

QUALITÉ PHYSICO-CHIMIQUE EN SAISON PLUVIEUSE DES EAUX DE SURFACE DE LA RÉGION DE BONOUA (SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

[PHYSICO-CHEMICAL QUALITY IN RAINY SEASON WATER SURFACE AREA BONOUA (SOUTHEAST OF IVORY COAST)]

Privat TOHOURI¹, Germain Miessan ADJA², Gbombélé SORO¹, Etienne Gabriel AKE¹, Ives N'guessan KONAN³, and Jean BIEMI¹

¹Département des Sciences et Techniques de l'Eau et du Génie de l'Environnement (DSTEGE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières. Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Département des Sciences et Technologies, École Normale Supérieure d'Abidjan, 08 BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire

³Laboratoire Central de l'Environnement (CIAPOL), BP 650 Abidjan, Côte d'Ivoire

Copyright © 2017 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The surface water resources in the region of Bonoua are subject to strong anthropogenic pressures created by the development and expansion of agricultural activities and also by the agro-industrial and domestic activities. This impacts the available quantities of these resources that fluctuate throughout the year. Similarly, their quality is thereby also changed. Regarding the quality of these resources how can occur at a given time of year? This concern led in this study to assess the overall quality of surface waters of Bonoua region during the rainy season. It is based on the exploitation of data from a water sampling campaign conducted in July 2014. The data were processed with the Evaluation System of Quality of Waters, referred to as "SEQ-Eau" for determining the overall water quality. The (ACPN) has also been applied to the data for the identification of phenomena causing water pollution. The results show that in general the surface waters in the region are Bonoua of "average quality" to 92.86% and "poor" at 7.14%. The responsible alteration of this deterioration in the quality of surface water is the "acidification" parameter, which contributes to 64%. Alterations "temperature" and "organic and oxidizable materials" expressed as COD and BOD 5 incidentally involved in this deterioration in the respective proportions of 14 % and 22 %. The phenomena causing water pollution is anthropogenic. They are mainly from discharges of domestic and industrial waste water and the use of chemical fertilizers in the plantations. This evaluation of the quality of surface water in the region of Bonoua is a first draft that should be complemented by other studies covering aspects such as pesticides and microbiology for better management.

KEYWORDS: Surface water, overall quality, SEQ-Water, Bonoua Region, Ivory Coast.

RESUME: Les ressources en eaux de surface dans la région de Bonoua sont soumises à de fortes pressions anthropiques suscitées par le développement et à l'extension des activités agricoles et également par les activités agro-industrielles et domestiques. Cette situation impacte les quantités disponibles de ces ressources qui fluctuent tout au long de l'année. De même, leur qualité s'en trouve également modifiée. En ce qui concerne la qualité de ces ressources, comment peut-elle se présenter à une période donnée de l'année ? Cette préoccupation a conduit dans la présente étude à évaluer la qualité globale des eaux de surface de la région de Bonoua en saison pluvieuse. Elle est basée sur l'exploitation des données issues d'une campagne d'échantillonnage d'eau réalisée en juillet 2014. Les données ont été traitées grâce au Système d'Évaluation de la Qualité des Eaux, dénommé "SEQ-Eau" pour la détermination de la qualité globale des eaux. L'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) a également été appliquée aux données pour la mise en évidence des phénomènes à l'origine de

la pollution des eaux. Les résultats obtenus montrent en général que les eaux de surface dans la région de Bonoua sont de "qualité moyenne" à 92,86% et de "qualité mauvaise" à 7,14%. L'altération responsable en partie de cette dégradation de la qualité des eaux de surface est le paramètre "acidification" qui y contribue à 64%. Les altérations "température" et "matières organiques et oxydables" exprimées en DCO et DBO₅ participent accessoirement à cette dégradation dans les proportions respectives de 14% et 22%. Les phénomènes à l'origine de pollution des eaux sont d'origine anthropique. Ils sont principalement issus des rejets des eaux usées domestiques et industrielles et à l'utilisation des engrais chimiques dans les plantations. Cette évaluation de la qualité des eaux superficielles de la région de Bonoua est une première ébauche qu'il conviendrait de compléter par d'autres études englobant les aspects tels que les pesticides et la microbiologie pour une meilleure gestion.

MOTS-CLEFS: Eaux de surface, Qualité globale, SEQ-Eau, Région de Bonoua, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie dans tout écosystème [1]. Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants [2] et [3]. Bien que l'on se tourne vers les ressources en eaux souterraines pour l'approvisionnement en eau potable, les eaux de surface demeurent une ressource très capitale pour le développement durable. Toutefois, ces eaux de surface connaissent une altération de leur qualité, qui aujourd'hui est devenue une préoccupation mondiale. En Afrique, ces eaux connaissent diverses sollicitations ou usages suscités par une démographie galopante, un développement agricole accru et un essor des activités industrielles. Ces paramètres de croissance et de développement, de par leurs actions entament considérablement la qualité de ces ressources superficielles. La croissance démographique que connaît la Côte d'Ivoire depuis son accession à l'indépendance a eu pour conséquence l'augmentation des besoins primaires en occurrence l'accès à l'eau potable en milieu rural et/ou urbain. La forte pression démographique sur les ressources naturelles aboutit à une production de plus en plus importante de déchets de toute nature. En effet, les travaux réalisés sur les ressources en eau en Côte d'Ivoire [4], [5], [6] et [7] ces dernières années ont révélé de nombreux foyers de pollution tant au niveau des eaux souterraines qu'au niveau des eaux de surface. Cette pollution est en partie due à l'intensification des activités agricoles, industrielles et domestiques [8], [9] et [10]. Une telle situation est une réalité que connaît la région agricole de Bonoua située dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Cette région fait l'objet de cette étude qui vise l'évaluation de la qualité globale des eaux de surface en saison pluvieuse et l'identification des phénomènes à l'origine de pollution de ces eaux.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude est située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Elle se localise entre les latitudes 5° 10' N et 5° 33' N et les longitudes 3° 12' W et 3° 50' W (Figure 1). Avec une superficie de 1864 km², la zone d'étude est limitée au Sud par la faille des lagunes, au Nord par l'affleurement du socle cristallin, à l'Ouest par la lagune Potou et la rivière Mé et à l'Est par la lagune Aby et la rivière Bia. La végétation très hétérogène de la région, passe des forêts denses humides sempervirentes à une végétation actuelle de type savane [11] et [12]. Dans l'ensemble, cette végétation est abondamment transformée par des cultures industrielles (cacaoyers, caféiers, palmiers à huile, ananas, bananeraies et hévéas) et des cultures vivrières (manioc, igname, banane plantain, etc.). Sur le plan hydrographique, la zone d'étude est drainée par le fleuve Comoé et les rivières Bia, Mé, Soumié et Toumanguié. Ces cours d'eau débouchent tous sur différentes lagunes que sont les lagunes : Ouladine, Potou, Ebbrié, Aby, Kodjobboué, Hébé, Adjin et Ono.

