ESI Preprints **Not Peer-reviewed**

Processus de minéralisation et impact de l'irrigation sur les ressources en eau souterraine au Sahel : Cas du périmètre irrigué de Birni N'Konni (Sud-Niger)

Yacouba Nouhou Chaweye
Boukari Issoufou Ousmane
Yahaya Nazoumou
Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger
Guillaume Favreau
Marie Boucher
Université Grenoble Alpes (UGA), Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut National Polytechnique (INP), Grenoble, France
Rabilou Abdou Mahaman
Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger

Doi: 10.19044/esipreprint.6.2025.p123

Approved: 08 June 2025
Posted: 10 June 2025

Copyright 2025 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:
Chaweye Y.N., Ousmane B.I., Nazoumou Y., Favreau G., Boucher M. & Mahaman R.A. (2025). *Processus de minéralisation et impact de l'irrigation sur les ressources en eau souterraine au Sahel : Cas du périmètre irrigué de Birni N'Konni (Sud-Niger).* ESI Preprints. https://doi.org/10.19044/esipreprint.6.2025.p123

Résumé

Au Sahel, en raison de la forte variabilité interannuelle des eaux de surface, les ressources en eau souterraine représentent la ressource la plus fiable pour l'irrigation. Toutefois, une évaluation préalable de leurs disponibilité, qualité et dynamique pluriannuelle s'avère nécessaire afin de garantir l'efficacité et la durabilité des systèmes de productions. Une étude associant les données piézométriques et géochimiques a été réalisée à postériori dans le périmètre irrigué de Birni N'Konni (Sud Niger) afin d'évaluer l'impact de l'irrigation sur les ressources en eau souterraine. Les résultats montrent que les eaux sont principalement sulfatées calciques et

magnésiennes (75%) et bicarbonatées calciques et magnésiennes (25%). Le diagramme de Gibbs, l'analyse en composante principale (ACP) et les relations ioniques montrent que la minéralisation des eaux est principalement contrôlée par le processus d'interaction eau-roche et dans une moindre mesure par l'évaporation de la nappe. L'utilisation de différents indicateurs conventionnels de la qualité de l'eau (EC, SAR, %Na, RSC, MAR et le IP) pour l'irrigation suggère que l'eau souterraine dans la zone est classée dans une large gamme entre excellente et impropre et présente, à court et à long terme, de forts risques de salinisation qui suggéreraient un recours aux cultures de plantes plus tolérantes au sel. Les données piézométriques montrent que le développement de l'irrigation et le faible taux de renouvellement ont entraîné une baisse généralisée du niveau de la nappe de plus de 4 m depuis les années 1960. Cette étude montre que le risque de salinisation à court ou à long terme demeure permanent mais reste moins préoccupant que la baisse du niveau de la nappe.

Mots clés : Semi-aride, Sahel, irrigation, impact, salinisation, périmètre irrigué de Birni N'Konni

Mineralization process and impact of irrigation on groundwater resources in the Sahel: Case of the Birni N'Konni irrigated perimeter (South-Niger)

Yacouba Nouhou Chaweye
Boukari Issoufou Ousmane
Yahaya Nazoumou
Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger
Guillaume Favreau
Marie Boucher
Université Grenoble Alpes (UGA), Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Institut National Polytechnique (INP), Grenoble, France
Rabilou Abdou Mahaman
Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Niamey, Niger

Abstract

In the Sahel, due to the high inter-annual variability of surface water, groundwater is the most reliable resource for irrigation. However, a prior assessment of their availability, quality, and multi-year dynamics is necessary to guarantee the efficiency and sustainability of production systems. A study combining piezometric and geochemical data was carried out posteriori in the Birni N'Konni irrigated perimeter (southern Niger) to assess the impact of irrigation on groundwater resources. The results show that the water is mainly calcium-magnesium sulfate (75%) and calcium-magnesium bicarbonate (25%). The Gibbs diagram, principal component analysis (PCA), and ionic relationships show that water mineralization is mainly controlled by the water-rock interaction process, and to a lesser extent by groundwater evaporation. The use of various conventional water quality indicators (EC, SAR, %Na, RSC, MAR and the PI) for irrigation suggests that groundwater in the area is classified in a wide range between excellent and unsuitable and presents, in the short and long term, high risks of salinization, which would suggest the use of more salt-tolerant crops. Piezometric data show that the development of irrigation and the low renewal rate have led to a generalized drop in the water table of over 4 m since the 1960s. This study shows that the risk of salinization in the short or

long term remains permanent, but is less of a concern than the drop in the water table.

Keywords: Semi-arid, Sahel, irrigation, salinization, Birni N'Konni irrigated area

Introduction

Les zones semi-arides sahéliennes se caractérisent par des précipitations variables dans l'espace et dans le temps, en raison d'une une forte variabilité climatique qui se traduit souvent par une succession des années de fortes pluies entrecoupées d'années de sécheresse (Lindle et al., 2023). Selon les prévisions du GIEC, l'intensité et la fréquence des fortes pluies devraient encore augmenter et les périodes sèches seraient encore plus longues (Taylor et al., 2013; Kendon et al. 2019).

En réponse à cette variabilité des précipitations, les cours et plans d'eau sahéliens sont saisonniers et souvent éphémères (Taylor et al., 2013; Wekesa et al., 2020; Acworth et al., 2021), ce qui limite la disponibilité et la durabilité des eaux de surface comme source d'approvisionnement en eau pour les activités socio-économiques (Lindle et al., 2023).

Les systèmes agricoles reposent principalement sur une agriculture pluviale de subsistance et un élevage extensif, tous deux sensibles à la variabilité climatique (Nazoumou et al., 2016). Les pertes de production agricole en années de sécheresses entraînent des crises alimentaires qui conduisent très souvent à des famines. Ainsi, pour protéger les communautés et les économies contre la menace de l'insécurité alimentaire, l'irrigation à partir des eaux souterraines reconnues disponibles tout au long de l'année est considérée comme l'une des solutions les plus prometteuses (Nazoumou et al., 2016).

Au Niger, le développement de l'irrigation à large échelle a commencé dès le début des années 1930, avec la mise en place d'un système d'aménagements hydro-agricoles basés surtout sur l'utilisation des eaux de surface dans la vallée du fleuve Niger. A partir des années 1980, le développement structuré de l'irrigation s'est étendu aux autres vallées et bas-fonds, et l'utilisation des eaux souterraines peu profondes a été encouragée afin d'améliorer la production locale et augmenter les revenus en milieu rural (ARID, 2004; Nazoumou et al., 2016).

Dans la vallée de la région de Birni N'Konni, notre zone d'étude, l'irrigation à partir des eaux de surface et des eaux souterraines peu profondes a commencé en 1976, avec l'aménagement de 1 384 ha. Afin d'augmenter le rendement agricole et de contribuer davantage à l'amélioration de la sécurité alimentaire, l'irrigation s'est encore intensifiée

avec la réalisation d'un périmètre irrigué de 1 068 ha autour de la ville de Birni N'Konni en 1982.

Cependant, le développement de l'irrigation intensive sur le site de Birni N'Konni avec l'utilisation d'engrais chimiques et de pesticides pourrait détériorer la qualité des eaux souterraines et du sol, et affecter la productivité dans le périmètre. La présente étude vise à évaluer l'impact à long terme de l'irrigation sur le sol et les ressources en eau souterraine dans la zone. Elle est basée sur une approche hydrodynamique et géochimique et vise pour objectif de (1) déterminer les processus géochimiques contrôlant la minéralisation des eaux souterraines dans la zone, (2) évaluer l'aptitude de l'eau à l'irrigation et (3) évaluer l'impact à long terme de l'irrigation sur la qualité et la quantité de l'eau dans la zone.

Contexte de la zone d'étude

Le périmètre irrigué de Birni N'Konni est situé dans la partie sud du Niger dans la vallée de la Maggia, un cours d'eau transfrontalier avec le Nigeria et appartenant au bassin versant du fleuve (***Figure 1a*** et ***1b***).

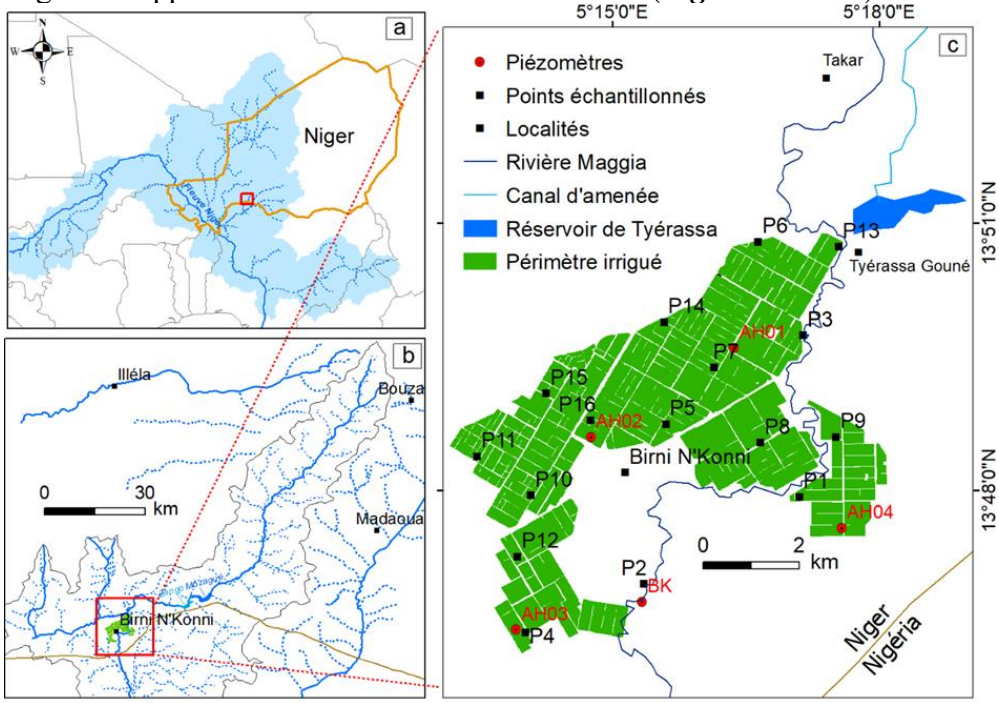


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude : a) bassin versant du fleuve Niger, b) bassin versant de la Maggia, c) Périmètre irrigué de Birni N'Konni

