

## Evaluation de la Qualité Hydrochimique des Eaux Souterraines de la Région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

Louan Odile BLE<sup>1</sup>, Gabriel Etienne AKE<sup>2</sup>, Tanina SORO<sup>1</sup>, Gbombélé SORO<sup>1</sup>, and Emile Yoboué KOUADIO<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Département des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (DSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup>Département de pédologie et Minéralogie des sols, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

---

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

**ABSTRACT:** The led study presents the current state of the quality of waters of the tablecloth of Bonoua as well as its situation towards polluting elements of anthropological origin ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). This tablecloth is more and more requested to cover the water requirements of the city of Abidjan, while its quality is felt (experienced) by the diverse sources of pollution which multiplied further to the urbanization and to the development of the agro-industrial cultures.

To estimate the current subterranean quality of waters of this tablecloth a comparison and a follow-up of its physico-chemical parameters from 2001 till 2015 was realized. It was coupled with a multivariate statistical analysis to know the Analysis in Main Component (ACP) to determine the origin of mineralization, The methodology took into account on one hand the hydrochemical parameters which showed that waters are acid with a pH between (4,2UpH and 6,88UpH, more important concentrations in nitrates (140mg / L) to Ahoutoué in 2001 in (150mg / L) in 2015, on the other hand the hydrodynamic parameters of the aquifer to know the thickness of the tablecloth, the level piézométrique.

This study showed that the tablecloth of Bonoua is a free tablecloth with a thickness of 115m. The piézométrique (map) showed that the flow of waters of the tablecloth is made in the North-south and east-west (direction), the flow is 258 722 m<sup>3</sup> / j.

The Analysis in Main Components (ACP) allowed to notice that the mineralization of underground waters of the region is bound to an organic pollution of the superficial layers of the ground surmounting the tablecloth Bonoua.

**KEYWORDS:** mineralization, organic pollution, chemical pollution, ACP, tablecloth of Bonoua.

**RESUME:** L'étude menée présente l'état actuel de la qualité des eaux de la nappe de Bonoua ainsi que sa situation vis-à-vis d'éléments polluants d'origine anthropique ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). Cette nappe est de plus en plus sollicitée pour couvrir les besoins en eau de la ville d'Abidjan, alors que sa qualité est éprouvée par les diverses sources de pollution qui se sont multipliées suite à l'urbanisation et au développement des cultures agro-industrielles.

Pour évaluer la qualité des eaux souterraines actuelle de cette nappe une comparaison et un suivi de ses paramètres physico-chimiques de 2001 à 2015 a été réalisée. Elle a été couplée à une analyse statistique multivariée à savoir l'Analyse en Composante Principale (ACP) pour déterminer l'origine de sa minéralisation. La méthodologie a pris en compte d'une part les paramètres hydrochimiques qui ont montré que les eaux sont acides avec un pH compris entre (4,2UpH) et (6,88UpH), des concentrations plus importantes en nitrates (140mg/L) à Ahoutoué en 2001 à (150mg/L) en 2015, d'autre part les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère à savoir l'épaisseur de la nappe, le niveau piézométrique.

Cette étude a montré que la nappe de Bonoua est une nappe libre avec une épaisseur de 115m. La carte piézométrique a montré que l'écoulement des eaux de la nappe se fait dans le sens Nord-Sud et Est-Ouest, le débit moyen est de 258 722 m<sup>3</sup>/j.

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis de constater que la minéralisation des eaux souterraines de la région est liée à une pollution organique des couches superficielles du sol surmontant la nappe Bonoua.

**MOTS-CLEFS:** minéralisation, pollution organique, pollution chimique, ACP, nappe de Bonoua.

## 1 INTRODUCTION

Les eaux souterraines offrent d'excellentes sources d'approvisionnement en eau potable. C'est à juste titre que les réserves en eau souterraine de la nappe de Bonoua estimées à 13,9 milliards de m<sup>3</sup>, sont actuellement exploitées pour couvrir les besoins en eau potable, tant de la zone que ceux de la ville d'Abidjan, dans sa partie sud. La qualité de cette ressource en eau souterraine est sans cesse mise à rude épreuve, à cause de la croissance des sources de pollution tant ponctuelles que diffuses. En effet, la région de Bonoua fait actuellement l'objet de nombreuses sollicitations, en matière d'investissements consacrés aux ressources agricoles notamment. Elle connaît une diversité de cultures agro-industrielles, notamment le binôme café-cacao, et plus récemment l'hévéa, le palmier à huile et l'ananas dont les intrants qui garantissent leur productivité, constituent une menace de pollution pour la nappe. Plusieurs travaux ont déjà été réalisés dans la région pour sa protection, notamment [1]; [2] et [3]. Cette étude a été entreprise dans le but de connaître l'état actuel de la qualité de cette nappe et se situe dans le prolongement de ceux réalisés par [4] et [5], évoquant, la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de cette zone. Il est bien admis que l'eau dans sa nature est rarement pure car différents éléments peuvent altérer sa constitution de base par diffusion, dissolution ou par un simple mélange. La composition chimique de l'eau dépend de l'environnement dans lequel elle se trouve. Pour ce faire, une analyse en composante principale a été effectuée pour établir les relations possibles entre différents facteurs hydrochimiques afin de suivre l'évolution physico-chimique de cette nappe.

