

## **Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la nappe du continental terminal et des retenues d'eaux pluviales du Sud-Ouest du Plateau d'Agoè à Lomé, Togo**

**Komlan FAMBI\*, Massabalo AYAH, Goumpoukini BOGUIDO, Ibrahim TCHAKALA, Tomkouani KODOM et Limam Moctar BAWA**

*Université de Lomé, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Laboratoire d'Hydrologie Appliquée et Environnement, 01 BP 1515 Lomé, Togo*

(Reçu le 21 Mai 2022 ; Accepté le 1<sup>er</sup> Août 2022)

---

\* Correspondance, courriel : [komlanfambi@gmail.com](mailto:komlanfambi@gmail.com)

### **Résumé**

L'objectif de ce travail est de caractériser les paramètres physicochimiques des eaux de forages et des retenues d'eau en milieu urbain. Les concentrations des divers éléments chimiques ont été déterminées par les méthodes normalisées (AFNOR) : pHmétrie, conductimétrie, néphélométrie, dosage volumétrique, par des spectrophotomètres d'absorption atomique et moléculaire, à travers les verreries et matériels courants de laboratoire. Les outils hydrochimiques (diagramme de Piper, de berkloff et de Pearson) ainsi que la classification ascendante hiérarchisée des eaux étudié, pour déterminer l'origine et le processus de leur minéralisation et leurs différentes corrélations. L'ensemble des eaux étudiées présente deux principaux faciès géochimiques suivant : sodique potassique et calcique pour les cations ; bicarbonaté carbonaté chloruré dans les eaux de surfaces ou chloruré (influence marine) bicarbonaté carbonaté dans les eaux souterraines. Selon l'échelle de berkloff, les ions majeurs étudiés montrent une évolution des pics vers les  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  et  $\text{Ca}^+$  ; pour les anions, ce pic évolue vers  $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$ , ce qui montre leur prédominance sur les autres éléments chimiques. L'origine de la minéralisation est principalement due au pluviolessivage et à l'infiltration des eaux, l'oxydo-réduction et l'hydrolyse acide des minéraux des roches encaissantes. L'interaction entre ces deux types d'eaux se fait essentiellement en saison pluvieuse des eaux de surface vers les eaux souterraines.

**Mots-clés :** *eau de forage, eau de retenue, minéralisation, pollution, corrélation.*

### **Abstract**

**Physico-chemical characterization of groundwater from the continental terminal aquifer and rainwater reservoirs in the South-West from the Agoè Plateau to Lomé, Togo**

The aim of this study was to characterize the physicochemical parameters of borehole water and water reservoirs in urban areas. The concentrations of the various chemical elements were determined by the standard methods (AFNOR): pHmetry, conductimetry, nephelometry, volumetric dosage, by atomic and molecular absorption spectrophotometers. The hydrochemical tools (Piper, Berkloff and Pearson diagrams) as well as the hierarchical ascending classification of the waters were used to determine the origin and the

process of their mineralization and their different correlations. The results showed that all the studied waters presented two main geochemical facies: sodic potassic and calcic for the cations; bicarbonated carbonated chlorinated in the surface waters or chlorinated (marine influence) bicarbonated carbonated in the groundwater. According to the berkloff scale, the major ions studied showed an evolution of the peaks towards  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  and  $\text{Ca}^+$ ; for the anions, this peak evolved towards  $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{2-}$  and  $\text{Cl}^-$ , which revealed their predominance over the other chemical elements. The origin of the mineralization is mainly due to rainfall, water infiltration, redox and acid hydrolysis of the minerals in the surrounding rocks. The interaction between these two types of water is essentially from surface water to groundwater during the rainy season.

**Keywords :** *borehole water, holding water, mineralization, pollution, correlation.*

## 1. Introduction

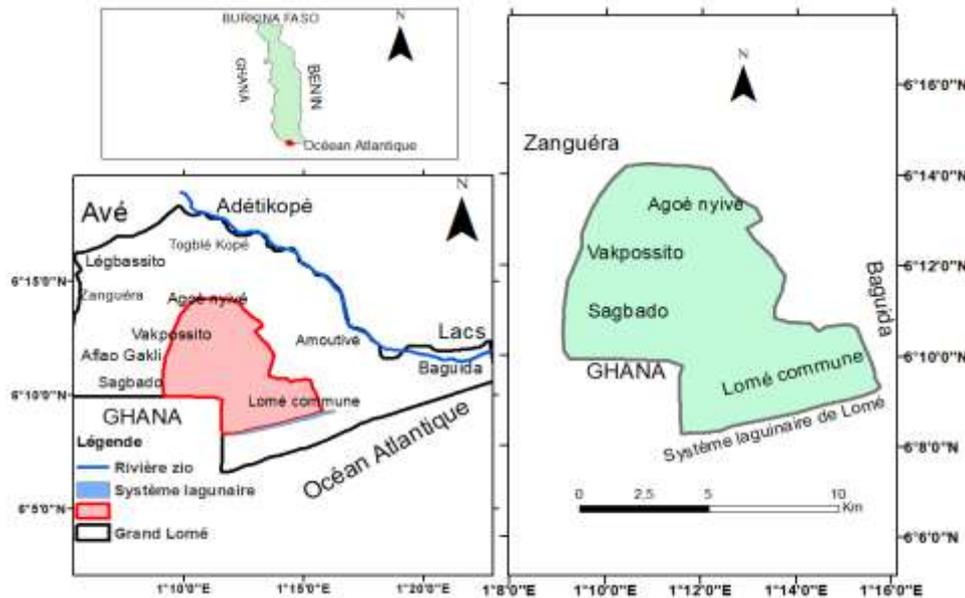
L'urbanisation rapide due à la démographie galopante et au phénomène d'exode rural, constitue l'un des facteurs d'inondation de nos villes [1]. Pour pallier à ce fléau, les autorités du pays ont implanté les bassins de rétention d'eau pluviale. Ainsi les caractéristiques physico chimiques et minéralogiques d'une eau de surface et souterraine, dûs à des réactions géochimiques des différents réservoirs traversés dans les bassins versants [2, 3], doivent être étudiées pour une gestion efficace et durable des ressources en eau souterraine susceptible d'être polluée [4 - 6]. Cette pollution accrue des eaux de surface, pendant le ruissellement qui pourrait également affecter les eaux souterraines, surtout en zone perméable favorable aux infiltrations [7]. Cependant, la qualité de l'eau demeure préoccupante pour la santé des populations qui consomme cette ressource [8]. Il est donc nécessaire de comprendre la relation entre les eaux de surface et eaux souterraines ainsi que des mécanismes de minéralisation pour une meilleure utilisation [9, 10]. Ainsi, l'utilisation d'outils statistiques comme diagramme de piper (DP) et la corrélation de Pearson dans le traitement des données sur les ions majeurs et les éléments traces métalliques [11 - 13] contribuent énormément pour expliquer les phénomènes de contraintes naturelle et anthropique des bassins versants d'assainissement urbain [14]. Le processus naturel de minéralisation naturel des eaux, dépend essentiellement de la formation géologique du milieu [2, 3], mais qui peut être également influencé par les activités anthropiques (agriculture, mauvaise gestion des déchets et eau usée) [15, 16]. Pour y parvenir, nous avons fait une étude hydrochimique et statistique des résultats d'analyses physico-chimiques de ces eaux superficielles et souterraines du bassin versant. Dans le cadre d'exploitation des eaux souterraines [4]. Pour les différents besoins des populations, cette étude basée sur l'approche hydrogéochimique, a pour objectifs : la caractérisation des propriétés physiques et chimiques des eaux et la détermination du processus de minéralisation et d'éventuelle pollution des eaux.

## 2. Méthodologie

### 2-1. Cadre géographique de l'étude

Créée dans la seconde moitié du XVI<sup>e</sup> siècle, Lomé est une ville africaine non autochtone, présentant de nombreuses singularités expliquant son mode de développement urbain. Initialement tournée vers la lagune (village de Bè), elle est de nos jours ouverte sur la mer. Capitale du Togo, la ville de Lomé est située à 6° 07' Nord et 1° 12' Est à l'extrême sud-ouest du pays en bordure du Golfe du Bénin. Elle est limitée à l'ouest par le Ghana et séparée en deux parties distinctes par le système lagunaire qui la traverse parallèlement à l'Océan Atlantique. L'agglomération de Lomé est en pleine extension principalement en direction du nord et du

nord-ouest ; ensuite vers l'est et au-delà du port autonome de Lomé, entre le fleuve Zio et la mer [14, 17]. La présente étude couvre la zone lagunaire nord jusqu'au plateau d'Agoé à Lomé. Cette zone d'étude couvre douze sous bassins versants d'assainissement urbain, caractérisés chacun par un point de chute aménagé appelé communément bassins d'orage ou retenue d'eau.



