

## Article

---

« Stabilité d'une structure spatiale et compromis d'une analyse statistique multi-tableaux : application à la physico-chimie d'un lac réservoir »

M. Centofanti, D. Chessel et S. Doledec

*Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 2, n° 1, 1989, p. 71-93.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/705024ar>

DOI: 10.7202/705024ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

---

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

---

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : [info@erudit.org](mailto:info@erudit.org)

# Stabilité d'une structure spatiale et compromis d'une analyse statistique multi-tableaux : application à la physico-chimie d'un lac réservoir

Stability of a spatial structure and compromise  
in a multiway matrices statistical analysis :  
application to physical and chemical properties  
in a reservoir lake

---

M. CENTOFANTI, D. CHESSEL, S. DOLEDEC (1)

---

## RÉSUMÉ

10 paramètres physico-chimiques sont mesurés en surface dans 10 stations à 12 dates sur le lac réservoir de la Sorme (Saône-et-Loire). L'article montre comment une analyse multi-tableaux peut caractériser la structure spatiale et préciser sa stabilité. Les notions d'interstructure et de compromis sont accessibles par une procédure simple et efficace.

Mots clés : *statistique multi-tableaux, spatio-temporel, interstructure, compromis, physico-chimie, lac réservoir, limnologie.*

## SUMMARY

This paper is based on the observation that three-dimensional data matrices (sites x times x variables) often used in limnological investigations require statistical analyses fitted to experimental objectives. Many apparently different statistical tools (3-mode PCA of TUCKER, 1964 ; KROONENBERG, 1983 ; projection of variables WILLIAMS and STEPHENSON, 1973 ; DOLEDEC and CHESSEL, 1987) may be useful to clarify limnological problems such as : 1) the temporal variability of a pattern (elimination of spatial heterogeneity) : 2) the spatial structure of a pattern (elimination of temporal effects,

---

(1) Ecologie des eaux douces, UA 367, Université Lyon 1,  
69622 Villeurbanne Cédex.

mapping of an average situation) ; 3) the temporal variability of lake stratification (stability, modification or inversion) ; 4) the spatial structure of temporal variability, and 5) the between variables typology of a spatial and temporal structure. Our methodological approach allowed us to assess the temporal stability of the spatial structure of the lake waters (question 3) using a multitable analysis known as triadic analysis (THIOULOUSE and CHESSEL, 1987).

As part of the limnological study of a reservoir lake (Sorme reservoir lake, Saône-et-Loire, France) 10 commonly used physical and chemical variables were studied from July 1980 to October 1981. During this period, 12 water samples were taken near the surface at each of the 10 stations scattered along the Sorme lake (see figure 1). Main morphometric features of the Sorme lake are : 1) a surface area equal to 230 ha, 2) a 25 km long perimeter and 3) a volume of  $9.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  with a maximum depth of 13 meters upstream of the dam and an average depth of about 4 meters. Seasonal tidal range was only a few meters.

Only 2 of the 3 concepts of triadic analysis stated by THIOULOUSE and CHESSEL, 1987 are developed here : 1) for each of the 12 tables (stations x variables) coming from the 12 sampling dates, data are first centered (elimination of mean) and standardized (division by standard deviation) (see figure 2). The resulting table Y called interstructure matrix, i.e. interstructure between each of the sampling dates matrix, is organized to have sampling dates as columns and the ten physical and chemical variables at each station successively as lines. Principal Component Analysis (PCA on the variance-covariance matrix) is then applied to the interstructure matrix. In our case it is a one-dimensional matrix, i.e. according to physical and chemical variables, there is only one spatial structure common to each sampling date (figure 3 and 2) compromise matrix are associated with the successive PCA factors of the interstructure (figure 4). According to the previous remark, only the first factor is considered. Data are reorganized to have physical and chemical variables as columns, and stations as lines. This last table defines a compromise matrix labelled Z. The mapping of the numerical values of matrix Z renders a ten-dimensional description of the permanent spatial structure (figure 5). To summarize the multivariate description, matrix Z is processed with a PCA on the variance-covariance matrix producing a three-dimensional compromise (figure 6).

The interpretation of the compromise table by mapping the factorial scores of the PCA leads to a functional scheme of the reservoir lake waters distinguishing five sectors (see figure 7) as a function of water depth, influence of tidal range, influence of tributaries and of the Sorme River. 3 stations are periodically isolated from the reservoir and produce 3 sectors with lower pH and temperature values and higher concentrations in ammonia and sulphate according to the influence of tributaries. The 4th sector is associated with the former submerged valley, i.e. main channel of the Sorme river prior to the dam closure, and demonstrated a ionic gradient concerning mainly nitrate and chloride concentrations. The 5th sector, opposed to the latter, consists in the deeper area of the Sorme lake which reveals rather homo-

geneous waters near the surface.

Key-words : *multiway matrices, statistical analysis, spatio-temporal, interstructure compromise, physical and chemical variables, reservoir lake, limnology*

---

## INTRODUCTION

---

L'analyse des données hydrobiologiques pose plusieurs types de problèmes. Les uns concernent toutes les disciplines de l'écologie (mesures de diversité, typologie de stations, relations espèces-milieu). L'approche typologique conduit en limnologie aux types d'eau (water type d'ESTRADA, 1975) ou aux types de référence (reference type de MARGALEF, 1975). Les autres sont spécifiques telles l'approche des indices biotiques ou des rythmes saisonniers. L'usage des données tridimensionnelles stations-dates-descripteurs (mésologiques ou faunistiques) est de règle dans l'étude de structures spatio-temporelles. Dans cette optique les variables physico-chimiques ont été utilisées dans tous les types de milieu stagnant, étang (VALLOD, 1984 ; BALVAY, 1984), lac de moyenne montagne (GAY, 1976) ou de haute montagne (CAPBLANCO et LAVILLE, 1968 ; CHACORNAC, 1986), lacs réservoirs (FEUILLADE et FEUILLADE, 1971 ; HANNAN *et al.*, 1979 ; GREGOIRE, 1981 ; DAUBA, 1981 ; WHALEN *et al.*, 1982) et grands lacs naturels (par exemple C.I.P.E.L., 1984 pour le lac Léman). Les points de mesures peuvent être répartis dans plusieurs sites, plusieurs stations d'un même site, plusieurs profondeurs ou former un plan d'échantillonnage complexe. C'est en hydrobiologie marine qu'a été exprimée pour la première fois le besoin d'analyses de données écologiques appropriées aux mesures spatio-temporelles multidimensionnelles (WILLIAMS et STEPHENSON, 1973).

Si l'acquisition de données tridimensionnelles est commune en limnologie leur dépouillement statistique est un champ important de la statistique mathématique. Des ouvrages nombreux y sont entièrement consacrés au premier desquels on peut citer la synthèse de KROONENBERG, 1983 qui comporte plusieurs centaines de références. Les difficultés traditionnelles des relations inter-disciplinaires sont ici renforcées par une diversité considérable de méthodes statistiques qui renvoie à une diversité non moins considérable d'objectifs exprimés par les écologues. En phytoécologie la pratique des placettes permanentes conduit à la recherche d'une évolution simultanée de l'abondance d'un grand nombre d'espèces (AUSTIN, 1977 et 1981 ; GITTINS, 1981), alors que la paléoécologie traite de longues séries de cartes de répartition (WEBB, 1987). En milieu lotique, sur un gradient amont-aval on peut assister à une confusion saisons-stations (DAKKI, 1986) alors qu'en limnologie on pourra s'intéresser soit à la stabilité d'une structure spatiale (synthèse de plusieurs dates de mesures), soit à la déformation de cette structure voire à son inversion retournement de lacs). C'est ainsi à juste titre qu'ESCOUPIER, 1985 distingue cinq classes de problèmes d'analyses statistiques multi-tableaux.

Le but de cette note est de montrer comment il est possible d'apprécier la stabilité de la structure spatiale des paramètres physico-chimiques d'un lac réservoir à l'aide d'une analyse triadique. Une première partie décrit les résultats expérimentaux et la question posée. Une seconde partie précise l'approche méthodologique et la procédure utilisée. Les résultats obtenus sont enfin présentés et la discussion souligne l'interaction forte entre l'objectif poursuivi et la méthode utilisée.

---

## MATÉRIEL EXPÉRIMENTAL

---

### 1 - Position géographique

Le lac de la Sorme est un lac artificiel qui appartient au type *lac réservoir* (type générique "sur le cours d'une rivière", type morphologique "plat", BENEDETTI-CROUZET et DUSSART, 1979). Situé sur le territoire de la communauté urbaine de Montceau-les-Mines-Le Creusot (département de Saône-et-Loire), il a été mis en eau en 1973-1974.

Les lacs de ce type sont des écosystèmes mal connus, bien que largement répandus ; en effet, en France, il existe 239 retenues de plus de 10 ha, dont 87 de plus de 100 ha, soit une superficie totale de 40 523 ha, à comparer aux 45 338 ha des lacs naturels (TRAVADE *et al.*, 1985). La régulation hydraulique (écrêtement des crues et irrigation), la production hydro-électrique, la constitution de réserves d'eau, ou plusieurs de ces objectifs justifient leur création auxquels s'ajoute ultérieurement un intérêt touristique.

