

Hydrochimie des eaux de surface en saison pluvieuse de la région de Bonoua, Sud-Est de la Côte d'Ivoire

Privat TOHOURI^{*}, Miessan Germain ADJA², Gabriel Etienne AKE¹, Gbombélé SORO¹,
N'guessan Ives KONAN³ et Jean BIEMI¹

¹ *Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Unité de Formation et de Recherches des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM), Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

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

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

* Correspondance, courriel : privatohouri@gmail.com

Résumé

Les eaux superficielles de la région de Bonoua sont d'une importance capitale pour les populations de cette région. Elles sont utilisées pour satisfaire les besoins domestiques et aussi pour l'irrigation, pour la baignade et pour la pêche. Cependant, elles sont soumises à des pressions anthropiques dues aux activités agricoles, aux rejets des eaux usées industrielles et domestiques. La présente étude a pour but d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de surface et d'identifier les phénomènes à l'origine de leur minéralisation. À cet effet, une série d'analyse physico-chimique a été réalisée en saison pluvieuse. Les résultats obtenus ont été analysés à l'aide du diagramme de Piper pour déterminer la typologie des eaux. La classification Ascendante Hiérarchique (CAH) a servi à mettre en évidence les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux et leur regroupement en classes homogènes en fonction de leur degré de minéralisation. Les résultats montrent des eaux turbides, acides, sous saturées en oxygène dissous et chaudes. Du point de vue chimique, les teneurs moyennes de Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- , NO_2^- et PO_4^{3-} sont conformes aux normes OMS. Cependant, 35,71 % des stations enregistrent des teneurs en NH_4^+ supérieures à la norme OMS, fixée à 0,5 mg / L.

En tenant compte des valeurs moyennes, l'ordre d'abondance des cations majeurs dans ces eaux est $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ et celui des anions est $\text{NO}_3^- > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. Les valeurs moyennes de DBO₅ et DCO sont respectivement de 18,64 mgO₂/ L et 43,89 mgO₂/ L. Elles sont largement supérieures aux normes OMS (2011) pour les eaux de surface. Les eaux sont dans leur majorité chlorurées / nitratées calciques (57,14 %). Les résultats de la classification hiérarchique ont permis de mettre en évidence trois processus à l'origine de la minéralisation des eaux. Il s'agit du phénomène de la minéralisation-temps de séjour par hydrolyse acide des minéraux silicatés qui est le plus prépondérant, du phénomène de pluiolessivage des terres agricoles et les apports superficiels d'origine anthropique. Aussi, trois groupes d'eau ont été mis en évidence. Les eaux faiblement minéralisées qui sont les plus abondantes avec 54,14 % ensuite viennent les eaux moyennement minéralisées (21,43 %) et les eaux minéralisées (21,43 %). Les eaux de surface de la région de Bonoua présentent de bonnes aptitudes au niveau hydrochimique qui peut permettre leur utilisation après traitement.

Mots-clés : *eaux de surface, paramètres physico-chimiques, CAH, minéralisation, région de Bonoua.*

Abstract

Chemistry of surface water in times of high water area Bonoua, South-East of Ivory Coast

The surface water in the Bonoua region are of paramount importance for the people of this region. They are used to meet domestic needs and for irrigation, for swimming and fishing. However, they are under anthropogenic pressures due to agricultural activities, to discharges of industrial and domestic wastewater. This study aims to assess the physicochemical quality of surface waters and to identify the phenomena at the origin of their mineralization. To this end, a series of physical and chemical analysis was carried out in periods of high water. The results were analyzed using the Piper diagram to determine the type of water. Hierarchical Classification (AHC) was used to highlight the phenomena at the origin of the mineralization of the waters and their grouping into homogeneous classes according to their degree of mineralization. The results indicate turbid water, acids, saturated in dissolved oxygen and warm. Chemical point of view, the average contents of Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- , NO_2^- and PO_4^{3-} comply with WHO standards. However, 35.71 % of stations record contents NH_4^+ above the WHO standard, fixed at 0.5 mg / L.

Considering the mean values, the order of abundance of major cations in these waters is $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ and the anion is $\text{NO}_3^- > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$. The average values of BOD and COD are respectively 18.64 mgO_2/L and 43.89 mgO_2/L . They are much higher than the WHO (2011) standards for surface water. The waters are in their majority Chloride / nitrated calcium (57.14 %). The results of the hierarchical classification allowed to highlight three originally process of mineralization of water. This is the phenomenon of mineralization-time living by acid hydrolysis of silicate minerals is most prominent, the through fall phenomenon of agricultural land and surface contributions of anthropogenic origin. Also, three water groups were highlighted. Weakly mineralized waters which are the most abundant with 54.14 % followed by the moderately mineralized waters (21.43 %) and mineralized water (21.43 %). The surface waters of the Bonoua region have good skills hydro chemical level that can allow their use after treatment.

Keywords : *surface water, physicochemical parameters, AHC, mineralization, Bonoua area.*

1. Introduction

Depuis l'antiquité, l'eau a toujours été considérée comme une source renouvelable et inépuisable [1]. De nos jours, plusieurs pays sont touchés par l'épuisement de leurs ressources en eau, du fait des conditions climatiques et de l'accroissement de la demande, résultat inéluctable de la croissance démographique et du développement socio-économique [2]. En Côte d'Ivoire, ce problème se ressent également aussi bien dans les régions rurales que dans les zones urbaines. En effet, ce manque d'eau est provoqué par les conditions climatiques défavorables souvent liées aux sécheresses prolongées et à la croissance démographique que connaît la Côte d'Ivoire depuis son accession à l'indépendance [3]. Ceci a engendré certains besoins primaires des populations dont l'accès à l'eau potable. Pour palier ce déficit en eau potable, le gouvernement ivoirien dès 1998 a conjointement financé avec la Banque Arabe pour le Développement Économique en Afrique (BADEA), un projet d'hydraulique villageoise pour toute la partie Sud du pays [3]. Cependant, force est de constater aujourd'hui que nombreux de ces ouvrages sont en mauvais état. La région de Bonoua située au Sud-Est du pays, objet de cette étude n'est pas en reste de cette situation. En effet, certaines localités rurales de la région ne disposent plus d'ouvrages d'hydrauliques villageoises pour des raisons de pannes mécaniques. Bien que disposant de ressources en eau souterraines importantes [4], certaines populations rurales, défavorisées ou en détresses, ont recours aux eaux de surface dont la qualité reste douteuse pour assurer leurs besoins domestiques, agricoles et pastorales. De plus, le charriage des intrants agricoles utilisés

par les cultures agro-industrielles, par les eaux de pluies, constitue une source potentielle de pollution de ces eaux de surface. On y observe par endroits des décharges sauvages et les eaux usées domestiques et industrielles sont déversées dans la nature, faute de l'inexistence d'un système d'assainissement adéquat. Les populations rurales, suite au manque de toilettes font leurs besoins dans la nature et souvent aux abords des cours d'eau. Par conséquent, en saison des pluies, les eaux de ruissellement charrient tous les déchets de toutes natures jusqu'aux eaux superficielles, ce qui pourrait altérer leur qualité. En effet, certaines études entreprises dans cette région ont montré l'impact de ses pressions anthropiques sur la qualité des ressources en eau. C'est le cas de celle de [5] qui a montré la présence de fortes concentrations de Coliformes totaux dans les eaux de certains forages. Cette forte présence de Coliformes totaux serait liée à l'intrusion des eaux usées domestiques suite à un réseau d'assainissement inadéquat. Les travaux de [6] ont montré l'eutrophisation de certains cours d'eau de la zone de Bonoua consécutive à la présence de fortes concentrations de phosphates dans ces eaux.

