

Etude Analytique des Caractéristiques Chimiques d'un Lac Eutrophe en Milieu Tropical : La Conductivité comme Indicateur de Trophie du Lac de Buyo (Côte d'Ivoire).

Bernard Yapo Ossey^{*}, Véronique Mambo, Sanogo Tidou Abiba, Pascal Valentin Houenou.

Laboratoire des Sciences de l'Environnement (L.C.E). Unité de Formation et de Recherche en Sciences et Gestion de l'Environnement (UFR-SGE). Université d'Abobo-Adjamé, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

(Reçu le 23/06/2005 – Accepté après corrections le 15/10/2007)

Summary

The eutrophication of Buyo Lake and the resulting deterioration of the quality of its water are revealed by the proliferation of an important algal biomass. This phenomenon impedes the global mineralization of the waters of the lake, which can be measured by its conductivity. The latter is related to the presence of dissolved inorganic solid materials, and depends also on the temperature of the waters, which are warmer during low water periods. The current work allowed establishing the relation between the ionic composition and the trophic state of the lake.

The hydrochemical profile of the waters was studied using the results of the analyses of major ions, such as, major cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) and major anions (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). Physical parameters of the waters, such as, pH, temperature, dissolved oxygen and conductivity, was measured. The global pollution of the lake was studied by measuring COD, suspended solids, total phosphorus and kjeldhal nitrogen. The biological activity was evaluated by the measurements of a-chlorophyll and pheopigments. All these measurements was implemented in the downstream side of the reservoir between October 1996 and June 1997.

The study revealed that the retained water (in the lake) exhibits an alcalinity due to bicarbonates, showing the predominance of bicarbonate ions (HCO_3^-) among the anions and the predominance of calcium and magnesium ions among the cations. The retained water is characterised by a mix hydrofacies: bicarbonated calcic and magnesian. The longitudinal evolution of the ions follows a negative repartition gradient North-South, which agrees with the one of the conductivity of the waters and the trophic level of the transition lake Eutrophic-Pleistotrophic in the upstream side and Mesotrophic-Eutrophic at the downstream side. The study showed that conductivity could be used as the trophic indicators.

Keys words: Eutrophication, conductivity, lake of Buyo, tropical.

Résumé

L'eutrophisation du lac de Buyo qui se manifeste par la prolifération d'une biomasse algale importante compromet notamment la minéralisation globale des eaux du lac qui peut être mesurée par sa conductivité électrique. Celle-ci est liée à la présence des matières solides inorganiques dissoutes mais aussi, dépend de la température des eaux qui sont plus chaudes en périodes d'étiage et de fin étiage. Le présent travail a permis d'établir le rapport entre la composition ionique et l'état de trophie du lac. Le profil hydrochimique des eaux a été étudié à l'aide des résultats des analyses des ions majeurs à savoir : les cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et les anions majeurs (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-). Cette retenue d'eau présente une alcalinité bicarbonatée, traduisant l'abondance des ions bicarbonates (HCO_3^-) parmi les anions et les ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) parmi les cations. La retenue se caractérise ainsi par un hydrofaciès mixte bicarbonaté calcique et magnésien. L'évolution longitudinale des ions qui suit un gradient de répartition Nord-Sud négatif est en accord avec celle de la conductivité des eaux et le niveau de trophie du lac de transitions eutrophe-hypereutrophe en amont et mésotrophe-eutrophe en aval. Il ressort de cette étude que la conductivité pourrait faire partie des indicateurs trophiques à retenir dans l'évaluation de l'état de trophie des retenus d'eaux.

Mots clés : Eutrophisation, conductivité, lac de Buyo, tropical.

* Auteur de correspondance, E-mail : yapoci@hotmail.com ou pvhouenou@aviso.ci

1. Introduction

L'eutrophisation est définie au sens habituel comme l'enrichissement des eaux en nutriments, essentiellement le phosphore et l'azote qui vont favoriser la croissance des végétaux. Plus brièvement, l'eutrophisation est le processus d'enrichissement d'une masse d'eau en sels minéraux et en matières organiques [1]. Les caractéristiques chimiques des eaux des lacs sont pour la plupart définies par le taux de solides dissous (TDS), la conductivité des eaux, l'alcalinité, l'acidité et les principaux ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , et HCO_3^- de l'alcalinité) [2]. Ces caractéristiques chimiques exprimées par les concentrations de ces divers sels minéraux dans le milieu, traduisent en effet l'ampleur des différentes réactions chimiques qui s'y produisent. Il convient donc d'en tenir compte dans l'examen de l'état trophique des lacs. Malheureusement, très peu d'études se sont consacrées à l'utilisation des composés minéraux dans l'étude de l'eutrophisation des lacs.

En effet, l'eutrophisation des cours d'eau étant un phénomène qui se traduit par une implosion d'algues dans les cours d'eau. Elle est consécutive comme nous l'avons rappelé plus haut, à l'enrichissement du milieu en nutriment dont les plus importants sont l'azote et le phosphore. C'est pourquoi, plusieurs études ont mis en évidence le rôle des nutriments azotés et phosphorés dans la genèse des processus conduisant à l'eutrophisation [3,4,5]. La recherche de modèle simplifié a fait l'objet de nombreuses recherches [6,7,8] donnant lieu à des couplages de données physico-chimiques et biologiques. Pour mesurer le niveau de trophie des cours d'eau, des échelles ont été développées, constituant des niveaux guide, dont la plupart prennent en compte les nutriments azotés et phosphorés auxquels on associe la chlorophylle-a et le zooplancton appartenant à la biocénose (facteurs

biologiques). Cette approche a déjà été utilisée dans l'évaluation de l'état de trophie du lac de Buyo [9]. Plusieurs autres indices de classification ont été élaborés et de manière chronologique, l'Indice Biotique [10], l'Indice Biologique de Qualité Générale [11], l'utilisation des macrophytes [12] et du phytoplancton [13]; le Trophic Diatom Index [14].

En réalité, on amalgame sur les causes et les conséquences, car toutes les méthodes utilisées çà et là semblent jusque là traduire les symptômes et les causes de l'eutrophisation, plutôt que ses effets dans un système pourtant en évolution. En effet, l'ensemble des équilibres physico-chimiques et biologiques des systèmes aquatiques en cours d'eutrophisation sera perturbé lors de l'apparition du phénomène [8].

Par exemple, le développement de végétaux aquatiques, d'espèces vivantes nouvelles, engendre dans le milieu un nouvel état de son équilibre. Ceci est le signe d'un désordre impliquant pour les variables caractéristiques du système, une variation dont le sens à notre avis, pourrait constituer un meilleur critère d'évaluation de l'état vers lequel tend le système, donc un meilleur critère de son état trophique [8]. La minéralisation considérée comme un état du système pourrait constituer un critère de variation dont le gradient d'évolution pourrait être corrélé avec l'état de trophie. Nulle part, ce critère n'a été pris en compte. Ce qui a suscité l'intérêt de cette nouvelle approche que nous abordons dans cette étude.

En effet, à l'instar du lac de Buyo, la minéralisation de la plupart des eaux est largement dépendante des particules dissoutes dominée par huit ions majeurs, parmi lesquels figurent quatre cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et quatre anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^-). Pour les eaux naturelles de $\text{pH} > 8,3$, on y ajoute l'anion carbonate (CO_3^{2-}) souvent inexistant dans les eaux de surface. Ces ions majeurs sont des descripteurs de base de la qualité de l'eau. Ils permettent de décrire la

conductivité des eaux, expression de la minéralisation globale du milieu. Le gradient d'évolution temporelle et/ou spatiale de la conductivité des retenues d'eaux pourrait constituer un critère fiable d'évaluation de leur état de trophie.

A travers cette étude, nous essayerons d'évaluer l'influence du caractère minéral sur le processus d'eutrophisation en cours du lac de Buyo.

2. Méthodologie

2.1. Le milieu d'étude

Comme nous l'avons déjà mentionné^[9], le lac de Buyo faisant l'objet de la présente étude, est localisé dans la partie Nord de la région Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Le deuxième grand barrage hydroélectrique y est situé entre 01°14' et 07°03' de latitude Nord et 06°54' et 07°31' de longitude Ouest. Il occupe une superficie de 920 km², avec une capacité productive de 610 GWh.

La géologie de la région de Buyo est caractérisée par des formations libériennes, birimiennes et granitoïdes associées à l'orogénèse Eburnéenne. Ces formations sont composées pour l'essentiel de roches mères granitiques^[15], de métasédiments, de schistes et gneiss. Ces formations, sous l'influence d'un climat tropical humide sont altérées, lessivées sous forêts pour discriminer les différents types de sol de cette région. Ce sont ces sols qui vont être décuplés et entraînés dans les milieux récepteurs^[16]. Le bassin versant est agricole et caractérisé par un climat de régime tropical, avec des températures élevées. Le lac contrôle un bassin versant de 46250 km² et des polluants organiques et minéraux sont drainés dans cette retenue d'eau. Les pluies mensuelles supérieures à 100 mm s'étalent entre Avril et Novembre, les hauteurs maximales se produisent généralement en septembre. Les moyennes interannuelles sont comprises entre 1300 et 1800 mm. Sept mois peuvent être considérés comme plus pluvieux, il s'agit de l'intervalle allant d'avril à octobre.

Nous avons déjà évalué l'état de trophie du réservoir d'eau dans une étude préliminaire^[9]. Ces travaux se sont ensuite poursuivis au cours d'un cycle hydrologique annuel pour confirmer les résultats déjà obtenus à travers huit approches convergentes^[17]. Ces études ont montré que, le secteur en amont de Guessabo présente des caractéristiques physico-chimiques moins bonnes dues à une pollution organique. La présence de macrophytes flottants (*Eichhornia Crassipès*) en abondance dans cette partie du lac est l'expression physique de son eutrophisation. Le secteur en amont du lac est dans un état d'eutrophie plus avancé que la partie en aval^[17].

