



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Evaluation qualitative et typologie des eaux de forage de la sous-préfecture de Boguédia (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire)

Affoué Bénédicte KOFFI^{1*}, Atta Koffi Sebastien DATTE², Armel Kouadio KOBLAN¹,
Amino Marie-Andrée KOUAME¹, Gabriel Etienne AKE¹,
Aminata BEDOU-BAKAYOKO³, Kan Jean KOUAME^{1,4},
Kouakou Luc Philippe KOUADIO^{2,3} et Jean Patrice Roger JOURDA^{1,4}

¹ Université Felix Houphouët-Boigny, 22 BP. 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

² Laboratoire de Santé Publique, UFR de Sciences Pharmaceutiques et Biologiques, BPV 34 Abidjan, Côte d'Ivoire.

³ Institut National d'Hygiène Publique, BPV. 14 Abidjan, Côte d'Ivoire.

⁴ Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection, 22 BP 801 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant ; E-mail : benedictka@gmail.com, Tel : +2250709240698.

Received: 01-03-2023

Accepted: 17-10-2023

Published: 31-10-2023

RESUME

L'eau destinée à la consommation humaine doit respecter un certain nombre de critères et directives recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Dans les pays en développement, obtenir de l'eau saine pour la consommation humaine est devenu un sérieux problème du fait d'un manque de protection de l'environnement. L'objectif de cette étude était de déterminer la qualité hydrochimique et la typologie des eaux de forages consommées par la population de la Sous-préfecture de Boguédia. Les paramètres physico-chimiques des eaux ont été comparés aux normes préconisées par l'OMS pour les eaux de consommation. La typologie de ces eaux a été déterminée à l'aide du diagramme de piper. Les résultats montrent que les eaux sont acides (pH moyen de 6,25), légèrement chaudes, (température moyen de 27,16°C), faiblement minéralisées (CE = 123 µS/cm). Certains paramètres (K^+ , NO_2^- , HCO_3^- , Fe^{2+} , PO_4^{3-} , F^-) des eaux de quelques forages présentent des teneurs supérieures aux normes OMS. Le diagramme de Piper a montré que toutes les eaux sont regroupées en quatre hydrofaciès: les eaux Bicarbonatées calciques et magnésiennes, les eaux bicarbonatées calciques, les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes. Au regard de cette étude, il ressort que les eaux de certains forages, notamment celles des localités de Boguédia, Bekora et Kibouo nécessitent un traitement préalable afin d'être aptes à la consommation.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Qualité, eaux de consommation, forages, Boguédia, Côte d'Ivoire.

Qualitative evaluation and typology of borehole water in the Boguédia sub-prefecture (Central-Western Côte d'Ivoire)

ABSTRACT

Drinking water must comply with several criteria and guidelines recommended by the World Health Organization (WHO). In developing countries, access to safe drinking water is becoming challenging due to a lack of environmental protection. The aim of this study was to determine the hydrochemical quality and typology of borehole water consumed by the population of the Boguédia sub-prefecture. The water's physico-chemical parameters were compared with the WHO's standards for drinking water. The typology of these waters was determined using the Piper diagram. The results show that the water is acidic (average pH 6.25), slightly warm (average temperature 27.16°C), with low mineral content (EC = 123 µS/cm). Some parameters (K⁺, NO₂⁻, HCO₃⁻, Fe²⁺, PO₄⁻, F) in some samples exceeded WHO standards for drinking water. The Piper diagram shows that all the waters are grouped into four hydrofacies: calcium-magnesium bicarbonate waters, calcium-bicarbonate waters, sodium-potassium bicarbonate waters and calcium-magnesium chloride-sulfate waters. The study revealed that water from certain boreholes, notably those in Boguédia, Bekora and Kibouo, requires prior treatment before it is fit for consumption.

© 2023 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: Boguedia, borehole, Côte d'Ivoire, drinking water, Water quality.

INTRODUCTION

Dans les pays en développement, obtenir de l'eau saine pour la consommation humaine est devenu un sérieux problème du fait d'un manque de protection de l'environnement (Ayraud, 2005). En Côte d'Ivoire, des efforts importants ont été réalisés ces dernières années pour l'approvisionnement en eau potable. Ainsi, 81% de la population a accès à l'eau potable avec 92% en zone urbaine et 69% en zone rurale (Kpan, 2017). Cependant, la croissance rapide de la population depuis plusieurs décennies pose divers problèmes à la fois d'ordre qualitatif et quantitatif de ces ressources. Les eaux souterraines, pour être aptes à la consommation, doivent respecter un certain nombre de critères et directives recommandées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) afin d'assurer la santé et le bien être des personnes (OMS, 2017). Pour se faire, l'eau doit donc subir diverses analyses physico-chimiques et bactériologiques qui définiront sa qualité pour la consommation humaine, afin d'éviter les risques de maladies hydriques pour les consommateurs (Gbohaida et al., 2016). Certains éléments chimiques de par leur présence, absence, en excès ou en déficit peuvent influencer la qualité chimique de ces

eaux voire la santé des populations. C'est le cas du fluor dont la présence dans les eaux de consommation favorise la fluorose dentaire. Cette fluorose dentaire est la conséquence d'un excès d'ions fluorures dans l'eau. En effet, les fluorures font parties des substances chimiques pour lesquelles l'on a mis en évidence des effets sur la santé humaine de grande ampleur à la suite d'une exposition à travers les eaux de consommation (Muralidharan et al., 2004). Ces fluorures peuvent être d'origine naturelle ou artificielle et en lien avec certains paramètres caractéristiques des eaux.

Depuis ces dernières décennies, les études réalisées sur les ressources en eau de la Côte d'Ivoire ont signalé de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux de surface que des eaux souterraines. Ainsi, Les travaux de Ohou et al. (2014) et Ahoussi (2008) ont révélé des concentrations en nitrates supérieures à 50 mg/L (valeur guides de l'OMS pour les eaux de consommation) dans les eaux des régions respectives de Buyo et d'Agboville. Selon les travaux de Ligban et al. (2009) réalisés dans le degré carré de Daloa, les ions chlorures et les nitrates sont abondants dans les eaux de puits et de sources à des concentrations dépassant les valeurs de l'OMS pour les eaux de consommation. La Sous-

Préfecture de Boguédia située sur le socle ivoirien, précisément dans le degré carré de Daloa, n'est pas en marge de ces problèmes liés à la qualité de l'eau. En effet, Entre 2014 et 2016, les résultats d'analyses d'eau du réseau d'adduction publique réalisé par l'Institut National d'Hygiène Publique ont révélé dans la Sous-Préfecture de Boguédia des concentrations en fluorures supérieures à 1,5 mg/L.