[7] a montré que les eaux de la lagune Ono connaissent une contamination par les métaux lourds (Cr, Ni et Cd), issus des pesticides utilisés dans la localité d'Ono pour le traitement des cultures. La lagune Aby, la plus vaste étendue d'eau superficielle de la zone d'étude est sujette à une pollution organique. En effet, selon [8], cette lagune reçoit les eaux usées domestiques et les rejets industriels en provenance du bassin versant de la Bia renfermant des unités industrielles (l'agro-industrie de Toumanguié, d'Ehania, d'Ono-Salci et de l'unité agro-industrielle de Palm-industrie). Les travaux de [9], relatives à la qualité physico-chimique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone d'Adiaké, qui fait partie intégrante de notre zone d'étude ont relevé la présence dans ces eaux de fortes teneurs en nitrates, en phosphates, en fer et en aluminium dépassant les normes OMS. Face à la menace de pollution potentielle dont sont sujettes les eaux de surface de la région de Bonoua, il convient donc de connaître et de suivre la qualité de ces eaux. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude. Elle a pour but d'évaluer la qualité physico-chimique des ressources en eau de surface de la région de Bonoua et identifier les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est située au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Elle se localise entre les latitudes $5^{\circ} 10' N$ et $5^{\circ} 33' N$ et les longitudes $3^{\circ} 12' W$ et $3^{\circ} 50' W$. Avec une superficie de 1864 km^2 , 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 (*Figure 1*). La végétation très hétérogène de la région, passe des forêts denses humides sempervirentes à une végétation actuelle de type savane [10, 11]. Dans l'ensemble, cette végétation est abondamment transformée par des cultures industrielles (cacaoyers, caféiers, palmiers à huile, ananas, bananeraies et hévéa) 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. Ils débouchent tous sur les différentes lagunes. Les différentes lagunes qui complètent le réseau hydrographique de la zone d'étude sont les lagunes Ouladine, Potou, Ebrié, Aby, Kodjobboué, Hébé, Adjin et Ono.

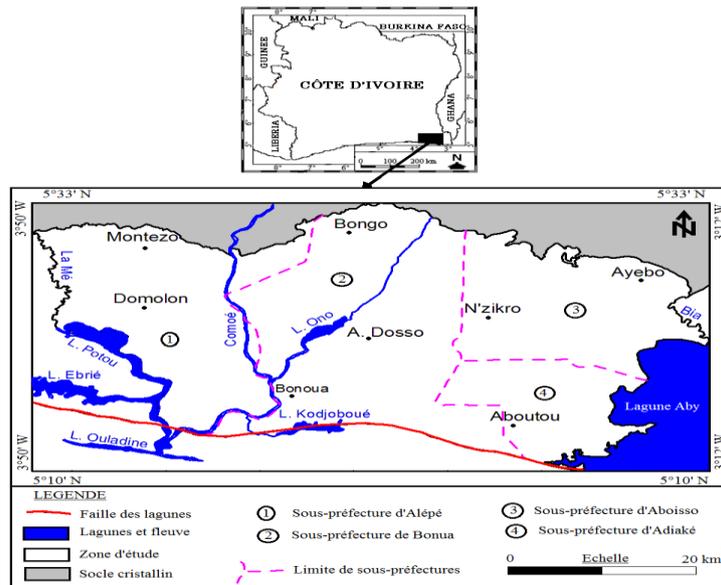


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

2-2. Données et matériel utilisés

Cette étude est basée sur l'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la région de Bonoua pour déterminer et apprécier leur qualité. Les paramètres physiques mesurés dans les échantillons d'eau sont : la température ($T^{\circ}\text{C}$), le potentiel d'hydrogène (pH), l'oxygène dissous (OD), la conductivité électrique (CE), les matières en suspension (MES), le potentiel redox (Eh), les solides totaux dissous (TDS), la salinité (Sal) et la turbidité (Turb) des eaux. Quant aux paramètres chimiques, les éléments dosés dans ces échantillons d'eaux sont : les éléments de pollution (Nitrates (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+), Nitrites (NO_2^-), Ortho-phosphates (PO_4^{3-}), Demande Biochimique en Oxygène (DBO) et Demande Chimique en Oxygène (DCO)) et les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^-). Ces paramètres sont obtenus par des mesures *in situ* au cours d'une campagne de terrain et par analyse en laboratoire des échantillons d'eau prélevés. Le matériel mobilisé pour acquérir ces données se compose :

- de bouteilles en polyéthylène de 1 litre utilisées pour recueillir les échantillons d'eau prélevés sur chaque site ;
- d'une glacière réglée à la température de 4°C pour la conservation et le transport des échantillons d'eau au laboratoire d'analyse ;
- d'une valise multi-paramètres contenant un pH-mètre, un conductimètre et un oxymètre.

2-3. Procédé d'échantillonnage

La campagne de prélèvements des échantillons d'eau de surface s'est déroulée dans le mois de juillet 2014. C'est la période de hautes eaux ou période humide qui correspond à la grande saison des pluies dans cette région. Au cours de cette campagne, les échantillons d'eau ont été prélevés sur quatorze (14) sites (*Tableau 1*). La *Figure 2* présente la carte de répartition spatiale des sites échantillonnés. Les bouteilles de prélèvement d'échantillons d'eau d'une capacité de 1 litre (bouteilles en polyéthylène) ont été préalablement lavées à l'eau distillée. Avant leur remplissage, elles sont rincées avec l'eau à prélever et remplies à ras-bord. Enfin, elles sont vissées par un bouchon pour éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère ambiante. Les échantillons d'eau sont stockés et conservés dans une glacière à la température de 4°C et ensuite transportés au laboratoire du Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL) pour analyse dans l'heure qui suit leurs prélèvements.

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

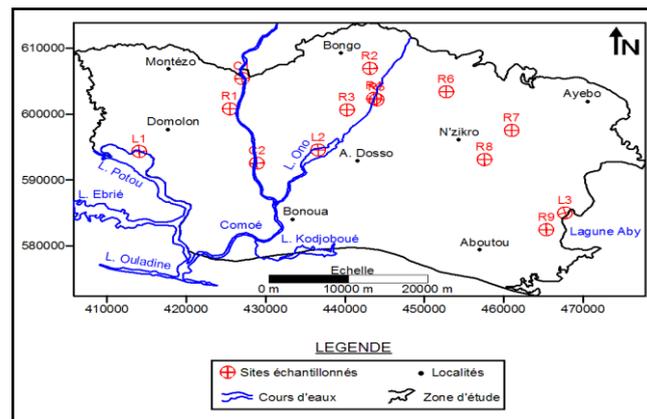


Figure 2 : Carte des sites d'échantillonnage des eaux de surface

2-4. Mesure *in situ* des paramètres physiques

Pendant la campagne de prélèvements des échantillons d'eau, le potentiel Hydrogène (pH), le potentiel redox (Eh) et la température (T°C) ont été déterminés à l'aide du multi paramètres HACH de type HQ40d, toutes les sondes intelliCAL. La conductivité électrique (CE), la salinité et les solides totaux dissous (TDS) ont été déterminés à l'aide du conductimètre portatif HANNA de type HI 99301. L'oxygène dissous (OD) a été déterminé à l'aide de l'oxymètre HANNA de type HI 9141. La turbidité a été déterminée à l'aide du turbidimètre portatif HACH de type 2100 Q. Les conductivités électriques (CE) des eaux déterminées *in situ* à la température ordinaire ont été ramenées à la température de 25°C selon la relation 1 suivante [12] :

$$CE(25^{\circ}C) = CE(Tmes) \times \frac{1}{(1-0,022)(25-Tmes)} \tag{1}$$

avec, Tmes : Température ordinaire de mesure (en °C) ; CE (25°C) : Conductivité électrique (en μS / cm) corrigée à 25°C.

