



ISSN: 0976-3376

Available Online at <http://www.journalajst.com>

ASIAN JOURNAL OF  
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Asian Journal of Science and Technology  
Vol. 17, Issue, 03, pp. 14178-14185, March, 2026

## RESEARCH ARTICLE

# EVALUATION DE LA QUALITÉ DES EAUX ET RISQUE DES DÉGRADATIONS DES SOLS AGRICOLES DANS LE DÉPARTEMENT DE LOUG-CHARI, CENTRE DU TCHAD

\*Abdelkadre Djibia, Abderamane Hamit, Mahamat Nour Abdallah and Djouingué Nguérassem

Chad

### ARTICLE INFO

#### Article History:

Received 14<sup>th</sup> December, 2025

Received in revised form

03<sup>rd</sup> January, 2026

Accepted 28<sup>th</sup> February, 2026

Published online 30<sup>th</sup> March, 2026

#### Key words:

Laboratoire,  
Chimiques analyses,  
Échantillons analyses,  
International.

### ABSTRACT

Dans le but de mettre en évidence la qualité des eaux et le risque des dégradations des sols agricoles dans le département de Loug-Chari, une étude a été réalisée. Une campagne de terrain a été menée pendant la période des basses eaux (mars 2023). Au cours de cette campagne, les paramètres physiques tels que le pH, la conductivité électrique, la température et le TDS ont été mesurés dans 24 ouvrages dont 2 puits ouverts, un échantillon d'eau de surface et 22 forages à motricité humaine. Un total de 25 échantillons d'eaux a été prélevé y compris l'eau de surface (le Chari). Ces échantillons ont été prélevés dans les flacons de 750 ml et expédiés au frais jusqu'au laboratoire national des eaux (LNE) pour l'analyse des paramètres chimiques (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Les résultats obtenus des paramètres in-situ ont montré que les eaux ont un pH variant entre 6,11 à 7,25 pour un moyen 7,25 dans les ouvrages, et la température mesurée avoisine de la température de l'air ambiante qui est de 31,5°C. La conductivité électrique oscille entre 62 µS/cm à 1323 µS/cm pour une moyenne de 412,60 µS/cm. Les valeurs de paramètres physiques mesurés sur le terrain respectent la norme de l'OMS. Les concentrations des paramètres chimiques analysés au laboratoire varient entre 3,28 mg/L à 72 mg/L avec une moyenne de 18,61 mg/L pour un écart de 13,55 mg/L. Ces valeurs sont inférieures à la norme de l'OMS (200 mg/L). Elles oscillent pour un minimum de 4,6 mg/L et 71 mg/L avec une moyenne de 28,92 mg/L et un écart de 16,76 mg/L pour le sodium. Ces analyses ont montré que la teneur en ion magnésium est faible dans les échantillons d'eau étudiés (0,437 mg/L et 26,244 mg/L). La valeur moyenne est de 4,73 mg/L et un écartype de 6,24 mg/L. Le potassium, avec une concentration moyenne de 2,25 mg/L et un écart de 1,27 mg/L, pour un minimum de 0,4 mg/L et un maximum de 5,6 mg/L. L'anion, le plus dominant dans les échantillons analysés est le bicarbonate dont les teneurs varient entre 12,2 mg/L à 292,8 mg/L avec une moyenne de 80,54 mg/L. Ils ont un écart de 65,40 mg/L. Pour le chlorure, la moyenne est de 20,42 mg/L avec un minimum de 3 mg/L et un maximum de 70 mg/L dont l'écart est de 13,39 mg/L. Toutes ses concentrations sont inférieures à 250 mg/L (seuil de potabilité de l'OMS, 2004). Les teneurs en ion sulfate sont faibles dans les eaux. Elles varient de 0,00 mg/L à 68,00 mg/L avec une moyenne de 16,28 mg/L et d'un écartype de 16,46 mg/L. Toutes ses valeurs sont inférieures à la norme de l'OMS (soit 250 mg/L). La moyenne des teneurs en nitrate de nos eaux est de 7,14 mg/L avec un minimum de 2,00 mg/L et un maximum de 22,00 mg/L dont son écart est 3,79 mg/L. Quant au fer, ses concentrations tournent autour de 0,01 mg/L à 2,00 mg/L avec une moyenne de 0,18 mg/L, un écartype de 0,50 mg/L. Selon les consignes de l'OMS, certaines eaux contiennent des teneurs en fer qui dépassent la directive internationale (OMS = 0,3 mg/L). Pour l'ammonium, sa concentration moyenne est de 0,85 mg/L et atteint un minimum de 0,06 mg/L et un maximum de 3,6 mg/L. Ses teneurs sont supérieures à la norme de l'OMS (1,5 mg/L) dans certains forages ou puits et d'autres ont des teneurs inférieures à la norme de l'OMS (1,5 mg/L). L'acquisition des eaux en éléments chimiques dissouts s'effectue par lessivage des roches encaissantes, et cela s'effectue par les processus d'échanges des bases. Les résultats d'analyses obtenus reportés dans le Diagramme de Piper ont permis d'identifier le faciès bicarbonaté calcique et magnésien et le faciès bicarbonaté sodique et potassique (figure 3A).

**Citation:** Abdelkadre Djibia, Abderamane Hamit, Mahamat Nour Abdallah and Djouingué Nguérassem. 2026. "Évaluation de la qualité des eaux et risque des dégradations des sols agricoles dans le département de Loug-Chari, Centre du Tchad", *Asian Journal of Science and Technology*, 17, (03), 14178-

Copyright©2026, Abdelkadre Djibia, Abderamane Hamit, Mahamat Nour Abdallah and Djouingué Nguérassem. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## INTRODUCTION

Dans les provinces comme le Chari Baguirmi plus précisément le département de Loug-Chari, l'eau souterraine constitue l'une des principales ressources utilisées pour l'irrigation des cultures. Cependant, la qualité de cette ressource est méconnue en raison d'un manque des études. Cette qualité de l'eau est en plus en plus remise en question en raison de la pression croissante exercée par les activités humaines, les changements climatiques et la mauvaise gestion de terres cultivables par les autochtones. Cette situation pose un vrai défi pour la durabilité des systèmes agricoles locaux et le bien-être des populations rurales dont les moyens de subsistance dépendent entièrement de l'agriculture ((Bouwer, 2000); Jalali, 2007, Ayers et Westcot, 1985).

L'eau souterraine bien que précieuse, peut aussi devenir un facteur de dégradation des sols agricoles si sa composition chimique n'est pas connue ou incompatible avec la nature du sol et les besoins des cultures dans ce département. Une eau trop salée ou riche en ions tels que sodium, chlorures, bicarbonates, etc... peut entraîner la dégradation des sols en compromettant ainsi leur structure, leur perméabilité et enfin leur fertilité (Rhoades, 1993; Qadir *et al*, 2008; Minhas et Sharma, 2006). Ces processus sont bien documentés dans nombreuses zones agricoles des régions arides et semi-arides (Bauder *et al*, 2014, Singh *et al*, 2010; Assouline *et al*, 2015) et le Loug-Chari ne semble pas faire l'exception. C'est dans ce contexte, il est important d'évaluer la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation pour assurer la santé des cultures et des sols. L'aptitude d'une eau à des fins agricoles ne se mesure pas uniquement à sa pureté apparente mais à sa composition chimique et ses interactions avec le sol (FAO,

1989). De nombreux travaux confirment cette complexité appelant à une combinaison d'analyse chimique, d'interprétation agronomique et d'évaluation environnementale ((Tidjani *et al.*, 2009); WHO, 2011 ; Zaman *et al* 2018). C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude qui vise à évaluer la qualité des eaux utiliser en irrigation dans le département de Loug-Chari et identifier les risques potentiels de dégradation des sols agricoles. A travers une approche combinant analyses physico-chimiques, les indicateurs d'aptitude à l'irrigation et diagnostic environnemental. Cet article ambitionne de fournir des outils d'aide à la décision pour une gestion durable des ressources hydriques et des terres agricoles dans cette partie du Tchad. Cette étude a pour objectif principal d'analyser les eaux utilisées pour l'irrigation ainsi que les risques liés à la dégradation des sols agricoles dans le département de Loug-Chari. Elle englobera une caractérisation physico-chimique des eaux, l'identification des facteurs responsables de la dégradation des sols, et l'évaluation de leurs répercussions sur la production agricole dans cette zone du centre du Tchad.

