International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)
ISSN: 2509-0119.
© 2022 Scholar AI LLC.
Vol. 35 No. 1 October 2022, pp. 178-194

Aptitude À L'irrigation Des Eaux De La Nappe Du Continental Terminal De Bonoua.(Sud-Est De La Côte d'Ivoire)

[Ability To Irrigate Groundwater From The Continental Terminal Of Bonoua (South-East Of The Ivory Coast)]

Privat TOHOURI[1], Benjamin Vincent Rodrigue Braphond ANONGBA[2], Germain Miessan ADJA[3], Jacques Edoukou DJEMIN[4], Jean BIEMI[5]

[1, 2, 3] Département des Sciences et Technologies

Ecole Normale Supérieure d'Abidjan (Côte d'Ivoire)

08 BP 10 Abidjan 08

[4, 5]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

Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody (Côte d'Ivoire)

22 BP 582 Abidjan 22

(cc) BY

Résumé – Dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire, la nappe du Continental Terminal de Bonoua constitue la principale source d'approvisionnement en eau pour l'irrigation de la culture de l'hévéa, de l'ananas et du palmier à huile des unités agro-industrielles. Cependant, cette nappe est menacée par l'intrusion de l'eau de mer dans sa partie sud et par la pollution anthropique qui constituent une contrainte majeure pour le développement de l'agriculture dans la région de Bonoua. L'objectif principal de cette étude est de déterminer la qualité des eaux à usage agricole de la nappe du Continental Terminal de Bonoua, afin de prévenir les risques d'apparition de processus de salinisation, de sodisation ou d'alcalinisation des sols à diversdegrés. Pour ce faire, une caractérisation hydrochimique des eaux de cette nappe a été réalisée suite à des prélèvements d'échantillons d'eau au niveau de 30 puits, de 23 forageset de 4 sources pendant les saisons sèche et pluvieuse. Les analyses des eaux ont permis d'établir les faciès chimiques et leur classification selon l'abaque de Stuyfzand et d'en déduire l'aptitude de ces eaux à l'irrigation et les risques de salinisation. Les résultats ont permis de distinguer deux faciès chimiques : un faciès chloruré et sulfaté calcique (74 %) et un faciès chloruré sodi-potassique (26 %). La classification de Stuyfzand a indiqué que les eaux souterraines sont oligohalines à oligohalines-fraîches avec une faible dureté, et ne sont pas contaminées par l'eau de mer. Concernant leur aptitude à l'irrigation, les eaux ont une faible minéralisation associée à des risques de salinité faible à moyen et d'alcalinité faible.Ces eaux peuvent donc être utilisées pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols. Cependant, avant toute utilisation des eaux pour l'irrigation, leur pH devrait être rehaussé

Mots clés – Salinisation ; Eaux souterraines ; Faciès géochimiques ; Classification de Stuyfzand ;Bonoua ; Côte d'Ivoire.

Abstract – In the south-east of Ivory Coast, the Bonoua Continental Terminal aquifer is the main source of water supply for the irrigation of rubber, pineapple and oil palm cultivation in agro-industrialunits. However, thisaquiferisthreatened by the intrusion of seawater in itssouthern part and by anthropogenic pollution, whichconstitute a major constraint for the development of agriculture in the Bonouaregion. The main objective of thisstudyis to determine the quality of water for agricultural use in the Bonoua Continental Terminal aquifer, in order to prevent the risk of the appearance of processes of salinization, sodization or alkalinization of the soil at variousdegrees. To do this, a hydrochemicalcharacterization of the waters of thisaquiferwascarried out following the taking of water

Corresponding Author: Privat TOHOURI

samplesfrom 30 wells, 23 boreholes and 4 springsduring the dry and rainyseasons. The water analyzes made it possible to establishthe chemical facies and their classification according to the Stuyfzand chart and to deduce the suitability of these waters for irrigation and the risks of salinization. The results made it possible to distinguishtwochemical facies: a chloride and calcium sulphate facies (74%) and a sodium-potassium chloride facies (26%). The Stuyfzand classification indicatedthat the groundwaterisoligohaline to oligohaline-cool withlowhardness, and is not contaminated by seawater. Regardingitssuitability for irrigation, the waters have lowmineralizationassociatedwithrisks of low to medium salinity and lowalkalinity. These waters canthereforebeused for the irrigation of mostcrops on mostsoils. However, beforeusing water for irrigation, its pH shouldberaised.

Keywords – Salinization ; Groundwater ; Geochemical Facies ; Stuyfzand Classification ; Bonoua ; IvoryCoast.

I. INTRODUCTION

L'eau est d'une importance biologique et économique capitale. Elle est à la fois un aliment, éventuellement un médicament, une matière première industrielle, énergétique et agricole, et un moyen de transport. L'agriculture est l'activité économique la plus consommatrice d'eau puisqu'elle prélève à elle seule près de 70 % de toute l'eau mobilisée des cours d'eau, lacs et nappes souterraines à travers le monde, pouvant atteindre jusqu'à 95 % dans les pays en développement [1]. L'irrigation, principale consommatrice d'eau du secteur agricole, est une technique innovatrice qui permet à l'agriculteur de se libérer de la dépendance des aléas climatiques en matière de pluviosité dans la conduite de ses activités. Cependant, l'irrigation des terres doit se faire avec des eaux respectant les normes de qualité requises. A cet effet, des études ont été effectuées dans certains pays et ont traité la qualité des eaux à usage agricole. En Algérie, [2] ; [3] et [4] ont montré que les pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité. [5] ont indiqué que la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux utilisées pour l'irrigation des cultures dans la ville de Taza au Maroc ne répond pas toujours aux critères d'utilisation de ces eaux dans l'irrigation. En Côte d'Ivoire, les travaux de [6] ont montré que 67 % des eaux échantillonnées dans la région de Katiola sont propices à l'irrigation, à l'exception de quelques points d'eau situés dans le Sud-est. Dans le département d'Agboville, l'étude réalisée par [7] a révélé que les eaux souterraines utilisées pour l'irrigation des cultures sont à 75% d'excellente qualité et présentent à cet effet un faible danger de salinisation et d'alcalinisation des sols. Dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire, la nappe du Continental Terminal de Bonoua constitue la principale source d'approvisionnement en eau pour l'irrigation de la culture de l'hévéa, de l'ananas et du palmier à huile des unités agro-industrielles. Cependant, cette nappe est menacée par l'intrusion de l'eau de mer dans sa partie sud et par la pollution anthropique qui constituent une contrainte majeure pour le développement de l'agriculture dans la région de Bonoua. L'objectif principal de cette étude est de déterminer la qualité des eaux à usage agricole de la nappe du Continental Terminal de Bonoua, afin de prévenir les risques d'apparition de processus de salinisation, de sodisation ou d'alcalinisation des sols à divers degrés.

II. MATERIEL ET METHODES

A. Matériel

A.1. Site d'étude

Le site d'étude est localisé au Sud-Est de la Cote d'Ivoire entre les latitudes 5°07' et 5°33' N et les longitudes 3°12' et 3°50' W (Figure 1). S'étendant sur une superficie de 2165 km^2, la nappe du Continental Terminal de Bonoua est limitée au Sud par l'Océan Atlantique, au Nord par l'affleurement du socle cristallin, à l'Ouest par le système lagunaire Aghien-Potou, à l'Est par la lagune Aby et la rivière Bia.La région possède un climat équatorial de transition avec des précipitations variables dans le temps et l'espace. La moyenne annuelle de la pluviométrie est de l'ordre de 1867 mm/an.La température moyenne mensuelle varie entre 24°C (au mois d'Août) et 27,5°C (au mois de Mars). Sur le plan hydrographique, la zone d'étude est drainée par les cours d'eau Comoé, Bia, Mé, Soumié et Toumanguié. Le tracé de la Comoé est méandrique, avec des tronçons Nord-Sud entre Alépé et Bonoua. Les rivières Soumié, Toumanguié, Bia et Mé sont de gros collecteurs méandriques aux débits irréguliers soutenus par des marigots non perennes, avec descrues en saison pluvieuse [8]. Toutes ces rivières débouchent sur les différentes lagunes qui servent de relais à la mer.