2-5. Analyse au laboratoire

Plusieurs procédés et méthodes sont mis en œuvre au laboratoire pour déterminer certains paramètres physico-chimiques de l'étude. Les méthodes analytiques utilisées et les normes associées sont celles préconisées par l'Association Française de Normalisation [13, 14]. Ces méthodes et normes sont consignées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Méthodes d'analyses des eaux de surface de la région de Bonoua

Paramètres	Méthodes d'analyses	Normes
Magnésium (Mg^{2+})	Spectrométrie d'absorption atomique avec flamme	NF T 90-112
Calcium (Ca^{2+})		NF T 90-005
Potassium (K^+)		NF T 90-020
Sodium (Na^+)		NF T 90-019
Bicarbonate (HCO_3^-)	Titrimétrie acide	NF T 90-003
Phosphates (PO_4^{3-})	Spectrométrie d'absorption moléculaire	NF T 90-023
Nitrate (NO_3^-)		NF T 90-012
Nitrite (NO_2^-)		NF T 90-013
Ammonium (NH_4^+)	Chromatographie ionique	NF T 90-015
Chlorure (Cl^-)		NF T 90-014
Sulfate (SO_4^{2-})		NF T 90-040
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 suspensions (MES)	Filtration sur membrane poreuse de 0,45 μm , séchage à 105°C et pesée	NF T 90-105
Titre Hydrotimétrique (TH)	Titrimétrie à l'EDTA	NF T 90-003

2-6. Traitement des données

Les données physico-chimiques obtenues des mesures *in situ* et des analyses en laboratoire ont été traitées. Ce traitement a permis de faire l'analyse descriptive des données basée sur la détermination des valeurs extrêmes (minima et maxima), de la moyenne et de l'erreur standard à la moyenne. Ces valeurs moyennes ont été comparées aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé [15] pour l'eau de boisson. Les données sont ensuite traitées par la méthode statistique multi-variée couplée à la méthode hydrochimique. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme triangulaire de Piper réalisé sous l'environnement du logiciel Diagrammes, pour la classification hydrochimique des eaux de surface. Ce diagramme est beaucoup utilisé en hydrochimie et fournit d'excellents résultats [9, 16 - 19]. L'approche statistique multi-variée est basée sur l'utilisation de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) pour mettre en évidence les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux et leur regroupement en classes homogènes en rapport avec leur degré de minéralisation. Cette méthode est couramment utilisée pour analyser les données hydrochimiques des eaux [20, 21]. La CAH consiste à définir un critère d'agrégation des classes qui peut être défini par la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance qui existerait entre les échantillons ou les variables [22]. Il existe plusieurs mesures pour évaluer la distance ou le degré de ressemblance entre les échantillons ou les variables. La distance euclidienne demeure la mesure de similarité la plus utilisée. Les partitions sont représentées par un arbre de classification ou un « dendrogramme ». Le nombre de classes obtenus dépend du niveau de la coupure de l'arbre choisi « pheon line ». Les critères

d'agrégation sont utilisés pour la détermination des classes et reviennent à rassembler les échantillons ou les variables suivant plusieurs méthodes. En comparant les solutions trouvées par les différentes méthodes, la méthode de Ward semble avoir donné les résultats les plus pertinents [1, 23]. En somme, dans le cadre de cette étude, la classification ascendante hiérarchique a été réalisée par application de la méthode d'agrégation de Ward et des mesures des distances euclidiennes, sous l'environnement du logiciel XLSTAT 2014.5.03 (version démo). Pour la réalisation de la CAH, 20 variables (pH, T°C, Eh, CE, TH, OD, DCO, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, PO₄³⁻, NO₃⁻, Sal, TDS, MES et Turb) et 14 observations sont utilisées.

3. Résultats

Les résultats de la détermination *in situ* et des analyses en laboratoire des paramètres physico-chimiques des eaux superficielles de la région de Bonoua en période de hautes eaux sont consignés dans le **Tableau 3**.

Tableau 3 : *Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la région de Bonoua en saison pluvieuse (juillet 2014)*

Paramètres	Unités	Min	Moy	Max	ESM	Normes OMS 2011
Température	°C	23,80	26,19	28,80	0,38	< 25 °C
Turbidité	NTU	0,99	14,47	112,00	8,30	< 5
CE	µS / cm	19,33	91,18	724,98	51,34	< 500
pH	-	4,80	5,92	7,51	0,24	6,5 - 8,5
Eh	mV	-77,20	25,05	82,30	14,22	-
TH	°F	0,81	2,52	15,38	1,01	< 35
Salinité	‰	0,01	0,05	0,40	0,03	-
OD		0,48	4,02	7,38	0,65	> 5
TDS		10,00	48,14	360,00	25,43	< 500
MES		22,50	43,14	130,52	7,52	< 50
Cl ⁻		0,30	7,56	62,00	4,46	< 250
HCO ₃ ⁻		0,62	12,93	108,00	7,85	< 120
SO ₄ ²⁻		1,00	3,64	18,00	1,17	< 250
K ⁺		0,37	1,94	10,32	0,74	< 12
Na ⁺	mg / L	0,98	2,98	16,50	1,09	< 150
Ca ²⁺		1,75	7,89	53,70	3,74	< 100
Mg ²⁺		0,72	1,31	4,70	0,28	< 50
NO ₃ ⁻		0,10	12,99	23,57	1,56	< 50
NO ₂ ⁻		0,00	0,03	0,08	0,01	< 0,1
NH ₄ ⁺		0,15	0,50	1,52	0,10	< 0,5
PO ₄ ³⁻		0,24	0,40	0,59	0,03	< 0,5
DBO ₅		0,00	18,64	150,00	10,48	< 6
DCO		2,10	43,89	336,10	23,22	< 10

Min : Minimum ; Moy : Moyenne ; Max : Maximum ; ESM : Erreur Standard à la Moyenne

3-1. Résultats des mesures *in situ*

La température des eaux varie de 23,80 à 28,80 °C avec une moyenne de 26,19 ± 0,38 °C. Sur un effectif de quatorze (14) sites, deux (2), soit 14,29 % ont une température inférieure à la norme de potabilité (< 25 °C),

par contre 85,71 % ont une température supérieure à la norme. Le pH varie de 4,80 à 7,51 unités pH, avec un pH moyen de $5,92 \pm 0,24$ unités pH. L'oxygène dissous des eaux oscille entre 0,48 et 7,38 mg / L, avec une moyenne de $4,02 \pm 0,65$ mg / L. Le potentiel redox (Eh) des eaux est compris entre -37,60 et 175,70 mV, avec une valeur moyenne de $37,26 \pm 14,22$ mV. La conductivité des eaux varie de 19,33 à 724,98 $\mu\text{S} / \text{cm}$, avec une moyenne de $91,18 \pm 51,34$ $\mu\text{S} / \text{cm}$. Les TDS fluctuent entre 10 et 360 mg / L, avec une moyenne de $48,14 \pm 25,43$ mg / L. La dureté des eaux ou TH varie de 0,81 à 15,38 °F, avec une valeur moyenne de $2,52 \pm 1,01$ °F. La turbidité s'échelonne entre 0,99 et 112 NTU, pour une moyenne de $14,47 \pm 8,30$ NTU. Les valeurs des MES sont comprises entre 22,50 et 130,52 mg / L, avec une moyenne de $43,14 \pm 7,57$ mg / L. La salinité des eaux de surface varie de 0,01 à 0,40 ‰ avec une moyenne de $0,05 \pm 0,03$ ‰.

