

Évaluation hydrogéochimique des aquifères du bassin des volta : cas du sous bassin de l'Oti supérieur au Togo

Yakini AKAKPO^{1,2*}, Afeina BLEZA¹, Goumpoukini BOGUIDO², Kamel ZOUARI³,
Rim TRABELSI^{3,4} et Masamaéya Dadja-Toyou GNAZOU¹

¹ Université de Lomé, Faculté des Sciences, Département des sciences de la Terre, Laboratoire de géologie,
01 BP 1515, Lomé, Togo

² Université de Lomé, Faculté des Sciences, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et de l'Environnement (LHAE),
01 BP 1515, Lomé, Togo

³ École Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Département de Génie Géologique, Laboratoire de Radio-Analyses et
Environnement (LARAÉ), BP 1173 3038, Sfax, Tunisie

⁴ Section Hydrologie Isotopique, Agence Internationale de l'Énergie Atomique, (AIEA), BP 100, Vienne, Autriche

(Reçu le 13 Décembre 2024 ; Accepté le 27 Janvier 2025)

* Correspondance, courriel : yakiniakakpo@gmail.com

Résumé

Les eaux souterraines constituent la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations du sous bassin de l'Oti supérieur. Cependant, l'exploitation incontrôlée de cette ressource peut entraîner sa détérioration sur le plan qualitatif. L'objectif de la présente étude est de comprendre les mécanismes de minéralisation des eaux souterraines du sous bassin de l'Oti supérieur en vue de son exploitation rationnelle. L'étude s'est basée sur les résultats de l'analyse de 73 échantillons d'eau souterraine par les méthodes de la spectrophotométrie et de la titrimétrie. L'hydrogéochimie classique couplée aux analyses statistiques multivariées sont appliquées aux résultats d'analyses obtenus. Les résultats montrent que ces eaux présentent une minéralisation importante, avec la prédominance du faciès NA-HCO₃. Dans l'ensemble, elles sont de bonne qualité chimique sauf au niveau de trois forages où les teneurs en nitrates dépassent les normes de potabilité de l'OMS pour l'eau de boisson. Les processus d'hydrolyse des silicates, d'échanges de bases, de dissolution des minéraux carbonatés et faiblement de la pollution anthropique contrôlent la minéralisation des eaux souterraines du sous bassin de l'Oti supérieur.

Mots-clés : *eaux souterraines, sous bassin de l'Oti supérieur, hydrogéochimie, minéralisation, analyses statistiques multivariées.*

Abstract

Hydrogeochemical assessment of aquifers in the volta basin: case of superior Oti sub-basin in Togo

Groundwater is the main source of drinking water in the Upper Oti sub-basin of Northern Togo. However, uncontrolled exploitation poses a serious risk to groundwater quality in the sub-basin. This study aims at understanding the mineralization mechanisms of groundwater in the Upper Oti sub-basin in order to promote

a sustainable exploitation. To achieve the study goal, 73 groundwater samples were collected and analyzed using spectrophotometric and titrimetric methods. Traditional hydrogeochemistry tools combined with multivariate statistical analyses were applied to the analytical results obtained. Results show that these waters are highly mineralized, with a predominance of NA-HCO₃ facies. Overall, they are of good chemical quality, except at three boreholes where nitrate levels exceed WHO drinking water standards. Silicate hydrolysis, base exchange, dissolution of carbonate minerals and, to a lesser extent, anthropogenic pollution control groundwater mineralization in the Upper Oti sub-basin.

Keywords : *groundwater, Upper Oti sub-basin, hydrogeochemistry, mineralization, multivariate statistical analysis.*

1. Introduction

Les ressources en eau douces sont principalement les eaux de surface et les eaux souterraines [1]. Cependant, ces ressources demeurent épuisables et fragiles, car vulnérables à divers types de pollutions [2]. En effet, la pollution des eaux des cours d'eau et des lacs entraîne une dégradation de plus en plus accrue de la nappe phréatique superficielle, voire profonde par endroits [2]. Toutefois, l'eau souterraine a pris l'avantage sur l'eau de surface en devenant la source privilégiée d'alimentation en eau potable des populations. Ceci, en raison de sa faible vulnérabilité à la pollution et de son faible coût de traitement [1, 3]. C'est ainsi que les populations se tournent de plus en plus vers l'exploitation des eaux souterraines par le biais des forages et des puits. Or, une forte sollicitation des eaux souterraines couplées à l'accroissement des activités humaines sont sources de dégradation de la qualité de celles-ci [2, 4]. Au Togo, les eaux souterraines constituent une part importante du patrimoine hydraulique du pays et l'accès à l'eau potable des populations constitue l'une des préoccupations majeures de l'État [5]. Bien que l'exploitation des ressources en eau souterraine soit en augmentation, en particulier dans la région des savanes où le potentiel de croissance économique est élevé, les caractéristiques hydrogéologiques et hydrochimiques des aquifères sont peu connues. En effet, l'hydrogéologie de cette région est contrôlée par la perméabilité secondaire, développée à partir de l'altération et la fracturation des roches sédimentaires d'âge protérozoïque consolidées [6]. Par ailleurs, la région des Savanes est la deuxième plus grande région productrice de coton au Togo [7]. De ce fait, les techniques de culture et les intrants agricoles utilisés pour amender les champs peuvent avoir une influence sur le mode d'infiltration des eaux de surfaces en profondeur et apporter une modification des caractéristiques hydrochimiques des eaux dans les nappes souterraines [4]. Étant donné que la gestion efficace des eaux passe par l'évaluation de leur qualité chimique, il est important de maîtriser les processus hydrogéochimiques qui concourent à leur minéralisation [8]. C'est donc dans le souci d'apporter une contribution à la connaissance de l'hydrogéochimie des aquifères du bassin des Volta en général et en particulier celle de l'Oti Supérieur au Togo, que la présente étude est réalisée. Les méthodes hydrogéochimiques classiques combinées aux techniques d'analyses statistiques multivariées sont utilisées. Ces techniques ont été déjà utilisées avec succès en Afrique subsaharienne pour l'identification des processus géochimiques et du régime d'écoulement des eaux souterraines [9, 10].

2. Matériel et méthodes

2-1. Cadre naturel de la zone d'étude

Avec une superficie de 5247 km², le sous bassin de l'Oti supérieur, objet de la présente étude, représente 61.47 % de la superficie de la région des Savanes (*Figure 1C*). Il est compris entre les latitudes 10°08'18" et 11°00'00" Nord et les longitudes 0°05'07" Ouest et 0°54'50" Est. Il est limité au Nord par le Burkina Faso, à l'Ouest par le Ghana, au Sud par le sous bassin de Koumongou et à l'Est par le Bénin. À l'image de l'ensemble de la région des Savanes, le régime climatique régnant dans le sous bassin de l'Oti supérieur est de type tropical. Il est caractérisé par une saison sèche relativement longue qui s'étend sur 7 mois (octobre à avril) et une saison pluvieuse qui couvre la période allant de mai à septembre.