Le climat est de type semi-aride caractérisé par une seule saison de pluie, qui s'étend généralement de mai à octobre (***Figure 2a***). Le cumul annuel de la pluviométrie enregistrée à la station synoptique de Birni

N'Konni varie de 289 mm en 1973 à 990 mm en 1952 (***Figure 2b***). La moyenne annuelle est de l'ordre de 500 mm/an (période 1950-2020), pour une évapotranspiration potentielle, estimée à 2 280 mm/an. Les mois les plus pluvieux sont ceux de juillet et août qui enregistrent près de 60% du cumul annuel. La température moyenne mensuelle varie de 23°C en janvier à 34°C en mai.

La Maggia constitue le principal cours d'eau de la zone et draine un sous bassin versant dont la superficie est estimée de 3080 km^2 à Konni. Elle est caractérisée par un écoulement saisonnier de juillet à septembre, avec une forte variabilité interannuelle en lien avec des précipitations (ORSTOM, 1964). En amont de Birni N'Konni, deux (2) barrages de retenue ont été construits en cascade sur le lit de la rivière à Mozagué et à Zango pour assurer l'approvisionnement en eau du périmètre irrigué situé à aval. Les sols de la zone de Konni sont de type hydromorphes, très favorables pour l'irrigation (SOGETHA, 1964).

Du point de vue géologique et hydrogéologique, le périmètre irrigué repose sur une nappe phréatique peu profonde (4-18 m) contenue indistinctement dans les alluvions quaternaires et les formations continentales du Continental terminal d'âge Oligocène, qui reposent elles-mêmes sur les formations marines du Paléocène et du Crétacé supérieur (Nouhou Chaweye et al., 2023, 2024). Les alluvions quaternaires et les grès Oligocène qui forment le système aquifère phréatique, présentent une épaisseur qui varie de 13 m dans nord-est à 40 m dans le sud-ouest (Nouhou Chaweye et al., 2023). Les formations marines sous-jacentes du Paléocène sont constituées d'une couche étanche supérieure formée de marnes et d'argiles, et d'un niveau calcaire qui représente la partie inférieure du Paléocène. Le niveau marneux et argileux présente une épaisseur moyenne de 23 m (Nouhou Chaweye et al., 2024) et forme un écran imperméable entre l'aquifère superficiel et les aquifères sous-jacents. Le niveau calcaire quant à lui montre une épaisseur moyenne de 15 m et repose directement sur une série argileuse du Crétacé supérieur (Sauvel, 1966; Nouhou Chaweye et al., 2023).

En raison d'un fort taux d'accroissement de la population et de l'attrait migratoire qu'elle suscite à cause de son important potentiel en eau et en terre, la région subit une forte pression démographique. Ainsi, selon les recensements officiels, la population du Département de Konni est passée de 254 000 habitants en 1988 à 313 000 habitants en 2012, avec un taux d'accroissement démographique de 3.6% et une densité de l'ordre de 100 habitants.km^{-2} (INS, 2012).

L'économie est en grande partie orientée vers l'agriculture pluviale de subsistance, sensible aux aléas climatiques, rendant les populations économiquement très vulnérables en années de sécheresse (Nazoumou et al.,

2016). L'agriculture irriguée constitue également une activité clé et un moyen de lutte contre l'insécurité alimentaire dans la région depuis les années 1970, avec l'aménagement d'un périmètre irrigué autour de la ville de Birni N'Konni.

La superficie totale du périmètre est de 3 000 ha aménagée autour de la ville en deux phases, successivement en 1976 (1 384 ha) et en 1982 (1 068 ha). Toutefois, seuls 2 452 ha sont aujourd'hui exploités par les populations de douze (12) villages environnants et de la ville de Birni N'Konni. Deux campagnes de cultures irriguées sont réalisées, en saison sèche puis pluvieuse, à partir des eaux de surface retenues dans les barrages de Mozagué et Zango et transférées jusqu'au périmètre grâce à un canal d'amenée qui alimente un réservoir tampon d'une capacité de 1,2 Mm^3 à Tyérassa (***Figure 1c***). En année déficitaire, lorsque les réserves des retenues s'avèrent insuffisantes, les eaux souterraines sont sollicitées en complément par les agriculteurs qui les captent à l'aide de puits et forages peu profonds. La distribution des eaux dans le périmètre se fait par gravité à l'aide d'un réseau de canaux de distribution.

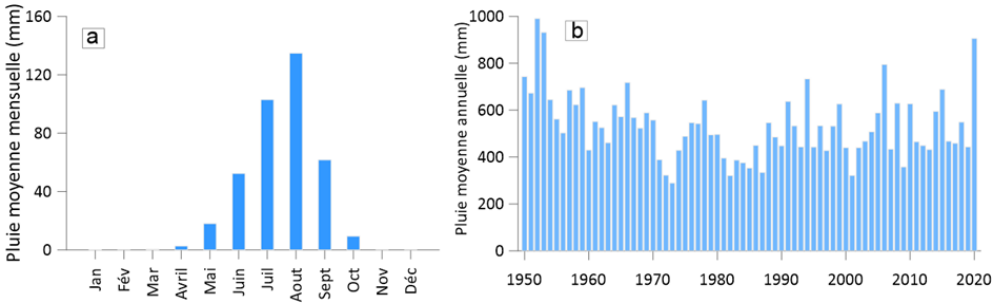


Figure 2 : Pluviométrie de la zone à Birni N'Konni : a) Moyenne mensuelle, b) Moyenne annuelle

Matériel et Méthodes

Echantillonnage et analyses au laboratoire

Dans le cadre de cette étude, 16 échantillons d'eau ont été prélevés dans des forages et puits d'irrigation en décembre 2023. Pour garantir la représentativité de ces échantillons, les prélèvements ont été effectués directement au cours des pompages dans les ouvrages. Les mesures in situ de la conductivité électrique (CE) et de la température (T°C) ont été effectuées à l'aide du conductivimètre (TeraCon 525®) (www.xylemanatytics.com), calibré à 25°C. Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène d'un litre (1L) neuves, préalablement rincées sur place avec de l'eau de l'ouvrage. Ils sont ensuite conservés au frais dans une glacière pendant le transport, puis dans un réfrigérateur (4°C) au laboratoire. Les éléments Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- et Cl^- ont été analysés en utilisant la méthode classique de titrimétrie avec le Titrimètre Digital HACH 2800. Les éléments

Na^+ et K^+ ont été déterminés par photométrie à l'aide d'un photomètre à flamme de type JENWAY PFP7. Les ions F^-, NO_3^-, NO_2^-, Fe^{2+}, Mn^{2+}, SO_4^{2+} et P^- ont été déterminés par spectrophotométrie avec le spectrophotomètre DR 3900 LANGE. Les limites de détection de ces éléments sont de : 2 ; 30 ; 0,3 ; 3 ; 0,7 ; 70 et 0,5 mg/L pour F^-, NO_3^-, NO_2^-, Fe^{2+}, Mn^{2+}, SO_4^{2+} et P^- respectivement. La qualité des analyses a été appréciée en utilisant la balance ionique (BI) à l'aide de l'***Equation 1*** :

$$BI = [(\Sigma cations - \Sigma anions)/(\Sigma cations + \Sigma anions)] \times 100 \quad (1)$$

Avec BI la balance ionique (%), Σcations = somme des cations (méq/L) et Σanions = somme des anions (méq/L)