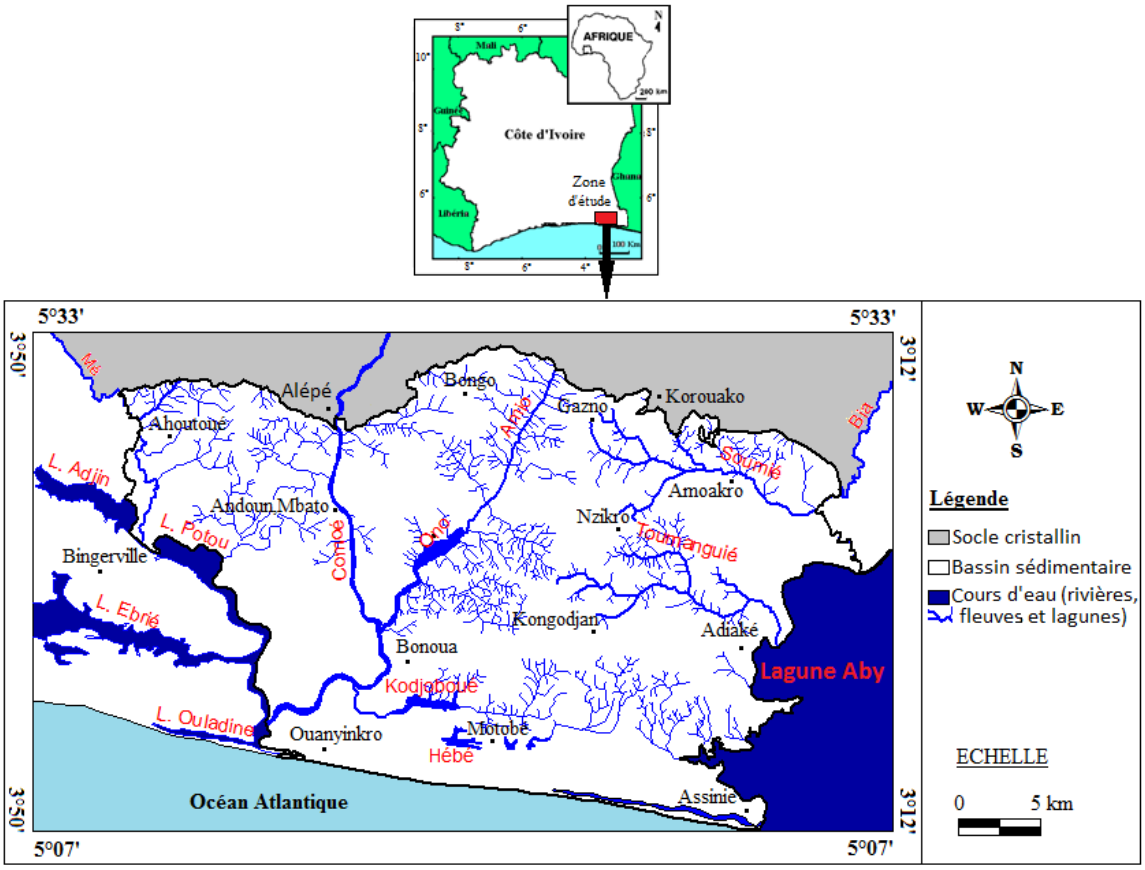

Figure 1:Localisation du site d'étude

A.2. Contexte géologique et hydrogéologique

Selon la carte géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200000 (Feuille de Grand-Bassam), les séries stratigraphiques qui affleurent dans la zone d'étude, sont celles du Quaternaire, du Tertiaire et du Secondaire [8] (Figure 2). Du point de vue hydrogéologique, les aquifères du Continental Terminal d'âge Mio-Pliocène et du Quaternaire sont les aquifères présents dans la zone d'étude. L'aquifère du Continental Terminal est le principal aquifère exploité pour l'alimentation en eau potable des populations de cette zone. La nappe de cet aquifère, soumiseà cette étude,est logée dans les formations du Mio-Pliocène. Elle a une épaisseur moyenne de 115 mètres, et varie de 25 mètres au Nord-Ouest à 200 mètres au Sud-est *in* [9]. L'importante épaisseur de cette nappe au Sud est due à l'affaissement du socle qui pourrait être liéà la faille des lagunes. Au Nord de la zone d'étude, la faible épaisseur de celle-ci est due probablement à la remontée du socle avec des affleurements granitiques en particulier.

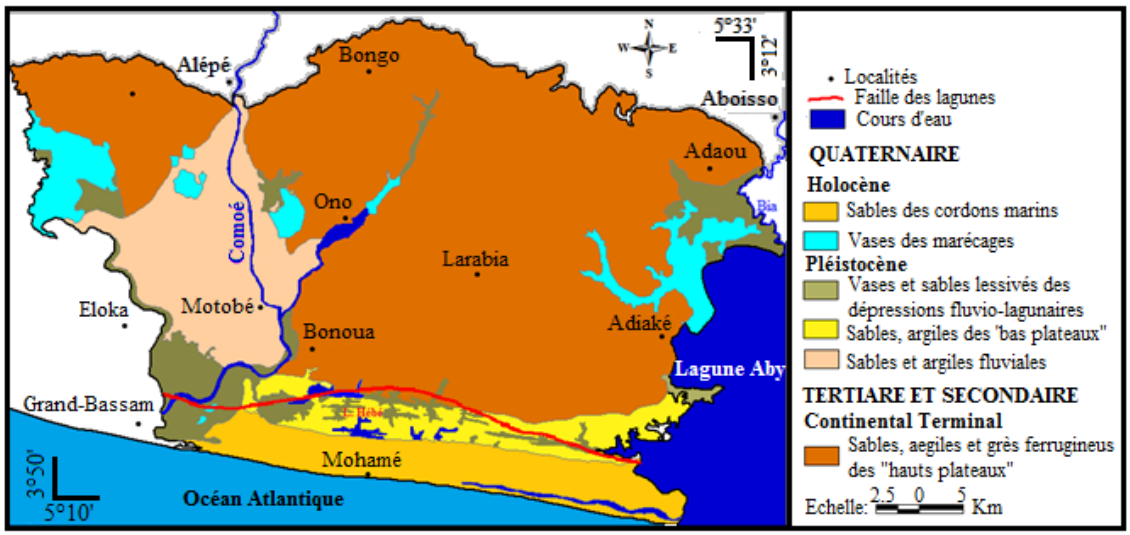

Figure 2: Carte géologique de la zone d'étude [8]

A.3. Contexte pédologique

Sur le plan pédologique, la région de Bonoua est caractérisée par deux types de sols : les histosols et les arenosols (Figure 3). Les histosols, constitués principalement de matières organiques se localisent entre le socle et la faille des lagunes et sur le cordon littoral. Les arenosols qui sont des sols sablonneux se rencontrent dans les environs de la lagune Aby et du fleuve Comoé. La plupart des sols de la zone d'étude présentent un intérêt agronomique certain mais, demandent des apports non négligeables d'engrais organiques et minéraux [10]. Ces engrais peuvent constituer une menace pour la qualité des eaux souterraines si les doses d'application ne sont pas respectées d'une part et si les engrais sont appliqués en saison des pluies d'autre part.

