



**Original Paper**

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

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

## Caractérisations hydrogéochimiques et qualités des eaux de la nappe phréatique du haut bassin versant de la Korama, commune de Droum /région de Zinder (Niger /Afrique de l'Ouest)

Issa Malam Salmanou SOULEYMANE<sup>1,4\*</sup>, Maman Sani ABDU BABAYE<sup>2</sup>,  
Illias ALHASSANE<sup>3</sup> et Ousmane BOUREIMA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Université de Zinder, Faculté des Sciences et Techniques, Département des Sciences Géologiques et Environnementales, Zinder, Niger.

<sup>2</sup>Université Dan Dicko Dankoulodo, Faculté des Sciences et Techniques, UMR SERMUG, Département de Géologie, Maradi, Niger.

<sup>3</sup>Université d'Agadez, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Agadez, Niger.

<sup>4</sup>Université Abdou Moumouni de Niamey, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger.

\*Auteur correspondant ; E-mail: [souleyissa6@gmail.com](mailto:souleyissa6@gmail.com)

### RESUME

La Commune de Droum, zone d'étude, est située entre 13°23' et 13°48' de latitude Nord, 8°39' et 9°1' de longitude Est. Elle dispose de trois aquifères, dont l'aquifère phréatique des sables récents ayant de hautes potentialités en eau souterraine. Cet aquifère est très sollicité pour l'approvisionnement en eau de boisson, l'abreuvement des animaux et l'irrigation qui est en pleine expansion. Or, il est très sensible à la pollution anthropique en raison de sa faible profondeur. L'objectif de cette étude est de caractériser cet aquifère du point de vue hydrogéochimique et de l'aptitude de ces eaux à la consommation humaine et à l'irrigation. La méthodologie appliquée fait appel aux approches hydrochimiques classiques, à l'Analyse en Composante Principale (ACP) et aux techniques d'évaluation de la qualité des eaux pour l'irrigation (SAR / USSL, %Na / Wilcox, RSC). Les résultats montrent que 45% des eaux échantillonnées sont de faciès chloruré calcique et magnésien (CaMgCl), 33% de faciès bicarbonaté calcique (CaHCO<sub>3</sub>) et 22% de faciès chloruré calcique (CaCl). Les deux principaux mécanismes hydrogéochimiques qui se sont révélés être à l'origine de l'acquisition des ions conduisant à ces différents faciès sont l'interaction eau-roche et les précipitations. Le rapprochement des résultats analytiques normes de l'OMS (2011), indique que les eaux étudiées sont en majorité de bonne qualité pour tous les ions considérés. Néanmoins quelques échantillons présentent des teneurs en NO<sub>3</sub>, Fe, et F dépassant leurs normes respectives. Les taux de Na (%Na), les valeurs du SAR et le positionnement des échantillons sur le diagramme de Wilcox indiquent que les eaux sont excellentes pour l'irrigation.

© 2020 International Formulae Group. All rights reserved.

**Mots clés :** Hydrogéochimie, Socle, irrigation, Climat aride, Continental Intercalaire /Hamadien.

### ABSTRACT

The Droum commune, study area, is located between latitude 13 ° 23 'and 13 ° 48' N, and between 8 ° 39 'and 9 ° 1' East. It has three aquifers, including the aquifer of recent sands with high potential in groundwater. This aquifer is in great demand for the supply of drinking water, animal watering and irrigation which is in full

expansion. However, this aquifer is very sensitive to anthropogenic pollution because of its shallow depth. The objective of this study is to characterize this aquifer from the hydrogeochemical point of view and the suitability of these waters for human consumption and irrigation. The methodology applied uses classical hydrochemical approaches, Principal Component Analysis (PCA) and techniques assessing the water quality for irrigation (SAR/USSL, %Na/Wilcox, RSC). The results show that 45% of the waters are calcium chlorides and magnesium facies (CaMgCl), 33% calcium bicarbonate facies (CaHCO<sub>3</sub>) and 22% calcium chlorides facies (CaCl). Two main hydrogeochemical mechanisms which have been shown to be at the origin of the acquisition of the ions leading to these different facies are the water-rock interaction and the atmospheric precipitations. The comparison of analytical results with the WHO standard (2011) indicates that most the waters studied are mostly of good quality for all ions considered. However, some samples have levels of NO<sub>3</sub>, Fe, and F exceeding the norm. The Na levels (% Na), the SAR values and the Wilcox diagram indicate that the waters are excellent for irrigation. © 2020 International Formulae Group. All rights reserved.

**Keywords:** Hydrochemistry, Socle, irrigation, Arid Climate, Continental Intercalary/Hamadien Niger.

## INTRODUCTION

Le haut bassin versant de la Korama, Commune de Droum / Région de Zinder, dispose d'importantes ressources en eau de surface et souterraine. Au cours de ces dernières décennies, cette région a été affectée par des sécheresses récurrentes qui ont eu des impacts négatifs sur son écosystème (Issa Malam Salmanou et al., 2018). Par ailleurs, la région a connu une démographie galopante ayant eu pour corollaire l'extension des zones de cultures et de l'habitats et ainsi que d'autres actions anthropiques. Toutes ces actions ont été dévastatrices sur l'écosystème (Issa Malam Salmanou et al., 2018). Elles pourraient avoir également des incidences sur les ressources en eau souterraine en termes de quantité et de qualité. En effet, de nombreuses études à travers le monde ont mis en évidence l'impact des sécheresses et de l'évolution démographique sur les ressources en eaux (Bi Tié et al., 2006) et particulièrement sur leur qualité (Scanlon et al., 2006; Farid et al., 2012; Belkhiri et al., 2014; Sathy et al., 2016; Adithya et al., 2016). Dans les bassins versants de N'Zo et N'Zi en Côte-d'Ivoire, les variabilités climatiques ont créé un écart défavorable entre la demande croissante en eau potable et les ressources en eau disponibles (Bi Tié et al., 2006). Cependant, dans les régions du Sud-Ouest américain, la variabilité climatique se traduit par une recharge jusqu'à trois fois plus importante pendant les périodes de

l'oscillation australe EL Niño (ENSO) que pendant les périodes dominées par la Niñas (Scanlon et al., 2005). Dans la région du socle précambrien du Liptako, au Sud-Ouest du Niger, l'impact du développement agricole et industriel sur la qualité des eaux souterraines a été également immédiat et énorme. La protection de ces eaux contre la contamination reste donc un défi majeur (Abdou Babaye et al., 2018). C'est connu que, l'eau souterraine évolue chimiquement en raison de son interaction avec les minéraux de l'aquifère ou de celle entre les différents aquifères par drainance et/ou flux latéral. C'est pourquoi, face à la variabilité climatique et à la croissance démographique que connaît la région d'étude depuis plusieurs années, une analyse des impacts de ces phénomènes sur la qualité des ressources en eau s'impose. C'est dans

cet ordre d'idée que ce travail a été mené, avec pour objectif caractériser les eaux de la nappe phréatique du haut bassin versant de la Korama sur le plan hydrogéochimique. Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- Identifier les facies chimiques des eaux de la nappe phréatique;
- Déterminer les facteurs responsables de la minéralisation de ces eaux souterraines;
- Evaluer l'aptitudes des eaux souterraines pour la consommation humaine;
- Apprécier l'aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation.

