



Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire)

[Multivariate analysis for assessment of physicochemical quality of water of a tropical lake system: case of Yamoussoukro lakes (Côte d'Ivoire)]

Sadat AW^{1,2,*}, Essan Bla Zita N'GORAN¹, Sorho SIAKA¹, Bernard PARINET²

¹Laboratoire des Procédés Industriels de Synthèse, de l'Environnement et des Energies nouvelles (LAPISEN) Institut National Polytechnique Houphouët Boigny Bp 1313 Yamoussoukro – Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Chimie et Microbiologie de l'Eau (LCME) – Université de Poitiers, 40 Avenue du Recteur Pineau ; 86000 Poitiers – France

*Autor correspondance : aw.sadat@yahoo.fr

Original submitted in 29th November 2010. Published online at www.biosciences.elewa.org on February 9, 2011.

RESUME

Dans le souci de mieux comprendre et gérer la qualité des eaux de surface, l'on entreprend souvent de longues et fastidieuses campagnes d'analyses. Celles-ci génèrent généralement assez de données dont l'interprétation n'est pas toujours aisée. L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) pour une telle tâche pourrait être salutaire. C'est dans l'optique d'une telle application que 22 paramètres physico-chimiques, provenant de l'analyse d'échantillons d'eau collectés entre Février 2007 et Avril 2008 sur 17 stations réparties sur 9 lacs du système lacustre de Yamoussoukro, ont été analysés. L'analyse en composantes principales appliquée aux données a montré que les variables peuvent être regroupées en cinq principales composantes. L'interprétation des résultats à l'aide de ces outils a permis de comprendre que les paramètres responsables de la qualité des eaux sont reliés pour la composante 1 (apports anthropiques : organiques et minéraux) et les composantes 2 et 3 respectivement aux processus liés aux macrophytes et aux phytoplanctons. Quand aux composantes 4 et 5, elles pourraient être reliées respectivement aux processus de recyclage interne des lacs occupés par les macrophytes et aux activités microbiennes. Une telle analyse a permis de dissocier les causes (apports anthropiques) des conséquences (niveaux trophiques macrophytaires et phytoplanctoniques) des processus d'eutrophisation des lacs de Yamoussoukro. Aussi l'ACP a montré une réduction possible du nombre de dimensions sans pertes majeures d'information. Cette réduction est d'autant plus intéressante que les 6 variables à prendre à compte sont de mesures simples. Dans la perspective de la création d'outils de gestion, cet outil se présente comme une bonne alternative.

Mots clés : Qualité eaux de surface, Système lacustre tropical, Analyse en Composantes Principales (ACP), Eutrophisation, Anthropisation

ABSTRACT

Objective: In order to understand and control the quality of surface water, long and tedious analyses campaigns were undertaken.

Methodology and results: The application of principal component analysis (PCA) method for such a task was beneficial. Using this method, 22 physicochemical parameters were analyzed, coming from the water samples drawn, in the period of February 2007 to April 2008, from 17 stations spread over nine lakes of Yamoussoukro lake system. The principal component analysis applied to the data showed that the variables could be grouped into five main components. These were component 1 (anthropogenic inputs: organic and inorganic), and components 2 and 3 were respectively related to processes of macrophyte and phytoplankton. Components 4 and 5 could be related to internal recycling processes of lakes occupied by macrophyte and the microbials activities. Such analysis allowed separating causes (anthropogenic inputs) and consequences (macrophyte, trophic levels and phytoplankton) of lakes eutrophication process. PCA also showed a possible reduction of number dimensions without significant information loss. The interest of this reduction lies in simplicity of the 6 variables to be analyzed.

Conclusion and application: In perspective of control tools creation, PCA seems to be a good alternative.

Keywords: surface waters Quality, tropical lake system, Principal Component Analysis (PCA), Eutrophication, Anthropisation

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle précieuse et essentielle pour de multiples usages (domestiques, industriels et agricoles). Sa qualité est un facteur influençant l'état de santé et la mortalité à la fois chez l'homme et les animaux (Kazi *et al.*, 2009). La pollution des eaux, définie comme étant une dégradation physique, chimique ou biologique provoquée par l'activité humaine, perturbe les conditions de vie et les équilibres aquatiques compromettant ainsi leurs utilisations multiples. Cependant, la qualité des eaux de surface est influencée aussi bien par des processus naturels (érosion des sols, précipitation, évaporation) que par l'activité humaine (agriculture, eaux usées urbaines et industrielles) (Strobl & Robillard, 2008).

Dans la plupart des pays en voie de développement, par manque de moyens, le contrôle et le suivi de la qualité des eaux de surface et souterraines utilisées pour la production des eaux de consommation ne sont pas systématiques.

D'un point de vue scientifique, les campagnes de contrôles environnementaux produisent de

grandes quantités de données qui, très souvent, ne sont pas simples à interpréter (Felipe-Sotelo *et al.*, 2007; Kowalkowski *et al.*, 2006). Dans ce contexte, l'utilisation de différentes techniques statistiques multivariées (analyse en composantes principales, les méthodes de classification) pour l'interprétation des données semble une solution intéressante pour une meilleure compréhension de la qualité des eaux et des états écologiques des milieux étudiés (Simeonov *et al.*, 2003). Ces techniques ont également l'avantage d'identifier et de lier les différents facteurs (ou sources) aux effets observés sur les systèmes aquatiques. Elles sont donc de meilleurs outils de gestion des ressources en eaux permettant de trouver des solutions rapides aux problèmes de pollution (Felipe-Sotelo *et al.*, 2007; Menció & Mas-Pla, 2008; Ouyang, 2005; Shrestha & Kazama, 2007; Swaine *et al.*, 2006; Vega *et al.*, 1998).

L'objectif de la présente étude est l'application des techniques statistiques multivariées pour évaluer la qualité d'un système lacustre tropical, expliquer les causes possibles de pollution et leurs influences sur les paramètres physico-chimiques.

MATERIEL ET METHODES

Description du site : La ville de Yamoussoukro, située au centre de la Côte d'Ivoire, possède un climat de type tropical humide de transition. Les températures moyennes de la période d'étude sont de 29,6 °C avec

des variations mensuelles inférieures à 2°C. La présente étude porte sur 9 lacs du système lacustre de Yamoussoukro (figure 1).



