

Étude comparative de la qualité physico-chimique des eaux d'aquifère de la Korama (Korama superficielle et Korama profonde) de la région de Zinder (Niger) pendant la saison pluvieuse et la saison sèche

Rabilou SOULEY MOUSSA^{1*}, Maman Mousbahou MALAM ALMA¹, Mahaman Sani LAOUALI¹, Ibrahim NATATOU¹ et Issa HABOU²

¹ *Université Abdou Moumouni de Niamey, Laboratoire d'Analyse des Matériaux, Eau et Environnement, BP 10662 Niamey, Niger*

² *Direction Régionale de l'Hydraulique et de l'Assainissement de Zinder, Laboratoire d'analyse des eaux, BP 480 Zinder, Niger*

* Correspondance, courriel : souleymoussarabilou@yahoo.fr

Résumé

Cette étude a pour objectif d'une part la caractérisation physico-chimique des eaux de l'aquifère de la Korama de la région de Zinder et d'autre part l'aptitude de ces eaux à la consommation humaine pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche). Soixante-et-un échantillons d'eaux ont été prélevés puis analysés suivant les méthodes *in situ* et classiques préconisées par les normes françaises AFNOR en se basant sur quatorze paramètres physico-chimiques. Les résultats obtenus ont été traités par une méthode hydrochimique qui utilise le diagramme de Piper et comparés aux valeurs guides de l'OMS pour une eau de consommation. La composition des eaux étudiées donne des teneurs pour certains paramètres, conformes aux valeurs guides de l'OMS. Cependant, des fortes teneurs en potassium, fer total et nitrate ont été enregistrées pour certains puits et forages avec des concentrations pouvant atteindre respectivement 45 mg.L⁻¹, 5,92 mg.L⁻¹ et 127,6 mg.L⁻¹ pendant la saison des pluies et 58,75 mg.L⁻¹, 5,95 mg.L⁻¹ et 94,16 mg.L⁻¹ pendant la saison sèche. Quatre faciès caractérisent les eaux étudiées pendant la saison des pluies et trois faciès pendant la saison sèche : chloruré calcique et magnésien (45,16 % saison des pluies et 63,33 % saison sèche), bicarbonaté sodique et potassique (25,81 % saison des pluies et 13,33 % saison sèche), chloruré sodique et potassique (19,35 % uniquement saison des pluies) et bicarbonaté calcique et magnésien (9,68 % saison des pluies et 23,33 % saison sèche). En général les eaux caractérisées sont aptes à la consommation mais, un traitement pour certains puits et forages est nécessaire avant approvisionnement.

Mots-clés : *eau souterraine, qualité physico-chimique, diagramme de Piper, Korama.*

Abstract

Comparative study of the physicochemical quality of the Korama (Korama superficial and deep Korama) aquifer waters of the Zinder region (Niger) during the rainy season and the dry season

The objective of this study is firstly the physicochemical characterization of the waters of the Korama aquifer in the Zinder region and, secondly, the suitability of these waters for human consumption during the two

seasons (rainy and dry). Sixty-one water samples were collected and analyzed according to the in situ and conventional methods recommended by French AFNOR standards based on fourteen physicochemical parameters. The results obtained were processed by a hydrochemical method using the Piper diagram and compared to the WHO guideline values for drinking water. The composition of the waters studied gives some values for certain parameters, in accordance with WHO guideline values. However, high levels of potassium, total iron and nitrate have been recorded for some wells and boreholes with concentrations of up to 45 mg.L⁻¹, 5.92 mg.L⁻¹ and 127.6 mg.L⁻¹, respectively. the rainy season and 58.75 mg.L⁻¹, 5.95 mg.L⁻¹ and 94.16 mg.L⁻¹ during the dry season. Four facies characterize the waters studied during the rainy season and three facies during the dry season : calcium chloride and magnesium (45.16 % rainy season and 63.33 % dry season), sodium bicarbonate and potassium (25.81 % season rains and 13, 33 % dry season), sodium chloride and potassium (19.35 % only rainy season) and calcium and magnesium bicarbonate (9.68 % rainy season and 23.33 % dry season). In general the characterized waters are suitable for consumption but, a treatment for certain wells and boreholes are necessary before supply.

Keywords : *groundwater, physico-chemical quality, Piper diagram, Korama.*

1. Introduction

Les eaux souterraines constituent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable de la population rurale de la région de Zinder. Cette ressource si fondamentale pour l'existence et l'économie d'un pays ou d'une région doit faire l'objet d'une gestion durable, cohérente et rationnelle. C'est dans ce contexte que les autorités nigériennes se sont engagés à promouvoir les cultures de contre saison pour la valorisation de cette ressource. Ce pourquoi, dans la région de Zinder où l'agriculture et l'élevage sont les principales activités productives pratiquées par la population, l'Etat s'est fixé comme priorité, le développement des cultures irriguées à partir des eaux souterraines mobilisables évaluées à 5 milliards de m³ dans la vallée de la Korama [1] qui fera d'ailleurs l'objet de notre étude. Suite à cela, plus de 6 000 Ha sont déjà mis en valeur pour des cultures de la canne à sucre, le maraichage et l'agroforesterie [1]. Mais, compte tenu des faibles profondeurs (3 à 4 m, moins de 25 m et par fois 40 m) de l'aquifère et de ses débits intéressants (entre 9 et 45 m³.H⁻¹ avec une moyenne de 10 m³.H⁻¹), ces activités agricoles caractérisées par l'utilisation intensive des produits agrochimiques (engrais chimiques, pesticides, etc.) peuvent avoir un impact négatif sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de l'aquifère de la Korama (grès de Mallawa et sables récents de la Korama). Car, durant ces dernières années, la qualité des eaux souterraines dans le monde a connu une grande détérioration due aux activités agricoles notamment par l'utilisation intensive des engrais chimiques [2]. Dans le souci de disposer des outils indispensables à l'établissement des stratégies de surveillance et de gestion durable de la qualité physico-chimique des ressources en eau souterraine de cette zone, des suivis de qualité ont été réalisés sur les ouvrages (puits et forages) captant cet aquifère pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. La présente étude s'intéresse d'une part à la caractérisation physico-chimique des eaux des puits et forages qui captent cet aquifère de la région de Zinder au Niger pendant les deux saisons afin de voir l'évolution spatio-temporelle des différents paramètres et d'autre part à l'aptitude de ces eaux à la consommation humaine. Car, la composition chimique des eaux des puits et forages qui est majoritairement acquise lors de la traversée du sol des eaux et de leur séjour dans le réservoir [3], peut être altérée par les différentes substances extérieures qui entrent en contact avec la nappe aquifère [4].

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

La région de Zinder est située dans la partie méridionale du Niger, c'est-à-dire au centre Est du pays, plus précisément entre $12^{\circ}48'$ et $17^{\circ}30'$ de latitude Nord et $7^{\circ}20'$ et $12^{\circ}00'$ de longitude Est. Elle couvre une superficie de 155778 km^2 , soit $12,3 \%$ du territoire national. L'aquifère de la Korama qui est notre zone d'étude se trouve au Sud de la région de Zinder (**Figure 1**). La nappe de cet aquifère est sub-affleurante dans son extrémité Nord où elle est exploitée par des puisards de profondeur très faible (3 à 4 m) dans la commune de Dogo et Bandé [5]. Dans le département de Magaria, elle se trouve à moins de 25 m en moyenne pour atteindre de profondeurs de l'ordre de 40 m dans le département de Dungas. La nappe alimente le bassin de Tchad [5]. La nappe de l'aquifère de Korama est dans sa partie inférieure formée de grès (les grès de Mallawa), surmontés par des sables et de silts, parfois argileux. Il s'agit de grès moyens à fins, parfois silteux. C'est une nappe libre d'âge quaternaire qui est limitée au Nord et à l'Est par les massifs cristallins du Damagaram et du Mounio [6]. Les principales ressources en eaux souterraines sont exploitées à l'aide des puits et forages.