## MATERIEL ET METHODES

### Présentation de la zone d'étude

La commune de Droum, notre zone d'étude occupe le haut bassin versant de la Korama, située au Sud de la région de Zinder dans le département de Mirriah et s'inscrit entre 13°23' et 13°48' de latitude Nord et 8°39' et 9°1' de longitude Est (Figure. 1). Elle couvre une superficie de 870 km<sup>2</sup>, avec une population estimée à 102.306 habitants, dont la densité est de 118 habitants/km<sup>2</sup> (INS, 2010). L'agriculture constitue la principale activité économique des populations, avec un degré d'utilisation de sol d'environ 93,3%, soit l'un de plus élevé au Niger (SNV, 2014). L'élevage occupe la seconde place. Le climat du bassin est de type Nord sahélien, il est caractérisé par deux saisons : une saison des pluies de Juin à Septembre et une saison sèche d'Octobre à Mai. Le module pluviométrique inter annuel sur la période 1921-2014 est de 344 mm.

Le contexte géologique de la commune est occupée au Nord-Est par des formations du Précambrien de Damagaram (Figure. 2), comprenant des granites hyperalcalins, des schistes, des micaschistes, des gneiss; à l'Ouest par les formations sédimentaires constituées de grès argileux du Continental Intercalaire Hamadien (CI/H) et au Sud par les alluvions récentes de la Korama de la bordure ouest du bassin du Lac Tchad. L'hydrogéologie du haut bassin de la Korama est marquée par la présence de trois aquifères à savoir : l'aquifère de socle du Damagaram, essentiellement constitué par des formations granitiques et est caractérisé par de débit faible ne dépassant guère 3 à 5 m<sup>3</sup>/h avec de rabattement très importants ; l'aquifère multicouche du CI/H caractérisé par la prédominance des grès argileux ou d'argiles sableuses, présente de coefficient de transmissivité variant entre 1.2x10<sup>-3</sup> à 6.10<sup>-5</sup>m<sup>2</sup>/s et l'aquifère des alluvions du Quaternaire et des sables récents de Korama, son réservoir constitué par des sables éoliens et des alluvions sablo-limoneuses, pouvant contenir localement des éléments grossiers de quartz (gravier, gros sable) et son épaisseur inférieure à 10 mètres dans sa partie ouest, où il repose en mince couche sur la partie captive du Continental Hamadien. Cet aquifère

alluvionnaire de profondeur de niveau statique très faible (0 à 20 m), est le plus sollicité pour l'approvisionnement en eau de la population dans la zone d'étude.

### Méthodes

#### Echantillonnage et analyse chimique

Les ouvrages sélectionnés (puits et forages) pour les prélèvements d'échantillons pour les analyses des paramètres physicochimiques sont au nombre de 18. Ils ont été choisis en vue de représenter de façon spatiale l'ensemble de l'aquifère.

Au cours de cette campagne, les paramètres physiques des eaux ont été mesurés *in situ* sur les eaux prélevées à l'aide d'une puisette ou des robinets des bornes fontaines. Ensuite, les reliquats des eaux ont servi à remplir les flacons plastiques en polyéthylènes de 1L et de 500 mL après leurs rinçages. Ces flacons sont étiquetés, fermés et placés dans une glacière pour être transportés jusqu'au laboratoire.

Les éléments majeurs (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>) et des éléments mineurs (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, Fe<sup>3+</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ont été analysés aux laboratoires de la direction régionale de l'hydraulique de Zinder et de l'Ecole Normale Supérieure de l'UAM selon les techniques suivantes :

- Les ions Calcium (Ca<sup>2+</sup>) et Magnésium (Mg<sup>2+</sup>) sont déterminés par titrimétrie avec comme réactifs spécifiques le calver 2 dans le cas du Ca<sup>2+</sup> et le Hard 9 pour le cas de Mg<sup>2+</sup>. Les valeurs de Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup> sont par la suite, vérifiées par la détermination de la dureté totale, la dureté calcique et par déduction, la dureté magnésienne ;
- Les ions Potassium (K<sup>+</sup>) et Sodium (Na<sup>+</sup>) ont été obtenus par photométrie à flamme avec un spectrophotomètre de type JENWAY PFP7;
- La méthode spectrophotométrique a été employée pour déterminer les ions fer (Fe<sup>2+</sup> et Fe<sup>3+</sup>), nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), fluorures (F<sup>-</sup>), sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) et chlorures (Cl<sup>-</sup>). L'appareil utilisé est le spectrophotomètre DR 2800 et les

différents réactifs sont respectivement : fer rover, nitraver5, nitriver3, SPDNS, sulfaver, mercuric thiocyanate + ferric ion solution.

**Traitements des données**

Les valeurs moyennes et les écarts types des paramètres physiques des eaux ont été déterminés afin de comparer les différentes eaux. Puis, un contrôle de la qualité des résultats analytiques des paramètres chimiques a été effectué à l'aide de la balance ionique. Celle-ci est donnée par l'expression suivante :

$$BI = \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \times 100 \quad (1)$$

Les cations et les anions sont en milliéquivalent par litre (még/l).

Cependant, compte tenu des nombres des éléments chimiques analysés et les faibles concentrations de ces éléments, certains auteurs (Favreau, 2000 ; Guero, 2003) considèrent que les résultats analytiques peuvent être considérés comme fiables pour une valeur de la balance ionique ± 10 %.

Dans le cadre de ce travail, deux méthodes de représentation graphiques ont été utilisées : les diagrammes de Piper, et de l'Analyse en Composante Principale (ACP).

Par ailleurs, pour déterminer l'aptitude des eaux à la consommation humaine, les valeurs maximales des paramètres physicochimiques (pH, Conductivité, TH, TDS, ions majeurs et traces) des échantillons étudiés ont été comparées aux valeurs directives de l'OMS (2011) (Tableau 1).

• **Aptitudes des eaux à l'irrigation**

Dans le cadre de ce travail, plusieurs méthodes ont été employées pour l'évaluation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation :

- **Taux d'Adsorption de Sodium (SAR) et Diagramme de salinité (USSL)**

Le taux d'adsorption de sodium ou Sodium Adsorption Ratio (SAR) est calculé à partir de la formule (2) suivante (Todd 1980):

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}} \quad (\text{équation 2})$$

Le diagramme USSL (United State of Salinity diagramm) est élaboré à partir du taux d'adsorption de sodium (SAR) porté en ordonnée et du TDS ou la conductivité de l'eau en abscisse.

- **Pourcentage de Sodium (% Na) et Diagramme de Wilcox**

Le %Na est déterminé par la formule suivante (Todd, 1980) :

$$\%Na = \frac{(Na^+ + K^+) \times 100}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)}, \quad (\text{équation n°3})$$

Le Diagramme de Wilcox (Wilcox, 1955) est élaboré à partir des valeurs de %Na portées en ordonnée et celles de la conductivité électrique ou le TDS portées en abscisse

- **Carbonate de sodium résiduel ou Residual soduim carbonate (RSC)**

L'indice de carbonate de sodium résiduel (RSC) est déterminé à partir de l'expression suivante (Eaton, 1950) :

$$RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}), \quad (\text{équation n°4})$$

Les ions sont exprimés en még/l.