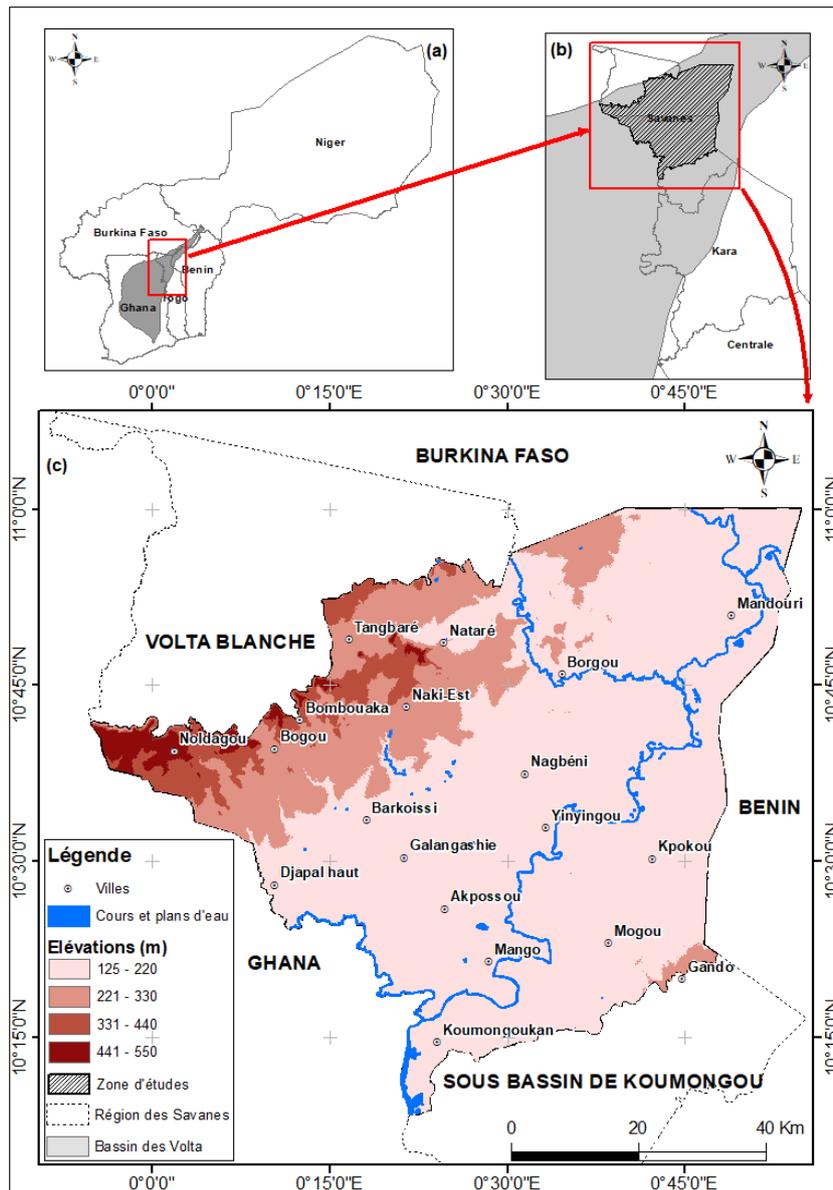


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

La moyenne pluviométrique annuelle est de 1044 mm à la station synoptique de Mango avec des températures moyennes mensuelles qui oscillent entre 27°C (août) et 32,88°C (mars). La végétation de la région se compose d'herbes et d'arbres résistants à la sécheresse tels que le karité (*Vitellaria paradoxa*), le baobab (*Adansonia digitata*), le dawadawa (*Parkia biglobosa*), les acacias et le neem (*Azadirachta indica*) [6]. Le relief est marqué par la présence de deux plateaux, une péninsule, une dépression et des plaines. Les sols sont de type ferrallitique à fertilité chimique moyenne [11, 12]. Le cadre géologique du sous bassin de l'Oti supérieur est caractérisé par des formations sédimentaires du bassin des Volta, d'âge Protérozoïque supérieur [6]. Ces formations sédimentaires tabulaires présentent une structure faiblement monoclinale vers le Sud-Est et reposent en discordance fondamentale sur le substratum éburnéen de la dorsale de Léo-Man [6, 12, 13].

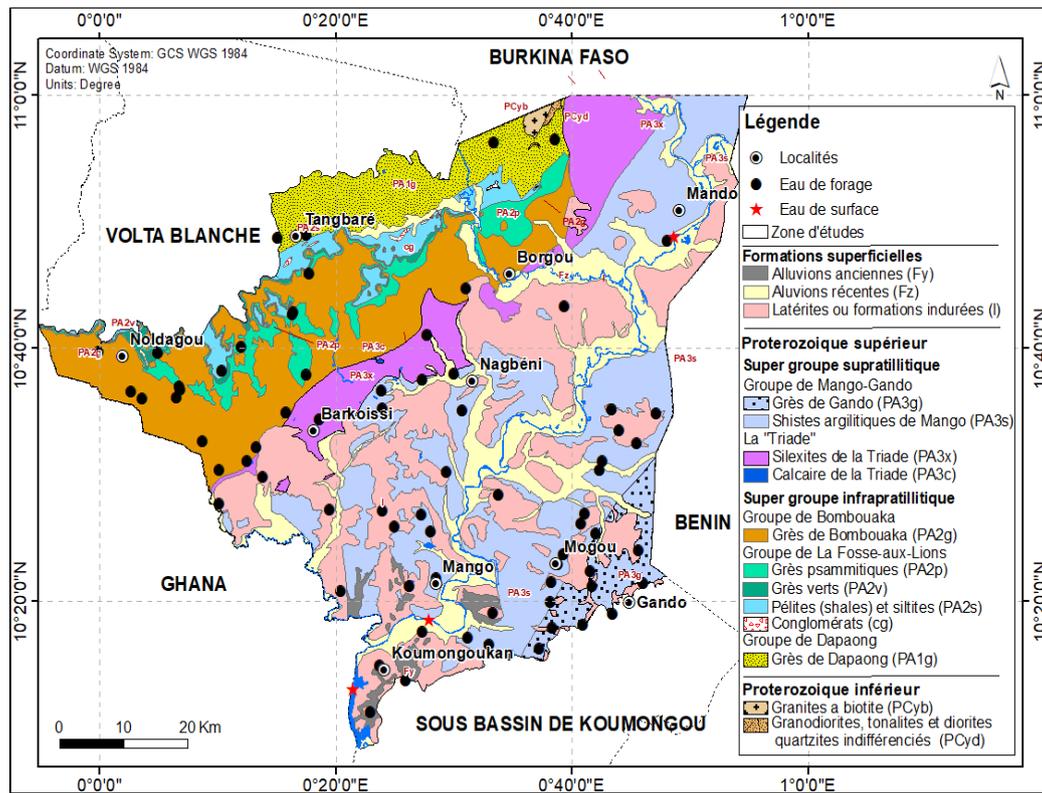


Figure 2 : Carte géologique de la zone d'étude et les points d'échantillonnage ([14] modifié)