Les principales caractéristiques morphométriques du lac de la Sorme sont une superficie de 230 ha (à la côte nominale de 296,75 m) pour un périmètre d'environ 25 km, un volume de  $9.5.10^6$  m<sup>3</sup>, une profondeur maximale de 13 m environ, à l'amont de la digue, pour une profondeur moyenne faible (4 m environ), un marnage journalier faible (de l'ordre d'une dizaine de centimètres) pour un marnage saisonnier important (de l'ordre de quelques mètres), et un bassin versant d'une superficie de 62 km<sup>2</sup> de terrains cristallins (granit à biotite et à muscovite) drainé principalement par la rivière Sorme.

Sa création devait répondre à la demande croissante en eau aussi bien en eau potable qu'industrielle et jouer un rôle hydraulique par écrêtement des crues de la Bourbince et soutien des étiages de la Bourbince et de la Loire. Sa gestion se caractérise principalement par un suivi très ponctuel de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau (effectué par la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale, au niveau de la prise d'eau, près du barrage) et un contrôle saisonnier du niveau du lac.

### 2 - Mesures expérimentales

Lors d'une expertise appliquée à la gestion de l'eau, nous avons cherché à préciser le niveau d'hétérogénéité horizontale de la masse d'eau pour des descripteurs physico-chimiques. Dix stations d'échantillonnage ont été régulièrement réparties sur l'ensemble du plan d'eau. A douze

reprises, durant les années 1980 et 1981, en chacune des stations, une analyse de prélèvements d'eau a fourni les valeurs de dix paramètres classiquement utilisés. Les données numériques sont consignées dans le tableau 1. On obtient ainsi un cube de données (stations-dates-variables) dont l'analyse statistique permet d'extraire l'information associée à un objectif précis. Ce cube est représenté dans la figure 1 où l'on trouve les trois codes des objets définissant les trois marges du cube des données.

La cartographie des valeurs observées montre qu'il existe des différences entre les stations échantillonnées vis-à-vis de ces variables physico-chimiques (structure spatiale). A chaque date cette structure multidimensionnelle peut faire l'objet d'une *Analyse en Composantes Principales*, que nous noterons par la suite ACP, avec cartographie des coordonnées factorielles, pratique initiée par GOODALL, 1954, mise en oeuvre par GITINS, 1968, popularisée par GREEN, 1979 dont on peut trouver des illustrations dans CARREL *et al.*, 1986.

*L'approche de la stabilité temporelle d'une structure spatiale multidimensionnelle conduit alors aux questions suivantes : Existe-t-il une structure commune aux différentes dates ? Cette structure spatiale est-elle stable dans le temps ? S'exprime-t-elle en permanence ou au contraire dans des circonstances spécifiques ? Peut-on en faire un résumé en dimensions réduites ?*

---

## APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

---

### 1 - Cadre général

Depuis une dizaine d'années, les statisticiens proposent des méthodes d'analyse de cube de données réunies sous le terme d'*Analyses multi-tableaux* (FOUCART, 1983) dont les plus connues sont *STATIS* (Structure des Tableaux A Trois Indices de la Statistique. L'HERMIER DES PLANTES, 1976) et l'*ACP 3-modes* (synthèse théorique et pratique dans KROONENBERG, 1983). A notre connaissance, ces méthodes n'ont pas été utilisées en hydrobiologie, alors que les concepts qu'elles manipulent s'accordent directement avec les objectifs expérimentaux précités.

Nous sommes dans la situation 3 décrite par ESCOUPIER, 1980 qui distingue les cas :

- 1-K matrices de données quantitatives sur les mêmes individus ;
- 2-K matrices de données quantitatives sur les mêmes variables ;
- 3-K matrices de données quantitatives sur les mêmes individus et les mêmes variables ;
- 4-K variables qualitatives sur les mêmes individus ;
- 5-K tableaux de contingence sur les deux mêmes variables qualitatives.

Cette situation est répertoriée de même par GLACON, 1981 qui ajoute aux cas précédents les éléments :

- 6-K matrices de covariances entre mêmes variables ;
- 7-K matrices de similarités entre les mêmes individus.

Tableau 1.  
Table 1.

DATES	SITES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3/7/80	1	9.5	132	17.5	96	1	0	0.8	7	0.12	4.5
	2	9.1	122	17.4	107	1	0.005	0.8	3	0.05	4.3
	3	8.7	107	17.5	94	0.8	0.005	0.6	8	0.05	4.3
	4	8.9	106	17.4	95	0.7	0	0.5	5	0.35	4.5
	5	9.1	112	17.6	94	0.5	0	0.5	7	0.1	4.5
	6	8.9	111	17.2	94	0.5	0	0.5	9	0.08	5.3
	7	8.8	105	17.2	94	0.7	0	0.5	7	0.12	5.3
	8	8.9	104	17	94	1	0.005	0.8	6	0.3	5.3
	9	8.5	106	17	86	0.8	0	0.6	8	0.25	4.6
	10	9	74	16.9	152	1	0	0.8	5	0.25	3.7
11/8/80	1	7.7	115	22	90	1.4	0.005	0.9	7	0.05	5.2
	2	7.5	111	24	100	1.4	0.005	1.15	8	0.15	8
	3	8	111	25	83	0.8	0.01	0.8	7	0.05	5.6
	4	8	109	25	81	0.7	0.005	0.9	6	0	5.8
	5	7.5	106	25	80	0.6	0.005	0.6	7	0	6.3
	6	8	107	23	80	0.6	0.005	0.7	10	0.4	6.1
	7	7.9	117	23	80	0.8	0.005	0.9	17	0.3	6.2
	8	7.3	85	22	80	1.1	0.02	1.25	10	0.1	5.7
	9	7.7	108	23	81	0.8	0.005	0.85	15	0.15	6.3
	10	7.5	122	22.5	78	1.1	0.025	1.6	12	0.1	6.5
15/9/80	1	7.8	112	20	102	1.5	0.01	0.65	10	0	7.9
	2	7.7	135	22	112	1.4	0.005	0.7	11	0	8.3
	3	7.8	112	23	102	1	0	0.55	8	0.05	5.9
	4	7.7	107	20	98	1.1	0	0.55	9	0	6.3
	5	7.7	91	22	94	1	0.005	0.55	8	0	5.1
	6	7.8	105	22.5	98	1	0	0.5	8	0	4.8
	7	7.7	112	21	94	1.3	0.01	0.55	7	0	5.5
	8	7.4	150	24	94	1.4	0.005	0.5	10	0	5.8
	9	7.9	114	21	98	1.1	0.01	0.8	7	0	5.5
	10	7.6	138	21	98	1.4	0	0.5	10	0.1	6.2
21/10/80	1	7.9	120	10.3	93	2.1	0.005	0.8	12	0.4	6.8
	2	7	125	10.6	141	2.4	0	0.6	18	0.35	11
	3	7.6	122	12	87	1.4	0.005	0.5	8	0.15	7
	4	6.9	114	12.1	86	1.2	0.005	0.6	6	1	7
	5	6.9	112	11.9	91	1.1	0.01	0.65	8	0.05	7.1
	6	6.7	85	11.9	89	1	0.005	0.9	28	0.4	7.2
	7	6.3	88	11.7	93	1.1	0.01	0.8	8	0.1	7.1
	8	6.4	95	10.2	90	1	0.01	1	13	0.1	6.6
	9	7.5	108	12.3	92	1	0.005	0.7	11	0.3	7.4
	10	6.6	120	10.1	102	1.8	0.005	1.1	14	0.15	8.6
14/11/80	1	6.8	92	2.9	44	2.5	0.01	0.6	8	0.3	8.4
	2	7.2	83	2.6	88	2.4	0.015	0.95	14	0.8	13
	3	7	93	4.6	43	1.8	0.005	0.6	7	1.4	8
	4	7.2	89	4.9	43	1.5	0	0.7	7	0.6	7.6
	5	7	75	5	44	1.7	0	0.7	7	0.9	7.4
	6	7	91	5.1	44	1.5	0.01	0.7	6	0.35	8.2
	7	7.2	90	5	48	1.5	0.005	0.7	6	1.35	8
	8	6.9	81	5	50	1.6	0.015	1.5	10	0.4	8.3
	9	7.5	81	5	50	1.5	0.005	0.7	7	0.5	9
	10	7	93	3.4	54	1.8	0.015	1	10	1.4	9.8

(voir légende p. 78)  
(see p. 78)