**Tableau 1** : Les paramètres physiques des eaux de la nappe phréatique.

Nappe	pH				T (°C)				C.E (µS/cm)			
	Min	Max	Moy	δ	Min	Max	Moy	δ	Min	Max	Moy	δ
Phréatique (n=18)	5,2	7,4	6,51	<b>0,29</b>	23,5	28,4	25,9	<b>1.1</b>	23,1	246	132,3	<b>63,9</b>

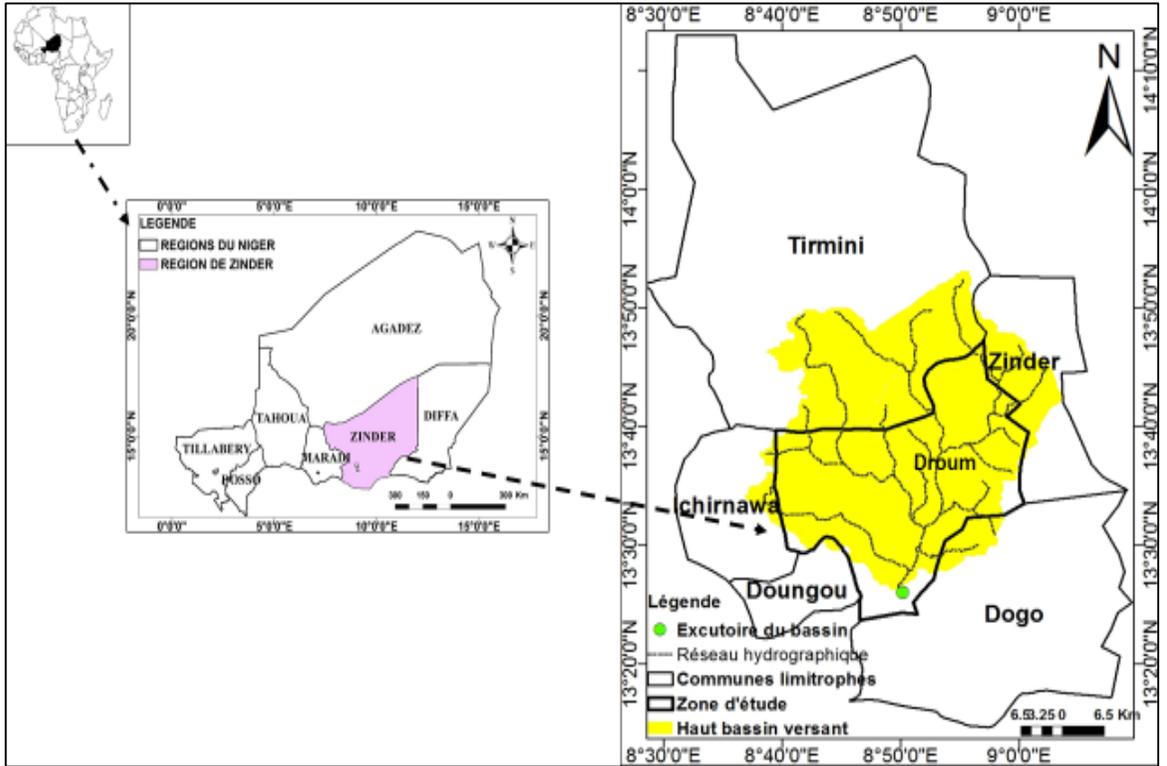


Figure 1: Situation géographique et administrative de la zone d'étude.

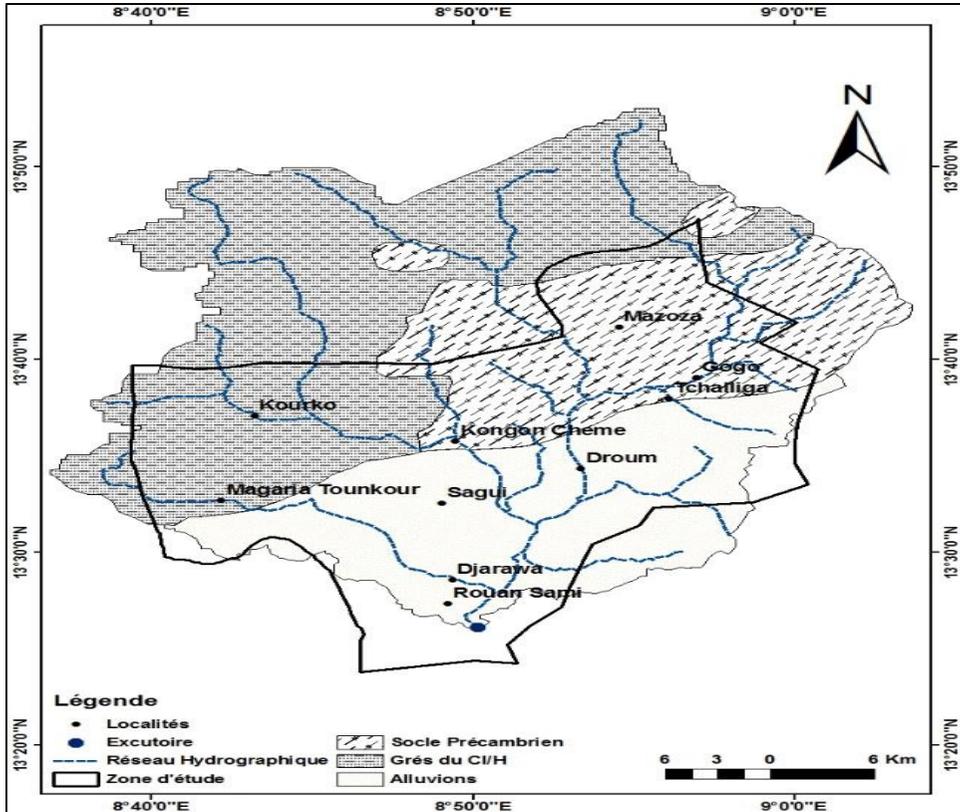


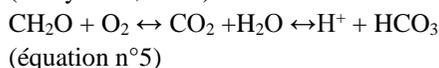
Figure 2: Géologie de la zone d'étude.

## RESULTATS

### Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Les températures des eaux de la nappe phréatique varient entre 23,5 et 28,4°C avec une moyenne de 25,9°C et un écart type de 1,14 (Tableau 1). Ces valeurs sont proches de celles des températures de l'air atmosphérique, ce qui permet de dire que cet aquifère est ouvert. Par ailleurs, on constate des variations saisonnières des températures des eaux souterraines qui suivent de près celles des températures de l'air atmosphérique (Abdou Babaye, 2010).