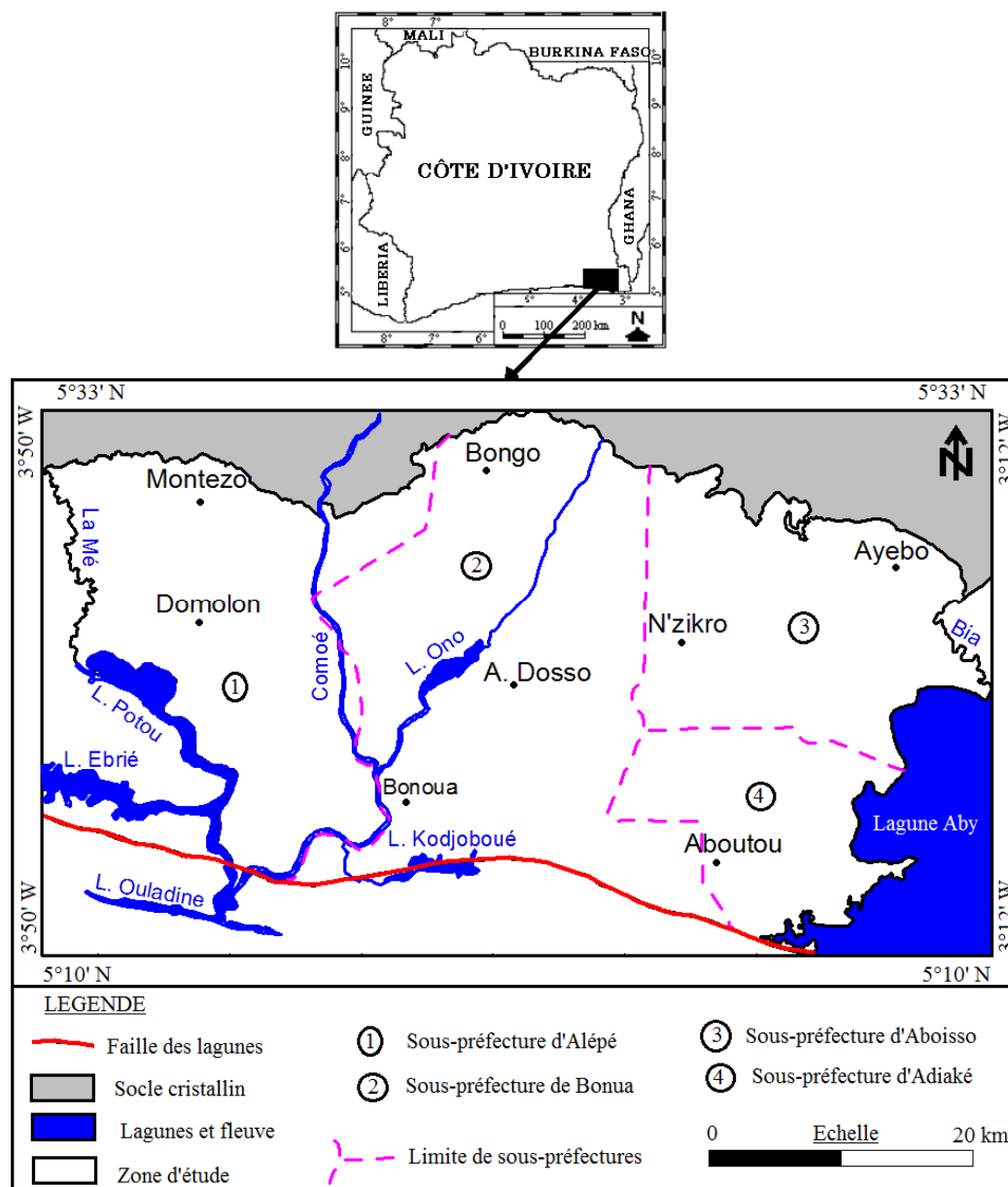


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude [13]

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 DONNÉES ET MATÉRIEL

La réalisation de cette étude a nécessité l'organisation d'une campagne d'échantillonnage et d'analyse hydrogéochimique réalisée sur les eaux de surface en juillet 2014, pendant la grande saison des pluies dans la région de Bonoua. Les prélèvements ont porté sur les eaux des lagunes, des rivières et du fleuve Comoé. Dans cette étude, les cours d'eau échantillonnés sont utilisés pour les activités domestiques des populations. Au cours de cette campagne, les échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant de remplir les bouteilles, elles ont été rincées avec l'eau à prélever. La bouteille tenue à l'aide d'une main est plongée dans l'eau jusqu'à 20 cm de profondeur, goulot dirigé à contre-courant, selon les recommandations de [14]. La bouteille remplie à ras-bord est retirée du plan d'eau et fermée hermétiquement à l'aide d'un bouchon afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère ambiante. Pour éviter le mélange des échantillons d'eau, une codification a été adoptée. Ainsi, les échantillons d'eau prélevés sur les eaux des lagunes sont affectés de la lettre "L", les

échantillons d'eau des rivières portent la lettre "R" et ceux du fleuve Comoé sont désignés par la lettre "C". Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire du Centre Ivoirien Antipollution (CIAPOL) pour analyse dans l'heure qui a suivi le prélèvement. Sur le terrain, la température (T) et le potentiel d'Hydrogène (pH) ont été déterminés à l'aide du multiparamètre de type HACH HQ 40dmulti toutes, les sondes intellical. L'oxygène dissous (OD) a été déterminé à l'aide de l'analyseur d'oxygène dissous portatif HANNA de type HI 941. La conductivité électrique (CE) a été déterminée à l'aide du conductimètre HANNA de type HI 99301 et la turbidité a été déterminée à l'aide du turbidimètre portatif HACH 2100Q. Le repérage des coordonnées (longitudes, latitudes et altitudes) des sites d'échantillonnage a été faite à l'aide du GPS GARMIN Map 60 CSX. Les prises de vue ont été faites à l'aide d'un appareil photo numérique. Au total, 14 échantillons d'eau ont été prélevés pour les analyses chimiques. Ils se répartissent comme suit : 03 échantillons d'eau des lagunes, 02 échantillons d'eau du fleuve Comoé et 09 échantillons d'eau des rivières. Sur les échantillons d'eau, les éléments chimiques tels que les nitrates (NO_3^-), l'ammonium (NH_4^+), les phosphates (PO_4^{3-}), la demande chimique en oxygène (DCO), la demande biochimique en oxygène (DBO_5) et les matières en suspension (MES) ont été analysés. Les méthodes d'analyses utilisées et les normes associées sont celles préconisées par [15] et [16]. L'ensemble des méthodes et normes utilisées sont résumées dans le tableau 2.

