ESI Preprints **Not Peer-reviewed**

Suivi des Parametres Physico-Chimiques des Eaux Souterraines du Bassin de l'alima, sous bassin du Fleuve Congo : Campagnes de Grande Saison Seche 2021 et 2022 dans les Districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji, RDC

Lebela Mouakoumbat Noida Janesia
Doctorante, École nationale polytechnique,
Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo
Chesther Gatsé Ebotehouna
Docteur, Ecole Normale Supérieure,
Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo
Urbain Gampio Mbilou
Professeur Titulaire CAMES, Unité de Recherche d'hydrologie et hydrogéologie, Département de géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo

Doi: 10.19044/esipreprint.5.2025.p363

Approved: 17 May 2025
Posted: 19 May 2025

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

Cite As:
Noida Janesia L.M., Gatsé Ebotehouna C. & Gampio Mbilou U. (2025). *Suivi des Parametres Physico-Chimiques des Eaux Souterraines du Bassin de l'alima, sous bassin du Fleuve Congo : Campagnes de Grande Saison Seche 2021 et 2022 dans les Districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji, Republique du Congo*. ESI Preprints.
https://doi.org/10.19044/esipreprint.5.2025.p363

Résumé

Cette étude a pour objectif de suivre l'évolution des paramètres hydrogéochimiques des eaux souterraines des districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji, dans le bassin versant de l'Alima, afin de déterminer leur qualité pour la consommation et l'irrigation pendant les saisons sèches de 2021 et 2022. L'échantillonnage a inclus 26 ouvrages en 2021 et 34 en 2022, répartis entre sources aménagées, puits de captage et forages. Les échantillons ont été prélevés, stockés et analysés au laboratoire de La Congolaise des Eaux (LCDE). Les paramètres physiques (pH, température, conductivité, TDS) et chimiques (cations et anions) ont été mesurés in situ et en laboratoire. Les résultats montrent que les eaux respectent les normes OMS, avec une prédominance de Ca^{2+}, Na^{+}, HCO_3^{-} et Cl^{-}, et deux faciès dominants,

bicarbonaté calcique et magnésien en 2021, et chloruré, sulfaté calcique et magnésien en 2022. Les eaux souterraines d'Oyo, Tchikapika et Boundji respectent les normes de l'OMS, mais présentent des spécificités chimiques qui nécessitent une surveillance continue. L'acidité persistante, la faible minéralisation, et la corrosion des infrastructures sont des indicateurs de risques sanitaires potentiels, bien que la qualité chimique globale soit satisfaisante. Les éléments tels que le Ca^{2+}, Na^{+}, et HCO_3^{-} dominent la composition chimique des eaux, avec une influence notable des précipitations et de l'altération des silicates. Selon les critères de Wilcox, les eaux sont excellentes à bonnes pour l'irrigation. Cependant, les préoccupations concernant l'acidité de ces eaux et les risques microbiologiques auxquelles elles sont exposées d'où, la nécessité d'un suivi microbiologique. Les résultats peuvent orienter les politiques de gestion de l'eau, particulièrement pour les régions où l'acidité et la corrosion peuvent affecter la santé publique et les infrastructures. Un suivi régulier et des interventions ciblées sont nécessaires pour garantir la potabilité de l'eau et la santé des habitants.

Mots clés : Eaux souterraines ; physico-chimiques, qualité d'eau, saison sèche, bassin versant de l'Alima

Monitoring of Physico-Chemical Parameters of Groundwater in the Alima Basin, Congo River Sub-Basin: 2021 and 2022 Long Dry Season Campaigns in the Districts Of Oyo, Tchikapika and Boundji, Republic of Congo

Lebela Mouakoumbat Noida Janesia
Doctorante, École nationale polytechnique,
Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo
Chesther Gatsé Ebotehouna
Docteur, Ecole Normale Supérieure,
Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo
Urbain Gampio Mbilou
Professeur Titulaire CAMES, Unité de Recherche d'hydrologie et hydrogéologie, Département de géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo

Abstract

This study aims to monitor the evolution of the hydrogeochemical parameters of groundwater in the sub-prefectures of Oyo, Tchikapika and

Boundji, in the Alima watershed, in order to determine their quality for consumption and irrigation during the dry seasons of 2021 and 2022. Sampling included 26 structures in 2021 and 34 in 2022, divided between developed sources, catchment wells and boreholes. The samples were collected, stored and analyzed at the laboratory of La Congolaise des Eaux (LCDE). The physical (pH, temperature, conductivity, TDS) and chemical (cations and anions) parameters were measured in situ and in the laboratory. The results show that the waters meet WHO standards, with a predominance of Ca^{2+}, Na^{+}, HCO_3^{-} and Cl^{-}, and two dominant facies, calcium bicarbonate and magnesium in 2021, and chloride, calcium sulfate and magnesium in 2022. The groundwaters of Oyo, Tchikapika and Boundji meet WHO standards, but have chemical specificities that require continuous monitoring. Persistent acidity, low mineralization, and corrosion of infrastructure are indicators of potential health risks, although the overall chemical quality is satisfactory. Elements such as Ca^{2+}, Na^{+}, and HCO_3^{-} dominate the chemical composition of the waters, with a notable influence of precipitation and silicate weathering. According to the Wilcox criteria, the waters are excellent to good for irrigation. However, concerns about the acidity of these waters and the microbiological risks to which they are exposed, hence the need for microbiological monitoring. The results can guide water management policies, particularly for regions where acidity and corrosion can affect public health and infrastructure. Regular monitoring and targeted interventions are necessary to ensure the potability of water and the health of residents.

Keywords: Groundwater; physicochemical, water quality, dry season, Alima watershed

Introduction

Les eaux souterraines constituent une ressource essentielle pour la consommation humaine, l'agriculture et les activités industrielles (Kumar et al., 2022). Cependant, leur disponibilité et leur qualité sont menacées par les impacts climatiques et conjoints de l'industrialisation, de l'agriculture intensive et de la croissance démographique (Singh et al., 2020). Alors qu'elles jouent un rôle crucial dans les zones arides, elles restent tout aussi importantes en zones équatoriales, où elles bénéficient généralement d'une certaine protection naturelle contre la pollution. Pourtant, en milieu urbain, les activités anthropiques, telles que les rejets industriels et les installations sanitaires inadéquates, compromettent leur qualité (Kanohin-Otchoumou et al., 2017).

En République du Congo, notamment dans les zones rurales comme Oyo, Tchikapika et Boundji, les populations dépendent fortement des eaux

souterraines, souvent sans évaluer leur qualité ni leur sécurité. L'absence d'infrastructures d'assainissement adéquates et l'expansion des activités agricoles exposent ces ressources à des contaminations chimiques et microbiologiques (Ambarref et al., 2007). De plus, les sécheresses récurrentes et la pression démographique accentuent ces menaces (Goula et al., 2006). Par ailleurs, la composition chimique des eaux souterraines varie en fonction de leur interaction avec les formations géologiques environnantes (Souleymane et al., 2020).

Dans ce contexte, cette étude a pour objectif de suivre l'évolution hydrogéochimique des eaux souterraines des districts étudiés au cours des saisons sèches de 2021 et 2022, afin d'identifier les facteurs influençant leur qualité et leur dynamisme.

Matériels et méthodes

Présentation de la zone d'étude

L'étude porte sur les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji (Figure 1), situés à environ 400 m d'altitude dans la Cuvette Congolaise, au cœur du bassin du fleuve Congo (Laraque & Olivry, 1998). Cette région couvre 5187,5 km², avec une population de 85.137 habitants, et ses principales activités économiques sont la pêche, l'agriculture et l'élevage (INS, 2018).

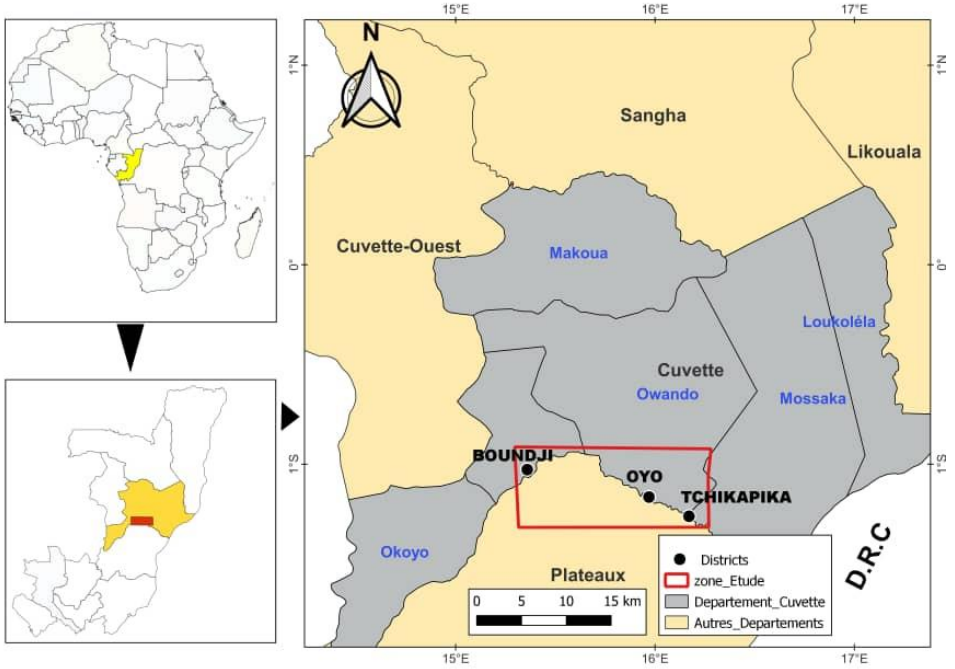


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

Le climat est chaud et humide, influencé par les basses et hautes pressions intertropicales, avec un profil pluviométrique bimodal, comprenant

deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches (Itoua et al., 2017). La pluviosité annuelle varie entre 1600 et 1800 mm, avec une température moyenne de 25°C (Itoua et al., 2017 ; Bocquier, 1960). La région est entourée d'une forêt ombrophile dense, couvrant près de 48 % du bassin (Laraque and Olivry, 1998). La Cuvette est délimitée au Sud par des formations sablonneuses des plateaux, à l'Ouest par des formations métamorphisées, au Nord par la République Centrafricaine, et à l'Est par le fleuve Congo et l'Oubangui (Bocquier, 1960).