Elles sont constituées des supergroupes de Bombouaka et de l'Oti (**Figure 2**). Le supergroupe de Bombouaka comporte de la base au sommet, les groupes de Dapaong, de la Fosse-aux-Lions et de Bombouaka [14]. Cet ensemble est essentiellement constitué de grès, de pélites et de siltites. Le supergroupe de l'Oti est composé de bas en haut des groupes de : la « Triade » (tillite-calcaires-silexites) et de Mango-Gando (argilites et siltstones de Mango et grès de Gando). Les conditions hydrogéologiques de la zone d'études sont complexes. En effet, l'hydrogéologie est principalement contrôlée par la fracturation et l'altération des roches sédimentaires consolidées [6]. Les principaux aquifères du sous bassin de l'Oti supérieur sont donc essentiellement constitués de grès avec les profondeurs des ouvrages pouvant parfois atteindre 200 m. Toutefois, on y rencontre des aquifères de la « Triade » tels que ceux des silexites qui semblent renfermer une nappe intarissable en saison sèche [14]. Quant aux shales de l'Oti, ils constituent le secteur le plus défavorable car ils ne contiennent aucune réserve à l'exception des secteurs méridionaux de Gando-Nali [14].

2.2. Méthodologie

2.2-1. Données de l'étude

La présente étude est essentiellement basée sur l'analyse de 73 échantillons d'eau souterraine (**Figure 2**). En effet, une campagne d'échantillonnage financée par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) a été réalisée en novembre 2023 dans la zone d'étude juste après la saison des pluies. Les paramètres physiques étudiés sont la température, le Ph et la conductivité électrique. Concernant les paramètres chimiques, cette étude s'est intéressée essentiellement aux éléments majeurs tels que le bicarbonate, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, la chlorure, le nitrate et le sulfate. Les paramètres physiques ont été mesurés in situ à l'aide d'un multimètre Inolab "WTW" et les échantillons recueillis dans des bouteilles en polyéthylène ont été conservés dans une glacière contenant des blocs de glace afin de maintenir une

température basse et constante. Ces échantillons ont été analysés selon les méthodes AFNOR au Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et de l'Environnement (LHAE) de l'Université de Lomé. Les éléments majeurs Ca^{2+} , Mg^{2+} ont été déterminés par complexométrie à EDTA 0,01M ; le Na^+ et K^+ par lecture directe à l'aide d'un photomètre de marque JENWAY PFP7 à flamme. Les ions Cl^- ont été déterminés par argentimétrie, les NO_3^- et SO_4^{2-} par spectrophotométrie d'absorption moléculaire. Les ions HCO_3^- ont été déterminée par titrage avec une solution d'acide chlorhydrique (0,1 M) en utilisant la phénolphthaléine et l'hélianthine comme indicateurs colorés. La fiabilité de l'analyse des données chimiques a été vérifiée en utilisant *l'Équation* de l'équilibre des charges suivante :

$$\text{Erreur (\%)} = \frac{\Sigma(\text{Cations}) - \Sigma(\text{Anions})}{\Sigma(\text{Cations}) + \Sigma(\text{Anions})} \times 100 \quad (1)$$

2-2-2. Méthode statistique multivariée

La méthode statistique utilisée dans le cadre de cette étude est basée sur une combinaison de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Cette méthode permet de synthétiser et de classer un nombre important de données, afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leur relation réciproque [15]. En effet, les techniques statistiques multivariées sont de plus en plus utilisées pour l'évaluation de la qualité de l'eau et dans la détermination des processus de minéralisation des eaux [16, 17]. Ainsi, l'analyse statistique de la présente étude a été réalisée à l'aide du logiciel XLSTAT 2024. Elle a porté sur 73 échantillons et 12 variables (la conductivité électrique (CE), le pH, la Température, la minéralisation totale des eaux (TDS), et les ions : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- et NO_3^-).

2-2-3. Processus hydrochimiques

La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de piper, réalisé grâce au logiciel Diagrammes (V 8.6), pour la classification hydrochimique des eaux. Ce diagramme est le plus souvent utilisé en hydrochimie et a donné des résultats satisfaisants [18 - 20]. Afin de mieux comprendre les différents processus hydrochimiques qui sont à l'origine de la minéralisation des eaux du sous bassin de l'Oti supérieur, des diagrammes binaires ont été mis à contribution. Ces diagrammes ont été réalisés à partir du logiciel de programmation Rstudio et du tableur Excel du package Office 2016.

3. Résultats et discussion

3-1. Hydrogéochimie

La description statistique des résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines est consignée dans le *Tableau 1* ci-dessous :

Tableau 1 : Statistique descriptive des variables des eaux souterraines

Paramètres	Unités	Min	Max	Moy	Méd	Éc-ty
T°	°C	27,60	31,90	30,27	30,40	0,69
pH		5,64	8,37	7,09	7,03	0,52
CE	μS/cm	54,10	1077,00	627,71	679,00	262,79
Ca ²⁺	mg/L	2,40	76,00	26,68	26,40	14,41
Mg ²⁺	mg/L	0,96	48,00	11,49	10,04	8,73
Na ⁺	mg/L	1,00	212,00	105,00	115,00	59,59
K ⁺	mg/L	0,50	52,00	3,25	2,50	5,90
HCO ₃ ⁻	mg/L	12,20	683,20	381,46	420,90	171,64
SO ₄ ²⁻	mg/L	0,00	83,50	13,70	7,30	14,58
Cl ⁻	mg/L	1,00	126,00	12,33	6,00	21,67
NO ₃ ⁻	mg/L	0,00	116,00	6,88	0,34	20,03
TDS	mg/L	32,12	973,24	553,97	614,44	235,29
dureté	[°f]	1,00	31,00	11,47	11,00	6,42

3-1-1. Analyse des paramètres physiques

Les températures des eaux souterraines enregistrées varient entre 27,6 °C à Bologou et 31,9 °C à Padori, pour une moyenne de 30,27°C. Les pH donnent des valeurs comprises entre 5,64 à Koumbok et 8,37 à Nagbéné, avec une valeur moyenne de 7,06. Plus de 90% des échantillons sont dans la gamme des valeurs guides de l'OMS (6,5-8,5). Dans l'ensemble, les eaux ont une tendance acide à neutre. La nature silicatée des réservoirs explique le caractère acide des eaux ; de plus la dissolution du CO₂ provenant de la décomposition de la matière organique constitue un des facteurs d'acidification des eaux souterraines [21]. La conductivité des eaux varie entre 54,10 et 1077 μS/cm avec une moyenne de 627,71 μS/cm. La plus forte valeur est observée aux environs de Tchabare. Ces eaux ont une minéralisation importante dans l'ensemble. En effet, 59 % des eaux souterraines étudiées présentent une conductivité comprise entre 600 et 1000 μS/cm (*Figure 3a*) et se retrouvent pour la majorité dans les aquifères argileux. Cependant, on y retrouve par endroit des valeurs faibles à moyennes généralement dans les aquifères gréseux. En se référant aux normes OMS de potabilité, environ 90 % des points d'eau peuvent être considérés comme acceptables. La dureté des eaux varie entre 1 et 31 °F, avec une moyenne de 11,47 °F indiquant une eau douce dans l'ensemble (*Figure 3b*).