**Présentation 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 (Fig. 1). La région du Chari Baguirmi 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). Le département de Loug-Chari situé au Sud-Est de N'Djamena, sur les bords du fleuve Chari dans la province du Chari-Baguirmi, il est l'un de département où les activités de l'exploitation pétrolière est très intense.

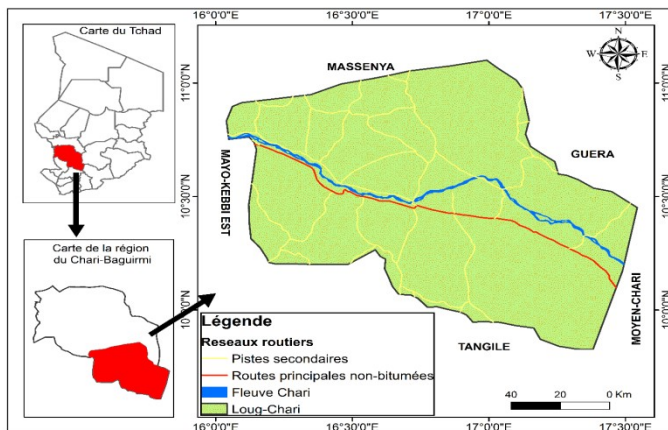


Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude

Les précipitations arrosent régulièrement la zone d'étude en saison pluvieuse, et se prolongent pour une période de six à sept mois. Les précipitations mensuelles enregistrées entre 1991 et 2021 sur la station de Bousso présentent un régime uni modal correspondant ainsi au domaine de la mousson atlantique (Leroux, 1980), principale source d'humidité. Les moyennes pluviométriques mensuelles mesurées au cours de trente dernières années (1991 à 2021) à la station de Bousso montrent que, les précipitations commencent en mai et atteignent leur maximum en août (257mm). Une telle pluviométrie est caractéristique d'un milieu sahélo-soudanien.

Le département de Loug-Chari est caractérisé par une plaine aux sols à texture et structure variable. Il compte quatre (4) types de sols:

- ✓ Les sols hydro morphes, inondable propices à la culture de Berbère pratiquée dans la zone Nord et Est de Bousso ;
- ✓ Les vertisols favorables aux cultures de décrues (Berbère)
- ✓ Les sols sableux et sablo-argileux, propices aux cultures pluviales (le reste de l'ensemble du département).

Le sol Dans le département de Loug-Chari est fertile pour l'agriculture et le maraichage mais nous constatons qu'une baisse de productivité qui est due à l'effet néfaste des activités pétrolière dans

la zone (Source : PDL de Bousso 2014). Sur le plan géologique, le département du Loug-Chari est formé de différents types des formations ((Vincent et Phillips, 1954); Gérard, 1953 ; Wackrenier, 1953 ; (Bouteyre *et al.*, 1992); Abdramane, 2012) : Tertiaires regroupant le Continental Terminal qui sont en contact avec la discordance au Crétacé atteignant une puissance de 80 à 100 m au centre du Chari-Baguirmi. Il forme des aquifères plus ou moins encaissants parfois très argileux dont la productivité de certaines structures est très faible (Massuel, 2001). On rencontre également le pliocène inférieur en alternance avec les bancs de sables et d'argiles du Continental Terminal et s'enfonce jusqu'au nord du lac Tchad depuis le bord du bassin et contient des aquifères artésiens. Les Pliocènes moyens sont des dépôts continentaux lacustres qui ont une puissance de 10 à 30 m (Abdrmane, 2012) et les Pliocènes supérieurs contenant un dépôt d'argile molle vert robuste et des dépôts gypso-argileux atteignant 200 à 300 m de puissances et en fin des formations quaternaires marquent la fin du dépôt d'argile imperméable du Pliocène et couvre toute la zone d'étude. Ce sont des sédiments de clastes sableux et argileux reformés dans les rivières, les lacs ou delta et éoliens.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

**Échantillonnage:** L'échantillonnage a été réalisé dans les ouvrages hydrauliques souterrains tels que les forages et les puits et les cours d'eau dans le département de Loug-Chari (Fig. 2). Lors de cette campagne, les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de 1,5 litre. Sur le terrain, ces flacons ont été rincés au moins trois fois avec de l'eau de forages ou puits pour éviter la contamination des échantillons et laisser l'eau couler pendant 5 min pour s'assurer qu'elle provienne de la nappe souterraine. Au niveau des puits, l'eau est prélevée à l'aide d'une puisette puis embouteillée de façon à éviter l'emprisonnement des bulles d'air. Par contre au niveau des forages, le prélèvement des échantillons d'eau a été direct à la pompe manuelle. Les échantillons ainsi prélevés ont été conservés au frais pendant toute la durée de campagne et expédiés ensuite au laboratoire national de l'eau (LNE) à N'Djamena dans une condition normale (4°C). Sur le terrain, les paramètres physico-chimiques in situ ont été mesurés à l'aide de l'appareil multi-paramètre HQ40d. Ils concernent la température, le pH, la conductivité électrique. Les mesures ont été faites au mois de juin-juillet 2023.

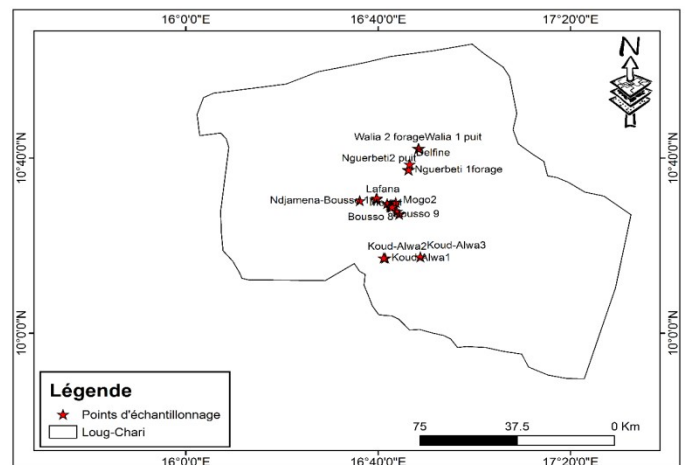


Figure 2. Carte d'échantillonnage des eaux dans le département de Loug-Chari

**Analyse:** Un total de 25 échantillons d'eau prélevées, ont été analysés au Laboratoire Nationale de l'Eau (LNE) à l'aide de spectrophotomètre UV6000. Les paramètres chimiques analysés sont :  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $NO_3^-$ . Les résultats de ces analyses ont été reportés dans le tableau 1. Ces résultats ont été testés pour l'équilibre des charges ioniques selon la formule suivante (Freeze et Cherry, 1979) :

$$BI (\%) = 100 * (\sum Cations - \sum Anions) / (\sum Cations + \sum Anions)$$

BI : la balance ionique s'exprime en pourcentage

Pour tous les échantillons, l'erreur analytique sur l'équilibre entre les cations et les anions ne dépasse pas plus ou moins 5%, ce qui signifie que les résultats des analyses au laboratoire sont valables pour l'interprétation.

sur les 13 variables tels que : le pH, CE, T°C, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Fe<sup>2+</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup>

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

**Hydrochimie des eaux:** Le pH des eaux étudiées est compris entre un minimum de 6,11 et un maximum de 7,25 avec une moyenne de 6,77 et un écartype de 0,34.