Le contexte géologique (Figure 2) des districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji est simple, avec des formations de couverture composées d'alluvions quaternaires fluviatiles argileuses ou sablonneuses, susceptibles d'être très perméables et de stocker de grandes quantités d'eau souterraine (Laraque & Olivry, 1998). La recharge des aquifères est probablement élevée en raison des fortes précipitations et de la présence d'aquifères hautement perméables (BRGM, 1982). Ces aquifères alluvionnaires sont essentiels pour l'approvisionnement en eau des communautés locales.

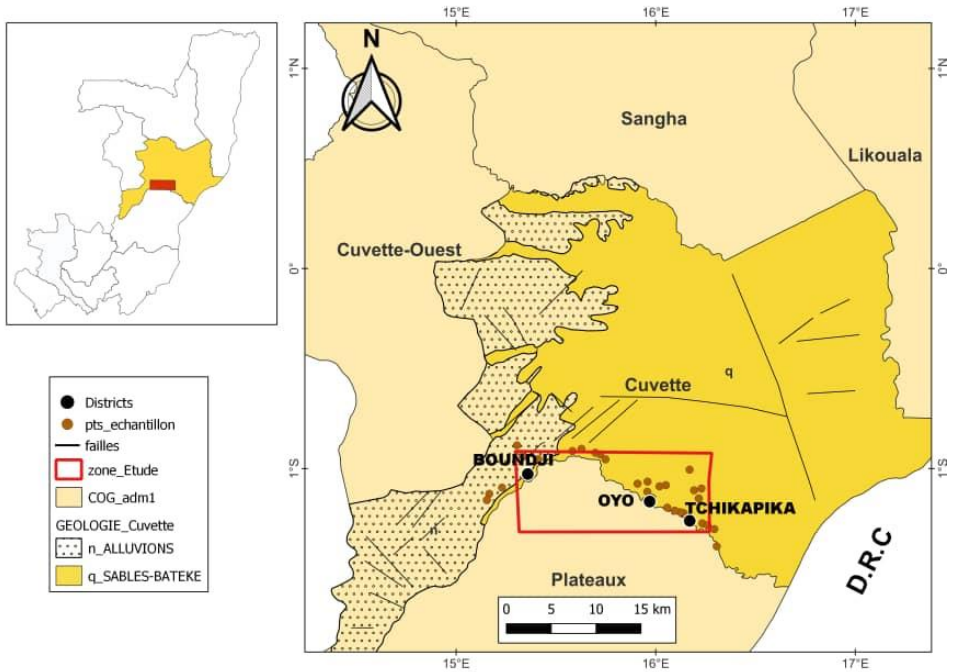


Figure 2. Extrait de la carte géologique de la zone d'étude

Echantillonnage et analyses chimiques

Pour les campagnes d'échantillonnage (Figure 3), 26 ouvrages ont été sélectionnés en 2021 et 34 en 2022, comprenant 04 sources aménagées, 05 puits de captage et 25 forages. Ces points ont été choisis pour représenter spatialement l'ensemble des aquifères des trois districts. La localisation des points échantillonnés est illustrée dans la Figure 3 pour les deux campagnes.

Au cours de ces deux campagnes, les paramètres physiques des eaux ont été mesurés in situ à l'aide de puisettes ou de robinets des bornes fontaines (Thierrin et al., 2003). Les échantillons, prélevés et stockés dans des flacons en polyéthylène de 1L, ont été conservés dans une glaciaire pour éviter la contamination et la variation de température. Un total de 60 échantillons d'eau a été collecté, dont 26 en août 2021 et 34 en août 2022, puis analysés au laboratoire de La Congolaise des Eaux (LCDE) pour les cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) et anions (Cl^{-}, NO_3^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}) selon les méthodes standard de l'APHA (20ème édition, 1998). Les mesures in situ incluaient la température, déterminée à l'aide d'un thermomètre alcoolique, ainsi que la conductivité électrique et les TDS (solides dissous totaux), évalués à l'aide d'un conductimètre portable HachsensION+ EC5. Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre portable Hachsens. En laboratoire, des titrages ont été effectués pour Ca^{2+}, Mg^{2+}, HCO_3^{-}, Na^{+}, K^{+} et Cl^{-}. Le sulfate (SO_4^{2-}) et les nitrates (NO_3^{-}) ont été mesurés respectivement par spectrophotométrie et méthode colorimétrique. L'analyse de la silice a été réalisée par spectrophotométrie Shimadzu UV-1800, avec des solutions étalons de silice préparée à partir d'une solution mère de métasilicate de sodium. L'exactitude des analyses chimiques a été vérifiée par l'équilibre ionique selon Hounslow (1995), et les variations temporelles des paramètres de qualité de l'eau ont été évaluées par le coefficient de corrélation de Pearson.

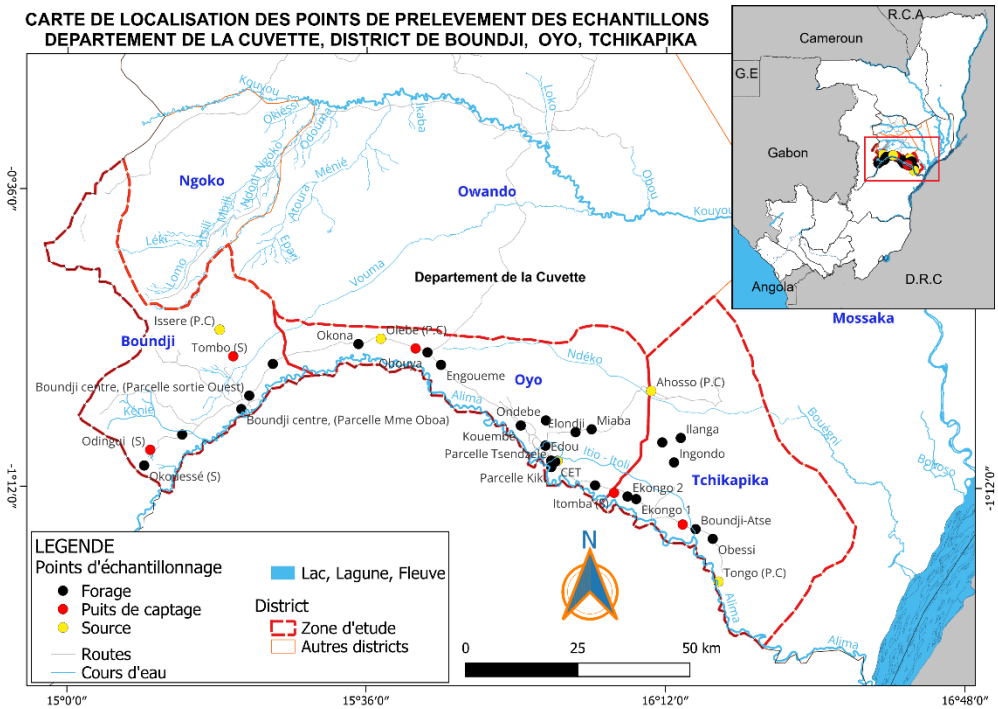


Figure 3. Carte montrant la répartition spatiale des points d'échantillonnage

Résultats et Discussion

Statistiques descriptives

Les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans notre zone d'étude (districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji) ont été évaluées pour les grandes saisons sèches (de 2021 et de 2022) et sont présentés respectivement dans les tableaux 1 et 2.

Température

Les températures des eaux souterraines dans le district d'Oyo en saison sèche variaient de 27,5 à 27,9 °C en 2021, et de 23,3 à 29,5 °C en 2022. À Tchikapika, les températures allaient de 27,1 à 28,2 °C en 2021 et de 24,1 à 28,8 °C en 2022. Dans le district de Boundji, les températures variaient de 27,4 à 27,9 °C en 2021, et de 22,8 à 27,2 °C en 2022. Ces valeurs sont proches de celles de l'air, suggérant des aquifères ouverts (Bocquier, 1960). La faible variation des températures indique une bonne qualité de l'eau, car elle ne modifie pas ses propriétés organoleptiques (Akil et al., 2014 ; Makhoukh et al., 2011).

Tableau 1. Résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eaux souterraines des trois (3) districts, campagne grande saison sèche 2021

District	Statistique	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Dureté
OYO (n=11)	Minimum	5,27	27,50	2,00	5,00	3,41	0,90	0,11	1,12	0,23	0,10	0,06	3,74
	Maximum	8,70	27,90	12,99	26,00	9,03	6,10	1,18	4,50	2,80	0,60	1,80	22,77
	Moyenne	7,63	27,73	5,05	11,22	5,86	2,44	0,34	2,54	0,63	0,25	0,74	8,94
	Variance (n)	0,87	0,02	8,79	32,94	3,08	2,25	0,10	0,95	0,49	0,02	0,28	24,15
	Ecart-type (n)	0,93	0,13	2,97	5,74	1,75	1,50	0,31	0,98	0,70	0,14	0,53	4,91
Tchikapika (n=7)	Minimum	4,65	27,10	2,00	5,00	1,80	0,37	0,10	0,41	0,18	0,11	0,06	1,77
	Maximum	7,95	28,20	18,41	17,00	10,37	1,42	0,54	1,84	32,00	1,14	0,09	134,62
	Moyenne	5,90	27,80	6,01	10,03	4,46	0,96	0,32	1,17	4,81	0,41	0,08	22,72
	Variance (n)	0,85	0,11	27,45	14,38	6,71	0,11	0,03	0,23	123,24	0,14	0,00	2088,77
	Ecart-type (n)	0,92	0,33	5,24	3,79	2,59	0,33	0,17	0,48	11,10	0,37	0,01	45,50
Boundji (n=8)	Minimum	5,39	27,40	3,00	6,00	1,83	0,12	0,05	0,28	0,09	0,12	0,04	1,24
	Maximum	7,79	27,90	24,97	51,00	8,53	2,13	0,80	1,48	0,76	0,36	0,13	5,67
	Moyenne	5,98	27,71	9,01	18,72	5,15	0,93	0,35	0,69	0,33	0,26	0,07	3,09
	Variance (n)	0,53	0,03	54,57	232,05	4,80	0,35	0,09	0,15	0,05	0,00	0,00	2,73
	Ecart-type (n)	0,73	0,16	7,39	15,23	2,19	0,59	0,31	0,39	0,22	0,06	0,03	1,65
Norme OMS (2019)		6,5-8,5	25	< 200	< 400	< 200	< 200	< 50	< 70	< 50	<12	< 150	< 200

n= nombre d'échantillon

pH

Les pH dans le district d'Oyo variaient de 5,27 à 8,7 en 2021 et de 4,73 à 7,82 en 2022, indiquant une tendance légèrement acide à neutre. À Tchikapika, les pH allaient de 4,65 à 7,95 en 2021 et de 4,72 à 7,58 en 2022, avec une majorité légèrement acide. À Boundji, les pH variaient de 5,39 à 7,79 en 2021, et de 4,6 à 7,74 en 2022, restant généralement acides. La

légère acidité est attribuée à l'acide carbonique formé par la combinaison de CO_2 libre et d'eau de pluie (Sethy et al., 2016 ; Souleymane et al., 2020).