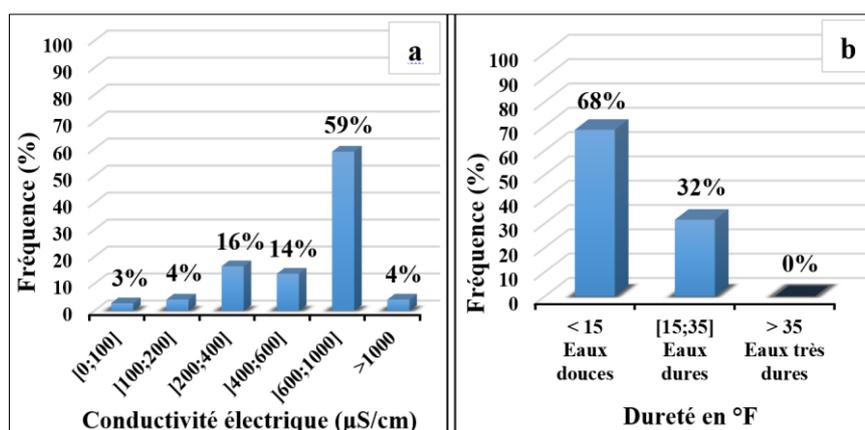


Figure 3 : Histogrammes des fréquences de conductivité électrique (a) et de dureté des eaux souterraines du sous bassin de l'Oti supérieur

3-1-2. Analyse géochimique des eaux souterraines

Les teneurs en potassium sont très faibles, oscillant entre 0,5 mg/L à Nagbeni et Kaditierie, et 52 mg/L à Padori. Exceptée la valeur maximale qu'on retrouve à Padori, les teneurs en potassium sont en dessous des normes de permisivité de l'OMS. Le magnésium présente également de faibles valeurs allant de 0,96 mg/L à Tchimouri à 48 mg/L à Tandjoare. Les valeurs de sodium qui constituent le cation le plus abondant dans les eaux varient entre 1 mg/L dans le secteur de Koumbok et 212 mg/L à Tontondi. Les teneurs en sodium peuvent être considérées admissibles à l'exception des points d'eau situés à Tontondi et Boudori où elles dépassent les normes fixées par l'OMS. Le calcium présente des teneurs modestes variant entre 2,4 mg/L à Tchimouri et 76 mg/L à Barkoissi. Tout comme les cations, les eaux souterraines affichent des concentrations en anions faibles. Les bicarbonates présentent des teneurs comprises entre 12,2 mg/L dans le secteur de Mamanga à 683,2 mg/L à Tchanwiekou. Environ 60 % des points d'eau ont une teneur en bicarbonates supérieure à la valeur moyenne indiquant l'abondance de cet anion dans les eaux. Les teneurs en sulfates oscillent entre 0 mg/L dans la zone de Koumongoukan à 83,5 mg/L dans le secteur de Tchabare. Pour tous les points d'eaux étudiés, les teneurs en sulfate sont largement inférieures à la valeur guide de l'OMS. Les taux de chlorures enregistrés varient entre 1 mg/L dans la zone de Koumbok et 126 mg/L dans le secteur de Kerekete. L'ensemble des échantillons ont des valeurs de chlorure en dessous de la norme OMS. Les concentrations en nitrates oscillent entre 0 mg/L et 116 mg/L. Trois points d'échantillonnages présentent des teneurs dépassant la valeur guide de l'OMS et sont localisés dans les secteurs de Padori, Todjakou et Nakitoni. Globalement, l'ordre d'importance de la représentativité des ions majeurs dans les eaux étudiées se présente comme suit : $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$ pour les cations et $HCO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_3^-$ pour les anions. Le diagramme de Piper a révélé quatre familles d'eau : le faciès bicarbonaté sodique (71 %), suivi du faciès bicarbonaté calco-sodique et magnésien (22%), puis du faciès bicarbonaté calcique (6 %) et du faciès chloruré sodique et potassique (1 %) (Figure 4).

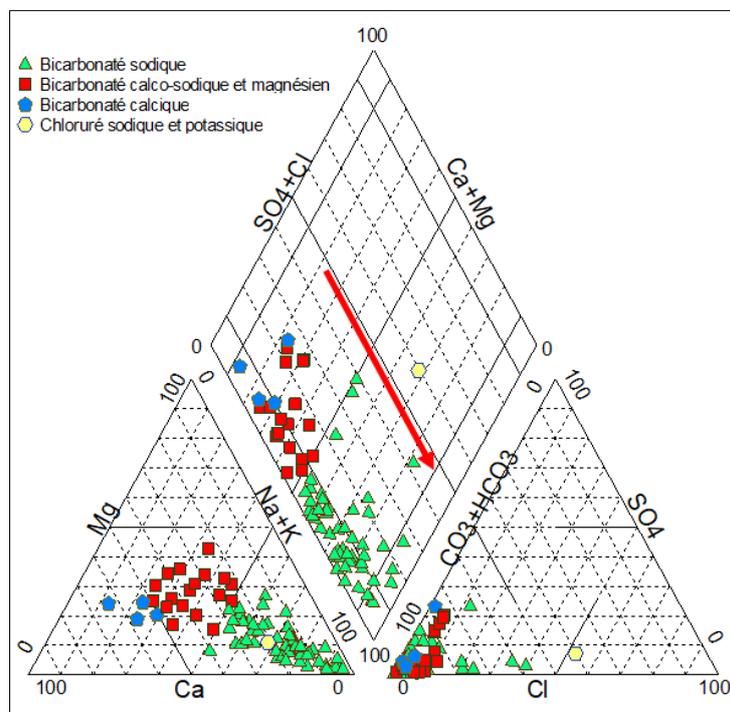


Figure 4 : Diagramme de piper des eaux du sous bassin de l'Oti supérieur

La prédominance du faciès Na-HCO₃ dans les eaux souterraines du sous bassin de l'Oti supérieur est en concordance avec les résultats obtenus dans le bassin des Volta par [21] au Ghana, [23] au Bénin et [6] au Togo. Par ailleurs, le diagramme de Piper illustre une évolution naturelle progressive des eaux des faciès Ca-

Na-Mg-HCO₃ et Ca-HCO₃ vers le faciès Na-HCO₃ (*Figure 4*). Cette évolution de faciès indique probablement des processus d'altération des silicates et/ou des interactions plus développées entre les eaux souterraines et les minéraux argileux dus à des processus d'échange de cations [23, 24].