Il y a donc un intérêt particulier à l'étude de la qualité des ressources en eau de consommation. Cette étude visait donc à évaluer la qualité chimique et la typologie des eaux de consommation de la sous-préfecture de Boguédia

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

La Sous-Préfecture de Boguédia est située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire dans la région du Haut-Sassandra, dans le degré carré de Daloa précisément dans le département d'Issia, entre les latitudes 6° et 7° Nord et les longitudes 6° et 7° Ouest (Figure 1). Elle est limitée au Nord par Daloa, au Sud par Issia, à l'Ouest par Gboguhé et à l'Est par les Sous-Préfectures de Gadouan et Saïoua. Elle couvre une superficie de 219 km².

Le climat de la zone de Boguédia est de type tropical humide de transition. Il est caractérisé par une saison sèche allant d'octobre à mars et une saison des pluies ayant deux maxima, l'un en juin et l'autre en septembre. La zone connaît une baisse pluviométrique de l'ordre de 40%. (Ligban et al., 2009). Dans cette région on distingue plusieurs formations bien distinctes. Ces formations appartiennent tous au socle précambrien et se regroupent en deux grandes entités géologiques que sont les roches magmatiques (les granites, les migmatites) et les roches métamorphiques (les schistes) (Figure 2). Ces formations géologiques sont recouvertes par des sols ferrallitiques fortement et moyennement dénaturés remaniés modaux avec recouvrement issus de schistes et de granites (Ahimon, 1990). L'approvisionnement en eau potable des populations dans le degré carré de Daloa est

principalement assuré par les eaux souterraines.

Matériel et campagne d'échantillonnage d'eau

Dans l'optique d'évaluer l'influence du climat sur la qualité des eaux souterraines, les échantillons d'eau ont été prélevés pendant la saison sèche, et également pendant la saison pluvieuse. Vingt-deux (22) forages ont été échantillonnés (Figure 3). Lors de cette campagne, les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'acide chlorhydrique puis à l'eau distillée. La Figure 4 montre le prélèvement dans un forage à gros débit suivi de mesure des paramètres *in situ*.

Dix-huit paramètres ont été déterminés *in situ* et au laboratoire selon les techniques de Rodier (2009). Ainsi, les mesures *in situ* concernent les paramètres que sont le potentiel d'hydrogène (pH); la conductivité électrique (CE) et la température (T) la turbidité (Tub). Ils ont été respectivement déterminés à l'aide d'un pH-mètre (HACH HQ11d), d'un conductimètre (HACH HQ14c) et d'un turbidimètre (HACH 2100Qis). Au laboratoire de l'Institut National d'Hygiène Publique (INHP) de Daloa, quatorze (14) autres paramètres ont été dosés. Il s'agit des ions Potassium (K⁺), Calcium (Ca²⁺), Magnésium (Mg²⁺), Nitrates (NO₃⁻), Nitrites (NO₂⁻), Ammonium (NH₄⁺), hydrogénocarbonate (HCO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻), Phosphate (PO₄²⁻), Chlorure (Cl⁻), et Fluorures (F⁻) et Fer ferreux (Fe²⁺) ainsi que le Titre Alcalimétrique Complet (TAC) et la Dureté Totale (THT). Ces analyses ont été réalisées en utilisant les méthodes colorimétriques à l'aide d'un photomètre.

Méthodes

Evaluation de la qualité des eaux

Avant de traiter les résultats des analyses effectuées au laboratoire, la fiabilité desdits résultats est testée en calculant la balance ionique (Yao, 2009). Le calcul se base sur l'équation suivante :

$$\text{NICB} = 100 \cdot \frac{[\sum \text{Cations} - \sum \text{anions}]}{[\sum \text{cations} + \sum \text{anions}]} \quad (1)$$

où
 NICB (Normalized Inorganic Charge Balance)
 : balance ionique exprimée en pourcentage,
 \sum Cations : La somme des cations (unités en meq/L),
 \sum Anions : La somme des anions (unités en meq/L).

La balance ionique de tout échantillon d'eau doit nécessairement être comprise entre les valeurs de -5% et +5%.

La qualité des eaux de Boguédia a été établie en comparant les valeurs des éléments physico-chimiques à celles préconisées par l'OMS (2017) (Tableau 1 et 2). Un échantillon d'eau est considéré comme impropre à la consommation humaine lorsqu'un paramètre a une teneur supérieure à celle de l'OMS.

Détermination de la typologie des eaux par le diagramme de Piper

Le diagramme de Piper a été utilisé pour la classification hydrochimique des eaux par facies. Ce diagramme est fréquemment utilisé dans le domaine de l'hydrochimie, avec de très bons résultats, par Oga et al. (2009).