<b>1981</b>											
<b>12/3/81</b>	1	7.2	91	10	92	2.5	0.005	0.5	8	0.2	5.5
	2	7.4	91	10	124	1.9	0.01	0.7	10	1.3	9.6
	3	7.5	93	11	94	2.8	0.01	0.4	8	0.6	7
	4	7.7	91	10	94	2.6	0.005	0.45	7	0.4	7.8
	5	7.8	89	9	94	2.2	0.01	0.4	7	0.4	7.1
	6	7.6	90	9.5	90	1.4	0.015	0.4	7	0.65	6.7
	7	7.6	91	10	90	0.9	0.01	0.4	7	0.3	8
	8	7.1	92	10.5	72	1.5	0.005	0.5	10	0.4	6.1
	9	7.5	89	9	90	1.1	0.005	0.4	8	0.4	8.4
	10	7.7	95	12	86	1.4	0.01	0.6	10	0.25	7.2
<b>13/4/81</b>	1	8	106	19.5	86	1.9	0.015	0.3	8	0.3	7.5
	2	9	145	20.5	112	1.5	0.015	0.5	9	0.2	9.9
	3	9.1	130	19.5	94	1.4	0.015	0.25	8	0.1	8.9
	4	9.2	130	21	94	1.4	0.015	0.15	7	0.2	9.2
	5	9.2	135	19	94	1.7	0.01	0.2	8	0.15	9.2
	6	9	135	20	96	1.5	0.015	0.3	7	0.15	9.2
	7	9	135	19	95	1.4	0.02	0.2	7	0.15	9.2
	8	8.5	135	19	91	1.2	0.02	0.4	9	0.2	8.5
	9	9	145	19	95	1.4	0.01	0.2	7	0.15	9.2
	10	8.2	130	18	99	1.2	0.01	0.3	7	0.2	8.2
<b>22/5/81</b>	1	8.7	114	17.5	85	0.5	0.02	0.5	10	0.2	7.6
	2	7.2	112	17	100	0.2	0.03	0.6	12	0.25	8.2
	3	7	109	18	89	1	0.02	0.55	8	0.1	7.4
	4	7	106	17.5	89	1.2	0.03	0.5	7	0.1	7.5
	5	7.1	105	17.5	85	1.4	0.02	0.45	10	0.15	7.2
	6	7.1	104	17	86	1.6	0.03	0.55	8	0.3	7.1
	7	6.9	103	17	87	1.4	0.02	0.4	8	0.05	6.8
	8	6.8	108	18	310	0.2	0.02	0.45	12	0.15	5.4
	9	7.1	100	17.5	95	1.4	0.02	0.5	12	0.15	6.5
	10	8.2	107	17.5	130	0.2	0.02	0.5	9	0.1	5.9
<b>27/7/81</b>	1	7.4	94	19.3	96	0.5	0.01	0.4	5	0.8	11.5
	2	7.3	92	18.9	108	0.6	0.005	0.4	7	0.5	14.5
	3	7.3	88	19.2	96	0.6	0.005	0.4	7	0.4	12.2
	4	7.4	94	19.2	95	0.6	0.01	0.3	6	0.3	11.5
	5	7.5	100	19.2	95	0.2	0.07	0.25	8	0.4	13
	6	7.5	91	19.1	95	0.6	0.01	0.2	5	0.4	14.5
	7	7.5	90	18.9	96	1	0.005	0.2	5	0.6	13.8
	8	7.6	108	19.4	86	0.2	0.005	0.35	8	0.2	12
	9	7.5	87	18.9	96	0.6	0.01	3	7	0.2	12.2
	10	7.6	89	18.7	95	0.5	0.01	0.35	8	0.25	11.8
<b>20/8/81</b>	1	8.5	107	21.9	96	0.6	0.01	0.2	8	0.1	6.8
	2	7.6	105	21.2	109	0.6	0.005	0.35	10	0.1	7.9
	3	9.1	118	22	96	1	0.005	0.2	5	0.1	7.2
	4	8.9	112	21.9	96	0.5	0	0.2	7	0.05	6.5
	5	7.5	89	21.3	96	0.6	0	0.2	7	0.05	9.7
	6	7.4	83	21.1	96	0.5	0.005	0.25	6	1.3	9.3
	7	8.9	107	21.6	96	0.6	0.01	0.35	6	0.85	11.1
	8	8.1	107	21.8	87	0.5	0.01	0.5	7	0.3	10.8
	9	8.5	95	21.5	96	0.2	0.01	0.2	6	0.18	11.8
	10	7.5	85	21.1	96	0.5	0.01	0.3	7	0.12	11.1



30/9/81	1	9.2	128	19.7	98	1	0.005	0.25	10	0.1	7.5
	2	8.7	130	18.7	105	1	0.01	0.35	12	0.12	9.7
	3	9.5	150	18.3	99	0.6	0	0.3	8	0.12	8.2
	4	9.3	135	18.3	99	1.2	0.01	0.25	9	0.1	8.3
	5	8.1	115	18.8	99	1.2	0.01	0.2	10	0.1	9.1
	6	7.7	115	17.1	99	1.2	0.01	0.5	6	0.1	9.3
	7	7.8	100	18.1	97	1.2	0.015	0.2	10	0.05	9.6
	8	8.3	108	15.5	85	1.2	0.01	0.4	8	0.1	8.4
	9	7.7	100	18.5	98	0.6	0.01	0.35	8	0.1	9.4
	10	8.8	110	15.3	94	2.4	0.015	0.4	10	0.15	8.7
19/10/81	1	7.5	92	13.6	101	2	0.01	0.3	8	0.25	6.2
	2	7.2	85	13	125	1.2	0.01	0.65	15	0.4	8.3
	3	7.6	100	13.7	100	2.2	0.01	0.25	8	0.2	6.6
	4	7.6	96	13.7	100	1.6	0.01	0.25	8	0.2	7.6
	5	7.4	94	13.7	100	1.2	0.01	0.25	6	0.2	8.2
	6	7.3	92	13.7	100	1.2	0.005	0.25	6	0.65	9.2
	7	7.2	90	13.8	98	0.8	0.005	0.25	6	0.2	8.6
	8	7	95	13.2	86	0.8	0.005	0.35	10	0.15	7.7
	9	7	82	13.7	98	1	0.01	0.2	7	0.2	8.4
	10	6.8	85	13	93	3.2	0.01	0.5	12	0.25	8.1

Tableau 1.- Données physico-chimiques retenues dans l'analyse.  
Les mesures (en colonnes) sont effectuées *in situ* avec une sonde multi-paramètres WTW AQUADATA modèle CB 570 :

- 1 - pH (unités pH) ;
- 2 - teneur en oxygène dissous (pourcentage de saturation) ;
- 3 - température instantanée de l'eau (t°C) ;
- 4 - conductivité (en  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  à 20°C) ;

ou analysées au laboratoire :

- 5 - azote nitrique (en ppm de  $\text{NO}_3^-$ , méthode HACH au Nitraver VI) ;
- 6 - azote nitreux (en ppm de  $\text{NO}_2^-$ , méthode HACH au Nitraver III) ;
- 7 - azote ammoniacal (en ppm de  $\text{NH}_4^+$ , méthode HACH au réactif de Nessler) ;
- 8 - sulfates (en ppm de  $\text{SO}_4^{--}$ , méthode HACH au Sulfaver IV) ;
- 9 - orthophosphates (en ppm de  $\text{PO}_4^{--}$ , méthode HACH au Phosver III) ;
- 10 - chlorures (en ppm de  $\text{Cl}^-$ , méthode HACH au nitrate mercurique).

Table 1.- Data matrix. Physical and chemical variables were analysed *in situ* with a WTW AQUADATA model CB 570 multiparameter :

- 1 - pH ;
- 2 - dissolved oxygen (%) ;
- 3 - instantaneous water temperature (°C) ;
- 4 - conductivity ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$  at 20 °C) ;

and back to laboratory :

- 5 - nitrate nitrogen ;
- 6 - nitrite nitrogen ;
- 7 - ammonia nitrogen ;
- 8 - sulphate ;
- 9 - phosphate ;
- 10 - chloride.