Analyse de données géochimiques

Une méthode multi-approche impliquant à la fois l'utilisation du diagramme de Piper (1944), de Gibbs, l'analyse statistique multivariées, les relations ioniques et les valeurs relatives des indices de saturation des différents minéraux a été utilisée. Ainsi, pour identifier les faciès chimiques des eaux, les principaux cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, K^+) et anions (HCO_3^-, SO_4^{2-}, Cl^- et NO_3^-) ont été projetés dans le diagramme de Piper. Pour identifier les probables sources d'ions, le diagramme ($Na^+ + K^+$) - Cl^- *vs* ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) - ($HCO_3^- + SO_4^{2-}$) et les indices chloro-alcalins 1 et 2 (CAl-1 et CAl-2) définis par les ***Equations 2*** et ***3*** tels que proposées par Schoeller (1965, 1967), ont été utilisés. Les indices chloro-alcalins 1 et 2 ont été utilisés pour étudier le processus d'échange d'ions entre l'eau et la roche. Les indices chloro-alcalins 1 et 2 (CAl-1 et CAl-2) calculés à l'aide des ***Equations 2*** et ***3*** et le diagramme ($Na^+ + K^+$) - Cl^- *vs* ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) - ($HCO_3^- + SO_4^{2-}$) proposé par Fisher et Mullican (1997) ont été utilisés pour déterminer si la minéralisation des eaux souterraines est influencée par l'échange de cations entre l'eau et la roche. L'importance de l'échange de cations entre Na^+ adsorbé sur les minéraux argileux contre Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux souterraines est suggéré lorsque les valeurs des indices chloro-alcalins 1 et 2 (CAl-1 et CAl-2) sont négatives (Huang et al., 2022) . En outre, un impact positif de cet échange sur la minéralisation des eaux souterraines est démontré lorsque le diagramme ($Na^+ + K^+$) - Cl^- *vs* ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) - ($HCO_3^- + SO_4^{2-}$) régresse le long de la ligne de pente 1/1 (Li et al., 2019; Su et al., 2019; Issoufou Ousmane et al., 2023).

$$CAL - 1 = [Cl^- - (Na^+ + K^+)]/Cl^- \quad (2)$$

$$CAL-2=[Cl^{-}-(Na^{+}+K^{+})]/(HCO_3^{-}+SO_4^{2-}+CO_3^{2-}+NO_3^{-}) \quad (3)$$

Les valeurs relatives des indices de saturations de la calcite ($CaCO_3$), de la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), de la fluorite (CaF_2), du gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$) et de la halite (NaCl), calculées à l'aide du modèle spécifique PHREEQC (Parkhurst et Appelo, 2013), ont été utilisées pour examiner le processus de dissolution de ces minéraux. L'analyse factorielle a été utilisée pour identifier les facteurs qui contrôlent le comportement général de l'aquifère, ainsi que les processus géochimiques se produisant dans les eaux souterraines (Cloutier et al., 2008; Abderamane et al., 2013; Ahmed et al., 2017). Dans cette étude, les analyses statistiques multivariées ont été réalisées à l'aide du logiciel IBM SPSS v26 sur l'ensemble des paramètres hydrochimiques (Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^- , Cl^-, Na^+, K^+, F^-, NO_3^-, NO_2^-, P, Fe, Mn^{2+} et SO_4^{2+}), ainsi que sur la conductivité et la température. La rotation varimax a été utilisée pour identifier les facteurs qui contrôlent la plus grande variabilité des échantillons.

Paramètres de qualité de l'eau d'irrigation

La qualité de l'eau, du sol et les pratiques agricoles sont des facteurs importants dans l'efficacité de l'irrigation. En effet, la qualité de l'eau joue un rôle important dans la productivité et la qualité des cultures, ainsi que la fertilité des sols. Il est donc important de surveiller l'adéquation des eaux souterraines pour l'irrigation afin de garantir la croissance des cultures et le maintenir la fertilité des sols. L'évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation est assurée grâce à des indicateurs de qualité de l'eau établis par diverses agences et organisations (El Bilali et Taleb, 2020). Les indicateurs les plus largement utilisés afin d'apprécier l'aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation sont la conductivité électrique (CE), le taux d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (%Na), le taux d'adsorption du magnésium (MAR), l'indice de perméabilité (PI) et le Carbonate de Sodium Résiduel (RSC). Les indices ont été calculés respectivement à l'aide des équations suivantes :

$$SAR = Na^{+}\times[(Ca^{2+}+Mg^{2+})/2]^{1/2} \quad (4)$$

$$\%Na=[Na^{+}/(Ca^{2+}+Mg^{2+}+Na^{+})]\times 100 \quad (5)$$

$$RSC=(CO_3^{2-}+HCO_3^{-})-(Ca^{2+}+Mg^{2+}) \quad (6)$$

$$MAR = Mg^{2+}/(Ca^{2+} + Mg^{2+}) \quad (7)$$

$$PI = [Na^{+} + (HCO_3^{-})^{1/2}]/[(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+})] \times 100 \quad (8)$$

Données piézométriques

Les relations surface-souterrain et l'évolution dans le temps du niveau de la nappe phréatique sous le périmètre irrigué ont été appréciées grâce à un réseau de quatre (4) piézomètres (AH1, AH2, AH3 et AH4) répartis sur le périmètre, en des sites présentant un intérêt certain pour la compréhension des processus affectant la dynamique et la minéralisation des eaux souterraines (***Figure 1c***). La recharge a été estimée en utilisant la méthode de fluctuation du niveau piézométrique (Labrecque et al., 2020). Les mesures ont été réalisées manuellement et au pas de temps mensuel à l'aide d'une sonde piézométrique de type OTT®. Des données piézométriques plus anciennes d'un puits (BK) retrouvées et complétées par des mesures récentes ont permis d'évaluer la dynamique de la nappe depuis les années 1960s.

Résultats

Caractéristiques chimiques des eaux souterraines

Le ***Tableau 1*** présente un résumé statistique des paramètres physico-chimiques et des résultats d'analyse des différents échantillons prélevés. La température de l'eau varie in situ de 29 à 33°C, avec une moyenne de 31°C et un écart type de 1,06 °C. Les eaux sont légèrement basiques, avec des valeurs de pH comprises entre 6,1 et 8,2 pour une moyenne de 7,3. Elles sont relativement minéralisées, avec des valeurs de CE qui varient de 247 à 3660 µS/cm et une moyenne de 1490 µS/cm. Le sulfate domine largement les anions avec une moyenne de 13,40 méq/L. Quant aux cations, le calcium prédomine, avec une valeur moyenne de 11,65 méq/L. Les valeurs moyennes de teneurs en cations et en anions suivent respectivement l'ordre général d'abondance suivant : $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^{+} > K^{+} > Mn^{2+} > Fe^{2+}$ et $SO_4^{2-} > HCO_3^{-} > NO_3^{-} > Cl^{-} > F^{-} > NO_2^{-}$.

Tableau 1 : Statistique des résultats analytiques des échantillons en méq/L (N=16)

	pH	T	CE	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	F^-	NO_3^-	NO_2^-	Na^+	K^+	Fe^{2+}	Mn^{2+}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	P
Max	8,2	33	3660	46,0	2,1	36,3	0,26	3,2	0,02	6,6	1,03	0,02	0,71	55,2	16,6	0,04
Min.	6,1	29	244	0,4	0,1	0,02	0,01	0,01	0,00	0,1	0,03	0,00	0,00	1,6	0,1	0,00
Moy.	7,3	31	1490	6,8	0,5	13,4	0,08	0,6	0,00	2,1	0,22	0,00	0,08	11,6	5,9	0,02
Méd.	7,3	31	1388	3,8	0,4	13,3	0,07	0,3	0,00	1,6	0,16	0,00	0,02	7,8	4,9	0,02
Ect.	0,4	1,1	706	5,4	0,3	7,7	0,03	0,5	0,00	1,6	0,12	0,01	0,09	8,0	3,6	0,01

La projection des principaux ions majeurs dans le diagramme de Piper permet d'identifier deux types de faciès (***Figure 3***) : un premier faciès sulfaté calcique et magnésien qui domine à 75% (12/16) les eaux, et un faciès bicarbonaté calcique et magnésien rencontré dans 25% (4/16) des échantillons. Le faciès $CaHCO_3$ n'a été identifié que sur quatre échantillons (P8, P13, P14 et P16) situés au nord-est du périmètre irrigué, à voisinage de la réserve tampon de Tyérassa. Ce faciès pourrait donc être dû au renouvellement de la nappe dans cette zone.

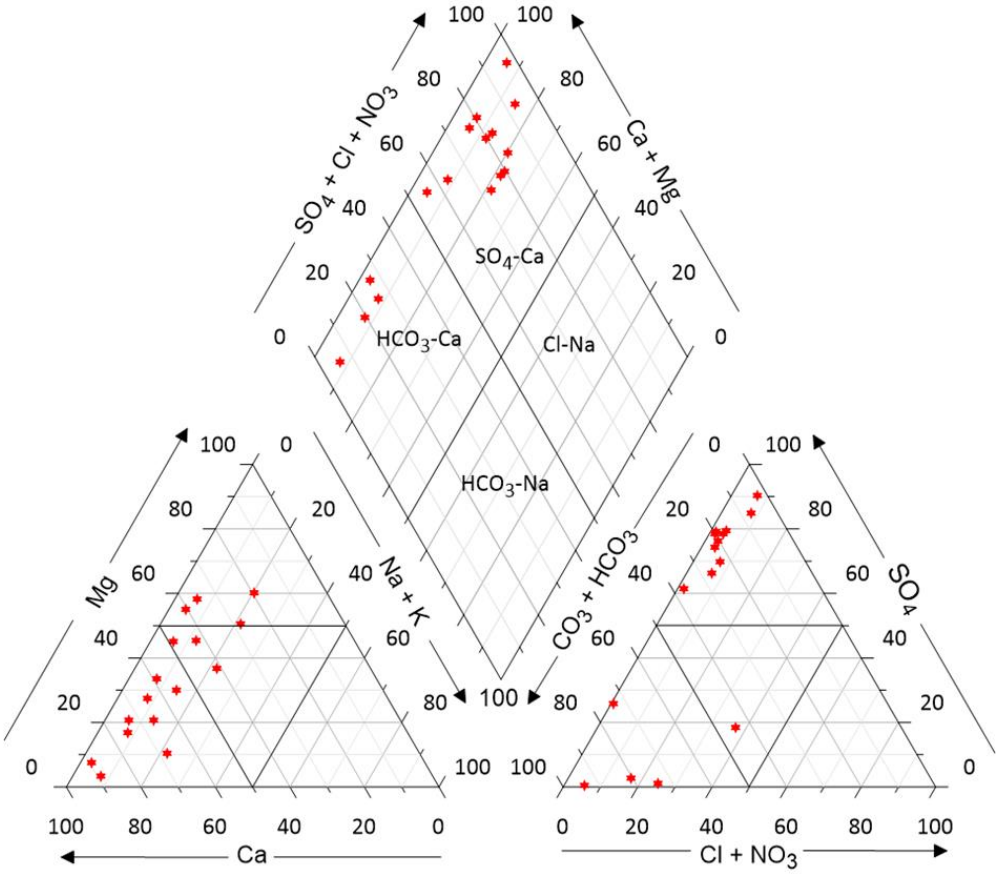


Figure 3 : Diagramme de Piper et faciès chimiques des eaux souterraines

Analyse des facteurs de contrôle géochimique

Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée sur 15 variables physico-chimiques afin d'identifier des groupes de variables corrélées et les facteurs qui contrôlent leurs compartiments de distribution. Le ***Tableau 2*** présente les valeurs des résultats de ces variables.