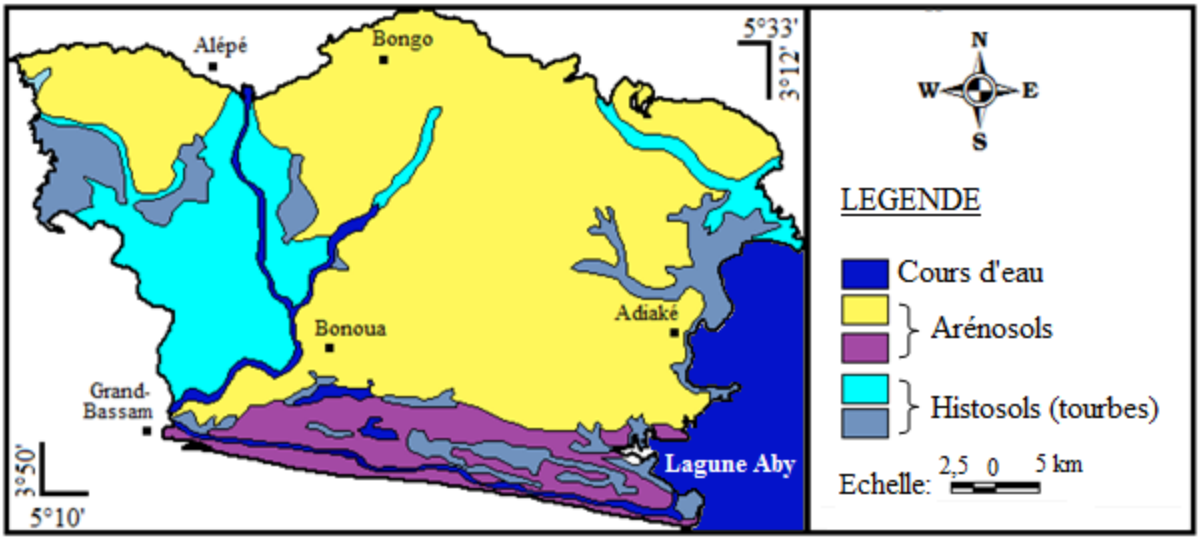

Figure 3 : Carte pédologique de la zone d'étude [11]

A.4. Utilisation des terres

L'utilisation des terres dans la région de Bonoua est principalement liée aux types de sol. La Figure 4 indique la carte d'occupation des sols issue du traitement de l'image landsat ETM+ (2000) réalisée par [12]. Cette carte montre que la zone d'étude est dominée par la mozaïque culture/jachère et les cultures industrielles (1- hévéa ; 2- palmier à huile ; 3- cocotier). Ces cultures industrielles sont irriguées avec les eaux souterraines.

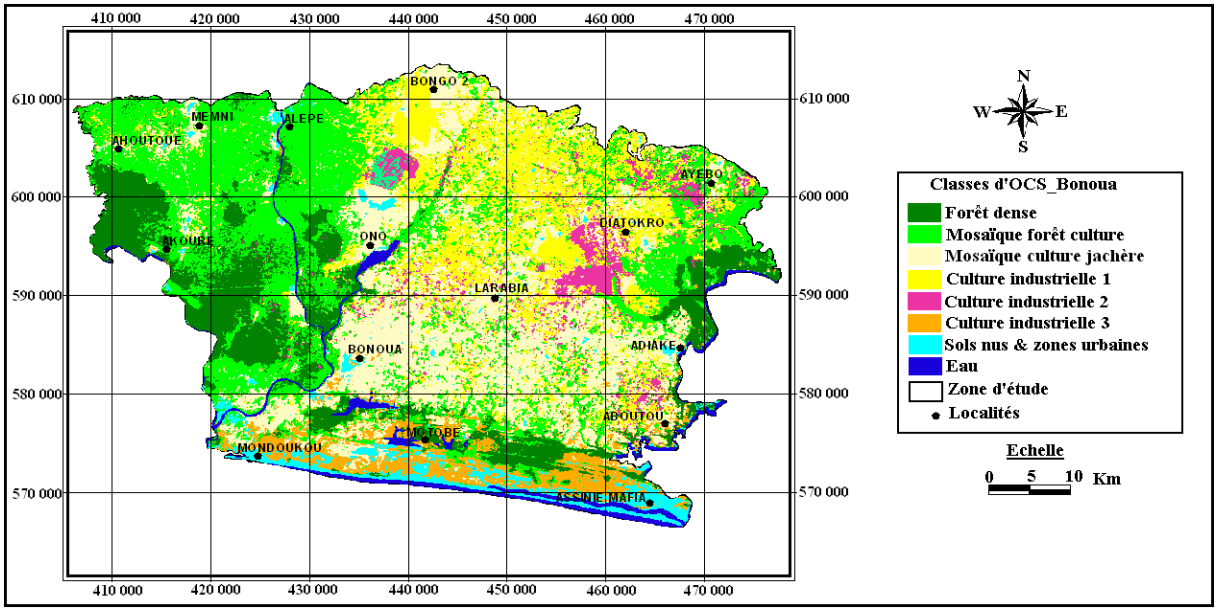

Figure 4 : Carte d'occupation du sol de la région de Bonoua en 2000 [12]

B. Méthodes

B.1. Echantillonnage et analyses physico-chimiques

Une campagne d'échantillonnage a été effectuée au niveau de 30 puits, de 23 forages et de 4sources pendant les saisons pluvieuse et sèche (Figure 5). Le prélèvement des eaux a été effectué selon la norme ISO 5665 pour l'analyse des paramètres physiques et chimiques. Le pH, la température (T) et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur le terrain à 25°C. Les analyses chimiques en éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, NO_3^{-}, HCO_3^{-}et SO_4^{2-}) ont été effectuées au Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL). Les concentrations en Cl^{-} et HCO_3^{-} ont été dosées par Titrimétrie. Le Ca^{2+} et le Mg^{2+} ont été déterminés par Complexométrie. Le Na^{+}, le NO_3^{-} et le K^{+} ont été analysés à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme et le SO_4^{2-} a été déterminé par un spectrophotomètre calorimétrique. Les résultats des analyses chimiques ont permis de calculer le Bilan Ionique (BI) selon l'équation 1, avec une erreur admissible ne dépassant pas 5% *in* [13] :

$$\mathrm{BI}\ (\%) = \left(\frac{\sum \mathrm{Cations} - \sum \mathrm{Anions}}{\sum \mathrm{Cations} + \sum \mathrm{Anions}}\right) \times 100 \qquad (1)$$

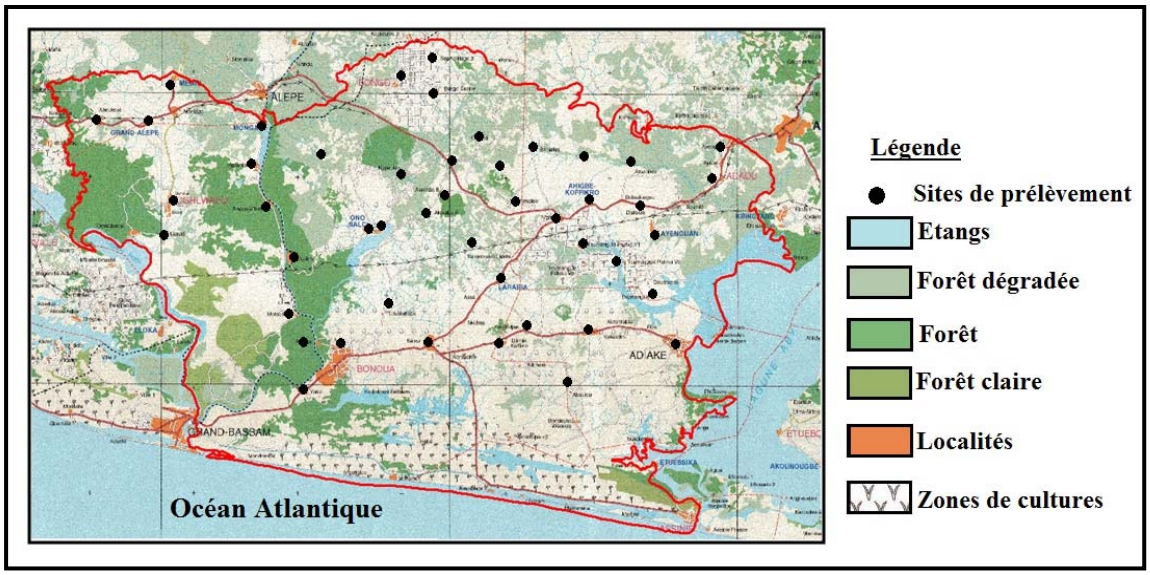

Figure 5 : Localisation des points d'échantillonnage

B.2. Méthodes hydrochimiques

Les méthodes hydrochimiques de caractérisation et de classification des eaux adoptées dans cette étude reposent essentiellement sur le diagramme de [14] et la classification de [15].