**Tableau 1. Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et surfaces dans le département de Loug-Chari**

Nom	pH	CE	TDS	NTU	CaCO <sub>3</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
BOU 1	7.06	293.0	147.0	1.0	50.0	17.6	1.5	1.6	17.0	62.2	14.0	10.0	9.0	0.14	0.97
NDJ BOU 2	7.16	1323.0	663.0	1.0	260.0	72.0	19.4	4.3	56.0	292.8	70.0	43.0	7.0	0.11	1.11
BOU 4	7.17	453.0	228.0	1.9	62.0	20.0	2.9	2.2	22.0	75.6	19.0	13.0	11.0	0.1	0.93
BOU 7	7.10	539.0	270.0	0.8	68.0	20.0	4.4	2.6	25.0	83.0	22.0	17.0	6.0	0.0	1.00
NDJ BOU 1	6.15	90.0	47.0	1.9	12.0	3.4	0.8	0.7	8.0	17.1	3.9	3.0	6.6	0.1	0.33
BOU DARI 1	6.55	191.0	96.0	8.0	36.0	11.7	1.7	1.3	12.0	43.9	11.0	6.0	4.0	0.0	0.79
BOU 8	6.70	763.0	382.0	1.4	80.0	22.4	5.8	3.0	33.0	97.6	24.0	26.0	7.0	0.0	0.88
NGUER 01 F0	6.69	397.0	198.0	1.6	60.0	20.2	2.3	2.0	20.0	73.2	16.6	11.0	8.6	0.0	1.02
LAFIA 1	6.11	62.0	32.0	4.0	10.0	3.3	0.4	0.4	4.6	12.2	3.0	0.0	5.9	0.0	0.11
BOU 9	6.52	122.0	62.0	0.3	30.0	10.1	1.2	1.0	10.0	36.6	10.2	3.0	2.0	1.7	0.38
KOUD 1	6.15	122.0	62.0	0.7	26.2	8.1	1.5	1.3	13.0	32.0	10.1	6.0	5.3	2.00	0.62
BOU 3	6.22	316.0	159.0	1.0	54.0	17.6	2.4	2.2	23.0	65.9	21.0	13.0	4.6	0.03	0.79
KOUD 3	6.94	321.0	162.0	0.8	56.4	17.6	3.0	2.4	25.2	68.8	22.3	14.6	7.1	0.0	0.88
WALIA F01	6.56	224.0	113.0	28.0	44.0	16.1	0.9	1.8	17.0	53.7	19.2	9.0	8.0	0.0	0.77
WALIA PUIITS 1	6.86	554.0	277.0	1.4	72.0	17.8	6.7	3.2	29.0	87.8	26.8	18.0	6.0	0.0	0.75
BOU 2	7.01	426.0	211.0	1.3	64.0	17.6	4.9	2.8	26.0	78.1	24.1	15.0	4.2	0.0	0.88
COTON TCHAD 1	6.82	128.0	65.0	0.9	27.2	9.8	0.7	1.6	14.3	33.9	16.1	7.0	6.0	0.0	0.71
BOU 6	6.80	704.0	353.0	1.6	78.0	20.0	6.8	3.6	46.0	97.6	29.0	36.0	9.2	0.0	1.00
KOUD 2	6.68	110.0	56.0	2.0	22.0	7.4	0.9	1.0	10.0	26.8	8.6	4.6	3.8	0.0	0.64
BOU 10	6.87	225.0	113.0	1.1	44.6	16.0	1.1	1.9	19.0	54.4	19.5	6.6	7.2	0.0	0.82
NGUER PUIITS	7.22	792.0	396.0	21.0	100.0	26.4	8.3	3.6	39.0	126.9	23.0	18.0	22.0	0.02	3.60
BOU 5	7.25	1001.0	501.0	1.0	180.0	28.8	26.2	5.6	71.0	219.6	39.0	68.0	11.0	0.01	0.06
DELFINE 1 F0	6.76	206.0	104.0	0.7	42.0	13.7	1.9	1.2	17.0	51.2	15.1	7.0	6.0	0.0	0.81
MOGO 1	6.94	839.0	420.0	1.0	145.0	37.5	12.4	4.0	55.0	185.9	32.0	49.0	7.0	0.0	1.00
MOGO 2 F0	6.91	114.0	57.0	0.9	30.0	10.3	1.0	1.0	11.0	36.6	11.0	3.2	3.9	0.0	0.41

**Tableau 2. Valeurs propres de l'ACP**

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
Valeurs propre	8,968	1,811	1,053	8,177	6,077
Variabilité (%)	64,059	12,938	75,260	58,412	43,412
% Cumulé	64,059	76,998	84,524	90,365	94,707

**Tableau 3. Poids dimensionnels des variables**

	Dim.1	Dim.2	Dim.3	Dim.4	Dim.5
pH	0,69	0,30	0,01	0,35	0,19
T°C	0,17	0,44	0,64	0,56	0,08
CE	0,98	0,01	0,02	0,05	0,03
Ca <sup>2+</sup>	0,88	0,07	0,02	0,25	0,39
Mg <sup>2+</sup>	0,91	0,21	0,07	0,16	0,22
K <sup>+</sup>	0,95	0,01	0,00	0,07	0,18
Na <sup>+</sup>	0,96	0,09	0,00	0,02	0,20
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,97	0,12	0,03	0,00	0,09
Cl <sup>-</sup>	0,91	0,16	0,07	0,11	0,28
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,91	0,23	0,07	0,09	0,29
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,48	0,72	0,31	0,03	0,27
Fe <sup>2+</sup>	0,28	0,40	0,64	0,52	0,03
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0,34	0,82	0,32	0,17	0,14

**Traitement des données:** Le traitement des données collectées sur les eaux souterraines et de surface du département de Loug-Chari a été réalisé à l'aide des méthodes hydrochimique et statistique multivariée. Pour l'étude hydrochimique, le diagramme de Piper a été nécessaire pour la classification hydrochimique des eaux. En effet, l'utilisation de ce diagramme dans le domaine de l'hydrochimie par bon nombre d'auteurs (Biémi, 1992); (Ouandaogo-Yameogo, 2008); (ABDOU BABAYE, 2012); (N'tcha *et al.*, 2018b) a conduit à de très bons résultats. L'application de la technique exploratoire ACP repose sur le choix du nombre d'axes représentant le maximum d'inertie conservée avec le minimum possible de facteurs. En global, l'ACP d'une région n'est valable que lorsque les plans factoriels étudiés retiennent au moins 70% d'informations (Faillat et Drogue, 1993); (Abdou Babaye, 2012); (Sambiénu, 2019). Les analyses statistiques ont porté

