
QUALITÉ DES EAUX SOUTERRAINES DANS LA LOCALITÉ DE BOUSSO (LOUG-CHARI, TCHAD)

Atteib Adam Baye^{1,2*}, Abdelkader Djibia Mahamat³, Djibrine Adoum Oumar³, Suzanne Ngo Mboum-Nkot¹, Bertil Nlend¹, Abderamane Hamit³, Boris Djieugoue¹ Fricelle Song, Jacques Etame¹.

¹ Laboratoire de Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement, Université de Douala (Cameroun) PO BOX 2415

² Ecole Nationale Supérieure de N'Djamena, PO BOX 460

³ Université de N'Djamena, Tchad

*Auteur correspondant; Courriel : atteibadambaye@gmail.com, atteib.baye@gmail.com

Résumé

Dans le but de mettre en évidence la qualité des eaux souterraines du système aquifère du quaternaire dans la zone de Bousso et ses environs, une étude a été réalisé sur les eaux de puits et des forages. Une campagne de terrain a été menée pendant la période des basses eaux (mars 2023). Au cours de cette campagne, les niveaux statiques ont été mesurés dans 24 ouvrages. Un total de 25 échantillons d'eaux a été prélevé y compris l'eau de surface (le Chari).

Les paramètres physico-chimiques (température, conductivité et pH) ont été mesurés in situ. Les différents ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) ont été déterminés au Laboratoire National de l'Eau.

Les mesures faites sur les niveaux statiques révèlent que, la piézométrie met en évidence une direction d'orientation des eaux, dont le sens d'écoulement s'effectue du sud vers le nord du Chari vers la dépression avec un faible gradient hydraulique de 4‰. Les résultats des paramètres in-situ ont montré que les eaux ont un pH moyen de 7,25 dans les ouvrages, et la température mesurée avoisine la température ambiante de l'air qui est de 31,5°C.

Il résulte de ces analyses que, les variations spatiales des teneurs en éléments dissous dans les eaux souterraines, suivent un gradient de minéralisation croissant près du Chari. Mais dans l'ensemble de la zone, les études faites sur les teneurs en éléments dissous démontrent que ces dernières soient peu minéralisées et indiquent que, les eaux souterraines des aquifères du Quaternaire dans cette région sont généralement peu minéralisées et respectent la norme de la limite fixée par l'OMS pour les eaux de boisson.

Les analyses des faciès chimiques déterminent deux types d'eaux : les eaux à faciès bicarbonatés calciques et magnésiens, et les eaux à faciès bicarbonatés sodiques et potassiques, Cependant les faciès bicarbonatés calciques et magnésiens semblent amorcer une évolution vers les faciès bicarbonatés sodiques et potassiques. L'acquisition des eaux en éléments chimiques dissous s'effectuent par lessivage des roches encaissantes, et cela s'effectue par les processus d'échange des bases. La corrélation litho-stratigraphique des coupes

géologiques montre une hétérogénéité dans la succession des couches géologiques, l'essentiel est composé d'une alternance des sables, argiles et des limons.

Mots clés : *hydrodynamique, hydrochimique, faciès chimiques, Bousso*

1. Introduction

Les réserves en eau douce disponibles pour l'homme s'épuisent, alors que les besoins en eau sont de plus en plus grands (Abderamane, 2012). Les réchauffements climatiques récurrents de ces dernières décennies, l'accroissement démographique galopant, ainsi que les pollutions d'origine divers et les gaspillages menacent davantage les ressources en eau. L'eau douce qui est l'essentielle de nos besoins ne présente qu'une infime partie de la quantité totale d'eau présente sur terre, dont 69% de cette fraction est composée des eaux de surface (glaciers, lacs et rivières) et 30% des eaux souterraines (Gleick, 1996). Contrairement aux eaux de surface qui sont facilement exploitables et cibles des pollutions anthropiques, les eaux souterraines sont moins exposées et globalement d'une qualité appréciable. Les restes étant formés par les eaux salées des mers, des océans et des calottes glaciaires.

Dans la province du Chari-Baguirmi, la rareté et le caractère aléatoire des précipitations, le phénomène de désertification, qui devient de plus en plus inquiétant et résulte de la dégradation des ressources naturelles sous l'action de l'homme et de la rigueur des conditions climatiques, menacent en plus des agglomérations, la qualité des eaux (Abderamane, 2012)

La nappe superficielle est captée par les puits ouverts tandis que la nappe sous-jacente est captée par les pompes manuelles. Ces nappes sont alimentées principalement par le Chari et quelque fois par les eaux de pluie (Kadjangaba, 2018). La relation entre les eaux de surface et souterraines dans la localité impacte considérablement sur la qualité des eaux souterraines.

Compte tenu des problèmes liés à la qualité des eaux souterraines, cette étude vise à connaître la qualité physico-chimique des eaux, afin d'apporter des informations sur les échanges d'ions qui régissent ces eaux, de connaître leur potabilité et d'indiquer l'origine de leur minéralisation en fonction du sens de l'écoulement des eaux.

2. Description de la zone d'étude

Située au centre du Tchad, dans le bassin géologique du Lac Tchad, la province du Chari Baguirmi est une vaste plaine qui s'étend entre 14°5 et 17°5 de longitude Est, et entre 10° et 13° de latitude Nord. Elle présente une particularité morphologique qui réside essentiellement dans la monotonie

d'une topographie plate rompue par quelques pointements d'inselbergs dans la partie Nord et Nord-Est (Abderamane, 2012). La localité de Bousso est un chef-lieu du département de Loug-chari dans la province du Chari Baguirmi, Il est situé à 300Km au Sud-est de N'Djamena (Tchad). Est limité au Nord par le canton Bath-Laïri, à l'Est par le canton Djana (Melfi), au Sud par le canton Gourgara et le canton Bâ-illi et à l'Ouest par le canton Bogomoro. La zone d'étude est comprise entre le 10° et 11° degré de Latitude Nord et le 16°21' et 16°52'degré de longitude Est ([figure.1](#)).

