

Caractéristiques hydrogéologiques de l'intervalle 177 - 79 m du forage d'Abouabou (Abidjan, Côte d'Ivoire): paramètres physico-chimiques

[Hydrogeological characteristics of the interval 177-79 m from wells Abouabou (Abidjan, Côte d'Ivoire): Physical and chemical parameters]

OGA Yéi Marie Solange¹, Koffi Kouamé Yves Alain¹, Yao N'Goran Jean-Paul², Kpan Jean Gauthier¹, Kouamé Yao³, and Jean Biémi¹

¹Département des Sciences et Technique de l'Eau et du Génie de l'Environnement,
Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

²Département des Géosciences Marines,
Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire

³Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI), Abidjan, 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: Sampling of water from the drilling Abouabou was used to measure the following physico-chemical parameters such as pH, electric conductivity, temperature, turbidity, content of silica, chlorides, aluminum, zinc, magnesium, manganese, copper, ammonium, sulfates, nitrates, nitrites, phosphates and fluorides.

Drilling Abouabou aims to increase water supply capacity of the city of Abidjan and its surroundings. Analysis of physical parameters indicates a neutral pH average of 6.8 ± 0.16 units and an average temperature of 28.83 ± 0.7 ° C. The water is highly mineralized and low in suspended solids with a conductivity average of 2990.83 ± 31.55 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ and an average turbidity 0.862 ± 0.91 NTU. The chemical analyzes, in turn, reveal a significant salinity making the water unsuitable for human consumption without pretreatment. A strong correlation is shown between the contents of chlorides and the physicochemical parameters such as temperature, pH, turbidity, content of iron and manganese. This shows that the drilling of water quality is mainly governed by the chloride contents. The geographical location of the structure near the Atlantic Ocean, deep character and a captive of the web (Continental Terminal) and the absence of solid salts (evaporites) in the formations traversed by drilling suggest two mechanisms either a seawater intrusion, a salinity heritage.

KEYWORDS: water, deep, neutral, mineralized material, suspension, consumption, salinization.

RÉSUMÉ: L'échantillonnage de l'eau du forage d'Abouabou a permis de mesurer les paramètres physico-chimiques suivants que sont le pH, la conductivité électrique, la température, la turbidité, les teneurs en silice, chlorures, aluminium, zinc, magnésium, manganèse, cuivre, ammonium, sulfates, nitrates, nitrites, phosphates et fluorures.

Le forage d'Abouabou vise à accroître la capacité d'approvisionnement en eau potable de la ville d'Abidjan et ses environs. L'analyse des paramètres physiques indique un pH neutre moyen de $6,8 \pm 0,16$ unités et une température moyenne de $28,83 \pm 0,7$ ° C. L'eau est fortement minéralisée et pauvre en matières en suspension avec une conductivité moyenne de $2990,83 \pm 31,55$ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et une turbidité moyenne de $0,862 \pm 0,91$ NTU. Les analyses chimiques, quant à elles, révèlent une salinité importante rendant l'eau inappropriée à la consommation humaine sans un traitement préalable. Une forte corrélation est signalée entre les teneurs en chlorures et les paramètres physico-chimiques que sont la température, le pH, la turbidité, les teneurs en manganèse et en fer. Ceci témoigne que la qualité de l'eau du forage est principalement gouvernée par les teneurs en chlorures. La localisation géographique de l'ouvrage à proximité de l'océan Atlantique, le caractère profond et

captif de la nappe (Continental Terminal), ainsi que l'absence de sels solides (évaporites) dans les formations traversées par le forage laissent supposer deux mécanismes : soit une intrusion marine, soit un héritage de salinité.

MOTS-CLEFS: eau, profond, neutre, minéralisée, matière, suspension, consommation, salinisation

1 INTRODUCTION

L'eau constitue une ressource naturelle indispensable dans la vie des hommes, des animaux et des végétaux. L'eau potable est vitale. Ainsi, la disposer en quantité suffisante et en qualité contribue au maintien de la santé. À l'échelle mondiale, l'utilisation des eaux souterraines pour les besoins domestiques s'est accrue à partir de 1950 à cause de la poussée démographique, du tarissement des eaux de surface et surtout de la pollution [1] (OMS, 1986). Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, environ 1,1 milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et 2,4 milliards n'ont pas accès à un système d'assainissement adéquat [2] (OMS, 2008). L'eau est devenue aujourd'hui un enjeu stratégique mondial dont la gestion doit impérativement s'intégrer dans une perspective politique de développement durable [3] (Servais et *al.*, 2009).

En Côte d'Ivoire, l'approvisionnement en eau potable des populations demeure pour cette dernière décennie une préoccupation majeure tant les besoins deviennent de plus en plus énormes et les difficultés de trouver les sources saines existent. Les grandes villes et en particulier la ville d'Abidjan n'échappent pas à ce constat. Afin de répondre à ses nombreux besoins, le gouvernement ivoirien a amélioré la qualité de ses prestations hydrauliques en mettant en place l'Office National de l'Eau Potable (ONEP). Par ailleurs, le programme d'urgence du Ministère des Infrastructures Économiques (MIE) pour le renforcement de la production d'eau potable, a initié la réalisation et l'étude de plusieurs forages sur l'ensemble du territoire ivoirien. C'est dans ce cadre que s'inscrivent ces travaux d'analyses du forage d'Abouabou (240 m de profondeur) situé au Sud de la ville d'Abidjan. Ils visent à apprécier la qualité de la nappe captée afin d'accroître la capacité d'approvisionnement en eau potable de la ville d'Abidjan et ses environs. De ce fait, ils consistent à définir les paramètres physico-chimiques que sont le pH, la conductivité électrique, la température, la turbidité, les teneurs en silice dissous, chlorures, aluminium, zinc, magnésium, manganèse, cuivre, ammonium, sulfates, nitrates, nitrites, phosphates et fluor.

2 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Abouabou est un quartier de Port-Bouët situé au Sud de la ville d'Abidjan (figure 1). Le forage qu'il abrite a atteint une profondeur totale de 240 m. Les affleurements du cordon littoral du Quaternaire de ce site constituent l'ensemble des unités morphologiques le plus affaissé du District d'Abidjan [4] (Martin et Tastet, 1972) entre la faille des lagunes (lagune Ébrié) et l'océan Atlantique. Les formations de la subsurface sont essentiellement sédimentaires sur plus de 5000 m d'épaisseur [5] (Yao, 2012). Les aquifères généralement captés dans la région d'Abidjan sont ceux du Maestrichtien, du Continental Terminal (Mio-Pliocène) et du Quaternaire [6] et [7] (Aghui et Biémi, 1984 ; Oga, 1998).

