

Caractérisation Physico-Chimique Des Eaux Souterraines Du Socle De La Région De Zinder (Niger) Pendant La Saison Des Pluies Et La Saison Sèche

Souley Moussa Rabilou

Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques,
Département de Chimie, Laboratoire des Matériaux,
Eaux et Environnement, Niamey, Niger

Malam Alma Maman Mousbahou

Mahaman Sani Laouali

Natatou Ibrahim

Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques,
Département de Chimie, Laboratoire des Matériaux,
Eaux et Environnement, Niamey, Niger

Issa Habou

Direction Régionale de l'Hydraulique et de l'Assainissement de Zinder
(DRHA/Z), Laboratoire d'analyse des eaux de la direction régionale de
l'hydraulique et de l'assainissement de Zinder, Zinder, Niger

Doi: 10.19044/esj.2018.v14n27p317 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n27p317](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2018.v14n27p317)

Abstract

Agriculture and livestock are the main socio-economic activities of the population of the Zinder region (Niger). However, these activities have negative impacts on groundwater quality, which is the main source of water supply for this population. In this work, the physicochemical quality of the waters of the Socle of the Zinder region was studied during the rainy and dry seasons. Twenty-four samples were the subject of a physico-chemical analysis. The data obtained were processed by the hydrochemical method by the Diagram software and the principal component analysis by the XLSTAT software. Of the waters analyzed, 83% have normal pH values (6.5 - 8.5) and 17% acid pH <6.5 during both seasons. The nitrate levels of Yekoua (62.04 and 63.36 mg.L⁻¹), Dan Ladi (123.64 and 146.96 mg.L⁻¹), Bourbourwa (64.65 and 80.08 mg.L⁻¹) and Kazoé (130.68 and 124.52 mg.L⁻¹) and fluoride of Kazoé (1.5 mg.L⁻¹), Midik (1.6 mg.L⁻¹) and Bourbourwa (2.98 mg.L⁻¹) during both seasons are abnormal. Four facies characterize the analyzed waters, with a predominance of bicarbonated calci-magnesian

(42%) during the rainy season, calci-magnesian bicarbonate (41.7%) and calci-magnesium chloride (41.7%) during the dry season. The residence time by hydrolysis and alteration of silicate rocks and the pluviolessivage of soils are the main mechanisms that govern the mineralization of these waters. These grades, call for remediation treatments. Clays could be promoters for this treatment because they are very available and less expensive.

Keywords: Physicochemical, underground water, Nitrate, Socle, Zinder

Résumé

L'agriculture et l'élevage constituent les principales activités socio-économiques de la population de la région de Zinder (Niger). Toutefois, ces activités présentent des impacts négatifs sur la qualité des eaux souterraines constituant les principales sources d'approvisionnement en eau de cette population. Dans ce travail, la qualité physico-chimique des eaux du Socle de la région de Zinder a été étudiée pendant les saisons pluvieuse et sèche. Vingt-et-quatre échantillons ont fait l'objet d'une analyse physico-chimique. Les données obtenues ont été traitées par la méthode hydrochimique par le logiciel Diagramme et par l'analyse en composantes principales par le logiciel XLSTAT. Parmi les eaux analysées, 83 % présentent des pH normaux compris (6,5 – 8,5) et 17 % des pH acides < 6,5 pendant les deux saisons. Les teneurs en nitrates de Yékoua (62,04 et 63,36 mg.L⁻¹), Dan Ladi (123,64 et 146,96 mg.L⁻¹), Bourbourwa (64,65 et 80,08 mg.L⁻¹) et Kazoé (130,68 et 124,52 mg.L⁻¹) et en fluorures de Kazoé (1,5 mg.L⁻¹), Midik (1,6 mg.L⁻¹) et Bourbourwa (2,98 mg.L⁻¹) pendant les deux saisons sont anormales. Quatre faciès caractérisent les eaux analysées, avec une prédominance bicarbonaté calci-magnésien (42 %) pendant la saison pluvieuse, bicarbonaté calci-magnésien (41,7 %) et chloruré calci-magnésien (41,7 %) pendant la saison sèche. Le temps de séjour par hydrolyse et altération des roches silicatées et le pluviolessivage des sols sont les principaux mécanismes qui gouvernent la minéralisation de ces eaux. Ces teneurs, font appel à des traitements de dépollution. Les argiles pourraient constituer des matériaux promoteurs pour ce traitement car très disponibles et moins onéreux.

Mots-clés: Physico-chimique, eau souterraine, Nitrate, Socle, Zinder

Introduction

Le socle des continents est constitué par des roches ignées et métamorphiques qui affleurent sur la majeure partie de la superficie du globe ou s'étendent près de la surface du sol sous un mince revêtement de dépôts superficiels de caractère alluvial, glaciaire etc. (ONU, 1987). De vastes parties de ce domaine géologique sont situées dans des régions tropicales et