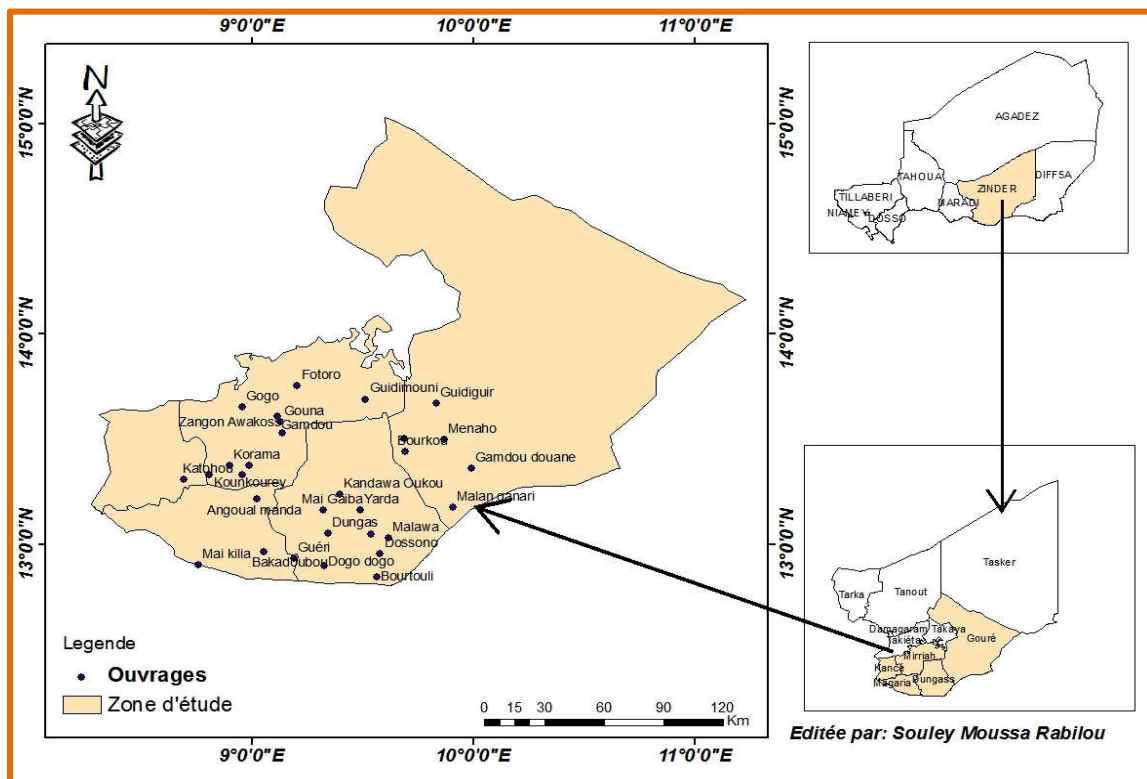


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude et des ouvrages échantillonnés

2-2. Méthodologie

Dans cette étude, deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées l'une pendant le mois d'août 2016 (saison pluvieuse) et l'autre en février 2017 (saison sèche) sur trente-et-un ouvrages qui captent l'aquifère de la Korama. Les ouvrages échantillonnés sont répartis comme suit :

- Seize (16) Forages à Motricité Humaine nommés (FM) ;
- Dix (10) Puits cimentés nommés (PC) ;
- Quatre (4) forages Mini adductions d'eau potable nommés (FA) ;
- Un (1) Puits traditionnel nommé (PT).

Le choix a été basé sur le fait que ces ouvrages sont les plus utilisés par les populations rurales. Les prélèvements ont été réalisés dans des flacons en polyéthylène de 1 L. Les échantillons issus de ces prélèvements ont été conservés dans un récipient contenant de la glace pour maintenir la température de l'ordre de 4°C, puis acheminés au laboratoire d'analyse des eaux de la Direction Régionale de l'Hydraulique et de l'Assainissement de Zinder. Les coordonnées géographiques des ouvrages échantillonnés pour la réalisation de la carte de localisation ont été obtenues à l'aide d'un GPS (GARMIN - GPSMAP64s). Les paramètres sélectionnés pour cette étude sont : des paramètres physiques (pH, Température, conductivité électrique) et des paramètres chimiques (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fer total (Fe^{2+} , Fe^{3+}), HCO_3^- , Cl^- , F^- , NO_3^- , NO_2^- , et SO_4^{2-}). Les paramètres physiques ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un pH-mètre de marque Palintest et d'un conductimètre de marque EUTECH INSTRUMENTS (Cyber Scan com. 110). Les paramètres chimiques à savoir : les ions F^- , le fer total (Fe^{2+} , Fe^{3+}), SO_4^{2-} , NO_3^- et NO_2^- ont été analysés par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre DR-2800, les ions K^+ et Na^+ par absorption atomique à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme de marque JENWAY, les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} par complexométrie à l'EDTA, les ions HCO_3^- par titrimétrie à l'acide sulfurique et les ions Cl^- par la méthode de Mohr. Toutes ces analyses ont été réalisées au laboratoire d'analyse des eaux de la direction régionale de l'hydraulique et de l'assainissement de Zinder suivant le protocole décrit par [7]. Les données issues de ces analyses ont été comparées aux valeurs guide de l'OMS pour une eau de consommation et traitées par la méthode hydrochimique en utilisant le logiciel diagramme pour déterminer les différents faciès hydrogéochimiques des eaux prélevées. Ensuite, ces données ont été comparées entre les saisons pour voir la qualité des eaux de cet aquifère et l'évolution de différents éléments chimiques en fonction des saisons. Ce diagramme est très utilisé en hydrochimie pour caractériser les faciès chimiques des eaux et donne de très bons résultats [8 - 12]. Ainsi, le logiciel XLSTAT 2018 a été utilisé pour déterminer les valeurs extrêmes, la moyenne et l'écart-type de différents paramètres.

3. Résultats

Les résultats des caractérisations physico-chimiques des eaux échantillonnées sont présentés dans le (**Tableau 1**) pour la saison de pluie et dans le (**Tableau 2**) pour la saison sèche. Il ressort de ces résultats que les eaux de l'aquifère de la Korama possèdent les caractéristiques suivantes :

- Paramètres physiques

Le pH des eaux de l'aquifère de la Korama varie de 5,6 à 9,59, avec une moyenne de 6,77 et un écart-type de 0,72 pendant la saison pluvieuse. Pendant la saison sèche, il est compris entre 5,54 et 7,79, avec une moyenne de 6,73 et un écart-type de 0,43. Ces eaux présentent une température qui varie de 28,1 à 35,5°C, avec une moyenne de 30,58°C et un écart-type de 1,29°C pendant la saison pluvieuse. Mais, pendant la saison sèche, cette température oscille entre 24,1 et 32°C, avec une moyenne de 29,65°C et un écart-type de 1,85°C. Les conductivités électriques de ces eaux varient 42,9 à 737 $\mu S.cm^{-1}$, avec une moyenne de 269,145 $\mu S.cm^{-1}$ et un écart-type de 182,583 $\mu S.cm^{-1}$ et de 42,5 à 2560 $\mu S.cm^{-1}$, avec une moyenne de 331,09 $\mu S.cm^{-1}$ et un écart-type de 463,840 $\mu S.cm^{-1}$ respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche.