### 1.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

#### ZONE D'ÉTUDE

La région de Bonoua (figure1), est située au Sud- Est de la Côte d'Ivoire à 60 km d'Abidjan, la capitale économique. Cette région couvre une superficie de 2209 km<sup>2</sup> et est dominée par un relief de plaine. La région est traversée par le fleuve Comoé, les rivières Bia et la Mé [6]. Toutes ces rivières débouchent sur les différentes lagunes. Les cultures sont diverses et variées en fonction du type de sol. Ainsi, sur les sables quaternaires entre la mer et les lagunes, se trouvent les cocoteraies industrielles. Sur le plateau de sables argileux du tertiaire, les cultures rencontrées concernent essentiellement les palmiers, ananeraies, hévéacultures, caféiers, cacaoyers et bananeraies. Ces cultures sont des plantations agro-industrielles.

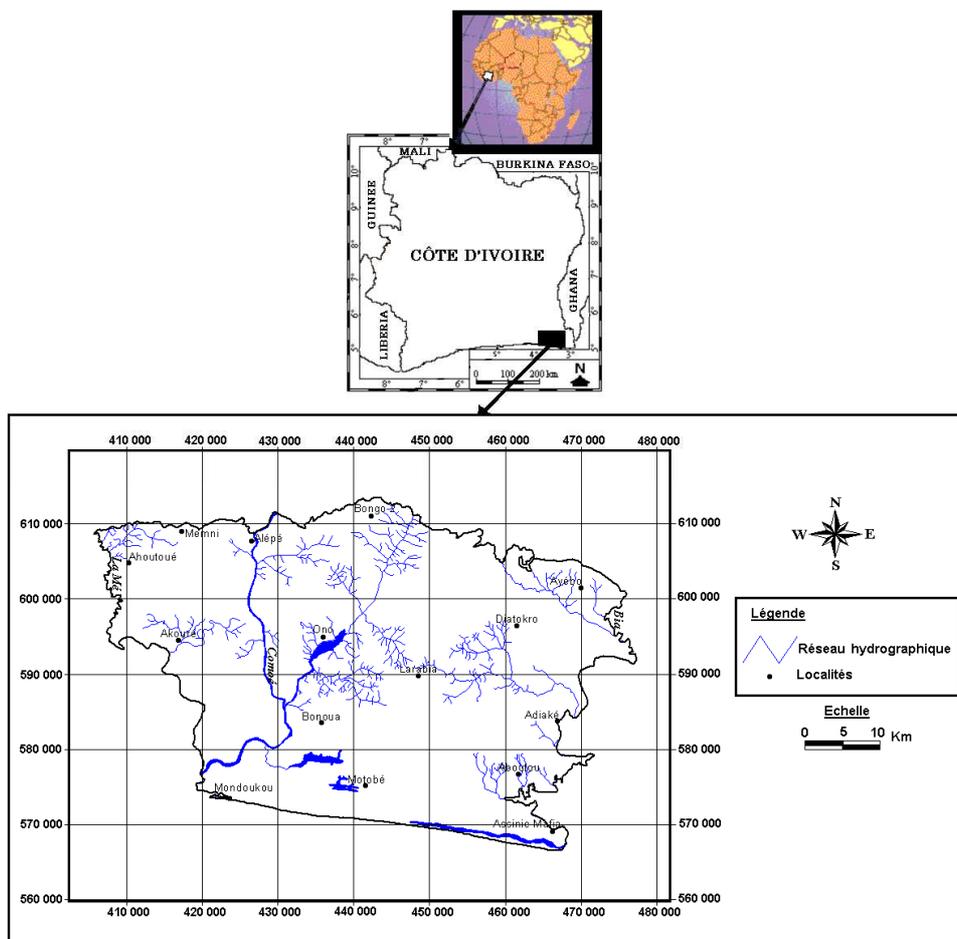


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Deux domaines géologiques sont à différencier dans notre zone d'étude : au Sud, le bassin sédimentaire constitué de roches détritiques du tertiaire et du quaternaire, au Nord, le socle cristallin constitué de micaschistes et de granites intrusifs (figure 2).

La zone d'étude est en majeure partie située dans le bassin sédimentaire.

Le contact socle cristallin - bassin sédimentaire qui passe à Aboisso et Alépé s'échancre en forme de "V" vers le Nord. Vers le Sud les granites s'enfoncent et sont recouverts par une épaisseur parfois importante de sables argileux néogènes [7]. Sur le littoral et au bord de la lagune Aby apparaissent des formations quaternaires



17	Ayebo	Bananaeraie
18	Babadougou	Bananaeraie
19	Babadougou	Palmeraie
20	Bangakoi	Palmeraie
21	Beniakre	Annaneraie
22	Bobopli	Cacaoculture
23	Bondoukou	Cacaoculture
24	Kimoukro	Hévéaculture
25	Akroaba	Palmeraie
26	Bongo-Saph	Hévéaculture
27	Bonoua	Annaneraie
28	Bonoua F2	cocoteraies industrielles
29	Wehou	Palmeraie
30	Montézo	Palmeraie

## 2.2 MÉTHODE D'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE

Les échantillons prélevés sont tenus au frais et à l'abri de la lumière, de préférence à une température de 4 °C et ont été analysés au laboratoire au plus tard dans les trois heures qui ont suivis leur prélèvement. Les paramètres physiques analysés sont : la température (T°) et le pH, et les paramètres chimiques sont : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, F et Al. Ils ont été analysés par la méthode de spectrophotométrie aussi appelée colorimètre au laboratoire des eaux de l'INHP. La matière organique (MO) a été aussi analysée combinée à des données de fiches techniques de forages principalement leur profondeur totale.