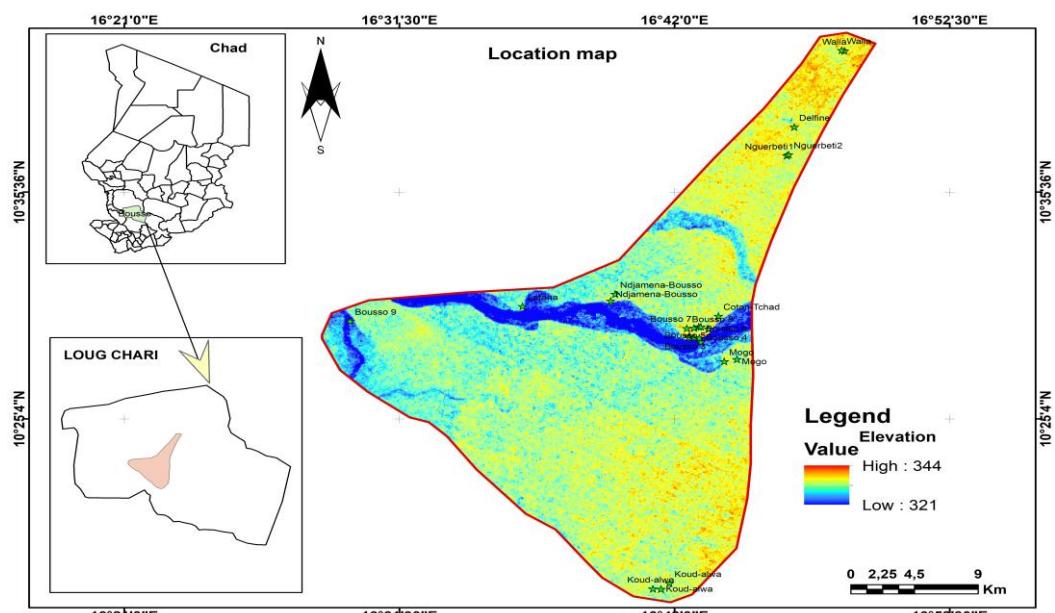


Fig. 1 : Carte de localisation et des points d'échantillonnage

2.1. Climat

La zone de Bousso est de type soudanien. Il est à cheval entre le climat de la zone soudanienne et celui de la zone sahélienne, et reçoit entre 800 et 1000mm de pluie par an. Il est caractérisé par une alternance d'une saison des pluies qui s'étend de Mai à Octobre et d'une saison sèche de Novembre à Avril ([figure.2](#)). La période chaude est généralement entre Mars, Avril et Mai selon les années avec une température dépassant 40°C. La période froide va de fin novembre à janvier, la température varie de 15°C à 20°C.

Ces informations sont fournies à l'agence nationale de la météorologie (ANAM) à la station de Bousso pour une période de 30 ans allant de (1991 à 2021).

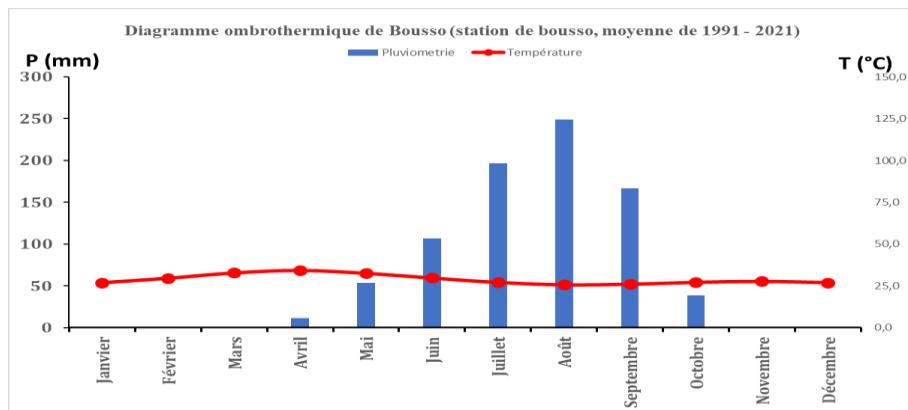


Figure.2 Diagramme ombrothermique

2.2.Hydrographie

Cette zone est traversée par la rivière chari et ses affluents. Le système Chari-Logone représente environ 95% de l'eau du lac Tchad ([BGR/CBLT, 2009](#)).

Le canton compte deux (02) réseaux hydrographiques importants dont l'un est temporaire (Bahr-erguig) au Nord-est de Bousso. Le fleuve Chari est permanent et borne le Sud du canton. On peut aussi remarquer la présence des mares Bélé, Mbaya, Gabon, Mbali, Galah, Doh, Ngorkolong, Mbazingara qui sont permanentes et semi-permanentes. La nappe phréatique est en moyenne **35 à 70 m** de profondeur. Ces cours d'eau constituent une source de revenus de la population et alimentent plusieurs régions voisines en poissons.

2.3.Géologie et hydrogéologie

La géologie de cette zone a fait aussi l'objet de plusieurs études grâce aux recherches pétrolières et aux forages d'eaux effectués dans la région. Dans cette zone située en bordure de la cuvette paléo-tchadienne, On distingue trois ensembles présentant diverses formations géologiques qui constituent le bassin et son soubassement :

- Au Nord-Est et au Nord-Ouest affleurent sous forme d'inselbergs des formations de :

Granitoïdes du socle cristallin ;

- Au centre, des dépôts pliocènes de la cuvette paléo-tchadienne recouvrent la quasi-totalité de la zone d'étude ;

- Les dépôts du quaternaire recouvrent la zone en masquant les formations sous-jacentes.

Les études hydrogéologiques antérieurement menées dans la région de Chari-Baguirmi méridionale par Schneider (1992 puis 2001) présentée dans la carte de valorisation des eaux souterraines à (1/500 000), mettent en évidence

l'existence d'un système aquifère multicouche tertiaire-quaternaire (cuvette tchadienne) dans la zone de Bousso et ses environs.

Ces travaux ont été nettement orientés vers l'identification de différents types d'aquifères, ainsi que sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines

- Nappes locales

Les formations constituées par des lentilles sableuses (2 à 15 m d'épaisseur) intercalées dans les dépôts quaternaires argileux se traduisent en aquifères locaux. Ce sont des petites nappes perchées (alluviales) qui constituent des petits réservoirs d'eau souterraine, ils proviennent de l'infiltration des eaux météoriques dans les alluvions des anciens cours d'eau, et sont utilisées par les populations sédentaires comme par les éleveurs. Leur intérêt est de se situer à une profondeur moindre que celle de la nappe phréatique générale. Ces aquifères locaux ont été également mentionnés par Ngounou (1993) pour la plaine d'inondation du Yaérés. Le Quaternaire ancien est séparé du récent par une couche argileuse d'une moyenne de 2 m à 5 m d'épaisseur (Seeber, 2013). La pérennité des points d'eau dépend directement de la hauteur des précipitations de l'hivernage précédent.

- Nappes libres

Les formations fluvio-lacustres pléistocènes constituent l'aquifère phréatique. Les dépôts sont à prédominance sableuse vers le 12e parallèle, ils reposent sur une épaisse série argileuse du Pliocène à une profondeur de 50 à 70 m. Ces formations renferment une nappe en générale libre ou semi-captive sous quelques mètres de niveaux argileux de l'Holocène supérieur. Cette nappe s'étend sur toute la région du Chari-Baguirmi et aussi sur une partie de Mayo-Kebbi, et se prolonge au Nigéria dans la région de Maiduguri et au Cameroun, où elle prend le nom d'aquifère des Yaérés (Djoret, 2000).