Les valeurs de pH dans cet aquifère varient entre 5,2 et 7,4 avec une moyenne de 6,51, pour un écart type de 0,29 (Tableau 1). Ces valeurs montrent en générale une tendance légèrement acide de ces eaux. Cette acidité est probablement liée à la combinaison entre le CO<sub>2</sub> libre et l'eau de pluie qui forment de l'acide carbonique, affectant ainsi à la baisse le pH de l'eau (Sethy et al., 2017). Par contre la consommation du CO<sub>2</sub> suite à l'hydrolyse des silicates entraîne l'augmentation de la basicité (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) des eaux (Abdou Babaye et al., 2016). Par ailleurs, quelques ouvrages montrent des valeurs de pH d'acide fort (< 6). Ce pH acide pourrait provenir de la décomposition de la matière organique présente dans le sol, sous l'action de l'oxygène, qui dégage du dioxyde de carbone lequel se dissout dans l'eau pour former l'acide carbonique suivant l'équation 5 (Sethy et al., 2017) :



La conductivité est de l'ordre de 23,1 µS/cm à 246 µS/cm avec une moyenne 132,3 µS/cm (Tableau 1). Ainsi, on constate qu'en générale les eaux de la nappe phréatique sont très peu minéralisées. Ceci résulte des faibles profondeurs de ces eaux dans l'aquifère (Sandao et al., 2018). Par ailleurs, on note une importante variation de la conductivité, avec un écart type de 63,9. Ces variations peuvent être liées à la diversité des processus géochimiques responsables de la minéralisation de ces eaux.

La classification chimique des eaux fait ressortir que le faciès de type chloruré calc-magnésien est prédominant (avec 45%) suivi du faciès bicarbonaté calcique avec 33% et

enfin le faciès de type chloruré calcique qui représente 22% des échantillons (Figure. 3).

### Analyse statistique multivariée

Pour étudier l'origine des éléments minéraux et les processus géochimiques responsables de la minéralisation des eaux souterraines, deux approches géochimiques ont été utilisées à savoir le calcul des corrélations (matrice des corrélations) bivariées, et l'analyse en composantes principales (ACP).

La matrice de corrélation bivariée relative à onze éléments physicochimiques fait ressortir (Tableau 2) ce qui suit:

- Le pH est bien corrélé avec le HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, le Ca<sup>2+</sup> et le K<sup>+</sup> mais décorrélié avec la pCO<sub>2</sub>.
- La C.E montre une corrélation moyenne avec les ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> et Na<sup>+</sup> (avec respectivement r<sup>2</sup> = 0,54 et 0,51), et une corrélation excellente avec le Ca<sup>2+</sup> (r<sup>2</sup> = 0,78) ;
- Enfin, le Ca<sup>2+</sup> est bien corrélé avec le SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> et le HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

L'analyse en composantes principales a été effectuée sur la base de ces onze éléments physicochimiques (Figure. 5a et 5b). La Figure 4 montre la répartition des valeurs propres des différentes composantes principales. Le critère de Kaiser a permis de déterminer les nombres de composantes principales représentatives de l'ensemble des données. Au total trois axes factoriels ou composantes principales ont été retenus F<sub>1</sub>, F<sub>2</sub> et F<sub>3</sub>. La variance exprimée par ces trois composantes est assez significative pour mettre en évidence le comportement des échantillons. Ainsi, la composante F<sub>1</sub> représentant 40,97% de l'inertie totale, montre des bonnes corrélations de la C.E, le SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, le HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, le Cl<sup>-</sup>, le Na<sup>+</sup>, le Ca<sup>2+</sup> et le Mg<sup>2+</sup> ; tandis que l'axe factoriel F<sub>2</sub> occupant 18,73% de la variance totale de données avec de fortes corrélations de pH, K<sup>+</sup> et pCO<sub>2</sub>. L'axe F<sub>3</sub> constitué de corrélation positive de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, représente 12,16% de l'inertie totale.

Le regroupement de la CE, le SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, le HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, le Cl<sup>-</sup>, le Na<sup>+</sup>, le Mg<sup>2+</sup> et le Ca<sup>2+</sup> sur l'axe F<sub>1</sub> (Figure 5a) indique que cet axe factoriel contrôle le processus majeur de la minéralisation des eaux de cet aquifère. Les corrélations élevées des ions HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>

et  $\text{Ca}^{2+}$  traduisaient la prédominance des altérations des minéraux silicatés (Figure. 5a).

Par ailleurs, les fortes concentrations observées des ions  $\text{Na}^+$  pourraient traduire les processus d'échanges d'ions dans la minéralisation des eaux souterraines. Tandis que, la présence des ions  $\text{Cl}^-$  dans les eaux souterraines peut être d'origine anthropique (activités agricoles, déchets domestiques), météorique (précipitations) et/ou géologique (l'altération des minéraux).

Le facteur  $F_2$  opposant la  $\text{pCO}_2$  au groupe  $\text{K}^+$  et pH pourrait traduire l'interaction eau-roche. L'axe  $F_3$  porte uniquement de  $\text{NO}_3^-$ , met en évidence l'apport anthropique dans la minéralisation des eaux souterraines (Figure. 5b). La présence de  $\text{NO}_3^-$  en quantité élevée dans la zone d'étude est essentiellement liée aux activités anthropiques.

#### **Aptitude des eaux à la consommation et à l'irrigation**

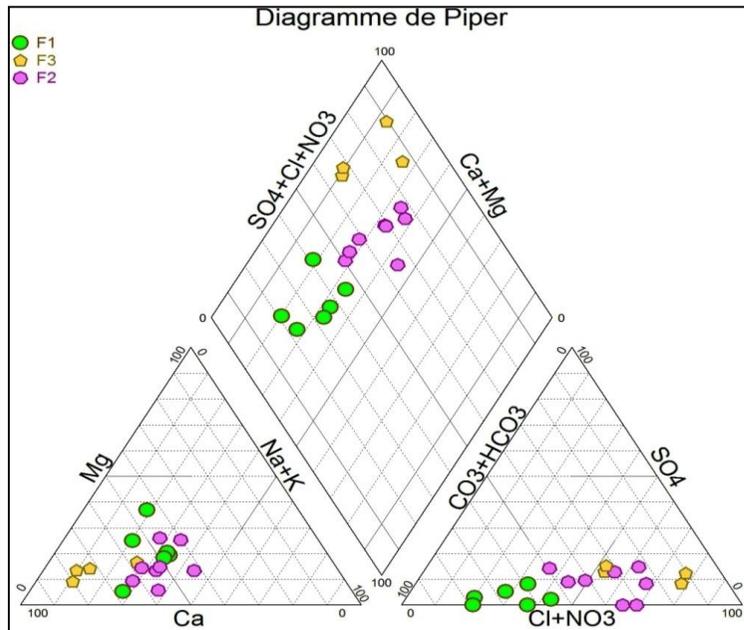
##### **Aptitude des eaux à la consommation humaine**

La comparaison des teneurs maximales des différents paramètres physicochimiques des eaux souterraines de la zone d'étude aux directives de l'OMS (2011) (Tableau 3) a permis de faire ressortir les observations suivantes :

- 28% et 5,55% des échantillons d'eaux ont respectivement des teneurs en nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) et en fluor ( $\text{F}^-$ ) supérieures aux normes OMS (2011) ;
- 33% échantillons d'eaux ont des teneurs élevées en fer ( $\text{Fe}$ ) qui sont supérieures à la norme OMS (2011) ;
- Enfin, plusieurs ouvrages ont des eaux dures (33%) et d'autres présentent de pH très acides (22%).