2.2. Echantillonnage et analyses au laboratoire

Les prélèvements d'échantillons d'eau ont été effectués en amont et en aval du lac. La collecte des données a été réalisée en début de saison des pluies, en période de crue, en période d'étiage et en période de fin d'étiage du fleuve Sassandra, principal cours d'eau alimentant le réservoir. Les stations de prélèvement ont été réparties selon le profil longitudinal (de l'amont vers l'aval) du lac en tenant compte des possibilités d'accès et les principales entrées et sorties d'eaux arrivant au barrage de Buyo. Neuf stations d'échantillonnage ont été saisonnièrement visitées dont six en aval du lac à Buyo et trois en amont à Guessabo. Ces 9 stations ont été retenues parmi 30 stations échantillonnées, suite à l'analyse des premiers résultats de la campagne exploratoire.

Les points de prélèvements retenus pour cette étude sont les suivants (Figure 1): en amont, Guessabo Pilier 7 (6° 45,02' N et 7° 59' W), Guessabo Pilier 3 (6° 45,08' N et 7° 59,11' W) et Guessabo Berge (6° 45,12' N et 7° 58,88 W); en aval, Buyo usine (6° 14,72 N et 7° 02,05' W), Buyo déversoir 1 (6° 45,08' et 7° 01,95' W),

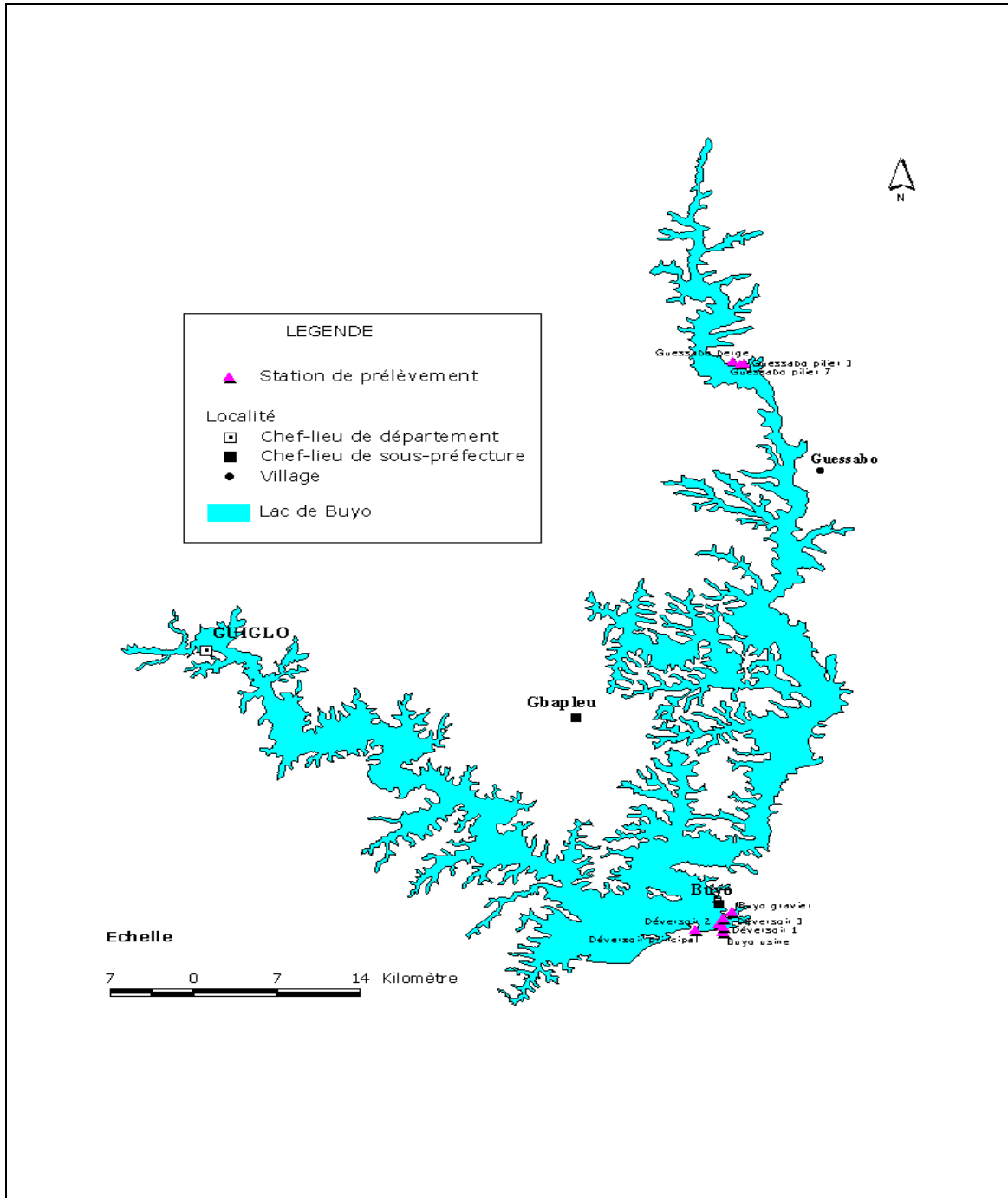


Figure 1 : Carte de localisation des points d'échantillonnage (a) zone véritable lacustre en aval : Buyo (b) zone fluviale en amont de Guessabo

Buyo déversoir 2 ($6^{\circ} 14,93' N$ et $7^{\circ} 02,21' W$), Buyo déversoir 3 ($6^{\circ} 16,06' N$ et $7^{\circ} 02,22' W$), Buyo gravier ($6^{\circ} 15,47' N$ et $7^{\circ} 01,38' W$) et Buyo déversoir principal ($6^{\circ} 14,47' N$ et $7^{\circ} 03,53' W$). L'échantillonnage, le conditionnement et les méthodes d'analyse des principaux

paramètres ont été effectués conformément aux méthodes normalisées AFNOR^[18] et sont résumés par Mambo *et al*^[9], puis par YAPO^[17].

2.3 Analyse statistique

Les données ont été soumises à une analyse statistique, le coefficient de

variation (CV en %) a été utilisé comme test d'homogénéité de nos résultats.

$$CV = \frac{\sigma}{x} \times 100, \text{ avec } \sigma = \text{écart-type et } x =$$

moyenne calculée.

Quand $CV < 2\%$, on admet que les mesures sont très homogènes ; $2\% < CV < 30\%$, on admet qu'elles sont homogènes ; $CV > 30\%$ les mesures sont considérées hétérogènes et les valeurs moyennes sont considérées moins représentatives du milieu. Par ailleurs un test de bilan ionique a été effectué pour nous assurer de la validité des valeurs mesurées, pour les principaux ions majeurs comme cela été fait dans les travaux de Potvin et al. [19].

Ce test consiste à vérifier si la somme des anions correspond bien à la somme des cations lorsque leur concentration respective est exprimée en milliéquivalents (méq). Le déséquilibre ionique se calcule par l'équation suivante :

$$DI \% = \frac{(\sum [C_i] - \sum [A_j])}{1/2 (\sum [C_i] + \sum [A_j])} \times 100$$

, où $\sum [C_i]$ est la somme des concentrations des "i" cations [Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+] et $\sum [A_j]$, la somme des concentrations des "j" anions [HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , CO_3^{2-}].

- Si $(\sum C_i)$ est égal à $(\sum A_j)$, le bilan est équilibré et le déséquilibre ionique DI (%) est faible.

- Si $(\sum C_i)$ est différent de $(\sum A_j)$, le bilan est déséquilibré et le déséquilibre ionique DI (%) est élevé. C'est un test de filtrage qui nous a permis de vérifier la validité des mesures effectuées. Les données correspondant à un déséquilibre de 25% doivent faire l'objet de vérification [19], et aucune donnée n'a été retenue pour correction dans notre étude.

Le diagramme de piper (diagramme triangulaire) traditionnellement utilisé pour l'étude des eaux souterraines, a permis de déterminer le faciès chimique des eaux du lac.

A l'aide du logiciel Aquakit [20], établi à partir d'un tableur Excel, les résultats sont

présentées en diagrammes ioniques moyens des états trophiques.

Pour rendre compte de la relation étroite entre la conductivité et la minéralisation des eaux, nous avons reconstitué par calcul la conductivité totale de l'eau du lac en additionnant les conductivités propres à chacun des ions, surtout celles des ions majeurs, à l'aide de la relation suivante :

$$\chi (\mu S / cm) = \sum \lambda_i C_i + \sum \lambda_j A_j \quad [21]$$

$C_i =$ concentration des "i" cations exprimée en mg/l,

- $A_j =$ concentration des "j" anions exprimée en mg/l

- $\lambda_i =$ conductivité limite des "i" cations exprimée en $\mu S/cm/mg/l$

- $\lambda_j =$ conductivité limite des "j" anions exprimée en $\mu S/cm/mg/l$.

Ce calcul a permis de mettre en évidence la contribution de chaque ion majeur à la conductivité des eaux.

Une Analyse en Composante Principale (ACP), particulièrement une ordination en Analyse de Redondance (RDA : Redundancy Analysis) avec le Logiciel de statistique CANOCO Version 4.0 a permis de faire des corrélations entre les différents paramètres chimiques des eaux du lac. Cette méthode d'analyse statistique a permis de nous rendre compte des liens entre les différents paramètres descripteurs de l'état de trophie du lac, les paramètres de sa minéralisation et la conductivité des eaux.