3-2. Résultats des analyses chimiques

3-2-1. Anions majeurs

Les concentrations en anions des eaux de surface de la région de Bonoua sont faibles et inférieures aux normes OMS (2011). En effet, la concentration en chlorure varient de 0,30 à 62 mg / L, avec une valeur moyenne de $7,56 \pm 4,46$ mg / L. Celles du bicarbonate varient de 0,62 à 108 mg / L, avec une moyenne de $12,93 \pm 7,85$ mg / L. Enfin, celle du sulfate oscille entre 1,00 et 18,00 mg / L, avec une valeur moyenne de $3,64 \pm 1,17$ mg / L.

3-2-2. Cations majeurs

Les concentrations des cations dosés dans les eaux de surface sont très faibles et inférieures aux normes OMS (2011). La concentration du potassium s'étale de 0,37 à 10,32 mg / L, avec une concentration moyenne de $1,94 \pm 0,74$ mg / L. Celle du sodium varie de 0,98 à 16,50 mg / L, avec une moyenne de $2,98 \pm 1,09$ mg / L. La concentration du calcium varie de 1,75 à 53,70 mg / L avec une moyenne de $7,89 \pm 3,74$ mg / L. Le magnésium des eaux varie de 0,72 à 4,70 mg / L avec une concentration moyenne de $1,31 \pm 0,28$ mg / L.

3-2-3. Éléments de pollution

Les teneurs en nitrates des eaux varient de 0,10 à 23,57 mg / L avec une moyenne de $12,99 \pm 1,56$ mg / L. Les concentrations en nitrites varient de 0 à 0,08 mg / L pour une moyenne de $0,03 \pm 0,01$ mg / L. Les concentrations en ammonium oscillent entre 0,15 et 1,52 mg / L pour une moyenne de $0,50 \pm 0,10$ mg / L. 35,71 % des eaux enregistrent des concentrations en ammonium supérieures à la norme OMS (2011). Les teneurs en phosphates sont comprises entre 0,24 et 0,59 mg / L pour une moyenne de $0,40 \pm 0,03$ mg / L. 21,43 % des stations enregistrent des teneurs en phosphates supérieures à la norme OMS (0,5 mg / L). La DBO₅ des eaux de surface est comprise entre 0 et 150 mgO₂ / L, avec une moyenne de $18,64 \pm 10,48$ mgO₂ / 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 mgO₂ / L). La DCO varie de 2,10 à 336,10 mgO₂ / L avec une moyenne de $43,89 \pm 23,22$ mgO₂ / L. 57,14 % des sites présentent des concentrations en DCO au-delà de la norme OMS (< 10 mgO₂ / L).

3-3. Classification hydrochimique des eaux de surface

La typologie des eaux est donnée par le diagramme de Piper de la *Figure 2*.

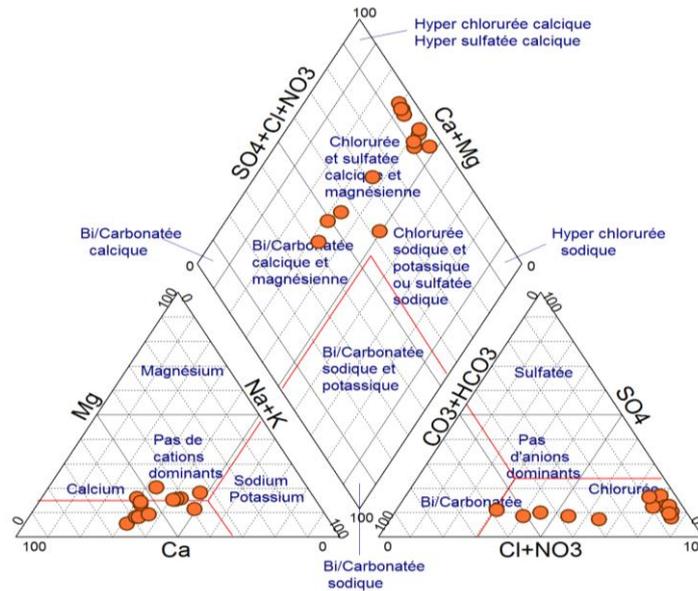


Figure 2 : Classification hydrochimique des eaux de surface de la région de Bonoua en saison pluvieuse (juillet 2014)

L'analyse de ce diagramme permet de faire les observations suivantes :

- dans le triangle des anions, les points d'eau migrent à la fois vers le domaine chloruré / nitraté et le domaine bicarbonaté. Ce qui permet de mettre en évidence les eaux chlorurées-nitratées et les eaux bicarbonatées ;
- dans le triangle des cations, les points d'eau migrent vers le pôle calcique et le pôle sodi-potassique. Ce qui permet de mettre en évidence les eaux calciques et les eaux sodi-potassiques.

Dans le losange, la synthèse de la position des points d'eau en fonction de leurs proportions en anions et en cations permet de mettre en évidence trois principaux faciès chimiques des eaux de surface (**Tableau 4**) :

- faciès bicarbonaté calcique : il est mis en évidence par trois échantillons, prélevés respectivement sur le fleuve Comoé à Monga (C1) et à N'gokro (C2) et sur la lagune Aby (L3) à Adiaké. Ce faciès représente 21,43 % des eaux de surface étudiées. Il représente les eaux les plus minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 312,61 $\mu\text{S} / \text{cm}$. Ces eaux contiennent des nitrates relativement élevées avec une moyenne de 13,70 mg / L ;
- faciès chloruré / nitraté sodi-potassique : il est également déterminé par trois échantillons d'eau. Ils sont prélevés sur la lagune Ono (L2) et sur les rivières de Béniakré (R6) et de Soubressi (R9). Ce faciès chimique représente aussi 21,43 % des eaux de surface de la région de Bonoua étudiées. Il représente les eaux faiblement minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 35,18 mg / L et une teneur moyenne en nitrate de l'ordre de 12,92 mg / L ;
- faciès chloruré / nitraté calcique : Ce faciès chimique est le plus dominant dans les eaux de surface de la région de Bonoua. En effet, il est mis en exergue par huit échantillons d'eau prélevés sur la lagune Potou (L1) à Oguédoumé et sur les rivières de Babadougou (R7), de Bongo V2 (R2), de Kimoukro carrefour (R4), d'Ingrakon (R1), de Kimoukro (R3), de Wourouwourou (R5) et de Toumanguié (R8). Ce qui fait une proportion de 57,14 %. Il représente les eaux très faiblement minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 28,68 $\mu\text{S} / \text{cm}$. Cependant, elles sont les plus riches en nitrates avec une teneur moyenne de 17,10 mg / L.