Figure 1 : Système lacustre de Yamoussoukro

Le système lacustre de Yamoussoukro s'est formé sur deux cours d'eaux qui traversent la ville. L'accès aux bordures des lacs est plus ou moins facile selon leur localisation. La ville ne possède pas de réseau de collecte des eaux usées et les maisons sont généralement munies de fosses septiques individuelles. Les apports dus aux activités anthropiques sont variables en fonction de la situation des lacs. Les cultures maraîchères et l'élevage d'animaux (bovins, ovins) contribuent également à la pollution des eaux (Aw, 2009). Le régime hydraulique des lacs est irrégulier, caractérisé par des apports

massifs d'eau de ruissellement pendant les périodes de pluies. Pendant la saison sèche, par manque d'apport d'eaux pluviales, seuls les effluents domestiques non traités constituent la principale source d'alimentation des lacs en eau. Aussi, le système lacustre, d'ordinaire communiquant, peut devenir par la suite des masses d'eaux stagnantes isolées les unes des autres.

Méthodes de prélèvements et d'analyses : Les données présentées dans cette étude proviennent de 15 campagnes de prélèvements d'eau effectués sur l'ensemble des 17 stations (Tableau 1) de février 2007 à avril 2008.

Tableau 1 : Description des stations de prélèvement en fonction des lacs

Lac	Numéro de station	Description et activités anthropiques
1	E1	Cultures maraîchères utilisant des engrais (chimiques ou fientes d'élevages, lac envahi par des végétaux aquatiques et situé dans une zone non habitée.
	S1	
2	E2	Lac bétonné, pas de contact avec l'extérieur et absence de végétaux à sa surface.
	S2	
3	E3	Hébergent une population de sauriens dont l'influence sur les rejets n'est pas négligeable. Lacs soumis aux apports d'une zone densément peuplée. Couverture végétale nulle.
	S3	
4	E4	
	E4	
5	E5a	Plus grand lac du système, recevant les eaux provenant des deux branches. Couvert

	E5b	de végétaux aquatiques à plusieurs endroits, notamment en ses entrées. Présence des laveurs de linge et de véhicules utilisant des lessives
	S5	
6	S6	Réceptacle du système situé en contre bas du lac 5 et jouté de parcs à bétail. Couvert de végétaux aquatiques
8	E8	Concentration sur les bordures d'activités touristiques (restaurants, gare, hôtels) dont il reçoit les eaux usées. Couverture progressive en végétaux aquatiques durant l'étude.
	S8	
9	E9	Situés en zones moyennement habitées avec présence de maraîchers, relativement couvert de façon abondante de végétaux aquatiques.
	S9	
10	S10	

E : entrée du lac, S : sortie du lac

A chaque station, à l'aide d'une perche équipée d'un bidon à clapet, 1 litre d'eau a été prélevé à environ 50 cm en dessous de la surface et transféré dans une bouteille en verre. Une fois les analyses *in-situ* (Le pH, la température, la conductivité, la turbidité, le potentiel redox et l'oxygène dissous) terminées, les bouteilles sont conservées dans une glacière à 4°C et

transportées au laboratoire dans les meilleurs délais. Les prélèvements ont été effectués toutes les trois semaines entre 8 et 10 heures du matin.

Le Tableau 2 résume l'ensemble des paramètres physico-chimiques analysés ainsi que les méthodes utilisées

Tableau 2 : Paramètres mesurés et méthodes analytiques utilisées

Paramètres	Abréviations	Unités	Matériel et Méthodes analytiques
Température	T	°C	Sonde température WTW OXI 320
pH	pH		Potentiométrie/ sonde HANNA HI 98240
Conductivité	Cond	µS/cm	Potentiométrie/ sonde WTW LF 330
Potentiel Redox	E	mV	Potentiométrie/ sonde Sentix ORP
Oxygène dissous	Od	mg O ₂ /L	Potentiométrie/ sonde Cellox 325
Turbidité	Turb	NTU	Turbidimétrie Turb 430 IR/T - (Norme NF T 90-033)
matières en suspension	MES	mg/L	Norme NF T 90-105
Absorbance UV à 254 nm	UV 254	cm ⁻¹	Mesure de l'absorbance UV à 254 nm sur les échantillons filtrés avec un spectrophotomètre JASCO
Orthophosphate	PO ₄ ³⁻	mg/L	Norme NF T 90-023, Spectrophotomètre JASCO
Phosphore total	Ptot	mg/L	Norme NF T 90-023, Spectrophotomètre JASCO
Azote total	Nt	mg/L	Analyseur de carbone SHIMADZU TOC-V _{CSH} disposant d'un module TNM-1
Carbone organique dissous	COD	mg C/L	Analyseur de carbone SHIMADZU TOC-V _{CSH}
Nitrates	NO ₃ ⁻	mg/L	Norme NF T 90-042, Spectrophotomètre JASCO
Azote ammoniacal	NH ₄ ⁺	mg/L	Norme NF T 90-015, Spectrophotomètre JASCO
Indice permanganate	IPEB	mg O ₂ /L	Norme NF T 90-050
Intensité de fluorescence	Fluo	cps	Spectre d'émission (longueur d'onde d'excitation à 370 nm) avec un Fluorimètre Fluoromax-2
Magnésium	Mg	mg/L	Norme NF T 90-136, Spectromètre d'émission

Potassium	K	mg/L	atomique ICP Perkin Elmer Optima 4300 DV
Sodium	Na	mg/L	
Calcium	Ca	mg/L	
Silicium	Si	mg/L	
Fer	Fe	µg/L	
Mercure	Hg	µg/L	
Manganèse	Mn	µg/L	

Traitement statistiques des données : L'Analyse en Composantes Principales (ACP) fait partie des analyses descriptives multivariées. Elle permet d'analyser des tableaux de données numériques quantitatives pour en réduire la dimensionnalité en trouvant un nouvel ensemble de variables plus petit que l'ensemble des variables, qui néanmoins contient la plupart de l'information. Les composantes principales sont obtenues par diagonalisation de la matrice des corrélations bivariées. Cette diagonalisation définit un

ensemble de valeurs propres dont l'observation pour chaque composante permet de déterminer le nombre de graphique à examiner (Menció & Mas-Pla, 2008). La phase finale de l'ACP consiste en une représentation graphique qui permet d'avoir un aperçu des résultats que les expressions numériques ne fournissent pas. Le logiciel statistique SPSS 18 (SPSS Inc.) pour WINDOWS a été utilisé pour le traitement des données.