**Figure 1 : Présentation de la zone d'étude**

## 2-2. Caractéristiques biophysiques de la ville de Lomé

### 2-2-1. Climat

Le littoral togolais jouit d'un climat de type subéquatorial guinéen soumis à l'influence directe de la mer, avec une humidité relative variant entre 70 % (février) et 90 % (juin-juillet). Il est caractérisé par quatre saisons alternées : une grande saison sèche (de novembre à mi-mars), une grande saison pluvieuse (de mi-mars à mi-juillet), une petite saison sèche (d'août à septembre) et une petite saison pluvieuse couvrant le mois d'octobre [18]. Les précipitations annuelles sont très irrégulières et varient entre 750 mm en année sèche et 1000 mm en année humide. Elles fluctuent entre les valeurs extrêmes passant de moins de 450 mm à plus de 1300 mm. La grande saison humide totalise 52 à 60 % des précipitations annuelles. Le mois de juin est une période de forte pluie avec 26 % de pluie annuelle. Le vent dans la zone littorale souffle souvent dans la direction ouest-est avec une vitesse de 1,93 m/s. L'évapotranspiration est de 1540 mm/an et l'humidité relative varie entre 70 % (février) et 90 % (juin-juillet). La température moyenne est d'environ 27°C avec des écarts de 6 à 9°C entre les minima et les maxima mensuels. Au mois d'août, la température tombe jusqu'à 18°C [18].

### 2-2-2. Relief

La ville de Lomé est composée de trois grandes zones :

- La zone située entre la mer et la lagune (cordon littoral) : il s'agit d'un cordon dunaire très plat avec des côtes comprises entre 2 et 5.5 m. Il est formé des cordons littoraux, cette côte sablonneuse est caractérisée par une forte perméabilité et une platitude de relief (+ 5 et + 8 m) et dont les versants

maritimes et lagunaires présentent des pentes respectives de 2 et 5 % ;

- La zone lagunaire est située à environ 2,5 km, du front de mer et s'étend de part en part de la ville sur une largeur d'un peu plus de 200 m ; l'altitude est par endroit inférieure au niveau de la mer avec un plan d'eau discontinu ;
- La zone des plateaux est délimitée au Sud par la zone lagunaire, au Nord - Est par le lit majeur du Fleuve Zio et à l'Ouest par la frontière du Ghana. Elle présente une forte rupture de pente immédiatement au Nord de la lagune avec une dénivellée importante de 5 à 15 m selon les endroits. Elle est aussi caractérisée par un relief hétérogène et irrégulier, ce plateau s'élève entre les côtes de 10 et 35 m dans les limites de la commune.

### **2-2-3. Géologie**

Les caractéristiques géologiques de la zone d'étude (ville de Lomé) font partie de l'ensemble géologique de la Région Maritime caractérisée par un socle cristallin (d'âge Panafricain) du bassin sédimentaire côtier du Togo [19]. L'étude des formations géologiques de Lomé montre une formation de la Terre de barre au nord du système lagunaire de Lomé (plateau de Lomé, zone d'extension urbaine) et au sud du système lagunaire une formation marine sableuse (cordons littoraux) d'environ 1 à 3 km de large [18]. La couverture pédologique du bassin sédimentaire côtier du Togo est constituée en fonction de la nature géologique et géomorphologique par quatre principaux types de sols [2].

- ✓ Les sols peu évolués développés sur les matériaux sédimentaires sableux qu'on retrouve le long du littoral. Leur utilisation est limitée par leur texture et leurs propriétés hydriques déficientes ;
- ✓ Les sols hydromorphes le long des cours d'eau et dans les dépressions sont caractérisés par la présence d'un excès d'eau pendant une période plus ou moins longue de l'année ;
- ✓ Les sols ferrallitiques représentés par la Terre de barre, sont des sols très sableux (75 à 90 %), avec une capacité de rétention en eau très faible. Ces sols ferrallitiques résultent de l'altération poussée des formations sablo-argileuses du Continental terminal ;
- ✓ Les sols halomorphes qui sont des sols salés à alcalis, développés sur des alluvions. Il existe dans cette famille deux sous familles qui sont les sols lessivés et les sols non lessivés.

Le bassin sédimentaire côtier comprend une séquence inférieure, marine à (sables, calcaires, argilites, phospharénites et argilites phosphatées), à faible pendage au sud, et une séquence supérieure sablo-argileuse, discordante, en grande partie continentale et dénommée « Continental terminal ». Sur le plan géomorphologique, l'ensemble du bassin sédimentaire côtier correspond à une série de bas-plateaux, d'altitude moyenne comprise entre 20 et 100 mètres, séparés par des dépressions parcourues par des cours d'eau (*Figure 2*)

### **2-2-4. Hydrographie**

Le réseau hydrographique de Lomé, est celui de la région Maritime comprend[3] : trois cours d'eau (Mono, Zio et Haho), des rivières ; un ensemble de systèmes lagunaires au sud-est regroupant le lac Togo alimenté par le Zio et le Haho et se prolonge par un chenal lagunaire qui rejoint le réseau du bras lagunaire d'Aného et la passe du lac de Zowla ; du système lagunaire aménagé de Lomé et enfin l'Océan Atlantique. Le système lagunaire de Lomé et le fleuve Zio constituent les principaux réseaux hydrographiques de Lomé. Le lit majeur du fleuve Zio correspond à la limite nord-est de la zone d'extension de la ville de Lomé et s'étale dans une vaste plaine inondable située entre 4 et 6 m d'altitude (*Figure 2*).

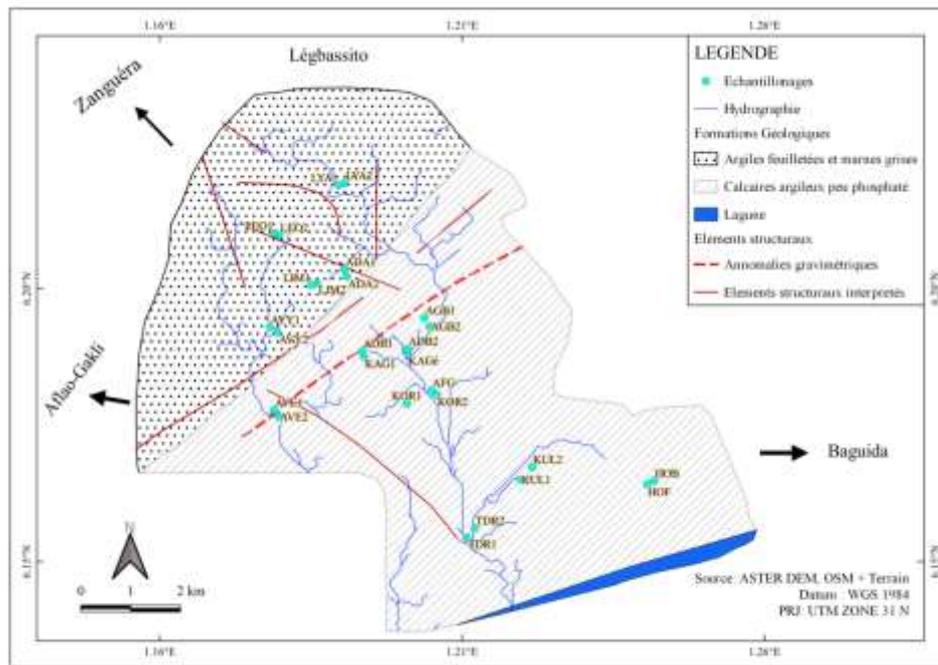


Figure 2 : Carte des grands ensembles géologiques et hydrographique des points de prélèvement d'eau

### 2-3. Méthode et outils

#### 2-3-1. Le prélèvement des échantillons

La méthode de travail a consisté au prélèvement des échantillons d'eau sur le terrain, pour acheminer au laboratoire, au traitement, analyse et interprétation des résultats. Le prélèvement des échantillons s'est effectué en deux campagnes : février et juillet 2021. Deux types d'eaux ont été prélevés : les eaux de surface (retenues d'eau) et les eaux souterraines (forage). Un total de quarante-huit (48) points d'eau a été prélevé. Les points d'eau échantillonnés ont été localisés en coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS et sont situés sur la carte de localisation (**Figure 2**). L'échantillonnage a été réalisé sur les eaux souterraines captées par les forages, et les eaux de surface des retenues d'eau (**Figure 2**). Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles plastiques de capacité 1,5L, 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. Tous les prélèvements ont été effectués entre 6 h 30 min et 11 h 30 min. Les échantillons d'eaux prélevées sont transportés au laboratoire dans une glacière à une température environ de 4 à 8 ° C pour être analysé dans les heures qui suivent (**Figure 2**). Le Laboratoire d'Hydrologie appliquée et environnement (LHAE) de la faculté des sciences (FDS) de l'Université de Lomé (UL) a servi de cadre d'étude des différentes eaux échantillonnées.