Tableau 4 : Classification des faciès chimiques des eaux de surface de la région de Bonoua en saison pluvieuse et leurs formules caractéristiques

Faciès chimiques	Formules caractéristiques	Échantillons d'eau	Fréquence (%)
Bicarbonaté calcique	$r\text{HCO}_3^- > r(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{2+}$	L3-C1-C2	21,43 %
Chloruré / nitraté Sodi-potassique	$r(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$ ou $r(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^-$ et $r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+}$	R6-L2-R9	21,43 %
Chloruré/nitraté calcique	$r(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{2+}$ ou $r(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-) > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) > r\text{Mg}^{2+}$	R7-R2-R4-R1 R3-R5-R8-L1	57,14 %

3-4. Résultats de l'étude statistique multi-variée

3-4-1. Classification ascendante hiérarchique (CAH) des paramètres physico-chimiques

La CAH des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la saison pluvieuse est traduite par le dendrogramme de la **Figure 3**. L'analyse de ce dendrogramme permet d'identifier trois grands regroupements des variables. Le premier groupe (G1) de variables prend en compte K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , CE, Ca^{2+} , TH, SO_4^{2-} , Sal, TDS et Na^+ . Il met en évidence le phénomène de la minéralisation-temps de séjour par hydrolyse acide des minéraux silicatés. Le deuxième groupe (G2) réunit les variables telles que pH, OD, PO_4^{3-} , MES et turbidité. Le pH et l'OD rendent compte des conditions du milieu et de leur influence dans la mise en solution des ions PO_4^{3-} . Ces éléments sont donc liés au phénomène de pluviollessivage des terres agricoles. Le troisième regroupement (G3) prend en compte NO_3^- , T°C , Eh et DCO. Dans ce groupe de variables, le potentiel redox (Eh) et la température (T°C) expriment les conditions du milieu et leur influence dans l'acquisition de la minéralisation des eaux superficielles. Par ailleurs, les variables NO_3^- et DCO sont de bons indicateurs de surface issus des activités anthropiques. Ce groupe de variables exprime donc la minéralisation des eaux de surface par les apports superficiels d'origine anthropique.

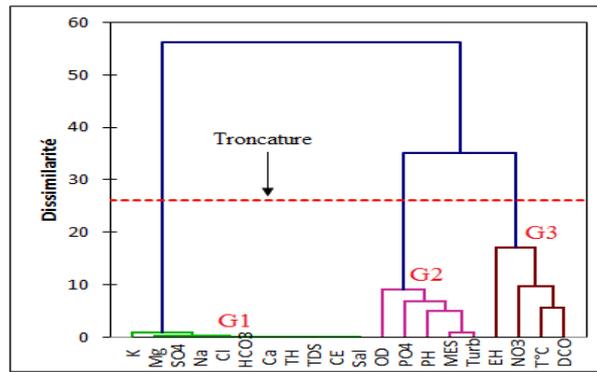


Figure 3 : Dendrogramme des paramètres physico-chimiques des eaux de surface de la région de Bonoua en période de hautes eaux (juillet 2014)

3-4-2. Classification ascendante hiérarchique (CAH) des stations de prélèvements

La classification ascendante hiérarchique des stations de prélèvements des eaux de surface en saison pluvieuse est traduite par le dendrogramme de la **Figure 4**. L'analyse de ce dendrogramme permet de distinguer une typologie des eaux en trois classes distinctes :

- Classe 1 : elle renferme la majeure partie des rivières échantillonnées, ce qui fait une proportion de 57,14 %. Il s'agit des rivières des localités de Béniakré (R6), de Bongo V2 (R2), d'Ingrakon (R1), de Kimoukro (R3), de Soubressi (R9), de Toumanguié (R8) de Wourouwourou (R5) et de Babadougou (R7). Cette classe d'eau est caractérisée par une faible minéralisation, avec une conductivité moyenne de 22,22 $\mu\text{S} / \text{cm}$. La minéralisation de ces eaux est gouvernée par le contact eau-roche ;
- Classe 2 : elle représente 21,43 % des eaux de surface étudiées et renferme les eaux des lagunes Potou (L1), Ono (L2) et de la rivière du carrefour Kimoukro (R4). Ces eaux sont moyennement minéralisées, avec une conductivité électrique moyenne de 53,67 $\mu\text{S} / \text{cm}$. La minéralisation de cette classe d'eau est sous l'emprise du phénomène de pluviollessivage des terres agricoles ;
- Classe 3 : elle représente 21,43 % des stations échantillonnées et regroupe les eaux de la lagune Aby (L3) et du fleuve Comoé à Monga (C1) et à N'gokro (C2). Cette classe d'eau est la plus minéralisée, avec une conductivité électrique moyenne de 312,61 $\mu\text{S} / \text{cm}$. La teneur moyenne en nitrates de ces eaux est de l'ordre de 13,70 mg / L. La minéralisation de ces eaux est influencée par les apports des activités anthropiques.

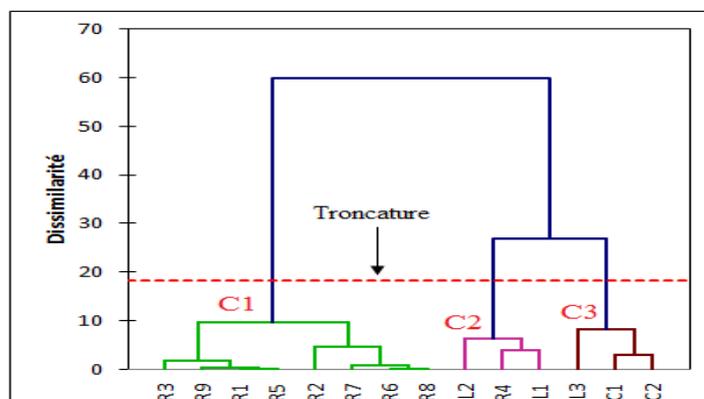


Figure 4 : Dendrogramme des stations de prélèvements des eaux de surface de la région de Bonoua en période de hautes eaux (juillet 2014)

4. Discussion

La température de l'eau joue un rôle important dans la modification des propriétés chimiques, physiques ainsi que les réactions biologiques [24]. Les températures des eaux de surface étudiées varient de 23,80 °C à 28,80 °C avec une moyenne de 26,19 °C. La température moyenne étant supérieure à la norme de 25 °C, fixée par [15] atteste que les eaux de surface sont chaudes. La hausse relative de la température des eaux observée au cours de cette période pourrait s'expliquer par le brassage des eaux par l'écoulement des eaux pluviales et l'adoucissement de l'ensoleillement par la couverture nuageuse. Ces températures pourraient stimuler la prolifération des microorganismes nuisibles qui peuvent causer des odeurs et des goûts désagréables et même rendre l'eau malsaine [25]. Les températures mesurées sont influencées par les conditions climatiques [26] et notamment la température de l'atmosphère ayant régné dans la région au moment des prélèvements. Quant aux variations spatiales ne montrant pas de différence significative d'une station à l'autre, seraient dues au fait que les prélèvements ont été effectués avec un décalage horaire journalier entre les différentes stations. Les températures moyennes des eaux de la région de Bonoua sont sensiblement identiques à celles déterminées par [3] sur les eaux de surface de la région d'Abidjan-Agboville, par [27] sur les eaux de surface de la partie centrale de la ville d'Ekiti, au Sud-Ouest du Nigéria, par [28] sur le barrage de Moloko (extrême-nord Cameroun) et par [9] sur les eaux de surface de la région d'Adiaké.