TDS et Conductivité électrique

Les valeurs de TDS variaient dans le district d'Oyo de 2 à 12,99 mg/L en 2021 et de 3,5 à 241,74 mg/L en 2022. À Tchikapika, elles allaient de 2 à 18,41 mg/L en 2021 et de 10,51 à 158,16 mg/L en 2022. À Boundji, les TDS variaient de 3 à 24,97 mg/L en 2021 et de 5,5 à 206,2 mg/L en 2022, toutes restant sous 500 mg/L, classant ces eaux comme douces (Subramani et al, 2005). La conductivité électrique (CE) variait de 5 à 26 µS/cm en 2021 et de 7 à 483 µS/cm en 2022 à Oyo. À Tchikapika, elle allait de 5 à 17 µS/cm en 2021 et de 21 à 316 µS/cm en 2022. À Boundji, les valeurs variaient de 6 à 51 µS/cm en 2021 et de 11 à 412 µS/cm en 2022. Ces résultats montrent que les eaux souterraines sont peu minéralisées, avec une minéralisation décroissante de 2021 à 2022, due aux faibles profondeurs des aquifères (Sandao et al., 2018) d'où ils sont prélevés.

Tableau 2. Résultats des analyses des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eaux souterraines des trois (3) districts, campagne grande saison sèche 2022

District	Statistique	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Dureté
OYO (n=14)	Minimum	4,73	23,30	3,50	7,00	3,67	0,91	0,00	1,05	0,22	0,32	0,60	3,49
	Maximum	7,82	29,50	241,74	483,00	253,57	62,73	37,32	72,45	14,50	27,04	40,76	240,62
	Moyenne	6,33	26,91	93,02	185,87	89,86	24,16	7,31	27,88	5,58	10,40	15,69	92,59
	Variance (n)	1,64	3,03	5568,02	22226,65	7230,71	375,35	93,36	500,12	20,02	69,77	158,32	5515,62
	Ecart-type (n)	1,28	1,74	74,62	149,09	85,03	19,37	9,66	22,36	4,47	8,35	12,58	74,27
Tchikapika (n=10)	Minimum	4,72	24,10	10,51	21,00	3,31	2,73	0,00	3,15	0,63	1,17	1,78	10,46
	Maximum	7,58	28,80	158,16	316,00	165,90	41,08	5,32	47,40	9,48	17,68	26,67	157,40
	Moyenne	6,25	27,17	77,92	155,70	77,67	20,24	3,33	23,35	4,67	8,71	13,14	77,55
	Variance (n)	1,42	1,79	4301,16	17169,81	5306,57	290,17	2,61	386,28	15,47	53,83	122,34	4260,50
	Ecart-type (n)	1,19	1,34	65,58	131,03	72,85	17,03	1,62	19,65	3,93	7,34	11,06	65,27
Boundji (n=11)	Minimum	4,60	22,80	5,50	11,00	2,98	1,43	0,00	1,65	0,34	0,61	0,93	5,52
	Maximum	7,74	27,20	206,20	412,00	216,30	53,56	33,00	61,80	12,36	23,07	34,78	205,21
	Moyenne	5,37	24,77	30,98	61,91	24,88	8,05	3,97	9,29	1,86	3,46	5,22	30,85
	Variance (n)	0,73	1,92	3208,28	12808,08	3673,28	216,42	86,34	288,18	11,52	40,18	91,32	3176,94
	Ecart-type (n)	0,85	1,39	56,64	113,17	60,61	14,71	9,29	16,98	3,39	6,34	9,56	56,36
Norme OMS (2019)		6,5-8,5	25	< 200	< 400	< 200	< 200	< 50	< 70	< 50	<12	< 150	< 200

Dureté totale, calcium et magnésium

La présence de calcium et de magnésium dans l'eau détermine la dureté (Ojekunle et al., 2020). Les concentrations de dureté des eaux souterraines échantillonnées dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji pendant les saisons sèches 2021 et 2022 révèlent des variations significatives. En 2021, à Oyo, la dureté variait de 3,74 à 22,77 mg/L (CG-05 et CG-11), à Tchikapika de 1,77 à 134,62 mg/L (CG-16 et CG-20), et à Boundji de 1,28 à 5,67 mg/L (CG-29 et CG-26), la majorité des échantillons

étant classés comme « douce », à l'exception de quelques échantillons de Tchikapika et Oyo qui étaient « dure » d'après la classification de (Sawyer & McCarthy, 1967). En 2022, Oyo affichait des valeurs de 3,49 à 240,62 mg/L (CG-07 et CG-13), avec 40 % en « dure », tandis que Tchikapika présentait 50 % en « douce » et 50 % en « modérément dure », et Boundji 82 % en « douce ». Les concentrations de Ca^{2+} en 2021 variaient à Oyo de 1,12 à 4,5 mg/L (CG-05 et CG-11), à Tchikapika de 0,41 à 1,84 mg/L, et à Boundji de 0,28 à 1,48 mg/L. En 2022, Oyo affichait des concentrations de 1,05 à 72,45 mg/L, Tchikapika de 3,15 à 47,4 mg/L, et Boundji de 1,65 à 61,8 mg/L. Les concentrations de Mg^{2+} en 2021 allaient de 0,23 à 2,8 mg/L à Oyo, de 0,18 à 32 mg/L à Tchikapika, et de 0,09 à 0,76 mg/L à Boundji, tandis qu'en 2022, elles variaient de 0,21 à 14,50 mg/L à Oyo, de 0,63 à 9,48 mg/L à Tchikapika, et de 0,34 à 12,36 mg/L à Boundji. Toutes les concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+} étaient inférieures aux limites admissibles de l'OMS (2019).

Potassium et sodium

L'étude présente les concentrations de K^+ et Na^+ dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji pendant les grandes saisons sèches de 2021 et 2022. En 2021, la concentration en K^+ à Oyo varie de 0,1 à 0,6 mg/L, à Tchikapika de 0,11 à 1,14 mg/L, et à Boundji de 0,12 à 0,36 mg/L. En 2022, ces valeurs augmentent significativement, atteignant 0,32 à 27,04 mg/L à Oyo, 1,17 à 17,68 mg/L à Tchikapika, et 0,61 à 23,07 mg/L à Boundji. Concernant Na^+, en 2021, les concentrations à Oyo varient de 0,06 à 1,8 mg/L, à Tchikapika de 0,06 à 0,09 mg/L, et à Boundji de 0,04 à 0,13 mg/L. En 2022, elles passent de 0,6 à 40,76 mg/L à Oyo, 1,78 à 26,67 mg/L à Tchikapika, et 0,93 à 34,78 mg/L à Boundji. Les concentrations de K^+ et Na^+ en 2021 sont inférieures à celles de 2022, mais toutes restent en dessous des niveaux admissibles (OMS, 2019).

Ion bicarbonate

Les concentrations en ions bicarbonate des échantillons d'eau souterraine prélevés dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji varient entre 3,41 mg/L et 9,03 mg/L en grande saison sèche 2021 pour Oyo, 1,8 mg/L et 10,37 mg/L pour Tchikapika, et 1,83 mg/L et 8,53 mg/L pour Boundji. En saison sèche 2022, les valeurs sont significativement plus élevées : 3,67 mg/L à 253,57 mg/L pour Oyo, 3,31 mg/L à 165,9 mg/L pour Tchikapika, et 2,98 mg/L à 216,3 mg/L pour Boundji. On observe une forte concentration en ions bicarbonate en 2022 par rapport à 2021.

Ion chlorure

Le tableau 1 présente les concentrations d'ions chlorure dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji pendant la saison sèche 2021. Dans le

district d'Oyo, la concentration de Cl^- variait de 0,9 à 6,1 mg/L, avec des minimum et maximum observés dans les échantillons CG-05 et CG-11, respectivement. Pour Tchikapika, les valeurs variaient de 0,37 à 1,42 mg/L, avec CG-20 et CG-21 comme échantillons extrêmes. À Boundji, les concentrations allaient de 0,12 à 2,13 mg/L, avec CG-29 et CG-,30 respectivement comme valeurs minimales et maximales. Le tableau 2 indique les concentrations d'ions chlorure en 2022. À Oyo, les valeurs moyennes allaient de 0,91 à 62,73 mg/L, avec CG-07 et CG-13 comme extrêmes. À Tchikapika, les concentrations variaient de 2,73 à 41,08 mg/L, tandis qu'à Boundji, elles allaient de 1,43 à 53,56 mg/L, avec les échantillons CG-36 et CG-34 comme points extrêmes. Les concentrations d'ions chlorure restent inférieures au seuil acceptable de 250 mg/L (OMS, 2019), et aucune conséquence négative sur la santé humaine liée à une consommation excessive n'a été rapportée (Jain et al., 2010).