3. Résultats et discussion

Nos résultats, bien que datant d'une décennie sont encore d'actualité. En effet, avec un temps de séjour des eaux $TS = 0,33$ an et un taux de renouvellement de $2,6$ à 3 an^{-1} [17], on note une forte accumulation de matières nutritives doublée d'un renouvellement des couches d'eau chaque 3 ans ; ce qui contribue à une faible évolution temporelle de la plupart des paramètres de qualité des eaux. Nous avons relevé une faible variation des paramètres de qualité des eaux entre notre

étude en 1997^[9,17], et celle de Kassoum et Konan en 1989^[21].

Certes, quelques différences apparaissent dans les résultats, mais pour ce qui est de la qualité globale du lac, nous sommes en accord 8 ans après, ce qui nous permet de minimiser les variations pouvant exister pour ce qui est de la qualité globale des eaux du lac de Buyo, donc de son état de trophie. L'originalité de ce travail réside dans l'approche statistique utilisée pour l'évaluation de l'état de trophie du lac de Buyo déjà réalisé par MAMBO et al^[9], puis intensifié par notre travail^[17].

3.1. Caractérisation physico-chimique et biologique du lac de Buyo

Le tableau I présente les statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques et biologiques du lac. Pour chaque paramètre mesuré, sont indiqués le minimum et le maximum, la valeur médiane, l'écart type et le coefficient de variation.

Les coefficients de variations souvent élevés (allant de 6% à 148%, tableau I), traduisent l'asymétrie des mesures effectuées. Ainsi, les écarts maxima-minima élevés pour la plupart des mesures effectuées, traduisent des perturbations importantes du système lacustre. Les fluctuations saisonnières du plan d'eau sont donc importantes et perturbent considérablement le milieu. La masse d'eau est donc hétérogène et le lac de Buyo ne constitue pas encore un écosystème stabilisé^[21]. Toutefois, pour ce qui est de la température, du pH et de la conductivité, les coefficients de variation sont relativement faibles. On a respectivement 6%, 7% et 25% (cf Tableau I); ceux-ci semblent homogènes et peuvent constituer des paramètres intégrateurs et indicatifs de l'évolution du milieu. Le pH du lac est faiblement alcalin, ce qui pourrait justifier de sa faible minéralisation. Ce constat semble évident, car la quasi-neutralité des eaux (pH≈7) ne permet pas à une grande quantité des métaux d'exister sous formes d'ions libres. Selon Legendre *et al*^[22], de

façon générale, les lacs acides (pH<7) semblent plus minéralisés que les lacs alcalins (pH>7) et ces derniers, plus que les lacs ayant un pH près de la neutralité (pH≈7).

La minéralisation actuelle des eaux du lac de Buyo peut être la conséquence des interactions entre l'eau et les sols dans le système lacustre et son bassin versant. La composition chimique des eaux paraît alors liée à la lithologie et à la nature des sols. La conjugaison de ces divers facteurs pourrait conduire à des variations importantes des caractéristiques physico-chimiques des eaux. La faible conductivité des eaux du lac ($75,8 \pm 19,1 \mu\text{S/cm}$) laisse supposer une très faible mise en solution des minéraux sur le bassin versant.

3.2. Minéralisation des eaux du lac

3.2.1. Composition ionique

3.2.1.1. Anions majeurs

Aucun échantillon analysé ne présente de teneur appréciable en CO_3^{2-} ; toutes les valeurs obtenues sont quasiment nulles (pH<8,3). Cette absence des ions carbonates montre qu'ils n'ont pas d'influence sur l'alcalinité du lac. L'alcalinité moyenne des eaux du lac exprimée en HCO_3^- est de ($49,8 \pm 36,3$) mg/l^[17]. En aval, l'alcalinité varie entre 26,3 et 85,4 mg/l; en amont entre 24,1 et 131,8 mg/l dans l'épilimnion. Par contre, dans l'hypolimnion elle varie entre 27,2 et 90,3 mg/l en aval puis entre 24,1 et 122 mg/l en amont^[9,17]. Les ions bicarbonates sont les plus abondants des anions et conditionnent l'alcalinité du milieu. En effet, les bassins versants sédimentaires peu riches en roches carbonatées (grès, schistes) sont liés à des lacs peu minéralisés.

Selon Legendre *et al*^[22], $[\text{HCO}_3^-] = [\text{Alcalinité totale}] / [1 + \{2 \times 10^{(\text{pH}-10,25)}\}]$. Le gaz carbonique libre en solution dans l'eau est étroitement lié d'une part, au carbonate et au bicarbonate de calcium, sels très répandus, et d'autre part, à la synthèse chlorophyllienne^[23]. La relation d'équilibre suivante est bien connue :

Tableau I : Paramètres physico-chimiques et biologiques du lac de Buyo

Paramètres	Symbole	Intervalle	Valeurs médianes	Ecart-type σ	Coefficient de variation en %
Variables mesurées					
Paramètres physico-chimiques					
Température	T°C	26,4 – 32,3	29,1	1,7	6
pH	pH	4,8 – 8,6	7,2	0,5	7
Conductivité	Cond ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	47,3 – 102,2	75,8	19,1	25
Transparence disque de Secchi	Transp.(m)	0,5 – 2,5	1,8	0,6	35
Oxygène dissous	O ₂ (mg/l)	0,2 – 9,88	4,0	2,8	69
Bilan nutritif des eaux					
Phosphore total	Pt ($\mu\text{g}/\text{l}$)	100 -450	277,3	132,1	48
OrthoPhosphates (PO ₄ ³⁻)	PO ₄ ($\mu\text{g}/\text{l}$)	4 – 162,5	29,8	44	148
Azote minéral	Inorg-N ($\mu\text{g}/\text{l}$)	14 - 118	38,8	24,5	63
Azote organique	Org-N ($\mu\text{g}/\text{l}$)	1282 - 9472	4576,3	2964	65
Nitrates	N-NO ₃ ⁻ ($\mu\text{g}/\text{l}$)	2,6 - 54	16,1	13,9	86
Nitrites	N-NO ₂ ⁻ ($\mu\text{g}/\text{l}$)	< LDM	nd	nd	nd
Ammonium	N-NH ₄ ($\mu\text{g}/\text{l}$)	5 - 33	17,0	7,2	42
Azote Kjeldhal	NTK ($\mu\text{g}/\text{l}$)	1400 - 9520	4622,5	2972	64
Production biologique des eaux					
Chlorophylle	Chl-a ($\mu\text{g}/\text{l}$)	5 – 14	9,5	2,4	26
Phéopigments	Phéo ($\mu\text{g}/\text{l}$)	2,3 – 5,6	3,7	1,1	29
Caractéristiques chimiques des eaux					
Potassium	K ⁺ (mg/l)	1,7 – 3,5	2,5	0,6	25
Carbonate	CO ₃ ²⁻ (mg/l)	0	0	0	0
Bicarbonate	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	24,1- 131,8	49,8	36,3	73
Sulfate	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	0,05 – 1,4	0,4	0,4	102
Chlorures	Cl ⁻ (mg/l)	0,5 – 7,1	3,3	2,3	68
Sodium	Na ⁺ (mg/l)	2,1 – 3,9	3,1	0,5	16
Magnésium	Mg ²⁺ (mg/l)	1,3 – 2,3	1,9	0,3	14
Calcium	Ca ²⁺ (mg/l)	2,2 – 4,5	3,3	0,8	24

LDM=Limite de Détection de la Méthode

nd=non déterminé

$$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$$
 En effet, l'espèce Ca(HCO₃)₂ est plus soluble que CaCO₃, et selon les conditions physico-chimiques, et particulièrement en zone tropicale où les températures moyennes des eaux sont supérieures à 25 °C (29,1± 1,7 °C pour le lac de Buyo), l'équilibre est plutôt déplacé de la gauche vers la droite [24].

Le carbonate de calcium (CaCO₃) précipite et forme les sédiments au fond du lac. Alors, le bicarbonate (HCO₃⁻) devient relativement peu abondant dans

l'épilimnion de même que le calcium. Par ailleurs, avec pH < 8,3, [HCO₃⁻] ≅ [Alcalinité totale] car [CO₃²⁻] est négligeable [25]. Le lac présente une alcalinité bicarbonatée qui varie suivant des gradients de répartition surface–fond et Nord-Sud positifs. Son alcalinité suit les fluctuations saisonnières : fortes en période d'étiage et faibles en période de crue [17, 21]. En ce qui concerne les ions sulfates (SO₄²⁻), leur concentration est supérieure à 0,5 mg/l, qui est une valeur minimale nécessaire à la croissance des algues dans

le milieu naturel ^[25]. En aval, les concentrations des ions chlorures varient de 0,49 à 10,55 mg/l dans l'épilimnion et de 0,49 à 10,65 mg/l dans l'hypolimnion, mais de 0,5 à 7,1 mg/l en amont, aussi bien dans l'épilimnion que dans l'hypolimnion. Ces valeurs sont suffisantes pour traduire la pollution du lac. En effet, la présence des ions chlorures a souvent été utilisée comme indice d'une pollution ^[25] et leur présence excessive dans l'eau présente des effets nuisibles sur la croissance de la flore aquatique et sur la faune aquatique.

3.2.1.2. Cations majeurs

Les rapports Mg/Ca sont de l'ordre de 0,61 en aval ($Mg/Ca = 1,9/3,1$) et de 0,56 en amont ($Mg/Ca = 1,9/3,3$). En général le rapport Mg/Ca est inférieur à 1 dans les eaux naturelles ^[25]. Ainsi le lac de Buyo pour lequel (Mg/Ca) < 1, malgré son niveau de vieillissement élevé ^[17], conserve encore son caractère de milieu naturel.