Mais s'avèrent supérieures à celles définies par [29] sur les eaux de surface (Oued Moulouya / barrage Hassan II) du Maroc et par [30] sur les cours d'eaux de l'Oued Boufekrane dans la région de Meknès-Tafilalt (Maroc). La turbidité mesure la teneur de l'eau des particules en suspension, associées au transport de l'eau qui est de nature minérale et par la présence de microorganismes [31]. La teneur moyenne de cette dernière dans les eaux de surface est de 14,47 NTU. Cette valeur moyenne est au-delà de la norme OMS, fixée à 5 NTU pour les eaux de boisson. La forte turbidité des eaux observée en période de hautes eaux serait liée au phénomène de l'érosion hydrique qui arrache les particules du sol et les charrie vers les eaux superficielles [32]. Ceci est en conformité avec les teneurs moyennes des matières en suspension qui augmentent parallèlement avec la turbidité. Cette forte turbidité pourrait être un vecteur de tous les microbes, parasites, et autres [33]. En effet, dans cette région, les travaux de [34] ont montré que 71 % des terrains de la région de Bonoua sont à moyenne et forte vulnérabilité à l'érosion hydrique. La **Planche 1** ci-dessous est l'une des illustrations de l'impact de l'érosion hydrique sur les terres agricoles dans la zone de Kimoukro.



Planche 1 : Illustration du phénomène de l'érosion hydrique dans la zone de Kimoukro

Selon [35], l'oxygène dissous mesure la concentration du dioxygène dissous dans l'eau. Il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique. La teneur moyenne de l'O₂ dissous dans les eaux de surface de la région de Bonoua est de 4,02 mg / L pour la période de hautes eaux. Cette valeur moyenne est inférieure à la norme OMS (2011), fixée à 5 mg / L. Ce qui atteste que ces eaux sont sous saturées

en O₂ dissous. Ce déficit en oxygène dissous est le résultat des fortes charges organiques générés par les rejets des eaux usées domestiques et les lixiviats des décharges sauvages qui bordent la plupart des cours d'eaux. En outre, le déficit de l'O₂ dissous serait essentiellement dû à l'augmentation de la température de l'eau, car une eau chaude contient moins d'oxygène dissous qu'une eau froide [36]. Le pH moyen des eaux étudiées est de 5,92. Il est inférieur au pH du niveau guide de l'OMS, fixé à 6,5. Ce qui démontre que les eaux étudiées présentent un caractère acide et sont donc agressives. 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 [37]. Les eaux de surface de la région de Bonoua sont très douces, avec une dureté moyenne de 2,61 °F. Elles sont également dans leur ensemble plus favorable aux conditions d'oxydation avec un potentiel redox moyen positif. Les eaux observent une conductivité électrique moyenne de 91,18 µS / cm. Cette conductivité moyenne est inférieure à la norme OMS (2011), fixée à 500 µS / cm, excepté la lagune Aby qui enregistre une conductivité électrique de 724,98 µS / cm. D'après la classification de [38], nous distinguons que 79 % des eaux sont de très faible minéralisation, 14 % des eaux de faible minéralisation et 7 % des eaux (lagune Aby) de minéralisation importante. Dans leur ensemble, les eaux de surface sont de très faible minéralisation.

L'importante minéralisation observée sur la lagune Aby serait due aux rejets des eaux usées domestiques issues des maquis et restaurants installés aux abords de cette lagune. La conductivité électrique enregistrée sur cette lagune est sensiblement identique à celle mesurée par [8] (705,2 µS en saison pluvieuse), mais reste tout de même inférieure à celle mesurée sur la même lagune par [39] qui se situe entre 6000 et 8000 µS / cm. Ceci pourrait s'expliquer par la forte influence des eaux continentales et à la réduction de l'influence marine suite au rétrécissement progressif de la passe d'Assinie [8]. La teneur moyenne en DCO de ces eaux est de 43,89 mgO₂ / L. Par contre, celle de la DBO₅ est de 18,64 mgO₂ / L. Ces différentes teneurs moyennes sont supérieures aux normes OMS, fixées à 10 mgO₂ / L pour la DCO et à 6 mgO₂ / L pour la DBO₅. Ces résultats montrent la présence d'une forte charge polluante dans les eaux de surface. Le rapport DCO / DBO₅ est inférieur à 3, ce qui montre que la cause principale de cette charge polluante est d'origine domestique [40]. La dégradation de la matière polluante nécessite des apports continus en oxygène, qui en cas de surcharge, reste insuffisant pour réduire le degré de pollution et rendre l'eau à son état naturel [41]. Les valeurs moyennes des ions majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻) et des nutriments (NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻) sont inférieures aux normes de potabilité de l'OMS (2011). Cependant, 35,71 % et 21,43 % des stations de prélèvements enregistrent respectivement des teneurs en NH₄⁺ et PO₄³⁻ supérieures aux normes requises pour les eaux de boissons.

Ces différentes proportions témoignent de l'apport des eaux pluviales dans le transfert de ces éléments de pollution dans les eaux de surface. L'évolution des phosphates est semblable à celle de l'ammonium, ce qui laisse penser que leur origine est anthropique [29]. Ils seraient issus des eaux usées domestiques et industrielles et des engrais utilisés pour la fertilisation des terres agricoles. De plus, les teneurs en nitrates évoluent de façon proportionnelle avec les nitrites. Ce qui pourrait s'expliquer par le processus de dénitrification des nitrites en nitrates par les bactéries autotrophes *nitrosomonas* et *nitrobacters* réalisant respectivement l'oxydation de l'ammonium en nitrites puis l'oxydation des nitrites en nitrates. C'est ce qui justifie les faibles teneurs en oxygène dissous observées dans les eaux de surface. Dans les eaux superficielles, l'azote ammoniacal proviendrait de la matière organique azotée et des échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère [42]. Bien que les concentrations en nitrates des eaux soient sous le seuil recommandé par l'OMS (2011) (< 50 mg / L), nous avons observé que 78,57 % des stations de prélèvements présentent une concentration en nitrates supérieure à 10 mg / L généralement admis pour les eaux naturelles [43]. Ce constat est la preuve que les eaux superficielles de la région de Bonoua sont sous l'influence des activités anthropiques. Les teneurs moyennes de nitrates (NO₃⁻) et de phosphates (PO₄³⁻) observées dans les eaux