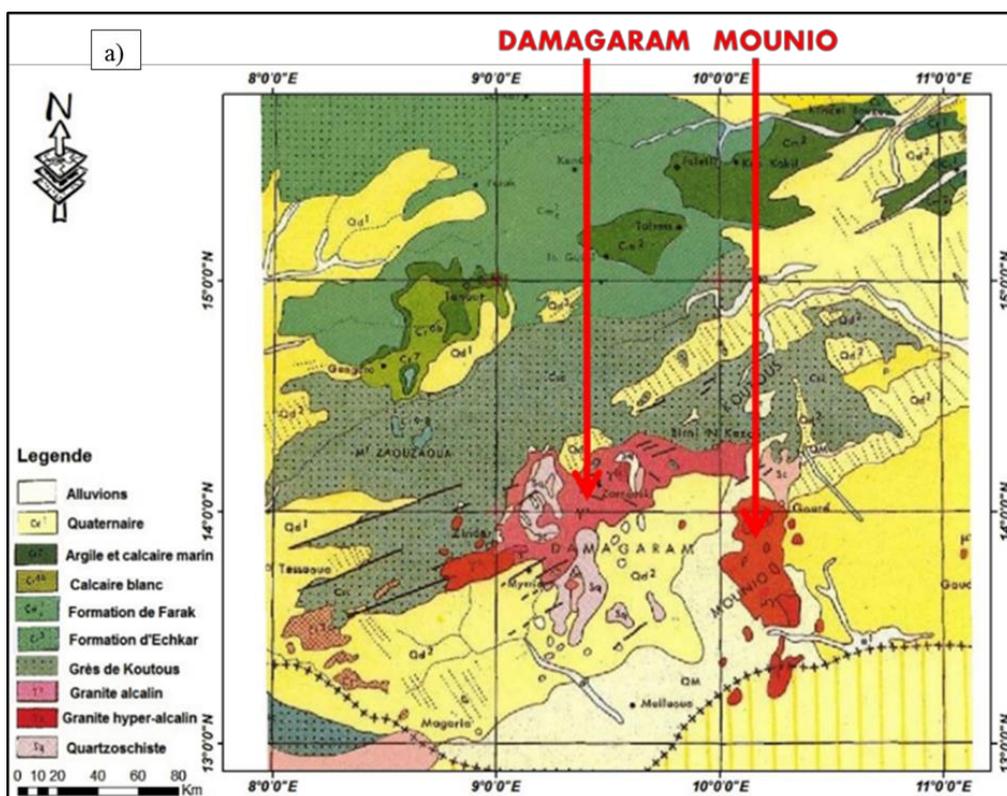
subtropicales qui sont parmi les moins développées du monde. En effet, la difficulté de fournir un approvisionnement en eau d'une manière quantitative et qualitative pour ces populations constitue une des contraintes premières au développement économique et social de ces régions. Les eaux souterraines s'emmagasinent souvent dans les couches supérieures (altérites) et ou circule le long de conduites privilégiés, qui sont essentiellement des fissures ou des failles (Yao, 2009). Le Niger à l'instar des autres pays est confronté à ce genre de problèmes, où les populations souffrent d'un grave manque d'eau dans les régions du socle, et ceci malgré des milliers de forages réalisés (Ousmane, 1988). La région de Zinder fait partie de ces zones où les forages sont implantés dans les aquifères du socle cristallin et cristallophyllien du Damagaram-Mounio. Mais à part l'étude réalisée par Ousmane (1988) dans cette zone et quelques données au niveau de la direction régionale de l'hydraulique et de l'assainissement de Zinder, les données sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines de cette zone sont presque inexistantes. Dans un contexte de pollution sans cesse croissante et incontrôlée, la qualité physico-chimique d'une eau souterraine peut être altérée naturellement ou anthropiquement par des substances indésirables voir toxiques issues de l'élevage, de l'agriculture, de l'industrie, de l'homme et de la roche encaissante. Ces paramètres peuvent d'une manière ou d'une autre rendre les eaux souterraines impropres à la consommation. La problématique de l'approvisionnement en eau potable fait désormais partie intégrante des stratégies de développement conçues et mises en œuvre dans nos pays pour atteindre les objectifs du développement durable. C'est dans ce contexte que la présente étude s'inscrit et s'intéresse surtout à la qualité physicochimique des eaux souterraines du socle de la région de Zinder pendant la saison pluvieuse et la saison sèche, afin d'étudier la qualité physicochimique de ces eaux, de voir la variation des différents paramètres pendant les deux saisons, les mécanismes qui sont à l'origine de la minéralisation de ces eaux et de proposer des solutions aux problèmes de pollution.

Matériel et méthodes

Présentation de la zone d'étude

La zone de socle de la région de Zinder couvre une superficie totale de 18 000 km². Elle occupe le centre de département de Mirriah, Gouré et toute la communauté urbaine de Zinder. Elle est encadrée par les méridiens 8°40' E à l'Ouest et 10° 40' E à l'Est, et par les parallèles 13° 16' N au Sud et 14° 20' N au Nord. Les formations du socle cristallin et cristallophyllien du Damagaram-Mounio qui occupent cette zone affleurent dans deux entités distinctes (le Damagaram et le Mounio) séparées par des formations dunaires récentes (figure 1a). Elles sont constituées principalement des roches plutoniques : granites et microgranites en général alcalins ainsi que des roches

volcaniques d’extension variables que l’on rencontre souvent sous forme de dykes reprenant les accidents majeurs du socle. Les tufs rhyolitiques sont assez abondants dans la région de Gouré, témoignant d’un volcanisme acide (Cadilhac, 1990). Le socle est d’âge précambrien ou paléozoïque dans le Damagaram et permo-jurassique dans le Mounio. D’une manière générale, les zones aquifères dans le socle sont discontinues, avec des caractéristiques hydrauliques très variables et un milieu à double porosité, représenté par la fracturation et les altérites, lorsque celles-ci sont saturées (Jessen, 1992). La figure 1b présente la répartition spatiale des différents ouvrages échantillonnés pour la présente étude.



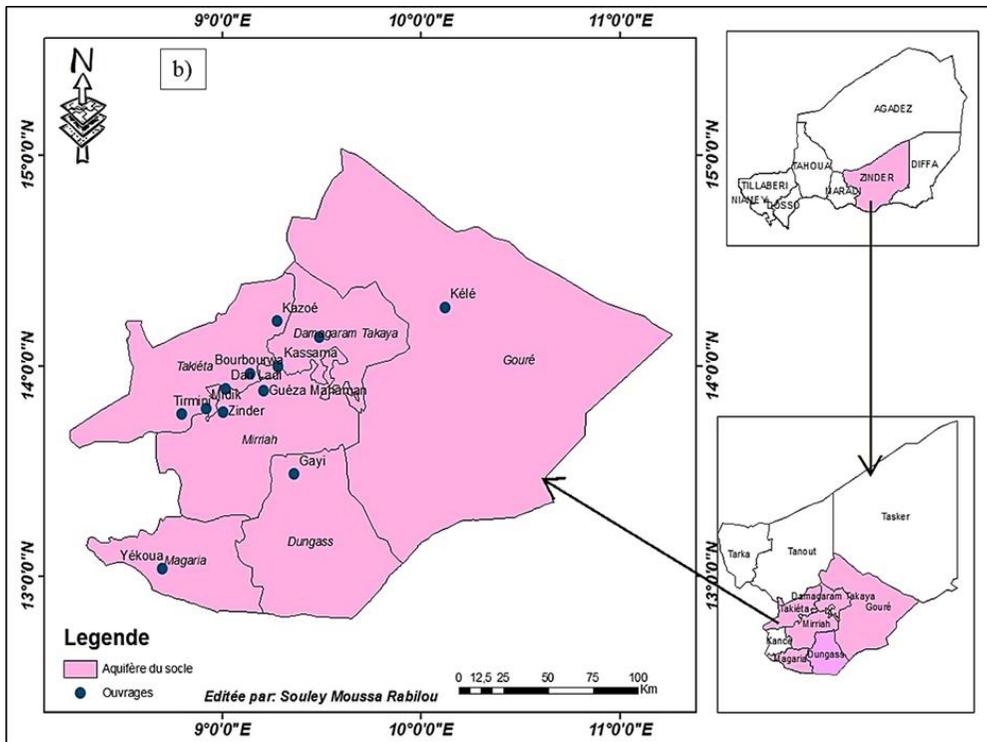


Figure 1 : a) Carte géologique de la région de Zinder montrant les formations du socle de Damagaram-Mounio (Greigert et Pougnet, 1965), b) Carte de répartition spatiale des différents ouvrages échantillonnés

Méthodologie

Dans cette étude, deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées dont l'une en Août 2016 et l'autre en Février 2017 sur douze ouvrages qui captent l'aquifère du socle de la région de Zinder. Les ouvrages échantillonnés sont repartis comme suit :

- ✓ Six (6) forages provenant des mini adductions d'eau potable nommés (FA),
- ✓ Un (1) Puits cimentés nommés (PC),
- ✓ Cinq (5) forages à Motricité Humaine nommés (FM).