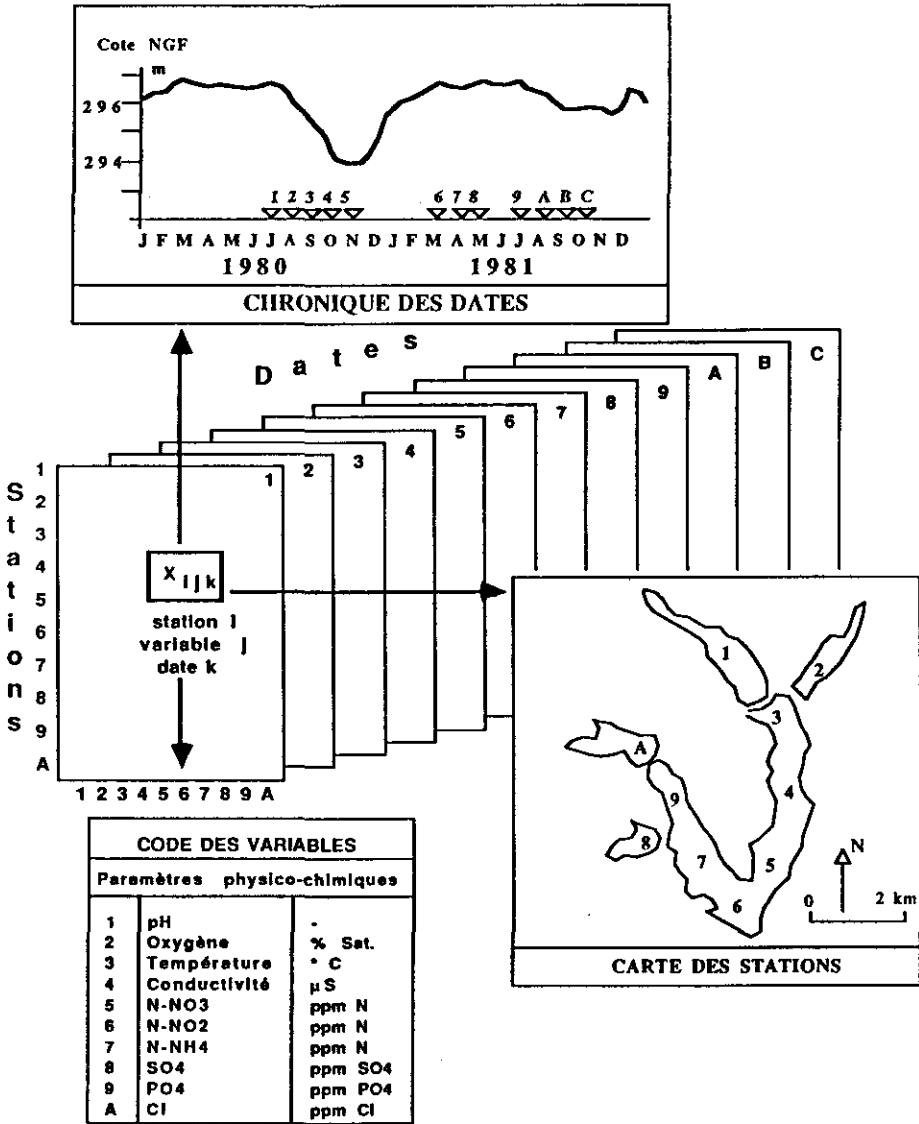


Figure 1.- Le cube des données dans une analyse multi-tableaux et la codification des objets des trois marges (variables x stations x dates). La présentation des tableaux par dates indique l'objectif assigné à l'analyse statistique qui est de faire un bilan des structures spatiales et de leur stabilité. La présentation des tableaux par stations (dates-variables) viserait à faire un bilan des évolutions temporelles et de leur répartition dans l'espace. Ce choix est décisif au niveau des résultats obtenus.

Figure 1.- The three way matrix in a multitable analysis, with the codes and explanations of the dimensions (variables x stations x dates). The matrices are presented by sampling dates, in order to characterize the spatial structure and its temporal stability. A presentation by stations would have shown the temporal changes and their spatial distribution. This choice is decisive for the results of the analysis.

La situation 3 qui nous concerne, dans laquelle les tableaux manipulés ont les mêmes individus (stations) et les mêmes variables (paramètres), a été étudiée au plan théorique par JAFFRENOU, 1978 dont les résultats justifient pleinement le modèle 1 de TUCKER, 1966 que nous utilisons.

D'après KROONENBERG et DE LEEUW, 1980 la première approche théorique a été développée par TUCKER et MESSICK, 1963. On pourra trouver une introduction en écologie dans THIOULOUSE et CHESSEL, 1987 et son application à la stratification d'un cours d'eau dans DOLEDEC, 1988. Nous explicitons ici la procédure de calcul pour en promouvoir l'usage en hydrobiologie.

## 2 - La notion d'interstructure

Dans la phase d'Analyse de l'interstructure commune aux méthodes multi-tableaux du type STATIS, il s'agit de faire une typologie de tableaux, c'est-à-dire de comparer entre eux les  $t$  tableaux ( $s$  stations- $p$  variables) considérés comme les individus d'une ACP inter-tableaux.

Considérons  $X_k$  et  $X_l$  les tableaux aux dates respectives  $k$  et  $l$  ( $1 \leq k, l \leq t$ ). Nous supposons que les tableaux sont normalisés par dates, c'est-à-dire que chaque variable  $y$  est centrée (moyenne nulle) et réduite (variance unité).  $X_k(i, j)$  est alors la mesure normalisée de la variable  $j$  sur l'individu  $i$  dans le tableau (date)  $k$ .

On peut appeler coefficient de corrélation entre les tableaux  $X_k$  et  $X_l$ , la moyenne des corrélations des variables de même nature soit :

$$R(k, l) = 1/p \sum_{j=1}^p [1/n \sum_{i=1}^n X_k(i, j) X_l(i, j)]$$

Ce coefficient est compris entre  $-1$  et  $1$ , puisque c'est une moyenne de coefficients de corrélation. S'il est franchement positif, toutes les corrélations entre les variables aux deux dates sont positives et la structure entre les deux tableaux est voisine. S'il est voisin de  $0$ , soit ses composantes sont faibles, soit elles sont contradictoires (corrélations positives pour certaines variables et négatives pour d'autres) et les deux tableaux n'ont pas la même structure.

Nous obtenons le tableau 2.

Il est aisé d'observer que cette matrice est exactement la matrice des covariances inter-dates du tableau à  $s.p$  lignes et  $t$  colonnes où l'on a écrit les tableaux de chaque date sur une seule colonne ligne par ligne (figure 2). On doit considérer que cette opportunité pratique est la transcription d'une structure mathématique forte (THIOULOUSE et CHESSEL, 1987, annexe statistique).

Faire le bilan des ressemblances inter-dates passe pratiquement par l'ACP ordinaire du tableau  $Y$ . Le premier produit de cette ACP ordinaire est une répartition de l'inertie entre les axes qui indique rapidement le nombre de facteurs à utiliser. La figure 3 est à ce sujet explicite : on devra examiner dans la typologie inter-tableaux le premier facteur. La structure inter-tableaux est unidimensionnelle.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1.00	0.17	-0.08	0.18	-0.06	-0.17	0.10	-0.03	-0.04	0.02	0.09	0.08	1
	1.00	0.13	0.45	0.44	0.31	0.18	-0.07	-0.01	0.31	0.23	0.34	2
		1.00	0.25	0.40	0.21	0.15	0.00	0.16	0.13	0.13	0.11	3
			1.00	0.36	0.17	0.25	-0.01	0.06	0.25	0.30	0.28	4
				1.00	0.38	0.28	-0.05	0.05	0.38	0.19	0.27	5
					1.00	0.30	0.22	0.14	0.25	0.18	0.35	6
						1.00	0.02	0.14	0.23	0.18	0.20	7
							1.00	0.13	-0.05	0.06	0.07	8
								1.00	0.10	0.10	0.22	9
									1.00	0.33	0.48	10
										1.00	0.45	11
											1.00	12

Tableau 2.- Matrice des corrélations inter-tableaux. A la ligne k et à la colonne l figure la moyenne des corrélations des variables j, mesurées respectivement à la date k et à la date l (point de vue théorique). Les valeurs sont obtenues dans l'ACP du tableau Y de la figure 2 (point de vue pratique).

Table 2.- Between-tables correlation matrix. The intersection of line k and column l gives the mean correlation between the variables j measured respectively at date k and at date l (according to the theory). From a practical point of view, the values are obtained from the PCA of matrix Y (see figure 2).

Le second produit de cette analyse est formée par les coordonnées factorielles des dates que nous pouvons représenter en fonction du temps (figure 3). Toutes les coordonnées sont de même signe, ce qui n'est pas obligatoire. Ce signe constant indique un effet "taille" inter-tableau qui rend compte que, sauf pour les dates 1 et 8, la majorité des corrélations inter-tableau sont positives. On obtient ainsi l'indication qu'une structure commune existe à l'intérieur de chacun des 12 tableaux. En juillet 1980 (t = 1) et en mars-avril 1981 (t = 8 et 9), cette structure est mal représentée alors qu'elle est relativement constante aux autres dates de prélèvements. La description de cette structure espace-variables commune aux différentes dates est assurée par l'analyse du compromis, deuxième phase des analyses multi-tableaux.

### 3 - La notion de compromis

Une analyse de chaque tableau conduirait à exécuter 12 ACP dont la lecture simultanée serait extrêmement difficile. On pourrait, pour simplifier cette tâche, analyser directement le tableau moyen soit :

$$x = (1/t) \sum X_k$$

où la valeur  $x(i,j)$  pour la station i et la variable j serait la valeur moyenne de cette même quantité pour les différents tableaux. On ferait ainsi l'analyse d'un compromis. Les dates 1, 8 et 9, peu représentatives, y joueraient un rôle égal à celui des autres dates, ce qui nuirait à son efficacité, la structure commune y étant peu perceptible.