Tableau 2 : Matrix des composantes de rotation varimax pour les variables physico-chimiques

Var	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Na^{+}	Fe^{2+}	Mn^{2+}	Cl^{-}	NO_3^{-}	NO_2^{-}	HCO_3^{-}	F^{-}	SO_4^{2-}	T°C	CE	pH	P
F1	0,25	**0,9**	0,15	**0,81**	-0,13	**0,68**	0,34	0,01	0,56	-0,01	0,15	**0,93**	-0,17	**0,91**	0,13	0,27
F2	**0,95**	-0,03	-0,2	0,11	0,05	0,01	0,02	-0,07	0,01	**0,96**	**0,95**	0,22	-0,01	0,12	-0,31	-0,42
F3	-0,02	0,03	0,04	0,37	-0,14	-0,45	**0,71**	-0,05	**0,72**	0,37	0,09	0,16	**0,69**	0,22	0,11	0,55

La projection des variables sur les plans factoriels (F1, F2) et (F1, F3) permet d'identifier trois principaux groupes de variables contrôlés à 31,73% par le facteur F1, à 22,98% par le facteur F2 et à 11,48% par le facteur F3 (***Figure 4a et 4b***). Le premier, porté par le facteur F1 qui contribue à 31,73% de la variance totale, regroupe le NO_2^{-}, le Mn^{2+}, le Mg^{2+}, le Na^{+}, le SO_4^{2-}, la CE et dans une moindre mesure, le Cl^{-}. Le regroupement de ces variables autour de l'axe factoriel F1 indique que cet axe factoriel exprime la principale source de minéralisation de l'eau dans l'aquifère. Le deuxième groupe est formé par le HCO_3^{-}, le F^{-} et le Ca^{2+}, qui évoluent ensemble sur le plan F2. Ce groupe peut être lié aux échanges eau-roche ou à la dissolution de la calcite et de la fluorapatite. Le troisième groupe, composé de NO_3^{-}, P, K^{+}, T°C, pH et Fe^{2+}, semble indiquer un impact anthropique dans l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines, surtout lié à l'utilisation d'engrais de type Azote-Phosphore-Potassium (NPK), le plus utilisé pour les cultures d'oignon dans le périmètre irrigué**.**

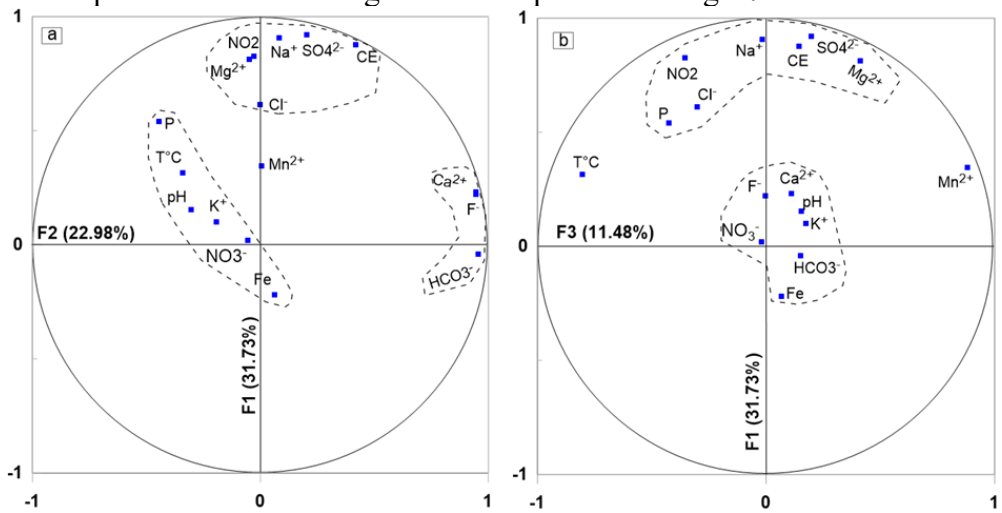


Figure 4 : Projections des variables sur les plans factoriels (F1, F2) et (F1, F3)

Digramme de Gibbs

L'utilisation du diagramme de Gibbs montre que 75% (12/16) des échantillons se situent dans la zone d'échange eau-roche, tandis que 25% (4/16) indiquent une dominance du processus d'évaporation (***Figure 5a*** et ***5b***). Cela suggère que la chimie des eaux est fortement contrôlée par l'échange eau-roche dans la zone d'étude. La dominance de l'évaporation

identifiée dans quatre (4) échantillons (P2, P4, P12 et P16), indique que l'évaporation des eaux souterraines est aussi importante dans la zone d'étude. Le taux d'évaporation moyen annuel dans la zone est de 2 280 mmm et la profondeur de la nappe sous le périmètre irrigué varie de 5 à 13 m avec une moyenne de 9 m. Ainsi, la faible profondeur de la nappe et le taux d'évapotranspiration élevé favorisent l'évaporation des eaux, ce qui en fait un mécanisme important affectant la minéralisation des eaux souterraines.

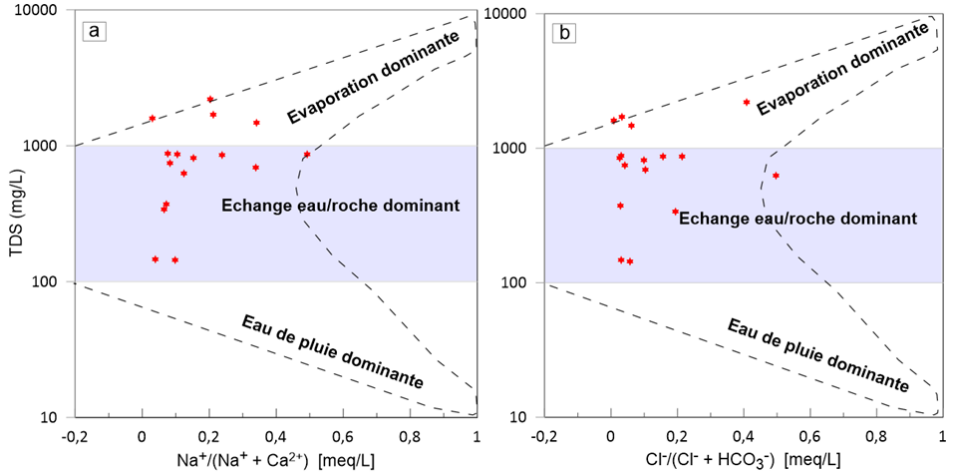


Figure 5 : Diagramme de Gibbs montrant les principaux processus contrôlant la chimie des eaux souterraines

Relation entre les ions et indices de saturation

La dispersion des échantillons de la ligne de dissolution de la halite et la faible valeur de coefficient de corrélation de 0,13 (***Figure 6a***), montrent que la dissolution de la halite n'est pas le principal mécanisme responsable de la présence des ions Na^+, K^+ et Cl^+ dans les eaux souterraines dans la zone. Cela est en accord avec la sous-saturation des eaux vis-vis de la halite ($IS_{halite} < -7$) (***Figure 7b***). La répartition des échantillons de part et d'autre de la ligne de dissolution du NaCl peut s'expliquer par l'échange des cations et/ou la dissolution des silicates comme suggéré par Su et al. (2019) puis Huang et al. (2022) dans les zones arides et semi-arides du nord-ouest de la Chine. Les diagrammes reliant les concentrations des cations divalents (Ca^{2+}, Mg^{2+}) à l'anion HCO_3^- (***Figure 6b et 6c***) montrent que seule la dissolution de la calcite semble indiquer son influence dans le processus de formations de Ca^{2+} et HCO_3^- dans les eaux souterraines (R^2= 0,85), comme le montrent également les valeurs relatives des indices de saturations des eaux vis-à-vis de la calcite ($IS_{calcite} > 0$) (***Figure 7a***). La répartition des ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} de part et d'autre de la ligne de dissolution du gypse (***Figure 6d***) et la valeur du coefficient de corrélation très faibles (0,2) n'indiquent pas une influence de la dissolution du gypse dans le processus de minéralisation des eaux en

Ca^{2+} et SO_4^{2-}. Ceci est en accord avec la sous-saturation des eaux vis-à-vis de ce minéral (IS_{gypse} < 0) (***Figure 7b***). Dans une nappe superficielle comme c'est notre cas, les concentrations anormalement élevées en SO_4^{2-} peuvent être dues à l'utilisation des engrais sulfatés ou à l'évaporation à partir de la nappe. Les quatre (4) échantillons (P2, P4, P12 et P16) qui indiquent une dominance de l'évaporation de la nappe (***Cf. Figure 5a et 5b***), ont également les concentrations les plus élevées en sulfates (31,66, 36,25, 26,25 et 16,23 méq/L respectivement). Cela montre que l'évaporation de la nappe est le principal mécanisme responsable de la minéralisation des eaux en sulfates.