Le spectrophotomètre d'absorption moléculaire HACH500 a été utilisé dans cette étude. Cet appareil peut être précalibré pour plus de 120 mesures différentes. Après ajout du réactif approprié et agitation énergétique pendant 1mn, la solution se repose pendant 5 à 20 mn et on obtient un dépôt d'intensité proportionnelle à la concentration de l'élément recherché. Enfin, on procède à la mesure de la densité optique au spectrophotomètre après avoir réalisé l'étalonnage à partir d'une solution témoin désionisée.

## 2.3 METHODE DE TRAITEMENT DES DONNEES

Afin de confronter les données actuelles à celles de 2001, l'analyse statistique multivariée notamment l'Analyse en Composantes Principales (ACP) a été utilisée.

L'ACP est une méthode statistique de description qui permet de synthétiser et de classer un nombre important de données Elle étudie les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux. Les analyses ont été effectuées à partir de neuf (9) variables qui sont : Température (T°), pH, nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitrites(NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), Chlorures (Cl<sup>-</sup>), Fluor (F), Aluminium (Al), la Matière organique (MO) et la Profondeur totale (Pt) des forages. L'ACP a été réalisée à partir du logiciel STATISTICA 6.0.

## 2.4 ETABLISSEMENT DE LA CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

L'établissement de la carte piézométrique a été réalisé à partir des données extraites des fiches techniques de forages de la SODECLI (Société de Distribution d'Eau en Côte d'Ivoire). Le niveau piézométrique a été mesuré à l'aide d'une sonde piézométrique OTT (100 m) sonore et lumineuse. Les profondeurs d'eau dans chaque forage et les altitudes à l'aide de GPS et de cartes topographiques au 1/50 000. Les données collectées ont permis de déterminer la côte des eaux souterraines selon la formule suivante (équation 1) :

$$C = Z - H$$

Avec Z : altitude du piézomètre (m) ;

H= (NP + M) : profondeur de l'eau dans le piézomètre (m) ;

NP : niveau piézométrique (m) ;

M : margelle des puits ;

C : côte de l'eau (m).

Pendant la campagne de relevés piézométriques, la profondeur des puits a également été mesurée. La lame d'eau dans le puits a été déterminée par la formule suivante (équation 2) :

$L = P(t) - NP$  avec  
 L : lame d'eau en (m) ;  
 P(t) : profondeur du puits en (m)

### 3 RESULTATS

#### 3.1 CARACTÉRISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

L'analyse des données de forages, a permis de déterminer l'épaisseur moyenne de la nappe (115m).

La nappe de Bonoua est une nappe libre, elle a un comportement hydrogéologique similaire à la nappe du Continental Terminal à Abidjan.

##### 3.1.1 ETUDE PIÉZOMÉTRIQUE

La campagne de mesure piézométrique effectuée en mars 2015 a permis de dresser la carte piézométrique (figure 3). Elle montre que le sens de l'écoulement des eaux est l'Est-Ouest et Nord-Sud. Notons que les aires d'alimentation de notre nappe sont situées dans la partie Nord à Montézo, Bongo, et Wehou comme l'indique les cartes. Suivant la courbure des lignes de courant nous avons déterminé les grands axes de drainage de notre secteur. L'axe principal est déterminé par la Comoé et les trois autres sont des lignes de partage des eaux. Le débit moyen de la nappe de Bonoua est de 258 722 m<sup>3</sup>/j.