superficielles de la région agricole de Bonoua sont largement supérieures à celle observées par [44] dans les eaux des réservoirs de Loubila et de Mongtédou du bassin versant agricole du Nakambé (Burkina Faso). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que beaucoup d'engrais riches en phosphore et en azote seraient le plus utilisés dans la région de Bonoua que dans le bassin du Nakambé. En effet, la région de Bonoua abrite des unités agro-industrielles qui utilisent d'importantes quantités d'engrais chimiques et de produits phytosanitaires, en vue d'améliorer leurs productions et protéger leurs cultures. De plus, on pourrait penser au phénomène d'érosion qui est intense dans la région de Bonoua [45]. Par conséquent, les phosphates et les nitrates en surplus dans le sol et non utilisés par les plantes sont transférés vers les eaux superficielles en période de hautes eaux par l'érosion hydrique [46, 47]. Aussi, la région de Bonoua bénéficie-t-elle d'une pluviométrie moyenne annuelle remarquable de 1715,7 mm, contre 800 mm pour le bassin du Nakambé. Par conséquent, les précipitations abondantes dans la région de Bonoua pourraient favoriser un pluviollessivage des terres agricoles, donc entraîner une forte concentration des ions phosphates et nitrates dans les eaux superficielles de la région. L'application de la méthode exploratoire multi-variée (CAH) aux données des eaux de surface a permis de mettre en évidence les processus à l'origine de la minéralisation de ces eaux et de les regrouper en classes homogènes.

La CAH a montré que trois phénomènes sont à l'origine de l'évolution de la minéralisation des eaux de surface. Il s'agit des apports superficiels d'origines anthropiques, du phénomène de minéralisation-temps de séjour par hydrolyse des minéraux silicatés et du phénomène de pluviollessivage des terres agricoles. En effet, les eaux de ruissellement chargées en CO_2 produisent l'acide carbonique, lequel va dissoudre les formations argileuses qui vont libérer les ions majeurs dans les eaux. En outre, le lessivage des terres agricoles, les rejets des eaux usées domestiques et industrielles et les lixivats des ordures ménagères enrichissent les eaux en phosphates et en nitrates. Parmi les différents processus à l'origine de la minéralisation des eaux de surface de la région de Bonoua, l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux constitue un problème majeur d'ordre mondial et fait l'objet de plusieurs études [48, 50]. L'influence de ces phénomènes dans la minéralisation des eaux de surface a conduit à la CAH de mettre en évidence trois regroupements des eaux en fonction de leur degré de minéralisation. Ainsi, nous avons la classe des eaux les plus minéralisées (21,43 %), la classe des eaux moyennement minéralisées (21,43 %) et la classe des eaux faiblement minéralisées (57,14 %).

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'évaluer la qualité physico-chimique des ressources en eau de surface de la région de Bonoua et identifier les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux. La comparaison des données physico-chimiques des eaux avec les normes OMS pour les eaux destinées à la consommation a révélé que ces eaux sont dans l'ensemble très faiblement minéralisées, très douces, très diluées et peu chargées en matières solides en suspension. Par contre, elles sont chaudes, acides et sous-saturées en oxygène dissous. Elles présentent un caractère turbide, avec de fortes charges en matières organiques matérialisées par des valeurs moyennes en DCO et DBO_5 supérieures aux normes de potabilité de l'OMS. Au plan chimique, les valeurs des ions majeurs tels que K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- sont conformes aux normes de potabilité. De même, les teneurs moyennes des paramètres de pollution (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et PO_4^{3-}) sont également conformes aux normes de potabilité. Cependant, 35,71 % et 21,43 % des eaux sont respectivement polluées par l'ammonium et les phosphates. Le diagramme de Piper a montré que les eaux de surface sont majoritairement chlorurées / nitrates calciques (57,14 %). La méthode d'analyse multi-variée (CAH) a montré que la minéralisation de ces eaux est gouvernée par trois principaux processus dont la minéralisation-temps de séjour par hydrolyse des minéraux silicatés, les apports superficiels d'origines anthropiques et le phénomène de pluviollessivage des terres agricoles. Les résultats de cette étude sont certes

intéressants mais méritent d'être complétés par d'autres investigations notamment une étude des pesticides et une étude microbiologique. Car 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.

Références

- [1] - A. F. HAMZAOUI, R. BOUHLILA et M. GUEDDARI, "Caractérisation de la minéralisation des eaux de la nappe des grès du Trias (Sud-Est Tunisien) par les méthodes géochimiques et statistiques", *Géo-Eco-Trop.*, 36 (2012) 49 - 62.
- [2] - M. BLINDA et G. THIVET, "Ressources et demandes en eau en Méditerranée : situation et perspectives". *Sécheresse*, 20 (2009) 9 - 16.
- [3] - K. E. AHOUSI, "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, (2008) 270 p.
- [4] - G. E. AKÉ, "Évaluation des ressources en eau souterraine de la région de Bonoua". Mémoire de DEA des Sciences de la Terre. Université de Cocody, (2001) 72 p.
- [5] - A. T. EFFINI, "Évaluation de la qualité chimique et bactériologique de la nappe de Bonoua et contribution à la protection de la nappe". Mémoire de DEA des Sciences de Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, (2007) 73 p.
- [6] - P. TOHOURI, "Étude de la qualité physico-chimique des eaux de surface du bassin versant de la lagune Ono dans la Sous-préfecture de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)". Mémoire de DEA des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, Abidjan, (2010) 61 p.
- [7] - M. KABLAN, "Caractérisation de la pollution métallique des hydrosystèmes côtiers de Côte d'Ivoire : analyse de la situation dans la lagune Ono sous-préfecture de Bonoua". Mémoire de DEA des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université de Cocody, Abidjan, (2011) 57 p.
- [8] - O. KAMBIRÉ, A. A. ADINGRA, S. G. EBLIN, N. AKA, A. C. KAKOU et KOFFI-NEVRYR, "Caractérisation des eaux d'une lagune estuarienne de la côte d'ivoire : la lagune Aby", *Larhyss Journal*, N°20, (2014) 95 - 110.
- [9] - S. G. EBLIN, A. G. SOMBO, G. SORO, N. AKA, O. KAMBIRE et N. SORO, "Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (Sud-est côtier de la Côte d'Ivoire)", *Journal of Applied Biosciences*, 75 (2014) 6259 - 6271.
- [10] - LENEUF, "L'altération des granites calco-alkalins et des granitoïdes en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés". Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Paris, (1959) 210 p.
- [11] - J. L. GUILLAUMET et E. ADJANOHOON, "Milieu naturel de la Côte d'Ivoire". Mémoire ORSTOM, N°50, (1971) 163 - 391.
- [12] - L. GOUAIDIA, "Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est algérien". Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, (2008) 129 p.