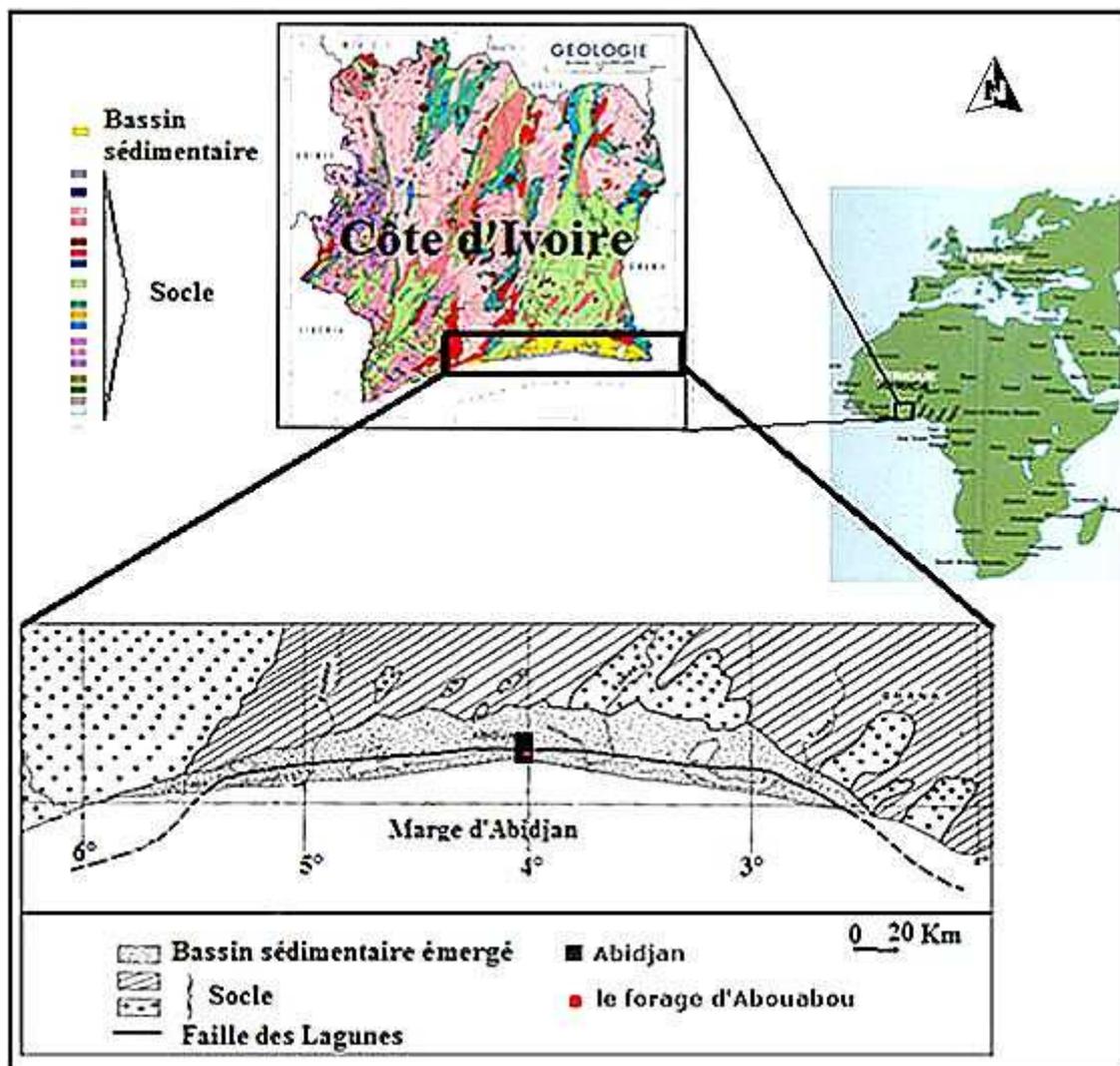


Figure 1 : Localisation du forage d'Abouabou

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les échantillons d'eau prélevés selon la norme ISO 5667-1 dans le forage d'Abouabou constituent l'essentiel du matériel d'analyse. Ces échantillons sont captés à partir de 105 m de profondeur dans des formations sableuses. Quatre prélèvements ont été effectués par jour à différentes heures du 31 mai au 2 juin 2012. Sur ces échantillons d'eau ont été dosés la silice et les ions Mn^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Fe^{2+} , Cl^- , SiO_2 , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Al^{3+} , PO_4^{2-} et F^- . Les mesures *in situ* ont concerné les paramètres physiques à savoir la température ($T^\circ C$), le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE) et la turbidité. Les méthodes d'analyse sont consignées dans le tableau I. Il s'agit de déterminer les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques relatives à la qualité de l'eau en comparant ces valeurs à celles des normes internationales. L'unité de mesure des paramètres chimiques est le $mg.L^{-1}$, à l'exception des teneurs en manganèse mesurées en $\mu g.L^{-1}$.

La salinité est déterminée indirectement (approximativement) à partir de la conductivité électrique exprimée en $\mu S.cm^{-1}$. Toutefois, le terme de salinité est souvent utilisé comme synonyme de chlorinité qui désigne la concentration en chlore sous forme de chlorures ($mg.L^{-1}$ ou $g.L^{-1}$).

L'application de l'analyse en composantes principales (ACP) sur l'ensemble des données a permis de mettre en évidence les corrélations existantes entre les paramètres physico-chimiques de l'eau du forage. Ces traitements statistiques ont été réalisés grâce au logiciel Statistica version 7.0.

Tableau I : Principe de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau du forage d'Abouabou

| Paramètres | Référence des Méthodes | Éléments du principe |
|--------------|------------------------|---|
| pH | NFT90-008 | Mesure électrométrique avec électrode de verre. pH mètre WTWpH90. |
| Conductivité | NFEN27888 | Conductimètre HACH CO 150 avec compensation de température. |
| Température | NFT90-100 | Mesure par une sonde de température couplée au pHmètre WTWOXI320 |
| Turbidité | NFENISO7027 | Comparaison de la lumière diffusée et de la lumière transmise par l'échantillon d'eau. Turbidimètre portable. |
| Nitrate | HACH | Photométrie |
| Chlorure | HACH | Photométrie |
| Ammonium | HACH | Photométrie |
| Silice | HACH | Photométrie |
| Fluor | HACH | Photométrie |
| Phosphate | HACH | Photométrie |
| Manganèse | NF EN ISO 15586 | Dosage par spectrométrie d'absorption au four graphite (VARIAN AA280Z) |
| Cuivre | FD T 90-112 | Dosage par spectromètre d'absorption atomique (Perkin Elmer Analyst 200) |
| Zinc | | |
| Fer | | |
| Nitrite | HACH | Photométrie |

4 RÉSULTATS

4.1 CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DU FORAGE

Les valeurs moyennes des mesures de la température (T° C), du potentiel d'hydrogène (pH), de la conductivité électrique (CE) et de la turbidité sont consignées dans le tableau II.