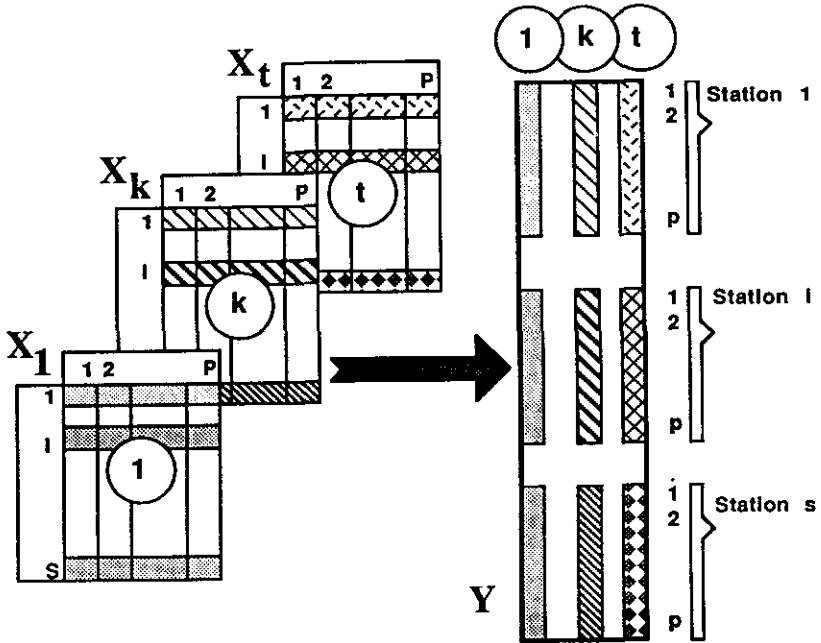


Figure 2.- Constitution du tableau de l'interstructure. Pour analyser l'interstructure entre les tableaux  $X_1, \dots, X_t$  aux différentes dates, il suffit de faire l'ACP centrée ordinaire du tableau  $Y$ . Cette opportunité pratique permet de mettre en oeuvre l'approche théorique (JAFFRENOU, 1978) par le biais d'un programme de grande diffusion.

Figure 2.- Construction of the interstructure matrix. To analyze the interstructure between matrices  $X_1, \dots, X_t$  at different dates, it is adequate to apply the Principal Components Analysis of the matrix  $Y$ . Thus, the theoretical approach (JAFFRENOU, 1978) may be performed by using a standard PCA program.

On appelle tableau compromis un tableau  $X$  à  $s$  lignes (stations) et  $p$  colonnes (variables), obtenu par combinaison des tableaux unitaires :

$$x = \sum a_k x_k$$

sous la contrainte

$$\sum a_k^2 = 1$$

Le meilleur compromis est celui qui donnerait la meilleure ACP, c'est-à-dire celle qui présenterait, sous la contrainte précitée, une inertie interne maximale. La théorie indique qu'on prendra pour ce faire les  $a_k$  comme les composantes du premier vecteur propre normé de la matrice de corrélation inter-tableau. Il s'en suit que le tableau compromis est directement calculé dans la première coordonnée factorielle de l'ACP de  $Y$  (analyse de l'interstructure). La figure 4 symbolise cette opération.

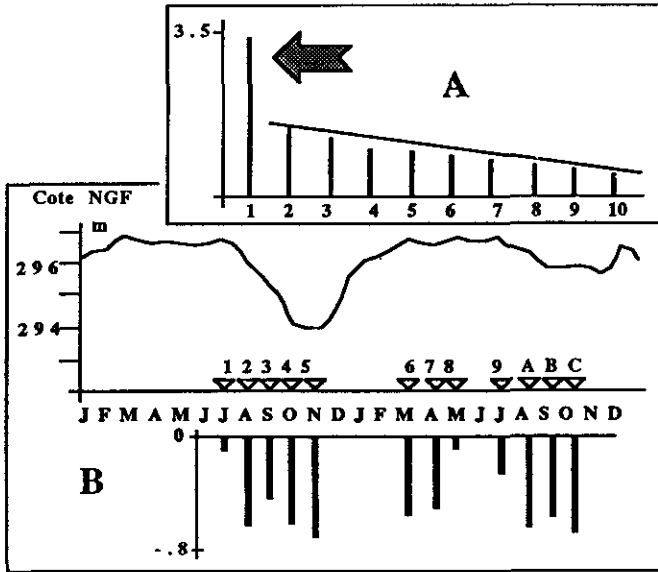


Figure 3.- Résultats de l'analyse de l'interstructure.  
 A - Répartition de l'inertie entre les axes (représentation des valeurs propres en fonction de leur rang). L'interstructure est essentiellement unidimensionnelle. Chaque tableau conservant au-delà du facteur 1 une structure très peu corrélée avec celle des autres. B - Représentation temporelle des coordonnées des dates (tableaux). Le signe commun indique la présence d'une structure spatiale permanente dans la physico-chimie du lac étudié, très faiblement perceptible en juillet 1980 et mai 1981.

Figure 3.- Results of the interstructure analysis.  
 A - Distribution of inertia between the axes (representation of the eigenvalues according to their rank). The interstructure is mainly uniform; each matrix is only correlated with the others in its first value. B - Temporal representation of date coordinates. The common negative algebraic sign is due to a common spatial structure in the physical and chemical nature of the water, which is barely discernible both in July 1980 and in May 1981.

Le compromis est donc le meilleur tableau Z que l'on puisse constituer avec les 12 tableaux  $X_k$  de départ. Comme les coordonnées factorielles des dates sont toutes négatives, le signe des variables est inversé. Ces résultats sont obtenus avec un programme d'ACP, aucun programme spécifique n'est nécessaire. Remarquons que dans la plupart des machines, le tableau à s.p lignes et 1 colonne de la première coordonnée factorielle pourra être strictement considéré comme le tableau Z à s lignes et p colonnes à l'entrée d'une nouvelle ACP.

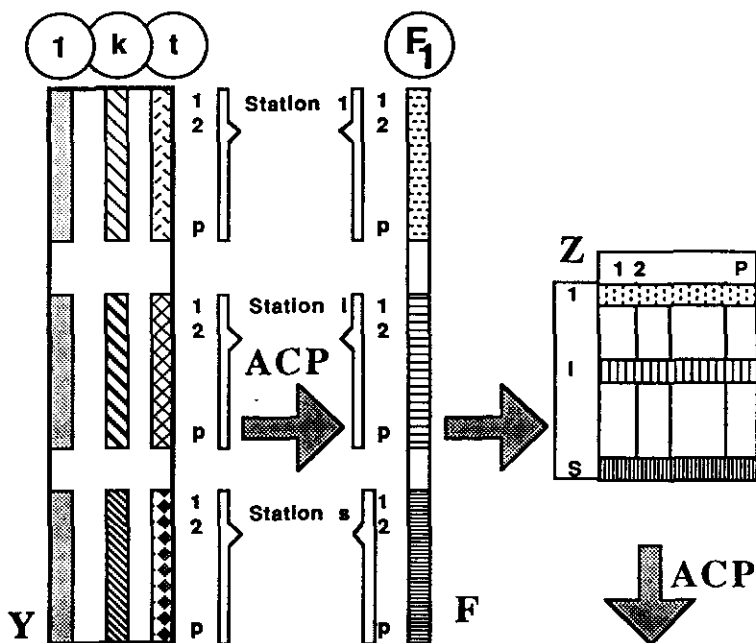


Figure 4.- Obtention du premier compromis comme tableau des coordonnées factorielles. Le passage de F ( $s \times p$  lignes et 1 colonne) à Z ( $s$  lignes et  $p$  colonnes) est ici encore l'image pratique de la notion du compromis dans la théorie de JAFFRENOU (1978). On peut faire de l'analyse multi-tableaux dans le cas où des individus et des variables sont communs sans implantation de programmes spécifiques. Le facteur 2 donnerait dans certains cas un deuxième compromis utilisable, ce qui n'est pas le cas dans l'exemple étudié.

Figure 4.- The first compromise is obtained in the form of a matrix which contains the factorial coordinates from F ( $s \times p$  lines and 1 column) to Z ( $s$  lines and  $p$  columns). This is a practical illustration of the compromise notion in JAFFRENOU's theory (1978). Multi-table analysis is possible without specific programs when samples and variables are the same. Factor n°2 might furnish another useful compromise (but it does not in this example).

La figure 5 montre la structure commune multidimensionnelle : on y a cartographié les valeurs du compromis variable par variable. Il faut à nouveau faire une synthèse inter-variable, ce qui est l'objet de l'analyse du compromis qu'on exécutera très simplement avec un programme d'ACP ordinaire sur le tableau Z.

