2 655	2,7	3,5	4	11,6
St-Point	Q313	2 688	3,1	4,0	4	13,3
St-Point	Q113	2 688	2,9	3,0	3	11,7
G. Clairvaux	E403	2 700	3,0	5,0	8	14,0
Chalain	D303	3 151	2,9	8,3	12	17,0
Chalain	D103	3 151	3,2	10,5	14	20,1

Tableau 5 Variables physico-chimiques des sédiments lacustres ; pour la légende des codes des variables, se reporter au tableau 2.

Table 5 Physico-chemical variables of the sediments ; see table 2 for the legend of the variables.

		GRAN	PERF	CARB	NTKJ	CDIN	CMUN	PHOS	CACO	HCO3	NH4E	NO3E	PO4E
		%	%	%	%			%	%	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
G. Clairv.	E403	67	5,7	2,0	0,20	10,0	0,4	0,02	85	248	6,32	0,22	0,06
G. Clairv.	E404	89	5,8	2,2	0,18	12,2	0,4	0,03	85	201	1,94	0,40	0,09
Rousses	P403	69	20,5	9,7	0,78	12,4	7,6	0,09	57	234	1,94	1,15	0,52
Rousses	P404	96	28,0	12,8	0,98	13,1	12,5	0,13	53	230	1,50	0,26	0,46
Abbaye	B433	30	33,8	17,3	1,65	10,5	28,5	0,15	21	132	16,77	0,22	0,24
Abbaye	B434	33	45,9	24,2	2,10	11,5	50,8	0,21	25	181	17,90	0,71	0,55
P. Maclu	N404	91	34,0	17,4	1,58	11,0	27,5	0,23	31	252	6,80	0,40	0,05
G. Maclu	M404	99	12,5	6,1	0,55	11,1	3,4	0,14	74	230	4,45	0,40	0,05
Ilay	J403	91	23,0	11,8	1,06	11,1	12,5	0,11	63	204	2,59	0,40	0,08
Ilay	J404	92	21,2	10,6	0,86	12,3	9,1	0,22	60	236	7,86	0,40	0,28
Chalain	D303	97	4,6	1,6	0,16	10,0	0,3	0,06	86	236	1,65	0,40	0,07
Chalain	D103	97	4,6	1,6	0,16	10,0	0,3	0,06	86	236	1,65	0,40	0,07
Chalain	D104	98	5,4	2,0	0,17	11,8	0,3	0,09	80	237	2,60	0,40	0,10
Chalain	D304	98	5,4	2,0	0,17	11,8	0,3	0,09	80	237	2,60	0,40	0,10
St-Point	Q313	49	8,4	3,9	0,45	8,7	1,8	0,09	79	268	1,42	0,62	0,31
St-Point	Q113	49	8,4	3,9	0,45	8,7	1,8	0,09	79	268	1,42	0,62	0,31
St-Point	Q213	61	9,5	4,2	0,38	11,1	1,6	0,11	69	244	0,26	0,49	0,55
St-Point	Q314	78	10,1	4,3	0,39	11,0	1,7	0,14	69	234	0,77	0,62	0,40
Bonlieu	C404	94	33,0	17,3	1,49	11,6	25,8	0,31	13	260	7,15	0,40	0,13
G. Etival	G404	94	16,0	6,9	0,74	9,3	5,1	0,27	33	249	3,17	0,40	0,03
Gerardmer	I403	100	18,0	8,2	0,70	11,7	5,7	0,53	1	30	2,30	0,00	3,20
Gerardmer	I404	100	21,0	9,6	0,70	13,7	6,7	0,62	1	30	2,70	0,00	2,90
Longemer	K403	100	20,0	11,1	0,90	12,3	10,0	0,44	1	30	2,20	0,00	2,40
Longemer	K404	100	22,0	10,7	0,80	13,4	8,6	0,40	1	30	2,30	0,00	3,20

Le nombre moyen d'espèces (NSPS) a été retenu de préférence au nombre total d'espèces (NSPT), très lié au nombre de campagnes d'échantillonnage sur chaque lac. De plus, dans la mesure où seule la présence des différentes espèces (et non leur pourcentage) est nécessaire à l'estimation de l'indice EOLA, celui-ci peut être calculé à partir de prélèvements ne reposant pas sur un cycle annuel complet.

5 - DISCUSSION

La première question qui se pose concerne la signification fonctionnelle du facteur trophique F1, défini par les ACPN et, en particulier, la signification de l'antagonisme entre les variables actives représentatives d'une part de la charge organique des sédiments, d'autre part de leurs teneurs en carbonates.

Tableau 6 Variables physico-chimiques des eaux ; pour la légende des codes des variables, se reporter au tableau 2.