La concentration des ions Na^+ en aval varie de 2,19 à 3,74 mg/l dans l'épilimnion et de 2,1 à 3,51 mg/l dans l'hypolimnion. En amont, elle varie de 2,84 à 3,88 mg/l dans l'épilimnion et de 2,85 à 3,75 mg/l dans l'hypolimnion ^[17]. La concentration des ions K^+ qui atteint 3,5 mg/l semble justifier le niveau de trophie du lac. La faible concentration de ces deux ions dans le lac est un facteur de croissance des végétaux aquatiques.

En effet, pour ce qui est de K^+ , certains lacs européens oligotrophes ou mésotrophes en renferment des concentrations variant de 0,4 à 1,5 mg/l tandis que d'autres lacs eutrophes atteignent une teneur de l'ordre de 5 à 6 mg/l ^[25].

3.2.2. Propriétés hydrochimiques du lac

Les analyses ont porté sur les quatre cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ , puis sur les quatre anions CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} et Cl^- , qui constituent l'essentiel des ions majeurs, lesquels ont été utilisés dans le calcul de la conductivité des eaux du lac. Les valeurs moyennes des concentrations des différents

ions ont été calculées pour les deux principales saisons (cruée et étiage) qui régissent le régime hydrologique du lac. Les valeurs moyennes calculées sont exprimées en milliéquivalents par litre (meq/l).

Le tableau II présente le bilan du déséquilibre ionique des différents points d'échantillonnage en période de crue et d'étiage. La balance ionique semble satisfaisante, car le déséquilibre ionique calculé est généralement inférieur ou égal à 5% ($DI \leq 5\%$) ^[22].

On peut toutefois admettre que le déséquilibre constaté en juin sur quatre stations ($DI > 5\%$) peut être lié à l'émergence de certains ions qui n'ont pas été pris en compte lors du bilan. Il peut s'agir des ions nitrates (NO_3^-), des ions phosphates (PO_4^{3-}) plus dominants que les ions carbonate (CO_3^{2-}). La majeure partie des échantillons analysés présente une nette dominance des cations par rapport aux anions dans la partie en aval où le volume d'eau est plus important. Ce qui n'est pas le cas en amont où le déséquilibre est le fait des anions, surtout en période de crue. Ce déséquilibre est beaucoup influencé par la prédominance des ions bicarbonates.

En Côte d'Ivoire, comme dans la plupart des régions de l'Afrique de l'Ouest, le déséquilibre de la balance ionique reste problématique. Les analyses chimiques semblent le plus souvent incomplètes par rapport à certains ions qui ne sont pas pris en compte dans l'analyse du bilan ionique. Ainsi le carbone organique dissous ($RCOO^-$) et les ions aluminium (Al^{3+}), ne sont nullement pris en compte dans la balance ionique. Par contre, les ions CO_3^{2-} pratiquement inexistantes dans les eaux (car de pH inférieur à 8,3) ont toujours été considérés comme ions majeurs. Ce constat constitue une faiblesse dans l'étude de la balance ionique. D'autres éléments comme les orthophosphates et les polyphosphates ($H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-} , PO_4^{3-} , $FeHPO_4^+$, $CaH_2PO_4^+$) qui complexent de nombreux cations tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} ,

Tableau IIa: Balance ionique et déséquilibre ionique des eaux aux différentes stations en aval du lac (zone Buyo)

Eaux des couches épilimniques (à 0,5 m de la surface)												
Station	USINE		DEVERSOIR 1		DEVERSOIR 2		DEVERSOIR 3		GRAVIER		DEVERSOIR P	
Périodes	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage
Total des cations (méq/l)	0,63	0,57	0,48	0,52	0,44	0,6	nd	0,5	0,42	0,51	0,45	0,49
Total des anions (méq/l)	0,61	0,51	0,47	0,39	0,44	0,5	nd	0,49	0,42	0,49	0,44	0,47
Déséquilibre ionique (DI) exprimé en %	1,54	3,5	0,45	5,3	0	6,0	nd	0,5	0	0,99	0,40	0,92
Eaux des couches hypolimniques (1 à 2 m du fond)												
Station	USINE		DEVERSOIR 1		DEVERSOIR 2		DEVERSOIR 3		GRAVIER		DEVERSOIR P	
Périodes	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage
Total des cations (méq/l)	0,49	0,63	0,49	0,5	0,45	nd	nd	nd	0,5	0,51	0,5	0,51
Total des anions (méq/l)	0,47	0,58	0,46	0,5	0,44	nd	nd	nd	0,42	0,5	0,46	nd
Déséquilibre ionique (DI) exprimé en %	0,92	3,65	1,35	0	0,39	nd	nd	nd	3,36	0,51	1,84	nd

Tableau IIb : Balance ionique et déséquilibre ionique des eaux aux différentes stations en amont du lac (zone Guessabo)

SECTEUR	Eaux des couches épilimniques (0,5 m de la surface)						Eaux des couches hypolimniques (1 à 2 m du fond)					
	Pilier 7		Pilier 3		Berge		Pilier 7		Pilier 3		Berge	
Périodes	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage	Oct.96 Crue	Juin 97 Fin étiage
Total des cations (méq/l)	0,52	0,71	0,55	0,58	0,49	0,71	nd	0,58	0,46	0,56	0,41	nd
Total des anions (méq/l)	0,53	0,55	0,55	0,55	0,49	0,57	nd	0,57	0,46	0,54	0,42	nd
Déséquilibre ionique (DI) exprimé en %	-0,55	12,5	0	1,9	0	11,3	nd	0,66	0	1,21	-0,34	nd

Octobre 1996: Période de crue, Juin 1997 : Période de fin d'étiage coïncidant avec les débuts des premières pluies

nd: non déterminé

Vérification de l'écart entre les sommes des ions chargés positivement et négativement:

Si $(\sum +) = (\sum -)$, le bilan est équilibré et le déséquilibre ionique : D.I (%) est faible.

Si $(\sum +) \neq (\sum -)$, le bilan est déséquilibré et le déséquilibre ionique : D.I (%) est élevé

$$DI = \frac{(\sum [C_i] - \sum [A_j])}{1/2 (\sum [C_i] + \sum [A_j])} \quad \text{où } \sum [C_i] : \text{somme des concentrations des "i" cations } [Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+] \text{ et } \sum [A_j] : \text{somme des concentrations des "j" anions } [HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^-, CO_3^{2-}]$$

Fe^{2+} et Mn^{2+} ; les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-), l'ammonium (NH_4^+) qui constituent des résidus des intrants chimiques agricoles sont autant d'ions qu'il faudrait certainement, prendre en compte dans la balance ionique des eaux de surface, notamment en région agricole. Le choix des ions devrait tenir compte de façon spécifique du contexte environnemental et des échanges (chimique et biologique) entre les différents écosystèmes (eau, sol, air).

Les anions classés par ordre de dominance décroissante montrent : HCO_3^- est le plus dominant, ensuite viennent Cl^- et SO_4^{2-} . Les concentrations en anions majeurs sont plus élevées en période d'étiage et de fin étiage qu'en période de crue^[9,17].

Le diagramme de Piper relatif à la composition des différents ions majeurs (Figure 2) met en évidence un hydrofaciès mixte bicarbonaté calcique et bicarbonaté magnésien. Les eaux en amont présentent le même faciès qu'en aval. Les eaux présentent ainsi une alcalinité bicarbonatée plus importante en période d'étiage et de fin étiage. La somme des cations ($\Sigma+$ en $\mu\text{eq/l}$) exprime directement la minéralisation des eaux^[26]. Leurs concentrations sont aussi plus élevées en période d'étiage et de fin étiage qu'en période de crue. Le lac est peu minéralisé car $0,5 \text{ méq/l} < \Sigma+ < 2 \text{ méq/l}$, mais Mg^{2+} , Ca^{2+} et HCO_3^- sont mieux représentés. Ces caractéristiques s'apparentent aux lacs liés aux bassins versants sédimentaires peu riches en roches carbonatées (grès, schistes)^[26].

Le total des cations est généralement plus élevé en amont qu'en aval, mais aussi en période d'étiage que de crue. La minéralisation des eaux est fonction du volume d'eau. En effet, en aval, le volume important des eaux dilue fortement les concentrations des solides dissous. Aussi en période d'étiage, le bilan hydrique du lac devient négatif^[16], les eaux lacustres commencent à se concentrer en sels minéraux.

Le tarissement des eaux en période d'étiage accroît conséquemment les concentrations des ions, ce qui favorise la minéralisation des eaux du lac et l'augmentation de sa conductivité. En effet, la conductivité des eaux est plus élevée pendant la période d'étiage^[9,17].

Le lac de Buyo est alimenté par des eaux de ruissellement, des tributaires et/ou des apports souterrains. Il est soumis aux rejets domestiques, agricoles directs et diffus qui modifient sa concentration en ions Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} qui sont généralement d'apport exogène.

La figure 3 représente le diagramme ionique réalisé du plan d'eau. Il indique un polygone qui traduit le caractère bicarbonaté des eaux. Ce diagramme est caractéristique d'une eau neutre-mésotrophe- mais de transition basique-eutrophe ($\text{pH}=7,2 \pm 0,5$), certaines mesures ayant données $\text{pH}=8,6$ ^[17].