3. Matériels et méthodes

Au total 25 points d'échantillonnages ont été ciblés, dont un seul échantillon d'eaux de surface. Cette eau de surface était celui du fleuve Chari. Les ouvrages hydrauliques concernés sont les puits ouverts et cimentés et aussi les forages à motricité humaine.

Le calcul de niveau piézométrique est calculé par différence entre la côte du sol (repère de l'ouvrage ou altitude) et la profondeur de l'eau. Il est donc obtenu par la relation suivante : $Np = Z - Nd$ Avec : $Nd = Nm - M$, **Np** : Niveau piézométrique en mètre (m) **Z** : Altitude(m), **Nd** : Niveau dynamique(m), **Nm** : Niveau mesuré(m) ; et **M** : margelle en mètre (m).

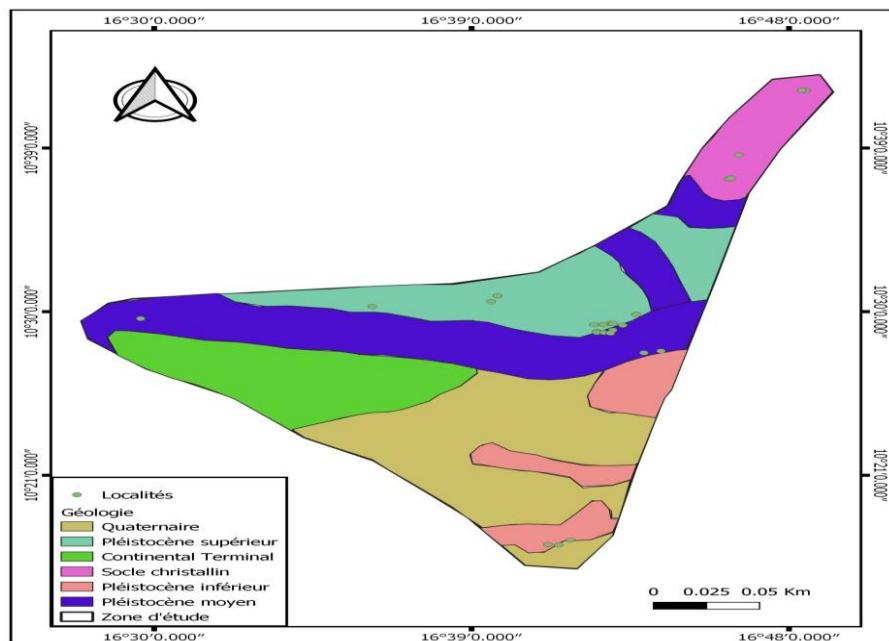


Figure 3. Geological and Piezometric map of the study area during the dry season (March, 2022)

Les échantillons d'eau prélevés au cours de ces travaux ont été analysés au laboratoire national des eaux (LNE). Les analyses des paramètres chimiques ont été effectuées selon les objectifs visés, et ont uniquement concernées les éléments chimiques majeurs ; les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) et les anions (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- et SO_4^{2-}). Quant aux paramètres physiques qui sont la température, la conductivité électrique et le potentiel hydrogène, leurs mesures ont été directement faites sur le terrain.

Tableau 1: Méthodes d'analyse

Eléments	Méthodes d'analyse	Appareils utilisés
HCO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+}	dosage volumétrique	Burette à zéro automatique
Fe^{3+} , SO_4^{2-} , NH_4^+ , NO_3^-	Spectrométrie	Spectrophotomètre DR3900
Na^+ , K^+	Photométrie	Photomètre à Flamme « BWB »

Pour évaluer la qualité d'eau, nous avons utilisé l'indice de qualité d'eau IQE. Il présente l'image globale de l'état de la qualité de l'eau à des fins de consommation (**Hamed et al., 2016**). La procédure de calcul a été décrite en détail par de nombreux chercheurs (**Brown et al., 1970**) et comporte généralement quatre étapes (**Sutadian et al., 2015**). Dans la première étape, les paramètres de qualité de l'eau à inclure dans le calcul de l'IQE sont sélectionnés. Ici, le IQE a été calculé pour chaque échantillon en utilisant 10 paramètres (EC, pH, Mg²⁺, Ca²⁺, K⁺, Na⁺, HCO₃⁻, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻) et la norme de qualité de l'eau potable définie par l'OMS 2017, qui a une grande influence sur la qualité de l'eau de consommation.

Dans la deuxième étape, chacun des paramètres chimiques s'est vu attribuer un poids (Wi). Un poids inégal (**Brown et al. 1972**) a été attribué en fonction de leur importance relative dans la qualité globale de l'eau destinée à la consommation (**Tableau 2**). Le poids attribué varie de 2 à 5. Le poids le plus élevé de 5 a été attribué aux paramètres qui ont les effets majeurs sur la qualité de l'eau potable et un minimum de 2 a été attribué aux paramètres qui sont considérés comme non nuisible (**Vasanthavigar et al., 2010 ; Ketata-Rokbani et al., 2011**). Enfin, le poids relatif (RW) de chaque paramètre a été calculé :

$$Wi = \frac{wi}{\sum_{i=1}^n wi} \quad (1)$$

Où AW_i est le poids attribué à chaque paramètre, n est le nombre de paramètres et RW est le poids relatif. Les valeurs du poids attribué (AW) et du poids relatif calculé (RW) sont présentées dans **le tableau 2**. Dans la troisième étape, une échelle d'évaluation de la qualité (Qi) est calculée pour chaque paramètre :

$$Qi = \frac{Ci}{Si} \times 100 \quad (2)$$

Où Qi est le classement de qualité, Ci est la concentration de chaque paramètre dans un échantillon d'eau individuel en mg/l et Si est la norme de l'OMS pour chaque paramètre en mg/l (**tableau 6**). Enfin, dans la quatrième étape, après avoir obtenu le sous-indice de qualité de l'eau SI_i en multipliant la note de qualité par le RW de chaque paramètre (Eq. 3), l'IQE intégré a été obtenu en totalisant tous les sous-indices (Eq.4).

$$SI_i = Wi \times qi \quad (3)$$

$$IQE = \sum_{i=1}^n SI_i \quad (4)$$

Tableau II : récapitulatif du calcul des poids relatifs

	Unité	OMS (2017)	Poids (wi)	Poids relatif(Wi)
pH		6,5-8	4	0,114
T°C		24	4	0,114
CE	μs/cm	2000	4	0,114
Ca²⁺	mg/litre	100	2	0,057
Mg²⁺	mg/litre	50	2	0,057
Na⁺	mg/litre	200	2	0,057
K⁺	mg/litre	12	2	0,057
HCO₃⁻	mg/litre	500	3	0,085
Cl⁻	mg/litre	250	3	0,085
SO₄²⁻	mg/litre	250	4	0,114
NO₃⁻	mg/litre	50	5	0,142
			$\sum wi=35$	$\sum Wi=0,096$

Tableau 3 : Classification de l'IQE (Sahu et al., 2008)

Valeur de l'IQE	Type d'eau
< 50	Excellente qualité
50-100.1	Bonne qualité
100-200.1	Mauvaise qualité
200-300.1	Très mauvaise qualité

4. Résultats et discussion

4.1. Influence piézométrique

Pour pouvoir analyser les processus mis en relief par la carte piézométrique, celle-ci a été annotée avec les principales lignes d'écoulement préférentielles. Sur la [figure 4](#) on peut voir les analyses sur la carte entière.