##### **Aptitude des eaux à l'irrigation**

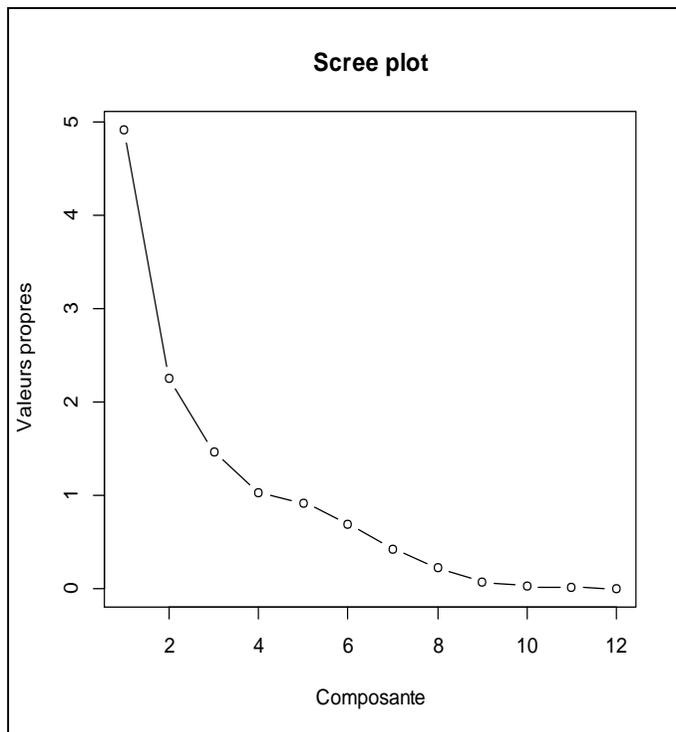
L'aptitude des eaux à l'irrigation est définie par plusieurs méthodes basées, d'une part sur le %Na vs conductivité (diagramme de Wilcox), d'autre part sur la SAR vs conductivité (diagramme USSL), mais aussi sur l'indice de carbonate de sodium (RSC). Les résultats sont présentés sur les Figures 6a et 6b et le Tableau 3. Ainsi, en se basant sur l'ensemble de ces méthodes on peut dire que toutes les eaux échantillonnées sont aptes à l'irrigation, à l'exception de l'échantillon du puits de Maygürgua dont la valeur de RSC est de 3,33 méq/l. De telles teneurs élevées de RSC dans les eaux entraînent la perturbation de la fertilité du sol et de la croissance des plantes (Brindha et al., 2013 in Chung et al., 2014).



**Figure 3 :** Faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique.

**Tableau 2:** Matrice de corrélation de Spearman.

	<i>pH</i>	<i>C.E</i>	<i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	<i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i>	<i>Cl<sup>-</sup></i>	<i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>	<i>Ca<sup>2+</sup></i>	<i>Na<sup>+</sup></i>	<i>K<sup>+</sup></i>	<i>Mg<sup>2+</sup></i>	<i>pCO<sub>2</sub></i>
<b>pH</b>	1,00										
<b>CE</b>	0,34	1,00									
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,07	0,19	1,00								
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	0,34	0,48	0,49	1,00							
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,02	0,42	-0,00	0,04	1,00						
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>0,66</b>	<b>0,54</b>	-0,32	0,30	0,12	1,00					
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>0,52</b>	<b>0,81</b>	0,24	<b>0,59</b>	0,44	<b>0,67</b>	1,00				
<b>Na<sup>+</sup></b>	0,23	<b>0,51</b>	0,05	0,25	0,37	0,36	0,35	1,00			
<b>K<sup>+</sup></b>	<b>0,53</b>	0,14	-0,11	-0,03	-0,00	0,49	0,38	0,11	1,00		
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	0,11	0,41	0,08	0,31	0,35	0,33	0,39	0,36	-0,05	1,00	
<b>pCO<sub>2</sub></b>	<b>-0,57</b>	-0,07	0,01	-0,10	0,11	-0,26	-0,14	-0,03	-0,42	-0,25	1,00



**Figure 4 :** Repartions des valeurs propres en fonction des composantes.

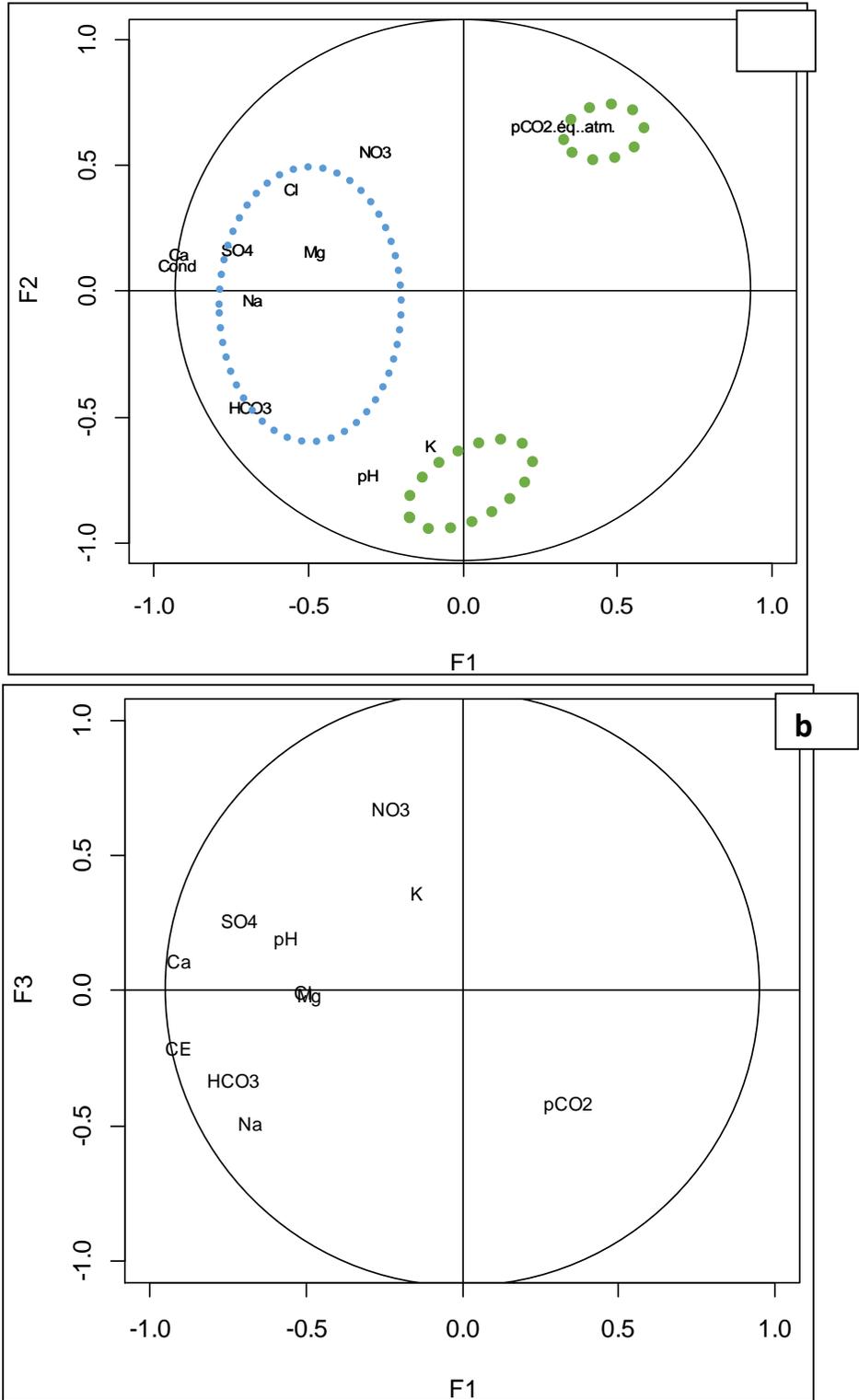


Figure 5 : Projection des variables dans le plan factoriel F<sub>1</sub>XF<sub>2</sub> (a) et F<sub>1</sub>XF<sub>3</sub> (b).