- Paramètres chimiques

Parmi les cations majeurs le sodium est prédominant dans la plupart des ouvrages avec 48,3 %, ensuite vient le calcium avec 33,64 %, puis le potassium avec 9,93 % et en fin le magnésium avec 8,13 % pendant la saison pluvieuse. Cette prédominance n'est pas la même en saison sèche, car le Ca^{2+} occupe la première position avec 52,79 %, ensuite vient le K^+ avec 16,58 %, puis le Na^+ avec 16,51 % et en fin le Mg^{2+} avec 14,12 %. Le magnésium reste le cation le moins abondant dans la plupart des ouvrages. Les ions calciums oscillent entre 3,2 et 89,6 $mg.L^{-1}$, avec une moyenne de 21,316 $mg.L^{-1}$ et un écart-type de 17,626 $mg.L^{-1}$ et entre 3,2 et 131,2

mg.L⁻¹, avec une moyenne de 26,693 mg.L⁻¹ et un écart type de 25,619 mg.L⁻¹ respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. Les ions magnésiums varient entre 0 (Gogo) et 12,64 mg.L⁻¹ (Zangon Awakoss), avec une moyenne de 4,260 mg.L⁻¹ et un écart-type de 2,778 mg.L⁻¹ pendant la saison pluvieuse. Mais, pendant la saison sèche, ils varient de 0,972 à 62,208 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 6,917 mg.L⁻¹ et un écart-type de 10,998 mg.L⁻¹. Les ions Na⁺ varient de 4,38 à 92,3 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 31,474 mg.L⁻¹ et un écart-type de 24,859 mg.L⁻¹ pendant la saison pluvieuse. Mais pendant la saison sèche, ils varient entre 0 et 156,78 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 12,103 mg.L⁻¹ et un écart-type de 30,093 mg.L⁻¹. Les maxima de ces ions sont relevés dans les ouvrages : Gamdou (92,3 mg.L⁻¹ en saison pluvieuse) et Gamdou douane (156,78 mg.L⁻¹ en saison sèche). Les ions potassiums pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche) varient respectivement de 0,75 à 45 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 7,587 mg.L⁻¹ et un écart-type de 11,524 mg.L⁻¹ et entre 0 à 58,75 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 7,73 mg.L⁻¹ et un écart-type de 11,185 mg.L⁻¹. Le fer total (Fe²⁺, Fe³⁺), est aussi présent dans les eaux de l'aquifère de la Korama avec des teneurs qui varient de 0,01 mg.L⁻¹ à 5,92 mg.L⁻¹ pendant la saison des pluies et de 0 à 5,95 mg.L⁻¹ pendant la saison sèche. Cette teneur en fer total (Fe²⁺, Fe³⁺) varie d'un forage à un autre et des fortes teneurs qui dépassent la valeur guide de l'OMS (0,3 mg.L⁻¹) ont été enregistrées à Kounkourey, Malan ganari, Malawa, Bourtouli et Yari pendant la saison des pluies et les ouvrages de Kounkourey, Malan ganari, Zongon Awakoss, Kandawa Oukou, Rouwan Chabara, Korama pendant la saison sèche. Parmi les anions majeurs, l'hydrogénocarbonate est le plus abondant avec 43,9 %, ensuite vient le chlorure avec 26,41 %, puis le nitrate avec 19,03 % et enfin le sulfate avec 10,66 % pendant la saison pluvieuse. Cette prédominance est bouleversée pendant la saison sèche, le HCO₃⁻ garde sa position avec 43,6 %, le NO₃⁻ prend la deuxième place avec 25,35 %, ensuite, le Cl⁻ occupe la troisième position avec 18,11 % et le SO₄²⁻ vient en dernière position avec 12,94 %.

Les ions HCO₃⁻ varient entre 14,640 et 185,44 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 65,175 mg.L⁻¹ et un écart-type de 48,528 mg.L⁻¹ pendant la saison des pluies, puis entre 4 et 404 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 54,367 mg.L⁻¹ et un écart-type de 75,933 mg.L⁻¹ pendant la saison sèche. Les concentrations maximales sont enregistrées dans les ouvrages de Wainaram (185,44 mg.L⁻¹ en saison pluvieuse) et de Gamdou douane (404 mg.L⁻¹ en saison sèche). Les ions chlorures varient respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche de 7,1 à 127,8 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 39,17 mg.L⁻¹ et un écart-type de 29,384 mg.L⁻¹ et entre 5,68 et 177,5 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 21,063 mg.L⁻¹ et un écart-type de 32,148 mg.L⁻¹. Les ions sulfates oscillent entre 0 et 62, mg.L⁻¹, avec une moyenne de 18,065 mg.L⁻¹ et un écart-type de 18,779 mg.L⁻¹ pendant la saison pluvieuse. Mais pendant la saison sèche, ils oscillent entre 0 et 170 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 23,333 mg.L⁻¹ et un écart-type de 38,182 mg.L⁻¹. Ces eaux analysées pendant les deux saisons présentent des ions nitrates qui varient de 2,2 à 127,6 mg.L⁻¹, avec une moyenne de 30,317 mg.L⁻¹ et un écart-type de 31,267 mg.L⁻¹ pendant la saison pluvieuse et entre 1,320 et 94,16 mg.L⁻¹, avec 27,247 mg.L⁻¹ comme moyenne et 28,752 mg.L⁻¹ comme écart-type pendant la saison sèche. Les concentrations maximales enregistrées pendant les deux saisons proviennent de l'ouvrage de Jeka da bouta (127,6 mg.L⁻¹ et 94,16 mg.L⁻¹ respectivement en saison pluvieuse et saison sèche). Mais les teneurs en NO₃⁻ enregistrées dans certains forages (Gamdou, Zangon Awakoss, Menaho, Wainaram, Kandawa Oukou, Jeka da bouta et Rouwan chabara) dépassent la valeur guide préconisée par l'OMS qui est de 50 mg.L⁻¹. Les ions F⁻ et NO₂⁻ sont aussi présents dans les eaux de l'aquifère de la Korama avec des concentrations qui varient respectivement de 0 mg.L⁻¹ à 1,05 mg.L⁻¹ et de 0,02 mg.L⁻¹ à 1,43 mg.L⁻¹ pendant la saison des pluies et de 0 à 1,06 mg.L⁻¹ et de 0 à 0,393 mg.L⁻¹ pendant la saison sèche.