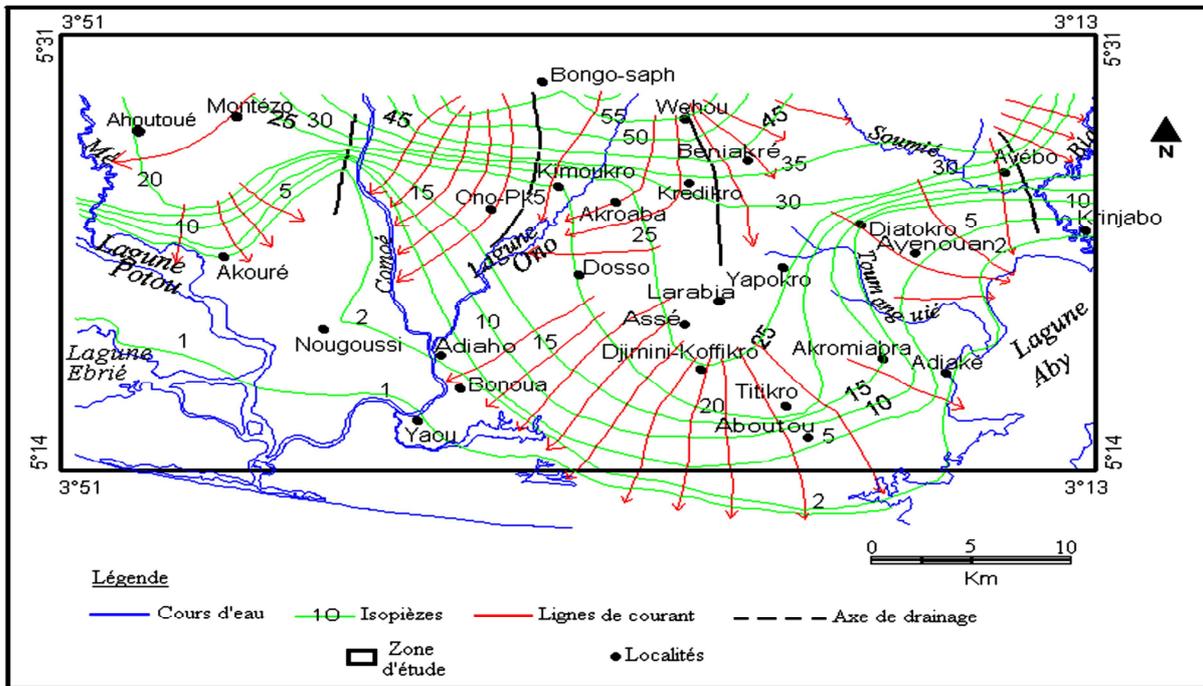


Figure 3 : Carte piézométrique de la nappe de Bonoua

#### 3.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES EAUX DE LA NAPPE DE BONOUA DE 1996 A 2001

##### 3.2.1 PARAMÈTRES CHIMIQUES DES EAUX

###### 3.2.1.1 NITRATES (NO<sub>3</sub>)

Les taux de nitrates observés de 1996 à 2001 varient de 0 mg/l à (Montézo F2) à 140 mg/L à (Ahoutoué) dans le forage FC, Bonoua forage F1 a enregistré un taux de 22,5mg/L. Ces taux sont inférieurs à la norme OMS qui est de 50 mg/l pour les eaux de consommation dans tous les forages sauf celui d'Ahoutoué qui a enregistré une concentration au-dessus de la norme en 2001 (figure4).

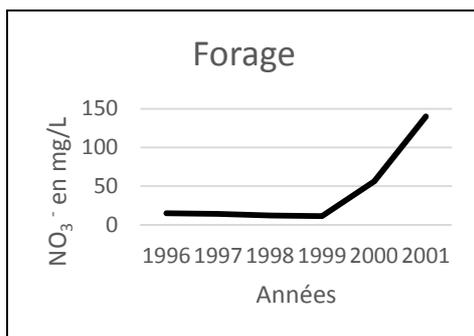


Figure 4 : Evolution du taux de nitrates dans le forage FC à Ahoutoué

### 3.2.1.2 AMMONIUM (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)

L’OMS fixe à 0,5 mg/L la concentration de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dans l’eau de consommation. Sur tous les échantillons analysés seuls, le forage FC de Ahoutoué en 2001 a enregistré une concentration dépassant la norme admise (0,6mg/L).

A Bonoua les teneurs varient de 0,021 mg/l à 0,4 mg/L. Cette concentration est passée de 0,05 mg/L en 1996 à 0,15 mg /L en 1999 pour atteindre le stade critique de 0,4mg/L en 2001 (Figure 5).

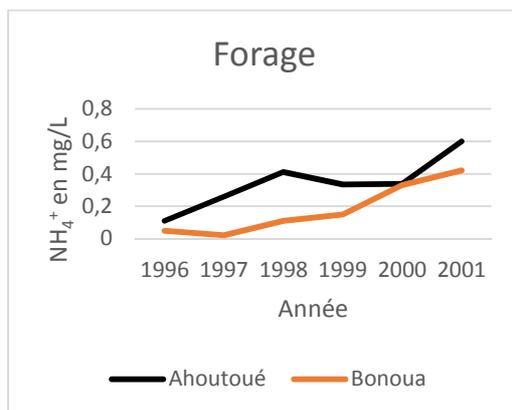


Figure 5: Evolution du taux d'ammonium

### 3.2.1.3 CHLORURES (Cl<sup>-</sup>)

Les concentrations en Cl<sup>-</sup> varient de 89,1mg/L dans les localités d’Ahoutoué, Babadougou F1, Akroaba, Wobekro, Djimini-koffikro et Titikro à 152,65 mg/L à Montézo, alors que l’OMS fixe ce taux à 250 mg/L. Pour une intrusion d’eau saumâtre, les taux sont plus grands et sont de l’ordre de plusieurs centaines de mg/L. C’est le cas à Nougoussi dans le forage F1 avec 124,25 mg/L de chlorures dans le forage F2. La proximité de la lagune Ebrié pourrait expliquer ces teneurs [8].