Analyse statistique multivariée

Analyse de corrélation de Pearson

Les tableaux 3 à 8 présentent les statistiques des eaux souterraines dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji. Les coefficients de corrélation de Pearson pour la grande saison sèche de 2021 sont détaillés dans les tableaux 3 à 5, tandis que ceux pour la grande saison sèche de 2022 figurent dans les tableaux 6 à 8.

Pour 2021, le tableau 3 montre que, dans le district d'Oyo, sur 66 corrélations, 12 sont significatives au niveau de 1 % et 4 au niveau de 5 %. Des corrélations positives notables incluent celles entre pH et Ca^{2+}, TDS et CE (0,964), ainsi que Cl^- avec Ca^{2+} et Mg^{2+}, indiquant une tendance à former des composés dans les eaux souterraines (Ganiyu et al., 2018).

Tableau 3. Matrice de corrélation pour les échantillons d'eaux souterraines dans le district d'Oyo campagne grande saison sèche 2021

	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Dureté
pH	1,000											
T°	-0,422	1,000										
TDS	-0,475	0,348	1,000									
Ce	-0,390	0,263	0,964	1,000								
HCO_3^-	0,168	-0,070	-0,178	-0,042	1,000							
Cl-	0,421	-0,687	-0,148	-0,107	-0,055	1,000						
NO_3^-	-0,350	-0,436	0,115	0,085	-0,005	0,248	1,000					
Ca^{2+}	0,564	-0,515	-0,152	-0,075	0,276	0,900	0,036	1,000				
Mg^{2+}	0,327	-0,421	0,067	0,074	-0,279	0,820	-0,129	0,704	1,000			
K^+	0,413	-0,117	-0,033	0,145	0,339	0,090	-0,415	0,331	-0,004	1,000		
Na^+	0,487	-0,465	-0,363	-0,237	0,185	0,646	-0,391	0,677	0,741	0,332	1,000	
Dureté	0,471	-0,502	-0,036	0,007	-0,027	0,927	-0,058	0,909	0,936	0,162	0,771	1,000

Le tableau 4 souligne des corrélations similaires dans Tchikapika, avec des relations positives entre pH et divers ions (K^+, Na^+, Mg^{2+}).

Tableau 4. Matrice de corrélation pour les échantillons d'eaux souterraines dans le district de Tchikapika campagne grande saison sèche 2021

	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Dureté
pH	1,000											
T°	0,245	1,000										
TDS	-0,204	0,063	1,000									
Ce	-0,346	0,168	0,893	1,000								
HCO_3^-	-0,322	-0,893	-0,270	-0,385	1,000							
Cl-	-0,767	0,123	0,025	0,201	-0,039	1,000						
NO_3^-	-0,697	0,136	0,436	0,740	-0,131	0,542	1,000					
Ca^{2+}	-0,152	-0,574	-0,582	-0,393	0,693	-0,116	0,101	1,000				
Mg^{2+}	0,908	0,242	-0,238	-0,221	-0,416	-0,722	-0,508	-0,024	1,000			
K^+	0,001	-0,650	-0,341	-0,626	0,687	0,019	-0,642	0,159	-0,212	1,000		
Na^+	0,181	0,125	-0,143	0,185	-0,223	-0,366	0,329	0,457	0,511	-0,685	1,000	
Dureté	0,904	0,227	-0,253	-0,231	-0,398	-0,725	-0,506	0,003	1,000	-0,208	0,523	1,000

Remarques : La corrélation est significative au seuil de 0,01 (bilatéral) ; La corrélation est significative au seuil de 0,05 (bilatéral).

Le tableau 5 pour Boundji montre également des corrélations positives, notamment entre le pH et K^+.

Tableau 5. Matrice de corrélation pour les échantillons d'eaux souterraines dans le district de Boundji campagne grande saison sèche 2021

	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	Dureté
pH	1,000											
T°	0,392	1,000										
TDS	-0,458	-0,307	1,000									
Ce	-0,448	-0,321	0,999	1,000								
HCO_3^-	-0,052	0,607	-0,152	-0,172	1,000							
Cl^-	-0,115	0,521	0,221	0,224	0,070	1,000						
NO_3^-	-0,164	-0,024	-0,362	-0,378	-0,076	-0,318	1,000					
Ca^{2+}	-0,367	-0,028	0,208	0,196	0,749	-0,215	-0,314	1,000				
Mg^{2+}	-0,348	0,451	0,027	0,006	0,796	0,066	0,107	0,584	1,000			
K^+	0,584	0,364	-0,038	-0,029	0,453	0,098	-0,637	0,369	0,120	1,000		
Na^+	0,757	0,334	-0,213	-0,218	0,146	-0,425	-0,088	-0,061	-0,007	0,393	1,000	
Dureté	-0,402	0,226	0,136	0,118	0,867	-0,090	-0,127	0,900	0,880	0,280	-0,040	1

En 2022, le tableau 6 indique pour Oyo une corrélation positive significative entre le pH et plusieurs ions (TDS, CE, HCO_3^-, Cl^-, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, Na^+), renforçant l'idée d'une interdépendance chimique entre ces paramètres (Kumar, 2014).

Tableau 6. Matrice de corrélation pour les échantillons d'eaux souterraines dans le district d'Oyo campagne grande saison sèche 2022

	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	PO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Dureté
pH	1,000											
T°c	0,392	1,000										
TDS	-0,458	-0,307	1,000									
Ce	-0,448	-0,321	0,999	1,000								
HCO_3^-	-0,052	0,607	-0,152	-0,172	1,000							
Cl^-	-0,115	0,521	0,221	0,224	0,070	1,000						
PO_4^{2-}	-0,164	-0,024	-0,362	-0,378	-0,076	-0,318	1,000					
NO_3^-	-0,367	-0,028	0,208	0,196	0,749	-0,215	-0,314	1,000				
Ca^{2+}	-0,348	0,451	0,027	0,006	0,796	0,066	0,107	0,584	1,000			
Mg^{2+}	0,584	0,364	-0,038	-0,029	0,453	0,098	-0,637	0,369	0,120	1,000		
K^+	0,757	0,334	-0,213	-0,218	0,146	-0,425	-0,088	-0,061	-0,007	0,393	1,000	
Dureté	-0,402	0,226	0,136	0,118	0,867	-0,090	-0,127	0,900	0,880	0,280	-0,040	1

Le tableau 7 révèle des corrélations similaires pour Tchikapika, incluant le pH et le TDS.

Tableau 7. Matrice de corrélation pour les échantillons d'eaux souterraines dans le district de Tchikapika campagne grande saison sèche 2022

	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	PO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Dureté
pH	1,000											
T°c	0,732	1,000										
TDS	0,983	0,785	1,000									
Ce	0,983	0,785	1,000	1,000								
HCO_3^-	0,985	0,789	1,000	1,000	1,000							
Cl^-	0,983	0,785	1,000	1,000	1,000	1,000						
PO_4^{2-}	0,678	0,408	0,662	0,662	0,662	0,662	1,000					
NO_3^-	0,327	0,022	0,275	0,275	0,272	0,275	-0,111	1,000				
Ca^{2+}	0,983	0,785	1,000	1,000	1,000	1,000	0,662	0,275	1,000			
Mg^{2+}	0,983	0,785	1,000	1,000	1,000	1,000	0,662	0,276	1,000	1,000		
K^+	0,983	0,785	1,000	1,000	1,000	1,000	0,662	0,275	1,000	1,000	1,000	
Dureté	0,983	0,785	1,000	1,000	1,000	1,000	0,662	0,275	1,000	1,000	1,000	1,000

Le tableau 8 pour Boundji confirme des relations positives entre pH et autres ions au niveau de 1 %.

Tableau 8. Matrice de corrélation pour les échantillons d'eaux souterraines dans le district de Boundji, campagne grande saison sèche 2022

	pH	T°c	TDS	Ce	HCO_3^-	Cl^-	PO_4^{2-}	NO_3^-	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Dureté
pH	1											
T°c	-0,023	1,000										
TDS	0,852	-0,017	1,000									
Ce	0,852	-0,016	1,000	1,000								
HCO_3^-	0,902	-0,066	0,977	0,977	1,000							
Cl^-	0,852	-0,017	1,000	1,000	0,977	1,000						
PO_4^{2-}	0,136	-0,107	0,135	0,135	0,012	0,136	1,000					
NO_3^-	-0,123	0,303	0,108	0,108	-0,101	0,108	0,654	1,000				
Ca^{2+}	0,852	-0,016	1,000	1,000	0,977	1,000	0,135	0,108	1,000			
Mg^{2+}	0,852	-0,017	1,000	1,000	0,977	1,000	0,135	0,108	1,000	1,000		
K^+	0,852	-0,016	1,000	1,000	0,976	1,000	0,136	0,108	1,000	1,000	1,000	
Dureté	0,852	-0,016	1,000	1,000	0,977	1,000	0,136	0,108	1,000	1,000	1,000	1,000

En résumé, les corrélations entre les paramètres des eaux souterraines sont similaires dans les trois districts, avec une mention d'une corrélation entre PO_4^{2-} et NO_3^- dans Oyo et Boundji, absente à Tchikapika. Aucune corrélation positive n'a été observée entre PO_4^{2-} et d'autres paramètres dans Tchikapika.

Faciès hydrochimiques des eaux

Pour caractériser la composition chimique des eaux souterraines dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji, les analyses chimiques sont présentées à l'aide de deux types de diagrammes : le diagramme triangulaire de Piper et des diagrammes binaires tel que celui de Chadha. Ces diagrammes permettent de déterminer les différents faciès hydrochimiques des eaux souterraines de la région.