Tableau 1 : Résultats de la caractérisation physico-chimique des échantillons d'eau prélevés en Août 2016 en mg.L⁻¹ sauf (CE, pH et T)

Ouvrages	Nom	T	pH	CE (µS.cm ⁻¹)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fer total	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻
Fototo	PC ₁	29,6	7,05	327	38,4	2,92	21,57	5,05	0,01	58,56	42,6	20	40,04	0,0594	0
Gamdou	PC ₂	30,4	6,56	655	46,4	6,81	92,3	30,1	0,02	180,56	85,2	52	75,24	0,2112	0,04
Zangon Awakoss	PC ₃	29,5	6,8	523	48	12,64	16,2	5	0,1	19,56	53,96	36	103,84	0,7029	0,48
Bourkou	PT ₁	30,2	6,58	205	16	6,81	25,06	5,75	0,07	58,56	34,08	1	40,48	0,0792	0,16
Gogo	PC ₄	28,3	6,54	168,6	14,4	0	31,5	3,75	0,14	73,2	26,98	9	2,2	0,0297	0
Menaho	PC ₅	28,1	9,59	330	33,6	1,95	6,74	30	0,02	48,8	25,56	16	64,68	1,4322	0,22
Gamdou douane	FM ₁	30	7,42	549	38,4	6,81	47,29	27,5	0,4	180,56	42,6	24	35,64	0,0594	0,25
Malan ganari	FM ₂	30,5	6,62	442	32	2,92	4,38	2,25	0,81	24,4	21,3	49	3,96	0,0561	0,57
Wainaram	FM ₃	31	6,5	295	30,4	7,78	66,74	5,5	0,16	185,44	31,24	13	62,48	0,297	0
Yarda	FM ₄	30,9	6,2	208	12,8	4,86	20,41	1,25	0,06	19,56	29,82	12	33,88	0,0627	0
Kandawa Oukou	FM ₅	30,8	6,65	381	24	2,92	15,52	30,01	0,03	19,56	39,76	21	62,04	0,0297	0,86
Mai Gaiba	FM ₆	30,4	6,95	159,5	17,6	3,89	5,98	1,5	0,13	48,8	18,46	4	5,72	0,0396	0,91
Dungas	FA ₁	30	6,75	65,1	6,4	0,98	36,68	1	0,01	82,96	19,88	0	6,16	0,0297	0,7
Malawa	FM ₇	30,8	6,68	192,4	14,4	4,86	12,77	2	1,06	39,04	19,88	17	10,56	0,0429	0,51
Jeka da bouta	FM ₈	31,6	6,27	737	89,6	4,62	40,18	3,75	0,11	78,08	89,46	40	127,6	0,2211	1,05
Dosso	FM ₉	31,7	6,4	260	19,2	3,89	28,41	2	0,14	34,16	29,98	41	18,92	0,0297	1,03
Bourtouli	FM ₁₀	31,3	6,63	218	17,6	5,84	14,13	1,5	0,48	53,68	28,4	8	10,12	0,0693	0,94
Dogo dogo	FM ₁₁	31,3	6,7	93,5	12,8	2,92	15,23	1,25	0,01	53,68	21,3	0	5,72	0,0231	0,21
Guéri	PC ₆	30,6	6,96	172,6	20,8	0,98	11,56	2	0,09	78,08	7,1	0	11,88	0,6963	0,69
Mai kilia	FM ₁₂	29,5	5,8	55,2	8	1,95	78,54	0,75	0,02	14,64	127,8	0	9,24	0,0264	0
Angoual manda	FM ₁₃	30,5	6,04	42,9	3,2	1,95	18,98	1	0,05	29,28	22,72	0	3,08	0,0264	0,52
Rouwan chabara	FM ₁₄	31,4	6,79	437	22,4	6,81	33,82	45	0,18	73,2	56,8	30	54,12	0,6039	0,9
Gada koutika	PC ₇	29,9	6,7	440	19,2	7,78	69,24	5	0,15	151,28	36,92	56	3,08	0,0297	0,44
Korama	FM ₁₅	31,4	6,6	161	19,2	2,92	11,17	4,75	0,3	34,16	25,56	2	29,92	0,033	0,33
Kounkourey	FM ₁₆	30,4	6,8	195	8	2,92	32,93	1,5	5,92	78,08	22,72	6	3,96	0,2013	0
Katohou	FA ₂	30,9	5,6	74,5	6,4	3,89	7,1	1,25	0,02	14,64	11,36	0	25,96	0,0231	0
Guidiguir	PC ₈	30,1	8,28	208	17,6	8,75	7,25	2	0,03	39,04	18,46	12	34,32	0,033	0
Gouna	FA ₃	32,3	6,54	100,7	4,8	3,89	24,11	1,25	0,02	53,68	14,2	5	15,84	0,033	0,68
Guidimouni	FA ₄	35,5	7,52	82,3	8	3,89	43,4	1,5	0,03	24,4	71	2	12,32	0,0363	0,51
Bakadoubou	PC ₉	29,6	6,4	137,2	12,8	0	47,3	4	0,04	92,72	25,56	22	6,16	0,0297	0,06
Yari	PC ₁₀	29,7	7,05	428	36,8	2,92	89,2	6,05	0,49	78,08	113,6	62	20,68	0,0198	1,03

Tableau 2 : Résultats de la caractérisation physico-chimique des échantillons d'eau prélevés en Février 2017 en mg.L⁻¹ sauf (CE, pH et T)

Ouvrages	Nom	pH	T°C	CE (µS/cm)	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fer total	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻
Fotoro	PC ₁	6,98	26,5	336	44,8	2,916	0	9,5	0,04	48	15,62	19	36,08	0,0825	0
Gamdou	PC ₂	6,87	26,6	2560	131,2	62,208	0	0	0,01	22	177,5	170	79,2	0,1881	0,17
Zangon Awakoss	PC ₃	6,99	26,7	403	44	1,458	7,79	6,25	1,3	43	28,4	24	53,68	0,0396	0
Bourkou	PT ₁	6,57	30,1	612	20,8	8,748	0	25,5	0,05	52	11,36	0	36,08	0,0924	0
Gogo	PC ₄	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Menaho	PC ₅	7,33	24,1	865	32	10,692	0	22,5	0,01	26	17,04	15	77,44	0,2541	0
Gamdou douane	FM ₁	7,79	31	110	40	9,72	156,78	4,75	0,17	404	12,78	135	14,08	0,0165	0
Malan ganari	FM ₂	6,58	31	448	40	2,916	38,9	4,5	0,38	170	8,52	50	5,72	0,0363	0
Wainaram	FM ₃	6,92	30,6	301	32	4,86	0	11,75	0,19	19	22,72	10	56,76	0,0231	0
Yarda	FM ₄	6,39	29,8	235	22,4	6,804	0	2,75	0,09	9	17,04	11	33	0,0594	0
Kandawa Oukou	FM ₅	7,02	30,5	251	24	12,636	0	58,75	0,44	39	29,82	22	70,4	0,0231	0
Mai Gaiba	FM ₆	7	30,5	160,4	16	4,86	0	2,8	0,23	56	5,68	5	4,84	0,0297	0,19
Dungas	FA ₁	6,95	30,3	67,1	6,4	1,944	2,3	1,6	0,02	23	7,1	0	3,52	0,0231	0,01
Malawa	FM ₇	6,72	30,2	213	16	0,972	13,7	2,7	0	39	12,78	24	5,28	0,0561	0,13
Jeka da bouta	FM ₈	6,54	29,1	628	83,2	11,664	0	4,9	0,13	18	69,58	32	94,16	0,1386	0
Dosso	FM ₉	6,57	30,3	261	16	1,944	15,66	3,75	0,22	28	17,04	33	9,68	0,0462	0,49
Bourtouli	FM ₁₀	6,76	30,1	109,9	14,4	1,944	13,24	3,5	0,24	61	11,36	6	8,36	0,2145	0,23
Dogo dogo	FM ₁₁	6,73	31,7	92,7	12,8	0,972	2,58	2,2	0,02	41	7,1	0	2,2	0,066	0,13
Guéri	PC ₆	6,95	31,8	151,1	14,4	9,72	0	3,7	0,17	55	5,68	1	5,28	0,0693	0,2
Mai kilia	FM ₁₂	5,9	27,4	42,5	3,2	3,888	0	3,7	0,02	5	7,1	0	6,16	0	0
Angoual manda	FM ₁₃	6,31	30,1	45,5	6,4	5,832	0	3,4	0,24	8	7,1	1	2,2	0,0462	0
Rouwan chabara	FM ₁₄	6,91	31,1	395	40	7,776	0	11,2	0,33	10	36,92	14	83,5	0,132	1,06
Gada koutika	PC ₇	6,61	28,8	370	20,8	1,944	44,45	9	0,09	123	14,2	48	2,64	0,0066	0,78
Korama	FM ₁₅	6,62	30,7	155,3	14,4	3,888	0	9,4	0,37	34	14,2	0	14,96	0,0066	0,54
Kounkourey	FM ₁₆	6,54	29,9	177,7	8	2,916	25,95	3,3	5,95	91	8,52	7	1,32	0,0033	0
Katohou	FA ₂	5,54	30,8	79,5	11,2	0,972	0	1,6	0,02	4	7,1	3	20,68	0,0033	0
Guidiguir	PC ₈	6,9	27,1	117	28,8	1,944	0	4	0,01	17	14,2	12	36,52	0,0396	0
Gouna	FA ₃	6,93	30,1	120,5	12,8	3,888	7,42	2,2	0,01	47	7,1	2	22	0,0066	0,24
Guidimouni	FA ₄	6,08	32	74,2	9,6	3,888	0	3,8	0,01	4	7,1	2	14,52	0,0528	0,13
Bakadoubou	PC ₉	6,57	29,9	156,3	17,6	8,748	0	4,4	0,08	31	17,04	17	11,44	0,3927	0
Yari	PC ₁₀	7,25	30,8	395	17,6	4,86	34,33	4,5	0,01	104	14,2	37	5,72	0,0099	0,39