- *Diagramme de Piper*

Le diagramme de Piper permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants. Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques [16].

- *Classification de Stuyfzand*

La classification hydrochimique de Stuyfzand est largement employée pour l'étude des eaux souterraines des aquifères côtiers [17]. Elle s'appuie sur les cations et les anions dominants. La classification d'eau implique la détermination successive du type principal, le type, le sous-type et la classe, pour chaque échantillon d'eau. Pour chacun des quatre niveaux de subdivision d'eau, on crée un code et un nom de type.

Le "type principal" est déterminé sur la base de la teneur en chlorures (mg/L) (Tableau 1). Le "type" est déterminé sur la base de l'indice de la dureté totale (TH) exprimée en degrés français (Tableau 2). La classification en sous-type est déterminée à partir des cations et des anions dominants. Enfin, La classe est déterminée à partir de la somme de Na^+, K^+ et Mg^{2+} en méq/L, corrigée pour une contribution de sel de mer [18] (Tableau 3). Elle traduit le fait d'avoir des échanges basiques ou non. Cela a été développé à partir de l'eau de mer. L'eau pendant son trajet peut être enrichie ou appauvrie suite à des réactions d'échanges avec le rocher. L'enrichissement/appauvrissement basique par rapport à l'eau de mer est calculé selon l'équation 2 [15] :

$$(Na + K + Mg)\ \text{corrigé} = (Na + K + Mg)\ \text{mesuré} - 1{,}0716 \times Cl\ (\text{méq/L}) \qquad (2)$$

Tableau 1 : Types principaux d'eau selon la concentration en chlorures (mg/L) [15]

Types principaux d'eau	**Niveaux de classification (Cl en mg/L)**	**Codes**
Eauoligohaline	< 5	G
Eauoligohaline-fraîche	5 - 30	G
Eau fraîche	30 - 150	F
Eau fraîche-saumâtre	150 - 300	f
Eau saumâtre	300 - 10^3	B
Eau saumâtre-salée	10^3 - 10^4	b
Eau salée	10^4 - 2.10^4	S
Eau très salée	>2.10^4	H

Tableau 2 : Types d'eau selon l'indice de dureté totale (TH °F) (Stuyfzand, 1989) [15]

Types d'eau	**Niveaux de classification (TH °F)**	**Codes**
Eau très douce	< 5	*
Eau douce	5 - 10	0
Eau modérément dure	10 - 20	1
Eau dure	20 - 40	2
Eau très dure	40 - 80	3
Eau extrêmement dure	80 - 160	4
Eau extrêmement dure	160 - 320	5
Eau extrêmement dure	320 - 640	6
Eau extrêmement dure	640 - 1280	7
Eau extrêmement dure	1280 - 2560	8
Eau extrêmement dure	> 2560	9

Tableau 3 : Classes d'eau basées sur (Na + K + Mg) corrigées pour le sel marin [15]

Classe	**Condition de correction de (Na+K+Mg) (méq/L)**	**Code**
Déficit de (Na+K+Mg)	$< -\sqrt{0{,}5 \times \mathrm{Cl}}$	-
Équilibre de (Na+K+Mg)	$\geq -\sqrt{0{,}5 \times \mathrm{Cl}}$ et $\leq \sqrt{0{,}5 \times \mathrm{Cl}}$	0
Surplus de (Na+K+Mg)	$> \sqrt{0{,}5 \times \mathrm{Cl}}$	+

B.3. Méthodes qualitatives

La qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation dépend des effets des concentrations des minéraux dans l'eau, sur le sol et les plantes [19]. L'effet des sels sur les sols entraîne des changements dans la structure du sol, la perméabilité et, par conséquent, il affecte la croissance des plantes. Dans cette étude, un système de classification pour évaluer l'aptitude de l'eau à usage d'irrigation a été déterminé à travers huit indices qui sont : la conductivité électrique (CE), le pourcentage de sodium (%Na), le Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR), le Rapport d'Adsorption du Magnésium (MAR), l'Indice de Perméabilité (IP), le Rapport de Kelly (KR), la teneur en nitrates et le Carbonate de Sodium Résiduel (RSC).

- *Conductivité Électrique (CE)*

La conductivité électrique est un bon moyen pour la mesure de la salinité afin de dégager le danger sur les cultures. L'excès de salinité diminue l'activité osmotique des plantes et interfère donc avec l'absorption d'eau et des nutriments du sol [20].

- *Pourcentage de sodium (%Na)*

Le Na^+ est un cation important qui se détériore au-delà de la structure du sol et réduit le rendement des cultures [21]. Lorsque la concentration de Na^+ est élevée dans l'eau d'irrigation, le Na^+ tend à être adsorbé par les particules d'argile et sera remplacé par les ions Mg^{2+} et Ca^{2+}. Ce processus d'échange de Na^+ dans de l'eau par Ca^{2+} et Mg^{2+} dans le sol réduit la perméabilité. C'est pour cela que le pourcentage en Sodium est considéré comme un indice important pour l'évaluation de l'eau destinée à l'irrigation. Le pourcentage en Sodium (%Na) est calculé selon l'équation 3 :

$$\%Na = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100 \qquad (3)$$

Où, les concentrations de tous les ions sont exprimées en milliéquivalent par litre (méq/l).

- *Rapport d'Adsorption du Sodium (SAR)*

Le rapport d'adsorption du sodium (SAR) est un paramètre important pour déterminer l'aptitude des eaux souterraines à des fins d'irrigation car il mesure le danger de l'alcali-sodium pour les cultures [22]. Le sodium pénètre dans l'aquifère par la pluie et par la dissolution des roches. En raison de ses effets sur les sols et les plantes, il est considéré parmi les principaux facteurs régissant l'eau d'irrigation [23]. Ce rapport est déterminé en utilisant l'équation 4 proposée par [23]:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \qquad (4)$$

Où, les concentrations de tous les ions sont exprimées en milliéquivalent par litre (méq/l).

- *Rapport d'Adsorption du Magnésium (MAR)*

Le pourcentage de magnésium ou danger de magnésium exprime la mesure de l'effet du magnésium dans l'eau d'irrigation. L'excès de magnésium affecte la qualité des sols qui peut se traduire en faible rendement des cultures. Le pourcentage de magnésium (%Mg) est calculé selon l'équation 5 [24] :

$$MAR = \frac{Mg^{2+}}{Ca^{2+} + Mg^{2+}} \text{ X } 100 \qquad (5)$$

Où, les concentrations de tous les ions sont exprimées en milliéquivalent par litre (méq/l).

- *Indice de Perméabilité (IP)*

La perméabilité du sol est affectée par l'utilisation à long terme de l'eau d'irrigation et est influencée par le contenu de sodium, de calcium, de magnésium et de bicarbonate dans le sol [25]. L'indice de perméabilité est déterminé par l'équation 6 proposée par [26] :

$$IP = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+} \qquad (6)$$

Où, les concentrations de tous les ions sont exprimées en milliéquivalent par litre (méq/l).

- *Rapport de Kelly (KR)*

Le rapport de Kelly représente le taux de sodium par rapport au magnésium et calcium. Il est utilisé pour classer la qualité de l'eau d'irrigation. Le rapport de Kelly (KR) est déterminé par l'équation 7 proposée par [27] :

$$KR = \frac{Na^+}{Mg^{2+} + Ca^{2+}} \quad (7)$$

Où, les concentrations de tous les ions sont exprimées en milliéquivalent par litre (méq/l).