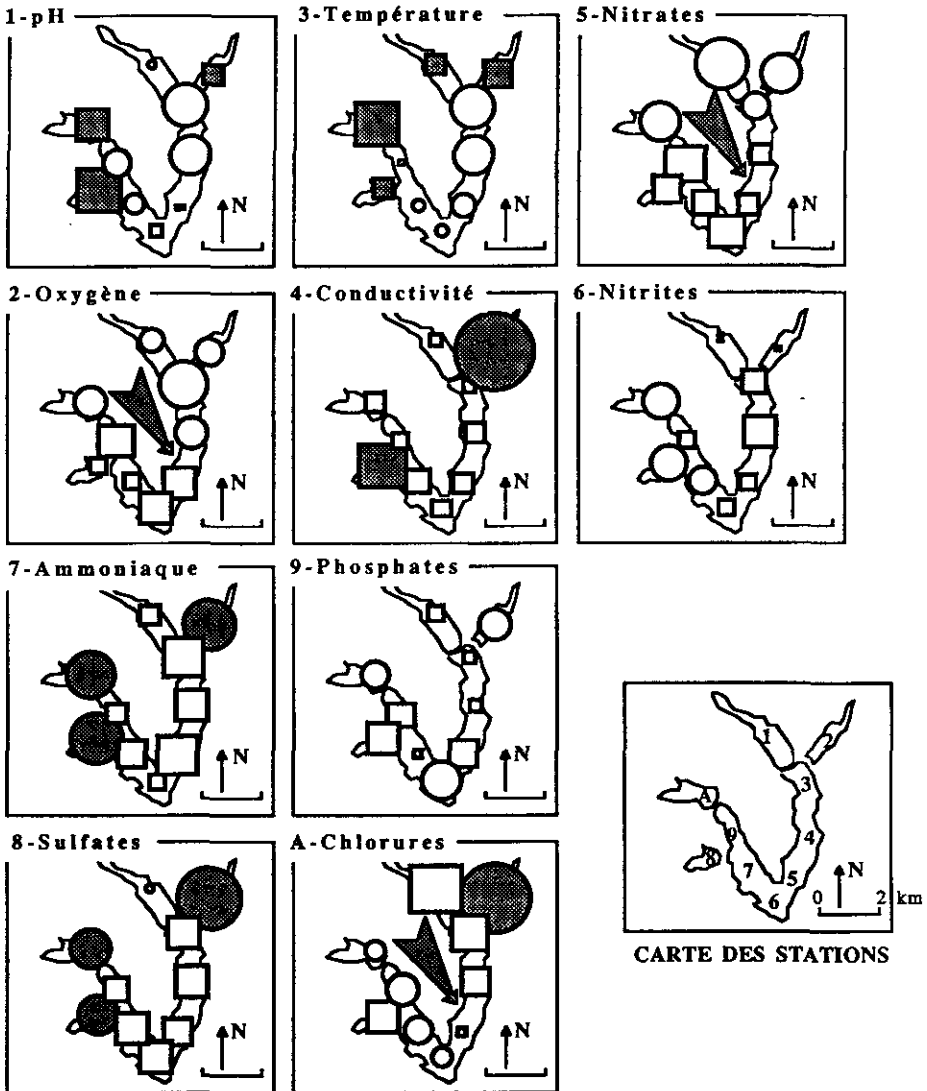


Figure 5.- Cartographie des valeurs numériques du tableau compromis. Les valeurs du tableau Z sont représentées par une surface (cercles : valeurs négatives ; carrés : valeurs positives ; aire du symbole proportionnelle à la valeur absolue : indications méthodologiques et logiciels de Y. AUDA. Laboratoire de Biométrie, Université Lyon 1). On a ici une description multivariée de la structure spatiale permanente, dont l'analyse du compromis fait un résumé de dimensions réduites.

Figure 5.- The numerical values from the compromise matrix. The values of matrix Z are represented by geometrical figures (circles : negative values, squares : positive values). Methodological explanations and programmes from Y. AUDA (Laboratory of Biometry, Université Lyon 1). Here is a multivariate description of the permanent spatial structure; compromise analysis gives a summary of lesser dimensions.



## DISCUSSION

### 1 - Résultats

Considérons d'abord la répartition de l'inertie dans le compromis (figure 6). Il apparaît cette fois que la structure commune est tridimensionnelle. Nous dépouillerons les 3 premiers facteurs. Les coordonnées factorielles des stations font l'objet d'une nouvelle cartographie (figure 7) qui conduit simplement à un schéma fonctionnel où on distingue 5 composantes.

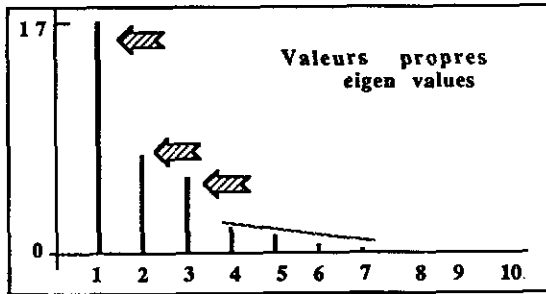


Figure 6.- Répartition de l'inertie entre les axes du compromis (représentation des valeurs propres en fonction de leur rang). L'interstructure unidimensionnelle conduit à un compromis tridimensionnel : ces résultats sont inaccessibles par les méthodes uni-tableau.

Figure 6.- The distribution of inertia between compromise axes (representation of the eigenvalues against their rank). The one-dimensional interstructure leads to a three-dimensional compromise : these results could not be obtained by uni-table methods.

Les 3 "queues du lac" représentées par les stations 2, 10 et 8 se distinguent très fortement du reste du plan d'eau et on les notera A (station 2), AB (station 10) et B (station 8) pour enregistrer les points communs notés sur la représentation des facteurs 1 et 2. Les stations 5, 6, 7 et 9 ont des coordonnées constantes sur les 3 axes et constituent la zone H, zone homogène principale représentant le plus grand volume d'eau. Les stations 1, 3 et 4 ont des coordonnées variant de façon assez continue indiquant un gradient (G).

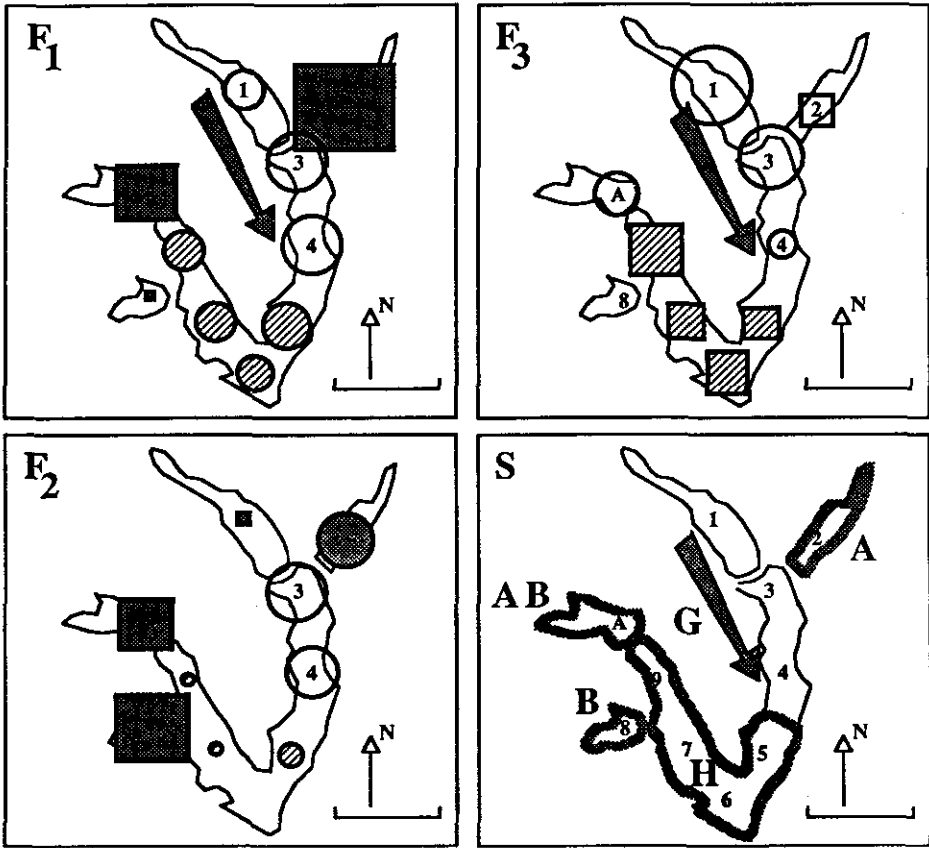


Figure 7.- Interprétation du compromis par cartographie des coordonnées factorielles. Les trois facteurs retenus (F1, F2, F3) définissent une carte du lac (S) faisant un bilan inter-dates et inter-variables simplifiant la lecture de la figure 5. Une analyse discriminante inter-stations donne des résultats sensiblement moins bons. On distingue les trois stations originales dans les annexes (notées A, AB et B), un gradient de variations des paramètres lié à l'alimentation en eau (G) et un groupe de 4 stations homogènes (H) représentant le volume principal.

Figure 7.- Interpretation of the compromise by mapping the factorial coordinates. A map of the lake (S) is made of the 3 factors retained (F1, F2, F3), thus presenting an inter-date and inter-variable scheme, making figure 5 easier to read. An inter-station discriminant analysis would have given less good results.

