

ETUDE DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES EAUX DE SURFACE DE LA ZONE FORESTIÈRE DE CÔTE D'IVOIRE: CAS DE LA RIVIÈRE LOBO À DALOA

[STUDY OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF SURFACE WATER OF CÔTE D'IVOIRE FOREST ZONE: CASE OF LOBO RIVER IN DALOA]

Kouassi Ernest AHOUSI, Founnigué SILUE, and Kouassi DONGO

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

Copyright © 2019 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 department of Daloa is located in central-west of Côte d'Ivoire. It belongs to the Lobo river watershed, a part of the Sassandra river. Water supply of populations from the city is done by the river Lobo. This water resource is faced to the pollution of water quality. This pollution came from anthropogenic activities. This study is carried out to know the physico-chemistry quality of water from Lobo river Daloa. The hydrochemical and multivariate statistical analysis technics were used for the study. The results show that the water of Lobo river is acid with pH value which ranges from 6.6 to 6.9 ; with an average of 6.8. Water is fresh with a low electric conductivity value which range from 192.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ to 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The chemical facies of water is the hydrofacies of $\text{HCO}_3^- > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$. The mineralization of water from Lobo river is led by the contact water-rock and anthropogenic activities. The study presents the physico-chemical characteristics of water from Lobo River. It determined the potential sources of pollution of surface water. Then, the study ensures sustainable management of the resource.

KEYWORDS: Surface water, minéralisation, physico-chemical, Daloa, Côte d'Ivoire.

RÉSUMÉ: Le département de Daloa est situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire et appartient au bassin versant de la Lobo principal affluent du fleuve Sassandra. L'approvisionnement en eau potable des populations de cette zone est assuré par l'eau de la rivière Lobo. Cette ressource est confrontée à de nombreux à une dégradation de sa qualité suite aux activités anthropiques. Pour ce faire, cette étude a été initiée pour déterminer l'état actuel de la qualité de la ressource à la prise d'eau de la ville de Daloa. Ces eaux ont fait l'objet de prélèvements en saison sèche et saison pluvieuse pour l'analyse des paramètres physico-chimiques. Les techniques d'hydrochimie et l'analyse statistique multivariée donc l'Analyses en Composantes Principales Normée (ACPN) ont été utilisées. L'étude hydro-chimique montre que les eaux de la région sont acides avec un pH qui varie de 6,6 à 6,9 pour une moyenne de 6,8. Ces eaux sont faiblement minéralisées, avec des valeurs de la conductivité qui varient entre 192,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 316 $\mu\text{S}/\text{cm}$. L'hydrofaciès de ces eaux est bicarbonaté magnésien et calcique. La minéralisation des eaux est gouvernée par les phénomènes du contact eau-roche et des apports anthropiques. Cette minéralisation est contrôlée par la nature des formations géologiques et par les précipitations. Cette étude a permis de mettre en évidence les caractéristiques physico-chimiques de la rivière Lobo et des sources de pollution de l'eau ressource afin de garantir une gestion durable de la ressource.

MOTS-CLEFS: Eaux de surface, minéralisation, physico-chimique, Daloa, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Longtemps considérée comme une ressource naturelle inépuisable, l'eau de consommation n'en est pas moins limitée. En effet, face au gaspillage et à l'illusion de l'abondance, la pénurie hydrique commence à se faire de plus en plus sentir dans tous les pays. L'accès des populations à l'eau potable, constitue l'un des problèmes auxquels sont confrontés les gouvernements de tous les états [1] Ainsi, selon le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD) le droit à l'eau potable doit être reconnu comme un droit de l'homme [2]. C'est pour cela que l'accès à l'eau potable a toujours été au centre des projets de développement, car l'homme ne peut vivre sans cette ressource. L'eau, en zone de socle s'emmagine souvent dans les couches supérieures (altérites) et/ou circule le long de conduits privilégiés, qui sont essentiellement des fissures ou des failles. Cette eau est de bonne qualité comparée à l'eau de surface (fleuves, rivières, lacs et étangs) [3]. En effet, compte tenu de leur présence à la surface du sol, les eaux de surface, sont confrontées à une dégradation permanente de leur qualité face aux activités anthropiques. Les résultats des études réalisées par [4, 5, 6 et 7] ont tous montrés que la qualité des eaux de surface est toujours influencée par la présence des activités anthropiques.

Dans la ville de Daloa, l'alimentation en eau potable de la population est assurée par les eaux de surface (rivière Lobo). Dans cette région à vocation agricole, cette ressource de surface est confrontée à une pression sans précédente liée aux activités agricoles. En effet, ce bassin est une région de production de café et cacao [8].

Les études réalisées par [8] sur cette rivière ne concernent que l'aspect quantitatif de la ressource. Ainsi aucune étude véritable n'est intéressée à la qualité des eaux de la rivière Lobo qui constitue le socle de l'alimentation en eau potable des populations de la ville de Daloa. En Côte d'Ivoire, les études réalisées par [9] sur les bassins versant de la Comoé ont montré une dégradation de la qualité de ce cours d'eau suite aux activités anthropiques. Par conséquent, la qualité de l'eau de surface brute dépend non seulement des processus naturels mais également d'activités anthropiques. Ainsi il est donc important de réaliser une caractérisation physico-chimique des eaux du bassin versant de la Lobo à partir de la prise de la SODECI au niveau de la ville de Daloa en vue de mettre en évidence la qualité de l'eau de cette rivière.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1.1 CADRE GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Daloa est une ville du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, Chef-lieu de la région du Haut-Sassandra, elle est située entre les latitudes 7°20 et 5°45 W et les longitudes 7°15 et 6°30 N (figure 1). Cette zone couvre une superficie d'environ 5 450 km² et le département de Daloa occupe 28% de la surface de la région. La ville de Daloa représente le pôle économique de la région. Elle appartient au bassin de la Lobo situé entre 6°05' et 6°55' de longitude Ouest et entre 6°02' et 7°55' de latitude Nord. La population de Daloa est estimée à environ 591633 habitants, soit un taux d'accroissement annuel moyen de 1,95% par rapport au recensement général de 1998 [10]. La géomorphologie dans l'ensemble se présente comme une pénéplaine dont l'altitude varie entre 160 m et 480 m. Les deux grands types de relief qui occupent le département sont les plaines et les plateaux. L'agriculture constitue la principale activité génératrice de revenus des populations. C'est une agriculture extensive, anarchique, pluviale et manuelle, qui compense ses faiblesses par la conquête permanente de terres nouvelles [11]. Elle est peu modernisée. Elle constitue l'occupation principale des populations de la région. Le système de production est dominé par la filière café-cacao. En dehors de la culture du café et cacao, on note la présence de quelques installations de transformation primaire (scieries) qui consistent au découpage, sciage et séchage du bois.