RESULTATS

Corrélations entre variables : L'étude des corrélations linéaires bivariées entre les paramètres étudiés renseigne sur la force des associations entre ceux-ci. La matrice des corrélations des 27 paramètres mesurés durant notre étude est présentée dans le tableau 3. Les stations de prélèvement ayant été combinées pour calculer cette matrice, les coefficients de corrélations doivent être interprétés avec précaution. En effet, ils sont affectés simultanément par les variations spatiales et temporelles (Vega *et al.*, 1998). Cependant, dans ce tableau où les coefficients de corrélation de Pearson significatifs ($p \leq 0,01$) et supérieurs à 0,5 sont représentés en gras, des corrélations intéressantes sont observées.

On note ainsi, une corrélation positive entre l'oxygène dissous et les paramètres du pH (0,56) et de la température (0,51). Des corrélations fortes et positives sont observées entre la conductivité et les minéraux que sont Na, Ca, Mg et K (r compris entre 0,80 et 0,88) ainsi qu'avec l'azote ammoniacal. Les nombreuses et fortes corrélations du potassium sont également intéressantes à observer.

Analyse en composantes principales (ACP) : Tout usage de l'ACP devant être justifié, nous avons réalisé les tests statistiques qui le permettent. Par application du test de sphéricité de Bartlett, une valeur de 6190,80 a été obtenue pour le Khi-deux (pour un degré de liberté de 351 et un seuil de signification de 0,00) confirmant que les variables sont corrélées significativement pour permettre une réduction de la

dimension. Dans un deuxième temps, nous avons effectué la mesure de l'adéquation de l'échantillonnage avec la faisabilité de l'ACP par la méthode de Kaiser-Meyer-Olkin (indice KMO). La valeur obtenue (0,812) tendant vers 1, confirme cette adéquation satisfaisante. Dans une ACP, le nombre de composantes à extraire est déterminé par le test d'accumulation de variance communément appelé « scree test ». Vega *et al.* (1998), ont suggéré d'arrêter l'extraction des composantes à l'endroit où se manifeste le changement de pente dans le graphique des valeurs propres. Cette décision concernant le nombre de composantes à extraire doit aussi tenir compte de la capacité d'interprétation des dimensions extraites. La figure 2 présente le graphique des valeurs propres obtenues durant cette étude.

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables sur l'ensemble des stations étudiées

	pH	T	Od	Turb	E	Cond	MES	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Nt	Ptot	PO ₄ ³⁻	COD	UV254	IA	IB	IC	IP	IT	Na	Ca	K	Mg	Fe	Mn	Hg	Si	
pH	1,00																											
T	0,36	1,00																										
Od	0,56	0,51	1,00																									
Turb	0,17	0,13	0,19	1,00																								
E	-0,14	0,26	0,14	0,15	1,00																							
Cond	0,00	0,01	-0,02	-0,08	-0,15	1,00																						
MES	0,47	0,24	0,30	0,59	-0,08	-0,09	1,00																					
NO ₃ ⁻	-0,12	-0,17	-0,12	-0,03	-0,07	0,16	-0,09	1,00																				
NH ₄ ⁺	-0,16	-0,17	-0,25	-0,17	-0,19	0,56	-0,15	0,25	1,00																			
Nt	-0,14	-0,07	-0,18	-0,10	-0,18	0,53	-0,13	0,28	0,65	1,00																		
Ptot	0,14	0,15	0,05	0,14	-0,14	0,56	0,19	0,11	0,46	0,36	1,00																	
PO ₄ ³⁻	0,13	-0,23	-0,10	0,04	-0,26	0,25	0,22	0,22	0,52	0,30	0,53	1,00																
COD	0,25	0,14	0,11	0,16	-0,13	0,21	0,13	-0,03	0,05	0,14	0,31	0,15	1,00															
UV254	-0,39	-0,26	-0,37	0,25	-0,12	0,16	-0,06	0,16	0,14	0,33	0,07	0,07	0,22	1,00														
IA	-0,31	0,08	-0,19	0,03	-0,05	0,56	-0,10	0,05	0,30	0,39	0,34	0,01	0,32	0,50	1,00													
IB	-0,01	0,21	0,03	0,19	0,28	0,14	0,13	0,04	0,02	0,03	0,08	-0,04	0,04	0,03	0,23	1,00												
IC	-0,36	0,01	-0,26	-0,01	-0,09	0,46	-0,17	0,05	0,24	0,35	0,25	-0,05	0,35	0,57	0,92	0,14	1,00											
IP	0,40	0,16	0,22	0,26	-0,08	0,03	0,30	-0,07	-0,01	0,05	0,36	0,26	0,55	-0,05	0,02	0,04	-0,01	1,00										
IT	-0,16	0,13	-0,10	0,07	0,06	0,56	-0,01	0,07	0,29	0,32	0,39	0,07	0,26	0,31	0,82	0,60	0,70	0,06	1,00									
Na	0,13	0,07	0,06	0,00	-0,19	0,88	0,04	0,11	0,45	0,54	0,54	0,23	0,31	0,19	0,52	0,17	0,44	0,14	0,56	1,00								
Ca	-0,13	-0,08	-0,05	-0,20	-0,18	0,80	-0,24	0,17	0,49	0,43	0,37	0,19	0,12	0,17	0,40	0,05	0,35	-0,11	0,39	0,73	1,00							
K	-0,09	0,13	-0,02	0,02	-0,06	0,88	-0,09	0,10	0,55	0,53	0,58	0,17	0,25	0,21	0,68	0,19	0,57	0,08	0,66	0,81	0,74	1,00						
Mg	0,05	0,05	-0,02	-0,08	-0,25	0,82	-0,07	0,02	0,40	0,49	0,45	0,12	0,35	0,26	0,62	0,12	0,58	0,08	0,58	0,88	0,72	0,77	1,00					
Fe	-0,37	-0,42	-0,40	0,19	-0,09	0,00	-0,07	0,09	0,08	0,09	-0,09	0,04	-0,05	0,67	0,23	0,00	0,32	-0,28	0,07	-0,04	0,07	-0,05	0,09					
Mn	-0,50	-0,42	-0,50	-0,19	-0,28	0,09	-0,27	0,11	0,19	0,17	0,02	0,11	-0,08	0,49	0,24	-0,14	0,35	-0,25	0,07	0,04	0,23	0,03	0,18	0,61	1,00			
Hg	-0,40	-0,44	-0,45	-0,15	-0,24	0,04	-0,26	0,10	0,09	0,11	-0,08	0,03	-0,01	0,55	0,28	-0,14	0,42	-0,30	0,08	0,02	0,14	-0,05	0,20	0,82	0,77	1,00		
Si	0,27	0,15	0,09	0,45	-0,02	0,04	0,35	-0,06	-0,19	0,07	0,01	-0,07	0,32	0,38	0,11	0,13	0,15	0,14	0,12	0,25	-0,06	-0,03	0,24	0,31	0,04	0,12	1,00	