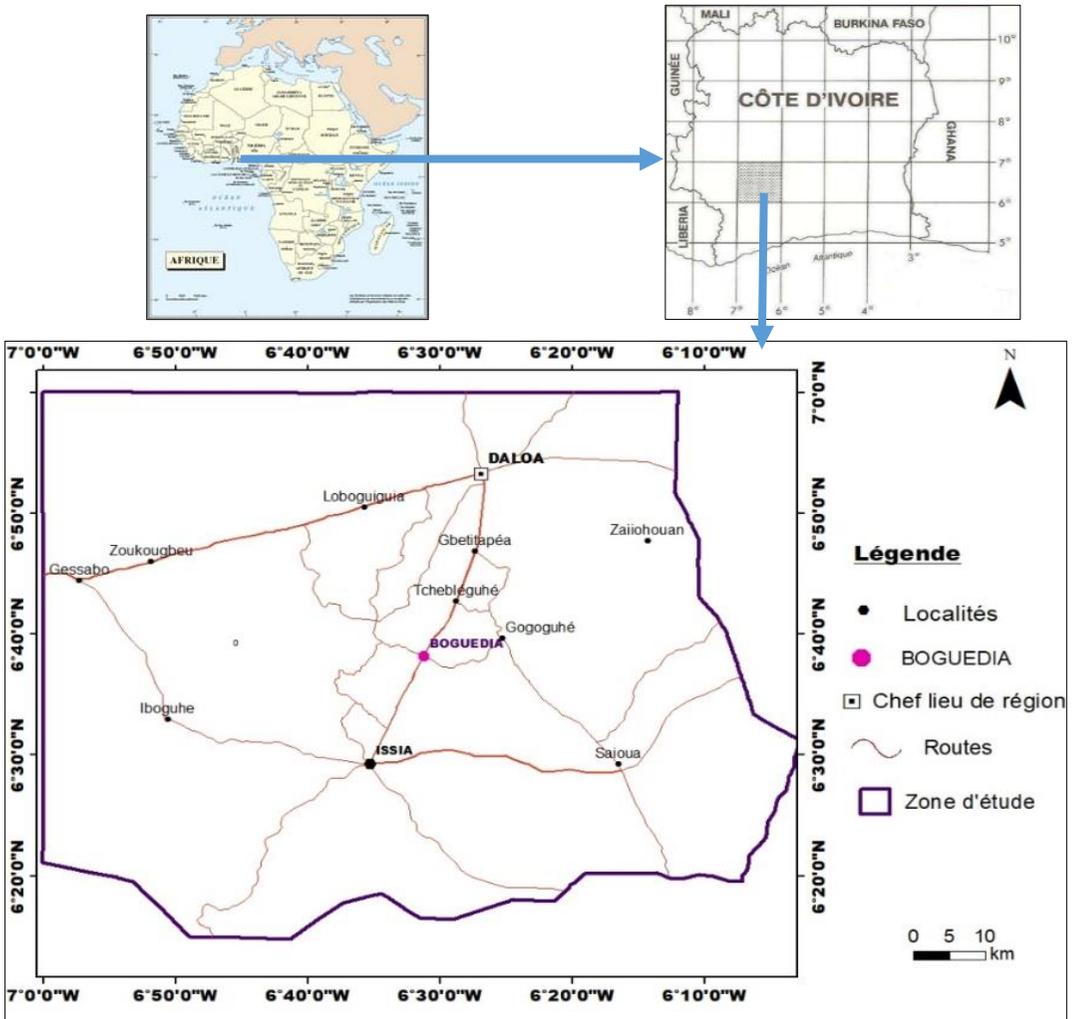


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.

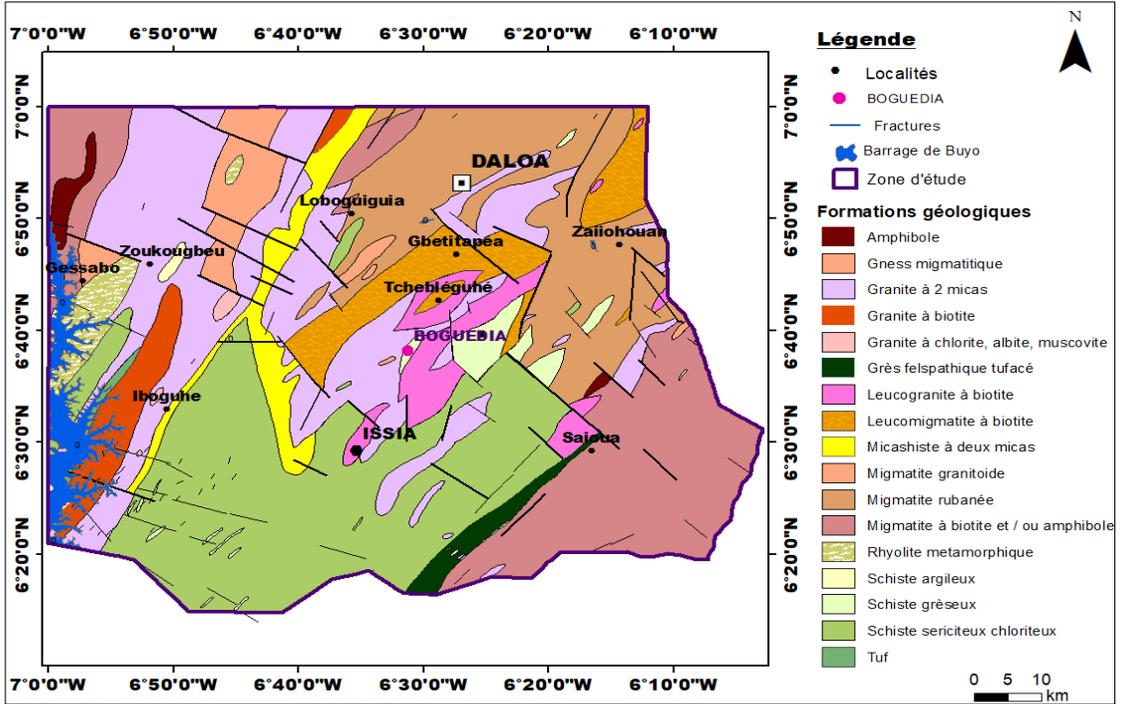


Figure 2 : Carte géologique de la zone d'étude.

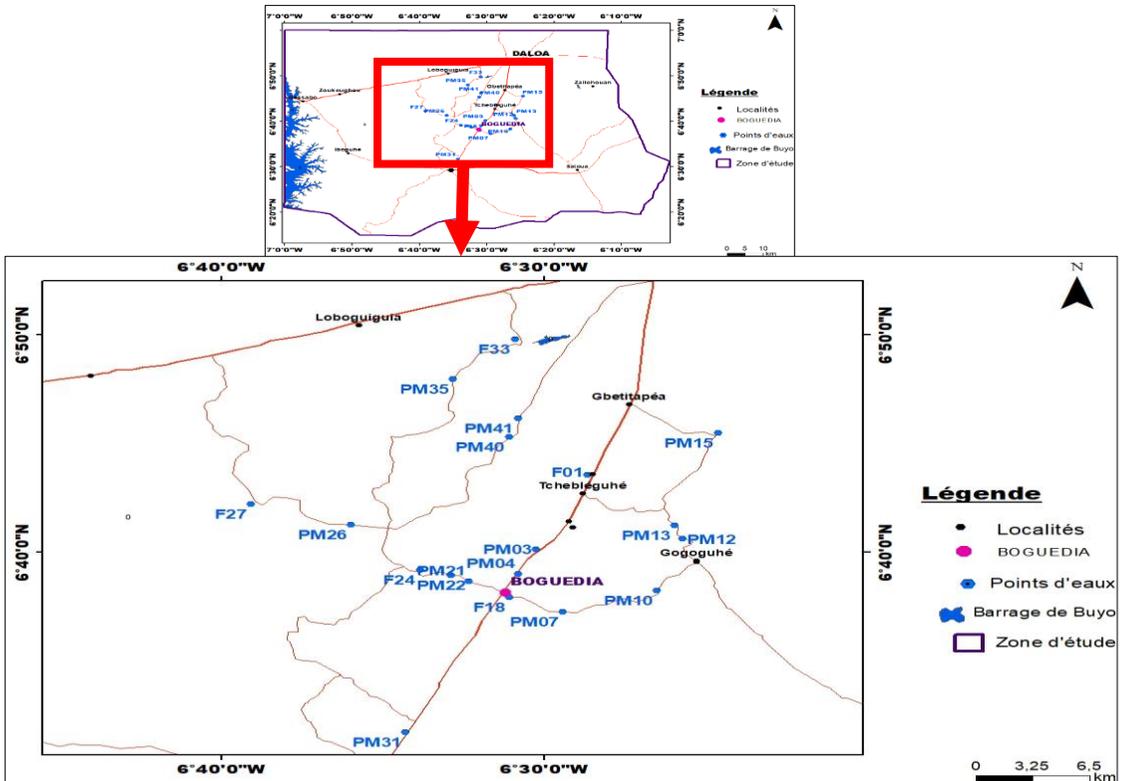


Figure 3 : Carte des points d'échantillonnages d'eau.