L'approvisionnement en eau potable des populations est assuré à partir d'un captage fait sur la rivière Lobo qui est un affluent du fleuve Sassandra, située à 25 km de la ville dans la localité de Zébra. Le régime climatique de cette zone est marqué par la présence de quatre saisons. De décembre à mars on la grande saison sèche et de juillet à août la petite saison sèche. La saison des pluies s'étend de septembre à novembre pour la grande saison pluvieuse et d'avril à juin pour la petite saison pluvieuse.

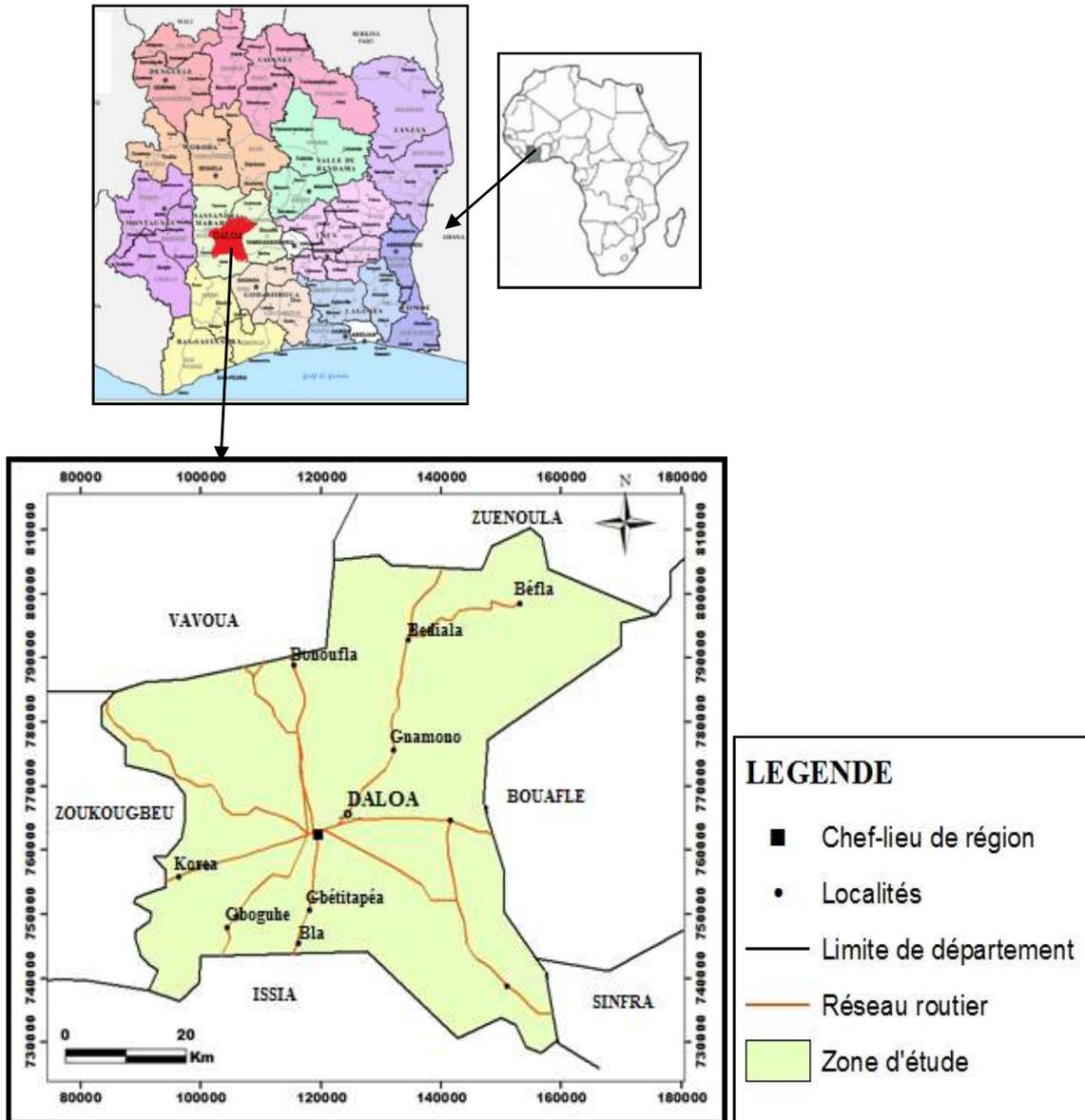


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

2.1.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE

Les formations de la région de Daloa appartiennent au socle précambrien qui couvre 97,5% du territoire ivoirien. Du point de vue géologique, selon [12], la région de Daloa appartient principalement au socle précambrien (précambrien moyen) et se regroupe en deux grandes entités que sont les roches magmatiques et les roches métamorphiques. Les roches magmatiques rencontrées sont de types: plutoniques et volcaniques. Les roches métamorphiques sont de type migmatites et schisteux dans lesquelles est logé le lit de la rivière Lobo.

Dans la zone d'étude, existe généralement deux types d'aquifères : les aquifères d'altérites (superficiels) et les aquifères fracturés (plus profonds). Les aquifères d'altérites constituent le premier niveau de réservoir d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien. Ce sont des formations de surface résultant des processus d'altération physico-chimique et d'érosion du socle. Ils se développent dans les formations argilo-sableuses de la couche d'altération dont l'épaisseur varie généralement entre 10 et 30 m mais peuvent parfois atteindre 40 m [13]. Ces altérites constituent un vaste réservoir superficiel directement alimenté par l'infiltration de l'eau de pluie. Ils sont caractérisés par un niveau piézométrique proche de la surface, ce qui les rend vulnérables à la pollution à cause des activités anthropiques.

Les aquifères de fissures sont sous-jacents aux aquifères d'altérites et constituent des réservoirs beaucoup plus importants. Ces aquifères naissent généralement à la suite d'événements tectoniques qui affectent les niveaux supérieurs et moyens de l'écorce terrestre [14]. Ils s'étendent en moyenne sur une épaisseur de 50 m [15] dans le socle et développent une productivité supérieure à celle des altérites. Par rapport aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et de la plupart des divers types de pollution.

2.2 MÉTHODES

2.2.1 MÉTHODE D'ÉCHANTILLONNAGE ET D'ANALYSE

L'échantillonnage des eaux de la rivière Lobo a été effectué sur la période de 2012 à 2016. Les prélèvements des échantillons d'eau ont été réalisés en saison des pluies et en saison sèche (suivant un cycle hydrologique). Les échantillons d'eau ont été prélevés de la prise d'eau aménagée dans le lit de la rivière. Dans cette zone, l'écoulement des eaux est permanent ce qui entraîne un renouvellement des eaux de la rivière au point de prélèvement.

Lors des prélèvements, les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 500 ml et 1 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été conservés à l'abri de la lumière et de la poussière dans une glacière à 4 °C, ensuite transportés au laboratoire pour analyse dans l'heure qui suit le prélèvement.