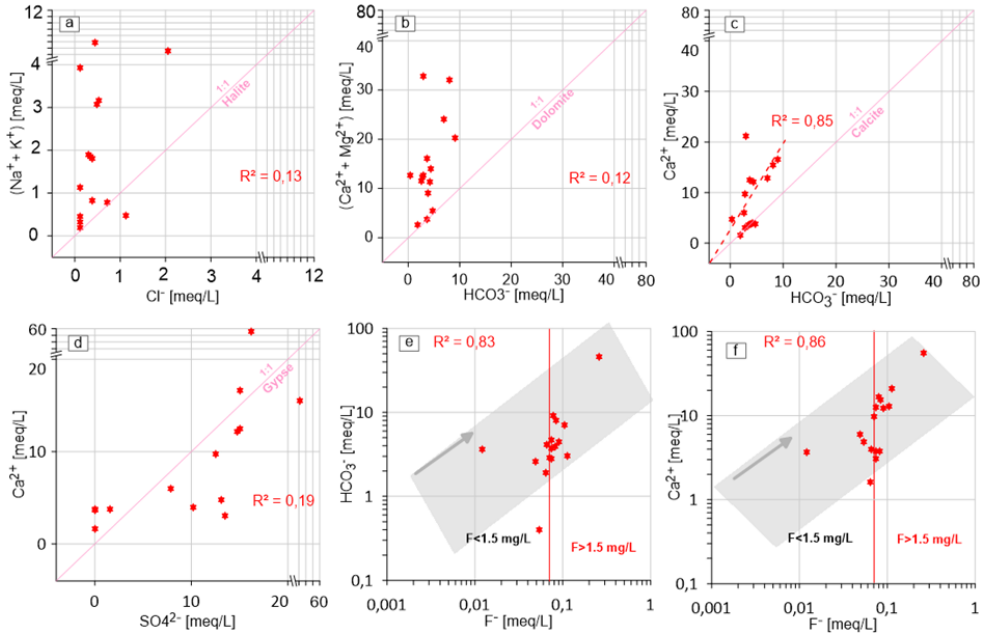


Figure 6 : Diagrammes des relations entre les ions : a) ($Na^+ + K^+$) vs Cl^-, b) ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) vs HCO_3^-, c) Ca^{2+} vs HCO_3^-, d) Ca^{2+} vs SO_4^{2-}, e) HCO_3^- vs F^- et f) Ca^{2+} vs F^-

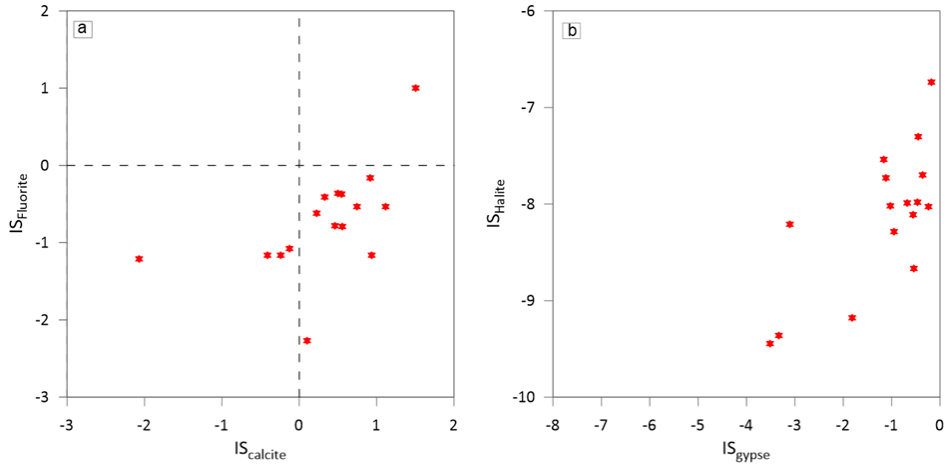


Figure 7 : Relations entre les indices de saturation : a) $IS_{Fluorite}$ vs $IS_{Calcite}$ et b) IS_{Halite} vs IS_{Gypse}

Echange cationique

Pour vérifier si l'échange de cations est aussi un processus important dans la minéralisation des eaux, nous avons utilisé les indices chloro-alcalins CAl-1 et CAl-2 proposés par Schoeller (1965, 1967) et le diagramme [(Na^+ + K^+) - Cl^-] *vs* [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})] proposé par Fisher et Mullican (1997). L'importance de l'échange de cations entre le Na^+ adsorbé sur les minéraux argileux et les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux souterraines est suggéré lorsque les valeurs des indices chloro-alcalins sont négatives (Issoufou Ousmane et al., 2023). De plus, un impact positif de cet échange sur la minéralisation des eaux souterraines est évident lorsque le diagramme (Na^+ + K^+) - Cl^- *vs* (Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-}) régresse le long de la ligne de pente 1/1 (Su et al., 2019; Issoufou Ousmane et al., 2023). Les valeurs des indices chloro-alcalins pour la plupart des échantillons sont négatives (***Figure 8a***), ce qui indique que les cations Na^+ et K^+ de la roche s'échangent avec les cations Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau souterraine. Cela peut réduire la concentration de Ca^{2+} dans l'eau et favoriser la dissolution de la fluorite (CaF_2) observée sur la ***Figure 6f***, pour libérer le F^-, ce qui augmente d'avantage la concentration de F^- dans l'eau. Ainsi, le manque d'équilibre entre les concentrations de HCO_3^- et de Ca^{2+} observé dans les échantillons (***Figure 6c***) peut être dû à ce processus d'échange de cations. La ***Figure 8b*** montre que les échantillons s'alignent autour de la ligne de pente -1/-1 du diagramme [(Na^+ + K^+) - Cl^-] *vs* [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})], avec un coefficient de corrélation de 0,86. Certains échantillons sont caractérisés par une libération de Ca^{2+} et une adsorption de Na^+, tandis que d'autres sont représentés par une adsorption de Ca^{2+} et une libération de Na^+ (***Figure 8b***). Cela confirme que l'échange cationique avec les matériaux du sol et de la formation l'aquifère sont aussi des processus importants dans la minéralisation des eaux.

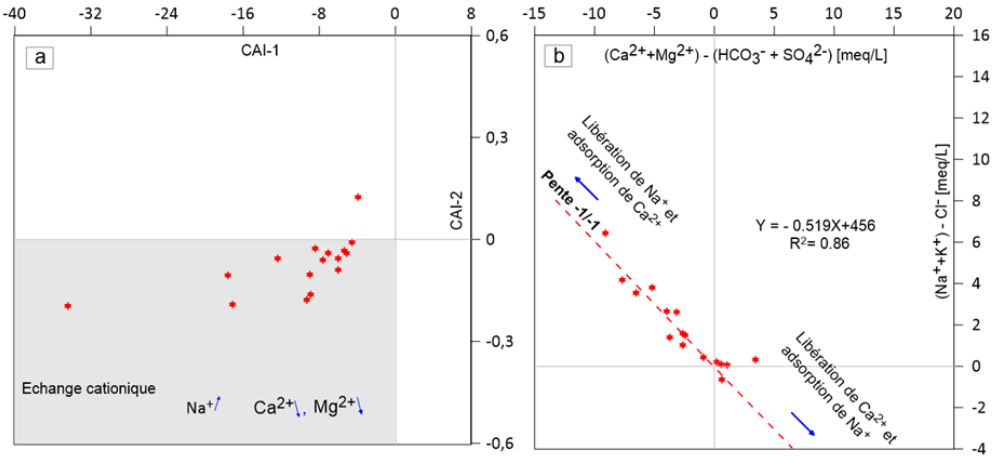


Figure 8 : Diagrammes montrant l'échange de cations dans la zone : Relations a) CAl-1 vs CAl-2 et b) (Na^+ + K^+) - Cl^- vs (Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-}).

Impact de l'irrigation sur la qualité des eaux souterraines
Taux d'adsorption du sodium (SAR)

Les valeurs du SAR ont été appréciées en utilisant la classification effectuée par le *United State Soil Laboratory* (USSL, 1954), où la conductivité est considérée comme un risque de salinité et le SAR comme un risque d'alcalinité (Bian et al., 2018; Zhao et al., 2021). Sur la base de ce classement, 25% (4/16) des échantillons se situent dans la classe C2-S1, 63% (10/16) dans la classe C3-S1 et 12% (2/16) dans la classe C4-S1 (***Figure 9a***). Les classes C1-S1 et C2-S1 sont associées à un risque de salinité faible à moyen et une faible teneur en sodium (S1), et donc considérées comme adaptées pour l'irrigation sur la plupart de type de sol. Les classes C3-S1 et C4-S1 qui portent la majorité des échantillons (12/16), bien qu'elles présentent un faible risque d'alcalinité, représentent un risque élevé de salinité pour la plupart des plantes, à moyen et à long terme surtout. Les eaux de ces classes peuvent cependant être utilisées sur des sols à texture grossière et bien drainés (Zhao et al., 2021). Sur la base de l'indicateur SAR, les eaux présentent pour la plupart, à court ou à long terme des forts risques de salinités et pourraient nécessiter un recours aux cultures des plantes plus tolérantes aux sels.