3-2. Statistiques multivariées

3-2-1. Analyse en composantes principales (ACP)

Le coefficient de corrélation est couramment utilisé pour établir la relation entre deux variables [25]. Les résultats de l'ACP sont résumés dans les *Tableaux 2 et 3*. Cette analyse réalisée sur les échantillons des eaux souterraines a été arrêtée aux trois premiers facteurs (*Tableau 2*), exprimant environ 71,5 % de la variance totale.

Tableau 2 : Valeur propre à chaque axe et sa contribution

	F1	F2	F3
Valeur propre	4.764	2.634	1.181
Variabilité (%)	39.698	21.948	9.841
% cumulé	39.698	61.646	71.487

Le *Tableau 3* met en évidence une importante corrélation entre CE-Na⁺ (0,92), CE-HCO₃⁻ (0,93), CE-TDS (0,98), Na⁺-HCO₃⁻ (0,86), Na⁺-TDS (0,90) et HCO₃⁻-TDS (0,97). Toutefois, on observe également à un degré moindre, une corrélation positive entre les variables telles que Mg²⁺-Ca²⁺ (0,74), Na⁺-pH (0,66), -Ca²⁺-K⁺ (0,41) et une corrélation négative entre K⁺-pH (-0,59). Ces différentes corrélations traduisent l'influence des ions bicarbonates et sodium dans la minéralisation des eaux du sous bassin de l'Oti supérieur. Aussi, indiquent-elles que le processus majeur de minéralisation des eaux est probablement l'hydrolyse acide des minéraux silicatés. En effet, ce processus conduit à la mise en solution des ions (sodium et bicarbonates). Cependant, il est également possible que d'autres processus, tel que l'échange de bases ait lieu dans la minéralisation de ces eaux. En effet, le processus d'échange de base expliquerait les corrélations entre le calcium et le magnésium d'une part et entre le calcium et le potassium d'autre part [4].

Tableau 3 : Matrice de corrélation des analyses des eaux souterraines

Variables	T°	CE	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	TDS
T°	1											
CE	0,23	1										
pH	0,00	0,48	1									
Ca ²⁺	0,31	0,25	-0,28	1								
Mg ²⁺	0,32	0,35	-0,28	0,74	1							
Na ⁺	0,11	0,92	0,66	-0,03	0,10	1						
K ⁺	0,10	-0,10	-0,56	0,41	0,35	-0,30	1					
HCO ₃ ⁻	0,24	0,93	0,39	0,35	0,43	0,86	-0,11	1				
SO ₄ ²⁻	0,03	0,36	0,31	0,03	0,02	0,36	-0,09	0,28	1			
Cl ⁻	-0,07	0,32	0,27	0,02	0,09	0,32	-0,19	0,15	0,06	1		
NO ₃ ⁻	-0,05	-0,31	-0,39	0,09	0,11	-0,47	0,24	-0,42	-0,18	0,12	1	
TDS	0,24	0,98	0,43	0,31	0,43	0,90	-0,09	0,97	0,33	0,27	-0,33	1

L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 permet de mettre en évidence deux grands regroupements des variables (*Figure 5a*). La première classe prend en compte la minéralisation totale (TDS), le pH, et les ions Na⁺ et HCO₃⁻ et sont contrôlés par l'axe F1. Cet axe montre dans un premier temps que la minéralisation des eaux du sous bassin de l'Oti supérieur est gouvernée par les ions Na⁺ et HCO₃⁻; dans un second temps la minéralisation est essentiellement d'origine lithologique. Les variables corrélées avec cet

axe, sont indicatrices de l'hydrolyse d'un milieu silicaté avec une prédominance des feldspaths sodiques. Ce résultat est en accord avec les conclusions de [26] pour l'ensemble des aquifères de socle du Nord du Ghana. En effet, les analyses pétrographiques et X-ray diffraction des échantillons d'affleurement de roches, prélevés par [27] dans le bassin de la Volta au Ghana, indiquent que la minéralisation des roches est dominée par les plagioclases sodiques et du quartz avec de faibles proportions de chlorite, muscovite, calcite, talc et zéolite. Contrôlé par l'axe factoriel F2, le deuxième regroupement est dominé par les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ . A l'instar de l'axe F1, l'axe F2 exprime également une minéralisation d'origine lithologique et par ricochet, de la mise en évidence du temps de séjour. Cet axe montre non seulement l'influence de la dissolution de certains minéraux carbonatés, mais aussi le phénomène d'échange de bases dans les eaux du sous bassin de l'Oti supérieur. Le facteur F3 exprimant environ 10 % (**Figure 5b**) de la variance totale, est défini par les ions Cl^- et NO_3^- . Cet axe est caractéristique des éléments de pollution. En effet, le NO_3^- est un bon indicateur des apports superficiels. Sa présence indique l'effet des activités anthropiques telles que les activités agricoles, sources de pollution des eaux souterraines [28]. Le facteur F3 exprime donc une pollution organique d'origine anthropique [15].

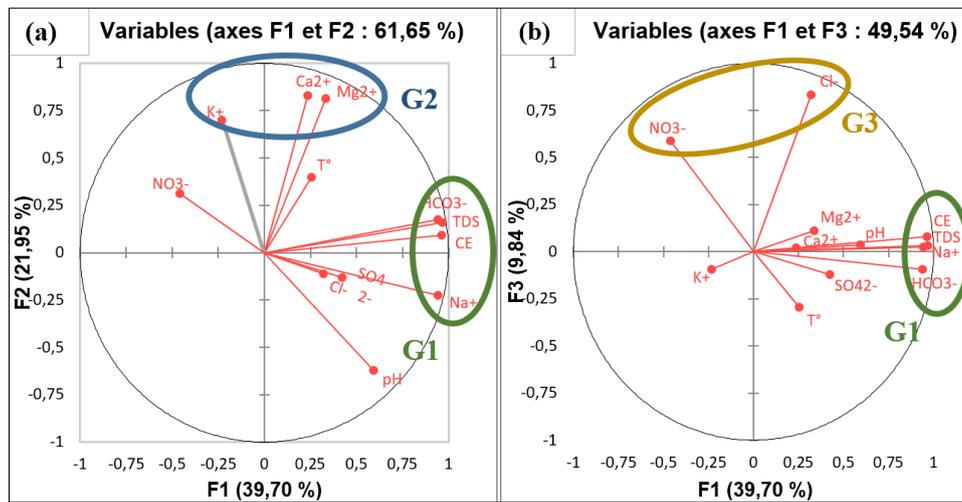


Figure 5 : Projection des variables sur les plans factoriels I x II et I x III

3-2-2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Le dendrogramme (**Figure 6**) issu de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a mis en évidence trois principaux regroupements des variables. La première famille qui prend en compte les teneurs en NO_3^- , K^+ , Cl^- et T°C traduit une minéralisation liée aux apports superficiels d'origine anthropique. Le second regroupement qui est constitué de Na^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , CE, TDS et du pH, rend compte du phénomène de l'hydrolyse des minéraux silicatés en lien avec le temps de séjour. Enfin la troisième famille concerne les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Elle met en évidence le phénomène de dissolution des carbonates et/ou d'échanges de bases. Ces résultats sont en conformité avec ceux de l'analyse en composantes principales.