Ce choix est dicté par le fait que ces ouvrages sont les plus utilisés par les populations rurales. Les coordonnées géographiques des ouvrages ont été obtenues à l'aide d'un GPS (GARMIN – GPSMAP64s). Les prélèvements ont été effectués dans des flacons en polyéthylène de 1 L bien préparés. Ensuite les échantillons ont été conservés dans une glacière contenant de la glace puis acheminés directement au laboratoire d'analyse des eaux de la direction régionale de l'hydraulique et de l'assainissement de Zinder. Au cours de cette étude quatorze paramètres ont été déterminés : le pH, la température (T°), la

conductivité électrique (CE), les ions potassium (K^+), sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), fer total (Fe^{2+} , Fe^{3+}), hydrogénocarbonate (HCO_3^-), chlorure (Cl^-), fluorure (F^-), nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-), et sulfate (SO_4^{2-}). Les paramètres physiques (pH, CE et T°) 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 : F^- , SO_4^{2-} , fer total (Fe^{2+} , Fe^{3+}), NO_3^- et NO_2^- ont été analysés par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre DR-2800, le K^+ et le Na^+ par absorption atomique à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme de marque JENWAY. Le Ca^{2+} et le Mg^{2+} ont été analysés par complexométrie à l'EDTA, le HCO_3^- par titrimétrie à l'acide sulfurique à l'aide d'un Titracteur Digital de marque Hach et le Cl^- par la méthode de Mohr. Toutes ces analyses ont été réalisées suivant le protocole décrit par Jean Rodier (2009).

Les coordonnées des ouvrages ont été utilisées pour la réalisation de la carte de répartition spatiale à l'aide du logiciel ArcGIS9.3. (Figure 2). Les données issues de ces analyses ont été comparées aux valeurs guides de l'OMS pour une eau de consommation. Ces données ont été traitées aussi par la méthode hydrochimique qui utilise le logiciel diagramme pour déterminer les différents faciès hydrogéochimiques des eaux prélevées. Ces données ont été par la suite traitées par le logiciel XLSTAT 2016 pour déterminer l'origine de la minéralisation de ces eaux par application de la méthode statistique d'analyse en composantes principales (ACP). Ces logiciels sont très utilisés en hydrochimie pour caractériser l'origine de la minéralisation et les faciès chimiques des eaux et donnent de très bons résultats (Chemseddine et al., 2009, Oga et al., 2009 ; Abid, 2010, Lasm et al., 2011, Ahoussi et al., 2010, Ahoussi et al., 2013, Amadou et al., 2014, Salifou et al., 2015, Loukman et al., 2017).

Résultats et discussion

Résultats

Paramètres physico-chimiques

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques effectuées sur les eaux souterraines du socle de la région de Zinder pendant la saison pluvieuse et la saison sèche ainsi que les valeurs guides de l'OMS sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Nomenclature des ouvrages, statistique descriptive des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du Socle de la région de Zinder (Août 2016 et Février 2017) et valeurs guides de l'OMS

Variables			Août 2016 (saison pluvieuse)				Février 2017 (saison sèche)				Nomenclature	
Paramètres	Unité	OMS (2011)	Min	Max	Moy	Ecart-type	Min	Max	Moy	Ecart-type	Localité	Ouvrages
T°C	°C		28,400	32,800	30,792	1,275	27,600	32,200	29,983	1,388		
pH		6,5 - 8,5	5,010	7,900	6,868	0,803	5,320	7,700	6,998	0,697		
CE	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	180 – 1000	116,300	2650,000	710,967	698,956	113,500	2490,000	655,125	665,426	Zinder	PC ₁
Ca ²⁺	mg.L ⁻¹		17,600	161,60	53,467	43,059	4,800	185,60	51,067	48,278	Yékoua	FA ₁
Mg ²⁺	mg.L ⁻¹		0,000	70,960	17,501	19,052	1,944	61,236	17,172	18,620	Tirmini	FA ₂
Na ⁺	mg.L ⁻¹	200	0,000	323,45	57,481	91,018	0,000	276,85	43,753	83,258	Dan Ladi	FM ₁
K ⁺	mg.L ⁻¹	12	1,250	6,000	3,883	1,664	2,800	16,500	7,083	4,150	Bourbourwa	FM ₂
HCO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹		9,760	448,96	201,30	136,452	3,000	380,00	174,42	120,538	Guéza Mahaman	FA ₃
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	250	14,200	124,96	53,605	40,283	5,680	124,96	38,932	38,559	Kassama	FM ₃
SO ₄ ²⁻	mg.L ⁻¹	250	0,000	248,00	36,750	69,707	0,000	275,00	41,000	80,531	Damagaram Takaya	FA ₄
NO ₃ ⁻	mg.L ⁻¹	50	9,240	130,68	44,440	43,393	0,000	146,96	43,450	49,574	Kazoé	FM ₄
(Fe ²⁺ , Fe ³⁺)	mg.L ⁻¹	0,3	0,010	0,380	0,105	0,143	0,000	1,810	0,186	0,513	Midik	FM ₅
NO ₂ ⁻	mg.L ⁻¹	3	0,003	0,106	0,035	0,028	0,000	0,040	0,019	0,011	Gayi	FM ₆
F ⁻	mg.L ⁻¹	1,5	0,000	1,500	0,433	0,451	0,150	2,980	0,853	0,827	Kélé	FA ₅

Analyse descriptive

La figure 2 présente la variation du pH des eaux souterraines du Socle de la région de Zinder pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche). Les pH varient de 5,01 à 7,9 avec une moyenne de 6,868 et un écart-type de 0,803 pendant la saison pluvieuse et de 5,32 à 7,7 avec une moyenne de 6,99 et un écart type de 0,69 pendant la saison sèche.