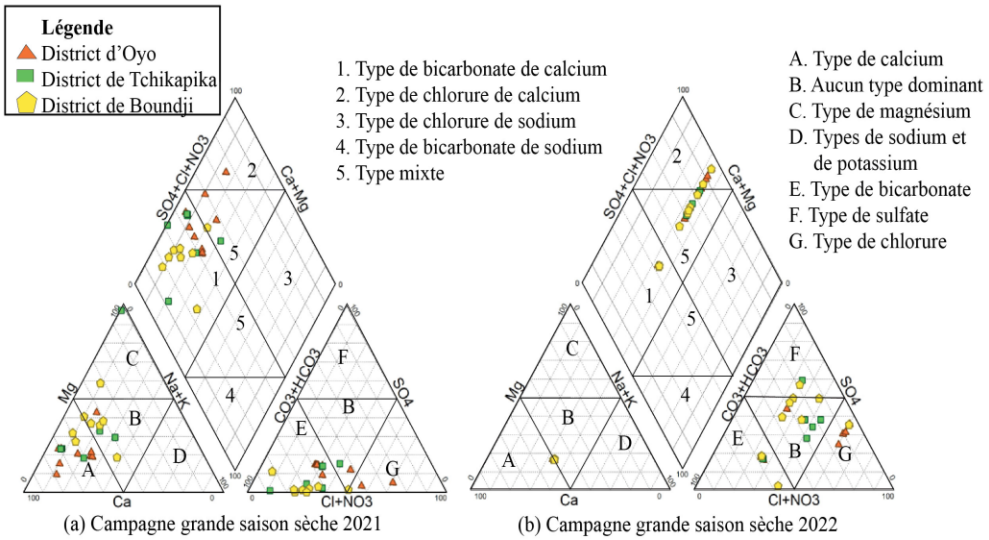
Diagramme de Piper

L'hydrochimie des eaux souterraines des districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji a été analysée pendant la grande saison sèche de 2021 et 2022, en utilisant le diagramme trilinéaire de Piper (Figure 4a, b) pour visualiser les concentrations d'ions (Akil et al., 2014). En 2021, 75 % des échantillons étaient de type bicarbonate de calcium (Ca^{2+}, HCO_3^-), tandis que 10 % étaient chlorurés, avec 70 % des 26 échantillons dans la zone 1. Ces eaux, généralement peu minéralisées, résultent de la dissolution de minéraux carbonatés, avec des bicarbonates provenant probablement de l'altération de roches silicatées (Adams et al., 2001 ; Bouteldjaoui & Taupin, 2023 ; Mgbenu & Egbueri, 2019).

En 2022, parmi les 36 échantillons analysés, 28 % étaient de type mixte (Ca-Mg-Cl), 13 % chlorure de calcium, et les types bicarbonate et chlorure n'étaient pas dominants (respectivement 17 % et 14 %).

L'hydrochimie n'affichait pas de type dominant, les faciès mixtes pouvant être influencés par des échanges d'ions inverses, la dissolution de minéraux évaporitiques et une contamination anthropique (Bouteldjaoui & Taupin, 2023). Les eaux chlorurées et sulfatées, généralement plus minéralisées, résultent souvent de l'infiltration et de la dissolution des roches argileuses.

L'analyse des eaux souterraines des districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji en 2021 montre deux faciès chimiques : bicarbonaté calcique et chloruré calcique, avec des pics pour le calcium, les chlorures et les bicarbonates. Les échantillons CG-19 et CG-09 affichent les valeurs les plus élevées, tandis que les sulfates sont faibles à Boundji (CG-28, CG-33). En 2022, les faciès sont bicarbonaté calcique et bicarbonaté sodi-potassique, avec des pics pour le calcium, le sodium-potassium et les bicarbonates. Boundji (CG-36) et Oyo (CG-12) ont des valeurs les plus élevées, et les sulfates sont les plus faibles (CG-34, CG-25). La minéralisation est dominée par les bicarbonates, calcium et sodium-potassium.



(a) Campagne grande saison sèche 2021 (b) Campagne grande saison sèche 2022

Figure 4. Répartition des faciès chimiques des eaux souterraines du bassin de l'Alima, sous bassin de la Cuvette congolaise

Diagramme de Chadha

Les échantillons d'eaux souterraines des districts de la zone d'étude, collectés lors des grandes saisons sèches de 2021 et 2022, ont été analysés à l'aide du diagramme de Chadha (Figure 5a, b) pour étudier les processus hydrochimiques, incluant l'échange de cations, la pollution par le ciment, et d'autres problèmes hydrochimiques (Chadha, 1999). Les résultats montrent qu'en 2021, 78 % des échantillons présentent un faciès bicarbonaté calcique et magnésien (Ca^{2+} – Mg^{2+} – HCO_3^-), tandis que 22 % affichent un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Ca^{2+} – Mg^{2+} – SO_4^{2-}/Cl^-).

Les analyses des eaux souterraines des districts de la zone d'étude pour la grande saison sèche 2022 (Figure 6b) révèlent que 26 % des échantillons appartiennent au type bicarbonaté calcique et magnésien (Ca^{2+} – Mg^{2+} – HCO_3^-) et 74 % au faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Ca^{2+} – Mg^{2+} – SO_4^{2-}/Cl^-). Le groupe bicarbonaté calcique et magnésien (Ca^{2+} – Mg^{2+} – HCO_3^-) représente les eaux de recharge, tandis que le groupe chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Ca^{2+} – Mg^{2+} – SO_4^{2-}/Cl^-) indique des eaux avec excès en Ca-Mg-Cl, ayant subi un échange ionique inverse (Murhula et al, 2019). Ces résultats suggèrent que l'aquifère est alimenté par les eaux de pluie, dont la durée de séjour dans la formation favorise l'interaction eau-roche (altération chimique) (Murhula et al, 2019). Les deux groupes montrent un excès de métaux alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) par rapport aux alcalins (Na^+ et K^+), mais le groupe Ca^{2+} – Mg^{2+} – SO_4^{2-}/Cl^- présente un léger déficit en anions faibles (HCO_3^-) comparé aux anions forts (Cl^- et SO_4^{2-}) (Murhula et al., 2019).

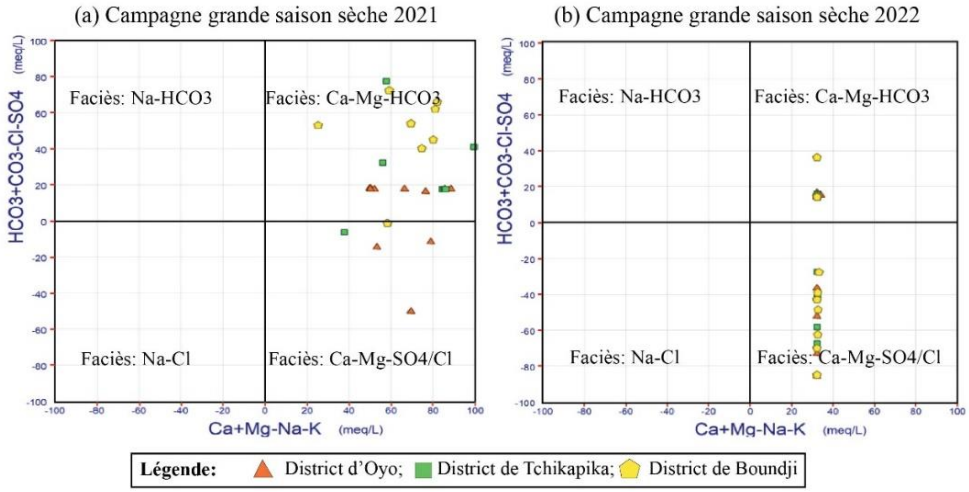


Figure 5. Diagramme de Chadha montrant le positionnement des différents échantillons d'eaux souterraines

Origines des ions majeurs et processus de minéralisation

Plusieurs chercheurs ont utilisé divers types de diagrammes bivariés pour identifier les processus hydrochimiques contrôlant la chimie des eaux souterraines par divers facteurs, notamment la composition chimique de l'eau de recharge, la nature des minéraux, l'interaction eau-roche, la dissolution/précipitation des phases minérales, l'échange d'ions, l'absorption et la désorption, l'évaporation, les processus de mélange et activités humaines (Ansari & Umar, 2019; Brindha et al., 2017; Husain et al., 2020; Li et al., 2018; Lyu et al., 2019; Roy et al., 2020).

Diagrammes binaires de corrélations entre les éléments chimiques majeurs

La Figure 6 illustre les corrélations entre les éléments chimiques majeurs des eaux souterraines, offrant un aperçu de la salinité pour une gestion efficace de la qualité de l'eau. Pendant la grande saison sèche de 2021 (Figure 6a, c, e, g), une faible corrélation a été notée entre le TDS et les ions Ca^{2+}, Cl^{-}, Na^{+} et SO_4^{2-}, due à leurs origines différentes. En revanche, en 2022 (Figure 6b, d, f, h), une forte corrélation positive a été observée entre le TDS et ces mêmes ions, indiquant leur importance dans la chimie des eaux souterraines (Mondal et al, 2011). Notamment, une corrélation élevée (R^2>0,9) entre le TDS et les ions SO_4^{2-} et Na^{+} révèle leur rôle de contrôle dans la chimie des eaux souterraines de certains puits de la zone d'étude.

Diagramme de Gibbs

Le diagramme de Gibbs (1970) est largement utilisé pour analyser les sources influençant la chimie des eaux souterraines (Khan & Jhariya, 2018). Il relie l'élément eau et les caractéristiques lithologiques de l'aquifère, notamment les précipitations, l'interaction roche-eau et l'évaporation (Krishna Kumar et al., 2015 ; Selvakumar et al., 2017). Ce diagramme représente les cations et anions en fonction du solide total dissous (TDS), avec des rapports spécifiques comme [(Na^{+})/ $(Na^{+} + Ca^{2+})$] et [Cl^{-}/$(Cl^{-} + HCO_3^{-})$]. Les campagnes de grande saison sèche en 2021 et 2022 (Figure 7) montrent que la majorité des échantillons révèlent une dominance de l'interaction précipitation-eau, indiquant que la précipitation est une source majeure de composants chimiques dans les eaux souterraines des districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji.