Lors des prélèvements, les paramètres physiques des eaux tels que la température, le pH, la conductivité électrique (CE) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre tous de type WTW 3110. Les analyses chimiques réalisées au laboratoire de la SODECI de Daloa ont concerné : TAC, TH total, TH calcique, magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}), pour ions majeurs et nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-), ammonium (NH_4^+), pour les sels nutritifs. Les métaux tels que cuivre (Cu), zinc (Zn), fer total (Fe), aluminium (Al^{3+}), manganèse (Mn), phosphate (P), fluor (F) ont également fait l'objet d'analyse. Ces éléments ont été analysés à l'aide d'équipements adéquats constitué d'un Spectrophotomètre de laboratoire de type HACH/DR 2500 et d'un turbidimètre 210 Q et des méthodes d'analyses préconisées par [16]. Rodier et al. (1996) et par les normes [17].

2.2.2 MÉTHODE DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Le traitement des données collectées sur les eaux de la rivière Lobo a été réalisé à l'aide de méthodes hydrochimiques et statistiques multivariées. L'étude hydrochimique des eaux a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper pour la classification hydrochimique des eaux. Ce diagramme est souvent utilisé dans les études hydrochimiques par [18, 19 et 20].

L'approche statistique qui a été utilisée pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux est basée sur l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN), c'est une méthode statistique multidimensionnelle permettant de synthétiser les informations dans le but de comparer les systèmes entre eux. Son application dans l'étude hydrochimique des eaux a été réalisée par plusieurs auteurs [5, 21, 22, 23 et 24] pour expliquer d'une part les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation et d'autre part les variables qui gouvernent ces mécanismes.

L'ACPN a été réalisée sur neuf (9) échantillons d'eau. Cette analyse porte sur 10 paramètres ou variables : pH, Conductivité Electrique (CE), Potassium (K^+), Calcium (Ca^{2+}), Magnésium (Mg^{2+}), Fer total (Fe), Chlorures (Cl^-), Sulfates (SO_4^{2-}), Bicarbonate (HCO_3^-), Nitrates (NO_3^-). L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1.

3 RESULTS

3.1 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE LA RIVIÈRE LOBO

Les résultats des analyses statistiques des données physico-chimiques des eaux de la rivière pendant la période (2012 à 2016) sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Le tableau montre les résultats analytiques de chaque paramètre pour la période 2012 à 2016

N°	Paramètres	2012	2013	2014	2015	2016	Moy	Min	Max	Ecart type
1	pH	6,7	6,6	6,8	6,9	6,8	6,8	6,6	6,9	0,11
2	Conductivité	276	293	316	229	192,3	261,26	192,3	316	50,04
3	Chlorures	19,9	18,2	12,4	10,7	21,4	16,52	10,7	21,4	4,71
4	Nitrates	6,73	4,54	3,6	3,7	1,6	4,03	1,6	6,73	1,85
5	Sulfates	2,73	5,33	0	0	0	1,61	0	5,33	2,39
6	Bicarbonate	51,64	54,9	39,04	39,04	45,14	45,95	39,04	54,9	7,22
7	Magnésium	28,47	35,73	19,58	21,18	17,17	24,43	17,17	35,73	7,60
8	Calcium	25,11	28,85	28,05	26,45	30,46	27,78	25,11	30,46	2,08
9	Potassium	11,66	10,67	10,9	7,2	4,2	8,92	4,2	11,66	3,15
10	Fe	1,315	1,66	2,09	2	2,2	1,85	0,2	2,2	0,36
11	Mn	0,162	0,12	0,18	0,3	0,491	0,25	0,119	0,491	0,15
12	Oxydabilité	16,2	16,16	15,7	14,5	14,5	15,41	14,5	16,2	0,86
14	Cu	0,1325	0,53	0,03	0,03	0,1	0,16	0,03	0,5275	0,21
15	Zn	0,34	0,36	0,02	0,02	1,04	0,36	0,02	1,04	0,42
16	F	0,64	0,22	0	0	0,27	0,64	0,23	0,26	0,26

3.1.1 PH DES EAUX DE LA LOBO

Pour une valeur de pH inférieure à la norme, elle tend à rendre l'eau corrosive et un pH plus élevé fournit la plainte de goût. Le pH moyen de la rivière Lobo sur la période 2012 à 2016 est de $6,8 \pm 0,11$ et les valeurs du pH de l'eau du secteur d'étude varient de 6,65 en 2013 à 6,93 en 2015 (Figure 2). Les eaux de la rivière Lobo dans le département de Daloa sont faiblement acides. Le pH moyen ($6,8 \pm 0,11$) de l'eau de la zone d'étude est supérieur à 6,5 et inférieur à 8,5 qui sont les valeurs de la norme OMS ($6,5 < \text{pH} < 8,5$).

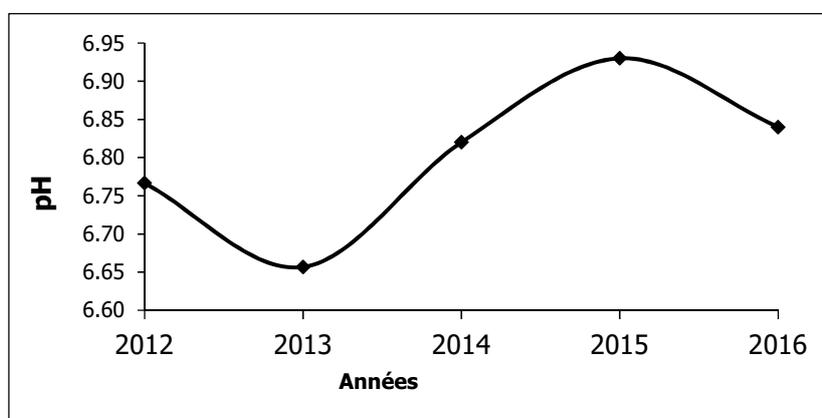


Fig. 2. Evolution du pH pour la période 2012 à 2016

3.1.2 CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE (CE)

Les valeurs de la conductivité électrique varient de $316 \mu\text{Scm}^{-1}$ en 2014 à $192,3 \mu\text{S.cm}^{-1}$ en 2016, pour une moyenne de $261,26 \pm 50,04 \mu\text{S.cm}^{-1}$ (Figure 3). La moyenne de la conductivité électrique est inférieure à la valeur indiquée par l'OMS ($400 \mu\text{S.cm}^{-1}$).