Tableau 1 : Caractéristiques des sites de prélèvement des eaux de surface

Localités	Cours d'eau	Code site	Longitude (d°m's")	Latitude (d°m's")	Altitude (m)
Adiaké	Lagune Aby	L3	-3° 17' 29,005836"	5° 17' 33,349128"	10
Béniakré	Rivière	R6	-3° 25' 35,279976"	5° 27' 30,780036"	57
Bongo v2	Rivière	R2	-3° 30' 47,999988"	5° 29' 25,979892"	41
Kimoukro carrefour	Rivière	R4	-3° 30' 31,080060"	5° 26' 58,379856"	12
Ingrakon	Rivière	R1	-3° 40' 21,720000"	5° 26' 6,000036"	10
Kimoukro	Rivière	R3	-3° 32' 21,779916"	5° 26' 1,440132"	14
Monga	Fleuve Comoé	C1	-3° 39' 31,799844"	5° 28' 35,460084"	5
N'gokro	Fleuve Comoé	C2	-3° 38' 30,839856"	5° 21' 37,920060"	7
Oguédoumé	Lagune Potou	L1	-3° 46' 32,400048"	5° 22' 35,399928"	9
Ono village	Lagune Ono	L2	-3° 34' 20,100216"	5° 22' 43,319856"	10
Soubressi	Rivière	R9	-3° 18' 45,419976"	5° 16' 10,319844"	22
Toumanguié	Rivière	R8	-3° 22' 58,739988"	5° 21' 56,640024"	31
Wourouwourou	Rivière	R5	-3° 30' 20,459988"	5° 26' 51,240048"	23
Babadougou	Rivière	R7	-3° 22' 58,739988"	5° 21' 56,640024"	55

Tableau 2 : Méthodes d'analyse des paramètres physico-chimiques [15] et [16]

Paramètres	Méthodes d'analyse	Normes
Nitrates (NO_3^-)	Spectrométrie d'absorption moléculaire	NF T 90-012
Phosphates (PO_4^{3-})		NF T 90-023
Ammonium (NH_4^+)	Chromatographie ionique	NF T 90-15
Demande chimique en oxygène (DCO)	Méthode au dichromate de potassium	NF T 90-101
Demande biochimique en oxygène (DBO_5)	Méthode de dilution	NF T 90-103
Matières en suspension (MES)	Filtration sur membrane poreuse de 0,45 μm , séchage à 105 °C et pesée	NF T 90-105

3.2 MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

L'approche méthodologique appliquée aux résultats des analyses et aux mesures *in situ* est marquée dans un premier temps par la comparaison des paramètres mesurés aux normes de potabilité de l'OMS [17]. Dans un deuxième temps, les données ont été traitées à l'aide du système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ-Eau) pour déterminer la qualité globale de l'eau. Cette approche a l'avantage qu'elle prend en compte simultanément plusieurs paramètres dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Elle représente un outil performant servant à résumer un grand nombre de données complexes sur la qualité de l'eau en un message facile à comprendre par le public et les gestionnaires de la ressource en eau [18]. Elle peut en effet indiquer si la qualité globale des eaux constitue un risque potentiel pour diverses utilisations de cette eau, notamment entant qu'eau potable. Le SEQ-Eau détermine si la qualité de l'eau est excellente, bonne, moyenne, mauvaise et très

mauvaise. Cette méthode est basée sur la définition de l'Indice Pondéré de Qualité Globale (IPQG) pour chaque point d'eau échantillonné. Il s'obtient en quatre étapes.

La première étape consiste à définir les altérations ou groupes de paramètres de même nature ou de même effet permettant de décrire les types de dégradation de la qualité de l'eau. Au niveau des eaux de surface, les altérations recommandées sont au nombre de sept (7) [19]. Il s'agit des altérations :

- "température" : elle est caractérisée par le paramètre température (T);
- "acidification" : elle est mise en évidence par le potentiel d'Hydrogène (pH) des eaux;
- "matières organiques et oxydables" : elle se compose de l'oxygène dissous, de la demande biochimique en oxygène (DBO₅), de la demande chimique en oxygène (DCO) et de l'ammonium (NH₄⁺);
- "matière phosphorée" : elle est composée des ortho-phosphates (PO₄³⁻);
- "nitrates" : elle est caractérisée par les nitrates (NO₃⁻);
- "minéralisation" : elle comprend la conductivité électrique (CE);
- "particules en suspension" : elle regroupe les matières en suspension (MES) et la turbidité (Turb).

La seconde étape de la méthode est réservée à la détermination de l'Indice Pondéré des différents paramètres analysés (IPpa) pour chaque point d'eau. L'IPpa s'obtient par pondération, basée sur l'attribution d'un poids (variant généralement entre 0 et 100) aux différents paramètres analysés selon leur importance dans la dégradation de la qualité de l'eau. Il se calcule à partir de l'équation (1) [19] :

$$IPpa = Ii + \left(\frac{Is - Ii}{bs - bi} \right) \times (bs - pa) \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec :

IPpa : Indice pondéré du paramètre analysé ;
Ii : Indice inférieur;
Is : Indice supérieur
bi : borne inférieure;
bs : borne supérieure;
pa : paramètre analysé.

La troisième étape consiste à déterminer l'Indice Pondéré pour chaque altération (IPa). Cet indice s'obtient en faisant simplement la moyenne des valeurs des indices pondérés des paramètres caractérisant ladite altération. Pour les altérations qui sont caractérisées par un seul paramètre, leur indice est identique à celui de leur paramètre.

La quatrième étape de la méthode réside dans la détermination de l'Indice Pondéré de Qualité Globale (IPQG) de chaque point d'eau. Il est défini en choisissant l'indice le plus faible, obtenu sur l'ensemble des altérations considérées pour chaque point d'eau. À cet indice, on fait correspondre la classe de qualité équivalente dans la grille d'évaluation de la qualité globale des eaux. Cette classe représente la qualité globale du site échantillonné. La grille d'évaluation de la qualité de surface fixe 5 classes de qualité définies chacune par un ensemble de valeurs seuils que les différents indices ne doivent pas dépasser. Ces classes sont représentées par des couleurs évoluant graduellement du bleu au rouge (tableau 3).

Une Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) a été également appliquée au traitement des données. Bien que l'ACPN soit une méthode exploratoire et descriptive [20], le but de ce traitement est de déterminer les principaux facteurs qui contrôlent le chimisme des eaux d'une part et leur typologie d'autre part. Cette méthode statistique a été largement appliquée pour enquêter sur des phénomènes de l'environnement et les processus hydrogéochimiques à travers le monde [21], [22], [23], [24], [25], [26] et [27]. En Côte d'Ivoire, cette méthode a été utilisée par [28] sur les eaux souterraines de la région des Lacs, [5] sur les eaux superficielles de la commune de Marcory (Abidjan), [29] sur les eaux souterraines de la région d'Adiaké et [30] sur les eaux des lagunes Aghien et Potou.

L'analyse effectuée a été réalisée sur un tableau de 11 variables (température (T°), pH, conductivité électrique (CE), oxygène dissous (OD), matières en suspension (MES), demande chimique en oxygène (DCO), demande biochimique en oxygène (DBO₅), nitrates (NO₃⁻), ammonium (NH₄⁺), turbidité (Turb) et phosphates (PO₄³⁻)) et de 14 individus, échantillons prélevés sur le terrain. Le critère de Kaiser [31] a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seuls les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 sont acceptés comme sources possibles de variance dans les données. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA.12 (version d'évaluation).