#### 2-3-2. Analyses physico-chimiques

Au laboratoire, on a procédé à la détermination des paramètres physiques : le pH, la conductivité électrique ; à l'analyse des cations majeurs :  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , à l'analyse des anions majeurs  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , aux éléments indésirables :  $\text{Fe}^{2+}$  et Mn ainsi que les indicateurs de pollutions :  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{O}_2$  et  $\text{KMnO}_4$  en utilisant les méthodes normalisées (AFNOR) [12, 13]. La fiabilité de ces données a été déterminée à partir du calcul de la balance ionique (BI) qui représente l'équilibre entre les cations et les anions exprimés en méq/L

présents dans l'eau selon l'Équation (1) suivant :

$$[Cl^-] + [SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [HCO_3^-] = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+] \quad (1)$$

$$BI = \frac{\sum cation - \sum anions}{\sum cation + \sum anions} \times 100 \quad (2)$$

Une analyse chimique des eaux n'est considérée comme représentative et acceptable que lorsque la balance ionique est inférieure ou égale à 10 %. [19, 20]. La méthode d'étude hydrochimique utilisée dans cette étude est basée essentiellement sur le diagramme de Piper et de Schoeller Berkloff, et la corrélation de Pearson. L'application des différents logiciels du Diagramme hydrochimique permettent d'étudier le processus de minéralisation, de pollution et de ressortir les corrélations entre les différents éléments chimiques des deux types d'eaux.

### 3. Résultats et discussion

#### 3-1. Analyse comparative

L'analyse statistique comparative des paramètres physico-chimiques est représentée dans le (Tableau 1). La répartition de ces paramètres montre que la température est légèrement élevée dans les eaux souterraines que celles de surface. Elle a une moyenne de 30,64 °C dans les retenues d'eau de surface contre 30,71 °C dans les eaux de puits en basse saison ; respectivement de 27,79 et 28,10 °C en haute saison. Ces moyennes sont proches de celles observées par certains auteurs au Burkina Faso et au Togo [21 - 24]. Le pH moyen est de 7,07 dans les eaux de surface et de 5,78 dans les eaux de forages en basse saison ; de 6,75 dans les eaux de surface et de 5,73 dans les eaux de forages en haute saison. Ces pH ont une tendance acide et se rapprochent de la neutralité dans les eaux de surface. Les valeurs moyennes des conductivités électriques sont élevées dans les eaux de surfaces comme souterraines et sont respectivement de 1315,46 µS/cm 1176,46 S/cm en basse saison. Par contre, ces valeurs sont de 357,5 µS/cm dans les eaux de surface et de 1182,93 µS/cm dans les eaux de forages en haute saison. Ce qui montre que les eaux de surface sont les plus douces en saison pluvieuse, La turbidité moyenne, est forte dans les eaux de surface (11,30 et 9,62 NTU) au cours des deux saisons et faible dans les eaux de forage et varie de (2,79 et 1,05 NTU). Les valeurs moyennes de sodium est de 159,17mg/L dans les eaux de surface et de 169,63 mg/L dans les eaux souterraines en saison sèche ; par contre, ces valeurs moyennes sont de 41,05mg/L dans les retenues d'eau et de 152,04mg/L dans les eaux de forage en saison pluvieuse. Les eaux de forages ont un taux élevé en sodium qui dépasse les normes de l'OMS (150 mg/L) [25]. Le taux moyen en potassium est de 28,33 mg/L et de 9,62 mg/L respectivement en basse saison et en haute saison dans les retenues d'eau. De même, cette variation est de 18,13mg/L et 11,56 mg/L dans les eaux souterraines. La dureté totale (TH) est élevée dans les eaux de surface comme dans les eaux souterraines en saison sèche. Elle est de 33,32 °f dans les retenues d'eau et de 22,98 °f dans les eaux de forage. De même elle varie de 11,45 °f et de 19 °f en haute saison. Ces valeurs sont conformes aux normes de l'OMS (< 50 °f). Par rapport à l'abondance des cations majeurs, l'ion sodium est le plus représenté suivi par l'ion calcium, en suite les ions magnésium et potassium qui ont des valeurs sensiblement égales dans les deux types d'eau en toutes saisons. Ainsi l'ordre d'abondance des cations majeurs est Na<sup>+</sup> > Ca<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup>. Cependant l'ordre d'abondance dans les eaux souterraines en haute saison est le suivant : Na<sup>+</sup> > Ca<sup>+</sup> > K<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> (Tableau 1). Par rapport aux anions majeurs

dominant, l'ordre est le suivant :  $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  dans les deux types d'eau en toutes saisons, sauf  $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^-$  dans les eaux souterraines en basse saison. La moyenne des concentrations des bicarbonates en basse saison est de 295,04 mg/L pour les eaux de surface et de 180,75 mg/L pour les eaux souterraines. En revanche, elle est de 156,22 mg/L dans les eaux de surface et de 140,46 mg/L dans les eaux souterraines. La teneur moyenne des ions chlorures est de 180,46 mg/L en basse saison et de 39,93 mg/L en haute saison dans les retenues d'eau. La variation est de 293,34 mg/L à 137,8 mg/L. Ces valeurs sont conformes aux normes de l'OMS, [25] qui fixe la valeur maximale des chlorures dans l'eau de boisson à 250 mg/L, sauf en saison sèche dans les eaux souterraines. Ces résultats sont élevés et différent par rapport à d'autres auteurs au Burkina Faso, à cause de l'influence marine, du fait que ces eaux sont à proximité de la mer. Les valeurs moyennes enregistrées pour les sulfates sont très faibles par rapport aux normes de l'OMS [25] qui fixe la teneur maximale dans les eaux de boisson à 400 mg/L. Ces teneurs sont de 21,14 mg/L dans l'eau de surface et 68,96 mg/L dans l'eau souterraine en saison sèche. De même, elle est de 16,37 mg/L et de 24,49 mg/L pendant la saison pluvieuse. Les concentrations sont très faibles dans l'eau de surface et varient de 2,16 mg/L à 0,53 mg/L de saison sèche en saison pluvieuse. Cette même diminution est observée également au niveau d'eaux souterraines, qui varie de 55,25 mg/L à 20,7 mg/L. La valeur moyenne des teneurs en nitrates des forages en saison sèche est supérieure à la valeur limite de l'OMS (50 mg/L) [25] dans l'eau de boisson. Ces valeurs élevées en saison sèche, peuvent s'expliquer par le déversement d'ordures ménagés et des eaux usées. La présence de l'ammonium dans les eaux de surface à des taux élevés serait due au déversement des effluents et au lessivage de dépotoirs riches en azote, qui varie de 0 à 9,6 avec une moyenne de 1,88 mg/L; de 0 à 3,73 avec une moyenne de 0,35 mg/L en saison sèche. Elle est de 0 à 19,42 avec une moyenne de 2,97 mg/L ; et de 0 à 8,74 avec une moyenne de 0,83 mg/L en saison pluvieuse, dont la teneur maximale dans l'eau de boisson fixée par l'OMS [25] est de 1,5 mg/L.