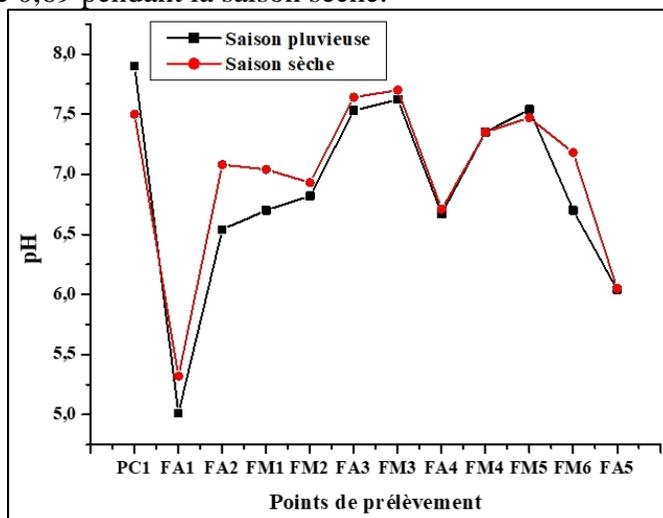


Figure 2 : Variation spatio-temporelle du pH des eaux du Socle de la région de Zinder

Pendant la saison pluvieuse les températures des eaux du Socle varient de 28,4°C à 32°C avec une moyenne de 30,792 °C et un écart-type de 1,175 °C, tandis qu'en saison sèche elles varient de 27,6 à 32,2 °C avec une moyenne de 29,98 °C et un écart type de 1,388 °C comme montre la figure 3.

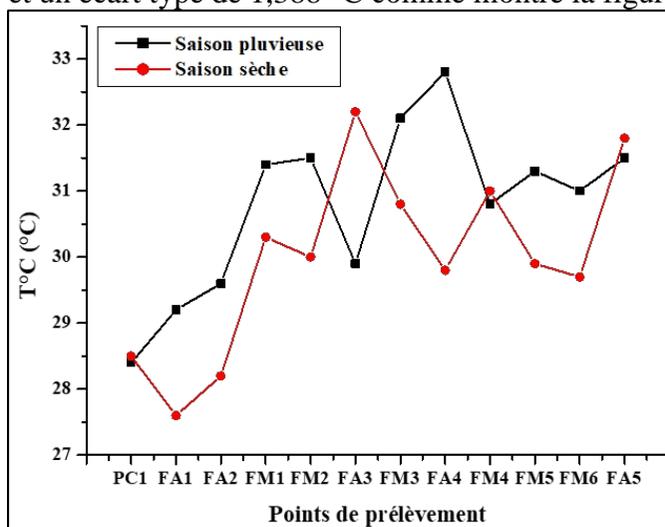


Figure 3 : Variation spatio-temporelle de la température des eaux du socle de la région de Zinder

La figure 4 présente la variation de la conductivité électrique des eaux du Socle de la région de Zinder pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche). Ces eaux ont des conductivités électriques qui varient de 116,3 à 2650 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ avec une moyenne de 710,967 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et un écart-type de 698,956 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pendant la saison pluvieuse et de 113,5 à 2490 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ avec une moyenne de 655,12 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et un écart type de 665,42 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pendant la saison sèche. Des conductivités relativement élevées ont été relevée pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche) dans les mêmes ouvrages (FM₆ (819 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 837 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), FM₂ (924 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 835 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), FM₁ (1309 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 1228 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), FM₄ (2650 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ et 2490 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) respectivement pendant la saison pluvieuse et la saison sèche).

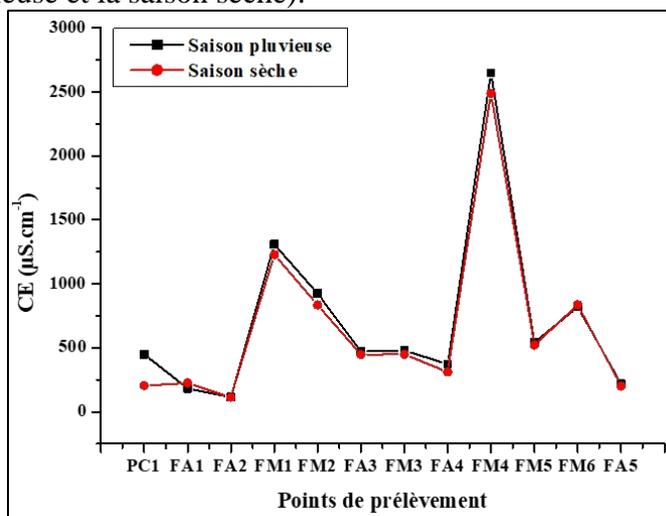


Figure 4 : Variation spatio-temporelle de la conductivité électrique des eaux du Socle de la région de Zinder

Parmi les cations majeurs le calcium est prédominant dans presque tous les ouvrages avec 46,7 %, ensuite vient le sodium avec 35,5 %, puis le magnésium avec 13,2 % et en fin le potassium avec 4,6 % pendant la saison pluvieuse. Cette prédominance est la même en saison sèche, mais avec 46,5 % de Ca^{2+} , 24,3 % de Na^{+} , 17 % de Mg^{2+} et 12,3 % de K^{+} . Une quantité importante en sodium a été enregistrée pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche) dans l'ouvrage FM₄ (323,45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ et 278,85 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) et le potassium reste le cation le moins abondant dans presque tous les ouvrages comme montre la figure 5.