La température de l'ensemble des échantillons d'eau analysées est comprise entre 27 et 31° C avec une moyenne de $28,83 \pm 0,7$ ° C. D'une façon générale, toutes les eaux étudiées ont un pH qui varie entre 6,5 et 7,1 unités avec une moyenne de $6,8 \pm 0,16$ unités. Les eaux du forage d'Abouabou sont pratiquement neutres.

Tableau II : Paramètres physico-chimiques de l'eau du forage d'Abouabou

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart-type | Normes |
|---|---------|---------|---------|------------|--------|
| T° (°C) | 27 | 31 | 29 | 1,25 | 25 |
| CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) | 2920 | 3040 | 2981 | 51,30 | 1250 |
| pH | 6,5 | 7,1 | 6,78 | 0,17 | 9,5 |
| Turbidité (NTU) | 0,3 | 5,6 | 0,94 | 1,64 | 5 |

La conductivité électrique de l'eau du forage d'Abouabou est élevée avec des valeurs qui oscillent entre $2920 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et $3040 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La moyenne est de $2990,83 \pm 31,55 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Ces valeurs dépassent la valeur guide fixée à $400 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Elles indiquent ainsi un degré de minéralisation relativement important des eaux étudiées. D'après la classification des eaux souterraines en fonction de la salinité, les eaux du forage d'Abouabou sont saumâtres et indiquent évidemment une saveur salée. Les valeurs de turbidité de l'eau du forage d'Abouabou restent, quant à elles, faibles. Elles varient entre 0,3 et 5,6 NTU avec une moyenne de $0,94 \pm 0,891$ NTU et indiquent que ces eaux analysées contiennent moins de matières en suspension (argiles, limons, grains de silice, matières organiques, etc.).

4.2 CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DE L’EAU D’ABOUABOU

4.2.1 ANALYSE DES PARAMÈTRES CHIMIQUES

La concentration d’ions chlorures dans les échantillons d’eau du forage varie de 872 à 886 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 881,37 ± 6,81 mg.L⁻¹. Elles sont relativement élevées et dépassent la valeur guide fixée à 250 mg.L⁻¹ par l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Les teneurs en ammonium oscillent entre 2,57 et 2,84 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 2,7 ± 0,09 mg.L⁻¹ alors que la concentration limite de l’ammonium (NH₄⁺) recommandée par les normes internationales pour l’eau de boisson est de 0,5 mg.L⁻¹. La concentration en silice dans les eaux du forage varie de 67,9 à 98,4 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 80,29 ± 10,56 mg.L⁻¹. Elles sont relativement élevées et dépassent la valeur guide fixée à 20 mg.L⁻¹ par l’OMS.

La concentration en fer varie de 1,6 à 6,49 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 2,34 ± 1,49 mg.L⁻¹. Elles sont relativement élevées et dépassent la valeur guide fixée à 0,3 mg.L⁻¹ par l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Les teneurs en nitrates mesurées au niveau de l’eau du forage profond d’Abouabou restent inférieures à 0,1 mg.L⁻¹ (tableau III). L’organisation Mondiale de la Santé (OMS) fixe à 50 mg.L⁻¹, la concentration maximale de nitrates admise dans l’eau de boisson.

À l’instar des nitrates, les nitrites, l’aluminium, les sulfates, le manganèse, le cuivre, le zinc, les phosphates et le fluor présentent des teneurs en dessous des normes admissibles (tableau III).

Les résultats des concentrations en Cl⁻, Fe²⁺, NH₄⁺ et SiO₂ indiquent que l’eau de la nappe captée par le forage d’Abouabou est de mauvaise qualité pour la consommation.

Tableau III : Paramètres chimiques de l’eau du forage d’Abouabou

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Écart-type | Normes |
|-------------------------------|---------|---------|---------|------------|--------|
| Cl ⁻ | 872 | 886 | 881,37 | 6,81 | 250 |
| SiO ₂ | 67,9 | 98,4 | 80,29 | 10,56 | 20 |
| Mn ²⁺ | 266 | 378 | 290,2 | 32,45 | 400 |
| NH ₄ ⁺ | 2,57 | 2,84 | 2,7 | 0,09 | 0,5 |
| Fe ²⁺ | 1,6 | 6,49 | 2,34 | 1,49 | 0,3 |
| F ⁻ | 0,01 | 0,15 | 0,06 | 0,06 | 1,5 |
| PO ₄ ³⁻ | 0,013 | 1,09 | 0,18 | 0,32 | 2 |
| Al ³⁺ | 0,007 | 0,04 | 0,02 | 0,01 | 0,2 |
| NO ₂ ⁻ | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,00 | 3 |
| Zn ²⁺ | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,00 | 3 |
| Cu ²⁺ | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,00 | 2 |
| NO ₃ ⁻ | 0,00 | 0,1 | 0,04 | 0,05 | 50 |
| SO ₄ ²⁻ | 0,00 | 0,1 | 0,08 | 0,04 | 250 |

NB : Toutes les valeurs sont exprimées en mg.L⁻¹ à l’exception des teneurs en Mn²⁺ exprimées en µg.L⁻¹.

4.2.2 CORRELATIONS ENTRE LES DIFFERENTS PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES DE L’EAU

L’analyse en composantes principales n’a pas pu être réalisée sur les paramètres physico-chimiques présentant une variance nulle, notamment le zinc, le cuivre et les nitrites. Les facteurs 1, 2 et 3 qui renferment le maximum d’informations sont utilisés pour l’analyse. Les pourcentages de variance exprimés par ces trois facteurs sont respectivement 33,54 % ; 23,78 % et 17,37 %, soit 74,69 % des informations (tableau IV).