Ces eaux souterraines et de surface sont acides à neutres. La conductivité électrique oscille entre 62 μS/cm à 1323 μS/cm pour une moyenne de 412,60 μS/cm dont l'écartype est de 329,06. Ces valeurs indiquent une minéralisation moyenne à forte car elles sont inférieures à 1000 μS/cm d'une part et supérieures à 1000 μS/cm d'autre part. Certaines eaux ont des conductivités électriques qui n'atteignent pas la norme d'OMS, 2000 (soit 1500 mg/L) et d'autres sont supérieures à la norme OMS, 2000 (soit 1500 mg/L). En effet, la minéralisation correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau. Quant à la température des eaux, elle varie entre 26,7°C à 33,6°C avec une moyenne de 31,45°C et un écart de 1,38°C. Le solide total dissous évolue en fonction de la conductivité électrique. Lorsque la conductivité électrique augmente dans les eaux, le solide total dissous augmente. Par contre, lorsqu'elles diminuent, la teneur en solide total dissous diminue considérablement aussi. Ses teneurs

varient entre un minimum de 32 ppm à 663 ppm avec une moyenne de 206,96 ppm et un écart de 164,45 ppm. Pour les cations, on observe par ordre pondéral décroissant : le calcium, le sodium, le magnésium et le potassium. Le calcium et le sodium sont des cations les plus abondants dans les eaux étudiées. Les teneurs en calcium varient entre 3,28 mg/L à 72 mg/L avec une moyenne de 18,61 mg/L pour un écart de 13,55 mg/L. toutes ces valeurs sont inférieures à la norme de l’OMS (200 mg/L) et elles oscillent pour un minimum de 4,6 mg/L et 71 mg/L avec une moyenne de 28,92 mg/L et un écart de 16,76 mg/L pour le sodium. Toutes les valeurs obtenues sont inférieures à la norme de l’OMS (soit 150 mg/L). Pour le magnésium, les concentrations vont d’un minimum de 0,437 mg/L et d’un maximum de 26,244 mg/L. la valeur moyenne est de 4,73 mg/L et un écartype de 6,24 mg/L. Ses valeurs montrent une faible teneur en magnésium. C’est un cation le plus dilué et inférieures à la norme internationale de l’OMS (soit 50 mg/L). Le potassium, avec une concentration moyenne de 2,25 mg/L et un écart de 1,27 mg/L, pour un minimum de 0,4 mg/L et un maximum de 5,6 mg/L. toutes ses valeurs sont inférieures fixées par l’Organisation Mondiale de la Santé (OMS = 12 mg/L) et indique de très faibles teneurs en potassium dans les eaux.

avec une moyenne de 0,18 mg/L, un écartype de 0,50 mg/L. selon les consignes de l’OMS, certaines eaux contiennent des teneurs en fer qui dépassent la directive internationale (OMS = 0,3 mg/L). Pour l’ammonium, ses concentration moyenne est de 0,85 mg/L et atteint un minimum de 0,06 mg/L et un maximum de 3,6 mg/L. Ses teneurs sont supérieures à la norme de l’OMS (1,5 mg/L) dans certains forages ou puits et d’autres ont de teneurs inférieures à la norme de l’OMS (1,5 mg/L). En effet, l’examen des teneurs en éléments majeurs montre que la minéralisation des eaux est régie par le sodium et le calcium pour les cations et par le bicarbonate et le chlorure pour les anions. Ainsi, le diagramme de Piper est un outil graphique utilisé pour représenter la composition chimique des eaux, notamment les eaux souterraines et de surface. Il permet de visualiser la répartition des principaux ions présents dans l’eau et d’identifier les types d’eau ainsi que les processus géochimiques qui influencent leur composition. Les résultats d’analyse de paramètres physico-chimiques reportés dans le diagramme de Piper a permis de conclure que les eaux souterraines et de surface du département du Loug-Chari sont caractérisées par le faciès bicarbonaté calcique et magnésien et le faciès bicarbonaté sodique et potassique (figure 3A).

**Tableau 4. Poids dimensionnels des individus**

	Dim.1	Dim.2	Dim.3
F1	0,217	0,211	0,095
F2	0,865	0,028	0,001
F3	0,031	0,063	0,313
F4	0,156	0,010	0,131
F5	0,822	0,009	0,0005
F6	0,313	0,059	0,373
F7	0,631	0,027	0,000
F8	0,120	0,451	0,174
F9	0,838	0,015	0,012
F10	0,421	0,249	0,277
F11	0,413	0,093	0,187
F12	0,195	0,163	0,002
F13	0,032	0,222	0,216
F14	0,663	0,074	0,060
F15	0,322	0,000	0,351
F16	0,059	0,041	0,033
F17	0,785	0,035	0,069
F18	0,720	0,005	0,027
F19	0,899	0,0001	0,056
F20	0,537	0,060	0,0002
F21	0,282	0,615	0,076
F22	0,812	0,053	0,005
F23	0,807	0,040	0,069
F24	0,910	0,031	0,004
F25	0,753	0,067	0,067

**Tableau 5. Les résultats statistiques des paramètres physico-chimiques des eaux échantillonnées**

Statistiques	pH	T	CE	TDS	NTU	CaCO <sub>3</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
MIN	6.11	26.7	62	32	0.31	10	3.28	0.437	0.4	4.6	12.2	3	0	2	0.01	0.06
MAX	7.25	33.6	1323	663	28	260	72	26.24	5.6	71	292.8	70	68	22	2	3.6
Moy	6.77	31.45	412.60	206.96	3.41	66.14	18.61	4.76	2.25	24.92	80.54	20.42	16.28	7.14	0.18	0.85
Ecartype	0.34	1.38	329.06	164.45	6.60	55.92	13.55	6.24	1.27	16.76	65.40	13.39	16.46	3.79	0.50	0.64

Pour les anions, l’ordre pondéral décroissant est le suivant : le bicarbonate, le chlorure, le sulfate et le nitrate. L’anion, le plus dominant est le bicarbonate dont les teneurs varient entre 12,2 mg/L à 292,8 mg/L avec une moyenne de 80,54 mg/L. Ils ont un écart de 65,40 mg/L. Pour le chlorure, la moyenne est de 20,42 mg/L avec un minimum de 3 mg/L et un maximum de 70 mg/L dont l’écart est de 13,39 mg/L. Toutes ses concentrations sont inférieures à 250 mg/L (seuil de potabilité de l’OMS, 2004). Les teneurs en ion sulfate sont faibles dans les eaux. Elles varient de 0,00 mg/L à 68,00 mg/L avec une moyenne de 16,28 mg/L et d’un écartype de 16,46 mg/L. Toutes ses valeurs sont inférieures à la norme de l’OMS (soit 250 mg/L). La moyenne des teneurs en nitrate de nos eaux est de 7,14 mg/L avec un minimum de 2,00 mg/L et un maximum de 22,00 mg/L dont son écart est 3,79 mg/L. c’est un ion qui provient des activités anthropiques. Ses teneurs obtenues respectent la norme de l’OMS (soit 50 mg/L). Pour les ions traces dangereux et nuisibles à la santé humaine tels que le fer, ses concentrations tournent autour de 0,01mg/L à 2,00 mg/L