Pourcentage en sodium (%Na)

Le pourcentage du sodium est également utilisé pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines pour l'irrigation car la concentration élevée du Na^+ réagit avec le sol pour réduire sa perméabilité. En effet, lorsque la concentration de Na^+ dans l'eau d'irrigation est élevée, le Na^+ a tendance à être absorbé par les particules d'argile qui libèrent les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans l'eau. Ce processus d'échange de Na^+ de l'eau contre les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} du sol réduit sa perméabilité. Les valeurs calculées du pourcentage en sodium sont indiquées dans le ***Tableau 3***. Elles varient en générale entre 2,8 et 21,30% avec une valeur moyenne de 9,8%. En se basant sur la classification de Wilcox (1955) reliant le %Na et la CE, 75% (12/16) des échantillons présentent une eau de bonne à excellente qualité et 25% (4/16) de qualité médiocre pour l'irrigation (***Figure 9b***).

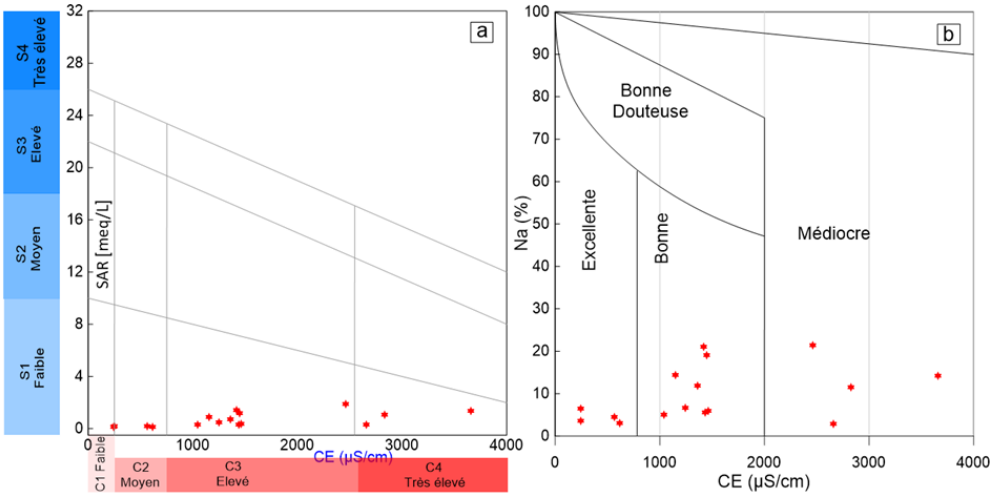


Figure 9 : Evaluation de l'aptitude de l'eau à l'irrigation sur la base des classifications de : a) USSL et b) Wilcox

Le Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)

Un autre facteur limitant pour l'irrigation est la teneur excessive de CO_3^{2-} et HCO_3^- par rapport à Ca^{2+} et Mg^{2+} (Eaton, 1950). L'excès de CO_3^{2-} et HCO_3^- peut dégrader la qualité de l'eau d'irrigation car il provoque la précipitation des alcalino-terreux, notamment le Ca^{2+} et Mg^{2+}. La précipitation de Ca^{2+} et Mg^{2+} sous forme des minéraux carbonatés peut augmenter la concentration de Na^+ et, par conséquent, les valeurs du SAR. Selon les critères du RSC, les eaux souterraines sont classées comme appropriées pour l'irrigation lorsque RSC < 1,5 méq/L et impropres quand RSC > 2,5 méq/L (Aher, 2012). Les valeurs calculées du RSC variant entre -29,7 et -0,2 (***Tableau 3***) indiquent que les eaux sont bien appropriées pour l'irrigation.

Indice de perméabilité (IP)

Selon Doneen (1964), la perméabilité du sol peut être affectée par l'utilisation sur le long terme d'eau d'irrigation très riche en sel. La perméabilité est influencée par la présence de Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} et HCO_3^-. Sur la base de l'IP, les eaux d'irrigation peuvent être classées de qualité excellente (IP > 75%), bonne (25-75%) et douteuse (< 25%) (Doneen, 1964). Les valeurs calculées de l'IP dans la zone d'étude varient entre 9,9 et 57,8% avec une moyenne de 27,7%. Une proportion de 56% des échantillons (9/16) présentent des eaux de qualité mauvaise pour l'irrigation tandis que les 44% autres présentent des eaux de bonne qualité pour l'irrigation (***Tableau 3***).

Le taux d'adsorption du Magnésium (MAR)

Les valeurs de MAR calculées dans la zone d'étude varient de 3,7 à 75,3% (***Tableau 3***), avec une moyenne de 37,28%. Les eaux peuvent être classés en deux groupes. Le premier avec 69% des échantillons peut être considéré comme adapté pour l'irrigation (MAR < 50%), tandis que le second qui intègre 31% des échantillons se classe comme non convenable pour l'irrigation (MAR > 50%). L'utilisation à long terme des eaux avec des valeurs de MAR supérieures à 50% entraîne une augmentation de l'alcalinité du sol avec un effet négatif sur la qualité de l'eau et le rendement des cultures (Dhaoui et al., 2023).

Tableau 3 : Indicateurs de la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
SAR	0,3	1,1	0,9	1,3	0,4	0,1	0,7	0,2	0,3	1,4	1,2	1,9	0,2	0,1	0,5	0,3
%Na	5,6	11,5	14,4	14,2	5,9	3,1	11,9	4,5	5,1	21,1	19,0	21,3	6,4	3,5	6,7	2,8
RSC	-9,0	-24,0	-7,1	-29,7	-12,4	-5,1	-9,9	-0,7	-12,2	-9,6	-9,6	-17,1	-0,6	-0,2	-11,3	-13,8
IP	18,8	19,4	30,8	18,8	17,2	24,5	23,7	42,8	9,9	33,0	30,2	30,1	57,8	51,6	20,6	13,9
MAR	48,1	51,7	64,4	35,3	22,1	57,6	23,9	29,9	61,9	13,4	75,3	47,0	36,3	3,7	18,3	7,7
EC	1436	2830	1152	3660	1463	618	1360	564	1042	1416	1445	2460	247	244	1247	2660

Dynamique saisonnière et à long terme de la nappe

Du fait de la faible profondeur de la nappe (4 à 18 m), la zone connaît une forte utilisation de l'eau souterraine pour l'irrigation. Près de 2 000 ouvrages ont été dénombrés sur l'ensemble de la superficie du périmètre (2 452 ha), ce qui indique une densité d'environ 80 ouvrages au km². Les mesures effectuées sur les quatre (4) piézomètres montrent une tendance homogène, avec de légères remontées saisonnières de la nappe en période de pluies et une baisse pluriannuelle généralisée (***Figure 10a***). Les faibles remontées saisonnières du niveau de la nappe témoignent de la faiblesse de la recharge en raison notamment des dépôts argileux superficiels qui caractérisent les sols dans le périmètre. L'évolution piézométrique pluriannuelle montrent une tendance à la baisse de la nappe depuis au moins 2021. La comparaison avec les mesures anciennes effectuées en avril 1965 dans le puits abandonné (BK) par Sauvel (1966) confirment la tendance pluriannuelle à la baisse du niveau de la nappe phréatique qui a atteint 4 m en 2024 (***Figure 10b***). Cette baisse persistance des ressources en eau souterraine est induite conjointement par un faible taux de recharge de la nappe phréatique et un pompage régulier aux fins d'irrigation dans le périmètre.

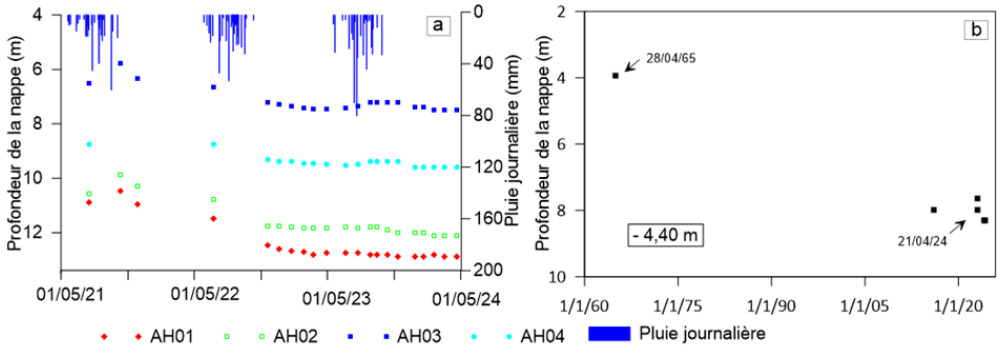


Figure 10 : Evolution du niveau de la nappe phréatique : a) dynamique saisonnière et b) dynamique pluriannuelle

Discussions

Notre analyse de l'échantillonnage des puits et forages dans le périmètre irrigué de Birni N'Konni montre que la composition chimique des eaux souterraines affiche des valeurs élevées de la conductivité électrique et de concentrations en certains éléments tels que le sulfate, le fluorure et le manganèse. La conductivité électrique nous renseigne sur le degré de minéralisation de l'eau. Les résultats montrent que la salinité des eaux souterraines exprimée en termes de conductivité électrique varie entre 244 et 3660 µS/cm, avec une moyenne de 1490 µS/cm. Ces valeurs dépassent largement dans un ordre de grandeur celles observées par Issoufou Ousmane et al. (2022) dans le périmètre irrigué de Djirataoua (84 - 441 µS/cm) dans le centre sud du Niger. Ceci reflète une forte minéralisation de ces eaux.