Les nitrites ont des valeurs faibles dans les eaux de surfaces en basse saison comme haute saison; ainsi que dans l'eau souterraine en basse saison, dont les valeurs moyennes sont respectivement de 0,07 ; 0,02 et 0,17 mg/L. Cependant, cette teneur est élevée dans l'eau souterraine pendant la saison pluvieuse dont la valeur moyenne est de 11,62 mg/L, varie de 0 à 74,98 mg/L pour une valeur limite maximale de 3 mg/L fixée par l'OMS [21] dans l'eau de boisson. L'analyse du fer révèle des valeurs maximales très élevées dans les eaux de surfaces de 1,85 mg/L et de 0,89 mg/L respectivement en saison sèche et saison pluvieuse. Elle est de 0,34 mg/L et de 0,67 mg/L, et serait à l'origine de sa forte turbidité (9,46 NTU dans LIM1) dans les eaux de forages en saison sèche et saison pluvieuse, dont les moyennes sont respectivement de 0,06 mg/L et de 0,03 mg/L. Ces concentrations maximales relevées dans les eaux de forage sont supérieures à la valeur limite fixée par l'OMS (0,3 mg/L) [25] dans l'eau de boisson. Le manganèse a une concentration maximale élevée dans l'eau de surface, qui est de 4,39 mg/L avec une moyenne de 0,64 mg/L en saison sèche. Leur disparition en saison pluvieuse peut s'expliquer par le phénomène de dilution des eaux pluviales. Par contre, elles sont très élevées dans les eaux de forage (5,19 mg/L et de 5,10 mg/L) avec des moyennes respectives de 0,39 mg/L et 0,69 mg/L pour les deux saisons. Ces valeurs sont toutes supérieures aux normes de l'OMS (0,5 mg/L), dans l'eau de boisson sauf la valeur moyenne des forages en saison sèche. Les éléments chimiques majeurs étudiés présentent beaucoup plus de distribution hétérogène par rapport au coefficient de variation CV ( $\text{CV} > 50\%$ ) qu'homogène ( $\text{CV} < 50\%$ ), des paramètres comme le  $\text{pH}$ , la conductivité électrique, les sulfates, du calcium, du potassium et des bicarbonates en saison pluvieuse dans les retenues d'eau. La diminution des ions majeurs en saison pluvieuse contribuerait à la baisse de la conductivité électrique des différents types d'eau étudiée. Cette baisse de la conductivité électrique et des autres éléments chimiques en haute saison s'explique par un phénomène de dilution par les eaux de pluie (*Tableau 1 et 2*) [8].

**Tableau 1 : Présentation des valeurs des paramètres physico - chimiques des différents types eaux en basse saison**

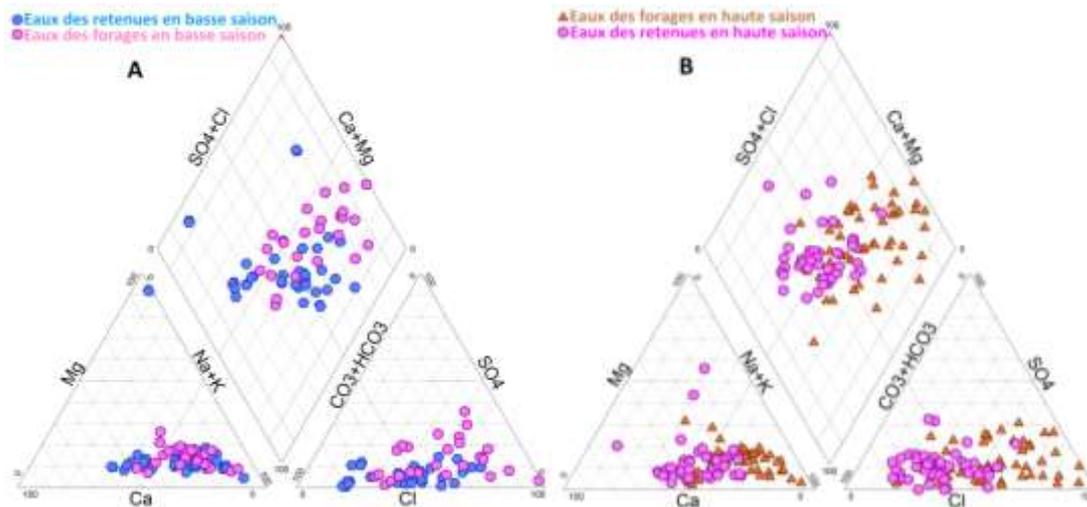
Cl	Eau de surface					Eau souterraine				
	Min.	Max.	Moy.	ET	CV(%)	Min.	Max.	Moy.	ET	CV(%)
T°C	29,4	32,5	30,64	1,14	3,72	28,1	33,3	30,71	1,6	5,22
pH	6,35	8,81	7,07	0,71	9,99	4,6	7,4	5,78	0,7	12,19
Turb.	0,9	48,3	11,30	12,33	109,15	0,31	23	2,79	5,24	187,63
CE	200	5660	1315,46	1382,58	105,1	281	6330	1176,46	1273,64	108,26
Na <sup>+</sup>	7,6	427	159,17	148,2	93,11	38	930	169,63	196,14	115,63
K <sup>+</sup>	6,7	68	28,33	17,78	62,75	2	93	18,13	26,5	146,13
Ca <sup>2+</sup>	4,32	590	84,51	149,78	177,23	7,2	165	57,25	46,89	81,9
Mg <sup>2+</sup>	3,36	189,1	29,29	47,58	162,45	5,28	124,8	20,82	23,24	111,66
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	71	732	295,04	173,45	58,79	36,6	553	180,75	141,96	78,54
Cl <sup>-</sup>	9,74	500	180,46	168,28	93,25	33	3353	293,34	637,96	217,48
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,3	91,54	21,4	23,54	110,04	6,6	316	68,96	72,07	104,51
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	13,4	2,16	3,48	160,54	0,96	265,3	55,25	72,46	131,14
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0	1,37	0,07	0,27	400,13	0	1,42	0,17	0,36	214,39
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0	9,6	1,88	2,68	142,49	0	3,73	0,35	0,84	242,45
Fe	0	1,85	0,59	0,58	98,71	0	0,34	0,06	0,09	147,42
Mn	0	4,39	0,64	1,21	190	0	5,19	0,39	1,16	294,16
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0	3,64	0,85	1,03	121,53	0	4,75	0,26	0,94	361,31
F <sup>-</sup>	0	0,7	0,18	0,23	128,57	0,05	0,97	0,5	0,22	43,97

**Tableau 2 : Présentation des valeurs des paramètres physico - chimiques des différents types eaux en haute saison**

Cl R	Eau de surface					Eau souterraine				
	Min.	Max.	Moy.	ET	CV(%)	Min.	Max.	Moy.	ET	CV(%)
T°C	25,6	30,7	27,79	2,01	7,25	25,8	31,1	28,1	2,11	7,5
pH	5,8	8,33	6,75	0,75	11,04	4,6	6,53	5,73	0,55	9,62
Turb.	0,22	56,6	9,62	14,19	147,61	0,15	9,46	1,05	1,94	185,07
CE	202	736	357,5	133,05	37,22	252	6380	1182,93	1318,29	111,44
Na <sup>+</sup>	11	96	41,05	21,94	53,45	36	1140	152,04	219,11	144,12
K <sup>+</sup>	5,6	20	9,62	3,69	38,33	1,1	90	11,56	19,62	169,71
Ca <sup>2+</sup>	22,4	52	31,05	6,51	20,96	8	132	47,58	32,65	68,63
Mg <sup>2+</sup>	2,4	43,2	8,87	7,43	83,71	1,92	129,6	17,08	24,57	143,87
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2,39	274,5	156,22	48,83	31,26	3,66	463,6	140,46	125,86	89,61
Cl <sup>-</sup>	2,11	140,3	39,73	39,66	99,82	25,02	445,48	137,8	120,79	87,66
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5,71	30,45	16,37	7,79	47,61	5,5	50,63	24,49	11,62	47,47
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0	2,02	0,53	0,56	106,01	0	180,38	20,7	40,24	194,36
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0	0,19	0,02	0,04	246,32	0	74,98	11,62	20,49	176,37
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0	19,42	2,97	5,14	173,17	0	8,74	0,83	2,03	245,33
Fe	0	0,89	0,22	0,26	115,67	0	0,67	0,03	0,13	382,95
Mn	0	0	0	0	0	0	5,1	0,69	1,23	178,48
PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0	1,84	0,51	0,56	109,51	0	9,3	0,44	1,74	398,32
F <sup>-</sup>	0	0,1	0,01	0,03	249,69	0	0,7	0,18	0,19	103,63