Tableau IV : Valeurs propres et pourcentage de variance de l’eau du forage d’Abouabou

| | Valeurs propres | % Total variance | Cumul Valeurs propres | Cumul (%) |
|----|-----------------|------------------|-----------------------|-----------|
| F1 | 3,35 | 33,54 | 3,35 | 33,54 |
| F2 | 2,38 | 23,78 | 5,73 | 57,31 |
| F3 | 1,74 | 17,38 | 7,47 | 74,69 |

La projection des variables dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 est donnée par les graphes des figures 2 et 3.

L'axe 1 est fortement corrélé du côté positif avec les chlorures (0,94), le pH (0,83), et à un moindre degré avec le manganèse (0,71), le fer (0,66) et du côté négatif avec les nitrates (-0,74) et la turbidité (-0,75) (figure 2). Les variables NO_3^- et Cl^- renseignent sur l'état de dégradation de l'eau. Cet axe exprime donc la dégradation de la qualité de l'eau. Ceci fournit un moyen plus simple et plus rapide pour le suivi de la qualité de l'eau. L'axe 2 est fortement corrélé du côté négatif avec la conductivité électrique (-0,87) et corrélé du côté positif avec les sulfates (0,78). Une forte corrélation est signalée d'une part entre les teneurs en chlorures et les paramètres physico-chimiques que sont les teneurs en manganèse (-0,82) et fer (-0,79) et à un moindre degré avec le la température (0,64), le pH (0,68) et la turbidité (-0,66) et les teneurs en nitrates (-0,61) (tableau V). Par ailleurs, la minéralisation de l'eau du forage est principalement gouvernée par les teneurs en chlorures. La mesure de la teneur en chlorures pourrait donc suffire pour prédire la qualité de l'eau du forage d'Abouabou.

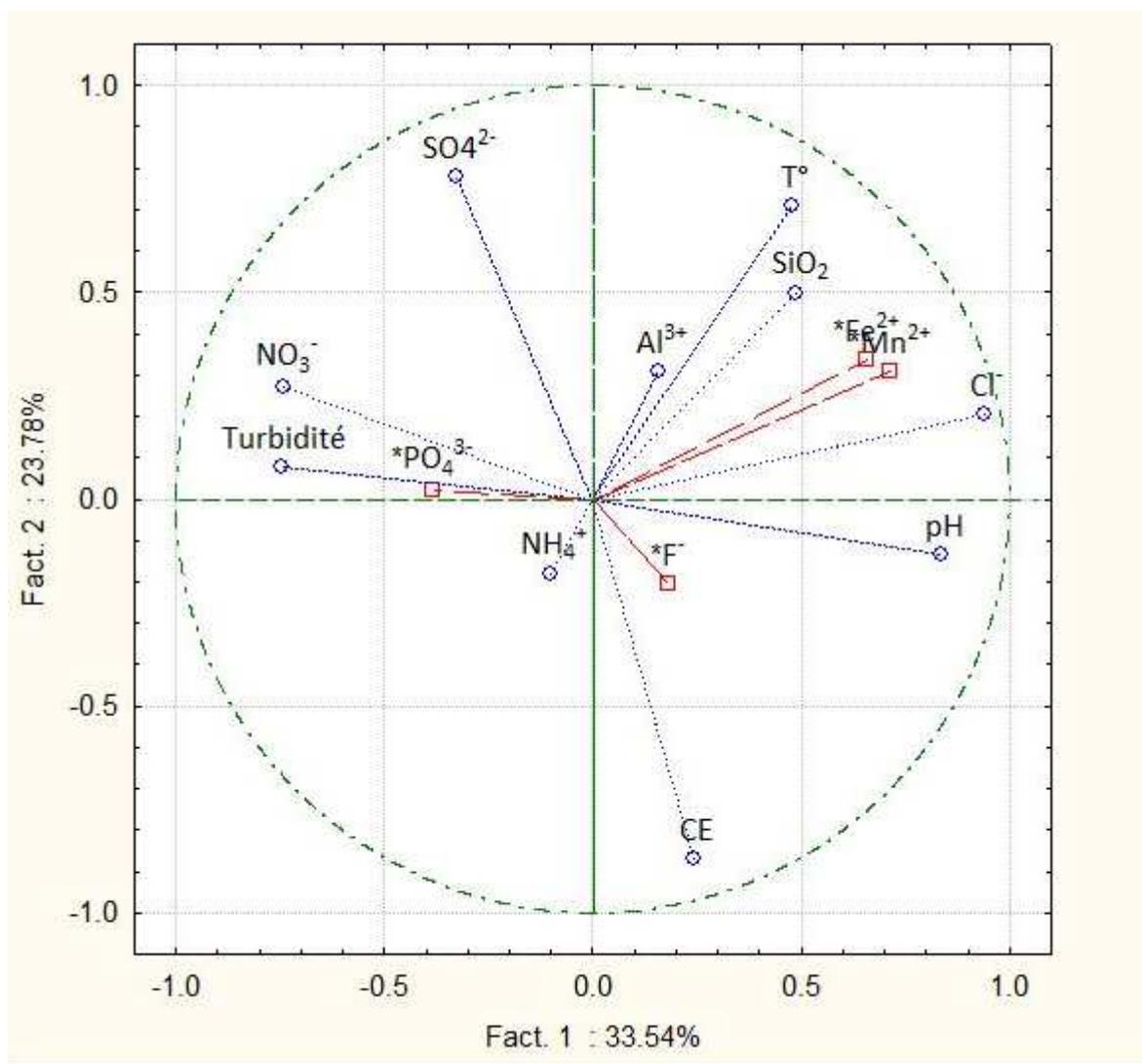


Figure 2 : Projection des variables sur le plan factoriel 1 x 2 (eau du forage d'Abouabou)