Table 6 *Physico-chemical variables of the waters ; see table 2 for the legend of the variables*

	PHMO u.pH	O2MI mg/l	O2MX mg/l	NH4M mg/l	NO3M mg/l	PO4M mg/l	DUMO mg/l	SRHM u. Rh	SNH4 mg/l	SNO3 mg/l	SPO4 mg/l
E403	7,9	7,8	12,8	0,04	1,00	0,02	76	24,7	0,09	3,77	0,09
E404	7,6	0,0	12,8	0,30	0,70	0,02	80	18,5	0,05	2,20	0,06
P403	8,0	4,8	09,9	0,08	0,30	0,11	49	23,5	0,03	0,75	0,37
P404	7,9	0,1	09,7	0,27	0,40	0,10	51	24,3	0,05	0,53	0,34
B433	7,9	3,6	09,2	0,06	0,20	0,02	47	22,7	0,84	2,12	0,06
B434	7,7	1,8	08,5	0,31	0,40	0,02	49	16,3	1,10	0,70	0,06
N404	7,5	3,0	10,0	0,20	0,50	0,02	58	30,0	0,54	0,80	0,05
M404	7,6	4,0	10,0	0,28	0,90	0,02	56	26,0	0,14	0,90	0,05
J403	7,8	5,1	11,0	0,15	0,40	0,02	47	29,0	0,27	0,65	0,05
J404	7,6	2,1	09,5	0,40	0,30	0,02	48	24,5	0,50	0,70	0,05
D303	7,8	3,2	11,0	0,04	1,60	0,02	64	30,5	0,03	2,10	0,05
D103	7,8	3,2	11,0	0,04	1,60	0,02	64	30,5	0,03	2,10	0,05
D104	7,6	2,4	10,6	0,10	1,20	0,03	64	27,0	0,06	1,40	0,05
D304	7,6	2,4	10,6	0,10	1,20	0,03	64	27,0	0,06	1,40	0,05
Q313	8,2	5,9	12,0	0,02	1,50	0,02	74	28,3	0,05	1,78	0,06
Q113	8,0	4,4	11,8	0,02	1,60	0,02	74	28,3	0,05	1,78	0,06
Q213	8,0	4,0	11,8	0,02	2,10	0,02	74	24,5	0,05	2,22	0,06
Q314	8,0	3,2	11,2	0,03	2,20	0,03	74	25,9	0,05	1,80	0,21
C404	7,3	0,0	11,2	1,64	0,20	0,11	60	19,9	1,26	0,40	0,13
G404	7,8	4,2	13,7	0,06	0,80	0,02	59	32,3	0,05	1,20	0,06
I403	6,6	6,6	10,6	0,12	1,30	0,02	07	18,5	0,25	0,40	0,00
I404	6,4	3,3	07,5	0,19	0,30	0,00	07	18,5	0,25	0,40	0,00
K403	6,9	8,8	12,0	0,17	2,20	0,00	08	18,5	0,07	0,64	0,00
K404	6,5	2,4	09,9	0,31	1,80	0,00	08	18,5	0,07	0,64	0,00

Cet antagonisme peut s'interpréter dans un triple contexte :

– *Le contexte géochimique*, solidaire de la nature géologique des roches du bassin versant ainsi que de l'importance des apports sédimentaires clastiques en provenance des divers affluents, lesquels conditionnent l'importance et la nature de la phase minérale des sols lacustres et le mode de répartition spatiale des faciès géochimiques au sein des sédiments.

– *Le contexte biochimique*, solidaire de la nature et de l'importance des flux particulaires autochtones, participant notamment à la formation de la « craie lacustre ».

Une origine mixte, à la fois allochtone et autochtone, caractérise certains faciès géochimiques, notamment les carbonates. Celle-ci a pu être mise à profit, en particulier dans le cadre des lacs subalpins et jurassiens, pour l'élaboration dans un but conceptuel et méthodologique d'une représentation cartographique en relation avec les principales tendances fonctionnelles de l'écosystème lacustre (JAQUET *et al.*, 1982, VERNEAUX *et al.*, 1988). L'effet dilutif à l'encontre du carbone organique de la fraction particulière des sédiments,

dû à la surcharge en carbone minéral d'origine mixte ou d'origine autochtone, peut se concevoir, pour sa part, comme l'une des causes partielles de l'antagonisme entre COP et carbonates des sédiments.