## 3.3 CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX DE LA NAPPE DE BONOUA DE 2014 A 2015

Le tableau 2 présente les résultats récents des analyses physico-chimiques des échantillons d’eau. Dans l’ensemble, les concentrations en certains éléments ont évoluées de 2001 à 2015. La température des eaux de nappe de Bonoua varie de 27,10° à 29,6°C. Sur les 30 échantillons recensés pour ce paramètre, 84% ont des températures supérieures à 27°C. La température moyenne des eaux de la nappe de Bonoua est de 27,6°C.

L’analyse des échantillons révèle que le pH varie de 4,2 à 8. Le pH moyen est de 5,79 et 25% des eaux analysées ont des pH < 5. Les pH compris entre 5 et 6,88 représentent 63,3% des échantillons.

Dans ces échantillons, les teneurs en NO<sub>3</sub><sup>-</sup> varient de 38,48 mg/L dans les localités de Bonoua (14/759A) à 150 mg/L à Montézo( 15/146A). Elles sont au-dessus des normes fixées par l’OMS (50 mg/l). Les teneurs en ammonium varient de 0mg/L à 2,6mg/L dans la localité d’Ahoutoué (14/392 A).

La teneur en matière organique (MO) des eaux naturelles varie en général de 2 à 10 mg/L. Les eaux de la nappe de Bonoua ont une teneur en matière organique comprise entre 0 et 2,22 mg/L.

**Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux échantillonnées de 2014 à 2015**

Code échantillon	pH	T°	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	Al	F	MO	Pt
14/001 A	5,08	27,7	1,76	0,00	0,18	2,7	0,10	0,15	0,12	24
14/096 A	5,4	27,8	9,80	0,00	0,10	4,2	0,17	0,12	0,00	30
14/115 A	4,5	27,9	2,08	0,02	0,99	4,8	0,11	0,81	0,55	26
14/166 A	6,3	27,10	8,00	0,01	0,12	3,1	0,11	0,01	0,42	34
14/250 A	4,2	27,11	12,5	0,00	0,22	3,1	0,17	0,13	0,56	21
14/274 A	5,6	27,12	1,90	0,00	0,08	1,7	0,11	0,22	0,55	15
14/392 A	5,9	27,13	8,20	0,00	<b>2,60</b>	105,4	0,05	0,13	2,22	6
14/ 559 A	5,45	27,14	1,72	0,00	0,06	3,5	0,01	0,36	0,53	30
14/696 A	4,7	27,15	2,90	0,00	0,00	4,2	0,05	0,02	0,72	44
14/ 759A	8,5	27,16	<b>38,48</b>	0,01	0,10	8,8	0,39	0,36	0,72	43
14/ 770 A	4,5	27,17	10,20	0,02	0,36	9,7	0,14	0,05	0,49	15
14/ 765 a	4,1	27,18	2,60	0,02	0,04	5,2	0,07	0,14	0,98	14
14/901 A	5,9	27,19	11,50	0,00	0,01	3,2	0,17	0,14	1,49	88
14/940 A	5,0	27,20	2,20	0,00	0,01	3,5	0,08	0,36	00	77
15/050 A	5,7	27,21	11,50	0,00	0,11	3,4	0,17	0,00	0,00	22
15/130 A	5,4	27,22	10,00	0,01	0,14	3,8	0,13	0,07	0,72	16
15/ 146 A	4,0	27,23	<b>150,00</b>	0,01	0,07	165,6	0,27	0,16	0,87	40
15/196 A	4,50	27,24	20,0	0,00	0,56	9,3	0,20	0,18	0,38	31
15/191 A	4,4	27,25	5,20	0,00	0,00	6,7	0,04	0,53	0,36	39
15/206 A	6,8	27,26	2,60	0,01	0,03	13,0	0,65	0,52	1,44	52
15/202 A	6,2	27,27	4,50	0,00	0,01	13,5	0,18	0,71	0,84	25
15/203 A	4,72	27,28	1,62	0	0,03	0,19	2,7	0,16	0,19	76
15/204 A	6	27,29	8,5	0	0,06	3,12	0,1	0,15	0	31
15/205 A	5,3	27,30	16	0,02	0,15	11	0,06	1,37	0,26	47
15/206 A	6,0	27,31	8,4	0,01	0,01	1,17	0,06	55	0,33	48
15/207 A	4,7	27,32	15	0	0,08	4,7	0,18	0,23	0,55	51
15/208 A	5,3	27,33	2,06	0,01	0,08	2,4	0,06	0,02	0,55	31
15/209 A	6,7	27,34	7,6	0,05	0,04	4,7	0,03	0,02	1,33	56
15/230 A	5,40	29,6	5,4	0	0,07	5,5	0,15	0,15	0,2	45
15/231 A	4,5	28,3	9,2	0	0,03	2,1	0,1	0,19	0	39

### 3.4 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE

Le tableau 3 récapitule les paramètres statistiques des variables. Les variables (pH, T°, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, F et Pt) présentent respectivement les valeurs extrêmes les plus importantes et les moyennes les plus élevées de toutes les variables étudiées. Les valeurs propres qui permettent d'apprécier la variance exprimée par chaque facteur et de montrer l'importance du caractère représenté par l'axe factoriel par rapport aux autres sont consignées dans le tableau 4.