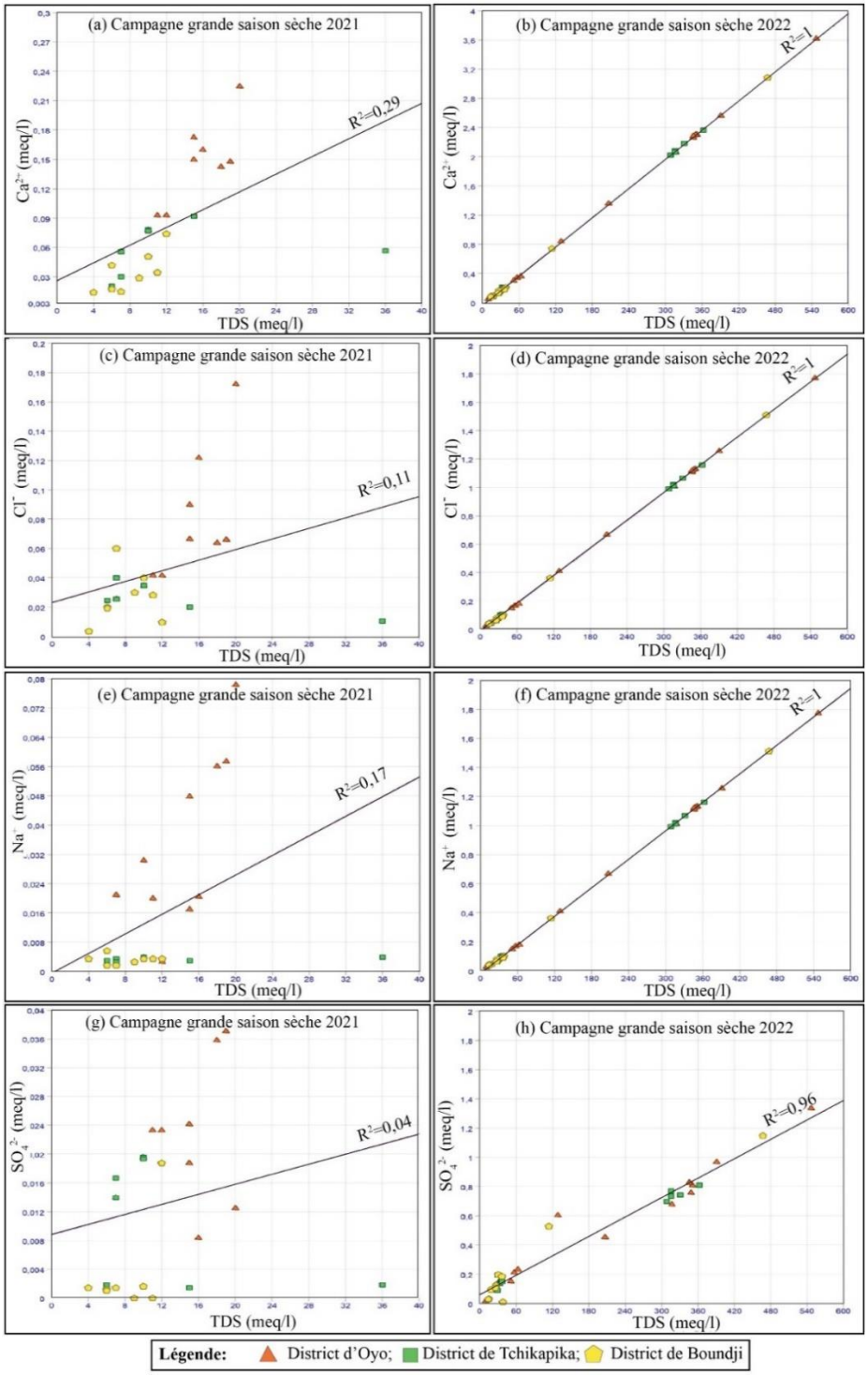


Figure 6. Diagramme binaire de corrélations entre les éléments chimiques majeurs des eaux souterraines

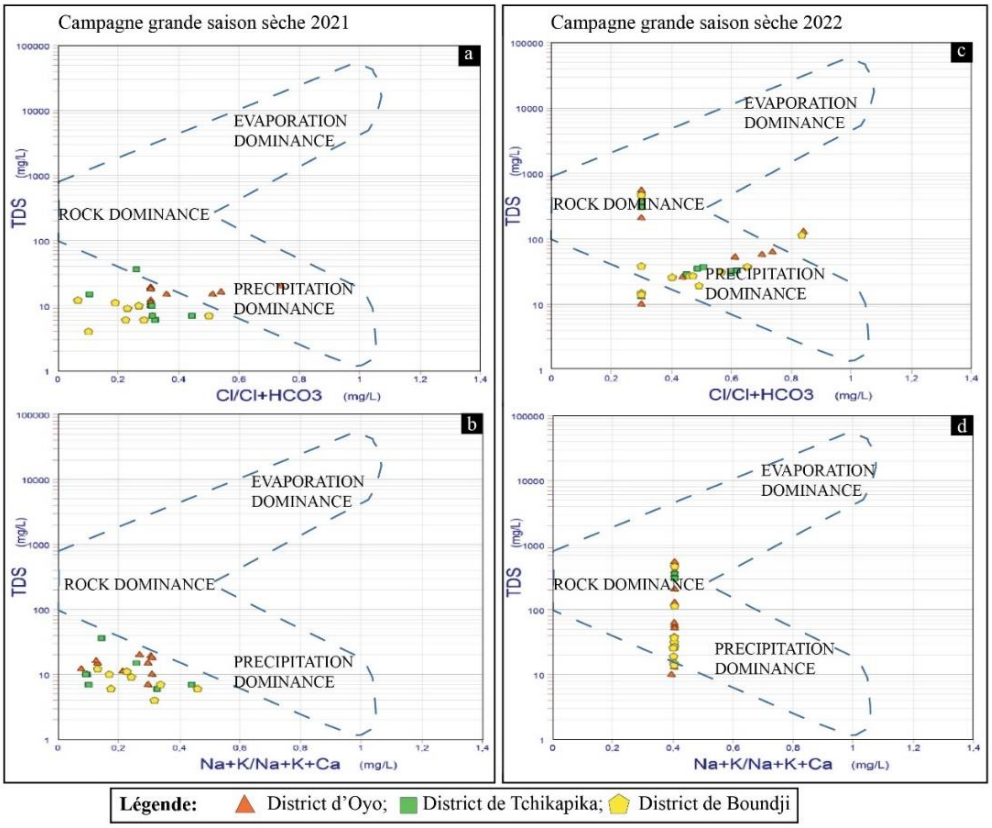


Figure 7. Mécanisme contrôlant la chimie des eaux souterraines

Relation du rapport des ions majeurs

Le diagramme bivarié Na^+ versus Cl^- (Figure 8a, b) a été utilisé pour analyser la chimie de l'eau dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji pendant les grandes saisons sèches de 2021 et 2022. En 2021, tous les échantillons étaient en dessous du rapport 1 :1, indiquant que la dissolution de l'halite contrôle la chimie de l'eau, avec un excès de Cl^- provenant de la dissolution des sels minéraux ou des réactions d'échange de cations (Appelo & Postma, 1996 ; Sajil Kumar et al., 2020 ; Bouteldjaoui & Taupin, 2023). En 2022, la majorité des échantillons se trouvaient près de ce rapport, suggérant que la dissolution des halites, ou des minéraux évaporitiques, contribuaient à la présence de Na^+ et Cl^- (Bouteldjaoui & Taupin, 2023 ; Souleymane et al., 2020).

Pour le graphique HCO_3^- versus Ca^{2+}+Mg^{2+} (Figure 8c, d), en 2021, les échantillons d'Oyo indiquaient une contribution de Ca^{2+} et Mg^{2+} par dissolution de dolomite, tandis que ceux de Boundji et Tchikapika étaient moins marqués.

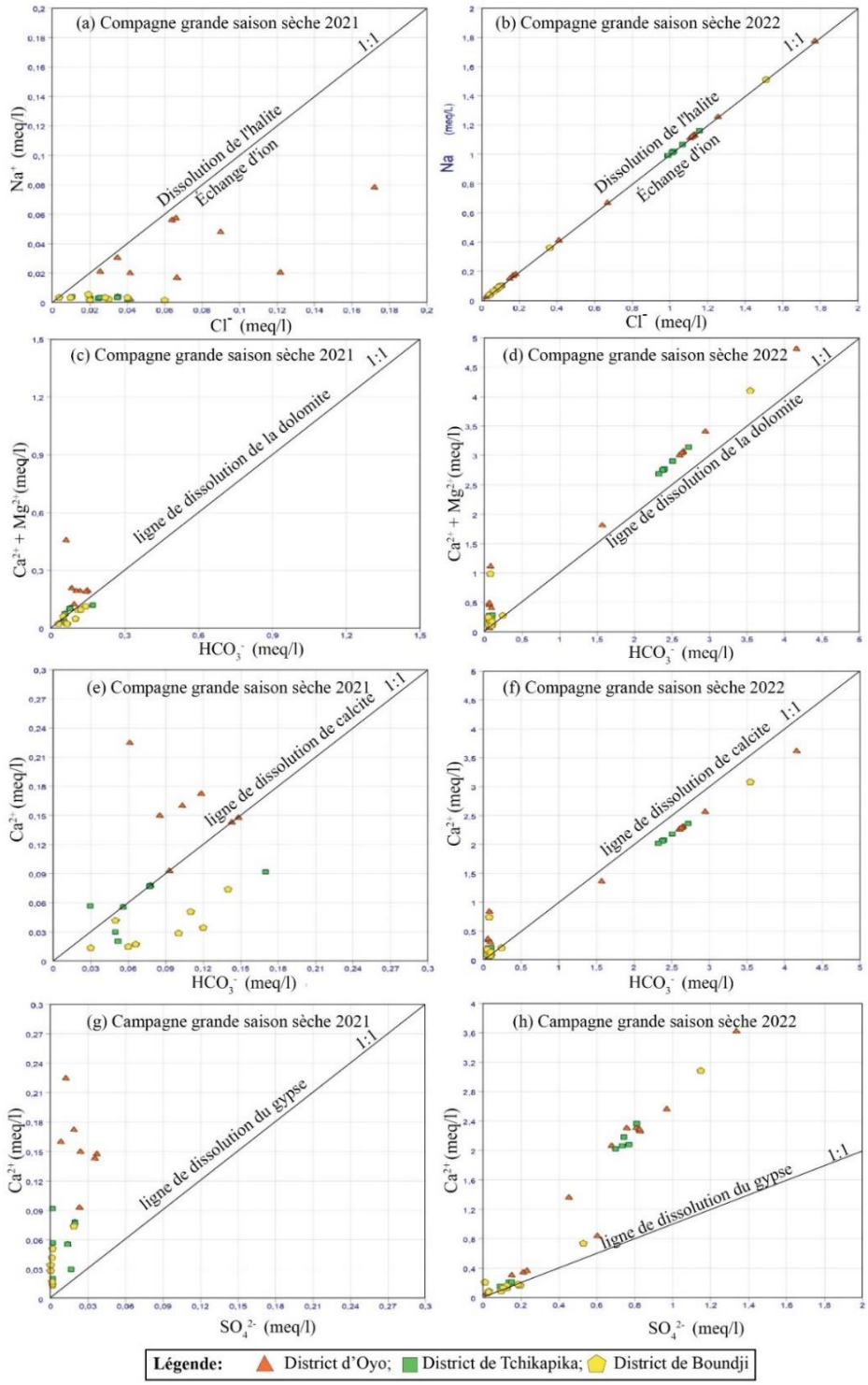


Figure 8. Diagramme binaire pour les différents échantillons d'eaux souterraines

En 2022, Oyo et Tchikapika montraient une moindre contribution de ces ions par dolomite, alors que Boundji était proche de l'équilibre, suggérant une dissolution des carbonates.