Les résultats des analyses physico-chimiques par le logiciel XLSTAT 2016 pour la statistique descriptive dans le but de déterminer les valeurs extrêmes, les moyennes et les écart-type ainsi que les valeurs guide de l'OMS sont présentés dans le (*Tableau 3*) et le (*Tableau 4*).

Tableau 3 : Valeurs extrêmes, variables statistiques et les valeurs guide de l'OMS (Août 2016)

Paramètres physico-chimiques	Unité de mesure	Valeurs Guide OMS	Nombre d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
T°	°C	-	31	28,100	35,500	30,587	1,295
pH		6,5 - 8,5	31	5,600	9,590	6,773	0,719
CE	µS.cm ⁻¹	180-1000	31	42,900	737,000	269,145	182,583
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	-	31	3,2	89,600	21,316	17,626
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	-	31	0,000	12,640	4,260	2,778
Na ⁺	mg.L ⁻¹	200	31	4,380	92,300	31,474	24,859
K ⁺	mg.L ⁻¹	12	31	0,750	45,000	7,587	11,524
Fe ²⁺ , Fe ³⁺	mg.L ⁻¹	0,3	31	0,010	5,920	0,358	1,061
HCO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	-	31	14,640	185,440	65,175	48,528
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	250	31	7,100	127,800	39,170	29,384
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	250	31	0,000	62,000	18,065	18,779
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	50	31	2,200	127,600	30,317	31,267
NO ₂ ⁻	mg.L ⁻¹	3	31	0,020	1,432	0,170	0,304
F ⁻	mg.L ⁻¹	1,5	31	0,000	1,050	0,422	0,375

Tableau 4 : Valeurs extrêmes, variables statistiques et les valeurs guides de l'OMS (Février 2017)

Paramètres Physico-chimiques	Unité de mesure	Valeurs Guide OMS	Nombre d'échantillon	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
T°	°C	-	30	24,10	32,000	29,653	1,853
pH		6,5 - 8,5	30	5,540	7,790	6,727	0,428
CE	µS.cm ⁻¹	180-1000	30	42,50	2560,000	331,090	463,84
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹	-	30	3,200	131,200	26,693	25,619
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹	-	30	0,972	62,208	6,917	10,998
Na ⁺	mg.L ⁻¹	200	30	0,000	156,780	12,103	30,093
K ⁺	mg.L ⁻¹	12	30	0,000	58,750	7,730	11,185
Fe ²⁺ , Fe ³⁺	mg.L ⁻¹	0,3	30	0,000	5,950	0,362	1,085
HCO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	-	30	4,000	404,000	54,367	75,933
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	250	30	5,680	177,500	21,063	32,148
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	250	30	0,000	170,000	23,333	38,182
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	50	30	1,320	94,160	27,247	28,752
NO ₂ ⁻	mg.L ⁻¹	3	30	0,000	0,393	0,072	0,089
F ⁻	mg.L ⁻¹	1,5	30	0,000	1,060	0,156	0,259

Du point de vue hydrochimique, quatre faciès caractérisent les eaux étudiées pendant la saison des pluies et trois faciès pendant la saison sèche : chloruré calcique et magnésien (45,16 % en saison pluvieuse et 63,33 % en saison sèche), bicarbonaté sodique et potassique (25,81 % en saison pluvieuse et 13,33 % en saison sèche), chloruré sodique et potassique (19,35 % uniquement en saison pluvieuse) et bicarbonaté calcique et magnésien (9,68 % en saison pluvieuse et 23,33 % en saison sèche). Ces différents faciès sont représentés à la *Figure 2* et à la *Figure 3* respectivement pour la saison pluvieuse et la saison sèche. Il ressort de la *Figure 2* (triangle cationique) que 22,58 % des eaux se concentrent dans le pôle calcique, 54,84 % dans le pôle sodi-potassique et 22,58 % dans la zone où aucun cation ne domine. De même dans le triangle des

anions, 35,48 % des eaux se concentrent dans le pôle bicarbonaté, 48,39 % dans le pôle chloruré-nitraté et 16,13 dans la zone où aucun anion ne domine. Il ressort de la **Figures 3**(triangle cationique) que 56,67 % des eaux se concentrent dans le pôle calcique, 13,33 % dans le pôle sodi-potassique, 23,33 % dans la zone où aucun cation ne domine et 6,67 % dans le pôle magnésien. De même dans le triangle des anions, 36,67 % des eaux se concentrent dans le pôle bicarbonaté, 50 % dans le pôle chloruré-nitraté et 13,33 % dans la zone où aucun anion ne domine. La répartition spatiale de ces faciès chimiques dépend des conditions de recharge de la nappe et de sa lithologie.