— *Le contexte pédologique.* Les carbonates sont considérés comme des agents naturels qui conditionnent, selon des modalités diverses, aussi bien le turnover de la matière organique fraîche (MOF) que celui de la matière organique humifiée. Le taux d'incorporation de la fraction minérale à la fraction organique, favorisé par la bioturbation (GOLTERMAN *et al.*, 1983), constitue un élément favorable à la minéralisation primaire de la MOF, principalement au sein des sédiments carbonatés. On peut ainsi considérer que le facteur F1 exprime un potentiel de minéralisation et un degré de capacité métabolique des sédiments à assimiler la matière organique. Cette hypothèse est en accord avec les travaux récents d'ANDERSON *et al.*, 1986, selon lesquels le taux de production au sein des sédiments en carbonate total (exprimé sous la forme de CO_2), conditionné lui-même par le taux de renouvellement de CaCO_3 à l'interface eau-sédiment, se révèle une mesure fiable de la minéralisation des sédiments et de la respiration benthique. Le potentiel métabolique ainsi défini peut être extrapolé à la masse d'eau lacustre, dans la mesure où les variables physico-chimiques des eaux, aussi bien des eaux surnageantes que des eaux interstitielles, ne contredisent pas les structures définies par les variables propres aux sédiments. Ainsi, sur les 2 premières composantes principales, toutes les variables décrivant un état de charge et (ou) de pollution en C., N., P., présentent un antagonisme avec l'ensemble des variables décrivant soit la minéralité du milieu (dureté, pH des eaux surnageantes, bicarbonates de l'eau interstitielle, carbonates de la fraction particulaire des sédiments), soit son état d'oxydation (potentiel redox des eaux de contact, nitrates des eaux surnageantes, valeurs maximales de l'oxygène dissous).

Il est donc plausible de considérer, dans le présent jeu de données, l'opposition entre lacs pauvres en carbonates et lacs riches en carbonates comme la traduction d'une capacité des eaux et des sédiments à métaboliser les matières organiques d'origines diverses, sans exclure les rejets polluants, capacité décrite par l'indice oligochètes EOLA.

L'impact de rejets polluants peut constituer une cause de réduction du potentiel métabolique lacustre. Par exemple, le faible potentiel biologique du Petit Maclu (EOLA = 4,9) et celui de l'Abbaye (EOLA = 5, *tableau 4*) n'ont pas les mêmes causes. Dans le premier cas, il s'agit d'un potentiel naturellement bas, le plan d'eau ne recevant apparemment pas de rejets allochtones (SRAE, 1985). Dans le cas de l'Abbaye, il s'agit sans aucune ambiguïté du résultat de l'impact de rejets polluants (SRAE, 1982). L'indice oligochètes EOLA peut être considéré comme l'expression d'une potentialité biologique (au sens absolu du terme), que les rejets organiques sont susceptibles d'altérer. Dans un travail précédent (LAFONT et JUGET, 1985), nous avons d'ailleurs signalé que l'impact des activités humaines pouvait interférer avec des facteurs défavorables aux oligochètes, liés à la composition géo-chimique et à la nature pédologique des sédiments. Cette remarque se trouve renforcée par les données analysées ici, les facteurs défavorables étant constitués par l'excès de matières organiques et la plus ou moins grande capacité d'un lac à les dégrader, capacité liée aux teneurs en carbonates.

Nos résultats ne concernent que 24 stations appartenant à 12 lacs, et toute généralisation hâtive serait dangereuse. Cependant, l'indice EOLA semble donner des résultats intéressants sur de nombreux systèmes lacustres européens (LAFONT, 1989). De plus, la démarche que nous avons développée prouve qu'en limnologie lacustre, il est possible de déboucher sur des typologies fonctionnelles ne se limitant pas à la seule prise en considération de la masse d'eau. Des propositions en ce sens seront effectuées dans un prochain travail, où la valeur descriptive des espèces d'oligochètes sera abordée conjointement à la prise en considération de l'indice EOLA.

6 - REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement Monsieur F. TROCHERIE pour son aide en informatique et ses conseils en analyse de données, Monsieur LE PIMPEC (laboratoire de chimie du CEMAGREF Lyon), Monsieur MASSON (SRAE Franche-Comté) pour la communication de données concernant la physico-chimie des eaux et Madame M. TAILLOLE qui a assuré la dactylographie du manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON L.G., HALL P.O.J., IVERFELDT A., RUTGERS VAN DER LOEFF M.M., SUNDBY B., WESTERLUND S.F.G., 1986. Benthic respiration measured by total carbonate production. *Limnol. Oceanogr.*, 31, (2), 319-329.
- BAZZANTI M., LAFONT M., 1985. Variabilité des soies spermathecales de *Potamothrix heuscheri* (Bretscher) (Oligochaeta, Tubificidae) dans le lac de Nemi et remarques sur la relation entre cette espèce et le degré de trophie des lacs. *Annls Limnol.*, 21 (2), 107-115.
- GOLTERMAN H.L., SLY P.G., THOMAS R.L., 1983. Study of the relationship between water quality and sediment transport. *Technical papers in Hydrobiology, UNESCO*, 231 p.
- GRIGELIS A., 1984. Ecology and importance of Oligochaeta in the biocenosis of zoobenthos in lakes of the National Park of the Lithuanian SSR. *Hydrobiologia*, 115, 211-214.
- HOWMILLER R.P., SCOTT M.A., 1977. An environmental index based on relative abundance of Oligochaeta species. *JWPCF*, 49 (5), 809-815.
- JAQUET J.M., DAVAUD E., RAPPIN F., VERNET J.P., 1982. Basic concepts and associated statistical methodology in the geochemical study of lake sediments. *Hydrobiologia*, 91, 139-146.
- JUGET J., 1984. Oligochaeta of the epigeal and underground fauna of the alluvial plain of the French Upper Rhône (biotypological trial). *Hydrobiologia*, 115, 175-182.
- JUGET J., GIANI N., 1974. Répartition des Oligochètes lacustres du massif de Néouvielle (Hautes-Pyrénées) avec la description de *Pelosclex pyrenaicus*, n. sp. *Annls Limnol.* 10, 33-53.