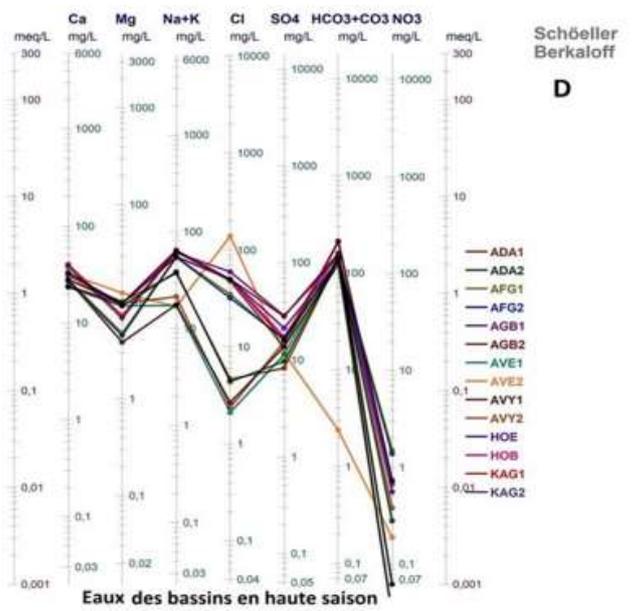
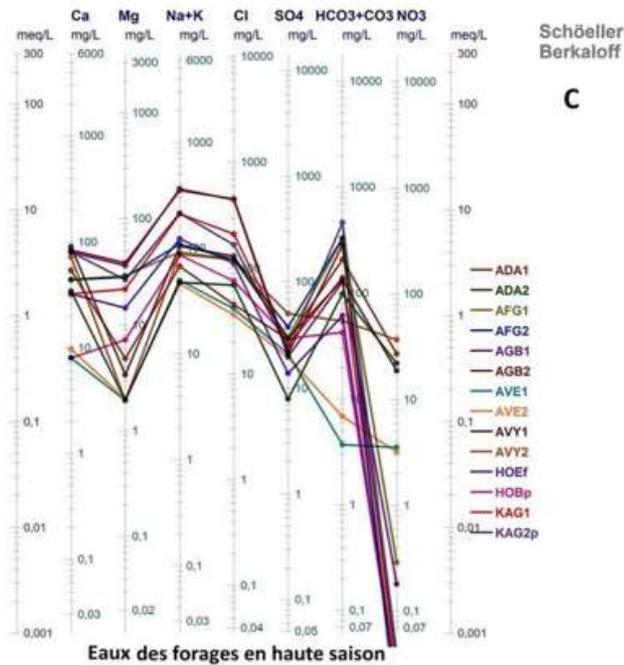
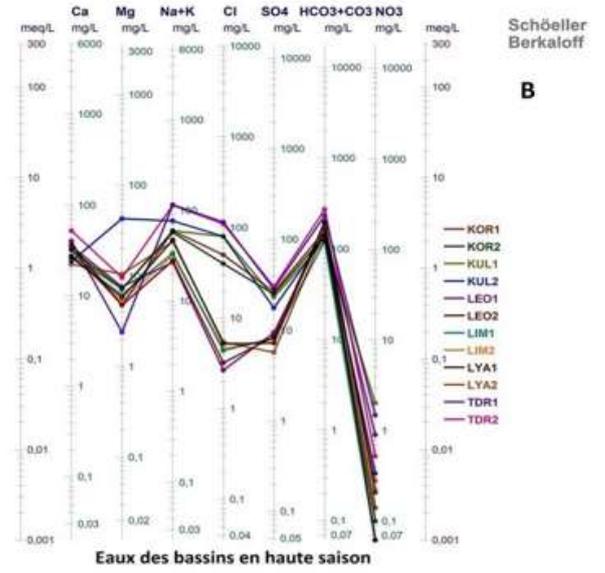
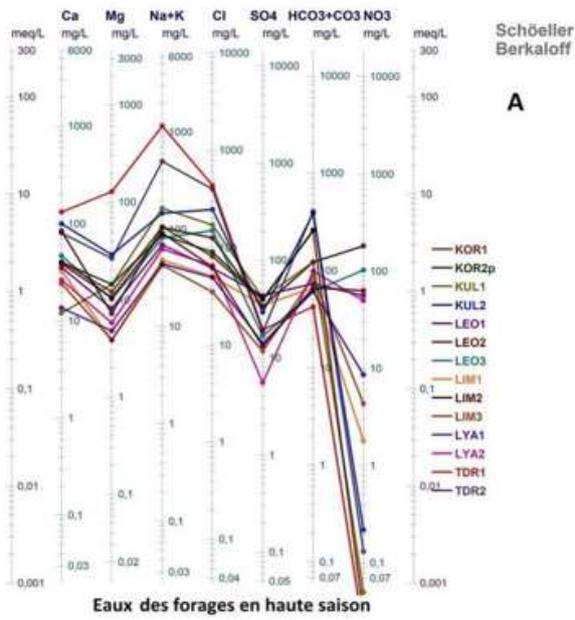
### 3-2. Faciès hydrochimiques

La forte prédominance des cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{Ca}^{2+}$ , est bien représentée par rapport aux autres ( $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ ). De même, cette forte prédominance est également observée chez les anions  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{Cl}^-$  dans les eaux de surfaces ou  $\text{Cl}^-$  et  $\text{HCO}_3^-$  dans les eaux souterraines par rapport aux autres ( $\text{SO}_4^{2-}$   $\text{NO}_3^-$ ). Ils sont bien représentés sur les diagrammes de Piper (**Figure 3**). L'ensemble des eaux étudiées, présente deux principaux faciès géochimiques : sodique potassique et calcique pour les cations ; bicarbonaté carbonaté chloruré dans les eaux de surfaces ou chloruré (influence marine) bicarbonaté carbonaté dans les eaux souterraines.



**Figure 3 :** *Faciès hydrochimique des deux types d'eaux en basse saison (A) et en haute saison (B)*

Pour mieux expliquer les teneurs des différents éléments chimiques dans le processus de distribution des ions dans les différentes eaux (surface et souterraine), le diagramme de berkalooff a été utilisé (**Figure 4**). Il confirme cette prédominance des faciès étudiés au niveau du diagramme de Piper (**Figure 3**). Pour chaque saison on a deux graphiques, du fait que le logiciel ne prenne en compte que quatorze éléments. Les graphiques sur l'échelle de graduation du diagramme des ions majeurs étudiés, montre une évolution des pics vers les  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$  et  $\text{Ca}^+$  à l'exception du  $\text{Mg}^{2+}$  qui présente un pic dans l'eau de surface KUL2 en haute saison ; pour les anions Ce pic évolue vers  $\text{HCO}_3^-$   $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{Cl}^-$ , avec une concentration moyennement élevée des  $\text{NO}_3^-$  des forages KOR1, LE01, LE02, LE03, LYA2. On note plus de parallélisme entre les axes des eaux de surface, ce qui montre que ces eaux subissent la même influence dans le processus de minéralisation [26]. Par contre, ces axes sont moins parallèles au niveau des eaux souterraines et se recoupent. Ceci montre que l'acquisition de la minéralisation dépend de la formation géologique du terrain traversé et de l'aquifère encaissant.