Pour en interpréter la nature en terme de descripteurs, nous utilisons une représentation tridimensionnelle conforme à la projection face-profil-dessus du sous-espace engendré par les premiers axes, ce qui respecte pleinement l'approche euclidienne en analyse de données (figure 8).

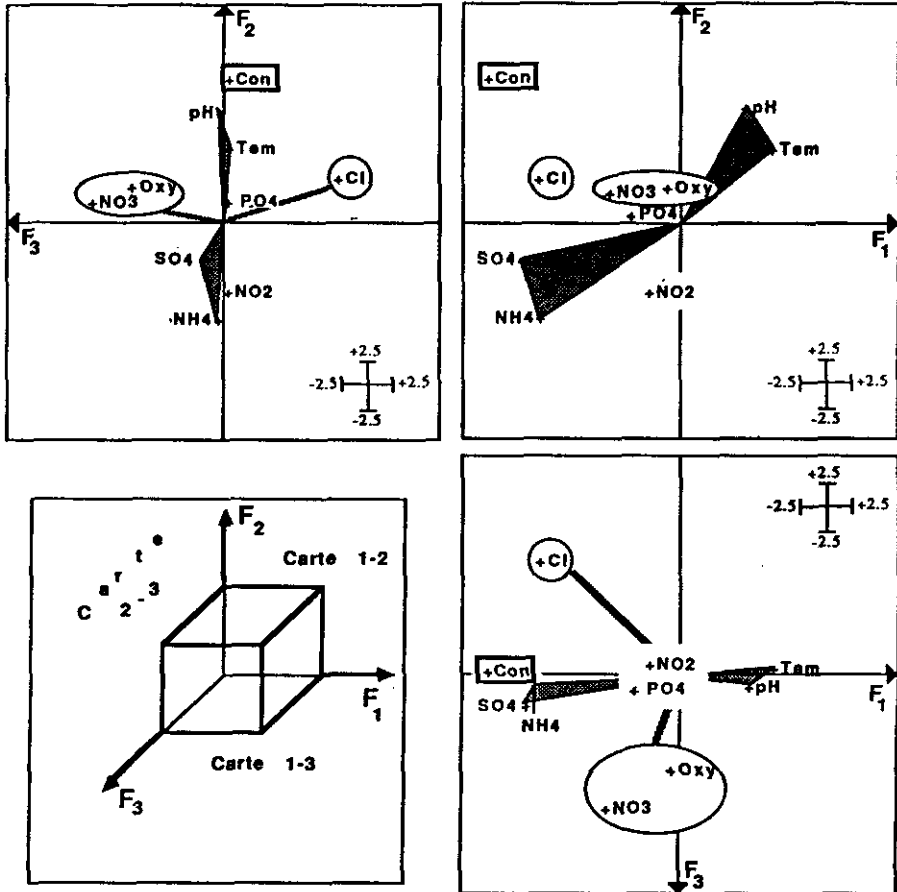


Figure 8.- Projection tridimensionnelle sur les axes du compromis des coordonnées des variables. On a voulu ici souligner que les cartes 1-2, 2-3, 1-3 sont des projections sur les plans du sous-espace de dimension 3 retenu par la décomposition de l'inertie (figure 6). Ce mode de représentation est conforme au théorème des trois perpendiculaires. Cette aide à l'interprétation facilite la discussion de la carte de synthèse (figure 7.S).

Figure 8.- Three-dimensional projection of the compromise of the co-ordinates of the variables on the axes. We want to emphasize that factorial maps 1-2, 2-3, 1-3 are projections on the planes of the three-dimensional subspace retained after inertia rooting (figure 6). This representation conforms to the three-perpendiculars theorem. This interpretation makes the discussion of the synthetic map (figure 7.S) easier.

Les trois "queues" A, B et AB sont caractérisées par un pH et une température de l'eau plus faible, ainsi que par des concentrations en azote (principalement ammoniacal) et en sulfates plus élevées dues aux apports par les tributaires. Ces caractéristiques peuvent être accentuées par la plus faible profondeur et les épisodes d'isolement, qui peuvent entraîner une perturbation sensible du cycle de l'azote (en fonction du niveau).

Les "queues" présentent cependant chacune des caractéristiques différenciées pour des variables comme les chlorures et la conductivité dont les valeurs élevées caractérisent la station A (apports importants et réguliers par l'affluent, le ruisseau des Bizots) par opposition à la station B où les apports sont très faibles et irréguliers. La queue AB présente quant à elle une situation intermédiaire pour ces deux variables et pour le volume des apports.

La zone de gradient G (caractéristique des nitrates et des chlorures) quant à elle, correspond à l'axe de l'ancienne vallée submergée, donc à la zone principale d'apport par la rivière Sorme. Elle s'oppose à la zone H, plus profonde et plus stable (du moins en surface et pour les paramètres mesurés).

## 2 - Perspectives

A partir d'un tableau de relevés stratifiés (espace-temps) de variables physico-chimiques (mesurées sur de l'eau de surface) dans un lac réservoir, nous avons pu faire automatiquement un bilan *inter-dates* et *inter-stations* de la structure spatiale horizontale du lac et de sa stabilité. La discussion sur l'approche fonctionnelle qui permet cette analyse est volontairement limitée pour souligner la proposition *méthodologique*, objet de la présente note.

Une analyse multi-tableaux, du point de vue biologique comporte d'abord un choix de l'objectif poursuivi ; une recherche de l'interstructure des stations donnerait des résultats radicalement différents. L'interstructure choisie montre l'existence d'une structure spatiale permanente en surface, quelquefois peu marquée. Cette structure permanente est décrite par l'analyse du compromis. On peut ajouter que les écarts au compromis peuvent faire l'objet d'un complément appelé analyse de l'intrastructure (THIOULOUSE et CHESSEL, 1987). Les concepts générés par la théorie statistique conviennent à l'approche expérimentale du système lacustre. Illustrés ici par une structure horizontale simple, ils pourraient prendre un intérêt encore plus marqué à propos de la description de la structure verticale, l'échantillonnage à différentes profondeurs générant un ensemble de tableaux qui pourrait conduire à une interstructure plus complexe liée aux différentes périodes de stratification de la masse d'eau. De même, en milieu d'eaux courantes, l'analyse proposée pourrait simplifier le difficile problème des typologies de stations dans un environnement à très fortes variations saisonnières (DOLEDEC, 1988). Lorsqu'il n'y a pas strictement, pour chacun des tableaux, les mêmes stations et les mêmes variables, la description des structures passe par des méthodes multi-tableaux exigeant des programmes spécifiques et, actuellement, l'intervention de biométriciens spécialisés ; l'évaluation du rôle de ces techniques en limnologie nous semble utile.

Ces méthodes doivent enfin être replacées par rapport à deux alternatives importantes. La première est celle de l'ACP 3-modes inventée par TUCKER, 1964 et décrite dans tous ses aspects par KROONENBERG, 1983. La

mise en oeuvre est beaucoup plus difficile : son coût ne sera envisagé que pour la mise en évidence d'interactions tridimensionnelles, brièvement lorsqu'on désire illustrer le fait que pour certaines dates et dans certaines stations certains descripteurs ont une covariation spatio-temporelle. La seconde est beaucoup plus simple. Elle s'appuie sur les modèles d'analyse de variance où l'observation dans la station  $i$ , à la date  $j$  et sur la variable  $k$  est modélisée par :

$$x_{ijk} = \mu_k + \alpha_{ik} + \beta_{jk} + e_{ijk}$$

(modèle additif) ou

$$x_{ijk} = \mu_k + \sum_f \lambda_{fk}^a \lambda_{jk}^b + e_{ijk}$$

(modèle multiplicatif)

La première perspective a été envisagée par WILLIAMS et STEPHENSON, 1973 et explicitée par DOLEDEC et CHESSEL, 1987 ; elle utilise un bilan inter-variables par ACP après élimination ou prise en compte des effets temporels ou stationnels. La seconde est dérivée des techniques de biplot (GABRIEL, 1971 et 1978) et illustrée par CARREL *et al.*, 1986, dans le cas d'une seule station. La synthèse inter-stations renvoie alors à l'ACP 3-modes. Ces remarques montrent qu'avant toute décision technique c'est l'objectif choisi qui est fondamental, plusieurs techniques d'apparence ou de nature distinctes pouvant répondre aux objectifs de description de :

- 1 - l'évolution temporelle d'un état (élimination de l'hétérogénéité spatiale) ;
- 2 - la structure spatiale d'un état (élimination de l'effet saisonnier, cartographie d'un état moyen) ;
- 3 - l'évolution temporelle de la stratification spatiale (stabilité, modification ou inversion) ;
- 4 - la structure spatiale de l'évolution temporelle (cartographie d'une typologie de chroniques) ;
- 5 - la typologie inter-variables de structures spatio-temporelles des descripteurs.