On remarque que les axes sont majoritairement orientés sud-nord, le sens d'écoulement des eaux est en générale orienté du Sud vers le Nord. Les zones de recharge de l'aquifère sont plus présentes dans la partie sud. La partie sud présente des gradients beaucoup plus forts que la partie nord, où les courbes de niveau sont bien plus espacées. L'observation la plus marquante de cette carte est que l'on remarque bien qu'en période de hautes eaux le fleuve draine systématiquement la nappe. Un important bassin de drainage, le chari est d'ailleurs situé au long de la zone d'étude ([Clement, 2015](#)).

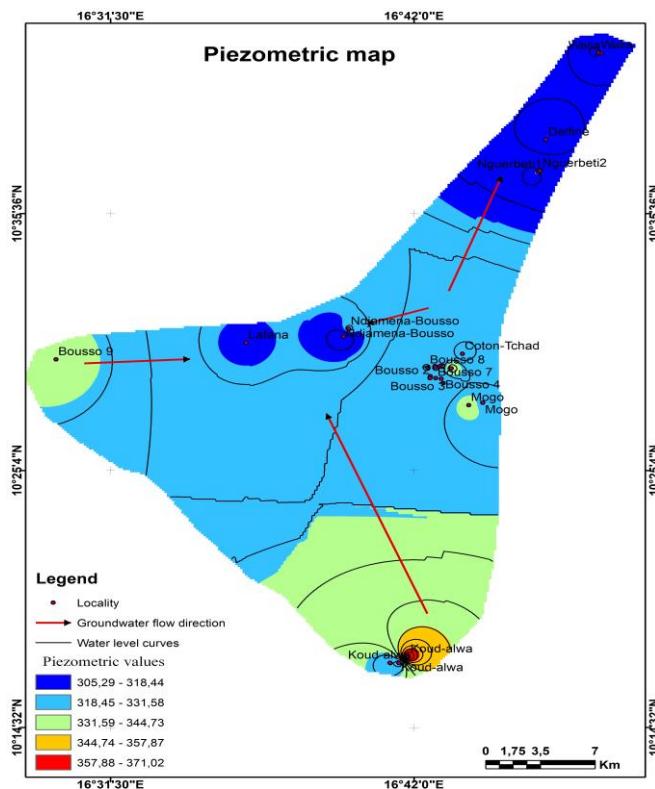


Figure 4 : Carte piézométrique

4.2.Hydrochimie

Tableau IV: Statistiques élémentaires des paramètres

	Min.	Max.	Moy.	Ecart.
T°C	30	33,6	31,47	1,38
pH	6,7	8,02	7,25	0,26
CE	89,2	1218	438,96	327,8
Cl-	3	70	20,42	13,38
Mg2+	0,4	26,2	4,763	6,23
NO3-	2	22	7,27	3,8
K+	0,4	5,6	2,252	1,269
Na+	4,6	71	24,92	16,75
SO42-	0	68	16,24	16,47
Ca2+	3,28	72	18,614	13,55
HCO3-	12,2	292,8	80,53	65,39

La température des eaux souterraines est presque homogène (tableau 4). En effet, elle varie entre 30°C et 33,6 °C avec une moyenne de 31,47°C. Ces valeurs reflètent celle de la température de l'air ambiant dont la moyenne est de 28°C

dans notre zone d'étude. Cela laisse penser que le système aquifère du Quaternaire est en équilibre thermique avec l'atmosphère ([Kadjangaba, 2018](#)). Pour le pH, les valeurs enregistrées montrent une faible variation entre 6,70 à (Bousso3) à 8,02 (Bousso-chari), avec une moyenne arithmétique de 7,25. Ce sont des eaux qui ont un pH faiblement acide à basique, la plupart des échantillons prélevés ont un pH égal à 7. Les valeurs de pH étudiées respectent la norme établie par l'organisation mondiale de la santé (OMS) qui est de 6,5 à 9,5.

La conductivité quant à elle, présente des mesures très hétérogènes, et fluctuent d'une faible valeur de 89,2 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à Bousso chari, à une valeur de 1218 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ à Bousso 4, avec une moyenne arithmétique de 438,96 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Ce sont des eaux qui vont d'un pôle faiblement minéralisé à un pôle des eaux moyennement minéralisées.

Dans le cas précis des résultats des analyses des eaux souterraines dans notre zone d'étude, nous avons identifiés les deux faciès suivants :

Le faciès bicarbonaté calcique et magnésienne ;

Le faciès bicarbonaté sodique et potassique ;

La zone sédimentaire quaternaire fait partie du remplissage du bassin colorimétrique tchadien, et ses L'histoire géologique est essentiellement l'histoire des transgressions et régressions successives du Méga-lac (lac-géant).

Les variations latérales et verticales des faciès et l'alternance des couches de sables et d'argiles, seraient les résultats de ces phénomènes.

Cette coupe ([figure 5](#)) montre une stratigraphie très hétérogène de sables, limons et d'argiles, outre les formations géologiques sur lesquelles se situe la nappe phréatique, on observe des formations sableuses qui pourraient contenir d'eau surmontent des couches argileuses au-dessus des niveaux piézométriques, ces formations seraient des aquifères locaux énoncé par [Schneider et Wolff \(1992\)](#), ils affirment que la présence des lentilles de sables de quelques mètres d'épaisseur se traduit par des aquifères locaux.

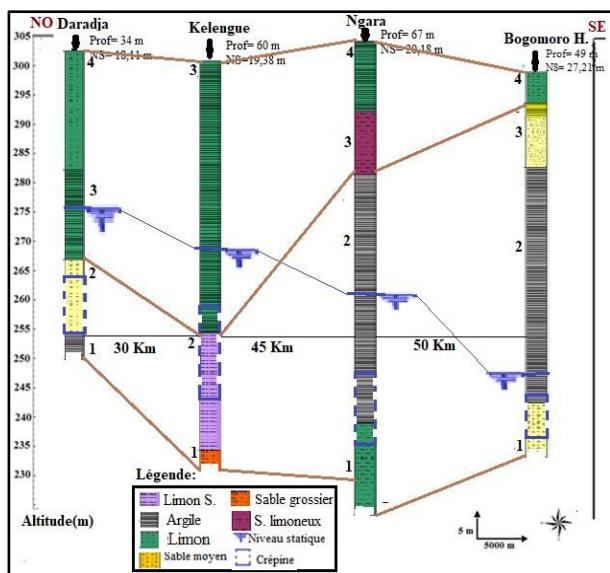


Figure 5 : Séquence litho-stratigraphiques des formations quaternaires de Bousso

L'interprétation de la carte piézométrique révèle un état assez homogène de la courbe isopièzes, ils présentent un comportement concentrique et différent en hauteur avec des altitudes qui varient d'un maximum dans la partie méridionale et d'un minimum dans la partie septentrionale. Ces caractéristiques de la courbe permettent de lire le sens de l'écoulement de l'eau sur la carte.