Le digramme de Schoeller-Berkoloff (Fig. 3B) à échelle logarithmique, permet de distinguer les faciès chimiques et confirme ce qui a déjà été identifiée par le diagramme de Piper dont nous avons constatés que les éléments dominants sont HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup> et Na<sup>+</sup> d’où obtient le faciès bicarbonaté calcique et magnésien et le faciès bicarbonaté sodique et potassique. En exprimant sous forme de pourcentage les teneurs en cations et anions respectivement, on obtient 53% de teneurs en sodium, 38% d’ions calcium, 5% de magnésium et 4% de la concentration en potassium dans les différents échantillons d’eau prélevées dans le département de Loug-Chari. Pour les anions, le bicarbonate est dominant dans l’eau avec un pourcentage de 71%, 17% des ions chlorure, 12% de nitrate et 0% des ions de sulfate (Fig.4). La figure 5A&B est un diagramme de Wilcox utilisé pour évaluer la qualité des eaux pour l’irrigation selon deux paramètres : la conductivité électrique qui indique la salinité totale de l’eau. Plus elle est élevée, plus l’eau contient de sels dissous, ce qui peut nuire aux cultures. Le dernier paramètre est le pourcentage de

sodium (%Na) qui reflète le risque de sodisation des sols (excès de sodium qui déstructure le sol et réduire l'infiltration). La projection des résultats d'analyse sur ce diagramme a montré que la majorité des points (forages, puits et eau de surface) sont situés dans les zones excellente a admissible. Ce qui justifie que ces eaux sont adaptées à l'irrigation et montrent un faible risque de salinité ou sodisation. Le diagramme (Fig.5C) permet d'étudier l'aptitude des eaux à l'irrigation. Il prend en compte la conductivité électrique qui influence la toxicité ionique et l'absorption de l'eau par les plantes et le pouvoir alcalinisant (SAR) qui renseigne sur le risque de sodisation des sols. Selon les observations de cette figure 5C, la majorité des échantillons (forages, puits et eau de surface) se situent dans les zones SAR faible à moyen (entre 4 et 10) avec une conductivité électrique modérée (< 1000 µS/cm). Ce sont des eaux globalement favorables à l'irrigation, sans impact majeur sur la structure des sols. Quelques forages et puits dépassent SAR >10 et CE >1000 µS/cm, indiquant un risque accru d'alcalinisation et de salinité moyenne à forte. Ces eaux peuvent affecter la porosité des sols, notamment en cas d'irrigation prolongée sur des sols argileux. Globalement, les eaux analysées sont adaptées à l'irrigation, avec faibles risques de salinité et d'alcalinisation pour la majorité des échantillons. Toutefois, une vigilance s'impose pour certains forages et puits présentant des valeurs élevées de SAR, car cela pourrait nécessiter.

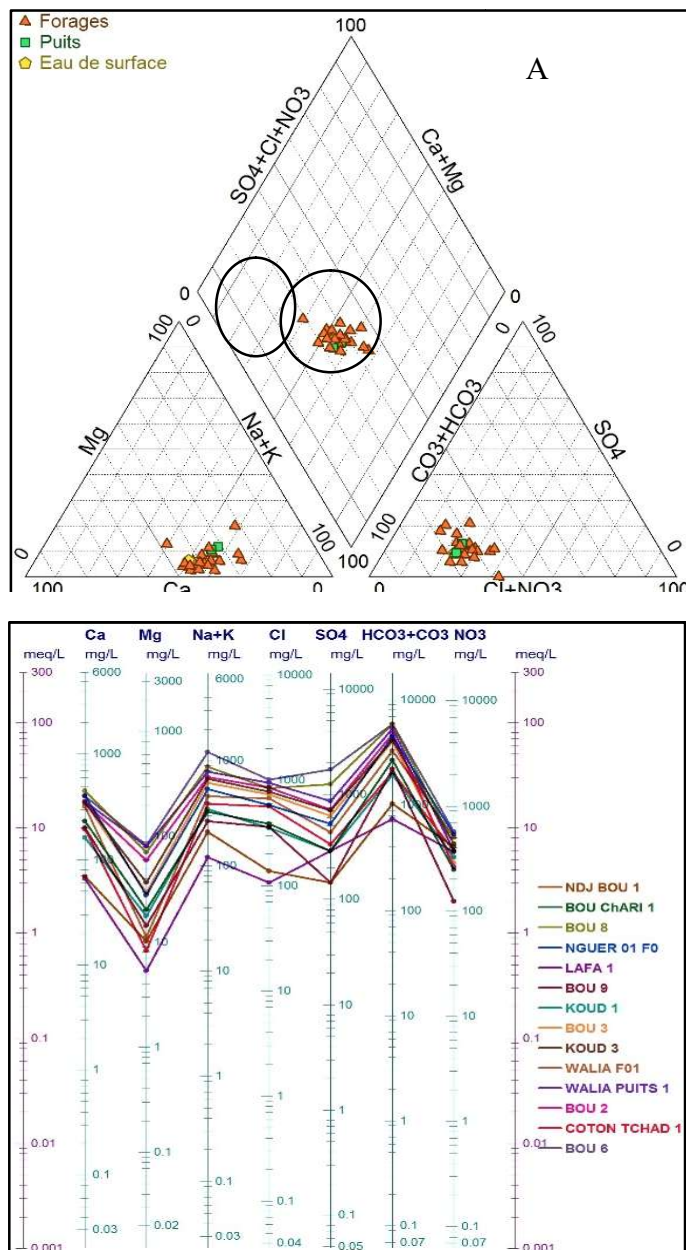


Figure 3. Diagrammes de Piper et Schoeller-Berkoloff

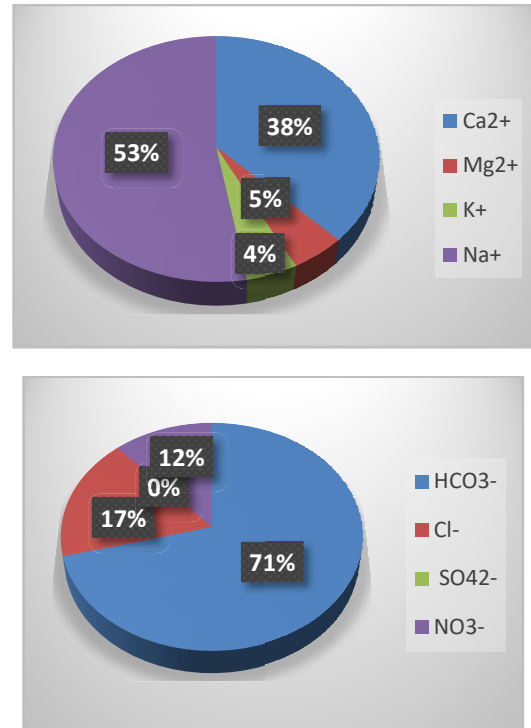


Figure 4. Pourcentage des teneurs en cations et en anions

Le diagramme de Riverside est un outil similaire, utilisé pour évaluer le risque de dégradation des sols causé par la salinisation et l'alcalinisation, en délimitant des zones de danger (Fig.5C). Globalement, la répartition des points indiquée par la figure montre que la majorité des points se trouvent dans les zones C1-S1, C2-S1, C2-S2, C3-S1, C3-S2, C3-S3, ce qui suggère une salinité faible à moyenne avec un faible indice de sodicité (SAR). Très peu de points apparaissent dans les zones C4, ce qui indique une faible accumulation de sels dissous. Enfin, aucun point n'est situé dans les zones S3 et S4, confirmant ainsi un faible risque de sodification des sols.