3.2.3. Conductivité

3.2.3.1. Variation des mesures effectuées

La conductivité moyenne des eaux du lac est de $(75,8 \pm 19,1) \mu\text{S/cm}$ (Tableau I). Dans les eaux de surface (jusqu'à 0,5 m), elle varie de $47,3 \mu\text{S/cm}$ à $89,3 \mu\text{S/cm}$ en aval et de $58,5 \mu\text{S/cm}$ à $97 \mu\text{S/cm}$ en amont. Dans les eaux profondes (1 à 2 m du fond), elle varie de $54,3 \mu\text{S/cm}$ à $91,3 \mu\text{S/cm}$ en aval et $60,7 \mu\text{S/cm}$ à $102,2 \mu\text{S/cm}$ en amont^[9,17]. La conductivité des eaux profondes demeure toujours supérieure à celle des eaux superficielles sur l'ensemble du réservoir d'eau et presque toute l'année (Figure 4). Ainsi, l'évolution de la conductivité suit un gradient horizontal amont-aval négatif et un gradient vertical Surface-Fond positif. Ceci est en accord avec l'évolution horizontal nord-sud négatif du niveau de trophie du lac^[9]. Toute augmentation significative de la conductivité avec la profondeur peut indiquer une stratification du lac de Buyo plus marquée en période d'étiage et de début de crue, où se déterminent deux couches d'eaux

différentes. Les couches d'eaux profondes devenant plus conductibles que les couches d'eaux superficielles.

3.2.3.2. Calcul de la conductivité des eaux
La valeur médiane de la conductivité mesurée sur l'étendue du lac donne (75,8 ± 19,1) µS/cm, celle calculée est d'environ 73,8 µS/cm (Tableau III). L'écart relatif avec la valeur mesurée est déterminé de la façon suivante :

$$\text{Ecart de Conductivité (\%)} = \frac{(\text{Conductivité calculée} - \text{Conductivité mesurée})}{\text{Conductivité mesurée}} \times 100$$

L'écart entre les deux valeurs qui est de 2,7% est faible, ce qui signifie que, la minéralisation des eaux du lac est bien déterminée par la mesure de sa conductivité. Ainsi, la minéralisation totale réalise une bonne corrélation avec les espèces ioniques. Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ et Cl⁻. En effet, la plupart des matières dissoutes dans le lac se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement ; la mesure de la conductivité étant liée à la quantité de sels dissous dans l'eau, les résultats de mesure s'expriment en terme de conductivité équivalente à 20 ou 25 °C [22]. C'est cette conversion automatique que font les appareils de mesures (conductimètres) utilisés sur le terrain. Ainsi, la conductivité semble liée à l'évolution globale du milieu.

Sa faible variation au regard de son coefficient de variation (CV=25%) montre que la conductivité est une grandeur quasi-homogène et constitue un paramètre intégrateur du milieu. Son évolution dans le lac peut constituer un élément indicatif de l'état de trophie du lac [8].

3.3.3. Analyses multivariées des variables et interprétation écologique

3.3.3.1. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques

L'Analyse en Composante Principale Normée (ACPN), a été réalisée avec les paramètres ayant un intérêt sur la qualité

de l'eau, sa productivité piscicole et sur le niveau de trophie du lac. Parmi eux, on a, le pH, la température, l'oxygène dissous, l'ion ammonium (NH₄⁺), les nitrates (NO₃⁻), les ions phosphates (PO₄³⁻), la transparence au disque de Sechhi, les matières en suspension (MES), les principaux ions majeurs et la conductivité [2,27].

La matrice de corrélation entre ces différentes variables (Tableau IV) montrent que la minéralisation totale ou la conductivité réalise avec certains ions (NH₄⁺, PO₄³⁻, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, Mg²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻), une forte corrélation, qui semble traduire une évolution quasi-homogène entre la minéralisation et les éléments dissous.

Cette corrélation est supposée significative entre 2 variables pour un coefficient de corrélation ≥ 0,50. Ce qui traduit que les deux variables sont corrélées à 50% ou plus. La corrélation est positive avec les ions NH₄⁺, PO₄³⁻, K⁺, Ca²⁺, Cl⁻, Mg²⁺, NO₃⁻ et négative avec les ions SO₄²⁻ et Na⁺. Celle de la température avec la plupart des paramètres est significative, en accord avec son importance dans les processus réactionnels, notamment la cinétique des réactions chimiques. Aussi, existe-t-il une corrélation supérieure à 0,50 entre la teneur en oxygène dissous et la conductivité.

Ce qui justifie le rôle de O₂ dissous dans les processus d'oxydation des composés solides dont la finalité est la mise en solution d'éléments minéraux. Ces résultats montrent une forte liaison entre les paramètres trophiques (NO₃⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻ et O₂ dissous) et les paramètres physiques caractéristiques du lac (pH, température, conductivité, transparence, et MES). Les substances dissoutes influencent ainsi la qualité physico-chimique du lac traduite par la bonne corrélation entre les ions (NH₄⁺, PO₄³⁻, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, Mg²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻) et la conductivité. La somme des valeurs absolues des coefficients de corrélation pour chaque variable donne une indication

Tableau III : Calcul de la conductivité des eaux en utilisant les facteurs de conversion de la conductivité selon **Legendre et al [21]**.

Espèces ioniques	Conductivité ionique équivalente à la dilution infinie et à 25 °C μS/cm par mg/l	Valeurs médianes des concentrations en mg/l	Conductivité propre de chaque ion λ _i × [A _i]
Ca ⁺⁺	2,98	3,3	9,834
Mg ⁺⁺	4,35	1,9	8,265
Na ⁺	2,21	3,1	6,851
K ⁺	1,88	2,5	4,7
HCO ₃ ⁻	0,73	49,8	36,354
SO ₄ ⁻⁻	1,67	0,4	0,668
Cl ⁻	2,15	3,3	7,095
$\chi (\mu S / cm) = \sum \lambda_i C_i + \sum \lambda_j A_j$			73,767
Ecart de Conductivité en (%)			2,7

du degré de liaison d'une variable avec toutes les autres (Tableau IV). On observe que la conductivité constitue le paramètre ayant le degré de liaison le plus élevée avec les autres paramètres physico-chimiques du lac. Il apparaît ainsi, comme un meilleur indicateur dans l'étude de l'évolution globale du lac. Par ailleurs, un fait important s'observe en amont. En effet, les sommes des valeurs absolues des coefficients de corrélation sont élevées pour la plupart des paramètres en amont qu'en aval, ce qui traduit un nombre de corrélations significatives plus important (avec $r \geq 50$) en amont qu'en aval. Ainsi, le nombre de corrélations significatives ($r \geq 50$) augmentant avec le niveau de trophie, mettant en évidence des liens irrationnels ou renforcés entre les paramètres environnementaux, expression du désordre écologique créé par l'eutrophisation.

En effet, lorsque l'eutrophisation s'installe dans un milieu, des incohérences peuvent naître entre certains paramètres, puis

deviennent importantes par la suite au détriment des liens naturels. Aussi, certains naturellement existants peuvent être renforcés ou amplifiés entre les variables environnementales du lac.

3.3.3.2. Variabilité de la qualité physico-chimique du lac

L'ACPN effectuée sur la base des paramètres physico-chimiques des stations de Buyo et de Guessabo au cours des 4 principales saisons (début de crue, crue, étiage et fin étiage) montre que, seuls les axes I et II (Tableau V) expriment la grande variabilité des paramètres à Guessabo et à Buyo. Cela se traduit par les valeurs propres (Eigenvalues) des 3 premiers axes et des pourcentages des variables cumulées exprimés par ces axes. La décroissance progressive des valeurs propres des trois premiers axes indique que le premier axe exprime le plus de variations dans les données [28].

En effet, les premiers axes expriment à 88,5% et 61,1% le maximum de

Tableau IV-a: Matrice des coefficients de corrélations linéaires entre les paramètres physico-chimiques des eaux du lac de Buyo (zone Guessabo)

Temp	1.0000														
O₂	0.5690	1.0000													
Cond	0.2140	-0.5168	1.0000												
Transp	-0.2408	0.6295	-0.9355	1.0000											
NO₃⁻	0.2217	-0.6710	0.7375	-0.9284	1.0000										
NH₄⁺	0.5251	-0.3250	0.9301	-0.9378	0.8108	1.0000									
PO₄³⁻	0.5413	-0.3336	0.9075	-0.9424	0.8431	0.9970	1.0000								
MES	0.7669	0.9616	-0.2951	0.3939	-0.4557	-0.0578	-0.0637	1.0000							
Mg²⁺	-0.4853	-0.7424	0.7309	-0.5915	0.3717	0.4321	0.3884	-0.6930	1.0000						
Na⁺	-0.2408	0.6295	-0.9355	1.0000	-0.9284	-0.9378	-0.9424	0.3939	-0.5915	1.0000					
Cl⁻	-0.3404	-0.7751	0.8436	-0.7446	0.5444	0.5968	0.5618	-0.6741	0.9787	-0.7446	1.0000				
SO₄²⁻	0.4853	0.7424	-0.7309	0.5915	-0.3717	-0.4321	-0.3884	0.6930	-1.0000	0.5915	-0.9787	1.0000			
HCO₃⁻	-0.8067	-0.1453	-0.2014	0.4280	-0.5963	-0.5388	-0.5927	-0.3470	0.4756	0.4280	0.2846	-0.4756	1.0000		
K⁺	-0.4853	-0.7424	0.7309	-0.5915	0.3717	0.4321	0.3884	-0.6930	1.0000	-0.5915	0.9787	-1.0000	0.4756	1.0000	
Σ	Temp	O₂	Cond	Transp	NO₃⁻	NH₄⁺	PO₄³⁻	MES	Mg²⁺	Na⁺	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	K⁺	
	6,9226	8,7836	9,7097	9,9554	8,8524	8,9533	8,8907	7,4887	9,4811	9,9554	10,046	9,4811	6,7956	9,4811	

Σ = somme des valeurs absolues des coefficients. Temp= température ; Cond= conductivité ; MES= matières en suspension

Tableau IV-b: Matrice des coefficients de corrélations linéaires entre les paramètres physico-chimiques des eaux du lac de Buyo (Zone Buyo)