Concernant HCO_3^- versus Ca^{2+} (Figure 8e, f) en 2021, les échantillons d'Oyo indiquaient une dissolution de calcite, tandis que ceux de Tchikapika et Boundji étaient en dessous de la ligne d'équilibre, montrant une faible contribution en HCO_3^-. En 2022, la majorité des échantillons étaient proches de l'équilibre, indiquant que HCO_3^- et Ca^{2+} provenaient de la dissolution de calcite.

La relation Ca^{2+} versus SO_4^{2-} (Figure 8g, h) montre que, en 2021, les échantillons étaient au-dessus de l'équilibre, suggérant d'autres sources de Ca^{2+} comme la dissolution de minéraux carbonatés. En 2022, les échantillons d'Oyo et Tchikapika étaient également au-dessus de l'équilibre, indiquant une faible contribution du Ca^{2+} par dissolution du gypse, tandis que ceux de Boundji étaient près de l'équilibre, suggérant que la dissolution du gypse pouvait contribuer à ces ions (Chen et al, 2021 ; Sajil Kumar et al, 2020).

Qualité des eaux souterraines à l'irrigation

La qualité des eaux à l'irrigation est définie par plusieurs méthodes basées, d'une part sur %Na vs conductivité (diagramme de Wilcox, Figure 9a, c), d'autre part sur le SAR vs conductivité (diagramme USSL, Figure 9b, d).

Pourcentage de sodium

La qualité de l'eau pour l'irrigation dépend de sa minéralisation et de ses effets sur les plantes et le sol (Ravikumar et al., 2011). Le pourcentage de sodium dans l'eau souterraine est crucial pour évaluer son aptitude à l'irrigation (Sajil Kumar et al., 2014). Selon le diagramme de Wilcox (1948), les échantillons des saisons sèches de 2021 et 2022 se situent dans le champ excellent pour l'irrigation.

Taux d'adsorption de sodium (SAR)

Le taux d'adsorption de sodium (SAR), rapportant le sodium au calcium et au magnésium, indique le risque lié au sodium (Wilcox et al., 1954). Une concentration élevée de Na est toxique pour les cultures et dégrade la structure du sol (Sajil Kumar et al., 2014). Le SAR dans les districts d'Oyo, Tchikapika et Boundji varie respectivement de 0,011−0,183 et 0,14−1,143 pour 2021 et 2022. Les résultats, illustrés dans un diagramme USSL (U.S Salinity Laboratory Staff, 1954), montrent que les échantillons de 2021 sont dans la zone Faible_Faible1, indiquant une faible salinité et un risque minimum de sodium échangeable, tandis que ceux de 2022 se situent

dans la zone Faible-Moyenne_Faible1, suggérant une salinité moyenne avec un faible risque pour l'irrigation (Vasanthavigar et al., 2012).

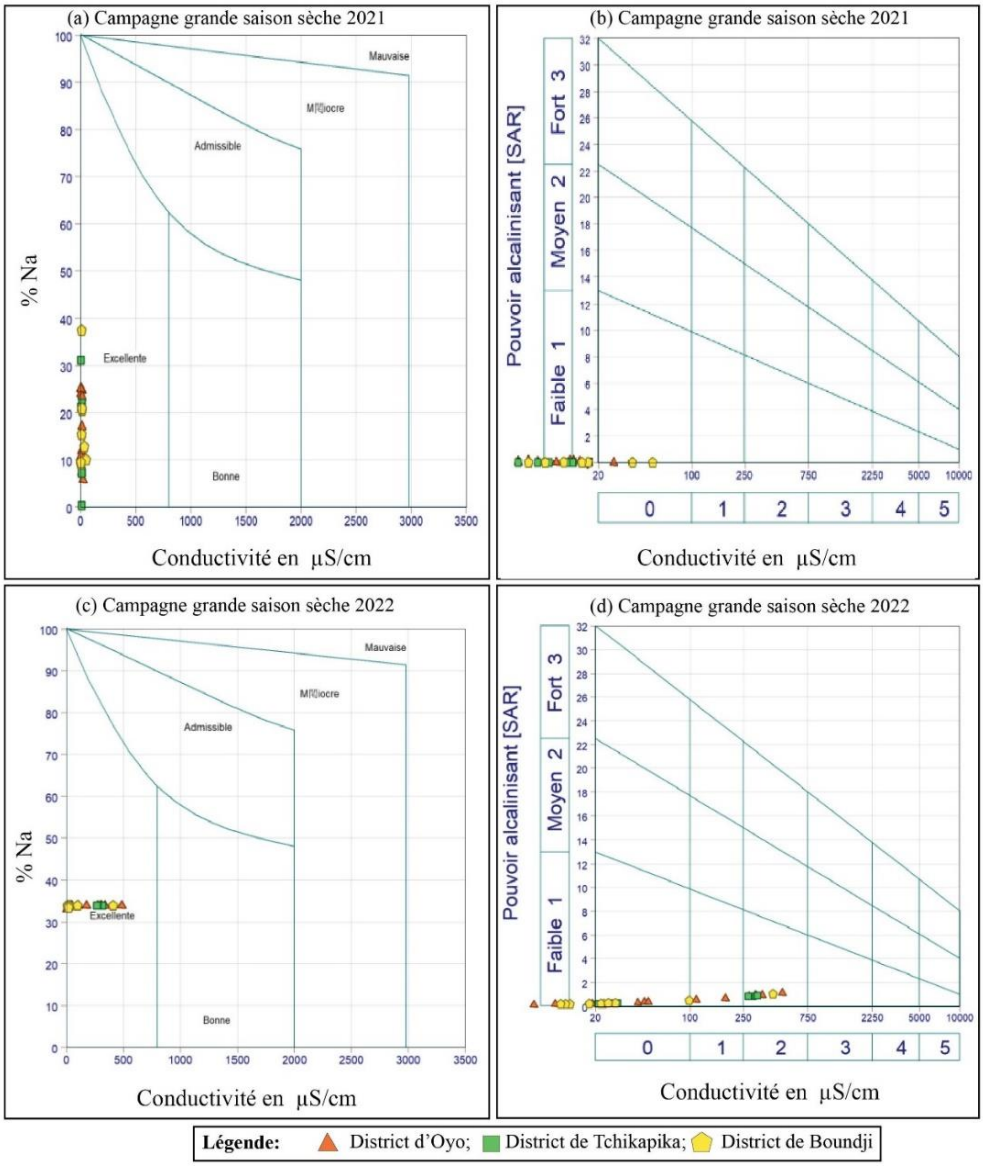


Figure 9. Diagramme de Wilcox et Riverside pour les eaux souterraines

Conclusion

Cette étude a évalué l'évolution des paramètres hydrogéochimiques des eaux souterraines d'Oyo, Tchikapika et Boundji lors des saisons sèches de 2021 et 2022, en analysant leur qualité pour la consommation et l'irrigation. Les résultats montrent que les eaux respectent globalement les normes de l'OMS, avec des différences entre 2021 et 2022 : en 2021, les

faciès prédominants étaient bicarbonaté calcique et magnésien, tandis qu'en 2022, ils étaient chlorurés et sulfatés calcique et magnésien. L'acidité de l'eau, associée à des températures élevées et une faible minéralisation, présente des risques potentiels pour la corrosion des infrastructures et la prolifération microbienne, nécessitant ainsi une surveillance continue. Les éléments comme le Ca^{2+}, Na^{+}, HCO_3^{-} et Cl^{-}, issus respectivement de l'hydrolyse des silicates et des sels minéraux, dominent la composition chimique. Selon Wilcox, l'eau est excellente à bonne pour l'irrigation, conforme aux critères %Na et SAR du diagramme USSL. Bien que l'impact sur la santé publique soit limité par la conformité chimique, la gestion de l'eau doit inclure des analyses microbiologiques régulières pour garantir sa potabilité et la santé des habitants.

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 : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux G., & Harris, C. (2001). Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa: Journal of hydrology, Vol. 241, Issues 1-2, pp. 91-103.
2. Akil, A., Hassan, T., Lahcen, B., & Abderrahim, L. (2014). Etude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de Guigou, Maroc: European Scientific Journal, Vol. 10, Issues 23.
3. Ambarref, M., Saadia, A., Bernoussi, A., & Haddouchi, B. (2007). Mapping vulnerability to groundwater pollution: application to the Gharb plain (Morocco): Rev Sci Eau, Vol. 20, Issues 2, pp. 185-199.
4. Ansari, J. A., Umar, R. (2019). Evaluation of hydrogeochemical characteristics and groundwater quality in the quaternary aquifers of Unnao District, Uttar Pradesh, India: HydroResearch, Vol. 1, pp. 36-47.
5. Appelo, C., & Postma D. (1996). Geochemistry, groundwater and pollution (3 rd corrected print): Balkema, Rotterdam, Vol. 536.
6. Bocquier, G (1960). Note concernant les travaux pédologiques dans la cuvette congolaise, Republique du Congo.