Figure 4 : Mesure des paramètres in situ.

Tableau 1 : Résumé des valeurs extrêmes et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux de forages de Boguédiá.

Paramètres	Eau de saison sèche			Eaux de saison pluvieuse			Directives OMS (2017)
	Min	Max	Moy	Min	Max	Moy	
pH	5	7,04	6,25	5,28	7,36	6,29	6,5 – 9,5
T°C	21,4	32	27,16	26,20	28,70	27,37	22 - 25
CE (µS/cm)	45,6	255	110,75	46,8	254	111,02	1000 -1400
Turb (NTU)	0,17	18,7	2,05	0,43	12,2	2,52	5
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,38	28	5,8	0,1	37,7	12	50
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,01	0,2	0,03	0	0,27	0,05	0,1
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,01	0,90	0,17	0,02	4,4	1,04	0,5
Ca ²⁺ (mg/L)	0,4	42	12,10	10	122	34,18	100
Mg ²⁺ (mg/L)	1	40	9,77	2	29	7,82	50
THT (°F)	5	120	27,05	5	170	27,73	500
TAC (mg/L)	20	360	112,27	15	510	99,32	500
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	25	440	136,36	20	620	117,50	65 - 160
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0,38	1,1	0,74	0,41	1,15	0,87	0,2
F ⁻ (mg/L)	0,47	3,20	0,89	0,09	0,63	0,26	0,5 – 1,5
Fe ²⁺ (mg/L)	0,01	1,15	0,10	0,042	0,05	0,26	0,3
K ⁺ (mg/L)	1,3	20	4,87	0	16,4	4,67	12
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	3	28	7,41	0	23	1,82	250

RESULTATS

Analyse de la balance ionique

Les résultats de la balance ionique de cette étude montrent que les résultats d'analyses sont fiables. En effet, ils sont compris entre -0,81% et 0,45%.

Analyse des paramètres physico-chimiques des eaux.

Le Tableau 2 résume les valeurs extrêmes et moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux de Boguédia.

Paramètres in situ (T°C, pH, CE, Tub)

La température des eaux varie entre 21,4°C et 32°C, avec une valeur moyenne de 27,16 °C pendant la saison sèche et entre 26,2°C et 28,7°C avec une valeur moyenne de 27,37°C pendant la saison pluvieuse. Dans l'ensemble, la température des eaux est constante durant les deux saisons. Les valeurs du pH des eaux de forages varient entre 5 à 7,04 avec une moyenne de 6,25 unités pH pendant la saison sèche et entre 5,28 et 7,36 unités pH avec une valeur moyenne de 6,29 unités pH pendant la saison pluvieuse. 80% en saison sèche contre 84% en saison pluvieuse des eaux échantillonnées ont un pH inférieur à la norme OMS 2011 compris entre 6,5 et 9,5 unités pH. La conductivité électrique des eaux échantillonnées renseigne sur le degré de minéralisation de ces eaux. Ces valeurs oscillent entre 45,6 µS/cm et 255 µS/cm avec une moyenne de 110,75 µS/cm pendant la saison sèche et entre 46,8 µS/cm et 254µS/cm avec une moyenne de 111,02 µS/cm en saison pluvieuse. Toutes les eaux échantillonnées présentent des valeurs de conductivité inférieures à 1000 µS/cm qui sont la valeur norme minimale des eaux de consommation selon l'OMS 2017 alors les eaux de Boguédia sont faiblement minéralisées. La turbidité varie de 0,17 NTU à 18,7 NTU avec une moyenne de 2,05 NTU en saison sèche et de 0,43 NTU à 12,2 NTU en saison pluvieuse avec une moyenne de 2,52 NTU. Les eaux de la sous-préfecture de Boguédia sont moins troubles cependant, celle de Biga présente une valeur élevée en Turbidité de 18,2 NTU en saison sèche et 12,2 NTU en saison pluvieuse.

Composés azotés (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+)

Les concentrations en NO_3^- dans les eaux de forages varient de 0,38 mg/L à 28 mg/L, avec une moyenne de 5,8 mg/L en saison sèche et de 0,1 mg/L à 37,7 mg/L avec une moyenne de 12 mg/L en saison pluvieuse. En saison sèche comme en saison pluvieuse, les eaux de forages des localités MIMIA1 (16 mg/L ; 10,9 mg/L), Gbalaboua (21,5 mg/L ; 37,7 mg/L) enregistrent des fortes valeurs. Les eaux échantillonnées dans le forage de PM22 de Gueffra présentent des valeurs élevées de 28 mg/L uniquement en saison sèche cependant en saison pluvieuse, plusieurs localités (PM9 de Bezibouho : 26,8 mg/L, F27 de yokorea 29 mg/L et F33 de Kibouo ; 24,2 mg/L). Ces concentrations varient de 0,01 à 0,2 mg/L, avec une moyenne de 0,3 mg/L en saison sèche et de 0 à 0,27 mg/L avec une moyenne de 0,05 mg/L en saison pluvieuse. Les concentrations en nitrates dans les eaux étudiées sont conformes à la norme guide recommandée pour les eaux de consommation.

Les eaux de forage de Boguédia sont faibles dans l'ensemble en Nitrite (NO_2^-). Deux forages (PM4 de Mimia: 0,2 mg/L) et (F33 de Kibouo : 0,27 mg/L) présentent de teneurs élevées en Nitrites

Supérieures à la valeur guide de l'OMS 2017

Les concentrations en NH_4^+ dans les eaux de forages varient de 0,01 à 0,9 mg/L avec une moyenne de 0,17 mg/L en saison sèche et de 0,02 à 4,4 mg/L avec une moyenne de 1,04 mg/L en saison pluvieuse. (27,30% des eaux de forage en saison des pluies contre 9% en saison sèche présentent des concentrations en NH_4^+ supérieures à la valeur guide l'OMS 2017).