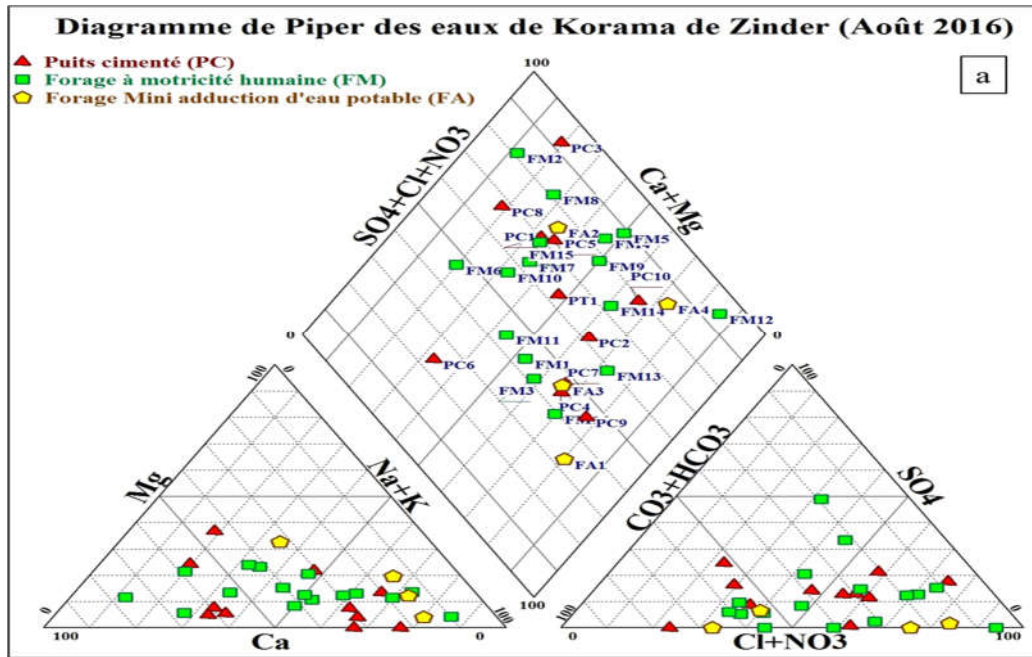


Figure 2 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de l'aquifère de la Korama de Zinder (Août 2016)

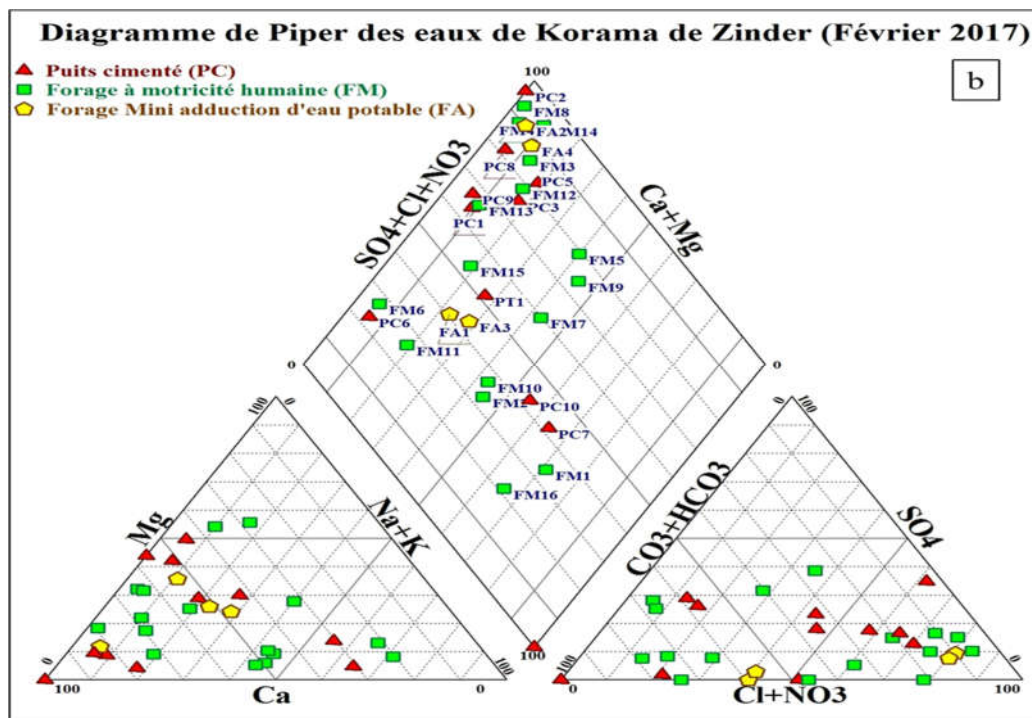


Figure 3 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de l'aquifère de la Korama de Zinder (Février 2017)

4. Discussion

4-1. Paramètres physiques

Les températures moyennes (30,59 °C et 29,65 °C respectivement pour la saison pluvieuse et pour la saison sèche) enregistrées dans les eaux de notre zone d'étude reflètent approximativement les températures ambiantes de la région pendant les deux saisons (32 °C et 27 °C en moyenne respectivement saison des pluies et saison sèche). Ces résultats sont presque similaires avec ceux obtenus par [1] en 2013. Il semble qu'aucune anomalie géothermique n'a été relevée et que les eaux ne semblent pas provenir de grandes profondeurs. Les températures enregistrées pendant la saison sèche sont majoritairement inférieures à celles de la saison pluvieuse et descendent dans certains ouvrages jusqu'à 24,1 °C. Cela pourrait se justifier par le fait que la saison sèche correspond souvent à la période froide où la température ambiante descend jusqu'à 27 °C, ce qui pourrait avoir une influence sur les températures des eaux souterraines notamment celles de puits cimentés. Ou bien, compte tenu des caractères superficiel et sableux de l'aquifère et de sa position géographique dans la zone d'hétérothermie, les températures atmosphériques pourraient avoir une influence sur les températures des eaux souterraines de cette zone. En outre, les températures élevées enregistrées pourraient favoriser le développement des micro-organismes dans les tuyauteries favorisant aussi le changement des goûts et odeurs des eaux souterraines [7].

Les eaux analysées pendant les deux saisons présentent dans l'ensemble des pH qui respectent les valeurs guide de l'OMS (74,2 % des ouvrages pendant la saison pluvieuse et 83,33 % pendant la saison sèche) à l'exception des certains ouvrages qui présentent des pH acides inférieurs à la valeur limite minimale de l'OMS (22,55% en saison pluvieuse et 16,67 % en saison sèche) et un seul ouvrage qui présente un pH basique uniquement en saison pluvieuse (3,22 %). Le pH acide pourrait être dû à la décomposition des matières organiques végétales dans le sol qui sous l'action d'oxygène dégage le dioxyde de carbone. Ce dernier peut se dissoudre dans l'eau pour former l'acide carbonique [13]. Le pH acide enregistré dans certains ouvrages pourrait donner à l'eau un aspect agressif tout en provoquant des troubles gastriques chez les consommateurs [14]. Cette légère acidité enregistrée dans ces ouvrages pourrait être expliquée d'une part, par le fait que ces ouvrages captent majoritairement les grès du Mallawa (Korama profonde) et minoritairement les sables récents (Korama superficielle) qui sont en contact avec d'autres formations géologiques (Continental Hamadien, Complexe Terminal) dont les eaux pourraient être plus acides. C'est donc à travers des échanges souterrains que ces eaux auraient acquis une légère acidité. Et d'autre part, les faibles valeurs en hydrogénocarbonate et en fer total qui ont été enregistrées dans ces ouvrages pourraient être dues à la réaction chimique consommatrice des ions hydrogénocarbonates (HCO_3^-) par les ions Fe^{2+} libérés par l'oxyde de fer en milieu aqueux pour former les FeCO_3 et H^+ .

Donc la libération des ions H^+ entrainera la diminution du pH. Les pH légèrement neutres enregistrés dans plus de 74,2 % et 83,67 % des ouvrages respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche sont similaires à ceux obtenus par [1] en 2013. Cela pourrait s'expliquer par la nature de l'aquifère qui peut être profond dans certaines localités, d'où l'hydrolyse des silicates va consommer les ions H^+ et augmenter en même temps le pH. Les plus faibles valeurs ont été enregistrées pendant les deux saisons à Mai kilia (5,8 et 5,9) et Katohou (5,6 et 5,54). Les eaux analysées présentent des conductivités électriques très hétérogènes dont 61,29 % en saison pluvieuse et 46,67 % en saison sèche sont dans la gamme des valeurs guides de l'OMS (180 – 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Les ouvrages restants présentent des faibles conductivités électriques qui sont inférieures à la valeur limite minimale de l'OMS dont 38,71 % en saison pluvieuse et 50 % en saison sèche. Une forte conductivité électrique dépassant la valeur limite maximale de l'OMS (1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) a été relevée dans le puits cimenté de Gamdou en saison sèche. Les faibles conductivités enregistrées dans ces ouvrages montrent une faible minéralisation des eaux de cet aquifère. Cela pourrait être dû aux caractères sableux de l'aquifère parce que la conductivité résulte des formations traversées par l'eau dans le bassin hydrogéologique et de son temps de séjour dans le réservoir, donc la dissolution ou l'hydrolyse des minéraux renferment les éléments majeurs sont minoritaires.