7. Bouteldjaoui, F., & Taupin JD. (2023). Assessment of some bottled natural mineral waters and spring waters in Algeria using multivariate statistical analysis, hydrogeochemical approaches and water quality index (WQI): International Journal of Environmental Analytical Chemistry, pp. 1-25.
8. BRGM (Bureau de Recherches Geologiques et Minieres) (1982). Notice explicative de la carte de planification des ressources en eau du Gabon et du Congo, Serie hydrogéologie de Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), 116pp, Ouagadougou. Burkinafasso.
9. Brindha, K., Pavelic, P., Sotoukee, T., Douangsavanh, S., & Elango L. (2017). Geochemical characteristics and groundwater quality in the Vientiane plain, Laos: Exposure and Health, Vol. 9, Issues. 2, pp. 89-104.
10. Chadha, D (1999). A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data: Hydrogeology journal, v. 7, p. 431-439.
11. Chen, W., Zhang, Y., Shi, W., Cui, Y., Zhang, Q., Shi, Y., & Liang, Z. (2021). Analysis of Hydrogeochemical Characteristics and Origins of Chromium Contamination in Groundwater at a Site in Xinxiang City, Henan Province: Applied Sciences, Vol. 11, Issues. 24, pp. 11683.
12. Ganiyu, S., Badmus, B., Olurin, O., & Ojekunle Z. (2018). Evaluation of seasonal variation of water quality using multivariate statistical analysis and irrigation parameter indices in Ajakanga area, Ibadan, Nigeria: Applied water science, Vol. 8, pp. 1-15.
13. Gibbs, RJ (1970). Mechanisms controlling world water chemistry: Science, Vol. 170, Issues. 3962, pp. 1088-1090.
14. Goula, BTA., Savane, I., Konan, B., Fadika V., & Kouadio GB. (2006). Impact de la variabilité climatique sur les ressources hydriques des bassins de N'Zo et N'Zi en Côte d'Ivoire (Afrique tropicale humide): VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol. 7, Issues. 1.
15. Husain, MS., Umar, R., & Ahmad S. (2020). A comparative study of springs and groundwater chemistry of Beas and Parbati valley, Kullu District, Himachal Pradesh, India: HydroResearch, Vol. 3, pp. 32-47.
16. INS (Institut National de la Statistique), (2020). Annuaire statistique du departement de la Cuvette 2018.
17. Itoua, TR., Mahoungou, GI., Maloba-Makanga, JD., Maniaka, FW., Samba-Kimbata, MJ. (2017). Evolution Decenale Des Regimes Pluviometriques Au Nord-Congo (République du Congo) de 1932 à 2011. Revues-ufhb-ci.org.

18. Jain, C., Bandyopadhyay, A., & Bhadra A. (2010). Assessment of ground water quality for drinking purpose, District Nainital, Uttarakhand, India: Environmental monitoring and assessment, Vol. 166, pp. 663-676.
19. Khan, R., & Jhariya D. (2018). Hydrogeochemistry and groundwater quality assessment for drinking and irrigation purpose of Raipur City, Chhattisgarh: Journal of the Geological Society of India, Vol. 91, pp. 475-482.
20. Krishna Kumar, S., Logeshkumaran, A., Magesh, N., Godson, PS., & Chandrasekar N. (2015). Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India: Applied Water Science, Vol. 5, pp. 335-343.
21. Kumar, L., Deitch, MJ., Tunio, IA., Kumar A., Memon SA., Williams L., Tagar U., Kumari R., & Basheer S. (2022). Assessment of physicochemical parameters in groundwater quality of desert area (Tharparkar) of Pakistan: Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Vol. 6, pp. 100232.
22. Kumar, PS (2014). Evolution of groundwater chemistry in and around Vaniyambadi industrial area: differentiating the natural and anthropogenic sources of contamination: Geochemistry, Vol. 74, Issues 4, pp. 641-651.
23. Laraque, A., & Olivry, J. (1998). Two hydrological systems close but opposite of the Congo-Zaire: the Congolese basin and Teke plateaux, in Proceedings International Conference on tropical climatology, meteorology and hydrology in memoriam Franz Bultot, Bruxelles (Belgium), pp. 22-24 May 1996, 1998, Royal Meteorological Institute of Belgium; Royal Academy of Overseas Sciences.
24. Li, P., Wu, J., Tian, R., He, S., He X., Xue, C., & Zhang K. (2018). Geochemistry, hydraulic connectivity and quality appraisal of multilayered groundwater in the Hongdunzi Coal Mine, Northwest China: Mine Water and the Environment, Vol. 37, Issues 2, pp. 222-237.
25. Lyu, M., Pang, Z., Yin, L., Zhang, J., Huang, T., Yang, S., Li Z., Wang, X., & Gulbostan, T. (2019). The control of groundwater flow systems and geochemical processes on groundwater chemistry: a case study in Wushenzhao Basin, NW China: Water, Vol. 11, Issues. 4, pp. 790.
26. Makhoukh, M., Sbaa, M., Berrahou, A., & Van Clooster, M. (2011). Contribution a l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'Oued Moulouya (Maroc oriental): LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN. , Issues 9, pp. 2521-9782.

27. Mgbenu, CN., & Egbueri J.C. (2019). The hydrogeochemical signatures, quality indices and health risk assessment of water resources in Umunya district, southeast Nigeria: Applied water science, Vol. 9, Issues 1, p. 22.
28. Mondal, N., Singh, V., Saxena, V., & Singh, V. (2011). Assessment of seawater impact using major hydrochemical ions: a case study from Sadras, Tamilnadu, India: Environmental monitoring and assessment, Vol. 177, pp. 315-335.
29. Murhula, EM., Kutangila, SM., Birhenjira, EM., & Muyisa, SK. (2019). Hydrogéochimie et susceptibilité à la contamination des eaux souterraines dans le secteur de Panzi, ville de Bukavu, RD Congo: Geo-Eco-Trop, Vol. 43, Issues 1, pp. 197-209.
30. Ojekunle, ZO., Adeyemi, AA., Taiwo AM., Ganiyu, SA., & Balogun MA., (2020). Assessment of physicochemical characteristics of groundwater within selected industrial areas in Ogun State, Nigeria: Environmental pollutants and bioavailability, Vol. 32, Issues 1, pp. 100-113.
31. OMS, World Health Organization (W.H.O), (2019). Guidelines for drinking-water quality, Fourth edition. 2011. ISBN 978 92 4 154815 1 [cited 2019 Nov 24]. Available from: http://www.who.int.
32. Ravikumar, P., Somashekar, R., & Angami, M. (2011). Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the Markandeya River basin, Belgaum District, Karnataka State, India: Environmental monitoring and assessment, Vol. 173, pp. 459-487.
33. Roy, A., Keesari, T., Mohokar, H., Pant, D., Sinha, UK., & Mendhekar G. (2020). Geochemical evolution of groundwater in hard-rock aquifers of South India using statistical and modelling techniques: Hydrological Sciences Journal, Vol. 65, Issues 6, pp. 951-968.
34. Sajil Kumar, P., Delson, PD., & James, E. (2014). Evaluation of groundwater chemistry in Vaniyambadi industrial area with special reference on irrigation utility: National Academy Science Letters, Vol. 37, pp. 493-502.
35. Sajil Kumar, P., Mohanan, AA., & Ekanthalu, VS. (2020). Hydrogeochemical analysis of Groundwater in Thanjavur district, Tamil Nadu; Influences of Geological settings and land use pattern: Geology, Ecology, and Landscapes, Vol. 4, Issues 4, pp. 306-317.
36. Sandao, I., Babaye, MSA., Ousmane, B., & Michelot, JL. (2018). Apports des isotopes naturels de l'eau ā la caractérisation des mécanismes de recharge des aquifčres du bassin de la Korama,

Région de Zinder, Niger: International Journal of Biological and Chemical Sciences, Vol. 12, Issues 4, pp. 1931-1954.
37. Sawyer, C., & Mccarthy, P. (1967). Chemical and sanitary engineering, McGraw-Hill, New York.
38. Selvakumar S., Chandrasekar N., Kumar G. (2017). Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India: Water Resources and Industry, Vol. 17, pp. 26-33.
39. Sethy, SN., Syed, TH., Kumar, A., & Sinha, D. (2016). Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater in parts of Southern Gangetic Plain: Environmental Earth Sciences, Vol. 75, pp. 1-15.
40. Singh, A., Patel, AK., Ramanathan, A., & Kumar M. (2020). Climatic influences on arsenic health risk in the metamorphic precambrian deposits of Sri Lanka: a re-analysis-based critical review: Journal of Climate Change, Vol. 6, Issues 1, pp. 15-24.
41. Souleymane, IMS., Babaye, MSA., Alhassane, I., & Boureima, O. (2020). Caractérisations hydrogéochimiques et qualités des eaux de la nappe phréatique du haut bassin versant de la Korama, commune de Droum/région de Zinder (Niger/Afrique de l'Ouest): International Journal of Biological and Chemical Sciences, Vol. 14, Issues 5, pp. 1862-1877.
42. U.S Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. US Department of Agriculture.
43. Subramani, T., Elango, L., & Damodarasamy, S. (2005). Groundwater quality and its suitability for drinking and agricultural use in Chithar River Basin, Tamil Nadu, India: Environmental Geology, Vol. 47, pp. 1099-1110.
44. Thierrin, J., Steffen, P., Cornaz, S., Vuataz, F.-D., Balderer, W., & Looser, M. (2003). Echantillonnage des eaux souterraines: Guide pratique: Publications de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), pp. 1-83.
45. Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., & Prasanna, M. (2012). Evaluation of groundwater suitability for domestic, irrigational, and industrial purposes: a case study from Thirumanimuttar river basin, Tamilnadu, India: Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 184, pp. 405-420.
46. Wilcox, L., Blair, GY., & Bower, C. (1954). Effect of bicarbonate on suitability of water for irrigation: Soil Science, Vol. 77, Issues 4, pp. 259-266.
47. Wilcox, LV. (1948). The quality of water for irrigation use.