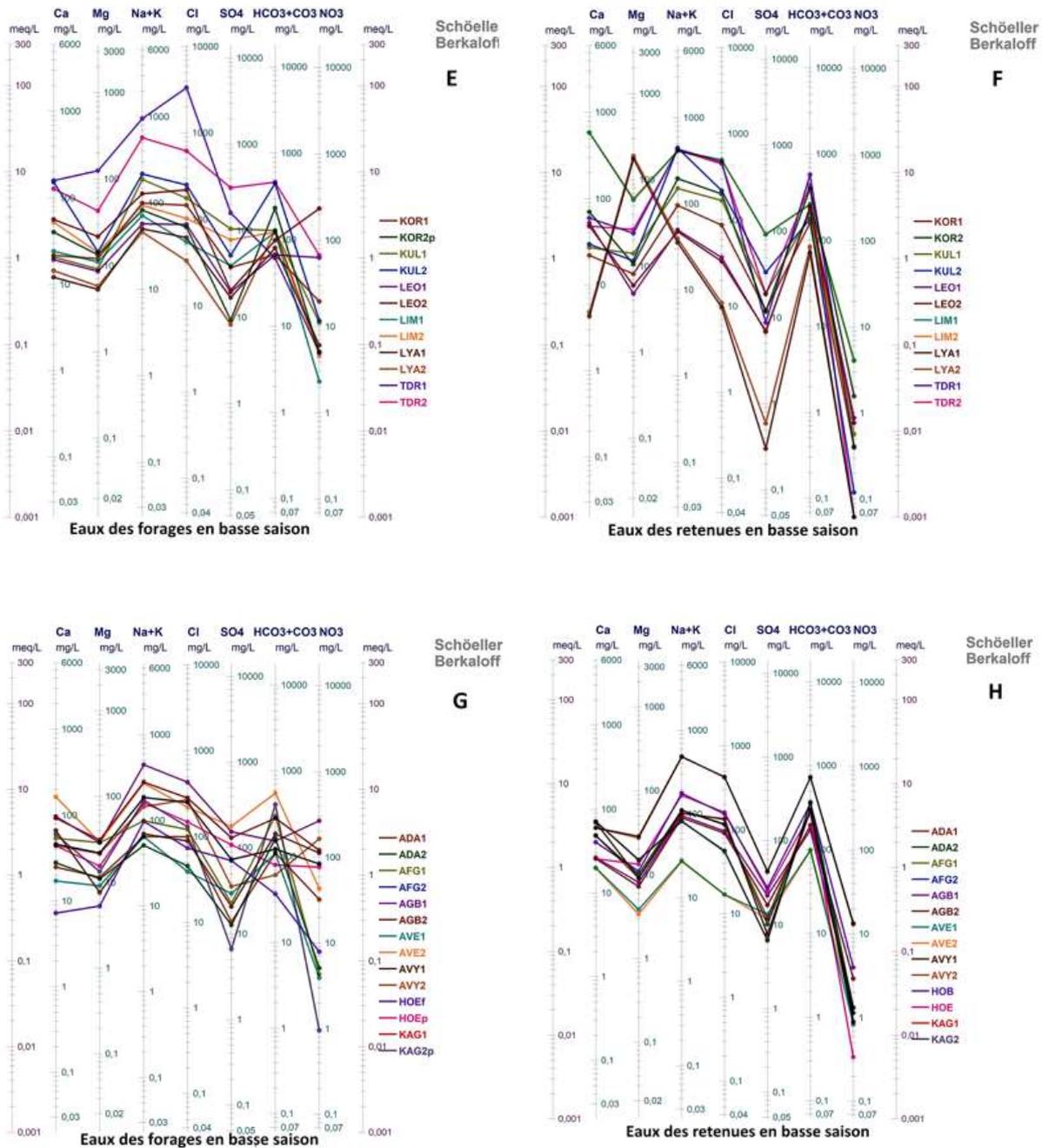


Figure 4 : Répartition des différents paramètres chimiques dans les eaux selon le diagramme de Berkaloff

### 3-3. L'analyse statistique par la matrice de corrélation de Pearson

La conductivité électrique des deux types d'eaux (surface et souterraine) est liée par une forte corrélation ( $r = 0,55$ ) (Tableau 4). La conductivité électrique des eaux de retenues montrent des corrélations avec des éléments chimiques suivants contenus dans les eaux de forages ( $Na = 0,49$ ,  $Ca = 0,51$ ,  $Mg = 0,61$ ,  $Cl = 0,73$  et  $SO_4 = 0,50$ ). Celle des eaux souterraines avec les ions  $HCO_3^-$  et les  $Cl^-$  des eaux de surface sont respectivement de 0,51 et 0,47, les chlorures et les magnésiums des deux types d'eaux ont une corrélation respective de 0,52 et 0,49 (Tableau 4). Ces résultats montrent que les ions majeurs qui déterminent la conductivité d'une eau proviennent majoritairement des eaux de surface, est totalement contrôlée par les ions dissouts, d'où ils acquièrent essentiellement leur minéralisation. La forte corrélation entre cation cation

ou anion anion d'eau de surface et souterraine (Na et Fe = 0,46 ; Na et Mg = 0,5; Cl et NO<sub>3</sub> = 0,61; SO<sub>4</sub> et NO<sub>3</sub> = 0,50 ; HCO<sub>3</sub> et Cl = 0,50 (**Tableau 3**), montre un phénomène de cations ou d'anions interchangeable pouvant maintenir l'équilibre entre le milieu intérieur et extérieur. Ces différents échanges entre les deux types d'eaux pourraient s'accompagner des phénomènes de pollution extérieure. Ce dernier groupe de corrélation de Na, Fe, Mg, de SO<sub>4</sub> de NO<sub>3</sub>, indique la contribution des activités anthropiques dans la minéralisation des eaux souterraines, à travers les eaux de surface. Elle met également en évidence le phénomène de minéralisation gouverné par l'infiltration des eaux de pluie dans les aquifères [26]. La corrélation entre les anions et cations ou inversement (HCO<sub>3</sub> Ca = 0,63), (HCO<sub>3</sub> Mg = 0,51) et (Mn et Ca = 0,48) des deux types d'eaux du bassin versant montre la formation des minéraux suivants avec leur formule chimique respective Kutnahorite magnésienne Ca(Mn,Mg)(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Dolomite (CaMg) (CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> ou Calcite CaCO<sub>3</sub>, Aragonite (CaCO<sub>3</sub>), Calcite (CaCO<sub>3</sub>), Gypse (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O). HCO<sub>3</sub> et K = 0,63; Fe et NO<sub>3</sub> = 0,57) K-Feldspar (KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) K-mica Kaolinite [(KAl<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>10</sub>(OH)<sub>2</sub>)(Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>)] Jarosite-K [(KFe<sub>3</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>(OH)<sub>6</sub>)]. La corrélation du (Mg et Cl = 0,53) signale la présence des minéraux ferromagnésien et du pyroxène [(Ca,Na,Mg,Li)(Mg,Fe,Ti,Al)(Si,Al)<sub>2</sub>O<sub>6</sub>] et la biotite [K(Mg,Fe)<sub>3</sub>(OH,F)<sub>2</sub>(Si<sub>3</sub>AlO<sub>11</sub>)] [26]. La corrélation entre les deux types d'eau du (Cl et Na = 0,43), signale également la présence des minéraux halites ou l'évaporite. La formation de ces minéraux dans les eaux de surface serait due aux phénomènes de pluviollessivage des sols ou par hydrolyse acide (70 % d'échantillons ont un P<sup>H</sup> < 6,5) qui favorise la dissociation de ces éléments se retrouvant dans les eaux souterraines par infiltration. La présence des éléments comme Fe<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et K<sup>+</sup> sont mis en solution par le phénomène d'oxydoréduction (forage LEO2). La géologie du milieu est dominée par les formations constituées principalement de granites, de gneiss et de schistes. L'hydrolyse de telles roches riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides explique la domination des teneurs en Ca<sup>2+</sup> et en Na<sup>+</sup> pour les cations dans les eaux souterraines. Ces ions sont issus de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux silicatés [27]. Contenu dans la structure des plagioclases, le calcium libéré, au cours de l'hydrolyse acide des plagioclases, évolue simultanément avec les bicarbonates dans les eaux selon la réaction 1 : 5(Na0.8,Ca0.2)(Al1.2Si2.8,08)+6H<sup>+</sup> + 19H<sub>2</sub>O → 3Al<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub>+4Na<sup>+</sup>+Ca<sup>2+</sup>+8H<sub>4</sub>SiO (1) [28, 29]. Cette réaction est marquée dans les deux types d'eaux (surface et souterraine) de corrélations respectives entre le Ca<sup>2+</sup> et le HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est r = 0,63 et r = 0,53. La minéralisation calcique, sodique, chloruré et carbonaté des deux types eaux de la nappe aquifère du continental terminal du bassin sédimentaire côtier (**Figure 4**) est sous l'influence du ruissellement dans les eaux de surface, de l'infiltration par des excédents pluviométriques ou pluies efficaces qui contribuent à la recharge de la nappe [2] et l'hydrolyse acide dans les eaux souterraines, des minéraux alumino-silicates, riches en Ca<sup>2+</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> comme l'anorthite selon la réaction 2: CaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> + 2H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O → Ca<sup>2+</sup> + 2HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + Al<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>(OH)<sub>4</sub> (2) [28, 29]. La prédominance des ions sodium et chlorure dans les eaux, serait due à l'intrusion marine, qui donne un goût salé aux eaux, ce qui montre une forte corrélation de Na et Cl : r = 0,82 dans l'eau de surface et r = 0,92 dans l'eau souterraine pendant la saison sèche. Par contre cette corrélation connaît une légère diminution et devient 0,69 dans l'eau souterraine et négative (0,02) dans l'eau de surface, due aux phénomènes de dilution par les eaux pluviales pendant la saison pluvieuse. Les éléments chimiques étudiés ont une distribution homogène autour de leur moyenne arithmétique dans les eaux de surfaces en haute saison. La conductivité électrique (37,22 %) et les ions majeurs qui déterminent la composition minéralogique d'une eau : les SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> des deux types d'eaux (47,61 % et 47,47 %), K<sup>+</sup> (38,33 %) et Ca<sup>2+</sup> (20,96 %) sont dûs au phénomène de pluviollessivage des formations géologiques traversés, ainsi que le P<sup>H</sup> (11,04) et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (31,26 %), ce qui montre que les ions bicarbonates régularisent le P<sup>H</sup> d'une eau (**Tableau 1 et 2**).