## DISCUSSION

### Origine et processus de la minéralisation des eaux

Les eaux souterraines sont caractérisées par une diversité de faciès. Celle-ci pourrait résulter de plusieurs mécanismes responsables de la minéralisation de ces eaux.

Pour discuter des origines des ions dans ces eaux, le rapport caractéristique  $\text{SO}_4^{2-}$  vs  $\text{Ca}^{2+}$  est, dans un premier temps, examiné (Figure .7). En effet, selon les équations stœchiométriques (équation 6), la dissolution du gypse libère une quantité de charges de  $\text{Ca}^{2+}$  égales à celles de  $\text{SO}_4^{2-}$  (Belkhir et al., 2014), par conséquent, le rapport  $\text{Ca}^{2+}$  vs  $\text{SO}_4^{2-}$  devrait être égal à 1.

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$   
(équation n°6).

La Figure 7 montre l'excès des ions  $\text{Ca}^{2+}$ , ce qui voudrait dire que ces ions semblent provenir d'autres processus que la dissolution des minéraux évaporitiques comme le gypse. Pour vérifier cette hypothèse, le rapport  $\text{HCO}_3^{2-}$  vs  $\text{Ca}^{2+}$  a été examiné (Figure. 8). On observe que la majorité des échantillons sont proches ou sur la droite d'équilibre. Ce qui veut dire que les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  sont issus de la dissolution des minéraux carbonatés. Pour , les points situés au-dessus de la droite d'équilibre, les ions  $\text{HCO}_3^-$  pourraient provenir d'une part, d'un processus de transformation de l'acide carbonique en bicarbonate, d'autre part une augmentation du processus d'hydrolyse des minéraux silicates qui produit le bicarbonate. Du bicarbonate peut être également produit suite à l'apport du  $\text{CO}_2$  par infiltration des eaux de précipitations, qui, par réaction d'hydrolyse des silicates permet d'une part la formation du  $\text{HCO}_3^-$  et d'autre part l'augmentation du pH en supposant une évolution en milieu fermé (Abdou Babaye et al., 2016).

Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  est, dans un deuxième temps, examiné (Figure. 9) :

- Quelques points sont proches voir situés sur la droite d'équilibre, suggérant que les

ions  $\text{Na}^+$  proviennent des eaux des précipitations;

- Par contre, la majorité de points sont situés au-dessus de la droite d'équilibre, traduisant l'excès du  $\text{Cl}^-$  par rapport au  $\text{Na}^+$ . Cet excès en  $\text{Cl}^-$  pourrait être d'origine anthropique avec les activités agricoles. En effet, la zone d'étude est caractérisée par une activité agricole intense avec emploi intensif de pesticides. Ces derniers seraient responsables de la présence de ces ions  $\text{Cl}^-$  dans les eaux. S'agissant du déficit en  $\text{Na}^+$ , il pourrait s'agir d'un phénomène d'échange de base de type cationique par lequel les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et/ou  $\text{Mg}^{2+}$  seraient libérés dans l'eau et les ions  $\text{Na}^+$  adsorbés (Capaccioni et al., 2005 ; Loukman et al., 2017).

Concernant l'origine des ions  $\text{K}^+$ , l'altération de roche entraîne la libération dans l'environnement des ions  $\text{K}^+$  à partir du feldspath potassique et du plagioclase qu'elles renferment (Prasanna et al., 2010). La corrélation entre le  $\text{K}^+$  et le pH et leur opposition avec la  $\text{pCO}_2$ , traduisent le fait que, lorsque le milieu est basique il y'a plus de  $\text{K}^+$ , mais quand le milieu est acide le  $\text{K}^+$  est produit certes, mais migre plus facilement (Issa Malam Salmanou, 2018).

### Détermination de l'origine des éléments indésirables

Dans les eaux de précipitations, les teneurs en  $\text{NO}_3^-$  se sont montrées relativement faibles. Aussi les fortes teneurs observées des eaux de certains ouvrages laissent supposer des apports secondaires d'origine naturelle ou anthropique. En effet, la faible profondeur de certains ouvrages, le manque d'hygiène au tour de ces derniers et les activités agricoles (retours des eaux usées et des eaux agricoles) seraient à l'origine de ces fortes teneurs en  $\text{NO}_3^-$ .

Pour ce qui concerne le fluor, compte tenu de l'absence d'industrie à base de fluor, les fortes teneurs de celui-ci observées dans les eaux de certains ouvrages pourraient

s'expliquer par les phénomènes d'altérations et de dissolution des minéraux tels que la fluorite et la fluoroapatite (Kamtchueng et al., 2014). En effet, si la géologie locale ne mentionne pas des minéraux fluoré, on peut penser que , l'usage de plus en plus important et incontrôlé des engrais phosphatés pourrait contribuer aux concentrations de cet élément dans les eaux souterraines (Jha et al., 2011 in Kamtchueng et al., 2014).

### Qualité des eaux pour la consommation humaine

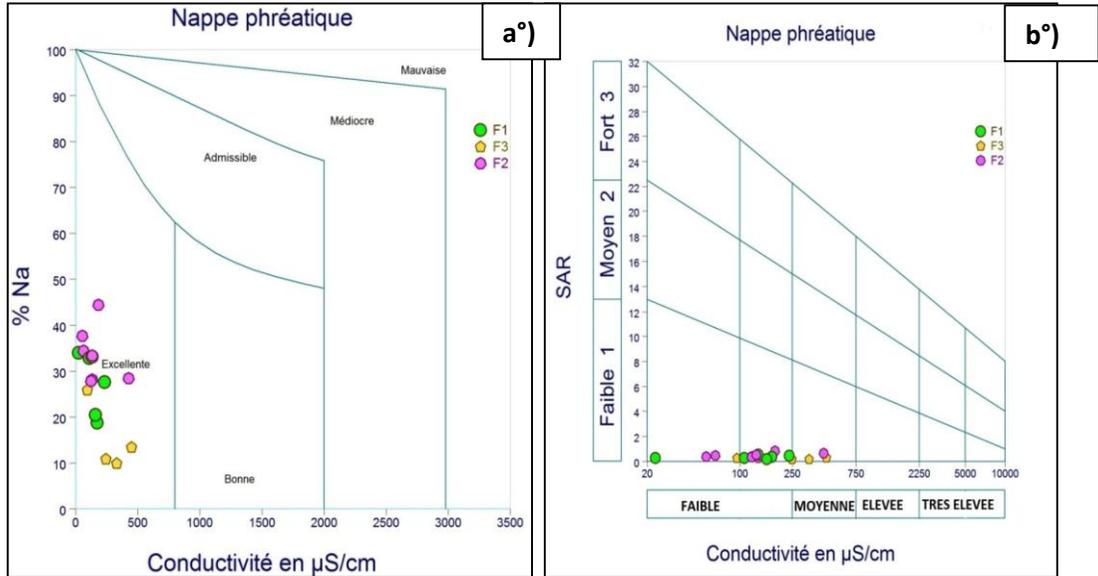
La classification des eaux destinées à la consommation humaine montre que plusieurs

échantillons contiennent un à plusieurs éléments physicochimiques dont les concentrations dépassent la norme OMS. Cette situation pourrait s'expliquer par la faible profondeur des ouvrages par endroits, la nature géologique des réservoirs des aquifères, l'utilisation intensive des pesticides et enfin le manque d'hygiène autour des points d'eau. Toutes ces réalités peuvent compromettre l'approvisionnement en eau potable des populations.