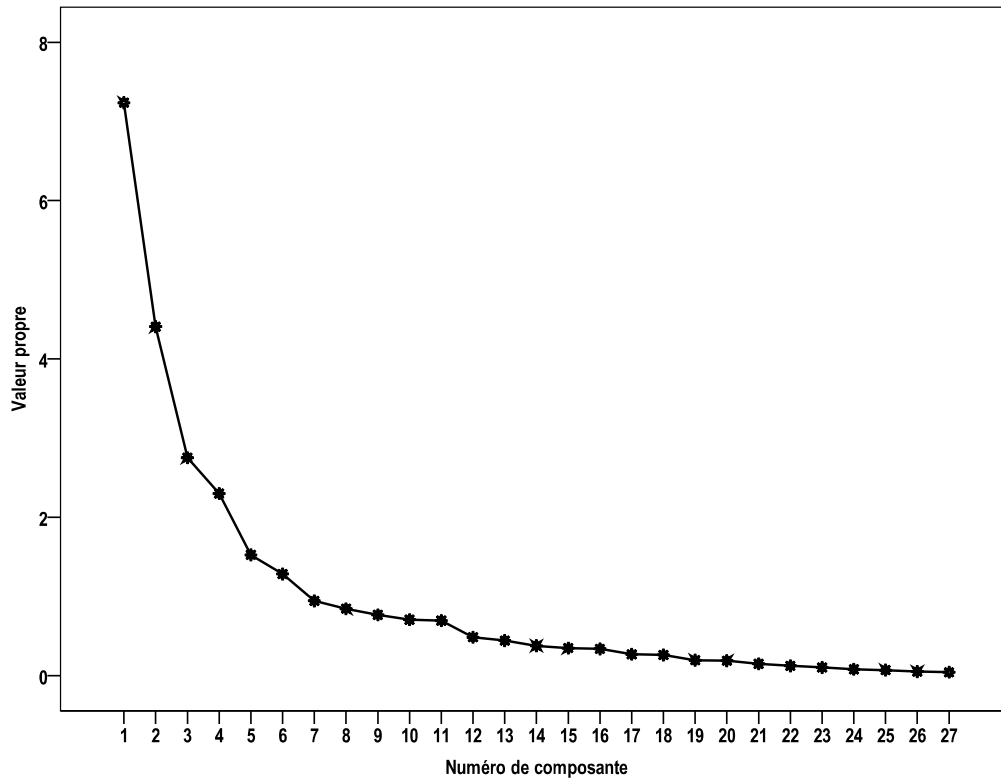


Figure 2 : Graphique des valeurs propres pour l'analyse en composante principale

De la figure 2, les cinq (5) premières composantes ont été extraites et utilisées pour les analyses. Elles représentent une variance totale expliquée de 67,92 %

(tableau 4) dont les deux premières expliquent à elles seules 43,66%.

Tableau 4 : Variance totale expliquée des variables étudiées pour toutes les stations

Composante	Variance totale expliquée		
	Valeurs propres initiales		
	Total	% de la variance	% cumulés
1	7,31	27,06	27,06
2	4,48	16,60	43,66
3	2,75	10,18	53,84
4	2,29	8,47	62,31
5	1,51	5,61	67,92

Les composantes principales sont obtenues par combinaison linéaire des variables initiales qui leurs sont plus ou moins corrélées. Ces composantes définissent donc un espace de dimension réduite dans lequel sont projetées les variables initiales rendant compte du maximum de l'information. Dans le tableau 5

sont représentées les valeurs des coefficients de corrélations liant les variables aux cinq composantes. Nous avons représenté en grisé les corrélations les plus significatives, c'est-à-dire celles qui, parmi les variables, expliquent le mieux chacune de ces composantes.

Tableau 5 : Coefficients de corrélation entre les variables et les 5 premières composantes

Variables	Composantes				
	1 27,06%	2 16,60%	3 10,17%	4 8,46%	5 5,61%
Mg	0,916	0,094	0,101	-0,043	-0,129
K	0,903	-0,058	-0,027	0,183	0,165
Cond	0,894	-0,041	-0,034	0,222	-0,027
Na	0,892	-0,065	0,160	0,129	-0,077
Ca	0,779	0,037	-0,222	0,162	-0,154
IA	0,739	0,360	0,060	-0,082	0,357
IT	0,694	0,142	0,095	0,030	0,553
IC	0,670	0,488	0,048	-0,162	0,262
Nt	0,550	0,148	-0,028	0,447	-0,024
Ptot	0,531	-0,144	0,301	0,490	0,002
Fe	-0,031	0,877	0,120	0,008	-0,001
Hg	0,087	0,861	-0,096	-0,065	-0,212
UV254	0,236	0,779	0,256	0,030	0,129
Mn	0,115	0,777	-0,183	0,080	-0,222
Od	0,016	-0,625	0,299	-0,269	-0,040
pH	-0,017	-0,583	0,533	-0,089	-0,319
T	0,153	-0,535	0,226	-0,340	0,288
MES	-0,158	-0,199	0,737	0,112	0,070
Turb	-0,150	0,066	0,720	0,054	0,339
Si	0,105	0,253	0,682	-0,289	0,007
IPEB	0,091	-0,292	0,589	0,158	-0,091
COT	0,378	-0,007	0,542	-0,086	-0,111
PO ₄ ³⁻	0,111	0,006	0,244	0,790	-0,209
NH ₄ ⁺	0,486	0,071	-0,176	0,675	-0,051
NO ₃ ⁻	0,041	0,141	-0,082	0,504	0,092
IB	0,161	-0,067	0,129	0,043	0,716
E	-0,189	-0,189	-0,128	-0,144	0,660