Tableau 3 : Grille pour l'évaluation de la qualité globale des eaux de surface [19]

Altérations N°	Classes de qualité		Excellente		Bonne		Moyenne		Mauvaise		Très mauvaise	
	Indices		100	80	80	60	60	40	40	20	20	0
1	Température											
	Température	°C	0 - 20		20 - 25		25 - 30		30 - 35		35 - 40	
2	Acidification											
	pH		6,5 - 8,5				8,5 - 9,2		3 - 6,5 et 9,2-10			
3	Matières organiques et oxydables											
	O ₂ dissous	mg/L	7 - 10		5 - 7		3 - 5		1 - 3		0 - 1	
	DBO ₅	mgO ₂ /L	0,5 - 3		3 - 5		5 - 10		10 - 25		25 - 1000	
	DCO	mgO ₂ /L	1,5 - 30		30 - 35		35 - 40		40 - 80		80 - 2000	
	Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/L	0 - 0,1		0,1 - 0,5		0,5 - 2		2 - 8		8 - 50	
4	Matières phosphorées											
	Ortho - phosphates (PO ₄ ³⁻)	mg/L	0 - 0,2		0,2 - 0,5		0,5 - 1		1 - 5		5 - 20	
5	Nitrates											
	Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/L	< 10		10 - 25		25 - 50		> 50			
6	Minéralisation											
	CE 20°C	µS/cm	100 - 750		750 - 1300		1300 - 2700		2700 - 3000		3000 - 7000	
7	Matières en suspension											
	MES	mg/L	< 50		50 - 200		200 - 1000		1000 - 2000		2000 - 10000	
	Turbidité	NTU	< 15		15 - 35		35 - 70		70 - 100		> 100	

4 RÉSULTATS

4.1 RESULTATS DES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

Les résultats de la détermination *in situ* et au laboratoire des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la région de Bonoua sont présentés dans le tableau 4.

4.1.1 PARAMÈTRES PHYSIQUES

La température des eaux varie de 23,80 °C à 28,80 °C avec une valeur moyenne de 26,19 ± 0,38 °C. La turbidité des eaux oscille entre 0,99 NTU et 112 NTU avec une moyenne de 14,47 ± 8,30 NTU. Les conductivités électriques des eaux sont conformes à la norme OMS, à l'exception de la lagune Aby qui enregistre une conductivité électrique de 725 µS/cm, supérieure à la norme OMS fixée à 500 µS/cm. Le pH des eaux varie de 4,80 à 7,51 avec un pH moyen de 5,92 ± 0,24. Les eaux de surface de la région sont acides. L'oxygène dissous des eaux fluctue de 0,48 mg/L à 7,38 mg/L avec une moyenne de 4,02 ± 0,65 mg/L. Les matières en suspension des eaux varient de 22,50 mg/L à 130,52 mg/L avec une moyenne de 43,14 ± 7,52 mg/L.

4.1.2 PARAMÈTRES CHIMIQUES

Les teneurs en nitrates des eaux sont conformes à la norme OMS de 50 mg/L. Elles varient de 0,10 mg/L à 23,57 mg/L, avec une moyenne de 12,99 ± 1,56 mg/L. Les concentrations en ammonium oscillent entre 0,15 mg/L et 1,52 mg/L pour une moyenne de 0,50 ± 0,10 mg/L. Les teneurs en phosphates sont comprises entre 0,24 mg/L et 0,59 mg/L pour une moyenne de 0,40 ± 0,03 mg/L. La DBO₅ des eaux de surface est comprise entre 0 mO₂/L et 150 mO₂/L, avec une moyenne de 18,64 ± 10,48 mO₂/L. Sur l'ensemble des quatorze sites échantillonnés, cinq (5) soit 35,71 % présentent des concentrations en DBO₅ au-delà de la norme OMS (≤ 6 mO₂/L). La DCO varie de 2,10 mO₂/L à 336,10 mO₂/L, avec une moyenne de 43,89 ± 23,22 mO₂/L, supérieure à la norme OMS de 10 mO₂/L. Le rapport DCO/DBO₅ est compris entre 2,09 et 5,16 avec une moyenne de 3,04.

Tableau 4 : Résultats de la détermination in situ et du dosage au laboratoire des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la région de Bonoua

Sites de mesure	pH	CE (µs/cm)	T°C	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	MES (mg/L)	OD (mg/L)	Turb (NTU)	DBO ₅ (mO ₂ g/L)	DCO (mO ₂ g/L)	DCO/DBO ₅
L3	7	725	28	24	0,5	0,4	42,05	7,4	11	1	5,16	5,16
R6	5,3	19,73	26	16	0,4	0,4	36,21	0,9	3	3	9,11	3,04
R2	5,9	29,79	25	14	0,5	0,5	30,15	5,8	1,7	0	3,86	-
R4	5,9	30,14	25	14	0,4	0,4	42,72	6,2	4,6	22	49,7	2,26
R1	5,4	20,57	24	10	1	0,3	26,72	4,2	1,2	4	13	3,26
R3	4,8	19,91	25	13	0,5	0,4	24,81	5,4	1,2	18	37,6	2,09
C1	7,5	108,60	27	0,1	1,5	0,6	50,25	5,1	40	4	12	3,00
C2	7,3	104,25	27	8,7	0,6	0,6	130,5	6,6	112	31	68,7	2,22
L1	6,8	64,37	29	21	0,3	0,4	70,45	4,4	15	150	336	2,24
L2	5,3	66,48	27	13	0,2	0,4	23,07	1,1	1	23	53,4	2,32
R9	5,1	19,33	27	9,5	0,4	0,4	25,18	1	1,4	0	2,1	-
R8	5,4	20	25	10	0,2	0,3	38,05	0,5	3,7	2	8,75	4,38
R5	5,6	19,73	26	12	0,3	0,2	22,5	4,9	1,1	3	10,3	3,45
R7	5,5	28,68	27	17	0,2	0,3	41,25	2,7	5,9	0	4,6	-
Min	4,8	19,33	24	0,1	0,2	0,2	22,5	0,5	1	0	2,1	2,09
Moy±	5,92 ±	91,18 ±	26,19±	12,99 ±	0,50 ±	0,40 ±	43,14±	4,02 ±	14,47 ±	18,64 ±	43,89 ±	3,04
ESM	0,24	51,34	0,38	1,56	0,10	0,03	7,52	0,65	8,30	10,48	23,22	
Max	7,5	725	29	24	1,5	0,6	130,5	7,4	112	150	336	5,16
Écart type	0,86	185,10	1,37	5,61	0,37	0,10	28,33	2,35	29,92	39,21	86,87	-
OMS (20011)	6,5-8,5	≤ 500	≤ 25	≤ 50	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 50	≥ 5	≤ 5	≤ 6	≤ 10	-

*ESM : Erreur standard à la moyenne Moy : Moyenne Max : Maximum

4.2 RESULTAT DE L'INDICE PONDERE DE QUALITE GLOBALE

Les valeurs des indices pondérés de qualité globale (IPQG) des échantillons prélevés sur les eaux de surface sont présentées sur la Figure 2. L'analyse de celle-ci montre que sur les quatorze (14) sites étudiés :

- un seul site (L1), soit 7,14 % présente une qualité globale mauvaise. Il s'agit de l'échantillon d'eau prélevé sur la lagune Ono;
- treize (13) sites (L2, L3, C1, C2, R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7, R8 et R9), soit 92,86 % indiquent une qualité globale moyenne.