**Tableau 3:** Classification des eaux souterraines selon la norme OMS (2011).

Paramètres chimiques	Concentration ioniques		Pourcentage des ouvrages ayant de (s) teneur (s) en élément (s) dépassant (s) la norme OMS
	Maximum	Norme (OMS 2011)	
pH (unité pH)	5,20	6,5-8,5	22%
C.E (µs/cm)	246	500	---
TH (mg/l)	324	100	33%
TDS (mg/l)	405,8	500	-
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	175,7	500	-
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	39,76	250	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	29,76	250	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	75,24	45	28%
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1,9	3	-
F <sup>-</sup> (mg/l)	1,99	1,5	5,55%
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	22,35	50	-
Na <sup>+</sup> (mg/l)	16,49	200	-
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	124,8	75	-
K <sup>+</sup> (mg/l)	16,49	200	-
Fe <sup>2+</sup> (mg/l)	1,85	0,3	33%

NB : -- aucun ouvrage



**Figure 6:** Report des échantillons sur le digramme de Wilcox (a) et le digramme de salinité USSL (b) de classification des eaux pour l’irrigation.

**Tableau 6:** Récapitulatif des résultats de la classification des eaux souterraines pour à l’irrigation.

Paramètres	Catégorie	Nombre n=18	Proportion
<b>SAR vs Conductivité, meq/l (Richards, 1954)</b>			
0-6	Excellent	18	100%
0-9	Bonne	-	-
> 9	Admissible	-	-
<b>% Na vs Conductivité (Wilcox, 1955)</b>			
<20	Excellent	04	22%
20-40	Bonne	14	78%
40-60	Admissible	-	-
60-80	Incertain	-	-
>80	Mauvaise	-	-
<b>RSC, meq/l (Richard, 1954)</b>			
<1,25	Bonne	17	94,44%
1,25-2,50	Incertain	01	5,55%
>2,50	Mauvaise	-	-

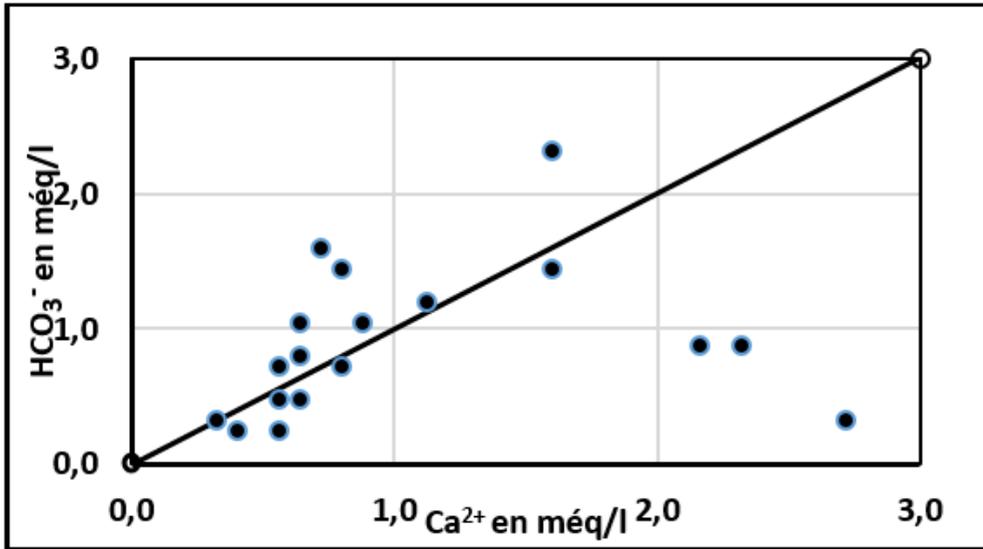


Figure 7: Diagramme d'équilibre Ca<sup>2+</sup> vs HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

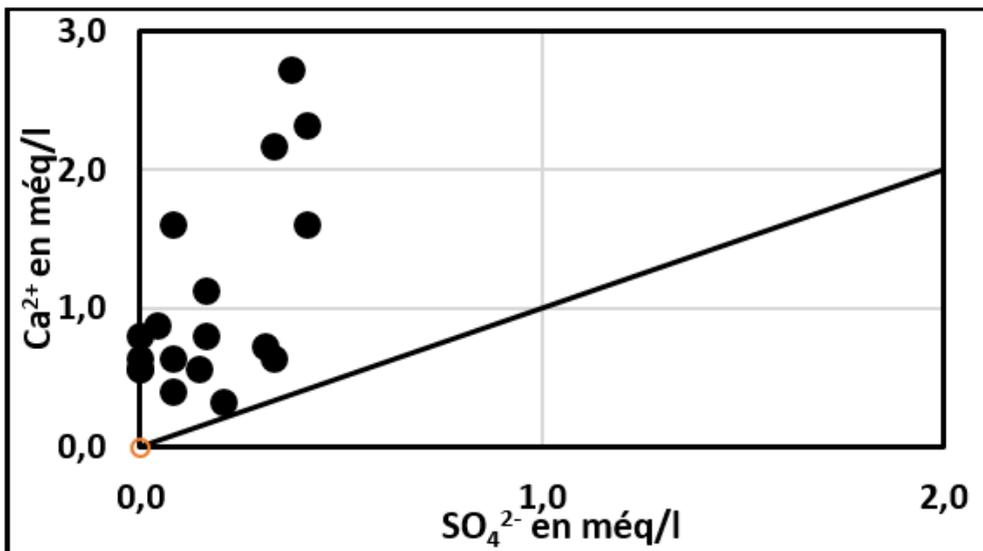


Figure 8: Diagramme d'équilibre Ca<sup>2+</sup> vs SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>.