Concentration en Cations (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+})

Les concentrations en (K^+) varient de 1,3 mg/L à 20 mg/L avec une moyenne de 4,87 mg/L en saison sèche et de 0 mg/L à 16,4 mg/L avec une moyenne de 4,67mg/L en saison pluvieuse. Le potassium (K^+) est alors le cation le plus abondant dans les eaux de forages de la sous-préfecture de Boguédia. Les valeurs élevées en potassiums précisément à Gueffra en saison sèche et à Bekora et Bissaguhé en saison pluvieuse. Les concentrations en Magnésium (Mg^{2+}) dans les eaux de forages

s'inscrivent dans la gamme de 1mg/L à 40 mg/L avec une moyenne de 9,77 mg/L en saison sèche et de 2 mg/L à 29 mg/L avec une moyenne de 7,82 mg/L en saison pluvieuse. La concentration en Magnésium dans les eaux de Boguédia est conforme à la consommation humaine.

Quant aux Calcium, les teneurs oscillent entre 0,4 mg/L et 42 mg/L avec une moyenne de 12,10 mg/L en saison sèche et entre 10 mg/L et 122 mg/L avec une moyenne de 34,18 mg/L en saison pluvieuse. Les eaux de Boguédia présentent des concentrations en Calcium conformes à la valeur guide de l'OMS pour les eaux de consommation. Cependant celle de Bissaguhé présentent une valeur supérieure de 122 mg/L en saison des pluies.

Concentration en Anions (HCO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et F^-)

Les Bicarbonates (hydrogénocarbonates) dans les eaux de forages oscillent entre 25 mg/L et 440 mg/L avec une moyenne de 136,36mg/L en saison sèche et de 20 mg/L à 620 mg/L avec une moyenne de 117,5mg/L. On note des concentrations élevées en HCO_3^- dans les eaux des localités de Biga, Bezibouo, Boguédia et Brakaguhé avec des valeurs respectives de 440 mg/L, 420 mg/L, 285 mg/L, 370 mg/L et 440 mg/L en saison sèche et les localités de Massa, Bissaguhé, Liguéguhé, Yokoréa et Brouhan, avec des valeurs respectives de 210 mg/L, 460 mg/L, 175 mg/L, 180 mg/L et 620 mg/L en saison pluvieuse supérieures à la valeur guide de l'OMS (2017) (160 mg/L).

Les valeurs de PO_4^{3-} en saison sèche dans les eaux de forages varient de 0,38 mg/L à 1,1 mg/L avec une moyenne de 0,74 mg/L en saison sèche et de 0,41 mg/L à 1,15 mg/L avec une moyenne de 0,87mg/L en saison pluvieuse

Les valeurs de SO_4^{2-} en saison sèche dans les eaux de forages varient de 3 mg/L à 28 mg/L avec une moyenne de 7,41 mg/L en saison sèche et de 0 mg/L à 23 mg/L avec une moyenne de 1,82 mg/L en saison pluvieuse.

Les PO_4^{3-} et les SO_4^{2-} présentent de faibles concentrations dans les eaux de la Sous-Préfecture de Boguédia donc conformes à la valeur guide de l'OMS 2017 pour les eaux de consommation.

Les concentrations en Fluorures des eaux varient de 0,47 mg/L à 3,2 mg/L avec une moyenne de 0,89 mg/L en saison sèche et de 0,09 mg/L à 0,63 mg/L avec une moyenne de 0,26 mg/L. Ces valeurs sont inférieures à la norme fixée par l'OMS (2017) qui est de 1,5 mg/L, excepté le forage de Boguédia dont les eaux enregistrent une concentration de 3,2 mg/L, largement supérieure à la valeur guide de l'OMS préconisée pour les eaux de consommation. Aussi, Le niveau optimal de fluorure dans l'eau potable pour prévenir les caries dentaires est de 0,7 mg/L et 54,5% (soit 12/22) uniquement en saison sèche sont au-dessus de ce niveau optimal.

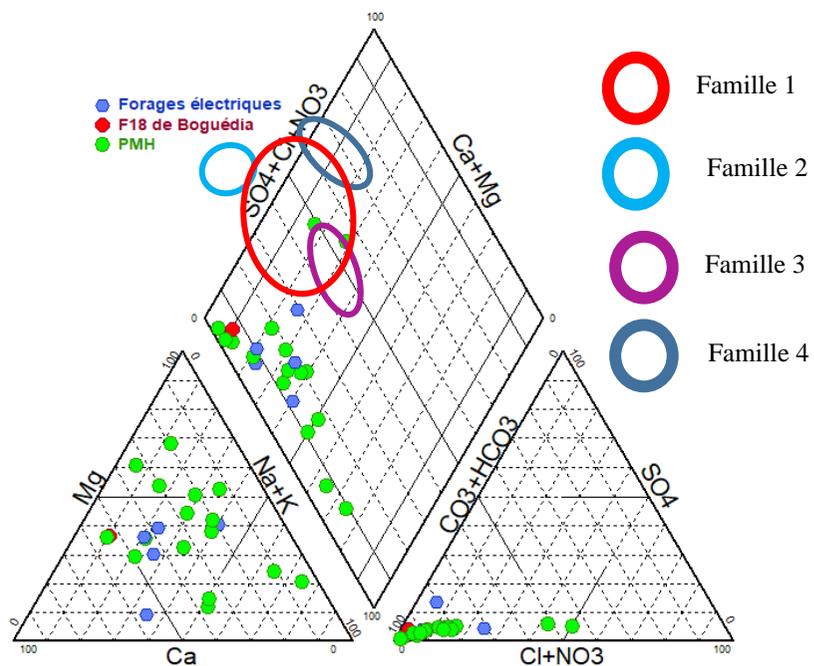
Autres Eléments chimiques (THT, TAC et Fe^{2+})

Les valeurs de la dureté ou le titre hydrotimétrique total (THT) oscillent entre 5 et 120 mg/L avec une moyenne de 27,05 mg/L en saison sèche et de 5 mg/L à 170 mg/L avec une moyenne de 27,73 mg/L en saison pluvieuse. La dureté des eaux de la Sous-Préfecture est faible dans l'ensemble et les valeurs sont toutes inférieures à la valeur guide de l'OMS 2011 (500 mg/L) Les eaux étudiées sont douces. Les valeurs de TAC varient de 20 mg/L à 360 mg/L avec une moyenne de 112,27 mg/L en saison sèche et de 15 mg/L à 510 mg/L avec une moyenne est de 99,32 mg/L en saison pluvieuse. Les valeurs de TAC sont conformes à la valeur guide de l'OMS pour les eaux de consommation excepté le forage de Brouhan qui a enregistré une valeur supérieure de 510 mg/L. Les concentrations du fer dans les eaux de forages, oscillent entre 0,01 mg/L et 1,15 mg/L avec une moyenne de 0,1 mg/L en saison sèche et entre 0,42 mg/L et 1,05mg/L avec une moyenne de 0,26 mg/L en saison pluvieuse. Les valeurs moyennes sont donc conformes à la valeur guide de l'OMS (0,3 mg/L), cependant les eaux de certains forages ont des concentrations au-delà de la valeur guide, il s'agit des forages des localités de Biga et Yokoréa soit 9% des eaux en saison sèche, et les localités de : Bla, Mimia 1, Bekora, Geffra, Bissaguhé et Brouhan en saison pluvieuse soit 27,30% des eaux.