La figure 3 représente les stations de prélèvement dans les plans recomposés à partir des composantes 1 et 2. De cette représentation, il ressort que les stations de prélèvement sont regroupées en cinq grands groupes. Dans la partie positive de la composante 2, le groupe I est composé des stations E1, S1 et S10. Les stations des lacs 2, 3 et 4 situées dans la partie négative des composantes 1 et 2 contribuent à la formation du groupe II. Les groupes IV et V se distinguent particulièrement sur la composante 1. Le groupe III est constitué des stations présentant un état intermédiaire sur les composantes. Dans l'optique d'un suivi régulier de la qualité des eaux, la possibilité de réduire le nombre de variable d'étude tout en minimisant la perte d'informations représente un réel intérêt dans la gestion des milieux aquatiques. En effet, un nombre réduit

d'analyses est synonyme de gain de temps. Des trois premières composantes de l'ACP précédente, nous avons retenu pour construire une ACP réduite une ou deux variables pertinentes par composante. Ainsi, ont été retenu pour la composante 1, la conductivité et le magnésium; pour la composante 2, l'absorbance UV254 et le pH et enfin pour la composante 3 les matières en suspension et l'indice permanganate. Le pourcentage de variance expliquée par les deux premières composantes pour ce jeu de variables est de 64,35% et la projection des six variables dans le plan principal est donnée par la figure 4. La projection des stations moyennes dans le plan de cette ACP réduite et la description de leur niveau trophique sont décrites par figure 5.

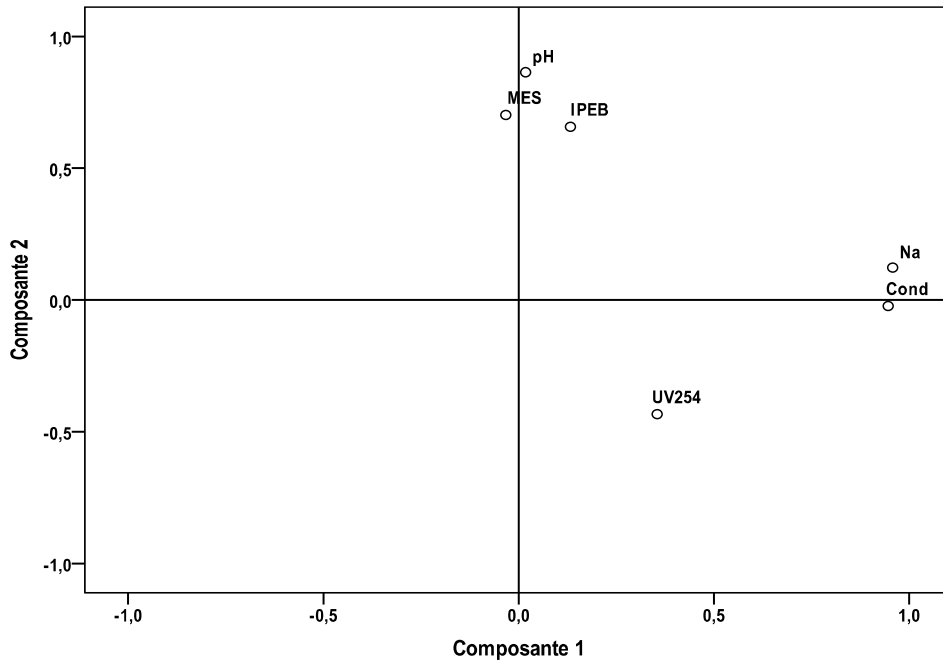


Figure 3 : Représentation des stations de prélèvement dans le plan des composantes 1 et 2