**Tableau 3 : Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico - chimiques des différents types eaux en basse saison**

	pH RB	pH FB	CE RB	CE FB	Na RB	Na FB	K RB	K FB	Ca RB	Ca FB	Mg RB	Mg FB	HCO3 RB	HCO3 FB	Cl RB	Cl FB	SO4 RB	SO4 FB	NO3 RB	NO3 FB	Fe RB	Fe FB	Mn RB	Mn FB	
pH RB	1,00																								
pH FB	0,00	1,00																							
CE RB	-0,27	0,07	1,00																						
CE FB	-0,02	-0,28	-0,10	1,00																					
Na RB	<b>0,62</b>	0,00	-0,19	-0,11	1,00																				
Na FB	0,00	-0,37	-0,12	<b>0,97</b>	-0,13	1,00																			
K RB	<b>0,63</b>	-0,01	-0,19	-0,10	1,00	-0,13	1,00																		
K FB	-0,08	0,19	0,25	-0,11	-0,05	-0,07	-0,06	1,00																	
Ca RB	<b>0,63</b>	-0,02	-0,19	-0,10	1,00	-0,13	1,00	-0,06	1,00																
Ca FB	-0,02	0,12	-0,01	<b>0,73</b>	-0,10	<b>0,63</b>	-0,10	-0,17	-0,10	1,00															
Mg RB	<b>0,97</b>	0,00	-0,26	0,00	0,47	0,03	0,47	-0,08	0,47	0,00	1,00														
Mg FB	-0,04	-0,19	-0,05	<b>0,94</b>	-0,06	<b>0,92</b>	-0,06	-0,10	-0,06	<b>0,66</b>	-0,03	1,00													
HCO3 RB	-0,23	0,42	<b>0,58</b>	-0,04	-0,12	-0,09	-0,13	<b>0,63</b>	-0,13	0,20	-0,23	0,04	1,00												
HCO3 FB	-0,06	<b>0,64</b>	0,02	0,16	-0,10	0,02	-0,10	-0,10	-0,10	<b>0,67</b>	-0,03	0,07	0,27	1,00											
Cl RB	<b>0,78</b>	-0,13	-0,19	0,02	<b>0,82</b>	0,03	<b>0,85</b>	-0,06	0,85	0,01	<b>0,64</b>	0,00	-0,17	-0,13	1,00										
Cl FB	-0,07	-0,32	-0,06	<b>0,92</b>	-0,08	<b>0,92</b>	-0,07	-0,08	-0,08	0,56	-0,06	<b>0,96</b>	-0,03	-0,08	-0,04	1,00									
SO4 RB	<b>0,56</b>	-0,06	-0,12	-0,01	0,63	-0,04	0,69	-0,04	0,69	-0,01	0,36	0,01	-0,11	-0,12	<b>0,83</b>	-0,02	1,00								
SO4 FB	-0,14	-0,16	0,05	<b>0,67</b>	-0,22	<b>0,67</b>	-0,21	-0,11	-0,22	<b>0,66</b>	-0,09	<b>0,53</b>	0,09	0,41	-0,08	0,42	-0,14	1,00							
NO3 RB	<b>0,80</b>	0,13	-0,20	-0,08	0,37	-0,11	0,41	-0,06	0,41	-0,06	<b>0,73</b>	-0,05	-0,17	-0,02	<b>0,50</b>	-0,07	<b>0,62</b>	-0,22	1,00						
NO3 FB	0,44	-0,32	-0,29	0,15	0,22	0,18	0,26	-0,14	0,26	0,18	0,40	0,06	-0,17	-0,11	<b>0,61</b>	-0,02	<b>0,50</b>	0,20	0,21	1,00					
Fe RB	<b>0,92</b>	-0,05	-0,22	0,06	0,31	0,09	0,35	-0,07	0,35	0,05	<b>0,91</b>	0,01	-0,21	-0,05	<b>0,68</b>	-0,03	<b>0,55</b>	-0,04	<b>0,80</b>	<b>0,57</b>	1,00				
Fe FB	0,17	0,16	0,25	-0,29	<b>0,46</b>	-0,28	0,42	0,35	0,42	-0,20	0,16	-0,24	0,39	0,01	0,14	-0,21	-0,07	-0,13	-0,01	-0,32	-0,10	1,00			
Mn RB	<b>0,56</b>	0,21	-0,15	-0,09	-0,05	-0,10	-0,05	-0,04	-0,05	-0,07	<b>0,64</b>	-0,06	-0,12	0,07	-0,05	-0,07	-0,04	-0,17	<b>0,76</b>	-0,14	<b>0,56</b>	0,05	1,00		
Mn FB	0,29	-0,20	-0,16	0,30	-0,10	0,34	-0,10	-0,07	-0,10	0,40	0,39	0,12	-0,18	0,18	0,26	0,14	-0,07	0,20	-0,10	0,41	0,43	-0,21	-0,07	1,00	

..... : Valeurs correspondant aux corrélations entre eaux de surface et eaux souterraines

-----: Valeurs correspondant aux corrélations corrélation entre les eaux de surface ou entre les eaux souterraines

Tableau 4 : Matrice de corrélation de pearson des paramètres physico - chimiques des différents types eaux en haute saison

	pH FH	pH RH	CE FH	CE RH	Na FH	Na RH	K FH	K RH	Ca FH	Ca RH	Mg FH	Mg RH	HCO3 FH	HCO3 RH	Cl FH	Cl RH	SO4 FH	SO4 RH	NO3 FH	NO3 RH	Fe FH	Fe RH	Mn FH	Mn RH	
pH-FH	1,00																								
pH-RH	-0,08	1,00																							
CE-FH	-0,32	-0,06	1,00																						
CE-RH	-0,08	-0,17	<b>0,55</b>	1,00																					
Na-FH	-0,35	-0,03	<b>0,83</b>	<b>0,49</b>	1,00																				
Na-RH	-0,09	-0,02	0,03	0,07	-0,01	1,00																			
K-FH	0,27	0,22	-0,24	-0,24	-0,13	-0,10	1,00																		
K-RH	-0,17	-0,07	-0,15	0,01	-0,15	0,29	-0,34	1,00																	
Ca-FH	-0,03	-0,11	<b>0,71</b>	<b>0,51</b>	<b>0,58</b>	0,22	-0,42	0,04	1,00																
Ca-RH	-0,08	1,00	-0,06	-0,17	-0,03	-0,02	0,22	-0,07	-0,11	1,00															
Mg-FH	-0,25	-0,04	0,89	<b>0,61</b>	<b>0,91</b>	0,06	-0,20	-0,14	<b>0,73</b>	-0,04	1,00														
Mg-RH	-0,19	<b>0,68</b>	0,39	0,19	<b>0,50</b>	-0,03	0,08	-0,08	0,25	<b>0,69</b>	<b>0,49</b>	1,00													
HCO3-FH	0,43	-0,11	0,15	0,16	-0,02	0,25	-0,23	0,00	<b>0,53</b>	-0,11	0,14	-0,06	1,00												
HCO3-RH	0,03	-0,15	<b>0,51</b>	<b>0,75</b>	0,39	0,11	-0,34	-0,02	<b>0,63</b>	-0,15	<b>0,51</b>	0,23	0,43	1,00											
Cl-FH	-0,15	-0,03	<b>0,76</b>	<b>0,73</b>	<b>0,69</b>	0,04	-0,13	-0,12	<b>0,62</b>	-0,03	<b>0,80</b>	0,19	0,09	<b>0,50</b>	1,00										
Cl-RH	-0,20	0,12	<b>0,47</b>	<b>0,86</b>	0,43	-0,02	-0,20	0,06	0,42	0,12	<b>0,53</b>	0,46	0,18	<b>0,63</b>	<b>0,52</b>	1,00									
SO4-FH	0,09	0,01	<b>0,51</b>	<b>0,50</b>	0,22	-0,04	-0,01	-0,17	<b>0,50</b>	0,01	0,42	0,09	0,27	0,44	<b>0,67</b>	0,39	1,00								
SO4-RH	-0,08	1,00	-0,06	-0,17	-0,03	-0,02	0,22	-0,07	-0,11	1,00	-0,04	<b>0,68</b>	-0,11	-0,15	-0,03	0,12	0,01	1,00							
NO3-FH	0,39	-0,02	-0,04	0,00	-0,03	-0,02	-0,09	-0,08	-0,12	-0,02	-0,03	-0,04	0,16	0,18	-0,01	-0,09	-0,02	-0,02	1,00						
NO3-RH	0,18	-0,07	-0,01	0,41	0,01	-0,08	0,27	0,01	-0,03	-0,07	0,06	0,18	0,11	0,28	0,05	0,48	0,11	-0,07	-0,07	1,00					
Fe-FH	0,06	0,00	-0,10	-0,07	-0,05	-0,04	0,26	-0,13	-0,14	0,00	-0,09	-0,03	-0,04	-0,18	-0,09	-0,04	0,00	0,00	-0,02	-0,06	1,00				
Fe-RH	-0,08	1,00	-0,06	-0,17	-0,03	-0,02	0,22	-0,07	-0,11	1,00	-0,04	<b>0,68</b>	-0,11	-0,15	-0,03	0,12	0,01	1,00	-0,02	-0,07	0,00	1,00			
Mn-FH	-0,02	0,48	-0,08	-0,01	-0,03	-0,03	0,42	-0,15	-0,22	<b>0,48</b>	-0,13	0,30	-0,11	0,03	-0,05	0,15	0,06	<b>0,48</b>	-0,05	0,10	-0,05	<b>0,48</b>	1,00		
Mn-RH	-0,08	1,00	-0,06	-0,17	-0,03	-0,02	0,22	-0,07	-0,11	1,00	-0,04	<b>0,68</b>	-0,11	-0,15	-0,03	0,12	0,01	1,00	-0,02	-0,07	0,00	1,00	<b>0,48</b>	1,00	