Les concentrations élevées d'ions et les valeurs EC observées dans la majeure partie des échantillons suggèrent un impact de l'irrigation sur les ressources en eau souterraine. La plupart des échantillons présentant des concentrations élevées en fluorures présentent également des concentrations élevées en Ca^{2+} (médiane 157 mg/L), K^{+} (médiane 6,25 mg/L), et montrent une corrélation élevée entre F^{-} et Ca^{2+} (0,86). Les concentrations relativement élevées de Ca^{2+}, F^{-}, et K^{+} dans les eaux souterraines peu profondes des périmètres irrigués ont été associées à l'action anthropique liée au retour d'irrigation et à l'utilisation d'engrais chimiques pour augmenter les rendements agricoles (Hassane et al., 2016; Lapworth et al., 2017; Issoufou Ousmane et al., 2023). D'après les entretiens avec les groupes d'agriculteurs, les types d'engrais utilisés dans le périmètre sont principalement composés d'azote-phosphore-potassium (NPK), qui est l'engrais le plus largement utilisé, de di-ammonium-phosphate (DAP), d'urée et de composts. Ces composés sont très solubles dans l'eau et contiennent une phase minérale, principalement du carbonate de fluorapatite ($Ca5(PO4CO3)3F$) (Mar et Okazaki, 2012; Nordstrom et Kirk, 2022). Ce processus de minéralisation des eaux souterraines lié à l'irrigation a été mis en évidence dans d'autres

contextes géologiques du Niger (Abdou Babaye et al., 2017; Issoufou Ousmane et al., 2022, 2023). Les concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+} largement supérieures aux concentrations de Na^{+} observées dans les eaux souterraines sont dues au processus d'échange de cations qui se produit dans la zone. Cette substitution peut perturber la structure physique du sol irrigué par ces eaux, avec le remplacement du sodium par des concentrations élevées du calcium et magnésium, ce qui entraînera un enrichissement en magnésium et en calcium dans le sol, puis une détérioration de sa structure, avec une dispersion des argiles, et une réduction de la croissance des plantes, comme observé dans le cadre de travaux d'autres auteurs (Olofinlade et al., 2018; Subba Rao et al., 2012, 2021; Dhaoui et al., 2023). La dissolution des carbonates et l'évaporation de la nappe mises en évidences dans certains échantillons, peuvent respectivement être rattachées à la nature carbonatée (calcaire) du substratum de l'aquifère (Nouhou Chaweye et al., 2023), et à la valeur relativement élevée de l'évapotranspiration potentielle de la zone (2 280 mm/an).

La comparaison des faciès géochimiques en 1960 (Tirat, 1963; Sauvel, 1966) et en 2023 (cette étude) révèle une nette variation de la minéralisation des eaux souterraines dans la zone irriguée. Tirat (1963) et Sauvel (1966) ont montré que le faciès chimique dominant les eaux souterraines dans les années 1960 était de type bicarbonate calcique. Cependant, cette étude montre que 75% du faciès est de type sulfate calcaire. Ceci montre l'impact de l'irrigation sur les eaux souterraines, résultant en un changement qualitatif du faciès original bicarbonate-calcium vers un faciès sulfate-calcium.

Les données piézométriques ont montré une tendance à la baisse depuis les années 1960. La tendance à l'augmentation de la pluviométrie depuis les années 1980s laisse à croire que le facteur climatique n'est pas à l'origine de la baisse de la nappe phréatique dans le périmètre irrigué, étant donné que les nappes phréatiques au Sahel affichent une tendance à la hausse pour les même fluctuations climatiques (Leblanc et al., 2008; Favreau et al., 2009, 2011). Dans la région, le pompage d'irrigation a augmenté au cours de la période 1980-2020 à cause du nombre important d'ouvrages d'accès à la nappe phréatique recensés dans le périmètre irrigué (près de 2000 sur 2 452 ha) (ICA, 2016). Cette baisse du niveau des eaux souterraines observée dans la zone d'étude a été rattachée à l'augmentation des prélèvements d'eau souterraine pour l'irrigation au cours des dernières décennies (ICA, 2016) et/ou les faibles taux de renouvellement.

Conclusion

Cette étude a montré que dans la zone d'étude, les eaux souterraines sont relativement chargées et légèrement basiques, avec une conductivité

moyenne de 1490 µS/cm et un pH moyen de 7,34. L'application de différentes approches (ACP, diagramme de Gibbs, relations ioniques et indices de saturation) a montré que la minéralisation des eaux est principalement contrôlée par le processus d'interaction eau-roche et par l'évaporation. Sur la base de 16 échantillons d'eau collectés et d'une série d'indicateurs de la qualité de l'eau pour irrigation, les eaux souterraines présentent pour la plupart un risque de salinisation à court ou long terme. Sur la base de l'indicateur SAR, 75% (12/16) appartiennent aux classes C3-S1 et C4-S1, montrant le risque élevé de salinisation à moyen et à long terme. En plus, les valeurs calculées du %Na ont montré que 25% des échantillons présentent une eau de qualité médiocre pour l'irrigation. L'évolution piézométrique indique une faible variation saisonnière du niveau de la nappe et une baisse pluriannuelle persistance atteignant 4 m depuis les années 1960. Cette étude a montré qu'après 47 ans d'exploitation, les pratiques agricoles ont impacté la qualité et la quantité des eaux souterraines dans la zone d'étude.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse de doctorat fondée par l'Etat du Niger et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Les auteurs remercient l'Office National des Aménagements Hydro-Agricoles (ONAHA) de Birni N'Konni pour avoir facilité l'accès au périmètre irrigué et de collecter les échantillons.

References:

1. Abderamane, H., Razack, M., & Vassolo, S. (2013). Hydrogeochemical and isotopic characterization of the groundwater in the Chari-Baguirmi depression, Republic of Chad. *Environmental Earth Sciences*, *69*(7), 2337–2350. https://doi.org/10.1007/s12665-012-2063-7.
2. Abdou Babaye, M. S., Sandao, I., Saley, M. B., Wagani, I., & Issoufou Ousmane, B. (2017). Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, *10*(6), 2728. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.26.
3. Acworth, R. I., Rau, G. C., Cuthbert, M. O., Leggett, K., & Andersen, M. S. (2021). Runoff and focused groundwater-recharge

response to flooding rains in the arid zone of Australia. *Hydrogeology Journal*, *29*(2), 737–764. https://doi.org/10.1007/s10040-020-02284-x.

4. Aher, K. R. (2012). Evaluation of Groundwater Quality and its Suitability for Drinking and Agriculture Use in Parts of Vaijapur, District Aurangabad, MS, India. *Journal Of Chemical Sciences*, *2*(46), 25–31.
5. Ahmed, A. H., Rayaleh, W. E., Zghibi, A., & Ouddane, B. (2017). Assessment of chemical quality of groundwater in coastal volcano-sedimentary aquifer of Djibouti, Horn of Africa. *Journal of African Earth Sciences*, *131*, 284–300. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.04.010.
6. ARID. (2004). Typologie des systèmes irrigués en Afrique de l'Ouest sahélienne. Projet Appia. Ouagadougou: ARID. http://www.arid_afrique.org/IMG/pdf/Typologie_des_systeme. 34.
7. Bian, J., Nie, S., Wang, R., Wan, H., & Liu, C. (2018). Hydrochemical characteristics and quality assessment of groundwater for irrigation use in central and eastern Songnen Plain, Northeast China. *Environmental Monitoring and Assessment*, *190*(7). https://doi.org/10.1007/s10661-018-6774-4.
8. Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., & Savard, M. M. (2008). Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. *Journal of Hydrology*, *353*(3–4), 294–313. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.02.015.
9. Dhaoui, O., Agoubi, B., Antunes, I. M., Tlig, L., & Kharroubi, A. (2023). Groundwater quality for irrigation in an arid region—application of fuzzy logic techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, *30*(11), 29773–29789. https://doi.org/10.1007/s11356-022-24334-5.
10. Doneen, L. D., (1964). Water Quality for Agriculture, Department of Irrigation. *University of California, Davis*, 48p
11. Kendon, R. A. Stratton, A. Rachel, S. M. Tucker, H. B. John, R. Ségolène, P. S., & David, A, C. (2019). Enhanced future changes in wet and dry extremes over Africa at convection-permitting scale. *Nature Communications*, *10*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09776-9
12. Eaton, F. M. (1950). Significance of carbonates in irrigation waters. *Soil Science*, *69*(2), 123–133. https://doi.org/10.1097/00010694-195002000-00004.
13. El Bilali, A., & Taleb, A. (2020). Prediction of irrigation water quality parameters using machine learning models in a semi-arid