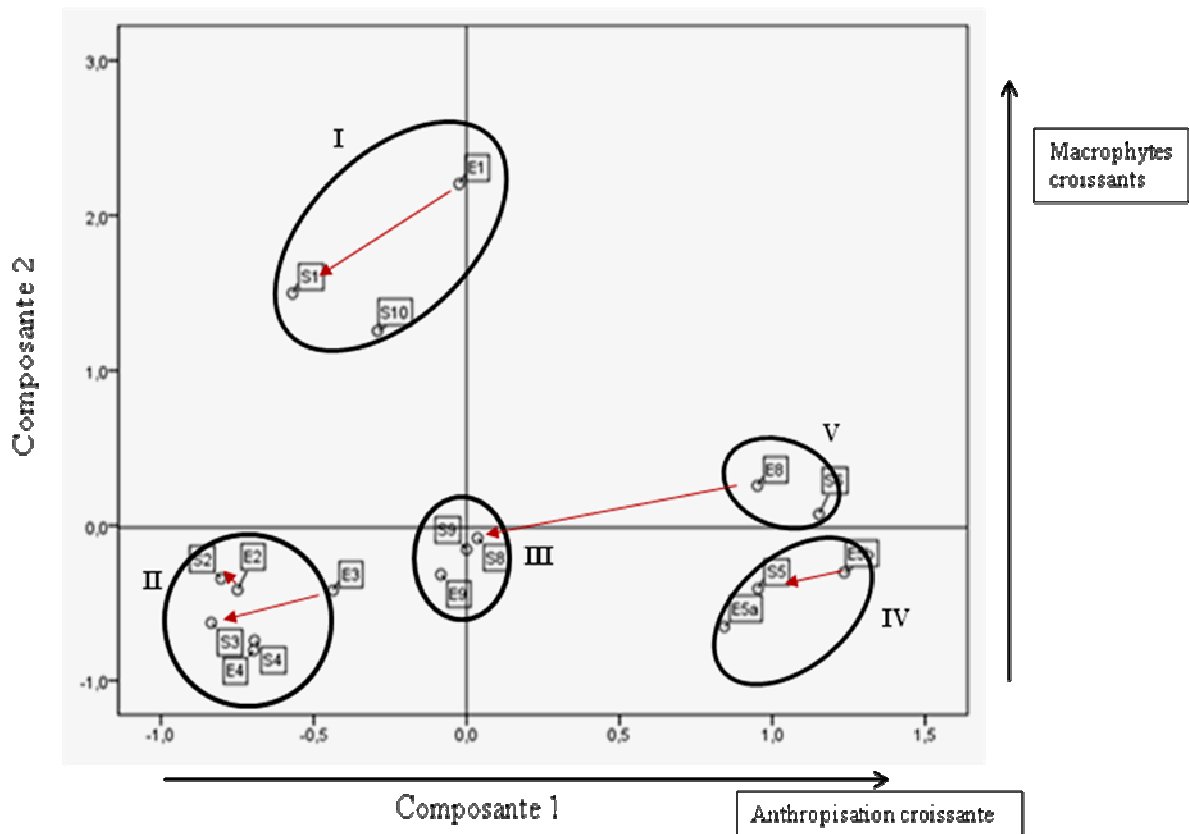


Figure 4 : Projection des six variables sur le plan principal de l'ACP réduite

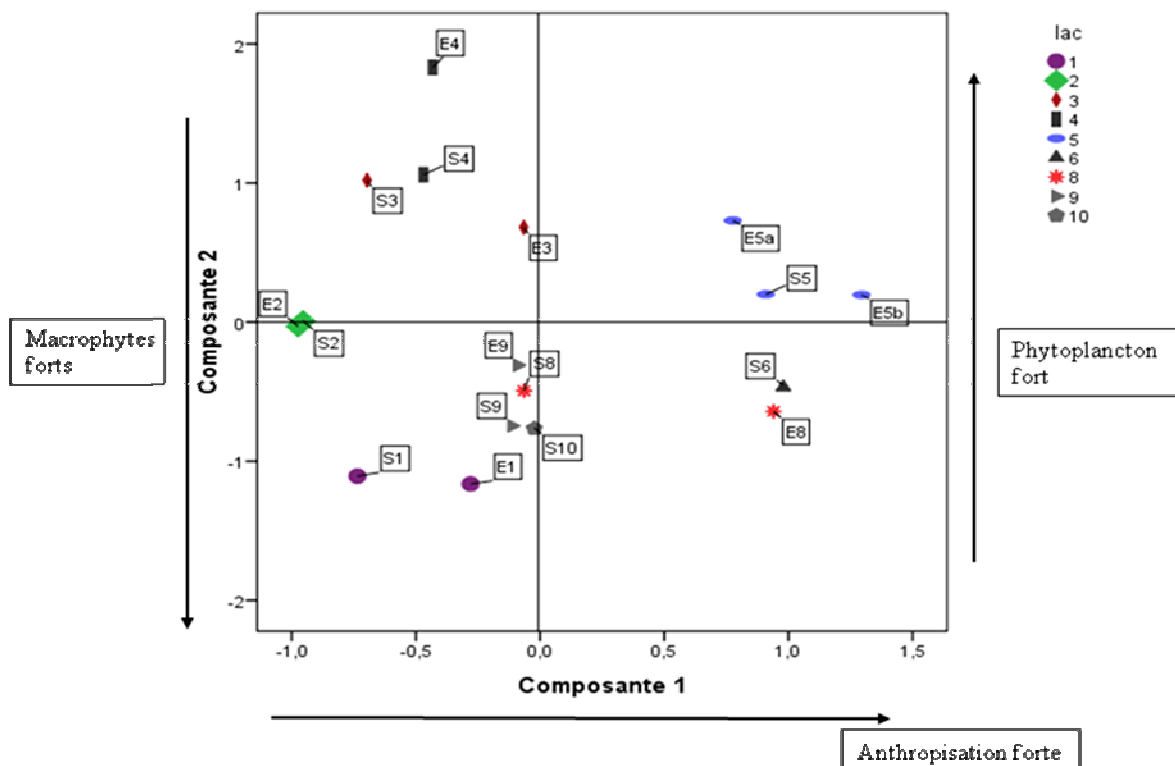


Figure 5 : Représentation de la dispersion des stations et leur état trophique dans le plan principal de l'ACP réduite

DISCUSSION

La matrice de corrélation des variables étudiées a montré une corrélation entre le pH et l'Oxygène dissous (Od). Cette corrélation est une des caractéristiques essentielles des milieux eutrophes aussi bien pour le développement des phytoplanctons que pour les macrophytes. Il est en effet admis que la photosynthèse lors d'un développement phytoplanctonique consomme les formes acides du carbone minéral en augmentant la valeur du pH. De même, la respiration dégage de l'Oxygène dissous dans le milieu ; ce qui est traduit par un fort taux d'oxygène dissous mesuré en début de matinée (Khan & Ansari, 2005). Dans le cas du développement des macrophytes, la réduction des échanges air-eau et l'exsudation de composés acides par les macrophytes abaissent respectivement l'Oxygène dissous et le pH (Lachavanne, 1980; Scheffer & Van Nes, 2007). Selon Kim et Kim (2000) la présence de macrophytes sur un plan d'eau diminue les radiations solaires dans les eaux empêchant par la même occasion la croissance des algues et donc une augmentation du pH. Les corrélations fortes observées entre conductivité et paramètres à caractères minéral pourraient être liées

au substrat. Or la nature granitique du substrat rocheux de notre site ne les justifie pas (Leblond, 1984). Ces corrélations ne peuvent être attribuées qu'à des processus non naturels liés à l'activité humaine tels que les eaux usées (Helena *et al.*, 2000). L'existence d'une corrélation entre la conductivité et NH_4^+ conforte cette hypothèse.

Analyse en composante principale : L'analyse en composante principale appliquée dans un premier temps à 27 variables mesurées sur 17 stations réparties sur l'ensemble du système lacustre de Yamoussoukro a permis d'obtenir un nombre limité de composantes (5) non corrélées.