..... : Valeurs correspondant aux corrélations entre eaux de surface et eaux souterraines

-----: Valeurs correspondant aux corrélations corrélation entre les eaux de surface ou entre les eaux souterraines

#### 4. Conclusion

La présente étude contribue à la connaissance des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et de surface dans la zone lagunaire de Lomé. Elle se propose de déterminer l'origine et les processus de minéralisation de ces eaux. Elles sont de bonne qualité même si l'on note une certaine pollution par les nitrates d'origine anthropique. Les eaux de surface sont douces et faiblement minéralisées, à l'exception de la retenue TDR1 (5660  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La forte minéralisation des eaux souterraines serait due aux phénomènes de pluviolésivage, des formations traversées et des roches encaissantes. Le pH des eaux dans l'ensemble sont acides et légèrement neutres. L'ensemble des eaux peuvent être réparties en deux principaux hydrofaciès : sodique potassique et calcique pour les cations ; bicarbonaté carbonaté chloruré dans les eaux de surfaces ou chloruré bicarbonaté carbonaté dans les eaux souterraines. La matrice de Pearson a montré d'importante corrélation ( $r = 0,53$  et  $0,63$ ) entre les deux types d'eau et ( $r = 0,82$  et  $0,92$ ) en eau souterraine et de surface. Les études isotopiques sont en perspective pour comprendre d'avantage les interactions entre les eaux souterraines et de surface de la zone d'étudiée.

#### Références

- [1] - DGSCN, Rapport sur les résultats du 4<sup>ème</sup> Recensement Général de la Population et de l'Habitat (4<sup>ème</sup> RGPH, 2010). Bureau central du recensement (Togo), (2011) 65 p.
- [2] - M. D. T. GNAZOU, B. E. SABI, P. Y. D. Da COSTA, M. S. TAIROU, *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, Série A, 17 (3) (2015) 13 - 23
- [3] - A. AKOUVI, M. DRAY, S. VIOLETTE, G. H. de MARSILY et G. M. ZUPPI, *Hydrogeology Journal*, 16 (2008) 419 - 436
- [4] - F. SOUID, B. AGOUBI, F. TELAHIGUE, A. CHAHLAOUI et A. KHARROUBI, *Journal of African Earth Sciences*, 138 (2018) 233 - 246, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2017.11.013
- [5] - E. KALBUS, F. REINSTORF et M. SCHIRMER, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10 (6) (2006) 873 - 887, doi: 10.5194/hess-10-873-2006
- [6] - B. KAMAGATE, A. MARIKO, L. SEGUIS, A. DAO, H. BOKAR et D. L. GONE, *IAHS*, 340 (2010) 365 - 373
- [7] - N. MOUKOLO, "Etat de connaissances actuelles sur l'hydrogéologie du Congo", *Journal Hydrogéologie*, 1 - 2 (1992) 47 - 58
- [8] - O. F. ESSOULI "Impact de la décharge publique du lac Mbeubeuss sur les ressources en eau de l'aquifère des sables quaternaires de Thiaroye (Dakar, Sénégal)", Thèse de doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, université C.A.D., Sénégal, (2005)
- [9] - A. SAKO, O. BAMBA et A. GORDIO, *Journal of Geochemical Exploration*, 170 (2016) 58 - 71, doi: 10.1016/j.gexplo.2016.08.009
- [10] - C. BAKOUAN, B. GUEL et A.-L. HANTSON, *Afrique Science*, 13 (6) (2017) 325 - 337
- [11] - R. Simler, *Logiciel d'hydrochimie*. (2005) <http://www.lha.univ-avignon.fr/logiciel.htm>
- [12] - AFNOR, "Eaux : méthode d'Essai. Directive relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine" ; directive 80/777/ CEE du 15 juillet 1980. Ed Afnor Paris, (1997) 624 p.
- [13] - J. Rodier, "L'analyse de l'eau : eaux naturelles ; eaux résiduaires, eaux de mer" ; 8<sup>ème</sup> édition, Paris, (2009) 1383 p.
- [14] - M. AYAH, " Contribution des apports anthropiques dans la pollution d'un hydrosystème lagunaire subtropical : hydrogéochimie du système lagunaire de Lomé (Togo) ", Thèse de doctorat, Université de Lomé, FDS/UL (2016) 204p+annexes
- [15] - C. MILLOGO, C. BAKOUAN, S. SAWADOGO et S. NAKOLEDOUSSE, *Afrique Science*, 17(5) (2020) 137 - 150

- [16] - B. ISSOUFOU OUSMANE, M. S. ABDOU BABAYE, Y. NAZOU MOU, G. FAVREAU, R. ABDOU MAHAMAN et M. S. ISSOUFOU ABOUBACA, *Afrique Science*, 20 (1) (2022) 56 - 70
- [17] - G. K. NYASSO GBO, "la zone lagunaire de Lomé : problèmes de dégradation de l'environnement et assainissement", Note publique d'information, Université de Lomé(TOGO), FSHS/UL (2010) 20 p.
- [18] - A. B. BLIVI, Communication en Nairobi (2005), REDDA/ RIOD/ UNCCD. 9 p.
- [19] - S. OUANDAOGO/YAMEOGO, " Ressources en eaux souterraines du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso Qualité et vulnérabilité ", Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Avignon, (2008) 254 p.
- [20] - A. A. MAHAMANE et B. GUEL, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, (1) (2015) 517 - 533
- [21] - S. G. EBLIN, A. P. G. SOMBO SORO, N. AKA, O. MBIRÉ et N. ORO, *Journal of Applied Biosciences* (2014) 75, 6259 - 6271 ISSN 1997 - 5902
- [22] - K. P. ESSOULI, " Contribution à l'étude hydrochimique des eaux souterraines exploitées dans la partie nord de Brazzaville : Origine de la minéralisation et qualité physico-chimique et bactériologique ", Mémoire de Master des Géosciences, Faculté des Sciences et Techniques Université Marien NGOUABI de Brazzaville(Congo), (2017)
- [23] - S. OUANDAOGO/YAMEOGO, B. BLAVOUX, J. NIKIEMA et A. N. SAVADOGO, *Revue des sciences de l'eau*, 26 (3) (2013) 171 - 191
- [24] - L. TAMPO, M. GNAZOU, V. AKPATAKU, L. BAWA, G. DJANEYE-BOUNDJOU, Y. NUTO, A. OUEDA et W. GUENDA, *European Scientific Journal*, 11 (14) (2015) 204 - 225
- [25] - OMS, " Directives de qualité pour l'eau de boisson ". Quatrième édition. Publication Organisation mondiale de la Santé, Genève, Suisse (2011) 307 - 447
- [26] - K. E. AHOUSI, N. SORO, Y. B. KOFFI, G. SORO et J. BIEMI, *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4(3) (2010) 782 - 797, <http://ajol.info/index.php/ijbcs>
- [27] - A. L. MARQUÉS, L. RIBEIRO, N. ROQUEÑÍ, J. J. FERNÁNDEZ et J. LOREDO, *Journal of Geochemical Exploration*, 191 (2018) 43 - 53
- [28] - J. F. VERNOUX, J. LIONS, E. PETELET-GIRAUT, J. J. SEGUIN et P. STOLLSTEINER, " Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystème terrestres associés en lien avec la DCE", Rapport final, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans - France, BRGM/RP-57044-FR, (2010) 235 p.
- [29] - G. BOGUIDO, M.D. T. GNAZOU1, R. TRABELSI, L. TAMPO, M. AYAH, K. ZOUARI, L. M. BAWA, G. DJANEYE-BOUNDJOU " *International Advance Journal of Engineering Research (IAJER)*" Volume 3, Issue 3 (2020), PP 01-19 ISSN: 2360-819X [www.iajer.com](http://www.iajer.com)