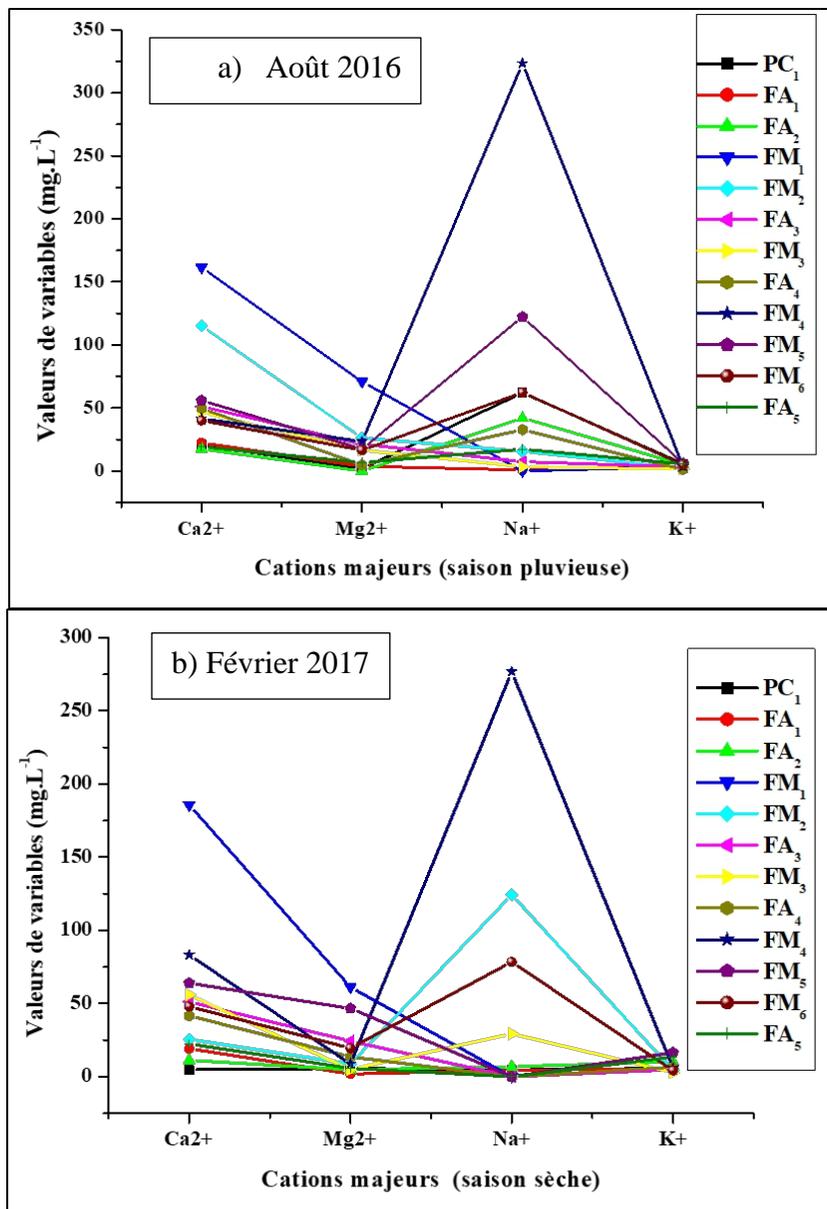


Figure 5 : Prédominance des cations majeurs des eaux du Socle de la région de Zinder (a :Août 2016 et b : Février 2017)

La figure 6 présente la prédominance des anions majeurs des eaux du Socle de la région de Zinder. Parmi les anions majeurs, l’hydrogénocarbonate est le plus abondant avec 58, 2 %, ensuite vient le chlorure avec 18 %, puis le nitrate avec 17 % et enfin le sulfate avec 6,8 % pendant la saison pluvieuse. Mais pendant la saison sèche, cette prédominance n’est pas la même que pendant la période pluvieuse, le pourcentage de nitrates dépasse celui de

chlorures. L'ordre de prédominance est le suivant : 57,6 % de HCO_3^- , 19,4 % de NO_3^- , 15,5 % de Cl^- et 7,5 % de SO_4^{2-} . Des teneurs relativement élevées en nitrates ont été enregistrées pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche) dans les ouvrages FA₁ (62,04 mg.L⁻¹ et 63,36 mg.L⁻¹), FM₂ (64,68 mg.L⁻¹ et 80,08 mg.L⁻¹), FM₁ (123,64 mg.L⁻¹ et 146,96 mg.L⁻¹) et FM₄ (130,68 mg.L⁻¹ et 124,52 mg.L⁻¹). Des teneurs moins négligeables en SO_4^{2-} (248 mg.L et 275 mg.L⁻¹) ont été enregistrées dans l'ouvrage FM₄ pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche). Mais le sulfate reste toujours l'anion le moins abondant dans presque tous les ouvrages.

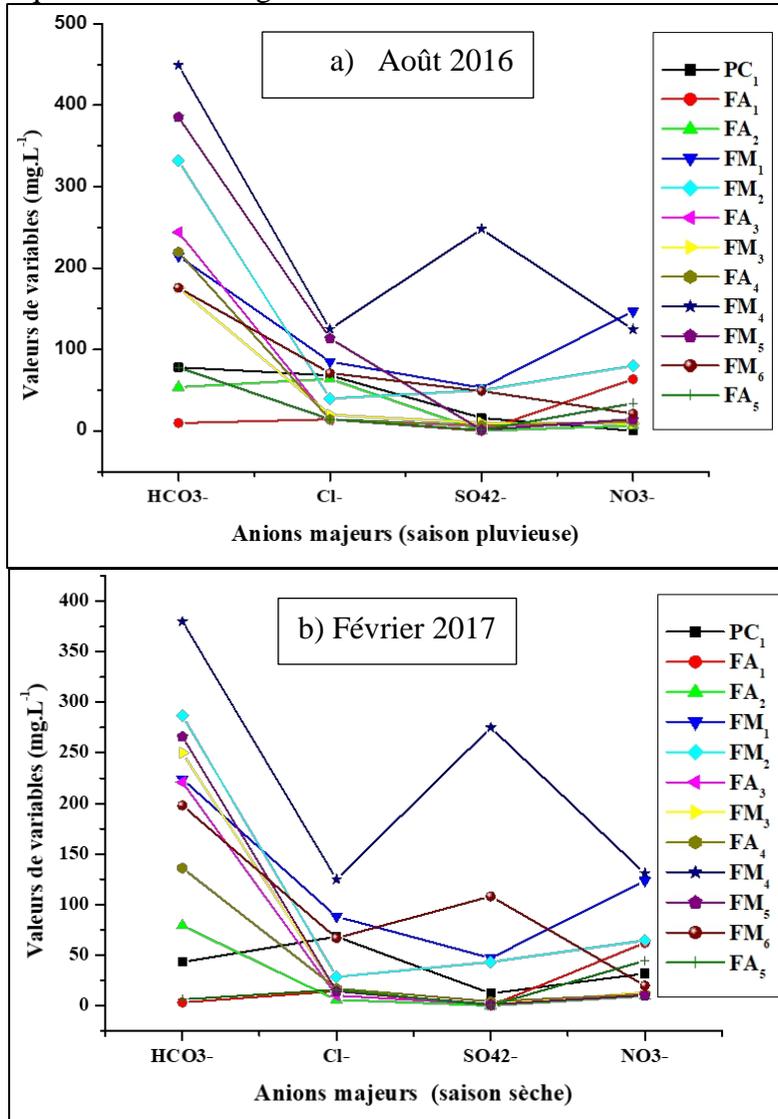


Figure 6 : Prédominance des anions majeurs des eaux du socle de la région de Zinder (a : Août 206 et b : Février 2017)

Pour les ions mineurs la figure 7 présente les valeurs des différentes variables pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche). On note légèrement la présence des ions fluorures dans les ouvrages FM₄ (1,5 mg.L⁻¹) et FM₅ (1,03 mg.L⁻¹) et de fer total (Fe²⁺, Fe³⁺) dans les ouvrages FM₂ (0,37 mg.L⁻¹) et PC₁ (0,38mg.L⁻¹) pendant la saison pluvieuse. De même que pendant la saison sèche des quantités légèrement élevées en fluorures ont été enregistrées dans les ouvrages FM₄ (1,26 mg.L⁻¹), FM₁ (1,35 mg.L⁻¹), FM₅ (1,6 mg.L⁻¹), et FM₂ (2,98 mg.L⁻¹) et une quantité élevée en fer total dans l'ouvrage PC₁ (1,81 mg.L⁻¹) avec des valeurs qui dépassent celles de la saison pluvieuse dans certains ouvrages.