- *Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)*

Dans les eaux fortement hydrogénocarbonatées, le calcium et le magnésium tendent à précipiter sous forme de carbonates lorsque l'eau se concentre et la proportion de sodium augmente. Le sol risque donc d'absorber plus de sodium [28]. En d'autres termes, le RSC est la teneur en CO_3^- et HCO_3^- restants lorsque tous les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été combinés à ces anions. Le RSC est déterminé selon l'équation 8 proposée par [29] :

$$RSC = (CO_3^- + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (8)$$

Où, les concentrations de tous les ions sont exprimées en milliéquivalent par litre (méq/l).

Si le RSC< 1,25 alors, l'eau peut être utilisée pour l'irrigation ;

Si le RSC > 1,25 alors, l'eau n'est pas appropriée à l'irrigation.

- *Teneurs en nitrates (NO_3^-)*

La forte présence des nitrates dans l'eau d'irrigation peut nuire à la plante [30]. Ainsi, trois classes ont été retenues. Les classes I et II, avec un minimum de 30 mg/L définissent une bonne aptitude des eaux à l'irrigation. Cependant, la classe III regroupe les points ayant une concentration supérieure à 30 mg/L et pour lesquels les eaux sont inappropriées à l'irrigation.

III. RESULTATS

A. Résultats

A.1. Analyses physico-chimiques

Les résultats des paramètres physiques et chimiques des eaux souterraines déterminés *in-situ* et au laboratoire sont consignés dans le tableau 4. L'analyse des résultats montre dans l'ensemble une hétérogénéité relative des paramètres. Le pH varie de 3,98 à 6,60 pour une moyenne de 4,84 en saison sèche, et de 4,04 à 6,87 pour une moyenne de 4,88 en saison pluvieuse. Ces résultats témoignent le caractère acide des eaux souterraines. La température des eaux avoisine 30°C, avec des températures moyennes respectives de 27,72°C en saison sèche et de 26,87°C en saison pluvieuse. La Conductivité Électrique (CE) s'échelonne entre 19,59 et 445,19 µS/cm avec une moyenne de 108,64 µS/cm en saison sèche et entre 19,16 et 420,65 µS/cm pour une moyenne de 104,42 µS/cm en saison pluvieuse. Les eaux souterraines sont faiblement minéralisées comme l'attestent les valeurs centrales des CE n'excédant pas les 100 µS/cm. Les concentrations des ions majeurs sont faibles dans les eaux souterraines. Si l'on tient compte des valeurs moyennes (en mg/L) des ions majeurs, l'abondance des cations et des anions dans les eaux souterraines durant les deux saisons climatiques est la suivante : $NO_3^- > HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-}$ et $Ca^{2+} > K^+ > Na^+ > Mg^{2+}$. Ce qui signifie que dans les eaux étudiées, le Ca^{2+} et les NO_3^- sont les ions les plus dominants. En comparant les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques de la saison sèche à celles de la saison pluvieuse, on remarque qu'il n'y a pas d'écart considérable. La variation saisonnière des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines pourrait donc être négligée. Par conséquent, dans la suite du travail, les paramètres physico-chimiques de la saison sèche peuvent être utilisés ou vice-versa. En ce qui concerne la présente étude, les données physico-chimiques de la saison sèche ont été utilisées, car l'irrigation des cultures se fait généralement en saison sèche.

Tableau 4 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

	Saison sèche				Saison pluvieuse			
	Min	**Moy**	**Max**	**Ec**	**Min**	**Moy**	**Max**	**Ec**
pH	3,98	**4,84**	6,60	0,72	4,04	**4,88**	6,87	0,74
T°C	25,40	**27,72**	31,10	1,05	25,00	**26,87**	29,90	0,86
CE (µS/cm)	19,59	**108,64**	445,19	103,77	19,16	**104,42**	420,65	105,34
Ca^{2+} (mg/L)	1,75	**6,81**	16,20	3,98	1,74	**6,12**	13,50	3,36
Mg^{2+} (mg/L)	0,72	**2,14**	5,82	1,37	0,67	**1,95**	4,84	1,12
Na^{+} (mg/L)	0,52	**4,06**	14,40	3,91	0,70	**4,12**	15,80	3,95
K^{+} (mg/L)	0,29	**4,34**	15,90	4,53	0,35	**4,28**	17,12	4,62
Cl^{-} (mg/L)	0,70	**9,09**	31,80	8,04	0,35	**9,13**	36,80	9,57
HCO_3^{-} (mg/L)	0,76	**13,30**	49,10	12,77	0,65	**13,61**	54,70	14,60
SO_4^{2-} (mg/L)	2,00	**5,56**	16,00	3,85	1,00	**4,93**	18,00	4,30
NO_3^{-}	6,25	**14,30**	24,10	4,30	1,70	**13,98**	25,30	3,70

Min = minimum ; Moy = moyenne ; Max= maximum ; Ec = Écart type

A.2. Classification hydrochimique selon Stuyfzand

Selon les teneurs en chlorures, 23 échantillons (40 %) présentent un type principal oligohaline de code "G" et 34 échantillons (60 %) sont de type principal oligohaline-fraîche de code "g"(Tableau5). En se basant sur la moyenne des éléments chimiques, le sous-type des eaux se caractérise par la dominance des ions NO_3^-et Ca^{2+}. En tenant compte des teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+}, les eaux souterraines se distinguent en deux principaux types. Il s'agit des eaux très douces qui sont infiniment représentées par 4 échantillons (7 %) et les eaux douces, fortement représentées dans la zone d'étude avec 53 échantillons (93 %). Pour la classe des eaux, la classification de Stuyfzand a dévoilé une classe, la classe de code (0).

Tableau 5 : Classification de Stuyfzand des eaux souterraines

Types et classes d'eau	**Niveau de Classification**	**Code**	**N = 57**	**%**
Type principal	**[Cl] (mg/L)**			
Oligohaline	< 5	G	23	40
Oligohaline-fraîche	5- 30	G	34	60
Type	**TH (°F)**			
Très douce	< 5	*	4	7
Douce	5 – 10	0	53	93
Classe	**$(Na+K+Mg)_{corrigé}$(méq/L)**			
Équilibre de (Na+K+Mg)	$\geq -\sqrt{0{,}5 \times Cl}$ et $\leq \sqrt{0{,}5 \times Cl}$	0	57	100

A.3. Faciès géochimique des eaux souterraines

La projection des points d'eau dans le diagramme de Piper (Figure 6) a permis de montrer que les eaux souterraines de la région de Bonoua sont différentes. Deux faciès géochimiques sont ressortis : le faciès chloruré et sulfaté calcique (74%) et le faciès chloruré sodi-potassique (26%). Il faut ajouter à ces faciès,le caractère purement chloruré-nitraté car la minéralisation totale en chlorures et en nitrates est supérieure à celle des autres anions. Cette variabilité de faciès pourrait mettre en évidence la complexité des processus hydrogéochimiques qui interviendraient dans la salinisation ou la minéralisation des eaux souterraines.

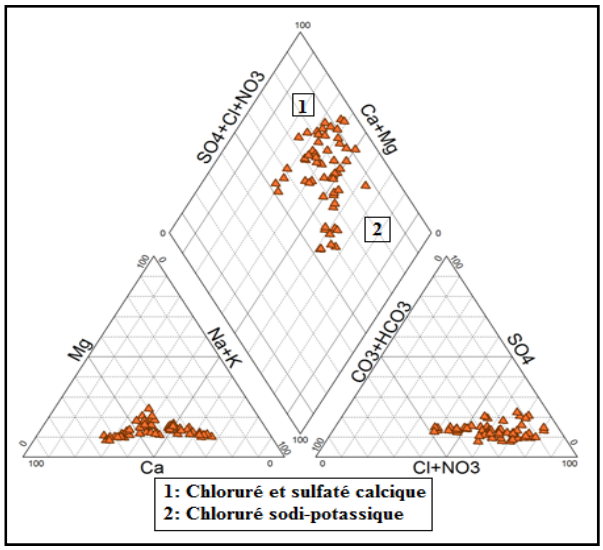

Figure 6 : Faciès géochimiques des eaux souterraines de la région de Bonoua

A.4. Qualité des eaux souterraines à usage agricole

Les indices d'évaluation des eaux souterraines de la région de Bonoua à l'irrigation sont exprimés dans le tableau 6. Les résultats de la conductivité électrique montrent que 86 % des eaux étudiées ont une faible salinité alors que 14 % ont une salinité moyenne. Dans l'ensemble, les eaux souterraines de Bonoua ne présentent pas de risque de salinité pour les sols.