Typologie des eaux par le diagramme de Piper

La représentation des résultats d'analyses chimiques dans le diagramme de Piper (Figure 5) montre que les eaux de Boguédia sont regroupées en quatre grandes familles que sont : les eaux Bicarbonatées calciques et magnésiennes, les eaux bicarbonatées calciques, les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes. Les eaux Bicarbonatées calciques et magnésiennes sont les plus abondantes et regroupent (12/22) des points d'eau soit 54,5%. C'est le faciès le plus représenté et majoritairement observé dans

tous les forages à gros débit, ensuite, viennent les eaux bicarbonatées calciques dont le forage F18 de Boguédia représentent 18,2%. Elles sont plus observées dans les PMH, puis suivent les eaux bicarbonatées sodiques et potassiques uniquement observées dans les PMH soit 18,2% et enfin les eaux chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes représentées par deux PMH (2/22) soit 9,1%. Les eaux de la zone d'étude présentent donc une hétérogénéité en espèces chimiques et se présentent en deux principaux hydrofaciès : les eaux bicarbonatées (83%) et les eaux chlorurées (17%). Les bicarbonates constituent donc les ions majeurs des eaux de la sous – préfecture de Boguédia



- Famille 1 : Eaux bicarbonatées calcique et –magnésiennes
- Famille 2 : Eaux bicarbonatées calciques
- Famille 3 : Eaux bicarbonatées sodique et potassiques
- Famille 3 Eaux Chlorurées sulfaté calcique et magnésiennes:

Figure 5 : Classification des eaux de forage de la Sous-Préfecture de Boguédia dans le diagramme de Piper.

DISCUSSION

La température moyenne des eaux de Boguédia (27,16°C) en saison sèche et 27,37°C en saison pluvieuse montre que les eaux consommées par la population de Boguédia sont chaudes. Ces résultats sont en conformité avec des travaux réalisés dans le socle par Soro (2010) dans la région des Lacs (27,21°C), Soro (2014) dans la zone de Tortya (28,8°C) et Bengaly (2018) dans la zone de Daloa et Zoukougbeu (27,9°C). Ainsi, la température moyenne des eaux de consommation en zone tropicale humide est de 30°C (Rodier, 2009). Selon Biémi (1992), il est difficile en Afrique de l'Ouest d'observer cette valeur guide en raison des conditions climatiques. L'acidité (pH moyen de 6,29) et la faible minéralisation (CE moyen de 110 µS/cm) des eaux de de Boguédia montrent des caractéristiques similaires aux eaux de la Mé étudiées par Ahoussi (2008). Dans la zone d'étude, la majorité des eaux présentent des concentrations en composés azotés (NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+) avec les valeurs respectives (5,8 mg/L, 0,03 mg/L, 0,17 mg/L) en saison sèche et (12 mg/L, 0,05 mg/L, 1,04 mg/L) conformes aux normes OMS. Cependant certains points d'eaux présentent des concentrations élevées en Nitrite (NO_2^-) et Ammonium (NH_4^+) spécifiquement en saison pluvieuse. Les ammoniums des eaux proviendraient probablement des rejets organiques d'origine agricole et la réduction des formes azotées (nitrates et nitrites) en conditions réductrices. Selon (Soro, 2014), la principale source demeure le sol où il est produit par les microorganismes. Par ailleurs, ces éléments chimiques seraient dus à l'entretien (hygiène et assainissement) autour des points d'eaux. C'est le cas des forages Gbalaboua et Biga tous les deux situés à proximité des toilettes. En ce qui concerne les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ ils ont tous des teneurs inférieures à la norme admise par l'OMS pour les eaux de consommation humaine. Cependant les valeurs élevées en potassiums précisément à Gueffra en saison sèche et à Bekora et Bissaguhé en saison pluvieuse seraient liées aux activités anthropiques. Les forages de Bekora et de Bissaguhé sont respectivement situés dans la

cour de l'hôpital et d'une zone de cultures dont le périmètre rapproché du forage est occupé par une culture de gombo et maïs tous les deux traités à l'aide d'herbicides. Bien que les calciums (Ca^{2+}) soient les plus dominants, les teneurs observées restent inférieures à la valeur limite proposée par l'OMS. Selon Assié (2008), ces cations seraient libérés dans l'eau par les minéraux tels que le chlorite et les feldspaths (albite en particulier) qui composent les roches de la zone d'étude. Les faibles teneurs en potassium observées ont déjà été révélées par (Kamenan, 2021) dans la région de Daloa. Sawadogo (1984) a montré que ces faibles teneurs sont dues au fait que le potassium peut non seulement être absorbé par les plantes mais aussi intervenir dans la composition des minéraux néoformés comme indiqué par Soro (2002). Pour les anions majeurs, les bicarbonates constituent l'essentiel des anions majeurs des eaux de la Sous-Préfecture de Boguédia. Sa prédominance, dans les eaux de la région est une caractéristique des eaux souterraines des régions de socle de l'Afrique de l'Ouest en général et de la Côte d'Ivoire en particulier (Soro, 2002 ; Oga et al., 2009). Selon Liban et al. (2009) dans la région de Daloa, ces ions bicarbonates proviendraient principalement de l'hydrolyse acide des roches tel que l'anorthite qui produit de la kaolinite et libère du calcium et des ions bicarbonates. Les faibles teneurs en sulfates et en chlorures dans les eaux souterraines de la région de Boguédia constituent une particularité des eaux souterraines de la Côte d'Ivoire (Soro, 2002 et Ahoussi, 2008). Dans cette étude, le point d'eau (PMH7 de Biga) qui enregistre ces fortes valeurs en chlorures, a également des valeurs relativement élevées en bicarbonates et sulfates. Le SO_4^{2-} provient principalement du pluviolésivage des sols. A l'instar de certaines régions de la Côte d'Ivoire, les bicarbonates constituent les anions dominants des eaux étudiées. Ces fortes teneurs proviendraient des formations géologiques. En effet, la région étant une zone d'intense activité agricole, et de forêt ombrophile disposant encore d'un important couvert végétal, c'est au cours de l'infiltration en profondeur des eaux de pluie que l'eau