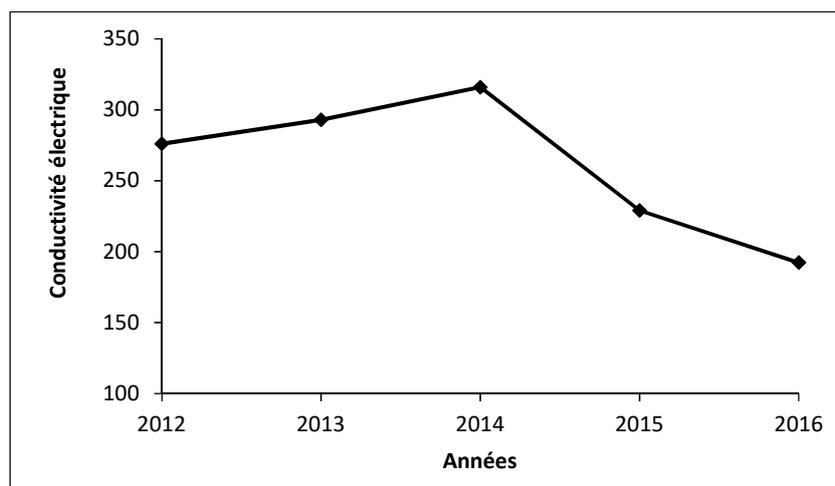


Fig. 3. Evolution de la conductivité électrique pour la période 2012 à 2016

3.1.3 CONCENTRATION EN CATIONS (Ca^{2+} , Mg^{2+} ET K^+)

La concentration du calcium dans l'eau varie de 25,11 mg/L en 2012 à 30,46 mg/L en 2016. La teneur moyenne de calcium observée dans les eaux sur la période d'étude est de $27,78 \pm 2,08$ mg/L. Les teneurs en magnésium varient de 17,17 mg/L en 2013 à 35,73 mg/L en 2016. La teneur moyenne en magnésium dans cette eau est de $24,43 \pm 7,60$ mg/L. Les concentrations en potassium sont les plus faibles. Elles varient de 11,66 mg/L en 2012 à 4,20 mg/L en 2016, pour une moyenne de $8,92 \pm 3,15$ mg/L (Figure 4). Le calcium est le cation le plus abondant, avec une moyenne de $27,78 \pm 2,08$ mg/L.

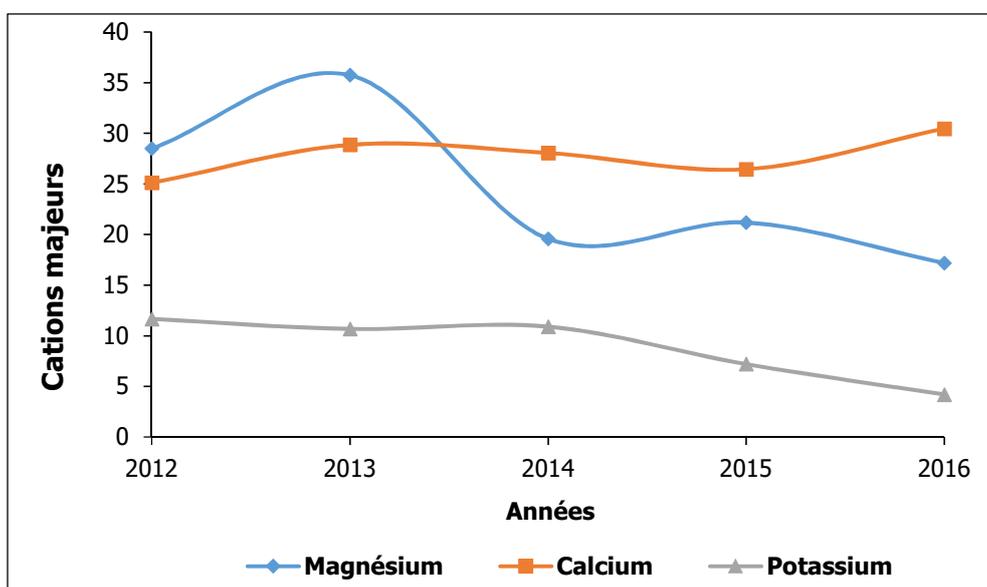


Fig. 4. Evolution de la concentration des cations majeurs sur la période 2012 à 2016

3.1.4 CONCENTRATION EN ANIONS (HCO_3^- , Cl^- ET SO_4^{2-})

La concentration en bicarbonate dans la rivière Lobo varie de 54,90 mg/L en 2013 à 39,04 mg/L en 2014, avec une teneur moyenne de $45,95 \pm$ mg/L. Sur la période 2012 à 2016, les teneurs en chlorure varient de 10,70 mg/L en 2015 à 21,40 mg/L en 2016. La teneur moyenne en chlorure est $16,52 \pm 4,71$ mg/L. Les concentrations en sulfate sont les plus faibles des anions, elles varient de 0 mg/L à 5,33 mg/L en 2013, pour une moyenne de $1,61 \pm 2,39$ mg/L. Quant aux concentrations en nitrates, elles

varient de 6,73 mg/L à 1,60 mg/L, pour une moyenne de $4,03 \pm 1,85$ mg/L (Figure 5). Le bicarbonate est l'anion le plus abondant, avec une moyenne de $45,95 \pm 7,22$ mg/L.

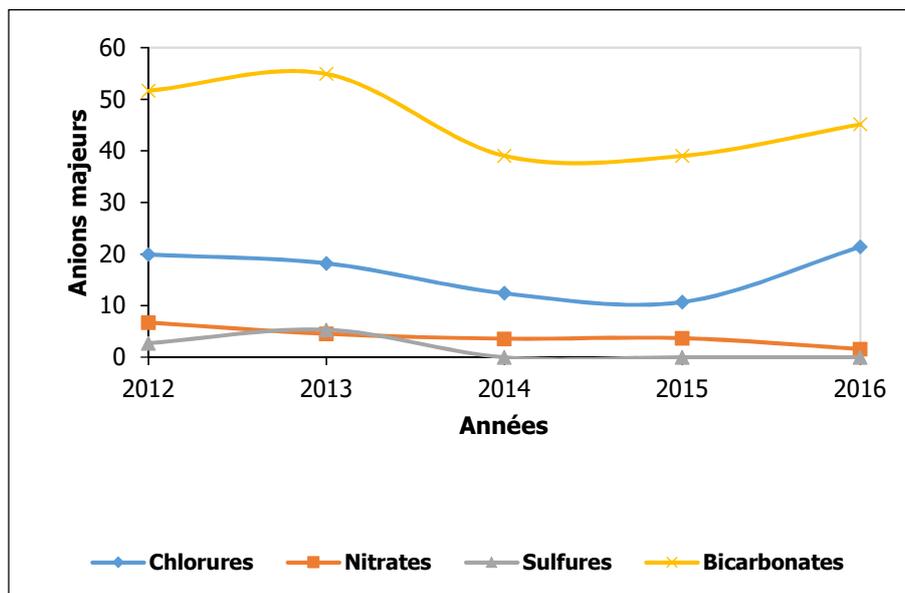


Fig. 5. Evolution de la concentration des anions majeurs sur la période 2012 à 2016

3.1.5 CONCENTRATION EN ÉLÉMENTS MÉTALLIQUES (FE, MN, CU ET ZN)

Dans les eaux de la rivière Lobo, les concentrations de fer sont les plus importantes. Celles-ci varient de 1,315 mg/L à 2,2 mg/L, pour une moyenne de $1,85 \pm 0,36$ mg/L. Le Mn présente des teneurs qui varient de 0,12 mg/L à 0,49 mg/L, pour une moyenne de $0,25 \pm 0,15$ mg/L. Au niveau du Cu, les teneurs oscillent entre 0,03 mg/L et 0,53 mg/L, avec une moyenne de $0,16 \pm 0,21$ mg/L. Les concentrations en Zn sont faibles et varient de 0,02 mg/L à 1,04 mg/L, pour une moyenne de $0,36 \pm 0,42$ mg/L. Parmi les métaux étudiés dans les eaux de la rivière, le fer reste une plus important, avec une teneur qui reste largement supérieure à la norme OMS (2011) qui est de 0,5 mg/L (Figure 6).