Le pourcentage de variances exprimées est de 21% pour le facteur 1 ; 16,04% pour le facteur F2 ; 12,41% pour le facteur 3 et de 11,84% pour le facteur 4. La représentation à l'aide de ces quatre facteurs rend compte de manière satisfaisante, la structure des nuages de points.

**Tableau 3. Variables statistiques des variables étudiées**

	N Actifs	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
--	----------	---------	---------	---------	------------

pH	30	5,35833	4,00000	8,50000	0,96607
T°	30	27,39333	27,10000	29,60000	0,49441
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	30	7,47733	1,38000	20,00000	5,46761
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	30	0,00667	0,00000	0,05000	0,01093
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	30	0,21133	0,00000	2,60000	0,49324
Cl <sup>-</sup>	30	5,23867	0,19000	13,50000	3,44251
Al	30	0,22700	0,01000	2,70000	0,48306
F	30	2,08200	0,00000	55,00000	9,99883
MO	30	0,57900	0,00000	2,22000	0,51441
Pt	30	37,20000	6,00000	88,00000	19,40387

Tableau 4 : Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	2,100803	1,604499	1,241290	1,184839
% de Variance exprimée	21,00803	16,04499	12,41290	11,84839
Cumul de valeur propre	2,10080	3,70530	4,94659	6,13143
% de Variance exprimée cumulée	21,0080	37,0530	49,4659	61,3143

### 3.4.1 ESPACE DES VARIABLES

Le facteur 1 est déterminé par la matière organique (MO), les nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) et l'ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Le facteur F2 est déterminé par le pH et la profondeur totale (Pt). Le facteur F3, déterminé par les nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). F4 est déterminé par l'aluminium (Al) et le fluor (F) (tableau 5).

Tableau 5 : Variables et axes principaux

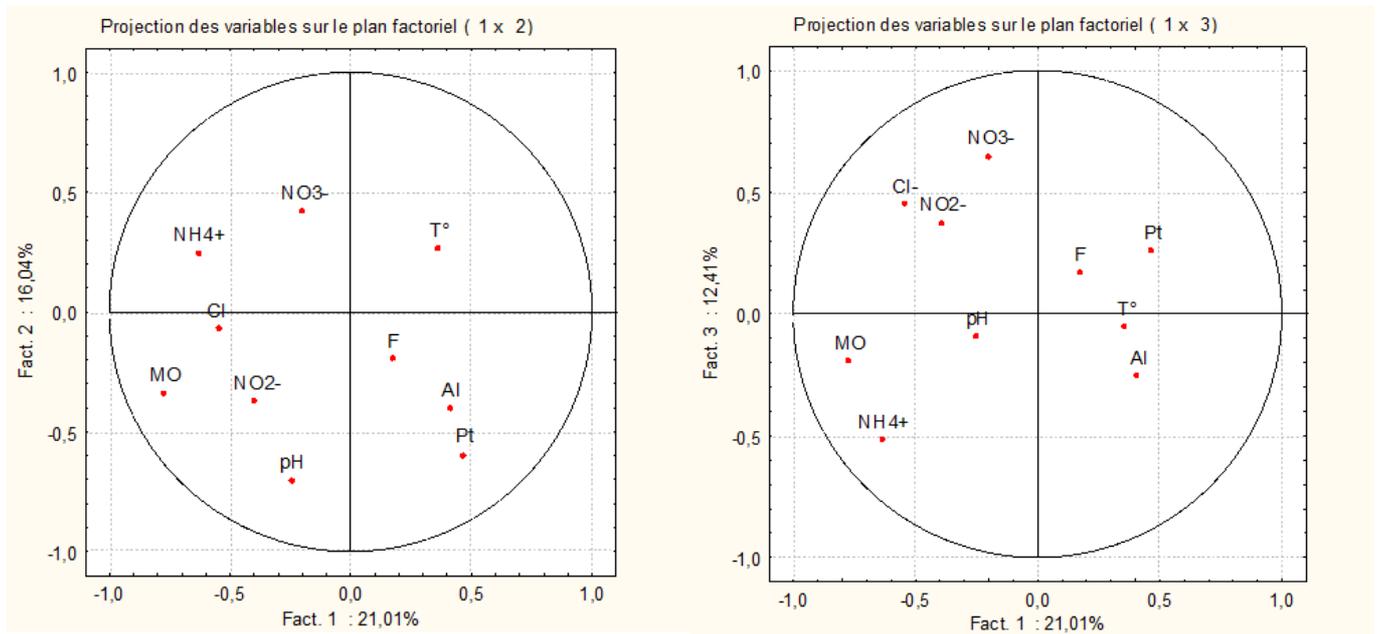
	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3	Fact. 4
pH	-0,247910	<b>-0,699948</b>	-0,090098	0,275221
T°	0,356964	0,266399	-0,048848	0,156586
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0,198575	0,421034	<b>0,650613</b>	-0,211792
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0,396182	-0,370252	0,378768	0,218551
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>-0,634919</b>	0,250778	<b>-0,512455</b>	-0,032927
Cl <sup>-</sup>	<b>-0,548844</b>	-0,071575	0,451716	-0,320347
Al	0,408217	-0,399195	-0,250676	<b>-0,569769</b>
F	0,167893	-0,194199	0,172714	<b>0,683296</b>
MO	<b>-0,775276</b>	-0,334374	-0,193262	-0,138332
Pt	0,463998	<b>-0,593599</b>	0,259513	-0,278534