4-2. Paramètres chimiques

Les teneurs en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , F^- enregistrées pendant les deux saisons sont inférieures aux valeurs guides de l'OMS pour une eau de consommation à l'exception du K^+ qui est présent dans deux puits (Gamdou et Menaho) et deux forages (Gamdou douane et Kandawa Oukou) pendant la saison des pluies et dans le puits traditionnel de Bourkou et le forage de Kandawa Oukou pendant la saison sèche à des teneurs dépassant largement la valeur guide de l'OMS (12 mg.L^{-1}). Ces fortes teneurs pourraient être dues aux lessivages par l'eau de pluies des engrais azotés riches en potassium qui peuvent rejoindre aisément la nappe à cause du caractère sableux et superficiel de l'aquifère exploité. Les eaux analysées présentent des teneurs en nitrates légèrement élevées mais qui sont dans certains cas inférieures à la valeur guide préconisée par l'OMS et dans d'autres cas dépassant largement la valeur guide, dont plus de 22,58 % des ouvrages pendant les deux saisons. Les fortes teneurs en nitrate enregistrées dans les puits (Gamdou, Zangon Awakoss et Menaho) et les forages (Wainaram, Kandawa Oukou, Jeka da bouta, Rouwan chabara) pendant les deux saisons pourraient préférentiellement avoir d'une part une origine anthropique suite à la décomposition des matières fécales d'origine animales et/ou humaines et d'autre part issues des cultures de contre saison dans les jardins par utilisation intensive des engrais chimiques azotés. Mais, selon les travaux de [15], les ions nitrates présentent plusieurs origines parmi lesquelles : les roches, les apports météoriques, engrais, la décomposition de la végétation dans les sols et les polluants domestiques.

Cependant, dans notre zone d'étude, les fortes teneurs en nitrates des puits de Gamdou, Menaho et Zangon Awakoss pourraient être dues aux matières fécales animales, parce que les puits de Menaho et de Zangon Awakoss se trouvent au bord du village où l'insalubrité est très remarquable. Le puits de Gamdou se trouve au milieu des habitations où l'insalubrité est aussi très marquante. Mais pour les forages de Wainaram, Kandawa Oukou, Jeka da bouta et Rouwan chabara, les teneurs en nitrates pourraient se justifier par le fait que ces forages sont implantés au milieu des agglomérations qui sont proches des champs de culture et de culture maraichères. Ces ions pourraient donc provenir des engrais chimiques ou des fumiers utilisés [16]. Pendant la saison sèche ces teneurs en nitrates diminuent dans certains ouvrages. Cela pourrait être dû à l'absence d'infiltration des eaux des pluies qui sont susceptibles de charruer et de décomposer les matières organiques animales qui sont à l'origine de l'augmentation des teneurs en nitrates. Ces fortes teneurs en nitrates pourraient être probablement d'origine anthropique (déjections animales et humaines, les dépotoirs, les engrais chimiques, etc.) comme l'ont montré [1, 17]. Des nombreux auteurs qui ont étudié l'hydrochimie des eaux souterraines ont montré que les nitrates ont une origine anthropique [18 - 20]. La présence des teneurs importantes en nitrate pourrait détériorer la qualité chimique de ces eaux souterraines et les rendent impropres à la consommation.

La consommation d'une eau dont les teneurs en nitrates dépassent la valeur guide de l'OMS (50 mg.L^{-1}) peut provoquer des problèmes sanitaires chez les consommateurs [21] notamment la méthémoglobinémie ou maladie du bébé bleu (suite à la réduction des nitrates en nitrites qui va oxyder par la suite les ions ferreux de l'hémoglobine en ions ferriques, d'où le nom de méthémoglobine qui entraîne l'incapacité de céder l'oxygène aux tissus cellulaires) ou le cancer digestif (suite à la transformation de nitrates en nitrosamines) [22]. Donc les fortes teneurs en nitrates enregistrées dans les ouvrages de Gamdou, Menaho, Zangon Awakoss, Wainaram, Kandawa Oukou, Jeka da bouta et Rouwan chabara pendant les deux saisons montrent que ces eaux présentent des risques pour la consommation. Les teneurs en fer total enregistrées pendant les deux saisons dans les forages de Kounkourey, Malan ganari, Malawa, Bourtouli, Yari, Zangon Awakos, Kandawa Oukou et Gamdou douane constituent un souci pour la population rurale environnante. En effet, une teneur élevée en fer confère à l'eau un goût métallique désagréable, une couleur rouge brune. Cela amène les populations rurales à se tourner vers les eaux de surfaces dont les qualités bactériologiques et parasitologiques les rendent aussi impropres à la consommation. Les fortes teneurs en fer pourraient être expliquées soit par une précipitation du fer de parois des canalisations à travers l'acidité de l'eau soit par un

développement de bactéries ferrugineuses qui peuvent augmenter la corrosion des forages car ces forages sont très anciens et certains sont entourés des eaux stagnantes. Il ressort des résultats du tableau II que la majeure partie des écart-types sont inférieurs aux moyennes des différents paramètres, ce qui explique une homogénéité des eaux de l'aquifère de la Korama pendant la saison des pluies. Ce qui n'est pas le cas de la saison sèche où la majorité des écart-types sont majoritairement supérieurs aux moyennes des différents paramètres ce qui montre une hétérogénéité de ces eaux. Cela pourrait être dû aux réactions chimiques (échange d'ion, oxydoréduction, adsorption, etc.) susceptibles de se produire. Le faciès chloruré calcique et magnésien est prédominant dans les eaux de la nappe Korama avec 45,16 % pendant la saison des pluies et 63,33 % pendant la saison sèche, vient ensuite le faciès bicarbonaté sodique et potassique avec 25,81 % pendant la saison des pluies et bicarbonaté calcique et magnésien avec 23,33 % pendant la saison sèche. Mais on constate un changement de faciès de ces eaux pendant les deux saisons. Sur la **Figure 2** (saison des pluies) on constate que les eaux se répartissent dans les quatre faciès alors que sur la **Figure 3** (saison sèche) elles se répartissent dans trois faciès. Donc les eaux appartenant au faciès chloruré sodique et potassique de la saison des pluies ont évolué vers le faciès chloruré calcique et magnésien de la saison sèche c'est ce qui explique l'augmentation du pourcentage du faciès chloruré calcique et magnésien de la saison sèche. Ces résultats sont en désaccord avec ceux trouvés par [1] dans la même zone d'étude et par [21, 23] en Afrique de l'ouest qui ont montré une prédominance bicarbonatée. Cela pourrait être dû à la nature géologique de roches traversées, aux saisons, au temps de séjour de l'eau dans le réservoir et aux substances réactives traversées. Ces paramètres peuvent avoir une influence sur le changement de faciès des eaux souterraines comme l'a indiqué [1] dans ses travaux en 2013. Dans cette étude on remarque l'absence des résultats physico-chimiques du puits de Gogo pendant la saison sèche, car ce puits était défectueux. Il faut aussi noter que le forage de Gamdou douane échantillonné pendant la saison pluvieuse était défectueux pendant la saison sèche et nous avons fait le prélèvement au niveau du deuxième forage situé au centre du village dont les populations doutaient de la qualité de ses eaux. Après analyse des eaux de ces forages nous avons constaté qu'elles contiennent des teneurs un peu élevées en HCO_3^- (404 mg.L^{-1}), SO_4^{2-} (135 mg.L^{-1}) et Na^+ (156,78 mg.L^{-1}) pendant la saison sèche qui dépassent celles obtenues dans les premiers forages (HCO_3^- (180,56 mg.L^{-1}), SO_4^{2-} (24 mg.L^{-1}) et Na^+ (47,29 mg.L^{-1})) pendant la saison des pluies.