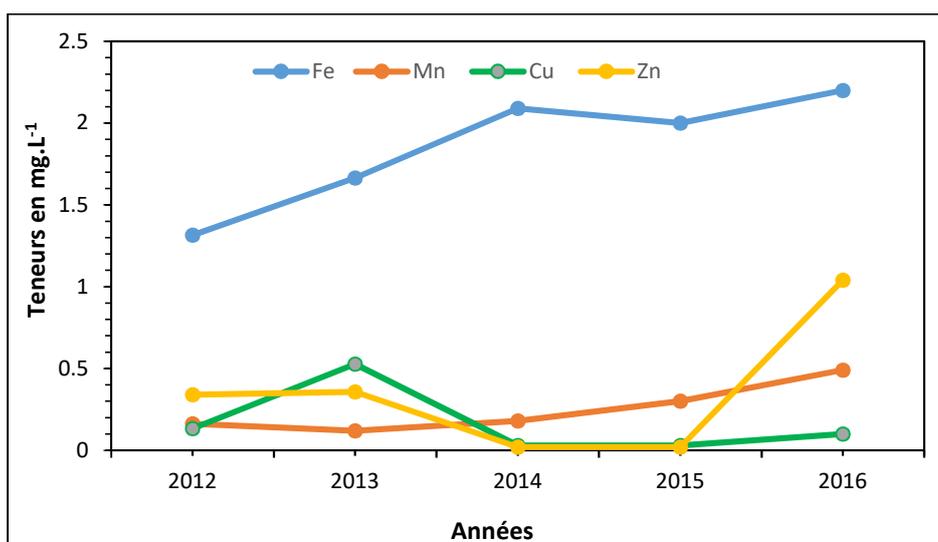


Fig. 6. Evolution de la concentration des métaux lourds des eaux de 2012 à 2016

3.2 CLASSIFICATIONS HYDROCHIMIQUES DES EAUX DE LA RIVIÈRE LOBO

3.2.1 CLASSIFICATIONS CHIMIQUES DES EAUX À PARTIR DES IONS MAJEURS

Dans l'eau de la rivière Lobo, la prédominance des anions est dans l'ordre de $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$, avec le bicarbonate comme l'anion le plus dominant. La prédominance cationique est de l'ordre de $\text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$, avec le magnésium comme le cation dominant (**Figure 7**).

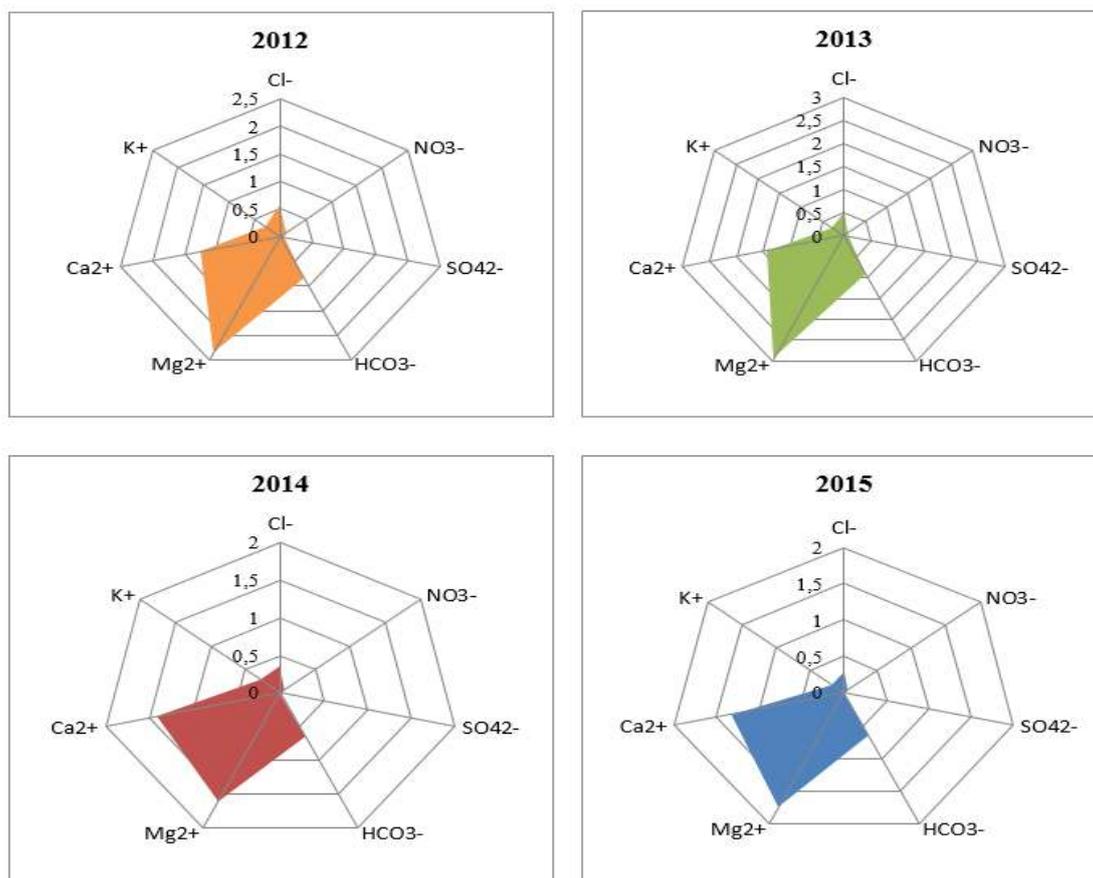


Fig. 7. Diagramme radial montrant la tendance spatiale en composition en eau (anions et cations majeurs) de 2012 à 2015.

3.2.2 CLASSIFICATIONS DES EAUX DE LA RIVIÈRE LOBO À PARTIR DU DIAGRAMME DE PIPER

La classification hydrochimique des eaux dans le diagramme de Piper (**Figure 8**) a permis de mettre en évidence une famille d'eau. Il s'agit des eaux bicarbonatées magnésiennes et calciques.