Le %Na des eaux échantillonnées varie de 16,38 à 54,47 %. Les valeurs de %Na montrent que les eaux sont d'excellente qualité à acceptable pour l'irrigation (tableau 6). Le croisement des valeurs de %Na avec la CE dans le diagramme de Wilcox a montré que les eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal de Bonoua sont d'excellente qualité pour l'irrigation (Figure 7).

Tableau 6: Paramètresde qualité des eaux souterraines à usage agricole selon différents indices de classification

Paramètres	**Classes d'eau**	**Nombre d'échantillons (N = 57)**	**%**
% Na (méq/L)			
< 20	Excellente	5	9
20 - 40	Bonne	37	65
40 - 60	Acceptable	15	26
CE (µS/cm)			
< 250	Faible salinité	49	86
250 - 750	Moyenne salinité	8	14
SAR			

< 10	Alcalinité faible	57	100
MAR			
< 50	Convenable	57	100
IP (%)			
> 75	Excellente	50	88
25 – 75	Bonne	7	12
RSC (méq/L)			
< 1,25	Bonne	57	100
KR			
< 1	Convenable	57	100
NO_3^- (mg/L)			
5 – 30	Toxicité modérée	57	100

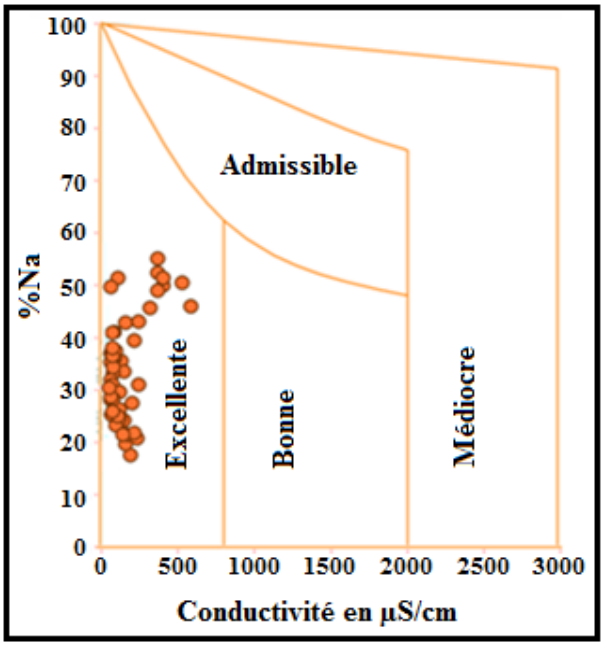

Figure 7 : Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de Bonoua

Les valeurs du SAR des eaux étudiées sont toutes inférieures à 10 (Tableau 6). Ce résultat montre que les eaux présentent un faible risque d'alcalinité pour les sols. La classification classique de Riverside des eaux de la nappe du Continental Terminal de Bonoua, selon son degré d'aptitude à l'irrigation montre que les eaux de la nappe se situent en général, dans deux classes principales : la classe C1S1 et C1S2 (Figure 8).

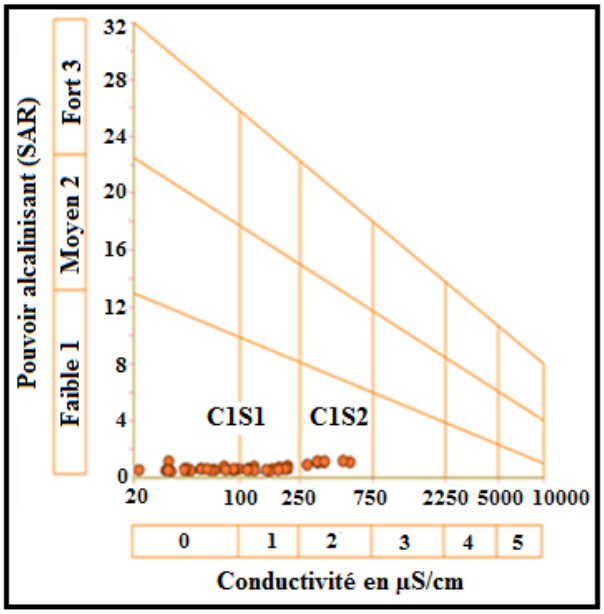

Figure 8 : Diagramme de Riverside des eaux souterraines de Bonoua

Les valeurs du MAR calculées varient de 15,22 à 49,82 % avec une moyenne de 35,56 %. Toutes les valeurs sont inférieures à 50 %, ce qui indique que les eaux étudiées sont appropriées pour l'irrigation.

L'indice de perméabilité calculé pour les échantillons d'eaux dans cette étude se situe entre 48,05 et 131,7% avec une moyenne de 97,29%. Par rapport aux valeurs de IP, les eaux souterraines de Bonoua définissent une excellente qualité à bonne pour l'irrigation des cultures (Tableau6).

Les valeurs de RSC calculées pourles échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude se trouvent entre -0,59 à 0,28 méq/L avec une moyenne de -0,18 méq/L. Toutes les valeurs sont inférieures à 1,25 méq/L, ce qui élimine les effets néfastes de carbonates et d'hydrogénocarbonates. RSC négatif indique que l'accumulation de sodium est peu probable puisque le calcium et le magnésium sont au-delà de ce qui peut être précipité sous forme de carbonates.

Les valeurs de KR fluctuent entre 0,15 et 0,94 avec une moyenne respective de 0,47. Toutes les valeurs calculées sont inférieures à 1 (tableau 6). Par conséquent les eaux souterraines de la région de Bonoua conviennent à l'irrigation.

Les concentrations en nitrates varient de 1,70 à 25,30 mg/L avec une moyenne de 13,98 mg/L. Toutes les concentrations en nitrates dosées dans les eaux étudiées sont comprises entre 5 et 30 mg/L (tableau 6). Cet état de fait révèle que les eaux souterraines de la nappe de Bonoua présentent une toxicité modérée pour les plantes.

IV. Discussion

L'eau d'irrigation, qu'elle provienne de sources ou qu'elle soit pompée dans les nappes, n'est jamais pure ; elle contient des sels dissous qui suivant leur concentration peuvent affecter les sols et les cultures [31]. L'analyse des eaux souterraines de la région de Bonoua basée sur le pH, CE, Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+ Cl, SO_4^{2-},NO_3^-et HCO_3^- pour déterminer leur degré d'aptitude à l'irrigation a montré que le pH est compris entre 3,98 et 6,60 avec une moyenne de 4,88. Ce qui confère un caractère acide à ces eaux. L'acidité des eaux souterraines en zone tropicale humide est principalement liée à la production de CO_2 dans les premières couches du sol [32]. Selon [33], le pH de l'eau d'irrigation devrait se situer entre 5,5 et 6,5 car à ces valeurs, la solubilité de la plupart des micro-éléments est optimale. En se basant sur ce critère, 75 % des eaux étudiées ont un pH inférieur à 5,5 et 25 % ont un pH compris entre 5,5 et 6,5. L'acidité très marquée des eaux souterraines de Bonoua pourrait causer des dommages aux racines des plantes et de plus, à ces valeurs de pH, les métaux lourds comme le manganèse et le fer sont bien absorbés qu'ils pourraient nécroser les plantes [34]. La classification de [15] a montré que les eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal de Bonoua sont oligohalines à oligohaline-fraîches, ce qui indique qu'elles sont très faiblement salées. Ces eaux se déclinent en une principale classe de code (0), qui indique qu'il n'y a pas d'échange entre l'eau de mer et les eaux souterraines de la nappe de Bonoua. Cette interprétation est subjective dans la mesure où les eaux étudiées ont été prélevées dans des ouvrages situés loin de