Tableau V : Matrice de corrélation entre les paramètres physico-chimiques de l’eau du forage

| | T° | CE | pH | Turb* | Cl ⁻ | SiO ₂ | NH ₄ ⁺ | Al ³⁺ | NO ₃ ⁻ | SO ₄ ²⁻ | Mn ²⁺ | Fe ²⁺ | F ⁻ | PO ₄ ³⁻ |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|------------------|------------------------------|------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|------------------|----------------|-------------------------------|
| T° | 1,00 | | | | | | | | | | | | | |
| CE | -0,49 | 1,00 | | | | | | | | | | | | |
| pH | 0,15 | 0,30 | 1,00 | | | | | | | | | | | |
| Turb* | -0,29 | -0,22 | -0,56 | 1,00 | | | | | | | | | | |
| Cl ⁻ | 0,64 | 0,01 | 0,68 | -0,66 | 1,00 | | | | | | | | | |
| SiO ₂ | 0,26 | -0,19 | 0,46 | -0,34 | 0,51 | 1,00 | | | | | | | | |
| NH ₄ ⁺ | -0,10 | -0,02 | 0,03 | -0,17 | -0,30 | -0,48 | 1,00 | | | | | | | |
| Al ³⁺ | 0,27 | -0,37 | 0,24 | 0,27 | 0,11 | 0,04 | 0,35 | 1,00 | | | | | | |
| NO ₃ ⁻ | -0,34 | -0,44 | -0,51 | 0,43 | -0,61 | 0,04 | -0,19 | -0,35 | 1,00 | | | | | |
| SO ₄ ²⁻ | 0,42 | -0,60 | -0,36 | 0,15 | -0,25 | 0,26 | 0,09 | 0,05 | 0,41 | 1,00 | | | | |
| Mn ²⁺ | -0,64 | 0,15 | -0,53 | 0,14 | -0,82 | -0,38 | 0,40 | -0,44 | 0,58 | 0,21 | 1,00 | | | |
| Fe ²⁺ | -0,60 | 0,15 | -0,49 | 0,07 | -0,79 | -0,44 | 0,53 | -0,37 | 0,48 | 0,19 | 0,98 | 1,00 | | |
| F ⁻ | 0,15 | -0,32 | -0,17 | -0,04 | -0,29 | -0,32 | 0,87 | 0,43 | -0,13 | 0,45 | 0,29 | 0,41 | 1,00 | |
| PO ₄ ³⁻ | -0,02 | 0,25 | 0,66 | -0,10 | 0,17 | 0,38 | 0,18 | 0,35 | -0,35 | 0,10 | -0,22 | -0,22 | 0,17 | 1,00 |

Turb : Turbidité

L’axe 3 est fortement corrélé du côté négatif avec l’ammonium (-0,80), l’aluminium (-0,76) et corrélé du côté positif avec le fluor (0,78) (figure 3). La présence de ces trois composés dans l'eau a deux origines possibles : la nature géochimique des sols et une source artificielle liée aux activités anthropiques. L'aluminium est présent de manière naturelle dans le sol, mais peut aussi provenir d'un rejet des usines métallurgiques. L’azote ammoniacal est relativement fréquent dans les eaux et traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique. Bien qu’utilisé comme indice d'une contamination fécale (eaux usées), il peut aussi être apporté par certains engrais utilisés en agriculture. À l’instar des deux premiers composés, le fluor est aussi lié aux activités anthropiques. En effet, le fluor et ses dérivés sont largement utilisés dans diverses activités industrielles (aluminium) et sont libérés lors de la fabrication et l'utilisation des engrais phosphatés. L’axe 3 exprime la vulnérabilité de l’eau liée aux activités humaines dans la zone.

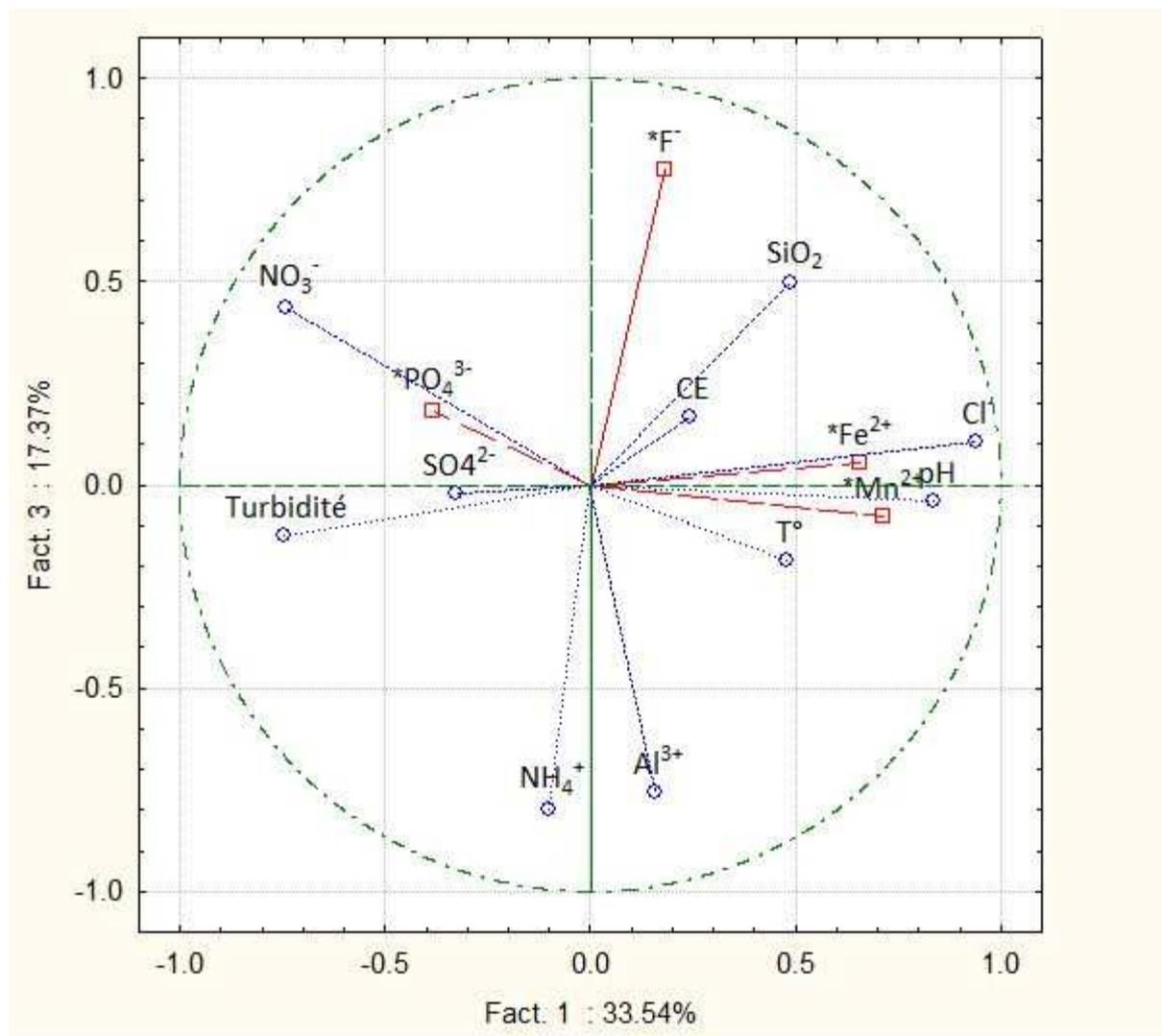


Figure 3 : Projection des variables sur le plan factoriel 1 x 3 (eau du forage d'Abouabou).