- JUGET J., LAFONT M., 1982. L'échantillonnage de la faune benthique : revue des techniques de prélèvement, d'extraction et de tri ; application aux Oligochètes. *Sciences de l'eau*, 1 (3), 243-254.
- LAFONT M., 1982. Les Oligochètes des lacs de Gérardmer et Longemer (Département des Vosges, France). *Sciences de l'eau*, 1 (1), 21-30.
- LAFONT M., 1989. Contribution à la gestion des eaux continentales : utilisation des oligochètes comme descripteurs de l'état biologique et du degré de pollution des eaux et des sédiments. *Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences, UCBL Lyon I*, 311 p. + annexes, 92 p.
- LAFONT M., JUGET J., 1981. Les Oligochètes de quelques lacs jurassiens et leur utilisation pour apprécier l'état biologique des sédiments profonds. *Ann. Scient. Univ. Franche-Comté, B.A. 4^e série*, (2), 47-57.
- LAFONT M., JUGET J., 1985. Les Oligochètes de quelques lacs français : propositions en vue de leur utilisation pratique pour apprécier l'état biologique des sédiments profonds. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22, 3019-3023.
- LANG C., 1989. Eutrophication of Lake Neuchâtel indicated by the oligochaete communities. *Hydrobiologia*, 174, 57-65.
- MILBRINK G., 1980. Oligochaete communities in pollution biology : the European situation with special reference to lakes in Scandinavia. In *Aquatic Oligochaete Biology*, R.O. Brinkhurst & D.G. Cook (eds); *Plenum Press, N.Y. & London*, 433-455.
- MILBRINK G., 1983. An improved environmental index based on the relative abundance of Oligochaete species. *Hydrobiologia*, 102, 89-97.
- MOUTHON J., 1986. Principes généraux pour une méthode d'appréciation de la qualité globale des sédiments lacustres à l'aide d'une analyse simplifiée des malacocénoses. *Annls. Limnol.*, 22 (3), 209-217.
- MOUTHON J., 1990. Importance des conditions climatiques dans la différenciation des peuplements malacologiques de lacs européens. *Arch. Hydrobiol.*, 118 (3), 353-370.
- PROBST L., 1987. Sublittoral and profundal Oligochaeta fauna of the Lake Constance (Bodensee-Obersee). *Hydrobiologia*, 155, 277-282.
- ROFES G., SAVARY M., 1981. Description d'un nouveau modèle de carottier pour sédiments fins. *Bull. franç. Pisc.*, 283, 102-113.
- SÄRKKÄ J., 1987. The occurrence of oligochaetes in lake chains receiving pulp mill waste and their relation to eutrophication on the trophic scale. *Hydrobiologia*, 155, 259-266.
- SÄRKKÄ J., 1989. Meiobenthic nauidid and aelosomatid oligochaetes from the profundal zone, and relations of species to eutrophication. *Hydrobiologia*, 180, 185-190.
- SRAE, 1982. Le lac de l'Abbaye (massif du Jura) ; étude écologique et biologique. *Diagnose. Rapport SRAE Franche-Comté*, 61 p. + annexes.
- SRAE, 1985. Les lacs Maclu (Jura). Etude écologique. *Rapport SRAE Franche-Comté*, 104 p. + annexes.
- UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE, 1987. Recherches en écologie. Typologie et diagnose des lacs. Les sédiments des lacs du Jura. *Rapport Centre d'Etude des eaux continentales de l'Université Franche-Comté, 2^e partie, composantes chimiques*, 151 p.
- VERNEAUX J., GUYARD A., JOLY D., VIDONNE A., 1988. Etude physico-chimique des sédiments du lac de Saint-Point (massif du Jura) : cartographie thématique. *Annls. Limnol.* 24 (1), 15-29.