La composante 1 comptant pour 27,06% des variances est constituée essentiellement de la conductivité, des variables minérales (K, Mg, Na, Ca) et des fluorophores A, C et T caractéristiques des matières organiques en partie. Cette composante montre 8 variables dont les coefficients sont supérieurs à 0,6. Ces variables sont majoritairement dépendantes de l'activité anthropique, notamment humaine (Elhatip *et al.*, 2008; Liu *et al.*, 2003; Omo-Irabor *et al.*, 2008). Les fluorophores A, C, T caractéristiques des matières organiques (Spencer *et*

al., 2007) n'influencent pas uniquement cette composante mais également d'autres composantes. Cela pourrait témoigner d'une certaine diversité d'origine de la matière organique dans ces eaux. La fraction de la matière organique sur la composante 1 est très probablement d'origine allochtone. La composante 1 qui est caractéristique des apports anthropiques organiques et minéraux peut donc être reliée ici, à la notion de potentiel trophique des eaux. La composante 2 (16,60% de la variance) est constituée dans sa partie positive par certains métaux (Fe, Hg, Mn), l'absorbance UV254 et une partie des fluorophores A et C. Sa partie négative est composée des variables Oxygène dissous, pH et Température. Cette composante traduit les processus induits par les macrophytes qui comme précédemment signalé, abaissent les valeurs de l'oxygène dissous, rendant le milieu plus réducteur et plus acide (coefficient négatif du pH). Ces conditions favorisent le relargage par les sédiments des métaux Fe, Hg et Mn présents sur cette composante. L'absorbance UV254 traduit une certaine forme de matière organique due à la présence de macrophytes. En effet, nous avons montré lors d'un projet pilote de culture de jacinthe d'eaux en bacs, que la croissance de ces macrophytes entraînait une augmentation de l'absorbance UV à 254 nm (Lhote, 2000). Une explication de ce phénomène est que les macrophytes exsudent des molécules aromatiques (Hilt & Gross, 2008). Ces molécules exsudées expliquent la présence des fluorophores A et C qui absorbent fortement dans l'UV.

La composante 3 (10,17% de la variance) est caractérisée par les variables pH, MES, turbidité, Silicium, une partie des matières organiques (COD, IPEB) ainsi que la température. Cette composante traduit certainement la présence d'une fraction de la matière organique générée dans le milieu par la dégradation du phytoplancton comme en témoigne la présence des MES (ici majoritairement d'origine algale), de la turbidité (matières colloïdales) et du pH (Hilton *et al.*, 2006; Mulderij *et al.*, 2007; Scheffer & Van Nes, 2007). L'indice permanganate mesuré sur l'eau brute (IPEB) tire essentiellement sa valeur de l'oxydation par le permanganate des cellules phytoplanctoniques. Cette composante peut être alors associée au niveau phytoplanctonique.

La composante 4 est constituée des paramètres caractérisant les nutriments azotés et phosphorés. Ces nutriments, excepté le phosphore total, l'azote total et l'ammonium (P_{tot}, N_t et NH₄⁺) semblent traduire les processus de recyclage interne des lacs occupés par

les macrophytes (présence de T avec un coefficient négatif).

La composante 5 qui est constituée d'une partie des fluorophores B, A, T et du potentiel redox E (coefficient positif) est d'une interprétation moins aisée. Cependant, la présence des fluorophores B et T qui ne témoignent que de l'activité microbienne (Baker *et al.*, 2003; Spencer *et al.*, 2007) pourrait être la base de l'interprétation de cette composante. Cette activité microbienne peut être en relation avec les apports anthropiques comme le montre la présence du fluorophore T sur la composante 1 des apports anthropiques.

Représentation des stations étudiées dans le plan des composantes 1 et 2 :

Les 17 stations de prélèvements représentées à la figure 3 peuvent être regroupées en 5 groupes selon leur niveau d'anthropisation et couverture par les macrophytes. Ainsi, les stations E1, S1 et S10 (groupe I) qui se trouvent dans la partie positive de la composante 2 correspondent aux lacs (1 et 10) situés aux deux entrées du système lacustre, dans des zones relativement peu anthropisées mais avec de fortes densités de macrophytes. Le groupe II comprend les stations des lacs 2, 3, 4 situés dans la partie négative des composantes 1 et 2. Ces lacs comptent parmi les moins anthropisés et ne sont pas envahis de macrophytes. Le groupe III constitué des stations E8, S8 et E9 est relativement plus anthropisé que le groupe II. Ces lacs présentent un niveau intermédiaire d'envahissement mixte par les macrophytes et le phytoplancton. Les groupes IV et V regroupent les lacs les plus anthropisés. La position de S6 pourtant très envahi par les lotus ne se trouve pas dans la position attendue correspondant à une valeur positive forte de son facteur sur la composante 2. Cela pourrait être dû à une forte anthropisation par les bovins qui occupent les berges de ce lac en ce point et qui créent des conditions opposées à celles produites par les macrophytes (clarification des eaux) augmentant en particulier les valeurs des paramètres MES, turbidité et pH.

On observe globalement, en suivant l'évolution des points entre les entrées et les sorties (sens des flèches), un déplacement des points dans le sens des valeurs négatives de la composante 1 (anthropisation décroissante). Ce déplacement pourrait découler du processus naturel d'autoépuration du milieu

Analyse en composante principale réduite : La figure 4 qui donne la projection des six variables retenues pour cette ACP montre que la composante 1

décrite par les variables conductivité (Cond.) et sodium (Na) est toujours rattachée aux apports anthropiques essentiellement d'origine urbaine caractéristique de ce système lacustre. Cette composante peut donc toujours être assimilée à la composante du potentiel trophique. Les variables pH, MES et IPEB décrivant la partie positive de la composante 2 sont des variables dont les valeurs sont liées au développement phytoplanktonique. En effet, les fortes valeurs des MES dans ce milieu ont essentiellement pour cause la présence de cellules du phytoplankton. Il en est de même pour le pH dont les valeurs sont influencées par la photosynthèse qui a lieu dans la colonne d'eau. Enfin, les valeurs de l'IPEB traduisent une production autochtone de matière organique associée aux phytoplanktons. A cette partie positive de la composante 2, l'on peut attribuer le terme de niveau trophique phytoplanktonique. La partie négative de la composante 2 est représentée uniquement par la variable UV254. Mais elle décrit également des eaux à pH faible, à teneurs faibles en MES et IPEB avec des valeurs d'UV relativement fortes. Cet ensemble de caractéristiques décrit des eaux où la présence de macrophytes est importante. Il est donc logique d'attribuer à cette partie négative de la composante 2 le terme de niveau trophique macrophytaire. Dans cette ACP réduite, la composante 2 synthétise les informations sur les niveaux trophiques des composantes 2 et 3 de l'ACP générale.

La disposition des stations de la figure 5 montre qu'il existe une forte similitude avec celle de l'ACP générale (figure 3). En effet, comme pour l'ACP générale, les coordonnées de la composante 1 (niveaux trophiques) montrent que les stations les plus anthropisées appartiennent aux lacs 5 et 6 situés en aval du système lacustre et les moins anthropisées sont celles du lac 2

protégé par une enceinte en béton. Les qualités d'eaux en entrée et sortie de ce lac sont très voisines. Selon la composante 2, les stations E3, S3, E4 et S4 sont les points ayant le plus fort développement phytoplanktonique (en particulier E4) alors que les stations des lacs 1, 10 et la sortie du lac 9 constituent les lacs ayant la plus forte production de macrophytes.