**Analyses statistiques multivariées**

**Matrice de corrélation de Pearson:** La matrice de corrélation indique les valeurs de corrélation, qui mesurent le degré de relation linéaire entre chaque paire de variables. Les valeurs de corrélation peuvent être comprises entre 0,5. Si les deux variables ont tendance à augmenter et à diminuer en même temps, la valeur de corrélation est positive. Lorsqu'une variable augmente alors que l'autre diminue, la valeur de corrélation est négative. La matrice de corrélation est utilisée beaucoup plus pour évaluer l'importance et la direction de la relation entre deux variables. Une valeur de corrélation positive élevée indique que les variables mesurent la même caractéristique. Si les items ne sont pas fortement corrélés, ils peuvent mesurer des caractéristiques différentes ou ne pas être clairement définis. Dans ces résultats, les variables ont une corrélation linéaire positive. Le coefficient de corrélation est compris entre 0,52 à 0,95 (tableau 2). Souvent, plus la corrélation est élevée, plus l'intervalle de confiance est étroit. Le tableau 2 a montré que les paramètres physico-chimiques sont fortement entre corrèlés entre eux. Par exemple, le pH de nos eaux analysées a corrélation modérée avec les autres paramètres tels que la conductivité électrique ( $r^2 = 0,62$ ), le calcium ( $r^2 = 0,56$ ), le magnésium ( $r^2 = 0,53$ ), le potassium ( $r^2 = 0,65$ ), le sodium ( $r^2 = 0,60$ ), le bicarbonate ( $r^2 = 0,60$ ), le chlorure ( $r^2 = 0,58$ ) et le sulfate ( $r^2 = 0,52$ ). La conductivité électrique a une forte corrélation avec les paramètres chimiques analysés au laboratoire. Ses valeurs de corrélation varient entre 0,87 à 0,95 (tableau 2). Ce qui justifie que les eaux de la zone d'étude sont fortement minéralisées. Quant aux ions calcium ( $Ca^{2+}$ ) ont une corrélation significative avec les ions magnésium ( $r^2 = 0,75$ ), les ions potassium ( $r^2 = 0,74$ ), les ions sodium ( $r^2 = 0,75$ ), les ions sulfate ( $r^2 = 0,75$ ) et fortement corrélés avec les ions bicarbonate ( $r^2 = 0,94$ ) et les ions chlorure ( $r^2 = 0,95$ ).

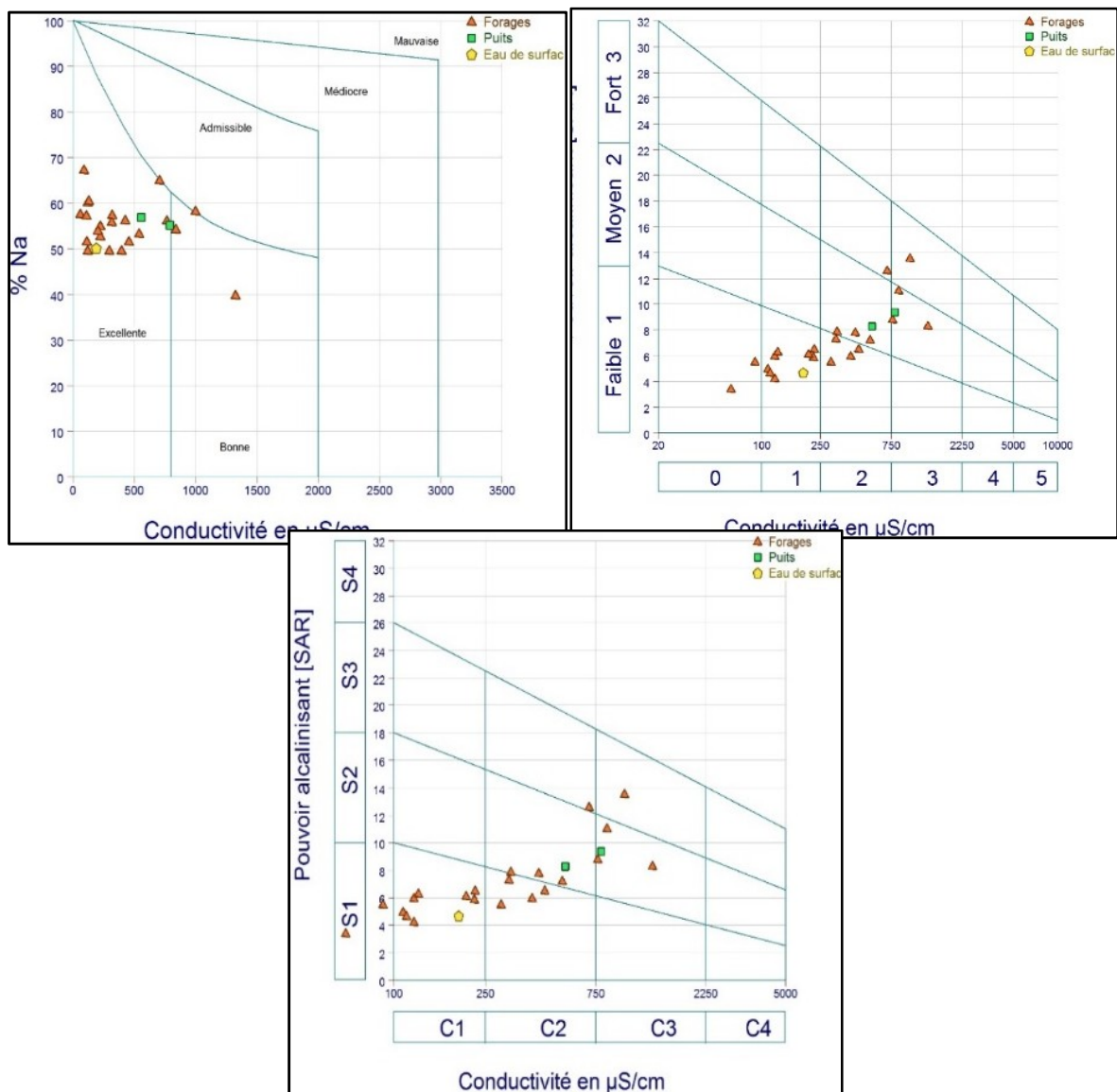


Figure 5. Diagrammes de Wilcox (A), (B) et Riverside des échantillons d'eau analysée

Tableau 6. Matrice de corrélation des variables

	pH	T°C	CE	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Fe <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
pH	1												
T°C	0.13	1											
CE	0.62	0.18	1										
Ca <sup>2+</sup>	0.56	0.13	0.89	1									
Mg <sup>2+</sup>	0.53	0.14	0.88	0.75	1								
K <sup>+</sup>	0.65	0.16	0.92	0.74	0.89	1							
Na <sup>+</sup>	0.6	0.19	0.93	0.77	0.93	0.97	1						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.6	0.15	0.95	0.94	0.92	0.88	0.92	1					
Cl <sup>-</sup>	0.58	0.17	0.9	0.95	0.82	0.83	0.84	0.94	1				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.52	0.21	0.87	0.71	0.94	0.93	0.97	0.88	0.78	1			
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.47	-0.02	0.46	0.28	0.34	0.47	0.43	0.35	0.23	0.31	1		
Fe <sup>2+</sup>	-0.37	0.2	-0.25	-0.18	-0.16	-0.3	-0.23	-0.19	-0.2	-0.2	-0.25	1	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.41	-0.16	0.36	0.31	0.08	0.3	0.24	0.24	0.21	0.06	0.78	-0	1

Analyse en Composante Principale (ACP)

Pour les ions magnésium, ils ont une corrélation forte entre les ions potassium ( $r^2 = 0,89$ ), les ions sodium ( $r^2 = 0,93$ ), les ions bicarbonate ( $r^2 = 0,92$ ), les ions chlorure ( $r^2 = 0,82$ ) et les ions sulfate ( $r^2 = 0,94$ ). Cette corrélation est également très entre les ions potassium et les ions sodium ( $r^2 = 0,97$ ), les ions bicarbonate ( $r^2 = 0,88$ ), les ions chlorure ( $r^2 = 0,83$ ) et les ions sulfate ( $r^2 = 0,93$ ). Elle est significative entre les ions sodium et les ions bicarbonate ( $r^2 = 0,92$ ), les ions chlorure ( $r^2 = 0,84$ ) et les ions sulfate ( $r^2 = 0,97$ ). Pour les ions bicarbonate, ils ont une corrélation forte avec les ions chlorure ( $r^2 = 0,94$ ) et les ions sulfate ( $r^2 = 0,88$ ). Cette corrélation est modérée entre les ions chlorure et les ions sulfate ( $r^2 = 0,78$ ), entre les ions nitrate et les ions ammonium ( $r^2 = 0,78$ ).