Les courants d'eau circulent généralement du sud vers le nord qui est le sens d'écoulement des eaux souterraines, avec un faible teneur en minéraux de la nappe phréatique (eau peu salée) de la zone d'étude et la phase chimique des eaux étudiées ci-dessus proche de la phase des eaux de précipitation, qui peut être interprétée comme une recharge du système Chari qui dérive des eaux souterraines des systèmes aquifères.

Les valeurs de la température proche de température moyenne de l'air ambiant peut s'expliquer par le bilan thermique des systèmes aquifères quaternaires en relation avec l'atmosphère. Dans la majeure partie du sahel des profondeurs d'environ moins de 30 m, la température de l'eau souterraine est d'environ égale à la température moyenne de l'air ([Ngounou Ngatcha, 1993](#)).

Les valeurs de pH observées montrent une uniformité presque parfaite, leur distribution La variation spatiale est faible, proche de la neutralité ($6,70 \leq \text{pH} \leq 8,02$). Le pH moyen de la zone d'étude était de 7,25. Ces valeurs sont tout de même supérieures à celles ($6,03 < \text{pH} < 6,90$) mesurées à N'Djamena par ([Siddick. 2015](#)). Dans les deux cas, les valeurs de pH étudiées respectaient les normes fixées par l'Organisation mondiale de la santé ([OMS](#)).

La mesure de la conductivité permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution (RODIER, 2009). Les valeurs de la conductivité de notre zone d'étude sont très hétérogènes et sont comprises entre 93,6µS/Cm (Bousso chari) et 12186µS/Cm (bousso 4) avec une moyenne arithmétique de 438,96 µS.cm. La répartition des conductivités très hétérogène, pourrait être liées aux diverses sources de minéralisation des eaux.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont similaires avec ceux obtenus par (Djoret. 2000) à N'Djamena (au Nord du fleuve Chari). Quant à la potabilité des eaux, toutes les valeurs des paramètres physicochimiques mesurées sont dans la limite de la norme de l'OMS, y compris la valeur de conductivité 1218 µS/cm enregistrée à Bousso 4.

Le calcium est l'élément présent en quantité appréciable dans la quasi-totalité des eaux superficielles, c'est un élément alcalino-terreux et un composant majeur de la dureté des eaux, sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. Il provient essentiellement de la dissolution des roches carbonatées suite à la présence du gaz carbonique, selon l'équation suivante : $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$. Il provient également des formations gypseuses ($\text{CaSO}_4 \cdot (\text{H}_2\text{O})_2$) qui sont facilement soluble.

Les concentrations du Ca^{2+} varient de 3,28 mg/l à 72 mg/l. Ces teneurs sont loin d'être compatible avec les normes établis par l'OMS et UE (100 mg/l).

La valeur la plus élevée est à N'Djaména-Bousso2 avec une concentration de 72 mg/l. L'origine des teneurs élevées de Ca^{2+} , est probablement due aux intercalations d'évaporites (les formations gypseuses). La concentration de calcium exprime de variations d'un point à l'autre et montre que les échantillons représentent des teneurs inférieures à 100mg/l.

Toutes les eaux naturelles contiennent le magnésium, qui est un élément significatif de la dureté des eaux, la présence du magnésium dans les eaux souterraines est liée à la nature lithologique de l'encaissant. Il doit sa présence à la dissolution des formations carbonatées (les dolomies) ainsi que les formations salifères qui sont riche en Mg^{2+} .

Les teneurs en Mg^{2+} dans les différents points d'eau de ce secteur oscillent de 0,406 mg/l comme valeur minimale enregistrée à Lafana, et 26,2 mg/l comme valeur maximale enregistrée à Bousso 5.

La présence du Sodium dans les eaux souterraines est très variable, dû à la dissolution des évaporites qui sont fréquent dans la région d'étude sous forme de Halite ou Sylvine. Les concentrations du sodium (Na^+), sont variées d'un point à un autre, on marque 4,6 mg/l comme valeur minimale mesurée à Lafana, et 71 mg/l à Bousso 5 donc une anomalie extrême qui a une relation directe avec la nature lithologique marquée par la présence d'évaporites englobant à la fois des niveaux gypsifères (CaSO_4) et des intercalations salifères (NaCl et KCl).

La présence du potassium dans les eaux est liée principalement à l'altération des argiles potassiques et au lessivage des évaporites, en l'occurrence la Sylvine (KCl). Au niveau des eaux, les teneurs en potassium présentent des valeurs relativement faibles. Les valeurs moyennes oscillent autour de 2,52mg/l. Le maximum et le minimum sont respectivement de 5,6 mg/l et 0,402 mg/l sont inférieures aux normes admises par l'OMS et l'UE (12mg/l).

La présence des bicarbonates dans les eaux souterraines est suite à l'équation suivante $CaCO_3 + H_2O + CO_2 = 2HCO_3 + Ca^{+2}$ qui montre la dissolution des formations carbonatées (Calcaire, dolomie) donc les bicarbonates sont le résultat d'un équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique. La solubilité des carbonates est principalement influencée par PCO_2 , la température, la force ionique, la pression totale et le pH (Hoefs, 1969). Dans les eaux étudiées, les bicarbonates varient de 12,2 mg/l à 292,8 mg/l, elles sont supérieures aux seuils de 30mg/l fixé par les normes de potabilité des eaux. Par rapport aux autres anions, la concentration en bicarbonate domine dans les eaux.

L'origine du sulfate est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses, selon la relation suivante : $CaSO_4 \cdot 2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$, l'OMS et l'UE, exigent des concentrations en sulfates inférieur à 250mg/l pour une eau potable.

Les concentrations des sulfates obtenues des eaux étudiées sont très variables et oscillent entre 0 mg/l à 68 mg/l. En plus de cela, de fortes teneurs de sulfates sont aussi signalées dans la zone du pourtour immédiat du Chari (Bousso 5, Lafana et Ndjamena-Bousso 2). Cette augmentation locale serait due probablement soit aux lessivages des sols, soit aux lessivages des couches évaporitiques de l'assise géologique. (Abderamane. 2012).