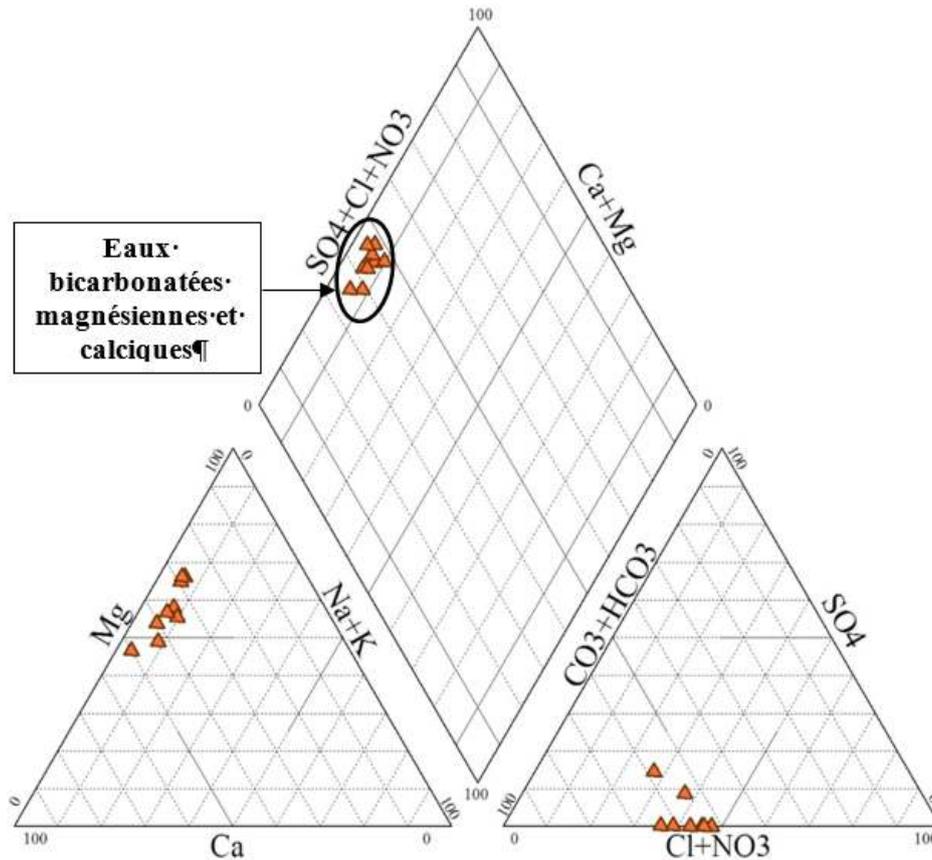


Fig. 8. Classe hydrochimique des eaux de la rivière Lobo dans le diagramme de Piper

3.3 RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE MULTIVARIÉE

3.3.1 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

Les résultats de l'ACP donnent de nombreux tableaux dont certains sont résumés dans cette étude. Le tableau des valeurs propres (**Tableau 2**) montre que les trois premiers facteurs représentent 81,57 % de la variance exprimée. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour traduire exactement l'information recherchée.

Tableau 2. Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux

Facteurs	F1	F2	F3
Valeur propre	3,57	3,02	1,55
% de Variance exprimés	35,79	30,26	15,52
Cumul de Valeur propre	3,57	6,60	8,15
% de Variance exprimée cumulée	35,79	66,05	81,57

La matrice de corrélation qui présente les différentes corrélations entre les variables nécessaires pour la compréhension des phénomènes étudiés est présentée par le tableau 3.

Tableau 3. Le tableau montre la matrice de corrélation entre les variables

	pH	CE	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
pH	1,00									
CE	-0,43	1,00								
K ⁺	-0,39	0,84	1,00							
Ca ²⁺	-0,22	0,18	-0,16	1,00						
Mg ²⁺	-0,72	0,34	0,49	0,32	1,00					
Fe	-0,42	0,53	0,20	0,50	0,01	1,00				
Cl ⁻	-0,38	-0,39	-0,06	-0,10	0,39	0,03	1,00			
SO ₄ ²⁻	-0,31	-0,25	0,04	-0,37	0,38	-0,31	0,60	1,00		
HCO ₃ ⁻	-0,32	-0,37	-0,01	-0,40	0,37	-0,35	0,73	0,96	1,00	
NO ₃ ⁻	-0,20	0,54	0,59	0,03	0,20	0,15	-0,22	-0,61	-0,52	1,00

Ce tableau donne les différentes corrélations entre les variables. Il existe une forte corrélation entre HCO₃⁻ et Cl⁻ (0,73) ; HCO₃⁻ et SO₄²⁻ (0,96) et entre K⁺ et CE (0,84). Les coefficients de corrélations négatives expriment une opposition entre les variables. Cela signifie que les variables considérées évoluent en sens inverse par rapport au centre.

L'espace des variables du plan factoriel F1-F2 (Figure 9) met en évidence deux groupements de variables suivant l'axe F1. Le premier groupement est constitué par Fe, Ca²⁺, NO₃⁻ et CE dans sa partie positive et le second déterminé dans sa partie négative par HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻. Ces regroupements traduisent une minéralisation des eaux liée au contact eau-roche (minéralisation temps de séjour). La présence du nitrate (NO₃⁻) dans ce groupement a une origine superficielle et témoigne d'une pollution anthropique. Cela exprime une minéralisation liée aux activités agricoles, industrielles et domestiques de la région produites à la surface du sol puis entraînées avec les eaux de ruissellement. De ce fait, le facteur F1 est considéré comme un axe de minéralisation d'origine superficielle (anthropique). Le facteur F2 qui exprime 30,26 % de la variance exprimée est défini par les éléments tels que le Mg²⁺, K⁺ et le pH, met en évidence le phénomène de dissolution de la roche.

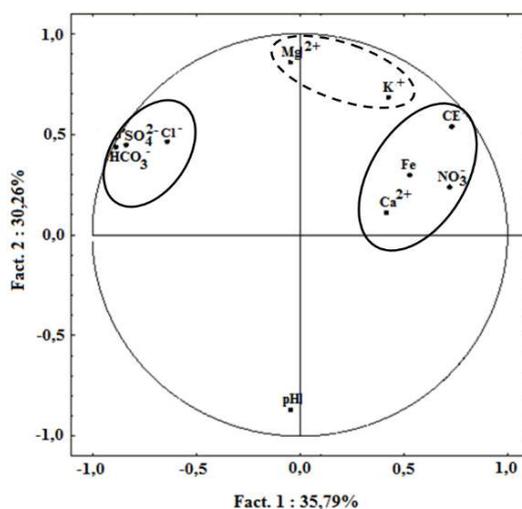


Fig. 9. Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.