### 3.4.2 ORIGINE DES IONS DANS LES EAUX SOUTERRAINES DE LA NAPPE DE BONOUA

#### 3.4.2.1 ANALYSE DES VARIABLES DANS LES PLANS FACTORIELS

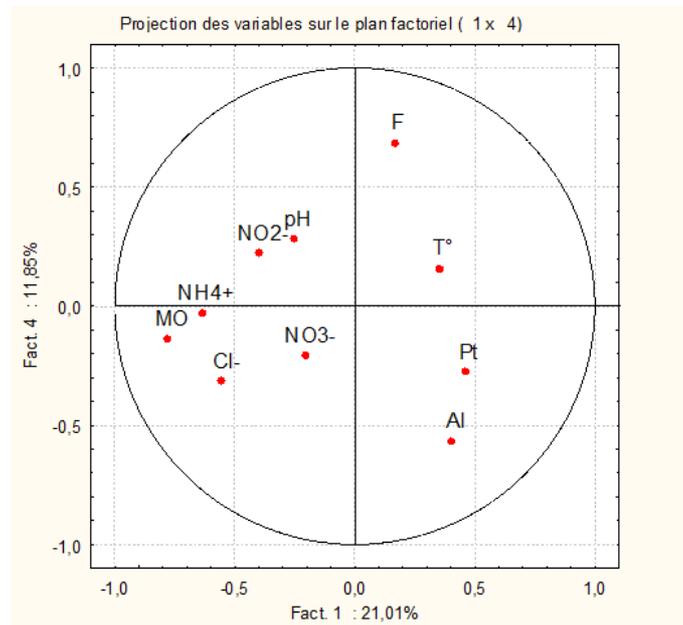
Le plan factoriel (F1-F2) représente à lui seul 37,05% des variances exprimées donc des informations recherchées. L'analyse du cercle de communauté du plan factoriel F1-F2 (figure 6a) montre que Le facteur F1, est commandé dans sa partie négative par les variables NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; MO et Cl<sup>-</sup>, la présence de ces composés azotés dans une eau souterraine rend compte des conditions du milieu et leur influence sur les eaux d'infiltration. Ils sont pour la plupart d'origine superficielle et proviennent des engrais azotés ou phosphatés, des pesticides, mais proviennent aussi de la matière organique (protéines animales et végétales, acide urique...). Cette matière azotée est produite à la surface du sol puis entraînée avec les eaux d'infiltration en profondeur. Les eaux de la nappe de Bonoua sont peu profondes (6 à 88 m) ; la présence de ces composés dans les eaux peu profondes, témoigne d'une pollution organique et microbienne. Cette pollution est issue de la dégradation complète ou incomplète de la matière organique par les microorganismes dans les couches superficielles du sol. Ces éléments sont de bons indicateurs des apports superficiels. Ainsi, le facteur F1 renseigne donc l'origine spatiale des ions.

Aussi, la profondeur totale (Pt) évolue de façon proportionnelle avec la variable  $\text{NO}_3^-$  autour de l'axe F2. Ces deux variables évoluent de façon contraire, cela signifie que la concentration du nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) augmente quand la profondeur totale du forage diminue, Ce facteur indique la minéralisation rapide et facile des eaux souterraines.



a) Espace des variables du plan factoriel F1 – F2

b) Espace des variables du plan factoriel F1 – F3



c) Espace des variables du plan factoriel F1 – F4

Figure 6. Projection dans l'espace des variables des plans factoriels a) F1-F2, b) F1-F3, c) F1-F4) des eaux souterraines de la région de Bonoua

#### 4 DISCUSSION

La campagne de mesure du niveau piézométrique effectuée sur les forages de la région de Bonoua a permis de caractériser les variations du niveau piézométrique dans les différents forages et montrer que l'écoulement des eaux de la nappe se fait dans le sens Nord –Sud et Est-Ouest.

Les eaux de la zone de Bonoua ont subi de manière significative une modification de leur composition chimique depuis 2001. Les analyses in situ réalisées sur les eaux montrent qu'elles sont acides, avec un pH qui varie de 4,2 à 6,88. L'acidité des eaux souterraines constitue un des caractères essentiels des eaux en Côte d'Ivoire et spécifiquement dans le bassin sédimentaire. En effet, selon [9] et [10], l'acidité des eaux en zone tropicale humide est principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO<sub>2</sub> dans les premières couches du sol.

Les résultats de l'analyse multivariée montrent qu'au niveau de la nappe de Bonoua, la pollution organique constitue un phénomène important dans la minéralisation des eaux. La région étant une zone forestière agricole, les apports dans la minéralisation sont marqués par l'enrichissement des eaux en sels nutritifs. La vulnérabilité de la nappe de Bonoua à la pollution résulte de l'intensification de l'agriculture, qui expose davantage les eaux souterraines.