5 DISCUSSION

La forte minéralisation de l'eau du forage d'Abouabou caractérisée par des valeurs élevées des teneurs en chlorures, en ammonium, en silice et de la conductivité électrique (CE) est un facteur limitant qui la rend impropre à la consommation humaine. L'ammonium peut engendrer divers inconvénients comme les troubles intestinaux. A l'instar des grandes villes africaines, la teneur élevée en composés azotés dans les eaux du forage d'Abouabou est fortement liée à un défaut d'assainissement collectif et individuel de la ville d'Abidjan et de ses environs [8] à [13] (Chippaux *et al.*, 2002 ; Soro, 2003 ; Coulibaly *et al.*, 2004 ; Fofana, 2005 ; Traoré, 2005 ; Yapo *et al.*, 2010). Selon [9] Soro (2003), le risque de pollution des eaux de la nappe par les ions NO_3^- , NH_4^+ et Al^{3+} , liés aux activités anthropiques, est accentué par la forte concentration de population dans les quartiers. La présence d'azote ammoniacal est le signe de la contamination des eaux par des apports exogènes. Elle peut traduire aussi l'absence d'un processus de dégradation complète de la matière organique [14] (Rodier *et al.*, 1996). En accord avec [8] Chippaux *et al.* (2002), les facteurs de pollution liée à l'ammonium découlent bien des problèmes majeurs liés au défaut d'assainissement des quartiers dans la commune de Port-Bouët et tiennent essentiellement au manque de salubrité [15] (Osemwegie *et al.*, 2013). Ils sont liés à l'absence de dispositif d'assainissement approprié à la protection des eaux souterraines et au défaut de collecte des ordures ménagères. En matière d'assainissement individuel, les équipements dans la zone d'étude correspondent dans la majorité des cas à des latrines et puisards très mal entretenus. La gestion des ordures ménagères est rudimentaire, avec des dépotoirs sauvages constitués sur les voies ravinées par le ruissellement des pluies (Soro, 2003 ; Soro *et al.*, 2010).

La forte concentration en chlorures dans les eaux des nappes (Quaternaire et Continental Terminal) au Sud de la lagune Ébrié est la cause de l’abandon de tous les ouvrages de la Société de Distribution d’Eau de Côte d’Ivoire (SODECI) dans cette zone sud de la ville d’Abidjan [16] [6] (Loroux, 1978 ; Aghui et Biémi, 1984). Pour l’approvisionnement en eau potable (AEP) du District d’Abidjan et de ses environs, la SODECI exploite la nappe du CT au Nord de la lagune Ébrié. Les valeurs de pH et de la salinité (CE et Cl⁻) des eaux du forage profond d’Abouabou sont largement supérieures à celles des ouvrages de captage de la SODECI [17] [7] [18] (Jourda, 1987 ; Oga, 1998 ; Adiaffi, 2008).

Selon [18] Adiaffi (2008), les eaux de la nappe du CT captées au nord de la faille des lagunes et utilisées pour l’AEP, présentent des valeurs du pH particulièrement faibles, variant entre 4,1 et 5,9 avec une moyenne et une médiane de 4,7. Des valeurs plus faibles (3,5 unités pH) ont été obtenues sur des eaux du CT dans la partie ouest de l’aquifère [7] (Oga, 1998). La CE, quant à elle, varie de 3,8 à 190,9 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ avec une moyenne et une médiane respectivement de 42,6 et de 38,0 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. On observe par ailleurs, un gradient N-S marqué par une baisse de valeurs du pH et de la CE clairement défini de la nappe du socle à la nappe du CT. Cette baisse serait justifiée par le fait que l’eau du socle subit une forte dilution par des eaux moins minéralisées et plus acides du CT [18] (Adiaffi, 2008).

D’après les travaux d’Ahoussi *et al.* (2013) [19], les zones au Nord de la faille sont exposées à une pollution azotée en rapport avec la croissance démographique et l’urbanisation galopante de la ville d’Abidjan. Les fortes teneurs en nitrates, en nitrites et en ammonium rendent les eaux de forages inaptes pour la boisson humaine pour Plateau, Adjamé et Yopougon Zone Ouest. Mais, les secteurs d’Anonkoua Kouté, Niangon Nord et Nord Riviera sont, quant à eux, affectés par une pollution métallique et phosphatée [20] Soro *et al.* (2010). Selon [7] Oga (1998), les teneurs élevées en nitrates observées dans les quartiers du Plateau et d’Adjamé sont liées au degré d’urbanisation. Les isotopes stables du carbone (¹³C) et de l’azote (¹⁵N) indiquent que la pollution nitratée à Abidjan et ses environs est liée aux fosses septiques et aux eaux usées [21] (Oga *et al.* 2007).

La variabilité spatiale des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines observées de part et d’autre de la faille des lagunes laisse supposer deux mécanismes : soit, une intrusion marine, soit un héritage de salinité. En effet, le caractère neutre et salé de l’eau du forage d’Abouabou suppose une influence de l’océan Atlantique et/ou de la lagune Ébrié à proximité de l’ouvrage. Cependant, d’après les travaux de [22] Adjiri *et al.* (2008), l’eutrophisation accélérée du plan d’eau lagunaire de la ville d’Abidjan résulte des fortes concentrations en éléments azotés et phosphatés (respectivement NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻ et PO₄³⁻) contenus dans les lixiviats issus des différentes décharges du District d’Abidjan (respectivement 564 mg.L⁻¹, 16 mg.L⁻¹, 612 mg.L⁻¹ et 190 mg.L⁻¹) et des baies (108,3 mg.L⁻¹, 31 mg.L⁻¹, 55,7 mg.L⁻¹ et 23,4 mg.L⁻¹). Ainsi, les faibles teneurs en nitrates, nitrites et phosphates observées dans l’eau du forage d’Abouabou suggèrent qu’elle n’a pas encore été contaminée par la lagune eutrophisée à proximité. L’intrusion marine semble donc être le mécanisme à l’origine de la salinisation de l’eau du forage.