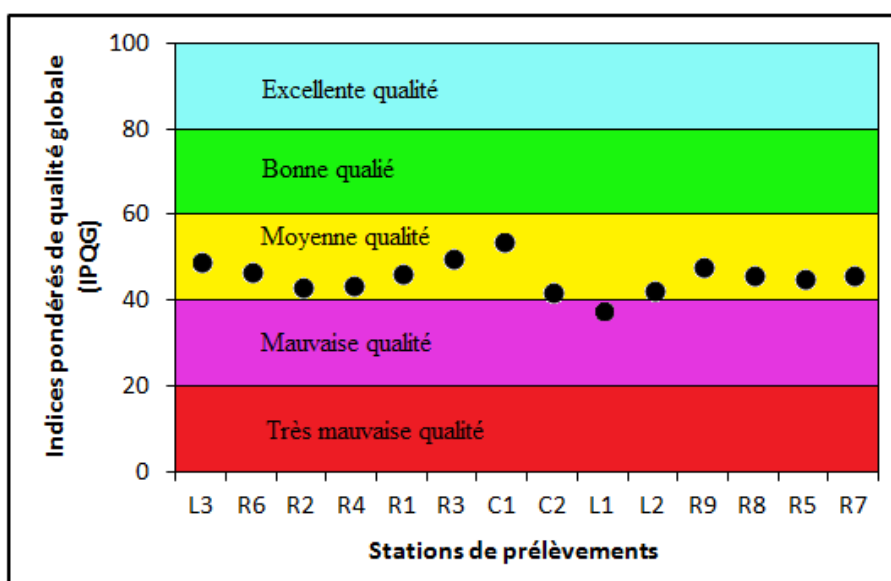


Figure 2 : Valeurs des indices pondérés de qualité globale enregistrées aux différents sites

4.3 RESULTAT DE L'ETUDE STATISTIQUE MULTIVARIEE

Selon le critère de Kaiser, trois facteurs ont été retenus dans l'explication de l'information recherchée (Tableau 5) Le facteur 1 est le plus important, avec une variance exprimée de 38,23 %, ensuite viennent les facteurs 2 et 3, avec respectivement 25,31 % et 15,06 % de la variance exprimée. Ces trois facteurs permettent de représenter de manière significative le nuage de points et contiennent le maximum d'informations recherchées.

Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée cumulée

	Valeur propre	%Total de Variance exprimée	cumul de valeur propre	% de variance exprimée cumulée
Fact. 1	4,21	38,23	4,21	38,23
Fact. 2	2,78	25,31	6,99	63,54
Fact. 3	1,66	15,06	8,65	78,60

La liaison qui existe entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (Tableau 6). On note des liaisons significatives entre les variables mais à des degrés différents. Ainsi, le pH présente une liaison significative (0,543 à 0,703) avec T°C, OD, Turbidité, PO₄³⁻ et MES. T°C est également en liaison avec DBO₅ (0,567) et DCO (0,569). La turbidité est significativement corrélée à PO₄³⁻ (0,619) et MES (0,933). La DCO et la DBO₅ sont très corrélée avec un coefficient de corrélation (r = 1,000). Ce qui témoigne de leur origine commune. NH₄⁺ est positivement corrélé à PO₄³⁻ (0,567) et négativement corrélée à NO₃⁻ (-0,590). PO₄³⁻ est corrélé à MES (0,518).

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques

Variables	pH	T°C	CE	OD	Turb	DBO ₅	DCO	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	MES
pH	1										
T°C	0,543	1									
CE	0,484	0,413	1								
OD	0,597	0,088	0,461	1							
Turb	0,691	0,368	0,094	0,390	1						
DBO₅	0,314	0,567	-0,074	0,120	0,151	1					
DCO	0,316	0,569	-0,073	0,113	0,144	1,000	1				
NH₄⁺	0,482	-0,169	0,116	0,382	0,286	-0,155	-0,155	1			
PO₄³⁻	0,590	0,167	0,052	0,415	0,619	0,037	0,030	0,567	1		
NO₃⁻	-0,102	0,339	0,470	0,112	-0,345	0,332	0,335	-0,590	-0,390	1	
MES	0,703	0,479	0,108	0,379	0,933	0,407	0,402	0,102	0,518	-0,085	1

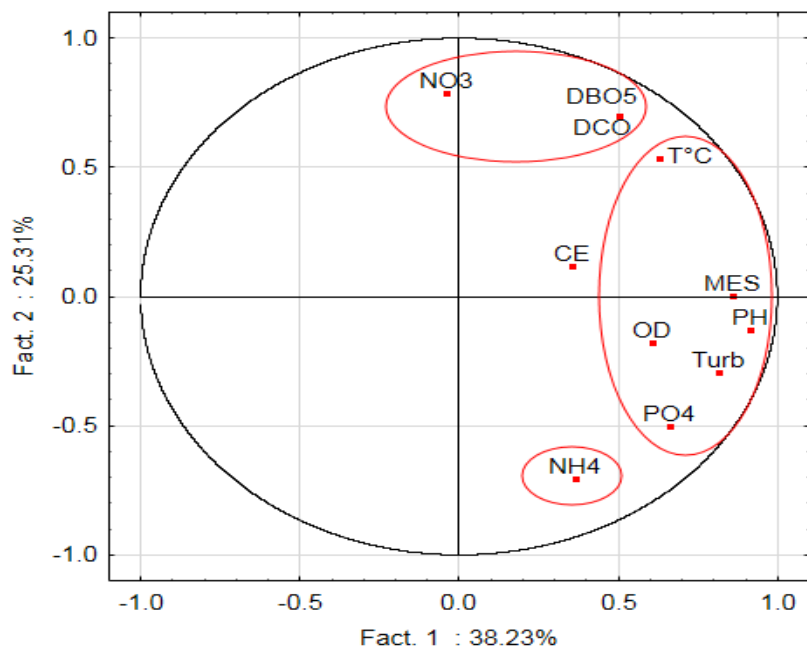
4.3.1 ANALYSE DE L'ESPACE DES VARIABLES

La projection des variables dans les plans factoriels (F1-F2) et (F2-F3) est représentée respectivement par les figures 3 et 4. L'analyse de la figure 3 montre que le plan factoriel (F1-F2) représente 63,54 % de la variance totale exprimée. Le facteur 1 le plus important (38,23 %) est déterminé par T°C, MES, pH, OD, turbidité et PO₄³⁻. La présence de T°C et OD rend compte des conditions du milieu. PO₄³⁻ est d'origine superficielle qui pourrait être dû à l'utilisation des engrais phosphatés dans l'agriculture. Le facteur 1 exprime donc le phénomène de la minéralisation anthropique lié au lessivage des terres agricoles. Le facteur 2 est déterminé dans sa partie positive par NO₃⁻, DCO et DBO₅ et dans sa partie négative par NH₄⁺. Ces variables sont d'origine superficielle, probablement issues aux rejets des eaux usées domestiques et industrielles. Le facteur 3 est déterminé par la seule variable CE. Cet axe met en évidence la minéralisation naturelle des eaux superficielles.