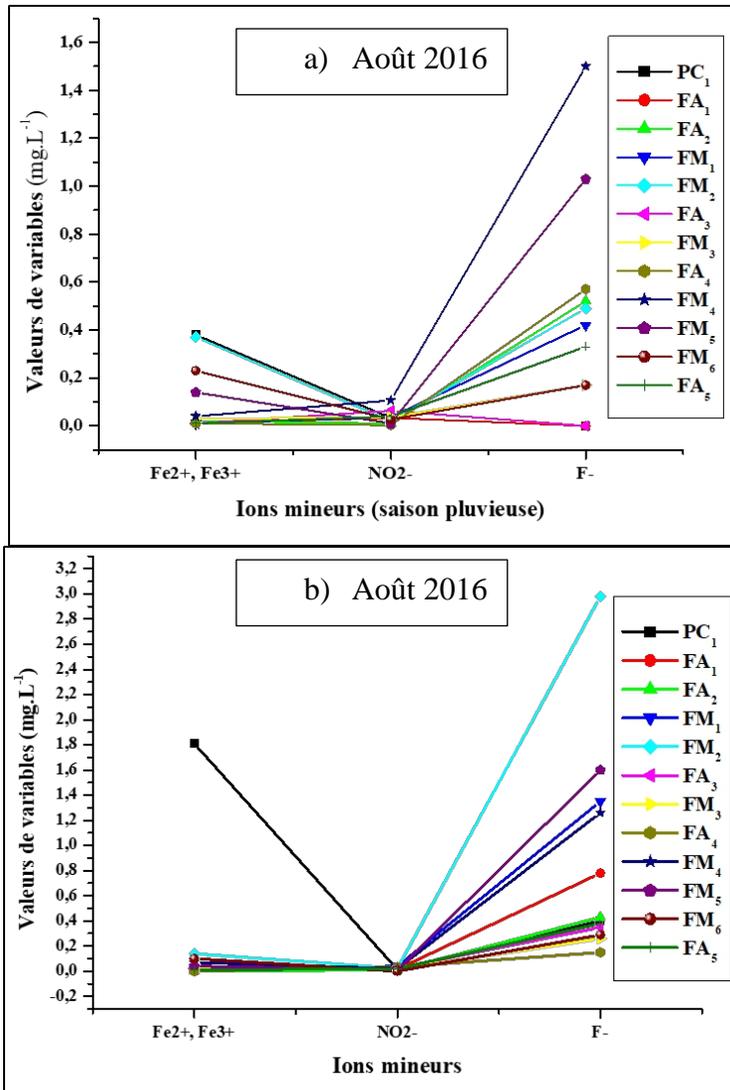


Figure 7 : Valeurs des ions mineurs dans les eaux du socle de la région de Zinder (a : Août 25016 et b : Février 2017)

Facès hydrogéochimique

Du point de vue hydrogéochimique, la figure 8a présente le diagramme triangulaire de Piper montrant les différents faciès des eaux souterraines du Socle de la région de Zinder pendant la saison pluvieuse. Ces eaux se répartissent en quatre faciès dont 42 % bicarbonaté calcique et magnésien, 25 % chloruré calcique et magnésien, 25 % chloruré sodique et potassique et 8% bicarbonaté sodique et potassique. Dans le triangle des cations, 50 % des eaux se concentrent dans le pôle calcique, 34 % dans le pôle sodi-potassique et 16 % dans la zone où aucun cation ne domine. De même dans le triangle des anions, 50 % des eaux se concentrent dans le pôle bicarbonaté, 25 % dans le pôle chloruré-nitraté et 25 % dans la zone où aucun anion ne domine. Pendant la saison sèche, ces eaux se répartissent encore dans les quatre faciès (figure 8b) mais avec des pourcentages différents : 41,7 % Bicarbonaté calcique et magnésien, 41,7 % chloruré calcique et magnésien, 8,3 % bicarbonaté sodique et potassique et 8,3 % chloruré sodique et potassique. Dans le triangle des cations, 50 % des eaux se concentrent dans le pôle calcique, 16,7 % dans le pôle sodi-potassique, 25 % dans la zone où aucun cation ne domine et 8,3 % dans le pôle magnésien. De même dans le triangle des anions, 50 % des eaux se concentrent dans le pôle bicarbonaté, 33,3 % dans le pôle chloruré-nitraté et 16,7 % dans la zone où aucun anion ne domine.