Temp	1.0000															
pH	0.4764	1.0000														
O₂	0.0005	0.6702	1.0000													
Cond	0.7098	-0.2762	-0.5902	1.0000												
Transp	0.5370	0.2558	-0.5461	0.4571	1.0000											
NO₃⁻	0.5899	-0.4282	-0.6389	0.9856	0.3489	1.0000										
NH₄⁺	-0.7379	-0.1841	-0.2747	-0.5985	0.1500	-0.5642	1.0000									
PO₄³⁻	0.6815	-0.3188	-0.5623	0.9957	0.3726	0.9926	-0.6371	1.0000								
MES	0.4915	0.9996	0.6777	-0.2613	0.2456	-0.4131	-0.2110	-0.3023	1.0000							
Ca²⁺	0.6738	0.3210	0.4790	0.4117	-0.2615	0.3693	-0.9756	0.4533	0.3473	1.0000						
Mg²⁺	-0.6738	-0.3210	-0.4790	-0.4117	0.2615	-0.3693	0.9756	-0.4533	-0.3473	-1.0000	1.0000					
Na⁺	0.0005	0.6702	1.0000	-0.5902	-0.5461	-0.6389	0.2747	-0.5623	0.6777	0.4790	-0.4790	1.0000				
Cl⁻	0.2657	-0.6285	-0.9379	0.8280	0.5122	0.8661	-0.0759	0.8130	-0.6266	-0.1447	0.1447	-0.9379	1.0000			
HCO₃⁻	-0.7179	-0.2369	-0.3535	0.5313	0.1930	-0.4938	0.9966	-0.5713	-0.2637	-0.9905	0.9905	-0.3535	0.0070	1.0000		
K⁺	0.6738	0.3210	0.4790	0.4117	-0.2615	0.3693	-0.9756	0.4533	0.3473	1.0000	-1.0000	0.4790	0.1447	-0.9905	1.0000	
	Temp	pH	O₂	Cond	Transp	NO₃⁻	NH₄⁺	PO₄³⁻	MES	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	Cl⁻	HCO₃⁻	K⁺	
Σ	8,230	7,1079	8,689	9,059	5,9489	9,0681	8,6315	9,1694	7,212	8,9067	8,9067	8,689	7,9329	8,690	8,9067	

Σ= somme des valeurs absolues des coefficients ; Temp= température ; Cond= conductivité ; MES= matières en suspension

Tableau V : Valeurs propres et pourcentages de variances cumulés

Valeurs propres et pourcentages de variables cumulées		Axe I	Axe II	Axe III	Axe IV
Zone en aval de Buyo	Valeurs Propres	0,885	0,112	0,003	0,000
	Pourcentage de variable cumulée	88,5	99,7	100	0
Zone en amont du lac de Guessabo	Valeurs Propres	0,611	0,347	0,041	0,000
	Pourcentage de variable cumulée	61,1	95,9	100	0

l'information respectivement dans la zone de Buyo et de Guessabo. Les pourcentages de l'information cumulée des axes I et II sont de 99,7% à Buyo et 95,9% à Guessabo. Au regard de la norme des vecteurs propres (Figure 5), l'ACP indique que les paramètres considérés sont des variables environnementales importantes affectant la qualité physico-chimique du lac et conditionnent par ailleurs sa productivité et donc le niveau de trophie.

3.3.3.2.1. Zone en aval de Buyo (fig 5-a)

La conductivité, les ions PO_4^{3-} et NO_3^- , les MES et le pH sont caractérisés par des vecteurs propres aux normes plus élevées. Ces variables influencent donc plus les caractéristiques physico-chimiques du plan d'eau. La conductivité des eaux, les concentrations des ions orthophosphates (PO_4^{3-}) et des ions nitrates (NO_3^-) sont corrélées positivement avec l'axe I, qui exprime 88,5 % de l'état du lac. Leurs valeurs diminuent lorsque celles de l'oxygène, du pH et des MES augmentent. La corrélation positive entre MES et O_2 est inhabituelle et semble traduire une perturbation écologique, signe de l'eutrophisation du lac. La température et la transparence sont corrélées négativement avec l'ammonium (Figure 5-a).

Par ailleurs, les MES et le pH sont plus corrélés avec Buyo 1 correspondant à la période de début de crue du lac. Cette période (mois de mai) correspond au début de la montée des eaux issues des eaux pluviales et du ruissellement des sols. Ces eaux sont généralement chargées de particules organiques qui les rendent troubles et contribuent ainsi à la baisse de leur transparence, dont les valeurs les plus faibles ont été mesurées en période de crue des eaux. Cette période est aussi caractérisée par la présence significative de l'ammonium (NH_4^+). C'est un indicateur de pollution dont la présence en quantité relativement importante peut être l'indice d'une contamination par des rejets

d'origine humaine ^[29]. La période de juin (fin étiage ou Buyo 4) est caractérisée par une baisse notable du niveau de l'eau et une forte concentration des sels dissous et par conséquent une montée de la conductivité des eaux. Cette période correspond également à la période de forte disponibilité des sels nutritifs dans le lac.

3.3.3.2.2 Zone en amont de Guessabo (fig 5-b)

Comme dans la partie en aval, les caractéristiques physico-chimiques de la zone fluviale en amont du plan d'eau, sont influencées par l'oxygène dissous, les MES et les ions PO_4^{3-} , auxquels s'ajoute la transparence.

Cette partie du lac est plus trouble, car elle reçoit beaucoup de polluants et est peu profonde. Le volume d'eau est moins important qu'en aval.

Il contient beaucoup de MES, des matières colloïdales et des particules dissoutes qui font diminuer la turbidité et la transparence des eaux. La conductivité, les ions NH_4^+ , PO_4^{3-} et NO_3^- constituent un groupe de variables étroitement liées entre elles et sont corrélées positivement avec Guessabo 4 qui correspond au mois de juin (fin étiage coïncidant avec les premières pluies). C'est à cette période que leurs concentrations sont élevées, coïncidant avec la diminution considérable de la surface du lac qui se réduit pratiquement au seul lit du fleuve.

Globalement, les paramètres nutritifs de l'eau (NH_4^+ , PO_4^{3-} et NO_3^-) sont corrélés positivement avec la conductivité. Par contre, ils sont corrélés négativement avec le pH et l'oxygène dissous. La matière organique végétale produite dans les milieux naturels est, dans la plupart des cas, le résultat de la photosynthèse. C'est le processus de fabrication de la matière vivante à partir d'éléments minéraux et en particulier de gaz carbonique. La réaction photochimique peut se traduire par l'équation générale suivante :