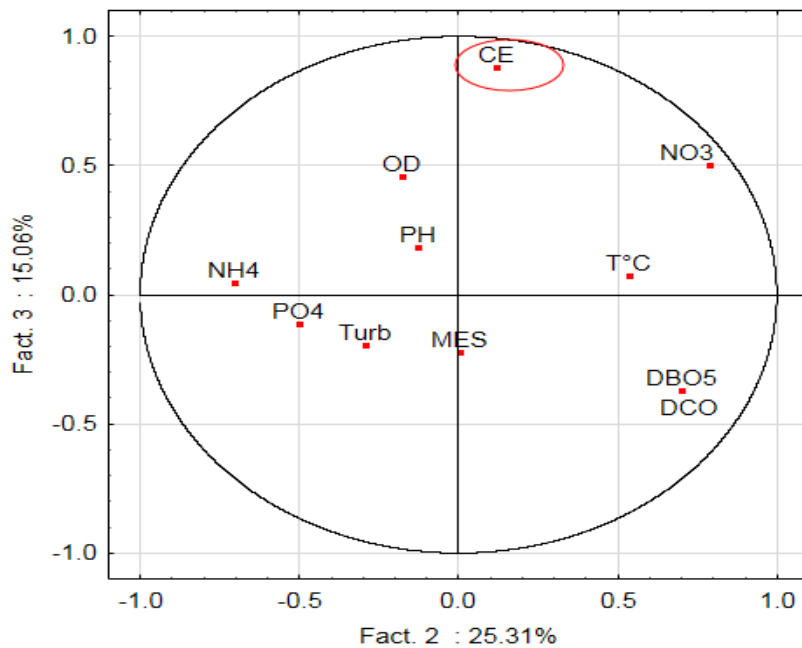
4.3.2 ANALYSE DE L'ESPACE DES INDIVIDUS

La projection des sites de prélèvement dans les plans factoriels F1-F2 et F2-F3 est respectivement donnée par les figures 4 et 5. L'analyse de ces figures montre que les eaux de surface de la région de Bonoua présentent 5 regroupements. La premier groupe prend en compte les points d'eau 2, 4, 6, 10, 11, 12, 13 et 14. Ce groupe caractérise les eaux claires, acides, peu oxygénées, avec de faibles valeurs en PO₄³⁻. Le deuxième groupe renferme le point d'eau 8. Il est caractérisé par les eaux

turbides, bien oxygénées, avec de fortes teneurs en PO_4^{3-} et des matières en suspension. Le troisième groupe est composé du point d'eau 9 (lagune Potou), riche en NO_3^- , DCO et DBO₅. Le quatrième groupe renferme les points d'eau 3, 5 et 7, riches en ammonium. Le cinquième groupe est composé de la lagune Aby, avec une forte minéralisation.

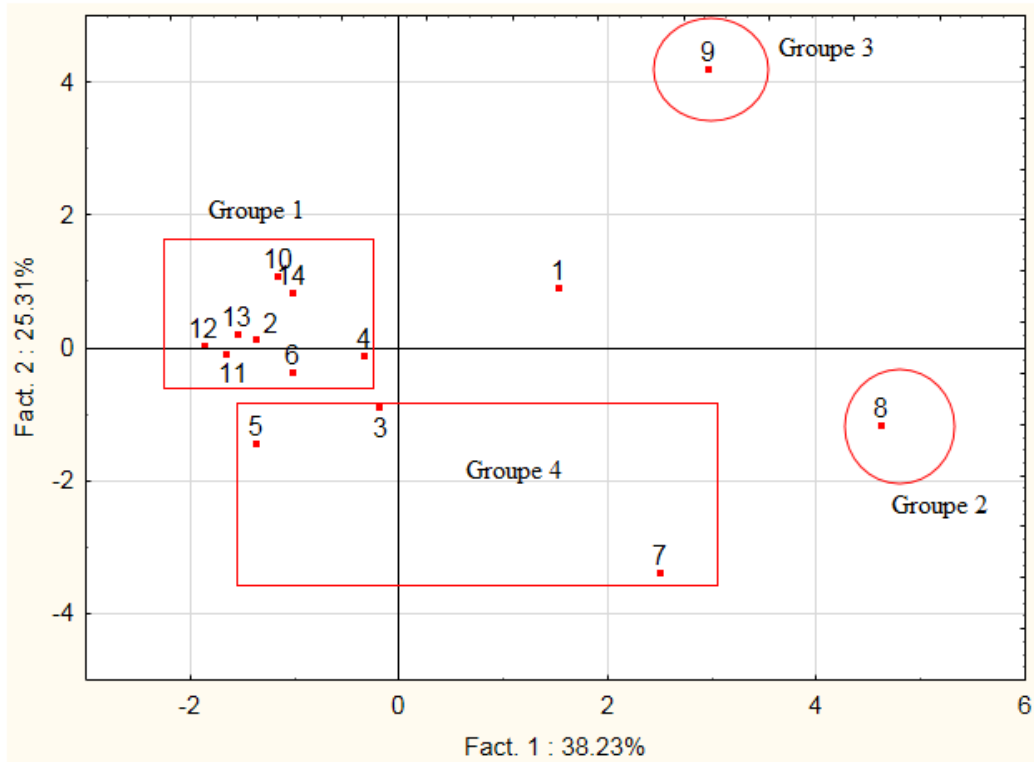


a-Espace des variables du plan factoriel F1-F2

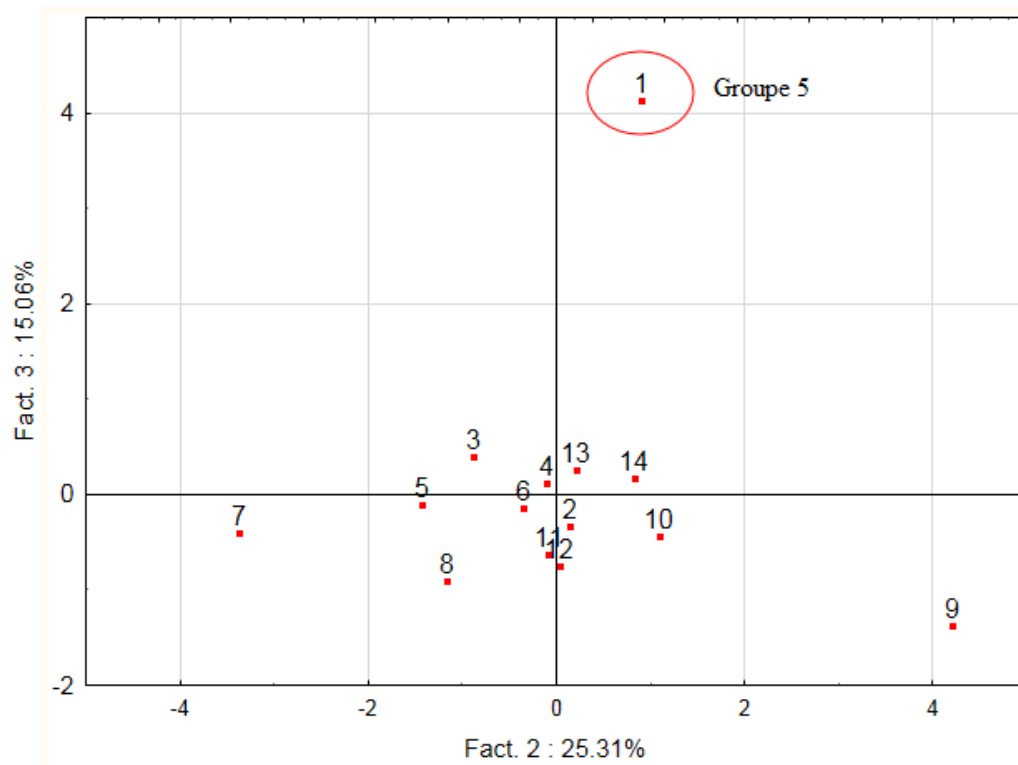


b-Espace des variables du plan factoriel F2-F3

Figure 3 : Projection des variables dans les plans factoriels (a: F1-F2) et (b: F2-F3) des eaux de surface de la région de Bonoua



a-Espace des individus du plan factoriel F1-F2



b-Espace des individus du plan factoriel F2-F3

Figure 4 : Projection des individus dans les plans factoriels (a : F1-F2) et (b : F2-F3) des eaux de surface de la région de Bonoua