5. Conclusion

L'étude comparative entre la qualité physico-chimique des eaux souterraines de l'aquifère de la Korama de la région de Zinder pendant la saison pluvieuse et celle de la saison sèche a montré que la majorité des eaux analysées du point de vue physico-chimique respectent les valeurs guides de l'OMS pour une eau de consommation pour les deux saisons (pluvieuse et sèche). Mais, il faut noter que les pH légèrement acides et les fortes teneurs en nitrates enregistrés pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche) ne respectent pas les valeurs guides de l'OMS et rendent ces eaux impropres à la consommation. De même que les teneurs en fer enregistrées à Kounkourey (5,92 et 5,95 mg.L^{-1}) ne respectent pas la norme de potabilité. Ces ouvrages doivent donc faire l'objet d'un traitement avant consommation. Les eaux de l'aquifère de la Korama sont classées en majorité chlorurées calciques et magnésiennes pendant les deux saisons. Mais le problème récurrent rencontré dans certains puits et forages est les taux élevés de nitrates dans 22,58 % des ouvrages et de fer aussi dans 23,33 % des ouvrages dont les valeurs dépassent respectivement 50 mg.L^{-1} et 0,3 mg.L^{-1} pour les deux saisons. Les teneurs en NO_3^- sont plus élevées pendant la saison des pluies que pendant la saison sèche. La présence des nitrates en quantité importante montre une infiltration des eaux de précipitation et la vulnérabilité de la nappe à la pollution. Les fortes teneurs en nitrate peuvent provoquer des maladies telles que la méthémoglobinémie ou le cancer digestif. Il est donc important de proposer des solutions pour ramener ces teneurs aux normes internationales des eaux de consommation. L'objectif des prochains travaux est de proposer un traitement de ces eaux avant leur consommation avec des matériaux locaux et peu onéreux.

Références

- [1] - S. ISSOUFOU, “Etudes hydrodynamique, hydrochimique et isotopique des eaux souterraines du bassin versant de la Korama / Sud Zinder, Niger : impacts de la variabilité climatique et des activités anthropiques”. Thèse de doctorat, Université Abdou Moumouni, Niamey, (2013) 211 p.
- [2] - H. CHEKROUD, “Etude de la pollution des eaux de la plaine de Telezza due aux activités agricoles et commerciales”. Mémoire de Magister, Université du 20 Août 1955-Skikda, (2007) 56 p.
- [3] - C. FEHDI, B. ABDERRAHMANE, R. ABDELKADER et S. ELIAS, *Afrique Science*, 05 (2) (2009) 217 - 231
- [4] - H. AMADOU, M. S. LAOUALI et A. S. MANZOLA, *Journal of Applied Bioscience*, 80 (2014) 7161 - 7172
- [5] - O. CADILHAC, Atlas des ressources hydrauliques du département de Zinder, Arrondissement de Mirriah, Magaria et Matamèye. Rapport. Direction départementale de l'hydraulique de Zinder, (1990 - 1991) 6 p.
- [6] - P. JESSEN, Analyse des conditions hydrogéologiques en vue d'un programme d'hydraulique rurale dans le département de Zinder. Rapport. Direction départementale d'hydraulique de Zinder, (1992) 6 p.
- [7] - J. RODIER, B. LEGUBE et N. MERLET, “*L'analyse de l'eau (9^e édition)*”, Ed. Dunod, Paris, (2009)
- [8] - M-S. OGA, T. LASM, T. K. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, D. KOUASSI et F. GNAMBA, *European Journal of Scientific Research*, Vol. 31, N°1 (2009) 72 - 87
- [9] - K. ABID, “Identification et caractérisation hydrogéologique et géochimique de la nappe du Turonien dans le Sud Tunisien et sa relation avec les aquifères adjacents”. Thèse de doctorat, Université de Sfax, (2010) 196 p.
- [10] - T. LASM, O. E. LASME, M. S. Y. OGA, M. YOUANTA, D. BAKA, F. KOUAME et T. K. YAO, *Int. J. Biol. Chem. Sci*, Vol. 5, N°2 (2011) 642 - 662
- [11] - H. AMADOU, M. S. LAOUALI et A. S. MANZOLA, *Int. J. Biol. Chem. Sci*, Vol. 8, N°4 (2014) 1904 - 1916
- [12] - S. ISSA, A. ALASSANE, Z. ADAMOU, I. NATATOU, M. BOUKAKARI, D. SOHOUNHLOUE et D. MAMA, *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, Vol. 3, N°4 (2015) 09 - 16
- [13] - L. MATINI, J. M. MOUTOU et M. S. KONGO-MANTON, *Afrique Science*, 05 (1) (2009) 82 - 98
- [14] - O.M.S., *Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed)*, Geneva, (2011)
- [15] - J. P. FAILLAT, and C. DROGUE, *Hydrological Sciences Journal*, 38 (3) (1993) 215 - 229
- [16] - M. A. KOUASSI, A. K. YAO, E. K. AHOUSI, C. L. SEKI, A. N. YAO, I. K. KOUASSI and J. BIEMI, *Int. J. Biol. Chem. Sci*, 4 (5) (2010) 1816 - 1838
- [17] - P. GIRARD, “Techniques isotopiques (15N, 18O) appliquées à l'étude des nappes des altérites et du socle fracturé de l'Ouest Africain. Etude de cas: L'Ouest du Niger”, Thèse de Doctorat, Université du Québec à Montréal et Université du Québec à Chicoutimi, (1993) 154 p.
- [18] - A. HAOUA, L. M. SANI and M. ABDOU SALAM, *Larhyss Journal*, N° 20 (2014) 25 - 14
- [19] - J. E. ASSLOUJ, S. KHOLTEI, N. E. AMRANI-PAAZA and A. HILALI, *Journal of water Science*, Vol. 20, N°3 (2007) 309 - 321
- [20] - N. E. HAMMOUMI, M. SINAN, B. LEKHLIF and L. E. MAHJOUR, *Afrique Science*, 08 (1) (2012) 54 - 66
- [21] - T. Y. YAO, M. S. OGA, O. FOUCHE, D. BAKA, C. PERNELLE and J. BIEMI, *Int. J. Chem. Sci*, Vol. 6, N°6 (2012) 7069 - 7086
- [22] - M. O. RATEL, “Elimination des nitrates des eaux potables, Document Technique” FNDAE Hors-Série N°4. Direction de l'Espace Rural et de la Forêt
- [23] - A. K. NJUEYA, J. D. H. LIKENG and A. NONO, *Int. J. Biol. Chem. Sci*, Vol. 6, N°4 (2012) 1874 - 1894