chargée de CO₂ va dissoudre les formations géologiques et s'enrichir en hydrogénocarbonates (Ahoussi, 2008 ; Yao, 2018 ; Kamenan, 2021). Dans la région de Daloa précisément à Boguédia, les majorités des eaux prélevées, ont des teneurs en fluorures conformes à la consommation humaine. Seul le forage F18 de Boguédia en saison sèche enregistre des teneurs respectives de 3,2 mg/L, dépassant la norme OMS fixée à 1,5 mg/L. La teneur élevée de fluorures dans le forage F18 serait due à la minéralisation des formations géologiques (roches magmatiques) traversées par les forages. Selon les travaux de Dibal et al. (2017) réalisés dans les migmatites et -gneiss granitiques au centre Nord du Nigeria, la présence des fluorures dans ces eaux est liée à la nature du matériau de l'aquifère. Ainsi, la concentration de fluorure dans les eaux souterraines dépend des caractéristiques géologiques, physiques et chimiques de l'aquifère, de la porosité, de la profondeur des ouvrages, du temps de séjour et de la structure géologique (Edmunds et Smedley, 2012). Il en est de même pour ces auteurs (Chidambaram et al., 2003 ; Chae et al., 2007) qui ont aussi montré que les fluorures dans les eaux souterraines proviennent principalement de la décomposition et la dissolution de minéraux contenant du fluorure (les micas) des roches magmatiques.

D'après le diagramme de Piper, les eaux de la Sous-Préfecture de Boguédia se présentent en quatre grandes familles que sont: Les eaux Bicarbonatées calciques et magnésiennes, les eaux bicarbonatées calciques, les eaux bicarbonatées (hydrogénocarbonatées) sodiques et potassiques et les eaux chlorurées sulfatées calciques et magnésiennes. Dans la zone d'étude, les eaux de forages sont donc caractérisées par une prédominance des ions bicarbonates sur les ions chlorures. En effet, les ions bicarbonates découlent essentiellement de l'hydrolyse acide des roches qui est le phénomène majeur de l'altération des minéraux en milieu de socle. Ces phénomènes ont été prouvés par Oga et al. (2009) à Tiassalé. Ce qui n'est pas le cas dans les travaux (Yao et Ahoussi, 2021) qui ont révélé une

prédominance de facies chloruré calcique dans les zones minières de la région de Divo. Il en est de même pour les travaux de Ligban et al. (2009) dans le degré carré de Daloa qui ont montré une prédominance de facies chlorurés dans les eaux de sources et puits. Cette différenciation chimique est due au fait que dans le degré de Daloa, les eaux de sources sont captées dans les aquifères d'altérites. Alors les eaux de sources et puits ne capture pas le même aquifère que les eaux de forages dans les aquifères de fissures. L'abondance des alcalino-terreux dans les eaux par rapport aux alcalins montre une abondance au sein de l'aquifère des minéraux ferromagnésiens et des plagioclases calciques plus hydrolysables que les feldspaths potassiques et sodiques. En outre, il y a une prédominance des ions Na⁺ sur les ions K⁺ dans les eaux de forage. Plusieurs auteurs l'ont montré à travers leurs travaux dans la zone du socle (Kouassi et al., 2012 ; Aka et al., 2013 ; Eblin et al., 2014). Cela s'explique d'une part par la grande stabilité de la muscovite et des feldspaths potassiques et d'autre part par l'adsorption des ions potassium par les plantes. Dans la sous-préfecture de Boguédia, il existe un fort couvert végétal. Les ions K⁺ pourraient également être adsorbés par les minéraux néoformés ce qui explique leur faible concentration dans les eaux (Kouassi et al., 2012). Les fortes teneurs en HCO₃⁻ proviendraient du couvert végétal. En effet, la région étant une zone de forêt dense sempervirente et ombrophile disposant encore d'un important tapis végétal, c'est vraisemblablement au cours de l'infiltration en profondeur des eaux de pluie dans certains terrains que l'eau chargée de CO₂ va dissoudre les formations géologiques et s'enrichir en hydrogénocarbonates (Adiaffi, 2008).

Conclusion

L'étude physico-chimique réalisée sur les eaux souterraines de la Sous-Préfecture de Boguédia a montré que ces eaux sont acides avec un pH compris entre 5 et 7,04, faiblement minéralisées (CE = 123 µS/cm) et une température moyenne de 27°C. En saison pluvieuse la turbidité est plus élevée uniquement dans le forage PM7 de Biga (18,7

NTU). Les paramètres chimiques: K^+ , NO_2^- , HCO_3^- , Fe^{2+} , PO_4^{3-} et F^- présentent à certains endroits, des caractéristiques chimiques supérieures aux normes de l'OMS établies pour l'eau de consommation. Cependant, des valeurs élevées observées en NO_2^- et Fe^{2+} dans certains points d'eau, représentent un danger réel pour les populations qui les consomment sans traitement préalable. Toutes les eaux échantillonnées en saison sèche et pluvieuse présentent des faibles concentrations en ions fluorures excepté le forage F18 de la SODECI de Boguédia qui a enregistré une teneur élevée en fluorure (3,2 mg/L) en saison sèche. Le diagramme de Piper a permis de mettre en évidence deux principaux faciès: les eaux bicarbonatées (83%) et les eaux chlorurées (17%). Dans la zone d'étude, la majorité des eaux de forages sont caractérisées par une prédominance des ions bicarbonates sur les ions chlorures et les sulfates qui sont en faibles concentrations. Le Mg^{2+} constitue le cation le plus important, suivi du Ca^{2+} , du Na^+ et du K^+ .

CONFLIT D'INTERÊTS

Les auteurs déclarent qu'il n'existe aucun conflit d'intérêt lié à cet article.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre les auteurs. ABK, AKSD et AMK ont effectué les missions d'échantillonnage. KAK a participé aux traitements des données ainsi que le montage du projet d'article. GEA a lu l'article et apporté des corrections. ABB, JKK et KLPK ont initié le projet de recherche lors d'une collaboration et JPRJ l'a supervisé.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été menée grâce au financement de l'Institut National d'Hygiène Publique (INHP) en collaboration avec le Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT) et Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et de Géo-matériaux (LSSEG) de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan de l'UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR STRM).