5 DISCUSSION

L'étude de la qualité globale des eaux de surface de la région de Bonoua par la méthode "SEQ-Eau" a montré que ces eaux sont de qualité moyenne à mauvaise en saison pluvieuse. La dégradation de leur qualité est liée principalement à l'altération dite "acidification" et accessoirement à celles dites "température" et "matières organiques et oxydables". L'altération "acidification" est observée sur neuf sites de prélèvement des eaux des rivières et lagunes, soit une proportion de 64%. Les pH de ces eaux sont compris entre 4,8 et 5,93 avec une moyenne de 5,4. L'acidité de ces eaux serait due au dioxyde de carbone dissous provenant soit de l'atmosphère, soit des réactions métaboliques des microorganismes et des matières organiques contenues dans ces eaux [32]. Ce résultat montre que les eaux de surface de la région de Bonoua sont légèrement acides contrairement aux eaux des cours d'eau "Banco" et "Mé" [33], dont le pH moyen est de 5,74. Toutefois, comparées aux eaux de surface de la région voisine d'Adiaké dont le pH moyen est de 6,33 [29], ces eaux de la région de Bonoua sont très acides. L'altération "température" est observée au niveau des sites L3 (Lagune Aby) et C1 (Comoé à Monga). Cette altération définit la qualité globale des eaux de surface à 14%. Les températures sont respectivement de 28°C pour le site L3 et de 27°C pour le site C1. Ces températures dépassent de loin la température de 25°C préconisée par l'OMS [17] pour les eaux de boisson. Ces températures élevées pourraient stimuler la prolifération des microorganismes nuisibles qui peuvent causer des odeurs et des goûts désagréables et même rendre l'eau malsaine [34]. Les températures mesurées pour ces eaux de surface seraient influencées par les conditions climatiques [35], notamment la température ambiante ayant régné dans la région au moment des prélèvements. Les températures observées au niveau de ces deux sites évoluent dans la même gamme que celles déterminées par [33] sur les eaux de surface de la région d'Abidjan-Agboville, par [36] sur les eaux de surface de la partie centrale de la ville d'Ekiti, au Sud-Ouest du Nigéria, par [37] sur le barrage de Moloko (extrême Nord du Cameroun) et par [29] sur les eaux de surface de la région d'Adiaké. Mais, elles s'avèrent supérieures à celles déterminées au Maroc dans les eaux de surface de l'Oued Moulouya [38] et dans celles de l'Oued Boufekrane dans la région de Meknès-Tafilalt [39]. L'altération "matières organiques et oxydables" en termes de DCO et de DBO5 participent à hauteur de 22% à la dégradation de la qualité des eaux. Cela s'observe dans les eaux des sites C2 (Comoé à N'gokro), L1 (Lagune Potou) et L2 (Lagune Ono). En ces sites, les eaux présentent de fortes teneurs en BDO et DCO, avec des concentrations moyennes respectives de 68 et 152,73 mg/L. Ces valeurs élevées de DCO et de DBO révèlent la présence d'une forte charge polluante d'origine organique en ces eaux. Cette pollution peut être d'origine domestique, industrielle, agricole ou bien être le résultat de la décomposition d'animaux ou de végétaux morts [40]. En effet, ces plans d'eau lagunaires sont utilisés par les populations riveraines pour la baignade, la vaisselle, la lessive,... (Figure 2). De plus, ces eaux reçoivent les eaux usées domestiques et celles des industries installées en amont. La pollution d'origine organique des eaux constatée en ces sites est en accord avec la faible concentration d'oxygène dissous (valeur moyenne OD = 4 mg/l). Ces faibles valeurs de l'OD sont dues à l'utilisation de cet oxygène au cours de la dégradation de la matière organique présente dans l'eau par les bactéries.

L'étude statistique (ACP) a montré que la minéralisation des eaux de surface de la région de Bonoua en saison pluvieuse est influencée par une pollution d'origine anthropique. Des résultats similaires ont été mis en évidence par les travaux de [7] sur les eaux de la lagune Ebrié, [41] sur la lagune Ebrié, [42] sur les eaux du Quaternaire de la ville d'Abidjan. En outre, l'ACP a montré que les eaux de surface de la région de Bonoua se déclinent en 5 principales classes.



Figure 5 : Activités anthropiques menées sur les plans d'eau lagunaires Potou (A) et Ono (B)

6 CONCLUSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer en saison pluvieuse la qualité globale des eaux de surface de la région de Bonoua soumises à des pressions anthropiques. Les données physico-chimiques issues des mesures *in situ* et des analyses en laboratoire ont été comparées aux normes de potabilité de l'OMS. Le résultat a montré que les valeurs moyennes de pH, température, oxygène dissous, turbidité, DBO et DCO dépassent les normes OMS. Par contre, celles des nitrates, de la conductivité électrique, de l'ammonium, des phosphates et des matières en suspensions (MES) sont conformes à ces normes de potabilité. L'application du système d'évaluation de la qualité de l'eau (SEQ-Eau) à ces données a montré que 92,86% de ces eaux sont de qualité globale moyenne. Seulement 7,14% des eaux sont de qualité globale mauvaise. La détérioration de la qualité globale de ces eaux superficielles de la région de Bonoua est majoritairement due à l'altération acidification et accessoirement aux altérations liées à la température et aux matières organiques et oxydables (DCO et de DBO₅).

Les résultats de cette étude donnent un aperçu sur le groupe de paramètres à l'origine de la dégradation de la qualité globale des eaux superficielles de la région de Bonoua. Toutefois, l'évaluation de la qualité globale de ces eaux doit aussi prendre en compte le volet pesticide et microbiologique, étant donné que la pollution des eaux par les pesticides et les microbes menace la santé humaine autant que la biodiversité aquatique. Ces résultats mettent en relief la forte pression anthropique sur la qualité des eaux de surface de la région de Bonoua.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL) pour l'analyse des données et le chauffeur SANGARÉ Madou pour sa disponibilité et sa connaissance du terrain.