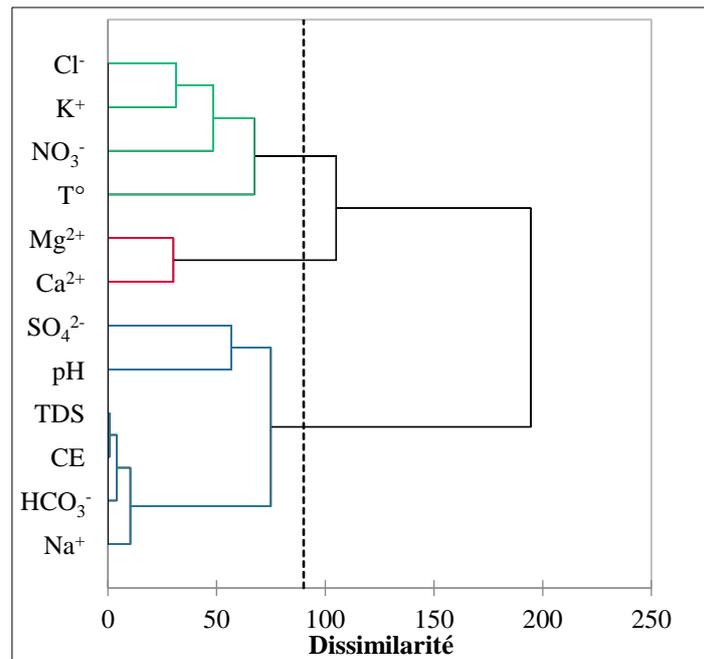


Figure 6 : Dendrogramme des variables

3-3. Principaux processus géochimiques

Le diagramme de Gibbs (**Figure 7**) a permis de prouver que la composition chimique des eaux souterraines est principalement contrôlée par l'interaction eau-roche par le biais de divers processus. Afin d'identifier ces processus d'interaction eau-roche, plusieurs diagrammes ont été mis à contribution. L'influence de la dissolution des silicates est mise en évidence par le diagramme binaire Ca/Na vs HCO₃/Na. Dans ce diagramme, la prédominance de la dissolution des carbonates conduit à de forts ratios Ca/Na et HCO₃/Na (> 50) alors qu'ils sont plus faibles (< 10) dans le cas de l'hydrolyse des silicates et très faible (< 0,2) lorsque la dissolution des évaporites est dominante [29, 30]. La **Figure 8a** montre que la majorité des ratios Ca/Na et HCO₃/Na varie entre 0,2 et 10 indiquant la prédominance de l'altération des minéraux silicatés avec les points qui se concentrent plus autour du pôle des silicates. Malgré l'identification des roches carbonatées dans certains groupes géologiques du sous bassin de l'Oti supérieur, le graphe de la **Figure 8a** ne démontre pas l'implication des processus de dissolution-précipitation des carbonates. Cependant, ces processus sont mis en évidence par les graphes de la **Figure 9**. En effet, certains échantillons d'eau souterraine ont atteint un état de saturation (IS > 0) par rapport à ces minéraux, illustrant ainsi leur participation à la minéralisation des eaux souterraines. Ces échantillons proviennent pour l'essentiel de la formation des argilites de Mango en liaison avec le temps de séjour des eaux dans la matrice rocheuse. En outre, pour ce qui concerne les évaporites, le caractère négatif de leurs indices de saturation, indique un état de sous-saturation à l'égard de celles-ci et suppose la rareté ou l'absence des gisements des minéraux évaporitiques dans le système aquifère étudié [23, 30]. Outre les processus d'hydrolyse des silicates et de dissolution des carbonates, les réactions d'échanges de cations peuvent affecter la minéralisation des eaux souterraines. Pour évaluer l'influence des processus d'échange de cation dans les eaux souterraines du sous bassin de l'Oti supérieur, le diagramme binaire [(Ca²⁺ + Mg²⁺) - (HCO₃⁻ + SO₄²⁻)] vs [(Na⁺ + K⁺) - Cl⁻] est utilisé [12, 23, 30]. Ce diagramme (**Figure 9b**) montre que la plupart des points s'alignent sur la droite de pente -1, indiquant une contribution significative du phénomène d'échanges cationiques dans la minéralisation des eaux souterraines du sous bassin de l'Oti supérieur. Durant ce processus, les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ existants dans les eaux souterraines sont échangés par les ions Na⁺ précédemment adsorbés à la surface des minéraux argileux qui sont relativement abondants dans les niveaux aquifères du système étudié.

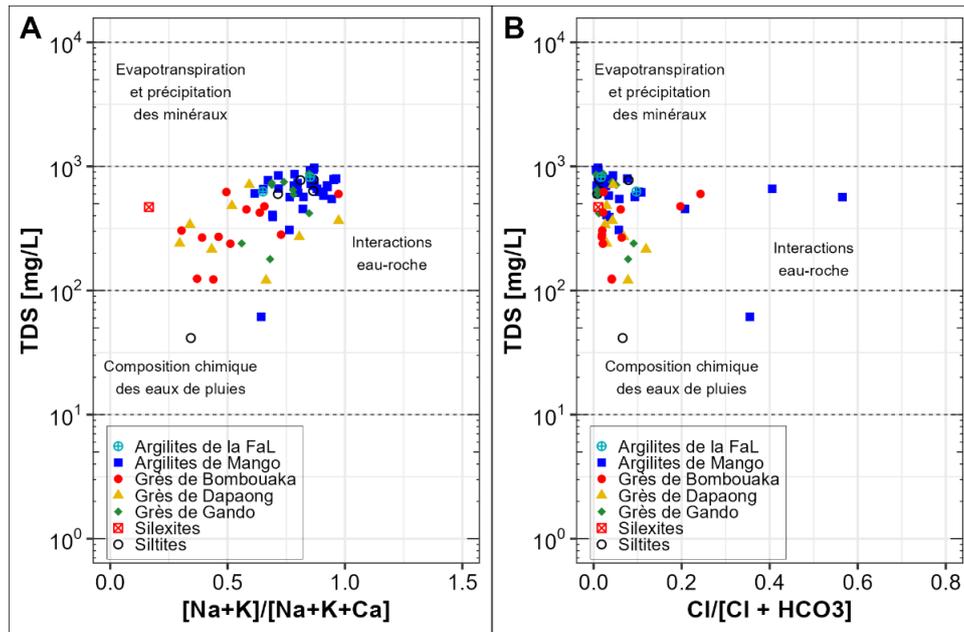


Figure 7 : Diagramme de Gibbs (les ratios sont calculés avec les concentrations en meq/L)