L'analyse de la qualité des eaux génère des données complexes et multidimensionnelles nécessitant l'utilisation d'outils statistiques multidimensionnels pour l'interprétation des informations sous-jacentes. Dans cette étude, la qualité des eaux du système lacustre de Yamoussoukro a été analysée à partir de données de 27 paramètres physico-chimiques provenant de 17 stations réparties sur 9 lacs.

Les résultats provenant de l'analyse en composante principale ont permis de dissocier les causes (apports anthropiques expliqués par la composante 1) des conséquences (niveaux trophiques macrophytaires et phytoplanktoniques) des processus d'eutrophisation qui ont lieu dans ces lacs. Parmi ces processus, celui conduisant au développement des macrophytes est majoritaire. Cela est justifié par le fait qu'il est rattaché à la composante 2 qui possède une variance expliquée plus forte que la composante 3 (développement phytoplanktonique).

L'ACP est donc un outil qui offre la possibilité de simplifier l'étude des milieux aquatiques et d'en alléger les coûts par la réduction du nombre de variables à prendre en compte. Nous avons montré au cours de cette étude qu'il est possible, dans la perspective de création d'un outil de gestion, de simplifier le modèle initialement construit à partir de 27 variables pour le ramener à la mesure de six variables relativement simple et moins onéreux.

REFERENCES

- Aw, S. (2009). Etudes physico-chimiques et microbiologiques d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), pp. 185. Poitiers, France: Université de Poitiers.
- Baker, A., Inverarity, R., Charlton, M. & Richmond, S. (2003). Detecting river pollution using fluorescence spectrophotometry: Case studies from the Ouseburn, NE England. *Environmental Pollution* 124, 57-70.
- Elhatip, H., Hinis, M. A. & Gülbahar, N. (2008). Evaluation of the water quality at Tahtali dam watershed in Izmir-Turkey by means of statistical methodology. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 22, 391-400.
- Felipe-Sotelo, M., Andrade, J. M., Carlosena, A. & Tauler, R. (2007). Temporal characterisation of river waters in urban and semi-urban areas using physico-chemical parameters and chemometric methods. *Analytica Chimica Acta* 583, 128-137.

- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J. M. & Fernandez, L. (2000). Temporal evolution of groundwater composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Research* 34, 807-816.
- Hilt, S. & Gross, E. M. (2008). Can allelopathically active submerged macrophytes stabilise clear-water states in shallow lakes? *Basic and Applied Ecology* 9, 422-432.
- Hilton, J., O'Hare, M., Bowes, M. J. & Jones, J. I. (2006). How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers. *Science of The Total Environment* 365, 66-83.
- Kazi, T. G., Arain, M. B., Jamali, M. K., Jalbani, N., Afridi, H. I., Sarfraz, R. A., Baig, J. A. & Shah, A. Q. (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 72, 301-309.
- Khan, F. A. & Ansari, A. A. (2005). Eutrophication: An ecological vision. *Botanical Review* 71, 449-482.
- Kim, Y. & Kim, W.-J. (2000). Roles of water hyacinths and their roots for reducing algal concentration in the effluent from waste stabilization ponds. *Water Research* 34, 3285-3294.
- Kowalkowski, T., Zbytniewski, R., Szpejna, J. & Buszewski, B. (2006). Application of chemometrics in river water classification. *Water Res* 40, 744-752.
- Lachavanne, P. J. B. (1980). Les manifestations de l'eutrophisation des eaux dans un grand lac profond: le Léman (Suisse). *Schweizerische Zeitschrift fur Hydrologie* 42, 127-154.
- Leblond, P. (1984). Contribution aux études géologiques en Côte d'Ivoire. Région de Yamoussoukro, Station expérimentale de l'ENSTP pp. 150. Bordeaux, France: Université de Bordeaux 1.
- Lhote, A. (2000). Critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'un système lacustre tropical. Approche statistique, pp. 154. Poitiers, France: Université de Poitiers.
- Liu, C.-W., Lin, K.-H. & Kuo, Y.-M. (2003). Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease area in Taiwan. *The Science of The Total Environment* 313, 77-89.
- Menció, A. & Mas-Pla, J. (2008). Assessment by multivariate analysis of groundwater-surface water interactions in urbanized Mediterranean streams. *Journal of Hydrology* 352, 355-366.
- Mulderij, G., Van Nes, E. H. & Van Donk, E. (2007). Macrophyte-phytoplankton interactions: The relative importance of allelopathy versus other factors. *Ecological Modelling* 204, 85-92.
- Omo-Irabor, O. O., Olobaniyi, S. B., Oduyemi, K. & Akunna, J. (2008). Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: A case study of the Western Niger Delta, Nigeria. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 33, 666-673.
- Ouyang, Y. (2005). Evaluation of river water quality monitoring stations by principal component analysis. *Water Research* 39, 2621-2635.
- Scheffer, M. & Van Nes, E. H. (2007). Shallow lakes theory revisited: Various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. *Hydrobiologia* 584, 455-466.
- Shrestha, S. & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software* 22, 464-475.
- Simeonov, V., Stratis, J. A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A., Sofoniou, M. & Kouimtzi, T. (2003). Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water Research* 37, 4119-4124.
- Spencer, R. G. M., Baker, A., Ahad, J. M. E., Cowie, G. L., Ganeshram, R., Upstill-Goddard, R. C. & Uher, G. (2007). Discriminatory classification of natural and anthropogenic waters in two U.K. estuaries. *Science of the Total Environment* 373, 305-323.
- Strobl, R. O. & Robillard, P. D. (2008). Network design for water quality monitoring of surface freshwaters: A review. *Journal of Environmental Management* 87, 639-648.
- Swaine, M. D., Adomako, J., Ameka, G., de Graft-Johnston, K. A. A. & Cheek, M. (2006). Forest river plants and water quality in Ghana. *Aquatic Botany* 85, 299-308.
- Vega, M., Pardo, R., Barrado, E. & Debán, L. (1998). Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis. *Water Research* 32, 3581-3592.