L'ion Cl^- représente dans la presque totalité des analyses, il est l'élément chimiques qui dominent dans la concentration en sels des eaux de cette zone. Sur la carte de la distribution spatiale de chlорure dans la zone d'étude. Les zones à concentration assez élevée en chlorures sont très foncées, à quelques détails près, aux zones à conductivité électrique élevée.

Elle varie entre 3 à 70 mg/l. Elle permet aussi de distinguer plusieurs secteurs :

- Un secteur à l'ouest de Bousso et précisément à Lafana avec des teneurs égales à 3 mg/l, cette zone indique une augmentation de la teneur de l'Ouest vers le centre de la dépression.

- La zone de la dépression avec une teneur égale à 70 mg/l à N'djamena-Bousso 2 où cette forte teneur pourrait avoir son explication dans l'influence du phénomène évaporatoire que connaissent la plupart des nappes en creux de l'Afrique sahélienne (Aranyossi et N'Diaye, 1993).

Les différents faciès chimiques caractérisés par les concentrations en ions majeurs sont généralement typiques de certains environnements géologiques ou hydrogéologiques (Ndédje-Allah, 2015)

Le diagramme de piper (figure 6) montre les faciès suivants :

- Faciès bicarbonaté calcique et magnésien;
- Faciès bicarbonaté sodique et potassique ;

Le faciès bicarbonaté calcique définit une faible minéralisation typique pour une eau souterraine près d'une zone de recharge, car toutes les eaux de surface produite par précipitation, ou les eaux immatures des aquifères sédimentaires sont de ce type.

Le faciès bicarbonaté sodique, défini une eau de recharge ayant parcourue une certaine distance où elle acquière des minéralisations au cours de son passage par lessivage selon la lithologie de la matrice du milieu aquifère avant de séjournée.

Pour ce secteur d'étude, les eaux prélevées dans des endroits près du fleuve Chari, ont des faibles profondeurs telles que Bousso 1 (11,91 m), Bousso 2 (11,74 m), Bousso 9 (11,5m) et Bousso 3 (11,08m) ont des faciès bicarbonatés calciques, tandis que, celles prélevées au centre et à des profondeurs importantes comme Nguerbeti (32,77m), Walia 1 (28,5m), Delfine (28,71m) et Walia 2 (27,63m) montrent des faciès bicarbonatés sodiques.

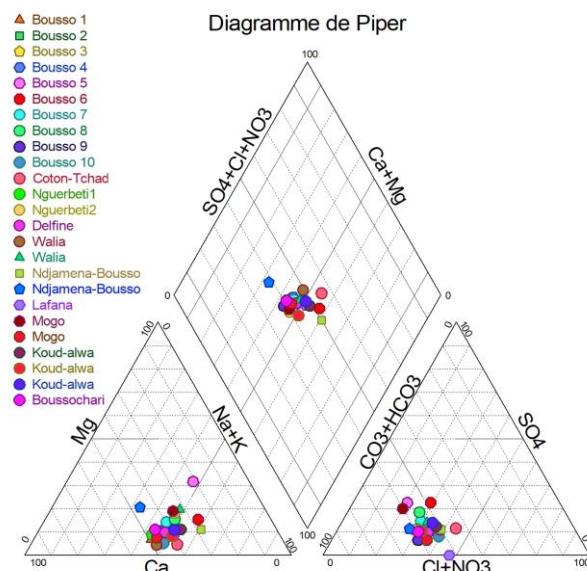


Figure 6 : Répartition des eaux analysées dans le diagramme de piper

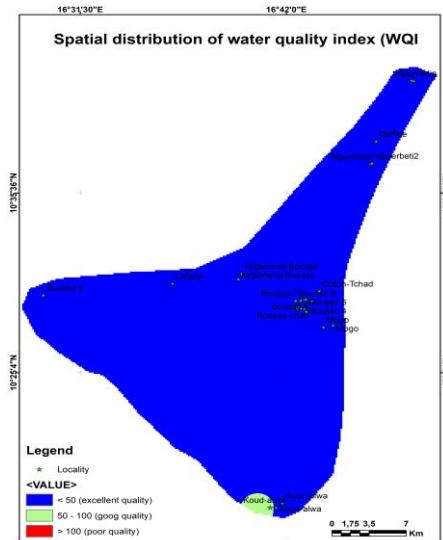


Figure 7 : Distribution de l'indice de qualité d'eau

Du point de vu qualité, toutes les eaux présentent des indices de qualité d'eau strictement inférieur à 100 donc par conséquent des eaux présentant une bonne aptitude à la consommation (figure 7).

4.3. Rapports caractéristiques

Les relations caractéristiques entre les différentes composantes chimiques majeures établis sur la base de matrice de corrélation représentent les relations communes entre les éléments chimiques dissoutes dans l'eau, c'est pourquoi les graphiques binaires sur lesquels des rapports Caractéristiques sont construit, montrant un coefficient de corrélations qui se rapprochent de 1. Le rapport K^+/Mg^{2+} (figure 8) montre que les eaux sont situées de part et d'autre de la droite de dissolution. La minéralisation serait d'une même origine à travers les formations géologiques.

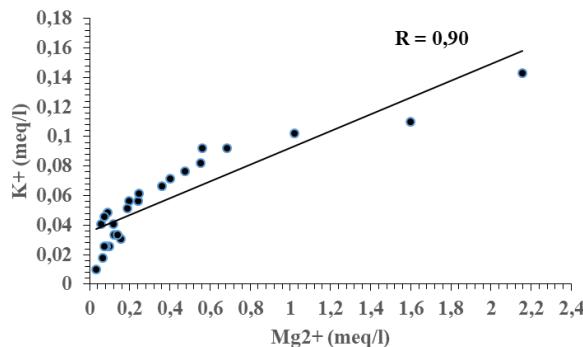


Figure 8 : Diagramme Kvs Mg

Le rapport Cl^-/K^+ (figure 9) montre que la plupart des eaux sont situées en dessous de droite de dissolution dominées par le potassium. La minéralisation serait à l'origine de longs séjours dans les aquifères ou au passage des eaux dans les formations géologiques.

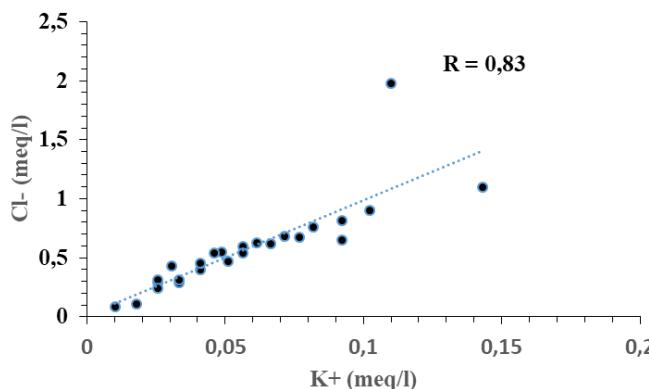


Figure 9 : Diagramme K vs Cl

Le rapport HCO_3^-/Na^+ (figure 10) montre que les eaux sont situées de part et d'autre de droite de dissolution dominées par les ions bicarbonate et ions sodium. La minéralisation serait due à la dissolution des évaporites en contact avec les formations carbonatées ou halites.