REFERENCES

- 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 11, France, 230p.
- Ahimon OA. 1990. Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000, feuille de Daloa. Direction de la géologie, Abidjan, 28p. Ahimon1982
- Ahoussi KE. 2008. Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire, Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville, Thèse de Doctorat de l'Université de C-Abidjan (Côte d'Ivoire), 270p.
- Aka N, Bamba SB, Soro G, Soro N. 2013. Étude hydrochimique et microbiologique des nappes d'altérites sous climat tropical humide : cas du département d'Abengourou (sud-est de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, **16**: 31-52. DOI: <https://www.asjp.cerist.dz/en/downArticle/125/10/5/55011>
- Assié KE. 2008. Lode gold mineralization in the Paleoproterozoic (Birimian) volcanosedimentary sequence of Afema gold district, southeastern Côte d'Ivoire. Dissertation, Technical University of Clausthal, 198 p.
- Ayraud V. 2005. Détermination du temps de résidence des eaux souterraines : application au transfert d'azote dans les aquifères fracturés hétérogènes. Thèse de l'Université de rennes 1, p298.
- Bengaly I. 2018. Caractérisation physico-chimique des ressources en eau souterraines des départements de Daloa et Zoukougbeu : implication dans le développement régional du Haut Sassandra (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Master des Sciences de la Terre, Université Felix Houphouët Boigny, 54p

- Biemi J. 1999. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'état, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 479p
- Chae GT, Yun ST, Bernhard M, Kim KH, Kim SY, Kwon JS, Kwon K, Koh YK. 2007. Fluorine geochemistry in bedrock groundwater of South Korea. *The Science of Total Environment*, **385**: 272e283. DOI : 10.1016/j.scitotenv.2007.06.038
- Chidambaram S, Ramanathan AL, Vasudevan S. 2003. Fluoride removal studies in water using natural materials. *Water SA*, **29**(3). DOI: <http://www.wrc.org.za>.
- Dibal HU, Dajilak WN, Lekmang IC, Nimze LW, Yenne EY. 2017. Seasonal Variation in Fluoride Content in Groundwaters of Langtang Area, Northcentral Nigeria, Department of Geology, University of Jos, P.M.B 2084, Jos, Plateau State, Nigeria. DOI: 10.1515/ctg-2017-0002
- Eblin SG, Sombo AP, Soro GM, Aka N, Kambire O, Soro N. 2014. Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire); *Journal of Applied Biosciences*, **75**: 6259–6271. DOI: 10.4314/jab.v75i1.10
- Edmunds WM, Smedley PL. 2012. Fluoride in natural waters. In *Essentials of Medical Geology*, Selinus O (Éd.). Springer: Netherlands; 311-336. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_13
- Gbohaida V, Agbangnan DCP, Ngossanga MB, Medoatinsa SE, Dovonon FCL, Wotto DV, Avlessi F, Sohounhloue DCK. 2016. Etude de la qualité physico-chimique de l'eau de boisson dans deux localités du Bénin: Cotonou et Dassa-Zoumè. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **10**(1): 422-434. DOI : 10.4314/ijbcs.v10i1.32
- Kamenan YM. 2020 Elaboration d'un modèle de protection des eaux souterraines en zone de socle : cas des aquifères du bassin versant de la Lobo à Nibéhibé (CentreOuest de Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat Unique, Université de Jean Lorougnon Guédé, 191 p.
- Kouassi MA, Ahoussi KE, Koffi YB, Ake YA, Biemi J. 2012. Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6**(1): 504-518. DOI: 10.4314/ijbcs.v6i1.45
- Kpan OJG 2017. Incidence de la variabilité climatique sur les ressources en eau, le développement agricole et la santé des populations dans le sud-est de la côte d'ivoire et perspectives : cas de zone littorale d'Abidjan à Aboisso, Thèse de Doctorat ; Université Félix Houphouët Boigny, Cote d'Ivoire, 261 p
- Ligban R, Gone DL, Kamagate B, Saley MB, Biemi J. 2009. Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **3**(1): 38-47. DOI : 10.4314/ijbcs.v3i1.42733
- Margat J. 2008. Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde. Coédition: UNESCO et BRGM. 52p.
- Muralidharan D, Nair AP, Muralidharan D, Sathyanarayana U. 2002 Fluoride in shallow aquifers in Rajgarh Tehsil of Churu District, Rajasthan: an arid environment. *Curr Sci.*, **83**: 699–702. DOI : <http://www.jstor.org/stable/24106144>
- Ohou YMJA, Séka AM, Mambo V, Yapou OB, Konan KF, Houéno PV. 2014 Contamination des eaux de puits traditionnels par les nitrates sur le bassin versant de la Lobo (Buyo, sudouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, **78**: 6654–6665. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/jab.v78i1.11>
- Oga MS, Lasm T, Yao KT, Soro N, Saley MB, Dongo KF, Gnamba K. 2009.

- Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture : cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal*, **31**(1): 72-87. <https://www.researchgate.net/publication/312116101>
- OMS. 2017. *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th edition incorporating first addendum). OMS; 538 p.
- Petit O. 2004. La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance. *Natures Sciences Sociétés*, **12** : 146-156. <https://www.cairn.info/revue--2004-2-page-146.htm>
- Rodier J. 2009. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9ème édition). Dunod : Paris (France) ; 1579 p.
- Samb F. 2004. Problématique du fluor dans l'alimentation en eau potable du Sénégal. Analyse de la situation-Proposition de solutions. Projet de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme d'ingénieur de conception, Université Cheikh Anta Diop de Dakar Ecole Supérieure Polytechnique Centre de Thies, 92p.
- Sawadogo AN. 1984. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de la Haute Volta : Etude régionale du bassin versant de lma Sissili. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Grenoble, France, 350 p.
- 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, 256p.
- Soro G. 2010. Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du District de Yamoussoukro et du département de Tiébissou, Thèse d'Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 250p
- Soro TD. 2014. Évolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Synthèse des travaux antérieurs. SODEMI, 27p.
- Yao KSA, Ahoussi KE. 2021. Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines dans un environnement minier du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du Département de Divo. *Afrique SCIENCE*, **18**(4) : 53-6853. <http://www.afriquescience.net>
- Yao KAF. 2018. Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive : cas de la mine d'or d' Afema (Sud-est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, 210 p.
- Yao KT. 2009. Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie. Thèse de Doctorat Unique, Université de Cocody, (Abidjan, Côte d'Ivoire), 284 p.