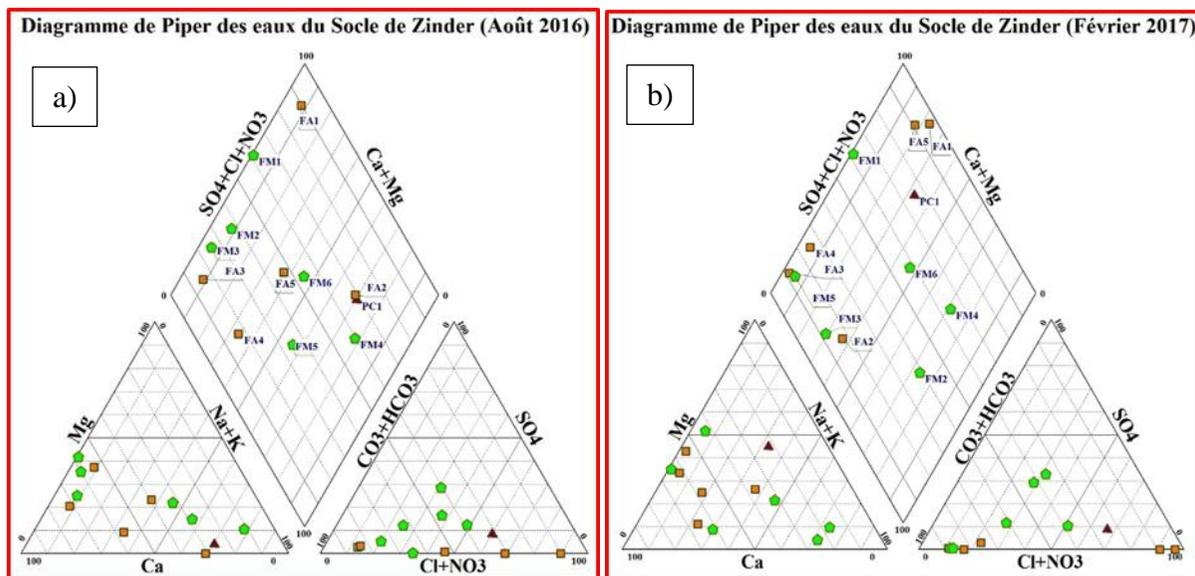


Figure 8 : Répartition des eaux souterraines du Socle de La région de Zinder dans le Diagramme triangulaire de Piper : a) Saison pluvieuse (Août 2016) b) saison sèche (Février 2017)

Aspect qualitatif par rapport aux valeurs guides de l'OMS

Du point de vue qualitatif, les eaux souterraines du Socle de la région de Zinder pendant les deux saisons (pluvieuse et sèche) présentent des pH qui répondent aux normes (6,5 – 8,5) excepté les eaux des ouvrages FA₁ et FA₅ qui présentent des pH légèrement acides. De même que les conductivités électriques de ces eaux restent dans les normes (180 à 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) excepté les ouvrages FM₁ et FM₄ où les valeurs dépassent largement la norme maximale et l'ouvrage FA₂ où les valeurs n'atteignent pas la norme minimale. Sur le plan cations majeurs, en dehors des eaux de FM₄ qui présentent des teneurs en sodium qui dépassent 200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ aucun cation majeur n'excède les valeurs admissibles (12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour le potassium, les valeurs de calcium et de magnésium ne sont pas déterminées) dans tous les ouvrages. Sur le plan anions majeurs, c'est uniquement les ions nitrates qui ont été enregistrés dans les eaux des FM₄, FM₁, FM₂ et FA₁ dont les teneurs dépassent 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ qui est la valeur admissible. Sur le plan ions mineurs les teneurs en fluorures et en fer total restent sensiblement égales aux normes (1,5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour le fluorure et 0,3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ pour le fer total) pour certains ouvrages pendant la saison pluvieuse, mais d'autres ouvrages pendant la saison sèche (FM₂ et PC₁) en dépassent. Mais dans la plupart des ouvrages, les teneurs en ions mineurs sont négligeables.

Analyse en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales a été réalisée sur 24 échantillons (12 pour la saison des pluies et 12 pour la saison sèche) et 14 paramètres (pH, T°, CE, F⁻, SO₄²⁻, (Fe²⁺, Fe³⁺), NO₃⁻, NO₂⁻, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, HCO₃⁻, Cl⁻). Cette analyse permet de calculer les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque axe factoriel, leur cumul, les coefficients de corrélation entre tous les paramètres pris deux à deux, ainsi que la participation de chaque paramètre à la constitution des axes factoriels. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau 2 et le tableau 3 pour la matrice de corrélation et les valeurs propres pour les eaux de la saison des pluies, le tableau 4 et le tableau 5 pour la matrice de corrélation et pour les valeurs propres pour les eaux de la saison sèche. Le tableau 2 montre des corrélations significatives entre le Ca²⁺ et le Mg²⁺ (0,913), le Na⁺ et les éléments HCO₃⁻ (0,642), SO₄²⁻ (0,862), Cl⁻ (0,749), NO₂⁻ (0,627), F⁻ (0,836), la CE et les éléments Na⁺ (0,790), HCO₃⁻ (0,718), SO₄²⁻ (0,966), Cl⁻ (0,688), NO₃⁻ (0,789), NO₂⁻ (0,735), F⁻ (0,694), le Cl⁻ et les éléments SO₄²⁻ (0,627), F⁻ (0,761), le SO₄²⁻ et les éléments NO₃⁻ (0,734), NO₂⁻ (0,779), F⁻ (0,703), le NO₃⁻ et le NO₂⁻ (0,604). Aucune corrélation n'est observée entre les éléments suivants : K⁺, (Fe²⁺, Fe³⁺), T°, pH et les autres paramètres. Le tableau 4 montre des bonnes corrélations entre le Ca²⁺ et les éléments Mg²⁺ (0,814), NO₃⁻ (0,704), le Na⁺ et les éléments HCO₃⁻ (0,661), SO₄²⁻ (0,929), Cl⁻ (0,673), la CE et les éléments Na⁺ (0,871), HCO₃⁻

(0,756), SO_4^{2-} (0,936), Cl^- (0,840), NO_3^- (0,758), le Cl^- et les éléments SO_4^{2-} (0,840), NO_3^- (0,665), le HCO_3^- et le SO_4^{2-} (0,606), le pH et le HCO_3^- (0,629). Aucune corrélation n'est observée entre les éléments suivants : K^+ , (Fe^{2+} , Fe^{3+}), T° et les autres paramètres. Le tableau 3 montre que les trois premiers axes expriment 72,84 % de la variance totale dont 42,35 % pour le premier axe, 18,21 % pour le deuxième et 12,27 % pour le troisième axe. Le tableau 5 montre que les trois premiers axes expriment 68,86 % de la variance totale dont 39,6 % pour le premier axe, 17,37 % pour le deuxième et 11,88 % pour le troisième axe. Les eaux de la saison pluvieuse expriment une variance totale par rapport aux trois axes factoriels plus que les eaux de la saison sèche. La poursuite de l'analyse jusqu'à trois axes factoriels est due au fait que les deux premiers axes ne donnent pas une variance totale suffisante pour fournir des renseignements sur les différentes interactions hydrogéochimiques qui se déroulent dans l'aquifère du Socle de la région de Zinder. Les figures 9 et 10 résument les espaces réduits de trois premières composantes principales respectivement pour les deux saisons (pluvieuse et sèche).