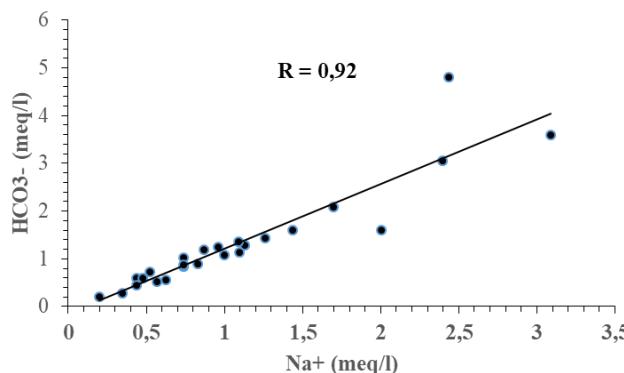


Figure 10 : Diagramme HCO_3 vs Na

Le rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ (figure 11) montre que la majorité des eaux sont situées sous la droite de dissolution dominées par les ions sulfates qu'aux ions chlorures. La minéralisation serait à l'origine de la dissolution des évaporites ou de la halite en contact les formations géologiques.

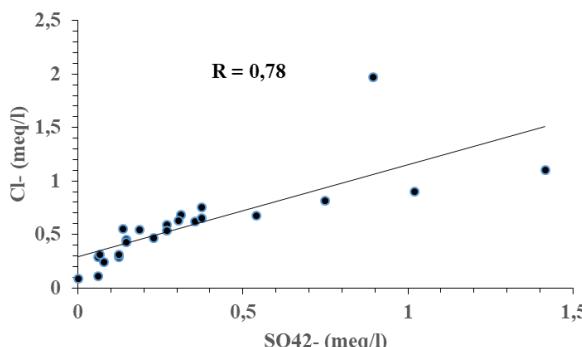


Figure 11 : Diagramme Cl vs SO_4

La relation $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ (figure 12) montre que la majorité des eaux sont situés en dessous de la droite de dissolution dominée par le calcium. La minéralisation serait liée aux formations carbonatées.

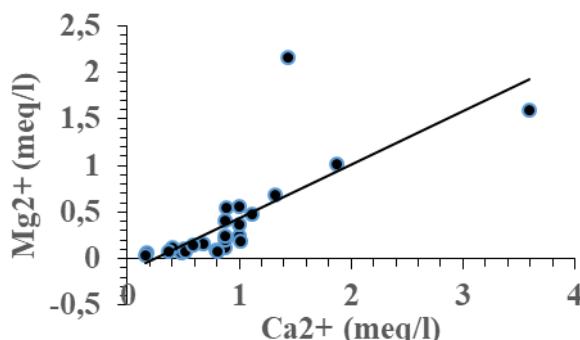


Figure 12 : Diagramme Mg vs Ca

4.4. Résultats des Analyses en Composantes Principales (ACP)

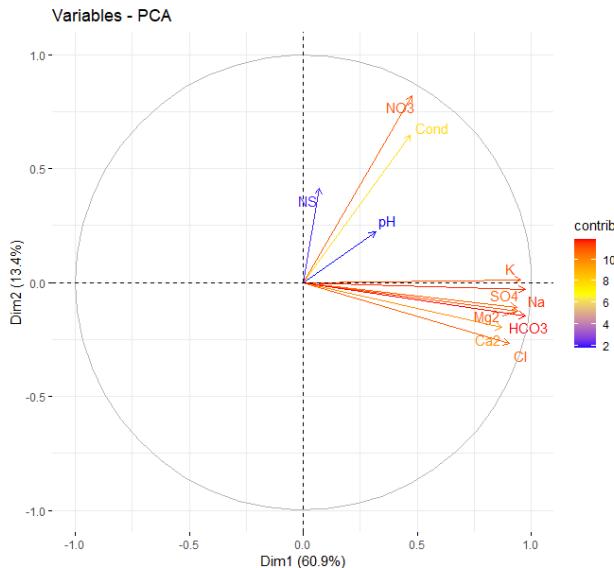


Figure 13 : Analyses de variables (plan factoriel Dim1- Dim2)

Pour cette analyse, il est retenu les axes factoriels supposés représentatifs de la variance de l'ensemble des données (figure 13). Le facteur F1(60,9) est fortement corrélé au bicarbonate, corrélé avec deux groupes d'éléments chimiques : Groupe 1 est formé de Ca²⁺, Cl⁻, Mg²⁺, qui seraient à l'origine de la dissolution des évaporites ou de la halite. Le Groupe 2 est formé de K⁺ et Na⁺ qui seraient liée à la dissolution des évaporites riches en magnésium (Rahamani, 2016). Les éléments fortement corrélés tels que le Cl et (K, Na, SO₄, Ca) d'un côté ; le Mg et (K, Na, SO₄, Ca) ; le K et (Na, SO₄, Ca) ; le Na et (SO₄, Ca) et enfin le SO₄ et Ca ont une source de provenance commune (tableau 5).

4.5. Processus de minéralisation des eaux souterraines

Les sels dissous dans les eaux souterraines proviennent des minéraux contenus dans les roches encaissantes du réservoir des formations traversées par le processus d'évaporation, de dissolution, de lessivage, de mélange etc. Les analyses montrent que la minéralisation des eaux est contrôlée par la nature des formations géologiques présentent dans le chari-Baguirmi.

En effet, l'origine des ions dans les eaux souterraines est contrôlée par le contact eau-roche comme l'indique les résultats des différentes études statistiques. La géologie de la zone d'étude est dominée par les formations des granitoïdes du socle cristallin, des dépôts pliocènes et des dépôts du quaternaire. L'hydrolyse de telles roches riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides, explique que les teneurs en Ca²⁺ et en Na⁺ soient dominantes pour les cations dans les eaux

souterraines. Ces ions sont issus de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux silicatés (Kouassi, 2010). En général, les concentrations d'ions majeurs dans les eaux souterraines indiquent qu'elles ne sont pas fortement minéralisées (Schneider et Wolff, 1992 ; Seeber, 2014). Quant à la potabilité de l'eau, les paramètres analysés respectent la norme de l'OMS et les normes de l'indice de qualité d'eau, mais la valeur de la conductivité Mesurée à Bousso 4, où l'ouvrage serait affecté par une pollution anthropique à grande importance ($CE=1218 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Tableau 5 : Matrice de corrélation