environment. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *19*(7), 439–451. https://doi.org/10.1016/j.jssas.2020.08.001
14. Favreau, G., Cappelaere, B., Massuel, S., Leblanc, M., Boucher, M., Boulain, N., & Leduc, C. (2009). Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resources Research*, *45*(7), 0–16. https://doi.org/10.1029/2007WR006785.
15. Favreau, G., Nazoumou, Y., Leblanc, M., Guéro, A., & Goni, I. B. (2011). Groundwater resources increase in the Iullemmeden Basin, West Africa. In *Climate Change Effects on Groundwater Resources: A Global Synthesis of Findings and Recommendations* (pp. 113–128). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11611-12.
16. Fisher, R. S., & Mullican, W. F. (1997). Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, *5*(2), 4–16. https://doi.org/10.1007/s100400050102.
17. Hassane, A. B., Leduc, C., Favreau, G., Bekins, B. A., & Margueron, T. (2016). Impacts d'une grande ville sahélienne sur l'hydrodynamique et la qualité des eaux souterraines: exemple de Niamey (Niger). *Hydrogeology Journal*, *24*(2), 407–423. https://doi.org/10.1007/s10040-015-1345-z.
18. Huang, L., Sun, Z., Zhou, A., Bi, J., & Liu, Y. (2022). Source and enrichment mechanism of fluoride in groundwater of the Hotan Oasis within the Tarim Basin, Northwestern China. *Environmental Pollution*, *300*. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118962
19. ICA. (2016). Evaluation du potentiel des ressources en eau souterraine dans le périmètre hydro-agricole de Birni N'Konni. Rapport d'étude, 64p.
20. INS. (2012). Recensement Général de la population et de l'habitation, 2012. (NER-INS-RGPH--2012-V1.0). https://anado.ins.ne/index.php.
21. Issoufou Ousmane, B., Nazoumou, Y., & Favreau, G. (2022). Évaluation des eaux souterraines : application de la géochimie pour une étude de cas dans le périmètre irrigué de Djirataoua , Sud-Est Niger Résumé. *Afrique SCIENCE, 2022*, *20*(February), 56–70p.
22. Issoufou Ousmane, B., Nazoumou, Y., Favreau, G., Abdou Babaye, M. S., Abdou Mahaman, R., Boucher, M., Sorensen, J. P. R., MacDonald, A. M., & Taylor, R. G. (2023). Groundwater quality and its implications for domestic and agricultural water supplies in a semi-arid river basin of Niger. *Environmental Earth Sciences*, *82*(13). https://doi.org/10.1007/s12665-023-11016-9.
23. Labrecque, G., Chesnaux, R., & Boucher, M. A. (2020). Water-table

fluctuation method for assessing aquifer recharge: application to Canadian aquifers and comparison with other methods. *Hydrogeology Journal*, *28*(2), 521–533. https://doi.org/10.1007/s10040-019-02073-1.

24. Lapworth, D. J., Krishan, G., MacDonald, A. M., & Rao, M. S. (2017). Groundwater quality in the alluvial aquifer system of northwest India: New evidence of the extent of anthropogenic and geogenic contamination. *Science of the Total Environment*, *599–600*, 1433–1444. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.223.
25. Leblanc, M. J., Favreau, G., Massuel, S., Tweed, S. O., Loireau, M., & Cappelaere, B. (2008). Land clearance and hydrological change in the Sahel: SW Niger. *Global and Planetary Change*, *61*(3–4), 135–150. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.08.011.
26. Li, P., He, X., Li, Y., & Xiang, G. (2019). Occurrence and Health Implication of Fluoride in Groundwater of Loess Aquifer in the Chinese Loess Plateau: A Case Study of Tongchuan, Northwest China. *Exposure and Health*, *11*(2), 95–107. https://doi.org/10.1007/s12403-018-0278-x.
27. Lindle, J., Villholth, K. G., Ebrahim, G. Y., Sorensen, J. P. R., Taylor, R. G., & Jensen, K. H. (2023). Groundwater recharge influenced by ephemeral river flow and land use in the semiarid Limpopo Province of South Africa. *Hydrogeology Journal*, *31*(8), 2291–2306. https://doi.org/10.1007/s10040-023-02682-x.
28. Mar, S. S., & Okazaki, M. (2012). Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer. *Microchemical Journal*, *104*, 17–21. https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.03.020.
29. Nazoumou, Y., Favreau, G., Adamou, M. M., & Maïnassara, I. (2016). La petite irrigation par les eaux souterraines, une solution durable contre la pauvreté et les crises alimentaires au Niger ? *Cahiers Agricultures*, *25*(1). https://doi.org/10.1051/cagri/2016005.
30. Nordstrom, D. K. (2022). Fluoride in thermal and non-thermal groundwater: Insights from geochemical modeling. *Science of the Total Environment*, *824*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153606.
31. Nouhou Chaweye Y., M., Boucher Y., Nazoumou G., Favreau R., Abdou Mahaman B., Issoufou. Ousmane., A., & Legchencko, A. (2023). Apport des méthodes RMP et TDEM á l'évaluation des ressources en eau disponibles pour l'irrigation en climat semi-aride – cas de Birni N'Konni. *Actes Du 13ème Colloque De Géophysique Des Sols et Des Formations Superficielles Organisé Par Le Réseau GEOFCAN 7-8 Nov. 2023 Collège de l'école Doctorale, Strasbourg,*

France.
32. Nouhou Chaweye, Y., Nazoumou, Y., Favreau, G., Boucher, M., Issoufou Ousmane, B., Abdou Mahaman, R., & Legchenko, A. (2024). Optimization of groundwater resources management in a semi-arid catchment: Application of MRS and TDEM geophysical methods in southern Niger. *The 9th Maghrebian Colloquium of Applied Geophysics (MCAG9): Applied Geophysics and Sustainable Development Challenges in Africa.'' April 23rd to 25th, 2024 Kenitra, Morocco.*
33. Olofinlade, W. S., Daramola, S. O., & Olabode, O. F. (2018). Hydrochemical and statistical modeling of groundwater quality in two constrasting geological terrains of southwestern Nigeria. *Modeling Earth Systems and Environment*, *4*(4), 1405–1421. https://doi.org/10.1007/s40808-018-0486-1.
34. ORSTOM. (1964). Bilan sommaire des études d'hydrologie de surface effectuées sur le territoire de la République du Niger. Rapport d'étude, 111p.
35. Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (2013). Description of input and examples for PHREEQC Version 3 — A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. In *U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chapter A43*.
36. Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *25*(6), 914–928. https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914.
37. Rao, N. S., Dinakar, A., Sravanthi, M., & Kumari, B. K. (2021). Geochemical characteristics and quality of groundwater evaluation for drinking, irrigation, and industrial purposes from a part of hard rock aquifer of South India. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(24), 31941–31961. https://doi.org/10.1007/s11356-021-12404-z.
38. Sauvel, C. (1966). Hydrogéologie de la haute Maggia. Rapport BRGM 66 NIA, 96p.
39. Schoeller, H. (1965). Qualitative evaluation of groundwater resource. In: Methods and techniques of groundwater investigations and development. UNESCO *Water Resources Series*, pp 44–52.
40. Schoeller, H. (1967). Geochemistry of Groundwater International Guide for Research and Practice, vol. 15. UNESCO, pp. 118.
41. SOGETHA. (1964). Aménagement de l'Ader Doutchi-Maggia : Études pédologiques de détail. Bassins versants expérimentaux. Rapport d'étude, 3éme partie, 114p.

42. Su, H., Wang, J., & Liu, J. (2019). Geochemical factors controlling the occurrence of high-fluoride groundwater in the western region of the Ordos basin, northwestern China. *Environmental Pollution*, *252*, 1154–1162. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.06.046.
43. Subba Rao, N., Surya Rao, P., Venktram Reddy, G., Nagamani, M., Vidyasagar, G., Satyanarayana, N. & Liu, V. V. (2012). Chemical characteristics of groundwater and assessment of groundwater quality in Varaha River Basin, Visakhapatnam District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, *184*(8), 5189–5214. https://doi.org/10.1007/s10661-011-2333-y.
44. Taylor, R. G., Scanlon, B., Döll, P., Rodell, M., Van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., Macdonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., & Treidel, H. (2013). Groundwater and climate change. In *Nature Climate Change* (Vol. 3, Issue 4, pp. 322–329). https://doi.org/10.1038/nclimate1744.
45. Tirat (1964). Contribution à l'étude hydrogéologique du Continental terminal. Rapport BRGM.
46. USSL. (1954). Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. Soil Sci Soc Am J 18(3):348. https://doi.org/10.2136/sssaj1954.03615995001800030032x.
47. Wekesa, S. S., Stigter, T. Y., Olang, L. O., Oloo, F., Fouchy, K., & McClain, M. E. (2020). Water Flow Behavior and Storage Potential of the Semi-Arid Ephemeral River System in the Mara Basin of Kenya. *Frontiers in Environmental Science*, *8*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00095.
48. Wilcox, L. V. (1955). Classification and Use of Irrigation Waters. US Department of Agriculture.Cire.969, Washington D.C., USA. (p. 19).
49. Zhao, X., Guo, H., Wang, Y., Wang, G., Wang, H., Zang, X., & Zhu, J. (2021). Groundwater hydrogeochemical characteristics and quality suitability assessment for irrigation and drinking purposes in an agricultural region of the North China plain. *Environmental Earth Sciences*, *80*(4). https://doi.org/10.1007/s12665-021-09432-w.