la mer, au nord de la faille des lagunes. Cette discontinuité naturelle empêcherait donc la contamination des eaux souterraines étudiées par les eaux marines. La faible salinité des eaux souterraines étudiées est confirmée par les faibles valeurs des conductivités électriques n'excédant pas les 500 µS/cm. Selon [24], une eau d'irrigation de faible salinité (< 500 µS/cm) entraîne par lixiviation les minéraux et les sels solubles. Si le calcium est lixivié, une déstabilisation de la structure du sol peut se produire, occasionnant par ricochet une dispersion des particules du sol. Ces particules fines bouchent les espaces poreux, ce qui conduit à une baisse des taux d'infiltration, au craquèlement du sol et à des problèmes d'émergence pour les cultures. Ce problème pourrait se produire dans la zone de Bonoua, puisque les conductivités électriques des eaux sont majoritairement en-dessous de 500 µS/cm. Parmi les sels dissous dans l'eau, le sodium requiert plus d'attention. En effet, de hautes concentrations en sodium peuvent être dommageables pour les plantes en modifiant les conditions physiques du sol. Dans la présente étude, l'influence du sodium sur les eaux d'irrigation a été évaluée par la détermination du taux d'adsorption du sodium (SAR), le rapport de Kelly et le pourcentage de sodium (%Na). Les faibles valeurs de ces paramètres dans les eaux étudiées montrent que le sodium n'est pas en excès dans ces eaux. Par conséquent, le risque de défolier des plantes sensibles par un système d'aspersion serait très faible [33]. L'eau d'irrigation avec un SAR compris entre 0 et 10 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec un faible risque d'accumulation de sodium [33]. Dans les eaux souterraines étudiées, les valeurs de SAR calculées sont toutes inférieures à 10. Ce résultat traduit que les eaux souterraines présentent un faible pouvoir alcalinisant pour les sols [23]. Ce résultat est en accord avec les travaux de [7] qui ont montré que les eaux souterraines de la région d'Agboville ont un faible pouvoir alcalinisant. L'interprétation des résultats ne peut se faire sur la seule teneur en sodium. En effet, ces effets sont tributaires de la présence ou l'absence d'autres éléments. Les autres ions comme le calcium et le magnésium, dans des proportions rencontrées dans les eaux maintiendraient la structure des sols. Les valeurs du taux de magnésium calculées dans les eaux étudiées sont toutes inférieures à 50%, ce qui montre que ces eaux sont utilisables pour l'irrigation vis-à-vis du magnésium. Pour [29], les eaux d'irrigation contenant moins de 1,25 méq/L de carbonate de soude résiduel (RSC) n'auraient aucune influence sur les sols, celles qui en contiendraient plus de 1,25 méq/L seraient dangereuses. Dans ladite étude, les valeurs de RSC calculées dans les eaux étudiées sont toutes inférieures à 1,25 méq/L, ce qui limite le risque de précipitation des ions magnésium et calcium sous forme de carbonates et par ricochet réduit le risque d'absorption du sodium par le sol [29]. Selon [28], des eaux d'irrigation ayant le même taux d'absorption de sodium donnent au sol le même pourcentage de sodium échangeable à l'équilibre. La vitesse à laquelle cet équilibre est atteint dépend de la concentration de l'eau, c'est-à-dire, de sa conductivité. Le diagramme de [23] donne cette classification. Dans la présente étude, la classification de Richards a révélé que les eaux souterraines de Bonoua appartiennent à deux principales classes ; la classe C1S1, la plus représentative avec 86 % des eaux étudiées et la classe C1S2 la moins représentée par 14 % des échantillons. La classe C1S1 caractérise les eaux à faible risque d'alcalinisation et de salinisation pour les sols agricoles. Elles peuvent donc être utilisées sans danger pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols [23]. Cette classe d'eau a également été observée dans le bassin versant de la rivière Mingoa, à Yaoundé [34]. Le faible risque d'alcalinisation observé au niveau des eaux de Bonoua est identique à celui de certains auteurs dont [35], [36] et [37]. Cependant, un contraste est observé au niveau du risque de salinisation. En effet, ces auteurs ont signalé des risques de salinité moyens à très élevés, contrairement à celui des eaux de Bonoua qui est très faible compte tenu de ce que les eaux sont faiblement minéralisées. La classe C2S1 présente un risque moyen de salinisation et un risque faible d'alcalinisation. Les eaux de cette classe peuvent être utilisées sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels. Ces résultats sont en accord avec ceux en Côte d'Ivoire de [38], [39], [6] et [7], respectivement dans la région de la Haute Marahoué, de Grand Lahou, de Katiola et d'Agboville. Elle a également été observée dans les eaux en Inde [40]; [36]; [41], en Irak [42], en Iran [43] et en Algérie [44] . Les faibles concentrations en nitrates (< 30 mg/L) dans les eaux souterraines de Bonoua indiquent que celles-ci ne présenteraient pas de risque de toxicité pour les plantes. Ce résultat est différent de celui de [30], qui a attesté que les nitrates des eaux souterraines de la région de Kenadsa en Algérie présentent une toxicité sévère pour les plantes. En effet, dans cette région, les nitrates issus des rejets des eaux usées sont très élevés, car ils sont compris entre 672,48 et 1533 mg/L. En outre, le niveau piézométrique de la nappe est proche de la surface du sol [30], si bien que l'intense évaporation dans la région induit une augmentation des teneurs en chlorures qui sont supérieures à 10 méq/L.

V. CONCLUSION

Cette étude a pour objectif de déterminer la qualité des eaux de la nappe du Continental Terminal de Bonoua à des fins d'irrigation. Les résultats montrent que les caractéristiques physico-chimiques sont relativement variables. Le diagramme de Piper a permis d'identifier deux faciès chimiques : chloruré et sulfaté calcique (74 %) et chloruré sodi-potassique (16 %). La classification de Stuyfzand a montré que les eaux sont oligohalines et oligohaline-fraîches, très douces à douces, avec la présence

d'une classe d'eau de code (0). Cette classe témoigne qu'il n'y a pas d'échange entre l'eau de mer et les eaux de la nappe. L'analyse des indicateurs de la qualité des eaux pour un usage en irrigation a montré, globalement une bonne qualité. Les eaux de la nappe de Bonoua peuvent donc être utilisées sans danger pour la plupart des cultures, sur la plupart des sols. Cependant, avant toute utilisation de ces eaux pour l'irrigation, leur pH devrait être rehaussé.

REMERCIEMENT

Les auteurs remercient le Centre Ivoirien Anti-Pollution(CIAPOL) pour l'analyse des échantillons d'eau.

REFERENCES

[1] Festy B., Hartemann P., Ledrans M., Levallois P., Payment P., Tricard D. 2003. Qualité de l'eau. In : Environnent et santé publique- Fondements et pratiques. pp.333-368.

[2] DOUAOUI A. et HERTANI T. (2007). Impact de l'irrigation par les eauxsouterraines sur la degradation des sols de la plaine du bas-Chéliff. Actes de l'atelier regional SIRMA. Tunis.

[3] BOUHLASSA S., ALECHCHEIKH C. et KABIRI L. (2008). Origine de la minéralisationet de la détérioration de la qualité des eauxsouterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du basin versant de Rheris (Errachidia, Maroc). Séchersse, vol.19, pp. 67-75.

[4] ROUABIA A. E. K. et DJABRI L. (2010). L'irrigationet le risqué de pollution saline. Exemple des eauxsouterraines de l'aquifèremiocène de la plained'El Ma Labiod. Larhyss Journal, n°8 pp. 55-67.

[5] BEN A. M., FADIL F. and El HAJI M. (2014). River Quality assessment of the city of Taza used in irrigation vegetable crops (Morocco). Journal Appliied Biosciences n° 77, pp. 6462-6473.