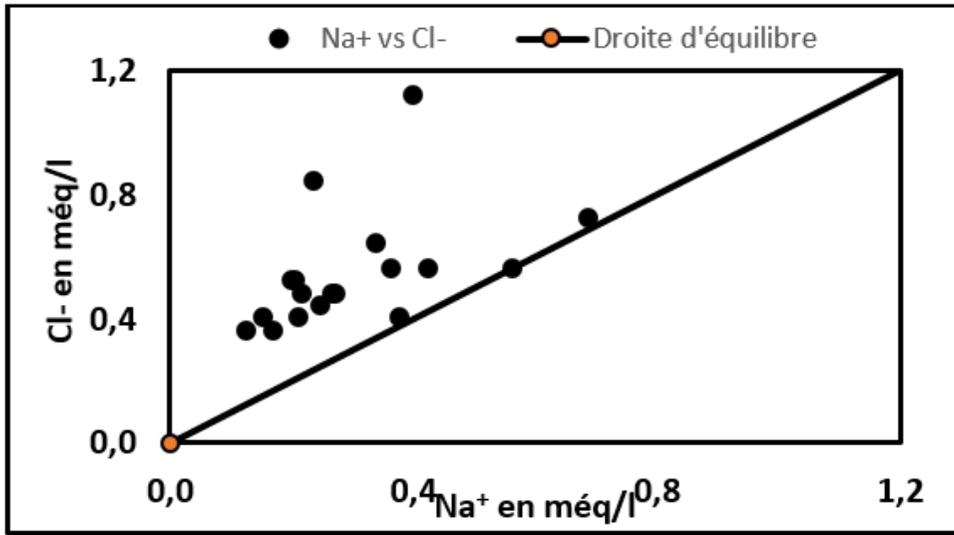


Figure 9: Relation entre les ions  $\text{Na}^+$  vs  $\text{Cl}^-$ .

## Conclusion

La caractérisation hydrogéochimique des eaux de la nappe phréatique du haut bassin versant de la Korama, au Niger, a permis d'identifier les faciès chimiques et les processus géochimiques responsables de la minéralisation des eaux souterraines dans cette nappe. Ainsi ce bassin est constitué d'un système hydrogéochimique complexe avec un mélange d'ions provenant des processus naturels d'altération des minéraux et, d'échanges d'ions ainsi que des activités anthropiques. Par ailleurs, les résultats d'analyse des eaux souterraines pour la consommation et pour l'irrigation montrent que, de façon générale, elles sont des bonnes qualités. Néanmoins, quelques ouvrages présentent des teneurs en certains éléments chimiques qui dépassent la norme recommandée par l'OMS. Bien que, des maladies liées à la consommation des eaux de ces ouvrages ne se manifestent pas encore dans la région, il s'avère nécessaire de prendre à temps des mesures préventives pour éviter dans le futur, un grave problème de santé publique.

## CONFLIT D'INTÉRÊTS

Les auteurs déclarent, à l'unanimité, qu'il n'y a aucun conflit d'intérêts qui serait liée au présent article.

## CONTRIBUTION DES AUTEURS

Tous les auteurs ont contribué à la réalisation de ce travail et à la rédaction du manuscrit.

## REFERENCES

- Abdou Babaye MS. 2012. Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). PhD Thesis, Univ. Liege, Belgique, 244p.
- Abdou Babaye MS, Orban P, Ousmane B, Favreau G, Brouyere S, Dassargues A. 2018. Characterisation of recharge mechanisms in a Precambrian basement aquifer in semi-arid south-west Niger. *Hydrogeol J*: 17p. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10040-018-1799-x>

- Abdou Babaye MS, Sandao I, Saley MB, Wagani I, Ousmane B. 2016. Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **10**(6): 2728-2743.
- Adithya VS, Chidambaram S, Thivya C, Thilagavathi R, Prasanna MV, Nepolian M, Ganesh N. 2016. A study on the impact of weathering in groundwater chemistry of a hard rock aquifer. *Arab J Geosci*, **9**: 158. DOI 10.1007/s12517-015-2073-3.
- Belkhiri L, Mouni L. 2014. Groundwater geochemistry of Ain Azel area, Algeria. *Chemie der Erde*, **74**: 99–106.
- Bi Tié AG, Issiaka S, Brou K, Vamoryba F, Gnamien BK. 2006. Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide). *Vertigo*. DOI :10.4000/vertigo.2038
- Chung SY, Venkatramanan S, Kim TH, Kim DS, Ramkumar T. 2014. Influence of hydrogeochemical processes and assessment of suitability for groundwater uses in Busan City, Korea. *Environ Dev Sustain*: 17p. DOI: 10.1007/s10668-014-9552-7
- Capaccioni B, Didero M, Paletta C, Didero L. 2005. Saline intrusion and refreshing in a multilayer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to hydrochemical characteristics of groundwaters. *Hydrol J*, **307**:1–16.
- Farid I, Trabelsi R, Zouari K, Abid K, Ayachi M. 2012. Hydrogeochemical processes affecting groundwater in an irrigated land in Central Tunisia. *Environ Earth Sci*, **68**: 1215–1231. DOI: 10.1007/s12665-012-1788-7
- Eaton FM. 1950. Significance of carbonate irrigation water. *Soils Sci*, **69**: 123–133.
- Institut Nationale de la statistique (INS). 2010. Recensement général de la population du Niger (2010). Rapport, 332p.
- Issa Malam Salmanou S, Issoufou S, Abdou Babaye MS, Boureima O. 2018. Dynamique de l'occupation des sols et l'évolution des mares dans le haut bassin versant de la Korama, Commune rurale de Droum, Région de Zinder. *Afrique SCIENCE*, **14**(4) : 346 – 358.
- Kamtchueng BT, Fantong WY, Wirmvem MJ, Tiodjio RE, Takounjou AF, Ndam Ngoupayou JR, Kusakabe M, Zhang J, Ohba T, Tanyileke G, Hell JV, Ueda A. 2014. Hydrogeochemistry and quality of surface water and groundwater in the vicinity of Lake Monoun, West Cameroon: approach from multivariate statistical analysis and stable isotopic characterization. *Environ Monit Assess*, **188**: 524. DOI : 10.1007/s10661-016-5514-x
- Loukman B, Nakolendousse S, Mahamat Nour A, Nguinambaye Memti M. 2017. Caractérisation hydrochimique de la nappe de Yao et ses environs : relations entre eaux de surface (lac-Fitri) et eaux souterraines. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **11**(3): 1336-1349. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i3.33>
- Prasanna MV, Chidambaram S, Senthil Kumar G, Ramanathan AL, Nainwal HC. 2010. Hydrogeochemical assessment of groundwater in Neyveli Basin, Cuddalore District, South India. *Arab J Geosci*, **4**: 319–330.
- Richards LA. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, 60. US Department of Agricultural Handbook, Washington DC, p 160.
- Sandao I, Abdou babaye MS, Ousmane B, Michelot JL. 2018. Apports des isotopes

- naturels de l'eau à la caractérisation des mécanismes de recharge des aquifères du bassin de la Korama, Région de Zinder, Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **12**(4): 1931-1954. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v12i4.33>
- Scanlon BR, Robert DA, Stonestromw DE, Prudiciz KF, Dennehy. 2005. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. *Global Change Biology*, **11**: 1577 – 1593.
- Scanlon BR, Keese KE, Flint AL, Flint LE, Gaye CB, Edmunds WM, Simmers I. 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrol. Process.*, **20**: 3335–3370.
- Sethy N, Tajdarul HS, Alok K, Debanjan S. 2016. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater in parts of Southern Gangetic Plain. *Environ Earth Sci*, **75**: 232. DOI: 10.1007/s12665-015-5049-4.
- Todd DK. 1980. *Groundwater Hydrology* (2nd edn). Wiley: New York; p535.
- WHO. 2011. Guidelines for drinking water quality, vol 1. Recommendations, 4rd edn. p565.
- Wilcox LV. 1955. Classification and use of irrigation waters. USDA, Circular 969, Washington, DC.