Le cercle de corrélation entre les deux facteurs (F2-F3) et les paramètres chimiques montrent que le facteur 2 est déterminé dans sa partie positive par les paramètres représentatifs de la minéralisation totale que sont : Mg²⁺, K⁺, CE, Cl⁻, HCO₃⁻ et SO₄²⁻ (Figure 10). Les variables telles que le HCO₃⁻, K⁺, Mg²⁺, sont en général issues de l'altération des roches et de l'hydrolyse acide des minéraux silicatés. Il revient que F2 rendre compte des conditions d'acquisition de la minéralisation. Le facteur F2 exprime donc le temps de séjour des eaux dans l'aquifère et l'acquisition de leur minéralisation par hydrolyse des silicates. De tout ce qui précède, nous considérons le facteur F2 comme un axe de minéralisation temps de séjour des eaux. Le facteur 3 est surtout représentatif du fer (Fe) et du calcium (Ca). La proximité entre ces deux éléments sur l'axe factoriel 3 signifie qu'ils sont mis en solution par le même mécanisme chimique qui est ici l'oxydo-réduction. L'origine de ces deux éléments dans les eaux est donc

naturelle. La présence du fer et du calcium serait liée au milieu réducteur que constitue la roche encaissante. Le facteur F3 exprime donc un phénomène d'oxydo-réduction qui favoriserait la mise en solution du fer et du calcium.

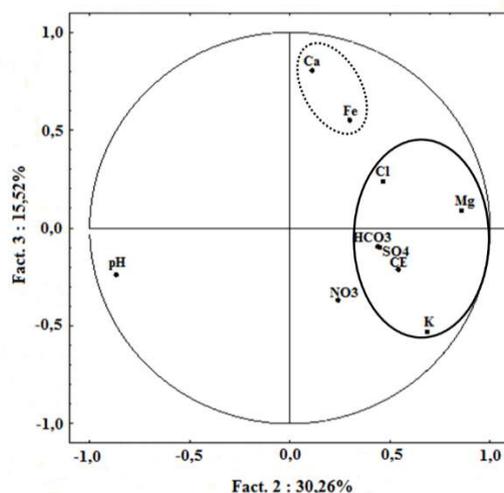


Fig. 10. Projection des variables sur le plan factoriel F2-F3

4 DISCUSSION

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la région de Daloa montrent que les eaux sont acides, avec un pH qui varie de 6,6 à 6,9. Cette acidité des eaux provoque la corrosion des infrastructures d'exhaure en acier utilisés lors du captage des eaux. Le caractère acide des eaux constitue une caractéristique des eaux rencontrées en zone de socle en Côte d'Ivoire. Cette acidité des eaux de surface a été observée dans plusieurs régions de la Côte d'Ivoire. Il s'agit de la région d'Odiénné [25], de la région de Tiassalé [26], de la région d'Abidjan [27], de la région des lacs [28] et de la région de San-Pédro [29] et dans le département d'Agboville [23]. D'après Lasm et al., (2008), cette acidité est principalement liée à la production de CO_2 dans les couches superficielles du sol sous l'action des activités biologiques [30]. Ainsi en zone tropicale humide, cette acidité provient de la décomposition de la matière organique (biogénique), avec la production de CO_2 dans les premières couches du sol [27-31, 32]. Du point de vue hydrofaciès, les eaux de la zone d'étude appartiennent au faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Ce résultat est en conformité avec celui obtenu par Kouassi et al., (2010), dans la région du N'Zi-Comoé [33]. Selon ces auteurs; la quasi-homogénéité des hydrofaciès de la zone d'étude est liée à sa faible hétérogénéité lithologique. La prédominance du faciès bicarbonaté calcique dans les eaux de la Lobo dans la région de Daloa est en accord avec les résultats des plusieurs investigations réalisées dans le domaine de la chimie des eaux en Afrique de l'Ouest. En effet, ces travaux ont tous abouti à la conclusion que le faciès bicarbonaté est le plus représenté dans les eaux du socle [1-9-34 et 35].

L'Analyse en Composantes Principales Normée (ACPN) a donné des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux de la région. Celle-ci révèle que la minéralisation des eaux est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la région. En effet, la minéralisation des eaux de la Lobo est contrôlée par le contact eau-roche comme l'indiquent les résultats des différentes statistiques. La géologie de la région est dominée par les formations telles que les granites, les gneiss et les schistes. L'hydrolyse de telles roches riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides, explique les teneurs en Ca^{2+} pour les cations dans ces eaux [1].

L'apport des activités anthropiques dans cette minéralisation a également été mis en évidence dans cette étude à partir de l'analyse statistique multivariée (ACP). Les pratiques agricoles et autres activités anthropiques qui se déroulent dans le bassin versant de la Lobo participent à la dégradation de la qualité de l'eau de cette rivière. En effet, d'autres études ont montré l'importance des activités anthropiques dans la minéralisation des eaux superficielles [6-36, 37].

5 CONCLUSION

L'étude hydrochimique réalisée sur les eaux de surface de la rivière Lobo dans la région de Daloa a permis de connaître les caractéristiques physico-chimiques des eaux de cette zone. Les eaux de la rivière Lobo sont faiblement minéralisées ($192,3 \mu\text{S}/\text{cm} < \text{CE} < 316 \mu\text{S}/\text{cm}$). Elles sont légèrement acides, avec un pH compris entre 6,65 et 6,93.

La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme de Piper a montré qu'elles sont bicarbonatées calciques et magnésiennes. Ce faciès est typique des eaux en zone de socle de Côte d'Ivoire. L'étude de la potabilité révèle que les paramètres chimiques de qualité sont tous inférieurs à la norme de potabilité OMS et ne présentent pas de danger majeur pour la consommation humaine.

Les méthodes d'analyse multivariées ont montré que la minéralisation est gouvernée par deux phénomènes dont la minéralisation d'origine naturelle (contact eau-roche) et anthropogénique.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Société de Distribution d'Eau de la Côte d'Ivoire (SODECI) pour son apport technique dans la réalisation de cette étude dans le département de Daloa.

CONFLIT D'INTÉRÊT

Il n'existe aucun conflit d'intérêt entre les auteurs de cet article.