Le phénomène est particulièrement sensible dans les localités d'Ahoutoué, Kimoukro, Montézo, Bonoua, Ono et Bongo2, où sont implantées les principales plantations agro-industrielles. La pression sur le milieu concourt à une dégradation du couvert forestier au profit des cultures. Celle-ci est estimée entre 997 ha/an et 1884 ha/an de 1986 à 2001. La conversion des espaces forestiers en zones de culture accentue les phénomènes d'érosion. Les pratiques agricoles s'accompagnent généralement d'une dégradation du sol et, par conséquent, la qualité de l'eau.

L'Analyse en Composantes Principales a permis de caractériser deux phénomènes dont un apport d'origine spatiale et une minéralisation rapide et facile des eaux. Ce résultat vient corroborer les études antérieures [11 et 12], qui ont montré que la nappe du bassin sédimentaire ivoirien est influencée par une pollution à dominante organique et chimique. Le phénomène de pollution des eaux souterraines n'est pas observé uniquement au niveau des différentes villes du sud de la Côte d'Ivoire. Elle constitue un réel danger en Afrique en général et dans toutes les grandes villes africaines en particulier. Ainsi, d'importantes teneurs en nitrates, supérieures à la norme OMS ont été mises en évidence dans les eaux souterraines du Nigéria [13].

## **5 CONCLUSION**

La présente étude a été entreprise dans l'objectif de contribuer à une meilleure connaissance qualitative des ressources en eau souterraine de la région de Bonoua. La nappe de Bonoua est libre. L'analyse temporelle des différents paramètres chimiques indicateurs de pollution tels que les NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, indique qu'il n'y a pas de concentrations alarmantes ayant atteint les eaux de la nappe bien que les teneurs aient augmentées dans le temps. Il faut noter que les forages d'Ahoutoué, Montézo et souvent Bonoua F1, ont des concentrations en nitrates et ammonium dépassant les normes de l'OMS.

L'analyse en composantes principales a permis de constater que la minéralisation des eaux souterraines de la nappe de Bonoua est liée à l'apport superficiel d'ions d'origine organique. Les différentes teneurs en ions ont permis de noter que la pollution ne s'est pas encore manifestée à grande échelle dans la région. Cependant le développement de l'agriculture avec l'utilisation d'engrais d'origine chimique pourrait la rendre très vulnérable et l'exposer à une pollution beaucoup plus importante.

## **RÉFÉRENCES**

- [1] Ake GE. 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, Université de Cocody, p.200.
- [2] Jourda JP, Kouame KJ, Adja MG, Deh SK, Anani AT, Effini AT, Biemi J. 2007. Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode DRASTIC. Actes de la Conférence Francophone. SIG 2007/ 10 au 11 Octobre 2007.
- [3] Ake GE, Dongo K, Kouadio BH, Dibi B, Saley MB, Biemi J. 2009. Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 31(1): 157-171.
- [4] Anoh KA. 2009. Évaluation de la vulnérabilité spécifique aux intrants agricoles des eaux souterraines de la région de Bonoua. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Cocody, p.68.
- [5] Effini AT. 2007. Évaluation de la qualité chimique et bactériologique de la nappe de Bonoua et contribution à la protection de la nappe. Mémoire de DEA, Université de Cocody, Cocody, p.73.

- [6] Delor C., Diaby I., Simeon Y., Yao B., Tastet J-P., Vidal M., Chiron J-C. et Dommanget A.): Notice explicative de la Carte Géologique de la Côte d'Ivoire au 1/200 000. Feuille de Grand-Bassam, *Mémoire de la Géologie de Côte d'Ivoire*, n°4, Abidjan, Côte d'Ivoire, (1992) 30 p.
- [7] Ake GE, Dongo K, Kouadio BH, Dibi B, Saley MB, Biemi J. Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, (2009) : p 157-171.
- [8] Tapsoba S. 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*, (1995): 201 p.
- [9] Martin JM, Meybeck M.. Elemental mass-balance of material carried by world major rivers. *Mar. Chemistry*,( 1979) : 173-206.
- [10] Ahoussi K. E. Distribution des composés minéraux : Nitrates, Sulfates, Ammonium et Aluminium dans les eaux de la nappe d'Abidjan. Étendue de la contamination des eaux souterraines. Mémoire du Diplôme d'Étude Approfondies (DEA) des Sciences de la Terre option Hydrogéologie, Université de Cocody, (2003). 69p.
- [11] Kouame KJ. 2007. Contribution a la gestion intégrée des ressources en eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Cote d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody- Abidjan, p. 226.
- [12] Yao KM, Métongo BS, Trokourey A, Bokra Y. Détermination de certains paramètres de pollution dans les baies d'une lagune tropicale: la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *J. Ivoir. Océanol. Limnol. Abidjan*,( 2007). p 1-10.
- [13] Adalam S. M. A Nitrates pollution of groundwater in Nigeria. Groundwater pollution in Africa, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain, (2006). pp. 37-45