[6] OGA M. S., GNAMBA F. M., ADIAFFI B., SORO T., OULAI K. and BIEMI J. (2015). Aptitude of Groundwaters for Irrigation in Katiola Area. Asian Review of Environmental and Earth, Vol. 2, N° 3, pp. 54-60.

[7] OROU K.R., GBOMBELE S., SORO T.D., TRAORE A., FOSSOU N.M.S. et SORO N. (2016). Aptitudes à l'agriculture des eaux souterraines du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). European Scientific Journal, vol.12, N°.21, pp. 81-100.

[8] 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).

[9] AKÉ G. E. (2001). Évaluation des ressources en eau souterraine de la région de Bonoua. Mémoire de DEA des Sciences de la Terre. Université de Cocody, 72p.

[10] ROOSE E. et CHEROUX M. (1965). Les sols du Bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. ORSTOM Adiopodoumé. 92 p.

[11] PERRAUD A. et DE LA SOUCHERE P. (1971). Esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/500000. ORSTOM, Adiopodoumé, 93 p.

[12] AKÉ G. E. (2010). 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, 204 p.

[13] M'NASSRI S., DRIDI L., EL AMRI A., HACHICHA M. et MAJDOUB R. (2016). Aptitude des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Sidi El Hani à l'irrigation (Centre-Est de la Tunisie), J. Mater. Environ. Sci. 7(12) pp. 4742-4753.

[14] PIPER A. M. (1944). A graphic procedure in the Geochemical interpretation of water-analyses. Eos, Transactions American Geophysical Union, n°25, pp. 914-928.

[15] STUYFZAND P.J. (1989). A new hydrochemical classification of water types, Regional Characterization of Water Quality, Proceedings of the Baltimore Symposium, IAHS, Publication n°182, pp. 89-98.

[16] OLIVE P. (1996). Introduction à la géochimie des eaux continentale, IdituraDidactica si pedagogica, R.A. Bucuresti, 130p.

[17] EL YOUTI F., EL MANDOUR A., KHATTACH D. et KAUFMANN O.(2009). Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Moroco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. AppliedGeochemistry 24, 16-31.

[18] MOLLEMA P.N., ANTTONELLINI M., DINELLI E., GABBIANELLI G., GREGGIO N. and STUYFZAND P.J. (2013). Hydrochemical and physical processes influencing salinization and freshening in Mediterranean low-lying coastal environments. Appl. Geochem. 34: 207-221. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2013.03.07.

[19] USMAN M., LIEDL R. and AWAN U.K. (2015). "Spatio-temporal estimation of consumptive water use for assessment of irrigation system performance and management of water resources in irrigated Indus Basin, Pakistan", Journal of Hydrology, vol. 525, pp. 26-41.

[20] COSTA J. L. and APARICIO V. C. (2015). Quality assessment of irrigation water under a combination of rain and irrigation. Agricultural Water Management, vol. 159, pp 299-306.

[21] NARASIMHA G., SRIDEVI A., BUDDOLLA V., SUBHOSH C.M. AND RAJASEKHAR R. B. (2006). Nutrient effects on production of cellulolytic enzymes by Aspergillus niger, African Journal of Biotechnology, vol. 5, no. 5, pp. 472- 476.

[22] T. SUBRAHMANI T., ELANGO L. and DAMODARSWAMY S.R. (2005). Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural useinChithar river basin, Tamil Nadu, India, Environmental Geology, vol. 47, pp. 1099-1110.

[23] RICHARDS L. A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agric. Handbook 60, USDA, Washington D.C. 160 p.

[24] AYERS R.S. and WESTCOT D. W. (1985).Water quality for agriculture FAO irrigation and drainage, n°. 29, 109 p.

[25] VASANTHAVIGAR M., SRINIVASAMOORTHY K., VIJAYARAGAVAN K., RAJIV GANTHI R., CHIDAMBARAM S., ANANDHAN P. and VASUDEVAN S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. Environnementan Monitoring and Assessment, vol.171, pp. 595-609.

[26] DONEEN L.D. (1961). The influence of crop and soil on percolating water. Proc. 1961 BiennialConf. ongroundwater recharge, pp. 156-163.

[27] KELLY W.P. (1963). Use of saline irrigation water. Soil. Sci. 95 (4): 355-391.

[28] DURAND J.H. (1973). Utilisation des eaux salines pour l'irrigation. Rapport de l'Institut national de la Recherche agronomique. CRA du Sud-Ouest-Domaine de la Grande Ferrade. 33-Pont-de-la-Maye, 20 p.

[29] EATON F.M. (1950). Significance of carbonate in irrigation waters. Soil. Sci. 123-133.

[30] BRAHMI H. (2015). Contribution à l'étude des eaux souterraines au Sahara, exemple des eaux de la région de Kenadsa. Mémoire de Master. Université Abou BekrBelkaïd-Tlemcen (Algérie) 105 p.

[31] LANDREAU A. et MONITION L. (1977). Nouvelle évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation, 77-SGN-628-HYD, 25p.

[32] TAPSOBA S. (1995). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire): Hydrochimie, Isotopie et Indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de Doctorat.3e cycle, Université de Cocody, 201 p.

[33] COUTURE I. (2004). Analyse d'eau pour fin d'irrigation. MAPAQ Montérégie-Est/AGRI-VISION 2003-2004, 8p.

[34] TABUE Y. J. G., FEUMBA R., WETHE J., EKODECK G. E. et DE MARSILY G. (2012). Evaluation of groundwater suitability for domestic and irrigational purposes: A Case study from Mingoa river basin, Yaoundé, Cameroon. Journal of Water Resource and Protection, 4, 285-293.

[34] KROEZE D. MSC. (2018). Le pH l'acidité : l'effet de l'acidité sur vos plantes. Bulletin d'information de CANNA-Research

[35] PRASAD DS. R., SADASHIVAIAH C. and RANGNNA G. (2009). Hydrochemical characteristics and evaluation of groundwater quality of TumkurAmanikere Lake watershed, Karnataka, India. E-Journal of Chemistry 6(S1), S211-S218.

[36] SRINIVAS Y., HUDSON D. O., RAJ A. S. and CHANDRASEKAR N. (2013). Evaluation of groundwater quality in and around Nagercoiltown,Tamilnadu, India: an integrated geochemical and GIS approach. Appl Water Sci. 3: 631-651.

[37] AMEUR M., HAMZAOUI-AZAZA F. et GUEDDARI M. (2014). L'apport du Système d'Informations Géographiques à l'évaluation de la qualité des eaux de la nappe des grès du Trias, dans le Sud-Est de la Tunisie. International Journal of Innovation and Applied Studies. Vol. 7 N° 3, pp. 1090-1103.

[38] BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrologique et par télédétection des bassins versants subsaharien du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Naturelles, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 480 p.

[39] SORO N. (2002). Hydrochimie et Géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implications hydrologiques et hydrogéologiques. Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, 256 p.

[40] RAJENDRA PRASAD DS., SADASHIVAIAH C. and RANGNNA G. (2009). Hydrochemical characteristics and evaluation of groundwater quality of TumkurAmanikere Lake watershed, Karnataka, India. E-Journal of Chemistry, 6(S1): S211-S218.

[41] PRABHUNATH S., ASHWANI K. T. and PRASOON K. S. (2014). Hydrochemical characteristic and quality assessment of groundwater of Ranchi Township area, Jharkhand, India. Current world Environment. Vol. 9(3), pp. 804-813.

[42] DIARY and AL-MANMI. (2007). Groundwater quality evaluation in Kalar town-Sulaimani/NE-Iraq. Iraqi Journal of Earth Sciences, Vol. 7, N°2, pp. 31-52.

[43] NOSRAT A. and ASGHAR A. M. (2010). Assessment of groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural uses in the Oshnavieh area, northwest of Iran. Journal of Environmental Protection, 1, 30-40.

[44] GOUAIDIA L., GUEFAIFIA O., BOUDOUKHA A. et HEMILA M.L. (2013). Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana, nord-est algérien. Geo-Eco-Trop., 37 (1) : 81-92.