Ces fortes corrélations observées entre les variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux. L'analyse en composantes principales est l'une des analyses de données multivariées les plus fréquemment utilisées. Elle étudie des ensembles de données multidimensionnelles avec des variables quantitatives. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une méthode statistique multivariée qui permet d'extraire les corrélations d'un ensemble de données à travers un ensemble de fonctions empiriques orthogonales. Elle représente une méthode descriptive permettant d'étudier les relations linéaires entre les variables sans tenir compte a priori d'une quelconque structure (Jolliffe, 2002).

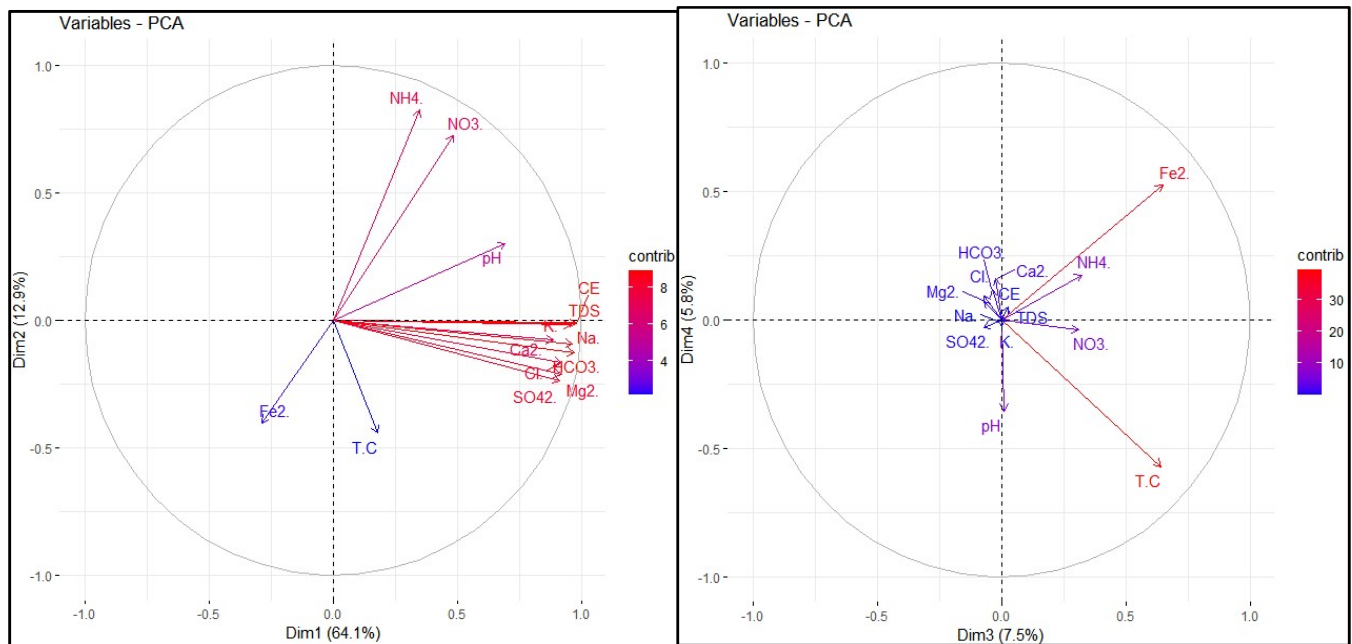


Figure 7. Analyses dans l'espace des variables des plans factoriels Dim.1-Dim.2 et Dim.3-Dim.4

Afin d'identifier les processus les plus importants qui contrôlent la géochimie des eaux souterraines, nous avons utilisé la méthode statistique multivariée à savoir l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Ce graphique montre les résultats d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) des variables physico-chimiques d'échantillons d'eau. Les axes principaux sont : Dim1 (64,1%), représente la majorité de la variance et Dim2 (12,9%), représente d'une part supplémentaire de la variance, moins importante. Les variables fortement corrélées avec Dim1 (axe horizontal) sont des variables contribuant fortement à la minéralisation de l'eau : CE, TDS, Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Mg<sup>2+</sup>. Ces variables sont très corrélées entre elles (Fig.7A). Elles indiquent une forte influence des processus de dissolution minérale, typique des eaux circulant dans un aquifère riche en sels dissous. Les variables liées à Dim2 (axe vertical) : NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> sont corrélées entre elles, probablement liées à des apports organiques ou anthropiques (activités agricoles, pollution domestique). Le pH montre une légère contribution sur Dim 2, orientée positivement (Fig.7A). La température et le fer sont des variables opposées aux paramètres chimiques, ce qui suggère une influence distincte ou inverse (condition climatiques, dilution...). La troisième composante principale, explique 7,5% de la variance totale (Dim3) et la quatrième composante (Dim4), explique 5,8% (Fig.7B). L'ensemble de ces deux axes n'expliquent qu'environ 13,3% de la variance. Les variables proches du centre (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, CE, TDS, K<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, etc.) ont une faible contribution à Dim3 et Dim4. Elles sont mieux représentées sur les autres axes (Dim1, Dim2). Les variables fortement projetées sur ce plan sont Fe<sup>2+</sup> (vers +Dim3/ +Dim4) qui contribuent fortement (Fig.7B). Elle influence positivement les deux dimensions. La température est une variable dominante de direction (+Dim3, -Dim4). Les NO<sub>3</sub><sup>-</sup> et NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sont des variables plus modérées, mais orientées dans la même zone, donc possiblement corrélées entre elles, et liées à la pollution azotée (origine anthropique). Le pH est dirigé vers le bas (-Dim4), à l'opposé de Fe<sup>2+</sup> qui a une corrélation négative possible entre acidité et fer dissous.

## DISCUSSIONS

La comparaison de nos résultats avec ceux de plusieurs travaux antérieurs a permis d'aboutir à plusieurs constats. Les eaux souterraines de la zone d'étude ont une température comprise entre 26,7°C à 33,6°C avec une moyenne de 31,45°C et un écart de 1,38°C. Cette température de certains points qui correspond aux variations saisonnières des températures atmosphériques ambiantes (25°C). Le pH moyen des eaux souterraines et de surface de Loug-Chari est de 6,77.