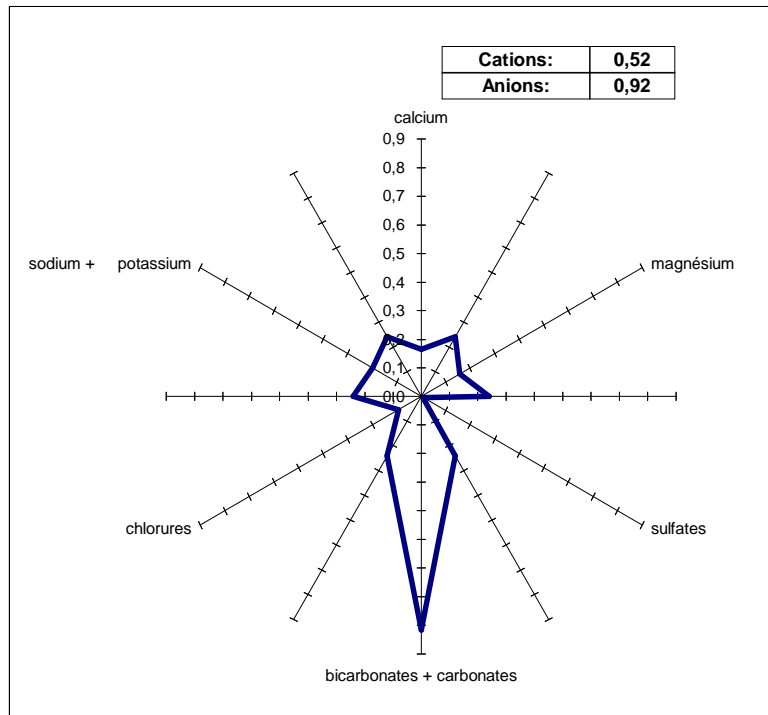


Figure 3 : Diagramme ionique moyenne correspondant aux eaux du lac de Buyo

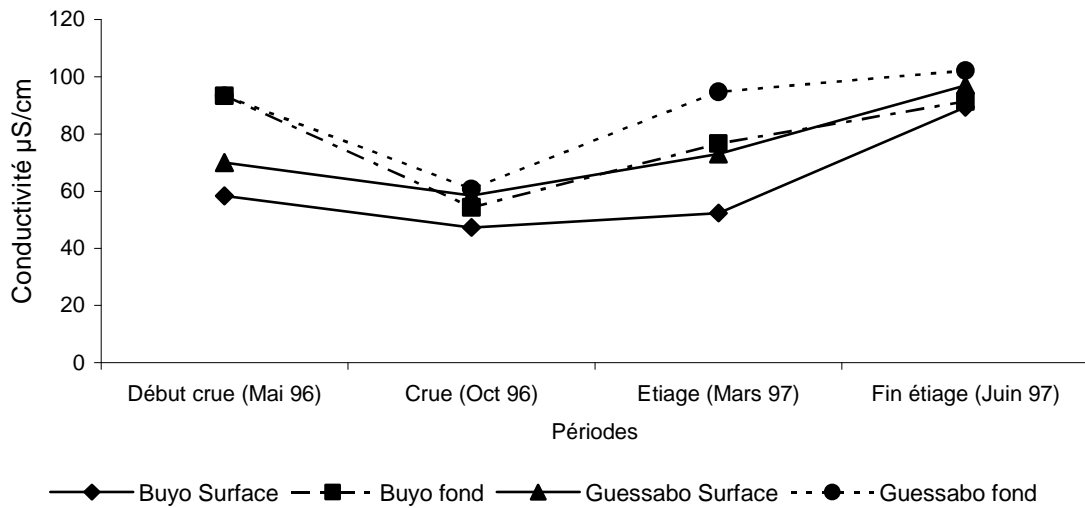
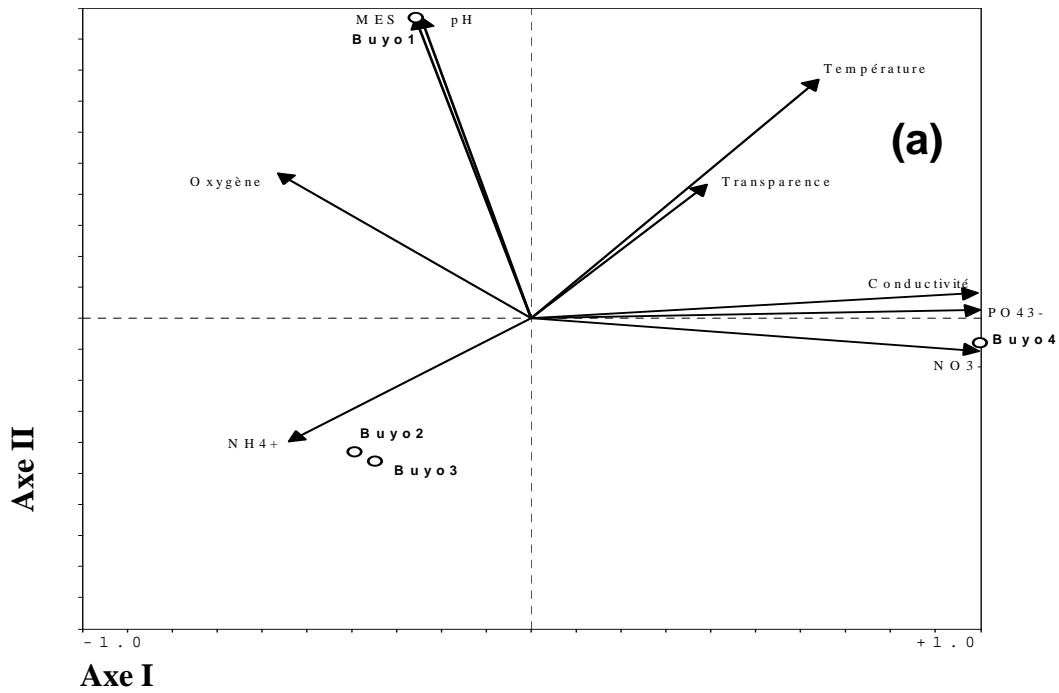


Figure 4 : Variation de la conductivité moyenne en amont et en aval du lac de Buyo

En aval (zone Buyo)



En amont (zone Guessabo)

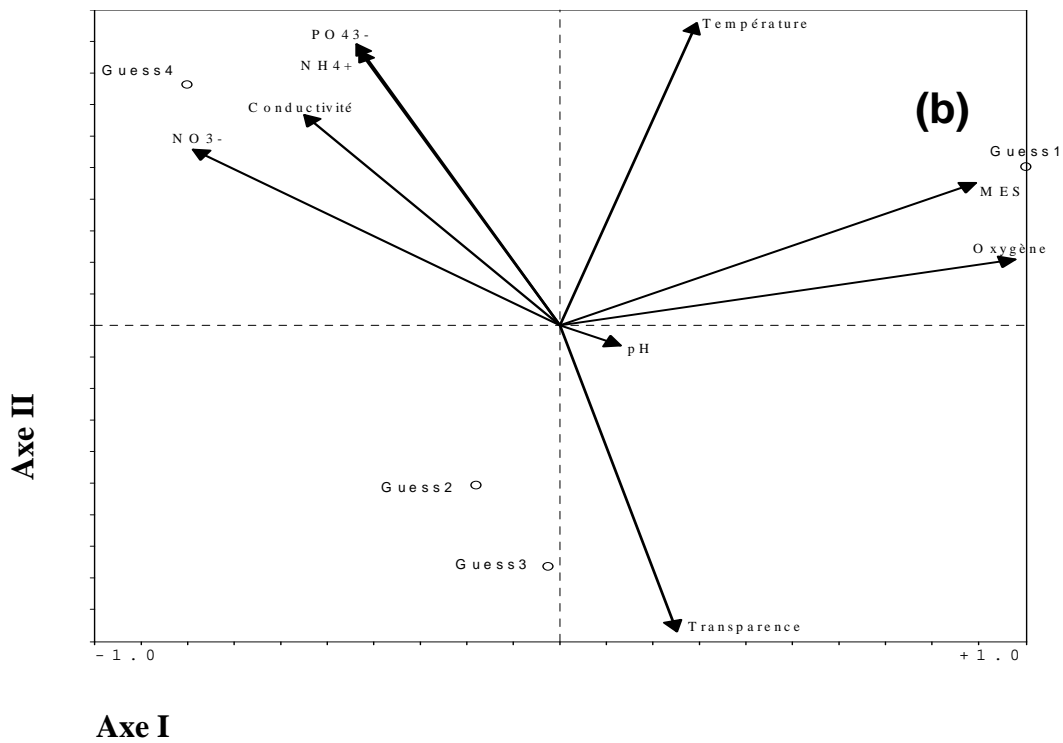
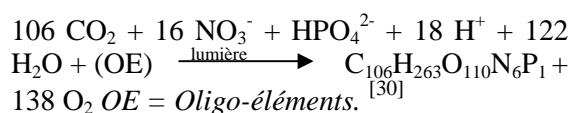
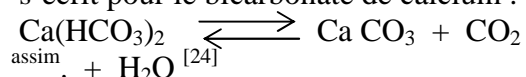


Figure 5 : Ordination en ACP Normée des variables physico-chimiques et des saisons sur les deux premiers axes dans la zone de Buyo(a) et de Guessabo(b): Buyo1, Buyo2, Buyo3, Buyo4 et Guessabo1, Guessabo2, Guessabo3, Guessabo4 désignent respectivement les campagnes d'échantillonnages en début crue(1), en période de crue(2), d'été(3) et de fin été(4), dans la zone du barrage de Buyo et dans la zone de Guessabo (en abrégé Guess sur la figure).



Le gaz carbonique est un facteur essentiel de cette équation, car il est la base de la synthèse organique. L'essentiel du CO₂ utilisé lors de la photosynthèse provient de la décomposition réversible des carbonates alcalins et alcalino-terreux présents dans les eaux en les tamponnant. La réaction s'écrit pour le bicarbonate de calcium :



Le pH s'élève quand la photosynthèse consomme le CO₂ assimilable sous diverses formes.

Le lac de Buyo est soumis aux rejets domestiques et agricoles directs ou diffus qui modifient considérablement sa composition chimique avec des apports exogènes élevés de Na⁺ et Cl⁻.

Il est alimenté diversement par les précipitations atmosphériques, les eaux de ruissellement du bassin versant agricole et les eaux souterraines longtemps en contact avec les roches encaissantes, plus concentrées en solides dissous qui, contribuent aux apports minéraux et nutritifs. La bonne corrélation entre MES et Buyo1 entre MES et Guessabo1 (Figure 5) traduisent l'influence des activités humaines principalement agricoles sur la qualité des eaux, entraînant une réduction de la transparence des eaux par la période de pluies.

3.4. Conductivité, sels minéraux et eutrophisation

Dans le tableau des coefficients de corrélation (Tableau IV), la majorité des corrélations fortes mentionnées par des coefficients supérieurs à 0,5 concordent avec les connaissances générales des eaux naturelles. Ainsi, pour les variables minérales, la corrélation est significative entre la conductivité des eaux et les ions majeurs : Mg²⁺, Na⁺, NO₃⁻, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻. Cette relation peut s'expliquer si l'on considère que les apports extérieurs (dont le sodium et le potassium sont de

bons indicateurs) contiennent à la fois des substances organiques et minérales.

L'examen des paramètres minéraux (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, HCO₃⁻, Cl⁻,...), qui semblent a priori moins caractéristiques du phénomène d'eutrophisation^[8], montre cependant leur rôle dans la conductivité qui est un paramètre important dans la productivité du lac^[9,17].

Les eaux du lac sont faiblement minéralisées (58 – 110 µS/cm) (Tableau VI) et sont influencées par les rejets urbains et autres, riches en sels minéraux. Les résultats montrent que la conductivité du lac est plus élevée en amont où le niveau de pollution et le niveau de trophie semblent élevés (eutrophe-hypereutrophe)^[15].

Avec le sodium (Na⁺) dont le coefficient de corrélation avec la conductivité est d'environ 1,0, les apports extérieurs (dont le sodium est un bon indicateur^[31]), contiennent à la fois des substances organiques plus importantes et des substances minérales moins importantes, qui contribuent à la minéralisation globale de l'eau du lac. Une telle interprétation est recevable en raison de la bonne corrélation entre Na⁺ et MES, puis entre Na⁺ et les Phéopigments^[24].

Le sodium, le potassium, les ions chlorures, les nitrates et les ions bicarbonates qui sont corrélés à la partie en amont (Guessabo) sont liés aux apports exogènes du lac (Figure 5). Parmi eux, seuls Na⁺ et K⁺ semblent significativement corrélés et positivement (r = 0,59) (Tableau IV), à la conductivité du lac. Leur contribution (conductivité propre) à la valeur calculée de la conductivité moyenne du lac est 6,8 pour Na⁺ et 4,7 pour K⁺.