Les mécanismes à l’origine de la salinité d’un système hydrologique sont divers et complexes. Les principaux vecteurs impliqués dans la salinisation des masses d’eau souterraine sont l’intrusion marine, le mélange avec les saumures anciennes, la dissolution de formations évaporitiques, mais aussi diverses sources anthropiques [23] à [29] (Andreasen et Fleck, 1997 ; Younsi, 2001 ; Frissant *et al.*, 2005 ; Kouzana *et al.*, 2007 ; Vittecoq *et al.*, 2007 ; Kloppmann *et al.*, 2010 et 2011).

Le niveau d’intérêt hydrogéologique franc (situé entre 79 m et 105 m) du forage d’Abouabou correspond à la nappe captive du Continental Terminal, couvert dans cette zone par 16 mètres d’épaisseur d’argile [30] (Koffi, 2015). Ce caractère profond et captif de la nappe à Abouabou et l’absence d’évaporites [31] (Digbehi *et al.*, 2011) dans notre zone d’étude laisse supposer que la salinité de l’eau du forage soit liée au contexte géographique de l’ouvrage, précisément à la proximité de l’océan Atlantique.

Les intrusions salines représentent un risque majeur de pollution pour les aquifères littoraux qui sont des réservoirs stratégiques. Selon [29] Kloppmann *et al.* (2011), la salinisation des masses d’eau souterraine est l’une des principales causes de dégradation de la qualité de l’eau dans le monde. Elle constitue un réel danger en Afrique en général et surtout dans les grandes villes côtières de l’Afrique du Nord où les fortes teneurs en chlorures sont le plus souvent observées dans les eaux des ouvrages côtiers [26] Kouzana *et al.* (2007). Ainsi, d’importantes teneurs en chlorures supérieures à la directive OMS ont été mises en évidence dans les eaux souterraines observées au Maroc avec des concentrations s’échelonnant entre un minimum de 216,5 mg.L⁻¹ et un maximum de 1405,8 mg.L⁻¹, avec une moyenne de l’ordre de 610,49 mg.L⁻¹ [32] Haddani (2010).

Les travaux de [26] Kouzana *et al.* (2007) dans la nappe côtière du Plio-Quaternaire de la région de Korba (Tunisie) ont mis en évidence une évolution spatio-temporelle de la piézométrie et de la qualité chimique des eaux. D’après ces auteurs, l’eau souterraine très sollicitée par les agriculteurs a probablement engendré une inversion du gradient hydraulique et par

conséquent l'avancée du biseau salé. Toutefois, les principaux vecteurs à l'origine de l'intrusion saline dans les grandes villes côtières de l'Afrique du Nord ne reflètent pas nécessairement la salinisation de l'eau du forage d'Abouabou. Les travaux réalisés au niveau de la zone demandent à être approfondi pour pouvoir clarifier les questions relatives à l'intrusion marine. Le risque lié à l'intrusion marine s'accroît en raison de l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des périodes de sécheresse et de canicules, mais aussi en réponse à l'augmentation importante de la population vivant en zones côtières. Il deviendra encore plus important lors de la remontée du niveau de la mer corrélative du changement climatique.

6 CONCLUSION

Au terme de cette étude, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau du forage d'Abouabou ont été déterminées dans la commune de Port-Bouët. Parmi les dix-sept paramètres mesurés, la conductivité électrique, les concentrations en chlorures, en ammonium et en silice dissous sont au-dessus des normes relatives à la qualité de l'eau de boisson. Le caractère salé de l'eau est caractéristique de la prédominance des chlorures parmi les espèces anioniques. La salinité serait d'origine naturelle notamment l'intrusion marine et donc liée à la localisation géographique de l'ouvrage, c'est-à-dire la proximité de l'océan Atlantique. Les travaux relatifs à la salinisation des eaux souterraines dans la zone demandent à être approfondi pour pouvoir clarifier des questions de l'intrusion marine au niveau de la ville d'Abidjan. L'intrusion marine constitue un risque sanitaire pour les populations abidjanaises qui sont tributaires de l'eau du Continental Terminal pour leur besoin. Pour ne pas l'accroître, il faut limiter les actions humaines qui pourraient renforcer le mécanisme de salinisation, notamment le pompage intensif des eaux des forages les plus proches de l'océan. Dans ce cas, une modification du champ de flux pourrait être provoquée par l'exploitation intensive de la nappe.

REMERCIEMENTS

L'étude a bénéficié du soutien matériel et financier de la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) pour les travaux de terrain et les analyses en laboratoire. Nous disons notre reconnaissance aux responsables de la SODECI. Nous tenons également à remercier les structures Foraco et ONEP pour leur collaboration et le Docteur Soro Tanina Drissa pour les corrections apportées à l'article.

REFERENCES

- [1] OMS (1986). Directives de qualité pour eau de boisson. Vol. 2 : Critères d'hygiène et documentation à l'appui. Genève : OMS, 1986, 121 p.
- [2] OMS (2008). Rapport sur la santé dans le monde. Les soins de santé primaires-maintenant plus que jamais. Genève : OMS, 2008, 149 p.
- [3] SERVAIS P., BILLEN G., GARCIA-ARMISEN T., GEORGE I., GONCALVEZ A., THIBERT S. (2009). La contamination microbienne dans le bassin de la Seine. Edition. *Agence de l'Eau Seine Normandie*, ISBN: 978-2-918251-07-1, 50 p.
- [4] MARTIN L. et TASTET P. (1972). Le quaternaire du littoral et du plateau continental de côte d'ivoire rôle des mouvements tectoniques et eustatiques, *Ball. ASEQUA*. Dakar. n° 33-34, pp. 17-32.
- [5] N'GORAN Y. (2012). Caractérisation sédimentologique, minéralogique, géochimique et biostratigraphique des falaises vives de Fresco : Région de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny*, 202 p.
- [6] AGHUI N et BIEMI J. (1984) : Géologie et hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contamination. *Ann. Univ. Nat. de Côte d'Ivoire, série C (sciences)*, tome 20, pp 313-347.
- [7] OGA M-S (1998). Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approches hydrochimique et isotopique. *Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud (Paris XI)*, 241 p.
- [8] CHIPPAUX J., HOUSSIER S., GROSS P., BOUVIER C., BRISSAUD F. (2002). Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bulletin de la Société de Pathologie Exotique* (Bull. Soc. Pathol. Exot.), 95(2), pp. 119-123.
- [9] SORO N. (2003). Gestion des eaux pour les villes africaines, évaluation rapide des ressources en eau souterraine /occupation des sols. *Projet UN-HABITAT. Ministère des eaux et forêt direction des ressources en eau (RCI). 30 Avril 2003 (rapport final)*, 45 p.
- [10] COULIBALY L., DIOMANDÉ D., COULIBALY A., GOURÈNE G. (2004). Utilisation des ressources en eaux, assainissement et risques sanitaires dans les quartiers précaires de la commune de Port-Bouët (Abidjan; Côte d'Ivoire). *Vertigo – La Revue en Sciences de l'Environnement*, 5(3), pp. 3299 – 3310.
- [11] FOFANA F. (2005). Évaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution de la nappe d'Abidjan selon les méthodes Drastic et God. *Mém. DEA, Univ. Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire*, 72 p.