Nous avons montré que dans le troisième cas on pouvait :

- a) normaliser les données par dates et par variables ;
- b) comparer les dates par une ACP d'interstructure ;
- c) repérer la partie stable de la stratification spatiale dans le premier facteur par le signe constant des coordonnées des dates ;
- d) décrire cette stratification par cartographie des coordonnées des stations d'une ACP de compromis ;
- e) interpréter sa signification par les cartes factorielles des variables.

Les dates au cours desquels la structure commune est perturbée ou mal exprimée (les raisons de tels accidents peuvent être nombreuses) sont automatiquement éliminées. Cette procédure permet également l'analyse d'une interstructure inter-stations (objectif 4) ou inter-variables (objectif 5) et donne des résultats soit concordants (ce qui conduit à une approche strictement tri-dimensionnelle), soit discordants (ce qui souligne les différences de points de vue).

Si la stabilité de la structure spatiale avait été invalidée par l'analyse, son évolution aurait été décrite par un complément dit analyse d'intra-structure présent dans les stratégies du type STATIS (un exemple est donné par THIOULOUSE et CHESSEL, 1987). Cet aspect devrait avoir un rôle important dans l'analyse de la stratification des masses d'eau (structure verticale) et celle de la dispersion des peuplements planctoniques. C'est pourquoi l'évaluation de ces méthodes en limnologie nous semble utile.

---

## REMERCIEMENTS

---

Nous remercions vivement les deux référees de la revue pour leurs critiques constructives et leurs conseils.

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- AUSTIN M.P. (1977). Use of ordination and other multivariate descriptive methods to study succession. *Vegetatio*, 35: 165-175.
- AUSTIN M.P. (1981). Permanent quadrats : an interface for theory and practice. *Vegetatio*, 46: 1-10.
- BALVAY G. (1984). La variabilité des caractéristiques physico-chimiques des étangs de la Dombes (Ain). *Verh. internat. Verein. Limnol.*, 22: 1655-1660.
- BENEDETTI-CROUZET E., DUSSART B. (1979). Les retenues d'eau. Création, évolution, impacts, surveillance. Synthèse bibliographique. Agence financière de bassin Seine-Normandie, 258 p..
- CAPBLANCO J., LAVILLE H. (1968). Etude morphométrique et physico-chimique de neuf lacs du Massif de Néouvielle (Hautes-Pyrénées). *Annls Limnol.*, 4: 275-324.
- CARREL G., BARTHELEMY D., AUDA Y., CHESSEL D. (1986). Approche graphique de l'analyse en composantes principales normée : utilisation en hydrobiologie. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, 7: 189-203.
- CHACORNAC J.M. (1986). Lacs d'altitude : métabolisme oligotrophe et approche typologique des écosystèmes. Thèse Doctorat, Université Claude Bernard Lyon I, 215 p..
- C.I.P.E.L. (1984). *Le Léman - Synthèse des travaux de la Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la pollution 1957-1982*. C.I.P.E.L., Lausanne, 647 p..
- DAKKI M. (1986). Biotypologie et gradient thermique spatio-temporel, étude sur un cours d'eau du moyen-atlas (Maroc). *Bull. Ecol.*, 17: 79-85.
- DAUBA F. (1981). *Etude comparative de la faune des poissons dans Les écosystèmes de deux réservoirs : Lizech (Lot) et Chastang (Dordogne)*. Thèse 3ème cycle, Inst. Nat. Pol. Toulouse, 179 p..
- DOLEDEC S. (1988). Les analyses multitableaux en écologie factorielle. II - Stratification longitudinale de l'Ardèche à partir de descripteurs physico-chimiques. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, 9: 119-135.
- DOLEDEC S., CHESSEL D. (1987). Rythmes saisonniers et composantes stationnelles en milieu aquatique. I - Description d'un plan d'observation complet par projection de variables. *Acta Oecologica, Oecol. Gener.*, 8: 403-426.
- ESCOUFIER Y. (1980). L'analyse conjointe de plusieurs matrices de données. In : *Biométrie et Temps*, JOLIVET ed., 59-76.

- ESCOUFIER Y. (1985). Objectifs et procédures de l'analyse conjointe de plusieurs tableaux de données. *Statistique et Analyse des données*, 10: 1-10.
- ESTRADA M. (1975). Statistical consideration of some limnological parameters in Spanish reservoirs. *Verh. internat. Verein Limnol.*, 19: 530-541.
- FEUILLADE J., FEUILLADE M. (1971). Etude comparative, en 1966 et 1967, de trois lacs de retenues du projet de parc naturel du Morvan. *Annis Hydrobiol.*, 2: 143-174.
- FOUCART T. (1983). Analyse factorielle de tableaux multiples. *Coll. Méthodes + Programmes*, Masson, Paris, 187 p..
- GABRIEL K.R. (1971). The biplot graphical display of matrices with application to principal component analysis. *Biometrika*, 58: 453-467.
- GABRIEL K.R. (1978). Least-squares approximated of matrices by additive and multiplicative models. *J.R. Statist. Soc. (B)*, 40: 186-196.
- GAY Ch. (1976). Contribution à l'étude écologique et à l'aménagement d'un lac de montagne : le lac de Petichet (Isère), (alt. 923 m). Thèse 3ème cycle. Université Scientifique et Médicale de Grenoble. 124 p..
- GITTINS R. (1968). Trend-surface analysis of ecological data. *J. Ecol.*, 56: 845-869.
- GITTINS R. (1981). Towards the analysis of vegetation succession. *Vegetatio*, 46: 37-59.
- GLAÇON F. (1981). Analyse conjointe de plusieurs matrices de données. Comparaison de différentes méthodes. Thèse de 3ème cycle. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 73 p..
- GOODALL D.W. (1954). Objective methods for the classification of vegetation. III - An essay of factor analysis. *Aust. J. Bot.*, 2: 304-324.
- GREEN R.H. (1979). *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. Wiley, New-York, 257 p..
- GREGOIRE A. (1981). Contribution à l'étude hydrobiologique d'une rivière aménagée : le Verdon. Les lacs de barrage et les tronçons de cours d'eau à débit régulé. Thèse d'Etat, Université d'Aix-Marseille I, 213 p..
- HANNAN H.H., FUCHS I.R., WHITENBERG D.C. (1979). Spatial and temporal patterns of temperature, alkalinity, dissolved oxygen and conductivity in an oligo-mesotrophic, deep-storage reservoir in Central Texas. *Hydrobiologia*, 66: 209-221.
- JAFFRENOU P.A. (1978). Sur l'analyse des familles finies de variables vectorielles. Bases algébriques et application à la description statistique. Thèse de 3ème cycle, Université Claude Bernard Lyon I, 97 p..
- KROONENBERG P.M. (1983). *Three-mode principal component analysis*. DSWO Press, Leiden, 398 p..
- KROONENBERG P.M., DE LEEUW J. (1980). Principal component analysis of three-mode data by means of alternating least squares algorithms. *Psychometrika*, 45: 69-97.
- L'HERMIER DES PLANTES H. (1976). Structuration des tableaux à trois indices de la statistique. Théorie et application d'une méthode d'analyse conjointe. Thèse 3ème cycle, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier II.
- MARGALEF R. (1975). Typology of reservoirs. *Verh. internat. Verein. Limnol.*, 19: 1841-1848.
- THIOULOUSE J., CHESSEL D., (1987). Les analyses multi-tableaux en écologie factorielle. I - De la typologie d'état à la typologie de fonctionnement par l'analyse triadique. *Acta Oecologica. Oecol. Gener.*, 8: 463-480.
- TRAVADE F., ENDERLE M.J., GRAS R. (1985). Retenues artificielles : gestion hydraulique et ressources piscicoles. In Gerdeaux D., Billard R. Eds., *Gestion piscicole des lacs et retenues artificielles*, INRA, Paris, 15-37.
- TUCKER L.R. (1964). The extension of factor analysis to three-dimensional matrices. In Gullinkson H., Frederiksen N. Eds., *Contributions to mathematical psychology*, Rinehart and Winston, New-York, 110-119.
- TUCKER L.R. (1966). Some mathematical notes on three-mode factor analysis. *Psychometrika*, 31: 279-311.
- TUCKER L.R., MESSICK S. (1963). An individual differences model for multidimensional scaling. *Psychometrika*, 28: 333-367.
- VALLOD D. (1984). Suivis physico-chimiques et biologiques d'étangs de Dombes. Application à la gestion piscicole. Thèse 3ème cycle, Université Claude Bernard Lyon I, 83 p..
- WEBB T. III. (1987). The appearance and disappearance of major vegetational assemblages : long-term vegetational dynamics in Eastern North America. *Vegetatio*, 69: 177-187.

---

WHALEN S.C., LEATHE S.A., GREGORY R.W.,  
WRIGHT J.C. (1982). Physicochemical  
limnology of the Tongue River reservoir.  
Montana. *Hydrobiologia*, 89: 161-176.

WILLIAMS W.T., STEPHENSON W. (1973). The  
analysis of three-dimensional data  
(sites x species x times) in marine  
ecology. *J. exp. mar. Biol. Ecol.*,  
11: 207-227.