L'intervalle des valeurs recommandées par OMS est 6,5 – 8,5. Le pH des eaux analysées respecte les limites fixées par l'OMS. Ceci montre que les eaux étudiées sont acides à neutres. L'acidité des eaux peut être due à un processus biogéochimique ou anthropogénique. Ce processus est régi par le CO<sub>2</sub> du sol générée à travers la respiration des racines d plantes et de la décomposition des matières organiques (Kortatsi *et al.*, acte 2008); (Matini *et al.*, 2009). Les valeurs de la conductivité électrique varient de 62 μS/cm à 1323 μS/cm pour une moyenne de 412,60 μS/cm dont l'ecartype est de 329,06. Cette variabilité de la conductivité électrique est probablement liée à l'interaction de plusieurs processus (naturelle et artificielle) responsable de la minéralisation des eaux du département de Loug-Chari. Ces valeurs obtenues sont inférieures à la norme (Dos Santos, 2000) (soit 1500 mg/l). Les concentrations élevées en fer par rapport à la norme OMS (2006) dans certains forages donnent souvent à l'eau une couleur rougeâtre. Cette couleur est souvent à l'origine du rejet de ces forages par les populations. Or le fer est généralement conseillé aux hommes qui ont une carence en fer (Kouassi *et al.*, 2012). La concentration plus faible en nitrate en dessous de la norme OMS (50mg/l) doit être utilisable pour la boisson, car ces eaux ne présentent aucun risque potentiel de maladies. Les concentrations plus faibles en nitrate dans les eaux peuvent indiquer aussi que l'eau ne contient pas des bactéries dangereuses et d'autres polluants. Le nitrate est un polluant commun des eaux souterraines, il est généralement issu de l'agriculture (utilisation des engrais chimiques), des eaux usées domestiques et des fumures animales (Yuan *et al.*, 2019). Les ions chlorures (3 mg/l à 70 mg/l avec une moyenne de 20,42 mg/l) et sulfates (0 – 68 mg/l avec une moyenne de 16,28) sont toutes en-dessous de la norme de potabilité telle que définie par l'OMS. Ce sont des ions qui peuvent dégrader la qualité de l'eau de consommation lorsque sa concentration est supérieure à la norme de l'OMS établie. L'origine des ions chlorures peuvent être naturelle dans le cas de l'infiltration des eaux marines. Les ions chlorures peuvent liés aux rejets humains (Matini *et al.*, 2009). L'origine de sulfates pourrait être liée à l'oxydation des pyrites (Kortatsi *et al.*, 2008) suivant la réaction :  $FeS_2 + 3,5O_2 + H_2O = Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+$

Cette réaction libère des ions sulfates et du fer dans les eaux souterraines. Durant l'évolution des eaux dans l'aquifère, l'une des conséquences de son long temps de séjour, est l'augmentation progressive de la minéralisation. Ce processus utilise le CO<sub>2</sub> aux eaux issues de la décomposition des matières organiques et s'infiltré grâce aux eaux de pluies dans le sol et dans les nappes (Soro *et al.*, 2019). Ainsi, l'hydrolyse des silicates est le principal mécanisme qui permet de libérer les ions alcalins au détriment des cations. C'est ce qui la prédominance des ions bicarbonates dans la charge saline des eaux

par rapport aux cations dont la mise en solution provient de la dissolution des carbonates. La présence des ions bicarbonates, calcium, magnésium et sulfates dans les eaux serait en majorité liée au processus hydrogéo-chimique qui est l'hydrolyse des minéraux silicatés et la dissolution des carbonates néoformées.

## CONCLUSION

L'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines et de surface dans le département de Loug-Chari relève une diversité des caractéristiques hydrochimiques, en lien avec la géologie locale, les activités humaines et les conditions climatiques. Les résultats des analyses montrent que la majorité des eaux (forages, puits et eau de surface) présentent une qualité chimique globalement acceptable à bonne, tant pour l'usage domestique. Les valeurs de la conductivité électrique et de SAR indiquent les eaux sont faiblement à modérément salines, avec un pouvoir alcalinisant généralement faible à moyen. Toutefois, quelques échantillons localisés montrent des tendances à l'augmentation du sodium, de la conductivité ou des éléments traces ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ), traduisant un risque potentiel de dégradation des sols agricoles en cas d'usage prolongé sans gestion adaptée. Le risque de salinisation et de sodisation des sols reste faible à modéré, mais doit être surveillé, surtout dans les zones à faible drainage ou en cas d'irrigation intensive. Une gestion intégrée des ressources en eau, accompagnée de pratiques agricoles adaptées est nécessaire pour préserver la fertilité des sols et assurer une production agricole durable.

## REFERENCES

- Abderamane, Hamit. *Étude du fonctionnement hydrogéo-chimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad)*. 2012. Poitiers, PhD Thesis. *Google Scholar*, <https://theses.fr/2012POIT2294>.
- ABDOU BABAYE. *Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger)*. 2012, p. 47.
- Biémi, Jean. « Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) ». *Mémoire de doctorat, Université d'Abidjan*, 1992.
- Bouteyre, Guy, et al. « Observations sur les formations du Continental Terminal et du Quaternaire dans le bassin du Logone (Tchad) ». *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 7, n° 1, 1964, p. 23-27.
- Bouwer, Herman. « Integrated water management: emerging issues and challenges ». *Agricultural water management*, vol. 45, n° 3, 2000, p. 217-28.
- Dos Santos, Stéphanie. « L'accès à l'eau en Afrique subsaharienne: la mesure est-elle cohérente avec le risque sanitaire? » *Environnement, Risques et Santé*, vol. 11, n° 4, 2012, p. 282-86.
- Faillat, J. P., et C. Drogue. « Différenciation Hydrochimique de Nappes Superposées d'altérites et de Fissures En Socle Granitique ». *Hydrological Sciences Journal*, vol. 38, n° 3, juin 1993, p. 215-29. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1080/02626669309492664>.
- Jolliffe, I. T. « Graphical Representation of Data Using Principal Components ». *Principal Component Analysis*, par I. T. Jolliffe, Springer New York, 1986, p. 64-91. Springer Series in Statistics. *DOI.org (Crossref)*, [https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1904-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4757-1904-8_5).
- Kortatsi, Benony K., et al. « Hydrogeochemical Evaluation of Groundwater in the Lower Offin Basin, Ghana ». *Environmental Geology*, vol. 53, n° 8, février 2008, p. 1651-62. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0772-0>.
- Kouassi, A. M., et al. « Analyse de la productivité des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) ». *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, n° 10, 2012. *Google Scholar*, <http://www.larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/129>.
- Matini, L., et al. « Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo ». *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, vol. 5, n° 1, 2009. *Google Scholar*, <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/61709>.
- N'tcha, Tinantikpa, et al. « Caractérisation hydrogéo-chimique des eaux souterraines des aquifères de socle de la commune de Natitingou au Bénin ». *Euro. Sci. J*, vol. 16, n° 6, 2020, p. 1857-7881.
- Ouandaogo-Yameogo, Suzanne. « Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso, qualité et vulnérabilité ». 2008. *Google Scholar*, <https://theses.fr/2008AVIG0040>.
- Sambiéno, W. G. *Contribution à la compréhension du fonctionnement et à l'évaluation des potentialités en eau du système aquifère du bassin versant de la Pendjari (Nord-Ouest du Bénin): Apports des outils piézométriques, hydrogéo-chimiques, isotopiques et de la télédétection*. 2019. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, PhD Thesis.
- Soro, Gbombélé, et al. « Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 13, n° 3, 2019, p. 1870-89.
- Tidjani, Alou Amina, et al. « Apports de la télédétection dans l'étude de la dynamique environnementale de la région de Tchago (nord-ouest de Gouré, Niger) ». *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Écologie Tropicales*, vol. 33, 2009. *Google Scholar*, <https://orbi.uliege.be/handle/2268/249546>.
- Vincent, E. A., et R. Phillips. « Iron-Titanium oxide minerals in layered gabbros of the Skaergaard intrusion, East Greenland: Part I. Chemistry and ore-microscopy ». *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 6, n° 1, 1954, p. 1-26.
- Yuan, Yuan, et al. « Hyperspectral image superresolution by transfer learning ». *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 10, n° 5, 2017, p. 1963-74.

\*\*\*\*\*