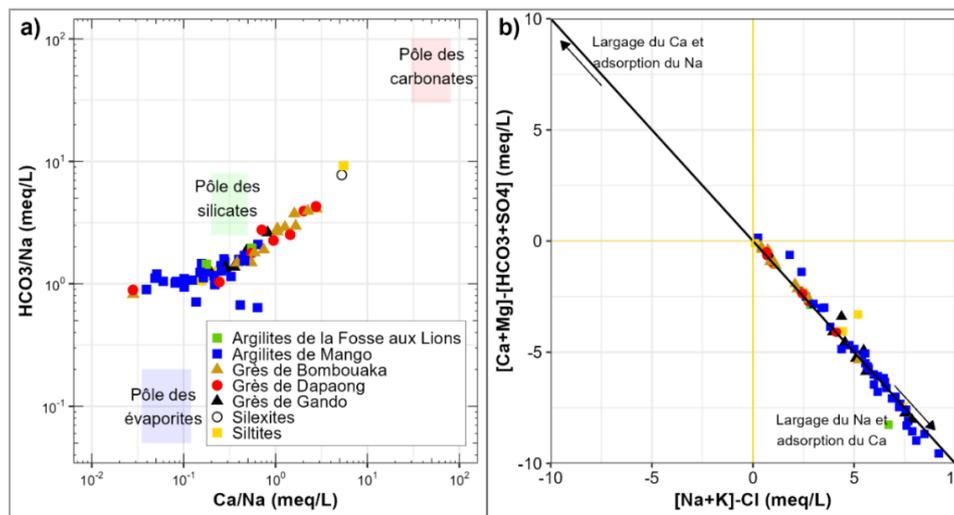


Figure 8 : Diagrammes Ca/Na vs HCO3/Na (a) et d'échange de cations (b)

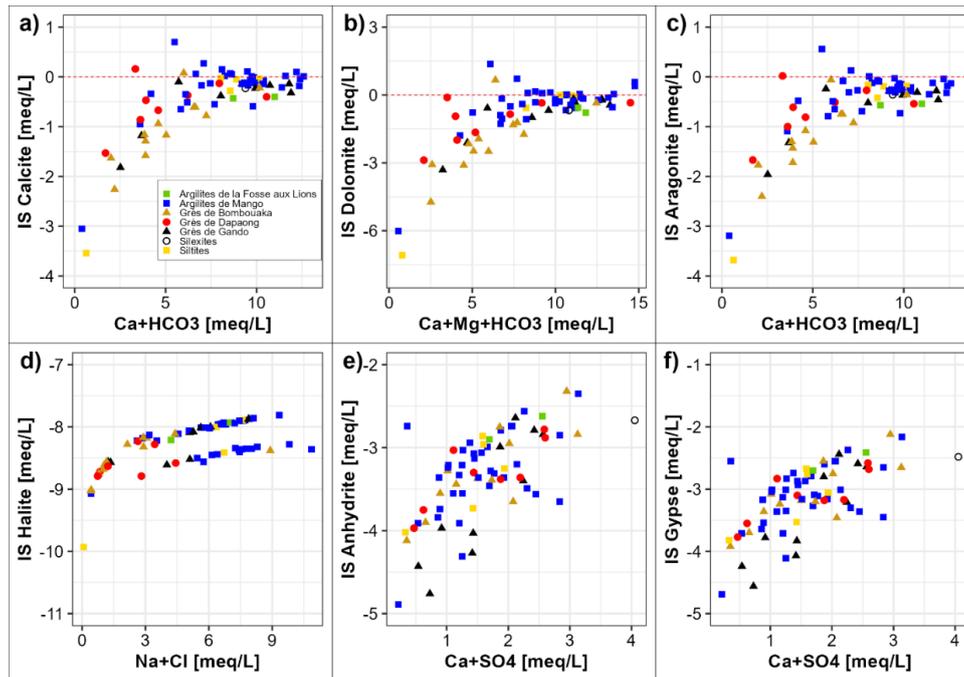


Figure 9 : Indices de saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés et évaporites

4. Conclusion

La présente étude combine les analyses statistiques multivariées et hydrogéochimiques pour la caractérisation géochimique des eaux souterraines dans le sous bassin de l'Oti supérieur au Togo. Les résultats de cette étude indiquent que les eaux souterraines sont moyennement à fortement minéralisées avec des TDS n'excédant pas 974 mg/l. D'une manière globale, la qualité chimique de l'eau du système aquifère du sous bassin de l'Oti supérieur est bonne. Cependant, trois points d'échantillonnages présentent des teneurs dépassant les limites recommandées par l'OMS pour les eaux de consommation humaine. Le faciès hydrochimique Na-HCO₃ est prédominant dans ce sous bassin. L'analyse hydrogéochimique révèle que les phénomènes d'hydrolyse des silicates, d'échanges de bases, de dissolution des minéraux carbonatés (calcite, dolomite) et faiblement de la pollution anthropique contrôlent la minéralisation des eaux du sous bassin de l'Oti supérieur. Pour préserver la qualité de la ressource, les services en charge des ressources en eau doivent réglementer l'activité de forages. De même, les services en charge de l'agriculture doivent réglementer l'utilisation des produits phytosanitaires et fertilisants dans la zone.