Par ailleurs, la conductivité des eaux baisse drastiquement avec la montée de la chlorophylle considérée comme un moyen d'estimation rapide de l'abondance du phytoplancton^[32] et comme un bon indicateur de la biomasse phytoplanctonique^[8]. La conductivité du lac et son niveau de trophie suivent les

mêmes gradients d'évolution surface-fond et Nord-Sud qui sont positifs

Ainsi, la conductivité semble se définir comme une donnée représentative de la pollution due aux apports extérieurs, elle pourrait faire partie des indicateurs trophiques à retenir. Nos résultats sont en accord avec ceux de LOTHE^[31].

4. Conclusion

L'abondance des matières organiques, des éléments nutritifs et l'accroissement des apports, en particulier en phosphore et en azote dans le lac de Buyo, traduisent l'eutrophisation du plan d'eau, qui se caractérise par une prolifération algale. Ce processus aboutit à une désoxygénation des eaux profondes. Les eaux profondes deviennent réductrices et les matières organiques ne sont que partiellement minéralisées et oxydées.

La conductivité des eaux devient faible, et pourtant elle est liée aux apports de matières solides inorganiques dissoutes comme les anions (chlorures, nitrates, sulfates et phosphates) ou les cations (magnésium, calcium, sodium). La conductivité, expression de la minéralisation globale du lac est donc en relation avec certains paramètres liés au phénomène d'eutrophisation. Elle croît avec les apports exogènes riches en sodium et en sels minéraux.

Par ailleurs, l'apport excessif de sels minéraux n'est pas l'expression d'une minéralisation croissante du cours d'eau. Une grande partie des sels apportés est utilisée par la flore biologique qui s'y développe activement, expression physique de l'eutrophisation du lac. L'autre partie moins importante concourt faiblement à la minéralisation des eaux du lac. C'est pourquoi, la conductivité pourrait faire partie des indicateurs trophiques à retenir.

Notre étude, malheureusement n'a pas permis de définir des valeurs seuils de classification de l'état trophique des lacs du point de vue de la conductivité. Néanmoins, elle montre qu'une

classification des états de trophies, basée sur une considération séparée de quelques paramètres physico-chimiques telle que proposée par l'OCDE, ne peut donner des résultats satisfaisants. Il est souhaitable que soient prises en compte les principales relations qui lient ces différentes variables, dont la réponse pourrait se trouver dans l'analyse des variations de la conductivité.

Si cette étude des principaux paramètres physico-chimiques nutritifs a permis de prendre connaissance du comportement global de l'eutrophisation sur la minéralisation, elle a essentiellement permis de mettre en évidence que l'eutrophisation a une forte incidence sur la minéralisation globale du lac et donc sur la conductivité des eaux. L'apport excessif de minéraux au plan d'eau concourt à sa minéralisation, mais celle-ci est contrariée par l'utilisation des sels nutritifs pour la production de la biomasse algale, expression de l'eutrophisation du lac. C'est donc, la conjugaison de ces deux phénomènes (apport et absorption des sels minéraux) qui gouverne la minéralisation globale et donc la conductivité du lac. Les couches d'eaux plus minéralisées, donc ayant une conductivité plus élevée, ont en leur sein un potentiel d'eutrophisation élevé. Le gradient de l'état de trophie suit ainsi celui de la conductivité.

Bibliographie

- [1] Bombace G., Les ressources de pêche de l'Adriatique : Situation et perspectives. Bulletin de l'Institut océanographique, Monaco, n°spécial 15 (1995):159-186.
- [2] Ryding S.O., Rast W., Le contrôle de l'eutrophisation des lacs et des réservoirs, *Sciences de l'Environnement 9, Edition 1994, Masson*
- [3] Benneton J. P., Eutrophisation des plans d'eau. Inventaire des principales sources de substances nutritives azotées et phosphorées. Étude bibliographique. Rapport de recherche LPL n°130 (1984). Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Paris 1-72

- [4] Henry R., Hino K., Tudisi J. G., Ribiero J. S. B., Response of phytoplankton in lake Jacaretinga to enrichment with nitrogen and phosphorus in concentration similar to those of the River Solimoes (Amazon, Brazil), *Arch. Hydrobiol* (1985), 103 : 453 – 77.
- [5] Cloot A., Ros J. C., Modeling a relationship between phosphorus, pH, Calcium and Chlorophyll-a concentration. *Water S A.* (1996), 22(1), 49-55
- [6] O.C.D.E., Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance d'évaluation et de lutte. Publications OCDE 1982, Paris
- [7] Pesson P., La pollution des eaux continentales, indice sur les biocénoses aquatiques. Guauthier-villars, 1980, Paris, p 1-345.
- [8] Parinet B., Lohte A., Legube B., Gbongue M. A., Étude analytique et statistique d'un système lacustre soumis à divers processus d'eutrophisation. *Rev. Sci. Eau* (2000) Vol. 13/3 p. 237-267.
- [9] Mambo V., Tidou A.S, Ossey Y. B. et Houenou P., Evaluation de l'état trophique du lac de Buyo (Côte d'Ivoire) ; Aspects physico-chimiques et Biologiques. *J. Soc. Ouest-Afr. Chim.* (2001), 11: 95-136.
- [10] Woodiviss F. S., , The biological system of stream River Board. *Chim. Ind* (1964). 14, 443-447.
- [11] Vernaux J., Une nouvelle méthode pratique d'évaluation de la qualité des eaux courantes. Un indice biologique de qualité générale (I.B.G.). *Ann. Sc. Univ. Franche-Comté* 1982, 4, 11-19.
- [12] Holmes N. T. H., The use of Riverine Macrophytes for Assessment of Trophic Status: Review of 1994/95. Data and Refinements for future Use. A report to the National Rivers Authority. Peterborough, U. K. (1996)
- [13] Kelly M. G., Use of trophic diatom index to monitors eutrophication in rivers. *Wat. Res.* (1998) 32 (1), 236-242.
- [14] Stambuk-Giljanovic N., Water Quality Evaluation by index in Dalmatia *Wat. Res.* (1999) 33(16), 3423-3440.
- [15] Le Buanec B., Les principaux sols de la Côte d'Ivoire et leurs aptitudes culturales. *Ann. Univ. Abidjan (c)* (1972), 17-26.
- [16] N'Go Yao A., Contribution à l'étude de l'érosion des sols du bassin versant du Sassandra (Région de Buyo) : analyse des facteurs et essai d'évaluation des risques par télédétection et des systèmes d'information géographique. *Thèse 3^{ème} Cycle de l'Université d'Abobo-Adjamé (Côte d'Ivoire)*, (2000).
- [17] Yapo O B, Contribution à l'évaluation de l'état de trophie du lac de Buyo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire): Etude analytique et statistique des paramètres physico-chimiques et biologiques, Thèse unique de doctorat en sciences et Gestion de l'Environnement, (2002)
- [18] A.F.N.O.R., Qualité de l'eau (Environnement), 1^è édition 1994, Paris
- [19] Potvin P., Grimard Y., Étude de la qualité du milieu aquatique de 67 lacs à sauvagine de la région de SCHEFFERVILLE, QUÉBEC, Ministère de l'Environnement, Direction générale des inventaires et de la recherche, Service de la qualité des eaux, (1983).
- [20] Feuilles d'interprétation des données scientifiques avec le logiciel Excel, http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6VJ3-3XK7GJ1-P.01/06/2007, consulté le 29/08/2007
- [21] Traoré K., Konan L, *Caractéristiques physico-chimiques du lac de Buyo, Rap. Rech. Institut d'Ecologie Tropicale, Côte d'Ivoire (IET)*, 1989.
- [22] Legendre P, Chodorowsk A., Chodorowska W, Pichet P, Potvin P. : Qualité des eaux : Interprétation des données lacustres (1971-1977), Centre de Recherche en Sciences de l'Environnement (CERSE), Université du QUEBEC à Montréal (1980).
- [23] Vivier P., L'eutrophisation des lacs : Structure, fonctionnement et évolution des lacs. In la pollution des eaux continentales. Incidences sur les biocénoses aquatiques (1976): 67-87.
- [24] Jankovic Stevan, Manuel de chimie de l'environnement, Organisation Mondiale de Santé, Genève 1974.

- [25] bremond r., vuichard r., les paramètres de qualité des eaux, Environnement, 1973
- [26] Pourriot R., Meybeck M., Limnologie générale, Masson 1995, P.6-59
- [27] Dussart B. H., Limnologie, l'étude des eaux continentales, Gauthier –Villars éditeur, 1966.
- [28] nieppola j.j., carlton t.j., Relations between under storey vegetation, site productivity and environmental factors in Pinus Sylvestris L. Stands in Southern Finland Vegetation, 1991, 93: 57-72.
- [29] Schwart J.B., Martin G. Point sur l'épuration et le traitement des effluents, (Air, Eau), Vol., 2.1 Bactériologie des milieux aquatiques. Lavoisier Technique et Documentations 1985, Paris
- [30]. Sigg L., Stumm W. et Behra Ph, Chimie des milieux aquatiques, chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement. 2^{ème} éd. MASSON 1994, Paris
- [31] Lhote A., Critères d'évaluation de la qualité de l'eau d'un système lacustre tropical. Approche statistique, Thèse de doctorat en Chimie et Microbiologie de l'eau, Université de Poitiers (2000)
- [32] Lorenzen J. C., Determination of Chlorophyll and pheopigments: Spectrophotometric equations. Limnol. Ocenogr (1967), 12, p. 343.