REFERENCES

- [1] Tampo L., Gnazou M., Akpataku V., Bawa L. et Djaneyé-Boundjou G. (2015). Application des méthodes statistiques à l'étude hydrochimique des eaux d'un hydrosystème tropical : Cas du bassin versant de la rivière Zio (Togo). *European Scientific Journal*, vol. 11 n°14, pp. 204-225.
- [2] Haouchine S. (2011). Recherche sur la qualité faunistique et l'écologie des macroinvertébrés benthiques des cours d'eau de Kabylie, mém. Magister Sciences bio.
- [3] Foto M. S., Zebaze T. S. H., Nyamsi T. N. L., Ajeegah G. A. et Njiné T. (2011). Évolution Spatiale de la Diversité des Peuplements de Macro invertébrés benthiques dans un cours d'eau anthropisé en milieu Tropical (Cameroun). *European Journal of Scientific Research*, Vol.55 n° 2, pp. 291-300.
- [4] Ahoussi K. E., Soro N., Soro G., Lasm T., Oga M. S. and Zade S. (2008). Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Cote d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol.20, N°2, pp. 302-316.
- [5] Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G., Soro N. et Biémi J. (2012). Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, volume 6, n°4, pp. 1854-1873.
- [6] Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G. et Biémi J. (2013). Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). *Journal of Applied Biosciences*, volume 63, pp. 4703-4719.
- [7] Coulibaly A., Mondé S., Wognin V. A. et Aka K. (2008). State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal elements traces. *European Journal of Scientific Research*, Volume 19, n°2. pp. 372-390.
- [8] Abdelbaki C. et Boukli H. F. (2007). Étude du phénomène de dégradation des eaux souterraines du groupement urbain de Tlemcen. *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 10, N°2, pp. 257-263.
- [9] Bricha S., Ounine K., Oulkheir S., El Haloui N. et Attarassi B. (2007). Étude de la qualité physicochimique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique SCIENCE*, volume 03, n°3, pp. 391-404.
- [10] Koné M., Bonou L., Bouvet Y., Joly P. et Kouliadiaty J. (2009). Étude de la pollution des eaux par les intrants agricoles : cas de cinq zones d'agriculture intensive du Burkina Faso. *Sud Sciences et Technologies*, Semestriel n°17, pp 5-15.
- [11] Leneuf (1959). L'altération des granites calco-alcalins et des granitoïdes en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Paris (France), 210 p.
- [12] Guillaumet J. L. et Adjanohoun E. (1971). Milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM N°50, pp. 163-391.
- [13] Delor C., Diaby I., Simeon I., Adou M., Bamble B.Z., Tastet J.P., Yao B., Konan G., Chiron J.C. et Dommanget A. (1992). Carte géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200000. Feuille de Grand-Bassam, Direction de la géologie, Abidjan (Côte d'Ivoire).
- [14] Rodier J. (1984). L'analyse de l'eau, 7^{ème} Edition, Ed. Dunod, Paris.

- [15] Rodier J., Legube B. et Merlet N. (2009). L'analyse de l'eau. 9^e édition, pp. 141-159.
- [16] AFNOR (1997). Qualité de l'eau. Tome 1 : Terminologie, échantillonnage et évaluation des méthodes, 3^e édition, Paris (France), 34 p.
- [17] OMS. (2011). Guidelines for drinking-water quality. Fourth Edition. World Health Organization Publication. Geneva, Switzerland, pp. 307-447.
- [18] G. (2003). Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques. Rapport sur «la qualité de l'eau et de l'assainissement en France», 293 p.
- [19] SEEE (2008). Fiche sur le nouveau système d'évaluation de la qualité des eaux, Maroc, 5p.
- [20] Dagnelie P. (2006). Statistique théorique et appliquée, Tome 2: Inférence à une et à deux dimensions, Bruxelles-université, Ed, De Boeck Larcier.
- [21] Anazawa K., Ohmori H., Tomiyasu T. and Sakamoto h. (2003). Hydrochemistry at a volcanic summit area, Norikura, central Japan, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 67, Issue 18, Supplement 17.
- [22] Güler C. et Thyne G.D. (2004). Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in India wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. *J. Hydrol.*, Vol. 285, Issues 1-4, 177-198.
- [23] Matini L., Moutou J. M. et Kongo-Mantono M.S. (2009). Évaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science* 05 (1): 82-98.
- [24] Belkhir L., Boudoukha A., Mouni L. et Baouz T. (2010). Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modelling for characterization of groundwater, A case study: Ain Azel plain (Algeria). *Geoderma*, Vol. 159, Issues 3-4, 390-398.
- [25] Tiri A., Belkhir L., Boudoukha A. et Lahbari N. (2011). Characterization and evaluation of the factors affecting the geomistry of surface water of Koudiat Medouar basin, Ageria, *Afr. J. Environ. Sci. Technol*, Vol. 5, Issues 5, 355-362.
- [26] Hamzaoui A.F., Bouhlila R. et Gueddari M. (2012). Caractérisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques. *Geo-Eco-Trop.*, 36: 49-62.
- [27] Brinis N., Boudoukha A. et Ahmed Hamela A. (2015). Analyse statistique et géochimique de la dynamique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du synclinal de Ghassira (Algérie orientale). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, N°22, pp. 123-137.
- [28] Soro G. (2010). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : Hydrogéologie et Hydrochimie des aquifères discontinus du District de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. Thèse de Doctorat. Université de Cocody, 250 p.
- [29] Eblin S. G., Sombo A. G., Soro G., Aka N., Kambiré O. et Soro N. (2014). Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, volume 75, pp. 6259-6271.
- [30] Traoré A. (2016). Impacts de la variabilité climatique et du changement de l'occupation et de l'utilisation du sol sur les ressources en eau de l'environnement lagunaire d'Aghien et de Potou (Sud-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 241 p.
- [31] Kaiser H. F. (1960). The application of electronic computers to factor analysis, *Educ. Psychol. Meas.*, Vol. 20, Issues 1, 141-151.
- [32] Klein L. (1973). River pollution, chemical analysis. 6th Ed., London, Sciences Direct-Environnement International, London.
- [33] Ahoussi K. E. (2008). Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, 270 p.
- [34] Chairi R. (2005). Géochimie organique des eaux de surface de la zone septentrionale de la Sebkhia de Mognine, Tunisie orientale. *Larhyss Journal*, n°4, pp. 17-30.
- [35] Aboulkacem A., Chahlaoui A., Soulaymani A., rhazi-filali F. et Benali D. (2007). Étude comparative de la qualité bactériologique des eaux des Oueds Boufekrane et Ouislane à la traversée de la ville de Meknès (Maroc).
- [36] Talabi A. O., Afolagboye O. L., Tijani m. N., Aladejana J. A. and Ogundana A. K. (2013). Hydrogeochemical Assessment of Surface Water in the Central Part of Ekiti-State, South western Nigeria. *American Journal of Water Ressources*, Vol. 1, n° 4, pp. 56-65.
- [37] Lewa S., Ombolo A. et Loura B. B. (2014). Caractérisation hydrochimique saisonnière (étiage et crue) et vulnérabilité environnementale de la ressource en eau de la retenue de Mokolo (extrême-nord Cameroun). *European Scientific Journal*, vol.10, n°12, pp. 396-413.
- [38] Chaoui M. (2013). Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et métallique des eaux de surface (Oued Moulouya/Barrage Hassan II) au voisinage de la mine abandonnée Zeida (Haute Moulouya). Mémoire de Master de l'Université Cadi Ayyad, Marrakech, 98 p.
- [39] Majdouline L., Abdelmadjid S. et Azzedine E. (2013). Évaluation spatio-temporelle du degré de la pollution industrielle oléicole sur les cours d'eaux de l'Oued Boufekrane dans la région de Meknès-Tafilalt (Maroc). *J. Mater. Environ. Sci.* volume 4, n°3, 432-441.

- [40] Aufray R. et Perennou C. (2007). Évolution de la Camargue: Pollution & santé. OBSERVATOIRE CAMARGUE. Version 28/02/2007, 27 p.
- [41] Soro N., Ouattara L., Dongo K., Kouadio K.E., Ahoussi K.E., Gbombele S., Oga M.S., Savané I. et Biémi J. (2010). Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4 (6): 2203-2219.
- [42] Ahoussi K. E., Soro N., Kouassi A. M, Soro G. Koffi Y. B. et Zade S. P. (2010). Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des Métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4, (5): 1753-1765.