Références

- [1] - K. E. AGBOTSOU, M. ANI, K. A. DJONGON et K. SOSSOU, "Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle fissuré du complexe gneisso-migmatitique de la zone interne des Dahoméides : cas de la préfecture de Haho, Sud-Est du Togo", *Afrique SCIENCE*, 23 (2) (2023) 65 - 78
- [2] - A. O. DENONSI, N. AGOÏNON et J. B. K. VODOUNOU, "Qualités physiques, chimiques et bactériologiques de l'eau de puits dans la commune de Ouessè, centre-Bénin", *Afrique SCIENCE*, 22 (4) (2023) 47 - 61
- [3] - AFD, "Réalisation et gestion des forages équipés d'une pompe à motricité humaine en Afrique subsaharienne", Guide méthodologique, AFD, Paris, France, (2011) 85 p.
- [4] - E. A. ABAI, F. NTEP, P. S. KOUKOUARE, P. Z. BILO'O et A. OMBOLO, "Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux souterraines de la zone rizicole de Maga, Extrême-Nord Cameroun", *Afrique SCIENCE*, 25 (6) (2024) 23 - 31
- [5] - A. A. DOUGNA, M. D.-T. GNAZOU, T. KODOM, G. DJANEYE-BOUNDJOU et M. L. BAWA, "Physico-chimie et qualité des eaux des forages d'hydraulique villageoise dans la région centrale au Togo", *Int. J. Bio. Chem. Sci*, 9 (4) (2014) 22 - 49
- [6] - G. BOGUIDO, M. D.-T. GNAZOU, R. TRABELSI, K. ZOUARI and A. L. ARAGUAS, "The use of hydrogeochemistry and stable isotopes to characterize water resources in Savannah region in Northern Togo", *J. Mater. Environ. Sci.*, 15 (5) (2024) 648 - 673
- [7] - FAO, "4^{em} Recensement national de l'agriculture 2011-2014", (2013) 129 p.
- [8] - T. D. SORO, L. O. BLE, G. Y. M. KONE, Y. M.-S. OGA and N. SORO, "Qualité et origine de la minéralisation des eaux souterraines du département de grand-lahou (sud-ouest de la Côte d'Ivoire)", *IJAR*, 10 (9) (2022) 359 - 367
- [9] - S. Y. GANYAGLO, S. OSAE, T. AKITI, T. ARMAH, L. GOURCY and T. VITVAR., "Application of geochemical and stable isotopic tracers to investigate groundwater salinity in the Ochi-Narkwa Basin, Ghana," *Hydrological Sciences Journal*, 62 (8) (2017) 1301 - 1316
- [10] - K. V. AKPATAKU, S. P. RAI, M. D-T GNAZOU, L. TAMPO, L. M. BAWA, G. DJANEYE-BOUNDJOU and S. FAYE, "Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the southeastern part of the Plateaux Region, Togo", *Hydrological Sciences Journal*, 64 (8) (2019) 983 - 1000
- [11] - Ministère de la coopération, du développement et de l'aménagement du territoire, "Monographie de la Région des Savanes", (2009) 70 p.
- [12] - G. BOGUIDO, "Apport de l'hydrogéochimie et de la géochimie isotopique a la connaissance des aquifères de socle birrimien de l'extrême nord du Togo". Thèse de doctorat, Université de Lomé, (2020) 226 p.
- [13] - P. AFFATON, "Le bassin des Volta (Afrique de l'Ouest) : une marge passive d'âge Protérozoïque supérieur, tectonisée au Panafricain". Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Aix-Marseille III, (1987) 496 p.
- [14] - J. P. SYLVAIN, J. COLLART, A. AREGBA et S. GODONOU, "Notice explicative de la carte géologique 1/500.000 du Togo Mémoire N°6", Mémoire N°6, (1986) 40 p.
- [15] - E. AHOUSI, N. SORO, A. KOUASSI, G. SORO, Y. KOFFI et S. ZADE, "Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 04 (5) (2011) 1753 - 1765
- [16] - R. TRABELSI AND K. ZOUARI, "Coupled geochemical modeling and multivariate statistical analysis approach for the assessment of groundwater quality in irrigated areas : A study from North Eastern of Tunisia", *Groundwater for Sustainable Development*, (2019) 413 - 427

- [17] - D. M. L. DIONGUE, L. SAGNANE, H. EMVOUTOU, M. FAYE, I. D. GUEYE and S. FAYE, "Evaluation of Groundwater Quality in the Deep Maastrichtian Aquifer of Senegal Using Multivariate Statistics and Water Quality Index-Based GIS", *JEP*, 13 (11) (2022) 819 - 841
- [18] - K. AHOUSI, Y. KOFFI, A. KOUASSI, G. SORO et J. BIEMI, "Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin", (2013) 4703 - 4719
- [19] - S. H. KOLSI, S. BOURI, W. HACHICHA, and H. B. DHIA, "Implementation and evaluation of multivariate analysis for groundwater hydrochemistry assessment in arid environments : a case study of Hajeb Elyoun-Jelma, Central Tunisia", *Environ Earth Sci*, 70 (5) (2013) 2215 - 2224
- [20] - S. EBLIN, A. SOMBO, G. SORO, N. AKA, O. KAMBIRE et N. SORO, "Hydrochimie des eaux de surface de la région d'Adiaké (sud-est côtier de la Côte d'Ivoire)", *J. App. Bioscience.*, 75 (1) (2014) 6259 - 6271
- [21] - D. ADOMAKO, S. OSAE, T. T. AKITI, S. FAYE and P. MALOSZEWSKI, "Geochemical and isotopic studies of groundwater conditions in the Densu River Basin of Ghana", *Environ Earth Sci*, 62 (5) (2011) 1071 - 1084
- [22] - OMS, "Guidelines for drinking water quality, 4 th ed.", Ed. WHO, Geneva, (2011) 564 p.
- [23] - W. G. SAMBIÉNOU, "Contribution à la compréhension du fonctionnement et à l'évaluation des potentialités en eau du système aquifère du bassin versant de la Pendjari (Nord-Ouest du Bénin) : Apports des outils piézométriques, hydrogéochimiques, isotopiques et de la télédétection". Thèse de doctorat, Université d'Abomey-Calavi, (2019) 202 p.
- [24] - M. KOUASSI, A. YAO, Y. AKE et J. BIEMI, "Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire)", *Int. J. Bio. Chem. Sci*, 05 (5) (2012) 2155 - 2169
- [25] - K. S. A. YAO et K. E. AHOUSI, "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) (2021) 53 - 68
- [26] - Y. S. LOH, B. BANOENG-YAKUBO, S. M. YIDANA, D. ASIEDU, T. AKABZAA and N. O. JØRGENSEN, "Hydrochemical Characterisation of Groundwater in Parts of the Volta Basin, Northern Ghana", *GMJ*, Vol. 13, (2012) 24 - 32
- [27] - S. Y. ACHEAMPONG and J. W. HESS, "Hydrogeologic and hydrochemical framework of the shallow groundwater system in the southern Voltaian Sedimentary Basin, Ghana", *Hydrogeology Journal*, 6 (4) (1998) 527 - 537
- [28] - T. HORTENSE, S. B. GÉRARD et D. JEAN-MARIE, "Pollution des eaux souterraines par les nitrates : cas du sous bassin du Massili au Burkina Faso", *Sciences Naturelles et Appliquées*, 43 (1) (2024) 71 - 86
- [29] - S. ZOULGAMI, "Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique des eaux souterraines dans la région de la Kara : influence des conditions climatiques sur les fluctuations". Thèse de Doctorat, Université de Lomé, (2018) 155 p.
- [30] - K. V. AKPATAKU, "Apports de l'hydrogéochimie et de l'hydrologie isotopique à la compréhension du fonctionnement des aquifères en zones de socle dans la Région des Plateaux au Togo". Thèse de Doctorat, Université de Lomé, (2018) 259 p.