RÉFÉRENCES

- [1] Soro N. Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doctorat d'État es Sc. Nat., Université de Cocody, 2002; 272 p.
- [2] PNUD. Au-delà de la pénurie : Pouvoir, pauvreté et la crise mondiale de l'eau. Human Development report 2006, 2006; 422p.
- [3] Reiss L. H. Réservoir engineering en milieu fissuré. Publication de l'institut français du pétrole. Technip, Paris, 1980; 136 p.
- [4] Megersa O., Dinkaa, W. L., Julius M. N.. Hydrochemical characterization of various surface water and groundwater resources available in Matahara areas, Fantalle Woreda of Oromiya region. *Journal of Hydrology*, 2015; 3:444–456. Available on: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581815000117>.
- [5] Akatumbila L., Mabila M., Lubini A., Pwema K., Musibono E. A. Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau: cas de la rivière urbaine Gombe de Kinshasa/République Démocratique du Congo. *Larhyss Journa*. 2016; 26 : 7-29.
- [6] Lakhili F., Benabdelhadi M., Bouderkha N., Lahrach H., Lahrach A. Etude de la qualité physicochimique et de la contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Beht (Maroc). *European Scientific Journal*. 2015; 11(11) : 1857- 7431. Available on: <https://ejournal.org/index.php/esj/article/viewFile/5443/5232>
- [7] Ngouala M.M., Mbilou U.G., Tchoumou M., Samba-Kimbata M.J. Caractérisation eaux de surface – eaux souterraines dans l'aquifère côtier du bassin versant de la Loémé en République du Congo. *Larhyss Journal*. 2016; 28 : 237-256
- [8] Yao A.B. Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (Centre Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat de l'Université NANGUI ABROGOUA en Géosciences et Environnement, spécialité Hydrologie. 2015; p 192.
- [9] Eblin S.G., Soro G.M., Sombo A.P., Aka N., Kambiré O., Soro N. Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*. 2014; 17: 193-214.
- [10] RGPH (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat. Résultats globaux, 2014; 22 p.
- [11] Noufou C. Déforestation et activités agricoles en Côte d'Ivoire: recherche d'un nouvel équilibre. Thèse de Doctorat, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, 1998; 159 p.
- [12] Delor C., Simeon Y., Vidal M., Zeade Z., Kone Y., Adou M. Carte géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Séguéla, Mémoire n°9 de la Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan, 1995; 19 p.
- [13] Lasm T. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Poitiers France, 2000; 274 p.
- [14] Savadogo A. Géologie et hydrogéologie du socle cristallin de Haute-Volta. Etude régionale du bassin versant de la Sissili. Thèse d'État Université Scientifique et médicale de Grenoble, 1984; 350 p.
- [15] Maréchal J. C., Robert W., Patrick L., Kambhampati S., Frédéric T. Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socles : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Géosciences*. 2003; 335, pp. 451-460.

- [16] Rodier J., Bazin C., Broutin J. C., Chambon P., Champsaur H., Rodi L. (1996). L'analyse de l'eau. 8ème Edition Dunod, Paris, 1996; 1383 p.
- [17] Afnor. Qualité de l'eau. Tome 1 : Terminologie, échantillonnage et évaluation des méthodes. 3° édition. Paris, France, 1997; 34p.
- [18] Falah F., Haghizadeh A. Hydrochemical evaluation of river water quality—a case study: Horroud River. *Applied Water Science*. 2017; 7: 4725–4733. Available on: <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0635-0>.
- [19] Bashir E., Huda S. N., Naseem S., Hamza S., Kaleem M. Geochemistry and quality parameters of dug and tube well water of Khipro, District Sanghar, Sindh, Pakistan. *Applied Water Science*. 2017; 7: 1645–1655. Available on: <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0316-9>.
- [20] Salifu M., Yidana S. M., Anim-Gyampo M., Appenteng M., Saka D., Aidoo F., Gampson E., Sarfo M. (2017). Hydrogeochemical and isotopic studies of groundwater in the middle voltaian aquifers of the Gushegu district of the Northern region. *Appl Water Sci*, 2017; 7:1117–1129. DOI 10.1007/s13201-015-0348-1. Available on: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-015-0348-1>.
- [21] Yidana S. M., Ophori D., Banoeng-yakubo B. A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, 2006; 8 p. Available on: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479706003793>.
- [22] Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Aké G. É., Biémi J. Assessment of Physico-chemical Suitability of Groundwater for Drinking and Agriculture Purposes in Bonoua and Samo (South-East Côte d'Ivoire). *Chemical Science International Journal*. 2016; 18(2): 1-13. Available on: http://www.journalrepository.org/media/journals/CSIJ_53/2017/Feb/Ernest1822016CSIJ30787_1.pdf.
- [23] Orou K. R., Soro G., Soro T. D., Fossou N'g. R. M., Onetie Z. O., Ahoussi K. E., Soro N. Variation saisonnière de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des aquifères d'altérites du département d'Agboville (Sud-Est De La Cote d'Ivoire). *European Scientific Journal*, 2016; 12(17) :1857–7881. Available on: <https://eujournal.org/index.php/esj/article/viewFile/7634/7389>.
- [24] Srinivas Y., Aghil T. B., Hudson Oliver D., Nithya Nair C., Chandrasekar N. Hydrochemical characteristics and quality assessment of groundwater along the Manavalakurichi coast, Tamil Nadu, India. *Appl Water Sci*, 2017; 7:1429–1438 DOI 10.1007/s13201-015-0325-8. Available on : <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs13201-015-0325-8.pdf>
- [25] Savané I., Soro N. Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte : recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné. *Africa Géoscience Review*, 2001; 8(4): pp 379-390.
- [26] Oga M. S., Lasm T., Yao T. K., Soro N., Saley M. B., Kouassi D., Gnamba F. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: Cas de la Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 2009; 31(1): pp 72-87. Available on: https://www.researchgate.net/publication/312116101_Caracterisation_chimique_des_eaux_des_aquifere_s_de_fracture_Cas_de_la_region_de_Tiassale_en_Cote_D'ivoire
- [27] Ahoussi K. E., Soro N., Koffi Y. B., Soro G., Biémi J. Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2010; 4(3): pp. 782-797. Available on: <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/view/60513/48749>.
- [28] Soro G. Evaluation 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, 2010; 250 p.
- [29] Lasm T., Lasm O., Oga M. S, Youan ta M., Baka D., Kouamé K. F., Yao K. T. Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2011; 5(2): pp. 642-662.
- [30] Lasm T., Yao K. T., Oga M. S., Kouame K. F., Jourda P., Kouadio K. E., Baka D. Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale area (Southern Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 2008; 20(3): pp. 526-543.
- [31] 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 Unique de l'Université Paris-Sud. Faculté des Sciences d'Orsay, France, 2008; 196p.
- [32] Matini L., Moutou J. M., Kongo-Mantono M. S. Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science*, 2009; 5(1): pp. 82-98.
- [33] Kouassi A. M., Yao K. A., Ahoussi K. E., Seki L. C., Yao N. A., Kouassi K. I., Biémi J. Apport des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 2010; 4(5): pp 1816-1838. Available on : <https://www.ajol.info/index.php/ijbcs/article/viewFile/141622/131362>.

- [34] Faillat J. P., Blavoux B. (1989). Caractères hydrochimiques des nappes des roches endogènes fissurées en zone tropicale humide : l'exemple de la Côte d'Ivoire. *J. Afri. Earth. Sc.*, 1989; (1): pp. 31- 40.
- [35] Biémi J. (1992). 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 isotopique des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'État, Université d'Abidjan, 1992; 480 p.
- [36] Chaouay A., Okhrib R., Hilali M., Bazzi L., Chahid A., Khiri F. Contribution à l'étude de l'analyse physico-chimique et de la contamination métallique de l'eau de mer du littoral d'Agadir (Sud du Maroc). *Journal of Materials and Environmental Sciences*, 2016; 7 (8), pp. 2748-2759.
- [37] Adjagodo A., Agassounon D. T. M., Kelomè N.C., Vissin E.W., Agbossou E. Pollution Physique et Bactériologique De L'eau Du Fleuve Dans La Basse Vallée De L'ouémé Pendant Les Périodes De Basses Et Hautes Eaux Au Bénin. *European Scientific Journal*, 2017; Vol.13, No.33, pp. 1857 – 7881.