- [13] - AFNOR, "Qualité de l'eau. Tome 1 : Terminologie, échantillonnage et évaluation des méthodes". 3^o édition Paris, France, (1997) 34 p.
- [14] - J. RODIER, B. LEGUBE et N. MERLET, "L'analyse de l'eau, 9^o édition, (2009) 141 - 159.
- [15] - OMS, "Guidelines for Drinking-water Quality". Fourth Edition. World Health Organization publication. Geneva, Switzerland, (2011) 307 - 447.
- [16] - M. S. OGA, T. LASM, T. K. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, D. KOUASSI, et F. GNAMBA, "Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture : Cas de La Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire". *European Journal of Scientific Research*, 31 (1) (2009) 72 - 87.
- [17] - T. LASM, R. M. N. FOSSOU, O. Z. ONETIE, D. BAKA, M. YOUAN TA, M-S. OGA, N. SORO, "Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du département de Ferké (nord de la côte d'ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable". *Revue Ivoire Sciences et Technologies*, 19 (2012) 114 - 135.
- [18] - S. H. KOLSI, S. BOURI, W. HACHICHA, H. B. DHIA, "Implementation and evaluation of multivariate analysis for groundwater hydrochemistry assessment in arid environments : a case study of Hajeb Elyoun-Jelma, Central Tunisia". *Environmental Earth Science*, 70 (2013) 2215 - 2224.
- [19] - K. E. AHOUSSE, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO et J. BIEMI, "Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de sources de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman)". *Journal of Applied Biosciences*, 63 (2013) 4703 - 4719.
- [20] - M. T. HUSSEIN, "Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques". *Hydrogeology Journal*, Vol.12 (2004) 144 - 158.
- [21] - N. BRINS et A. BOUDOUKHA, "Classification statistique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya. (W) De Birskia-Algérie". *Courrier du savoir*, N°11 (2011) 41 - 46.
- [22] - M. TEMPL, P. FILZMOSER and C. REIMANN, "Cluster analysis applied to regional geochemical data : Problems and possibilities", *Applied Geochemistry*, 23 (2008) 2198 - 2213.
- [23] - V. CLOUTIER, R. LEFEBVRE, R. THERRIEN and M. M. SAVARD, "Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system", *Journal of Hydrology*, 353 (2008) 294 - 313.
- [24] - A. ABBOUDI, H. TABYAOUI et F. EL HAMICHI, "Étude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou, Maroc", *European Scientific Journal*, Vol. 10, N°23, (2014) 84 - 94.
- [25] - R. CHAIRI, "Géochimie organique des eaux de surface de la zone septentrionale de la Sebkhia de Moknine, Tunisie orientale". *Larhyss Journal*, N°4 (2005) 17-30.
- [26] - A. ABOULKACEM, A. CHAHLAOUI, A. SOULAYMANI, F. RHAZI-FILALI et D. BENALI, "Étude comparative de la qualité bactériologique des eaux des oueds Boufekrane et Ouislane à la traversée de la ville de Meknès (Maroc). *Rev. Microbiol. Ind. San. et Env.*, N°1, (2007) 10 - 22.
- [27] - A. O. TALABI, O. L. AFOLAGBOYE, M. N. TIJANI, J. A. ALADEJANA and A. K. OGUNDANA, "Hydrogeochemical Assessment of Surface Water in the Central Part of Ekiti-State, South western Nigeria". *American Journal of Water Ressources*. Vol. 1, N° 4, (2013) 56 - 65.
- [28] - S. LEWA, A. OMBOLO et B. B. LOURA, "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, (2014) 396 - 413.
- [29] - M. CHAUI, "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 Zeïda (Haute Moulouya)". *Mémoire de Master de l'Université Cadi Ayyad, Marrakech*, (2013) 98 p.
- [30] - L. MAJDOULINE, S. ABDELMADJID et E. AZZEDINE, "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.*, 4 (3) (2013) 432 - 441.

- [31] - M. E. OULD, "Évaluation de la qualité physicochimique et métallique des eaux du fleuve Sénégal : cas du Delta Mauritanien localisé dans la ville de Rosso". Mémoire DESA Faculté des Sciences, Université IbnTofail Maroc, (2006).
- [32] - M. S. K. MINT, A. D. N'DIAYE, M. O. S. A. O. KANKOU et A. TINE, "Évaluation de la qualité de l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal". *Science Lib*, 3, 111002 (2011) 12 p.
- [33] - G. E. AKE, B. H. KOUADIO, M. G. ADJA, J. B. ETTIEN, K. R. EFFEBI, J. BIEMI, "Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)", *Physio-Géo*. Volume 6, (1) 1 - 42.
- [34] - J. RODIER, C. BAZIN, J. C. BROUTIN, P. CHAMBON, H. CHAMPSAUR et L. RODI, "L'analyse de l'eau". 8^{ème} Edition Dunod, Paris, (1996) 1383 p.
- [35] - S. HEBERT et S. LEGARE, "Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau. Direction du suivi de l'état de l'environnement", Ministère de l'Environnement Gouvernement du Québec, (2000) 5 p.
- [36] - L. KLEIN, "River pollution, chemical analysis", 6th Ed., London, Sciences Direct-Environnement International, London, (1973).
- [37] - M. DETAY, "Forage d'eau : réalisation, entretien, minéralisation". Paris, Ed. Masson, (1993) 380 p.
- [38] - S. CLAON, "Exposition de l'écosystème et des populations riveraines de la lagune Aby au mercure, arsenic et sélénium". Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, (2004) 204 p.
- [39] - B. M. ABBOU, F. FADIL et M. EL HAJI, Évaluation de la qualité des cours d'eau de la ville de Taza utilisés dans l'irrigation des cultures maraichères (Maroc), (2014).
- [40] - M. RAISSOUNI, Z. DJEBARY TAHIRI, A. RAISSOUNI, A. EL KADI, S. BOUZID, A. EL ARRIM et H. ER-RAIOUI, "impact des activités anthropiques sur la qualité physico-chimique et métallique des eaux de surface de l'oued Martil (Maroc Nord occidental)". *Science Lib Éditions Mersenne*, Volume 7, N° 150302, (2015) ISSN 2111 - 4706.
- [41] - D. CHAPMAN and V. KIMSTACH, Selection of water quality variables. *Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring*, Chapman edition, 2nd ed. E and FN Spon, London, (1996) 59 - 126.
- [42] - S. BROUYÈRE, I. RUTHY et PH. ORBAN, "L'état quantitatif et qualitatif des eaux souterraines en Région wallonne". Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon, (2006) 76 p.
- [43] - S. KOUSSAO, D. YOUSOUF, L. SOME et R. MILLAGO, "Pollution agricole des eaux dans le bassin du Nakanbé : cas des réservoirs de Loumbila et de Mogtédou au Burkina Faso". *Sud Sciences et Technologies*, N° 16, (2008) 9 p.
- [44] - G. E. AKÉ, "Impacts de la variabilité climatique et des pressions anthropiques sur les ressources hydriques de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)". Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody (Abidjan), Côte d'Ivoire, (2010) 204 p.
- [45] - OMAF, "Nutrient Management-Best Management Practices". Ontario Ministry of Agriculture and Food, (1994) 64 p.
- [46] - J. LORMIER, "Manure nutrient management". Document électronique (1995). Disponible sur www.ces.ncsu.edu/whpaper/wqswine.html, (consulté le 25 mars 2010).
- [47] - S. BRICHA, K. OUNINE, S. OULKHEIR, N. EL HALOUI, B. ATTARASSI, "Étude de la qualité physicochimique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc)". *Afrique SCIENCE*, 03 (3) (2007) 391 - 404.
- [48] - J. EL ASSLOUJ, S. KHOLTEI, N. EL AMRANI-PAAZA et A. HILALI, "Analyse de la qualité physicochimique des eaux souterraines de la communauté des Mzamza, au voisinage des eaux usées". *Afrique SCIENCE*, 03 (1) (2007) 109 - 122.
- [49] - A. SHAHBAZI and A. ESMAEILI-SARI, "Groundwater Quality Assessment in North of Iran : A Case Study of the Mazandaran Province". *World Applied Sciences Journal* 5 (Special Issue for Environment), (2009) 92 - 97.