- [12] TRAORÉ A. (2005). Pollution des eaux souterraines de la région d’Abidjan par les composés azotes. Bilan des connaissances origine et évolution de ces composés. Mémoire DEA Univ. Abobo-Adjamé, Côte d’Ivoire, 77 p.
- [13] YAPO O., MAMBO V., SEKA A., OHOU M. J. A., KONAN F., GOUZILÉ V., ... et HOUENOU P. (2010). Évaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d’Abidjan (Côte d’Ivoire): Koumassi, Marcory, Port-Bouet et Treichville. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 4(2) : (2010), ISSN 1991-8631, pp. 289-307.
- [14] RODIER J., BAZIN C., BROUTIN J. P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H., RODI L. (1996). L’analyse de l’eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Ed. Dunod, Paris, 1383 p.
- [15] OSEMWEGIE I., OGA Y. M. S., AHOUSSE K E, KOFFI Y B, KOUASSI A. M., BIÉMI J. (2013): Influence of Anthropogenic Activities of Groundwater from Hand Dug Wells within the Precarious Settlements of Southern Abidjan, Côte d’Ivoire: Case of the Slums of Anoumabo (Marcory) and Adjouffou (Port-Bouët). *Journal of Water Resource and Protection*, April 2013, 5, pp. 427-439. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2013.54042>. (<http://www.scirp.org/journal/jwarp>)
- [16] LOROUX B. F. (1978). Contribution à l’étude hydrogéologique du bassin sédimentaire côtier de Côte d’Ivoire. Thèse de 3ème cycle, Univ. Bordeaux I, n°1429. Talence 1978, 93 p.
- [17] JOURDA J. P. (1987). Contribution à l’étude Géologique et Hydrogéologique du Grand Abidjan (Côte d’Ivoire). *Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Scientifique, Technique et Médicale de Grenoble*, 319 p.
- [18] ADIAFFI B. (2008) : Apport de la géochimie isotopique, de l’hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact “socle-bassin sédimentaire” du Sud-est de la Côte d’Ivoire. *Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud, Orsay, France*, 217 p.
- [19] AHOUSSE K., LOKO S., KOFFI Y. B., SORO G., OGA M. S., SORO N. (2013) : Évolution spatio-temporelle des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la ville d’Abidjan (Côte d’Ivoire). *Int. J. Pure App. Biosci.* 1 (3): (2013), ISSN : 2320 – 7051, pp. 45-60.
- [20] SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO K. E., AHOUSSE K. E., SORO G., OGA Y. M-S., SAVANE I., BIEMI J. (2010). Déchets municipaux dans le District d’Abidjan en Côte d’Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (6), pp. 2203-2219.
- [21] OGA Y.M.S., SACCHI E., ZUPPI G.M. (2007). Origin and effects of nitrogen pollution in groundwater traced by $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ and $\delta^{18}\text{O-NO}_3$: the case of Abidjan (IVORY COAST). *Advances in isotope hydrology and its role in sustainable water resources management (HIS-2007) proceedings of a symposium Vienna, 21 - 25 may 2007, Vol. 1*, pp. 139-147. http://wwwpub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1310_web.pdf
- [22] ADJIRI O. A., GONÉ D. L., KOUAMÉ I. K., KAMAGATÉ B., BIÉMI J. (2008). Caractérisation de la pollution chimique et microbiologique de l’environnement de la décharge d’Akouédo, Abidjan, Côte d’Ivoire. *In. J.Biol. Chem. Sci.*, 2(4), pp. 401-410.
- [23] ANDREASEN D. C. et FLECK W. B. (1997). Use of bromide: chloride ratios to differentiate potential sources of chloride in a shallow, unconfined aquifer affected by brackish-water intrusion. *Hydrogeology Journal*, 5(2), pp. 17-26.
- [24] YOUNSI A. (2001). Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). *Thèse de Doctorat, Univ. Chouaib Doukkali-El Jadida*, 117 p.
- [25] FRISSANT N., RENE-CORAIL C., COLL B. J., et DE LA TORRE Y. (2005). Le phénomène d’intrusion saline à la réunion : état des connaissances et synthèse des données disponibles. BRGM/RP-54330-FR, 64 p.
- [26] KOUZANA L., MAMMOU A. B. et GAALLOUL N. (2007). Intrusion marine et salinisation des eaux d’une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie), *Géo-Eco-Trop*, 31, pp. 57-70.
- [27] VITTECOQ B., MATHIEU F., LACHASSAGNE P., BRUGERON A. (2007). Localisation du biseau salé sur la nappe du Lamentin : apport de la méthode géophysique par panneau électrique. Rapport final, BRGM/RP-55554-FR, 79 p.
- [28] KLOPPMANN W., BOURHANE A., SCHOMBURGK S. (2010). Salinisation des masses d’eau en France métropolitaine et dans l’Outre-mer. Rapport BRGM/RP-59496-FR, 144 p.
- [29] KLOPPMANN W., BOURHANE A., ASFIRANE F. (2011). Méthodologie de diagnostic de l’origine de la salinité des masses d’eau. Emploi des outils géochimiques isotopiques et géophysiques. BRGM/RP-60026-FR, 41 p.
- [30] KOFFI K. Y. (2015). Caractérisation hydrogéologique du forage profond d’Abouabou (Bassin sédimentaire, district d’Abidjan en Côte d’Ivoire). Mém. Master 2, Univ. FHB, Côte d’Ivoire, 63 p.
- [31] BRUNO D. Z., ELYSÉE G. K., JEAN-PAUL Y. N. G., KOUADIO A., BI T., KIZITO K. K., ... et IGNACE T. (2011). Palynostratigraphy and depositional palaeoenvironment of Cretaceous-Palaeogene (K-Pg) boundary deposits on Abidjan margin (Côte d’Ivoire). *Journal of Geography and Regional Planning*,4(11), pp. 644-655.
- [32] HADDANI H. (2010). Mise en évidence de l’intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia. Mém. Licence, Univ. Cadi Ayyad, Maroc, 44 p.