	NS	pH	Cond	Cl	Mg2	NO3	K	Na	SO4	Ca2	HCO3
NS	1										
pH	-0,27	1									
Cond	-0,05	0,26	1								
Cl	0,09	0,23	0,19	1							
Mg2	0,02	0,24	0,35	0,82	1						
NO3	0,4	0,32	0,63	0,23	0,34	1					
K	0,09	0,23	0,43	0,84	0,9	0,47	1				
Na	0,07	0,21	0,44	0,84	0,94	0,44	0,98	1			
SO4	-0,04	0,18	0,44	0,79	0,94	0,32	0,93	0,98	1		
Ca2	0,07	0,29	0,25	0,95	0,76	0,28	0,75	0,77	0,71	1	
HCO3	0,05	0,29	0,35	0,94	0,93	0,36	0,89	0,92	0,89	0,94	1

Conclusion

Ce travail porte sur la qualité des eaux souterraines de l'aquifère de Bousso et ses environs. Il a pour objectif de connaître l'origine de la minéralisation et la qualité physico-chimique des eaux pour une gestion saine, en tenant compte de la géologie, de l'hydrogéologie, du sens de la circulation des eaux souterraines. Les eaux présentent un pH qui fluctue en moyenne autour de la neutralité ($\text{pH}=7,25$), avec des conductivités supposées bonne dans la majorité des ouvrages mesurées.

La carte piézométrique issue des mesures de la période de basses eaux montre des courbes isopièzes dont l'altitude varie entre 371,02 m à la périphérie de la dépression de la zone d'étude, et 305,29 m au centre de la dépression. Le sens d'écoulement global est orienté vers le nord de la dépression. Elle donne non seulement une vue globale sur le sens de l'écoulement des eaux souterraines mais aussi, dans une moindre mesure, des informations sur les caractéristiques géologiques. L'étude hydrodynamique a permis de comprendre que les eaux de la zone d'étude ont subi une très nette évolution d'amont en aval.

Deux types d'eau sont identifiés à savoir, les eaux de type bicarbonaté calcique et magnésienne ; et les eaux de type bicarbonaté sodique et potassiques. Ces

derniers présentent des conductivités relativement faibles et regroupent aussi bien les eaux de puits que ceux de forages.

Parlant de la chimie des eaux, on note un gradient de minéralisation croissant en s'éloignant du chari vers le milieu de la zone, autrement dit, les eaux s'enrichissent en éléments dissous quand on s'éloigne du fleuve.

Financement

Cette recherche n'a bénéficié d'aucune subvention spécifique de la part d'organismes de financement des secteurs public, commercial ou à but non lucratif.

Déclarations de Conflit d'intérêts

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu sembler influencer le travail présenté dans cet article.

Références bibliographiques

- Abdelkerim adaw T. (2016).** Étude du fonctionnement hydrochimique et hydrodynamique du système aquifère dans la zone de madiago. (P1-P5-P6)
- Abdramane H. (2012).** Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du chari Baguirmi (république du Tchad) (P10-P15-P24-P30-P33-135)
- ANAM. (2022).** Données des paramètres climatiques. Agence National de Météorologie. Division climatique-Tchad.
- Aranyossi, J.F., et Ndiaye, B. (1993).** Etude et modélisation de la formation des dépressions piézométriques en Afrique Sahélienne. Revue des Sciences de l'eau (6) : 81- 96.
- Brown R.M., McClelland N.I., Deininger R.A., Tozer, R.G. (1970).** A water quality index – do we dare? Water Sew. Works 117, 339–343
- Brown, R. M., McClelland, N. I., Deininger, R. A., O'connor, M. F. (1972).** A Water Quality Indexcrashing the Physiological Barrier. Indic Environ Qual, 1, 173–182. Heavy Metal Pollution of Surface Soil in the Thrace Region, Turkey. Environmental Monitoring and Assessment, 119 (1–3): 545–556.
- Clément D. (2015).** Réalisation d'une carte piézométrique et intérêts dans la délimitation des aires d'alimentation de captages, mémoire de stage, université Bourgogne P.24
- Djoret D. (2000).** Etude de la recharge de la nappe du chari baguirmi (Tchad) par les methods chimiques et isotopiques. Thèse de doctorat. Sciences et agronomie. ED380. P 161.
- Kouassi AHOUSSI. (2010).** Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville, Int. J. Biol. Chem. Sci. 4(3) : 782-797, June 2010 P794

- Gleick, P.H. (1996).** Basic water requirements for human activities: Meeting basic needs. Water International Vol. 21, No. 2, pp. 83-92
- Hamed Y., Redhaounia B., Saad A., Hadji R., Zahri F., Zighmi K. (2017).** Hydrothermal waters from karst aquifer: Case study of the Trozza basin (Central Tunisia). 5. 33-44
- Kadjangaba E. (2018).** Impact des Processus Hydrochimique sur la Qualité des Eaux souterraines de la Ville de Ndjamena-Tchad ; European Scientific Journal June 2018 Edition Vol.14, No.18 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431 P167, P165, P135.
- Ketata M., Gueddari M., Bouhlila R. (2011).** Use of geographical information system and water quality index to assess groundwater quality in El Khairat deep aquifer (Enfidha, Central East Tunisia) Arab J Geosci (2012) 5: 1379.doi:10.1007/s12517-011-0292-9
- Mahamat N. (2013).** Caractérisation et fonctionnement du système aquifère de Haraz **Mohamad Fayçal O. (2013).** études des caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques du complexe terminal dans la zone du walo et du dieri (ferlo)-Sénégal, P35. **Ndedje A. (2015).** Contribution à la connaissance hydrogéologique des aquifères du Quaternaire de la plaine Naga (Sud-ouest du Tchad). Mémoire de master, université de N'Gaoundéré, 67p.
- Rahamani. (2016).** Approche hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines dans une zone semi-aride. Cas de la moi-Plio-Quaternaire du synclinal de Djelfa en Algérie. Université Larbi Tebessi, 81p.
- Rodier J., 2009.** L'analyse de l'eau, analyses physicochimiques et microbiologique 9e édition. 1529 p.
- Seeber K., Djoret D., Aminu M. B., SARA V. (2013).** Études de la qualité des eaux souterraines dans la plaine d'inondation du Logone inférieur. Document BGR/CBLT. 44 p.
- Siddick M.O. (2015).** Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines dans certaines zones défavorisées de la ville de N'Djamena au Tchad. Mémoire master, université de Yaoundé I, 53p.
- Schneider J.L et Wolff J.P. (1992).** Carte géologique et Carte hydrogéologique au 1/1 500 000 de la République du Tchad. Mémoire explicatif. Document BRGM N° 209, vol. 1 et 2, 689 p.
- Sutadian A., Muttill N., Yilmaz A., Perera B. (2015).** Development of river water quality indices—a review. Environmental Monitoring and Assessment. 188. 10.1007/s10661-015-5050-0.
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K. (2010).** Environ Monit Assess (2010) 171: 595. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1>