Tableau 2 : Matrice de corrélation entre les différentes variables prises deux à deux (eaux de la saison pluvieuse)

Variables	T°C	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	(Fe ²⁺ , Fe ³⁺)	NO ₂ ⁻	F ⁻
T°C	1													
pH	0,041	1												
CE	0,156	0,282	1											
Ca ²⁺	0,396	0,093	0,361	1										
Mg ²⁺	0,301	0,129	0,516	0,913	1									
Na ⁺	-0,028	0,326	0,790	-0,179	-0,017	1								
K ⁺	-0,492	0,060	-0,085	-0,309	-0,148	0,217	1							
HCO ₃ ⁻	0,441	0,517	0,718	0,416	0,410	0,642	-0,167	1						
Cl ⁻	-0,100	0,396	0,668	0,201	0,343	0,749	0,483	0,570	1					
SO ₄ ²⁻	0,066	0,205	0,966	0,138	0,297	0,862	-0,061	0,627	0,613	1				
NO ₃ ⁻	0,011	-0,167	0,789	0,515	0,642	0,433	-0,062	0,332	0,430	0,734	1			
(Fe ²⁺ , Fe ³⁺)	-0,251	0,349	0,026	0,098	-0,095	0,020	0,237	0,117	0,215	0,005	-0,084	1		
NO ₂ ⁻	-0,180	0,209	0,735	-0,051	0,227	0,627	-0,013	0,374	0,275	0,779	0,604	-0,209	1	
F ⁻	0,341	0,216	0,694	0,116	0,162	0,836	0,073	0,761	0,713	0,703	0,421	-0,131	0,323	1

Tableau 3 : Valeurs propres et pourcentages exprimés pour les axes principaux (eaux de la saison pluvieuse)

	F1	F2	F3
Valeur propre	5,930	2,550	1,718
Variabilité (%)	42,355	18,215	12,270
% cumulé	42,355	60,569	72,840

Tableau 4 : Matrice de corrélation entre les différentes variables prises deux à deux (eaux de la saison sèche)

Variables	T°C	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	(Fe ²⁺ , Fe ³⁺)	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	F ⁻
T°C	1													
pH	0,349	1												
CE	0,323	0,261	1											
Ca ²⁺	0,331	0,229	0,568	1										
Mg ²⁺	0,222	0,283	0,224	0,814	1									
Na ⁺	0,201	0,188	0,871	0,113	-0,221	1								
K ⁺	0,037	-0,177	-0,232	-0,093	0,257	-0,278	1							
(Fe ²⁺ , Fe ³⁺)	-0,326	0,249	-0,173	-0,302	-0,192	-0,093	-0,204	1						
HCO ₃ ⁻	0,463	0,629	0,756	0,507	0,364	0,661	-0,203	-0,294	1					
Cl ⁻	0,083	0,245	0,840	0,525	0,222	0,673	-0,328	0,271	0,439	1				
SO ₄ ²⁻	0,202	0,198	0,936	0,308	-0,030	0,929	-0,242	-0,072	0,606	0,840	1			
NO ₃ ⁻	0,125	-0,191	0,758	0,704	0,367	0,525	-0,187	-0,252	0,415	0,665	0,582	1		
NO ₂ ⁻	0,312	-0,127	0,192	0,566	0,357	-0,080	-0,176	-0,185	0,125	0,122	-0,060	0,532	1	
F ⁻	-0,002	0,007	0,390	0,215	0,262	0,410	0,066	-0,115	0,505	0,174	0,215	0,558	0,198	1

Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentages exprimés pour les axes principaux (eaux de la saison sèche)

	F1	F2	F3
Valeur propre	5,546	2,432	1,663
Variabilité (%)	39,614	17,374	11,880
% cumulé	39,614	56,988	68,868

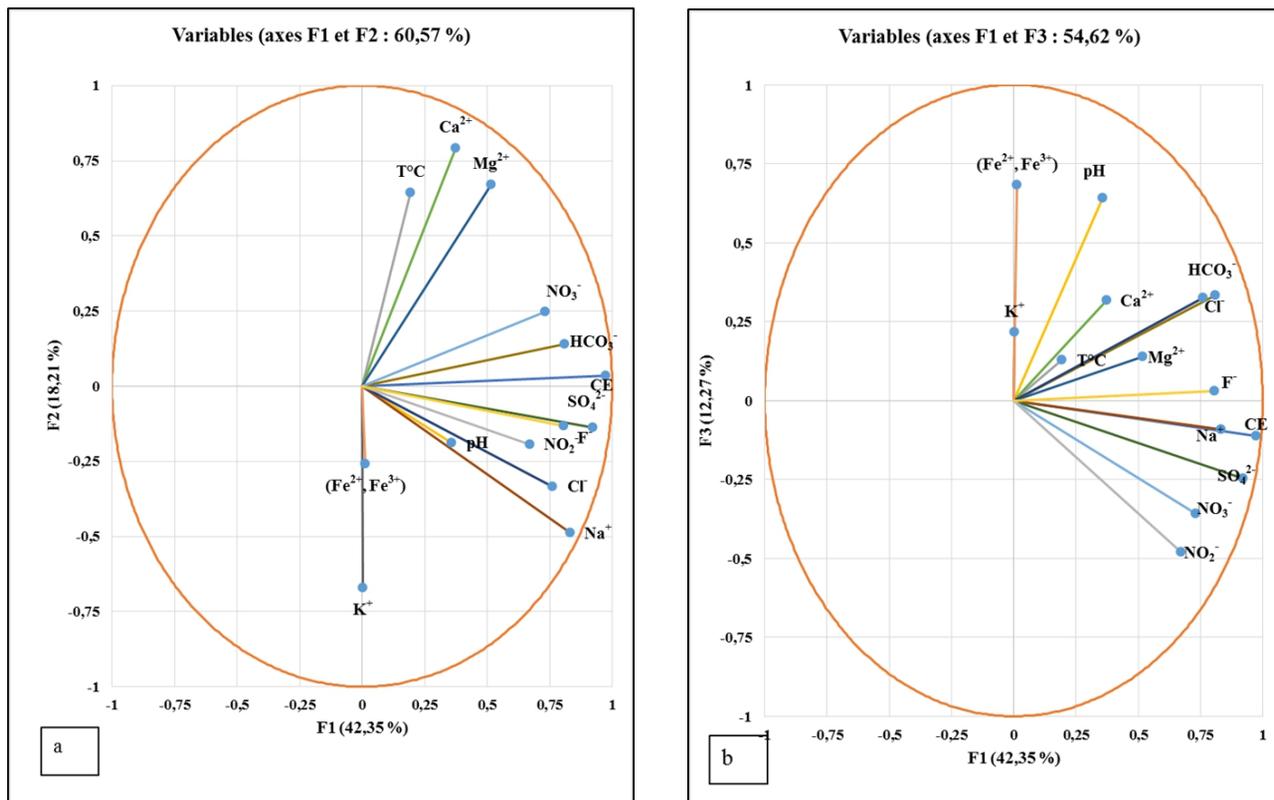


Figure 9 : Espace des variables des plans factoriels a) F1 x F2 et b) F1 x F3 pour les eaux du socle pendant la saison des pluies

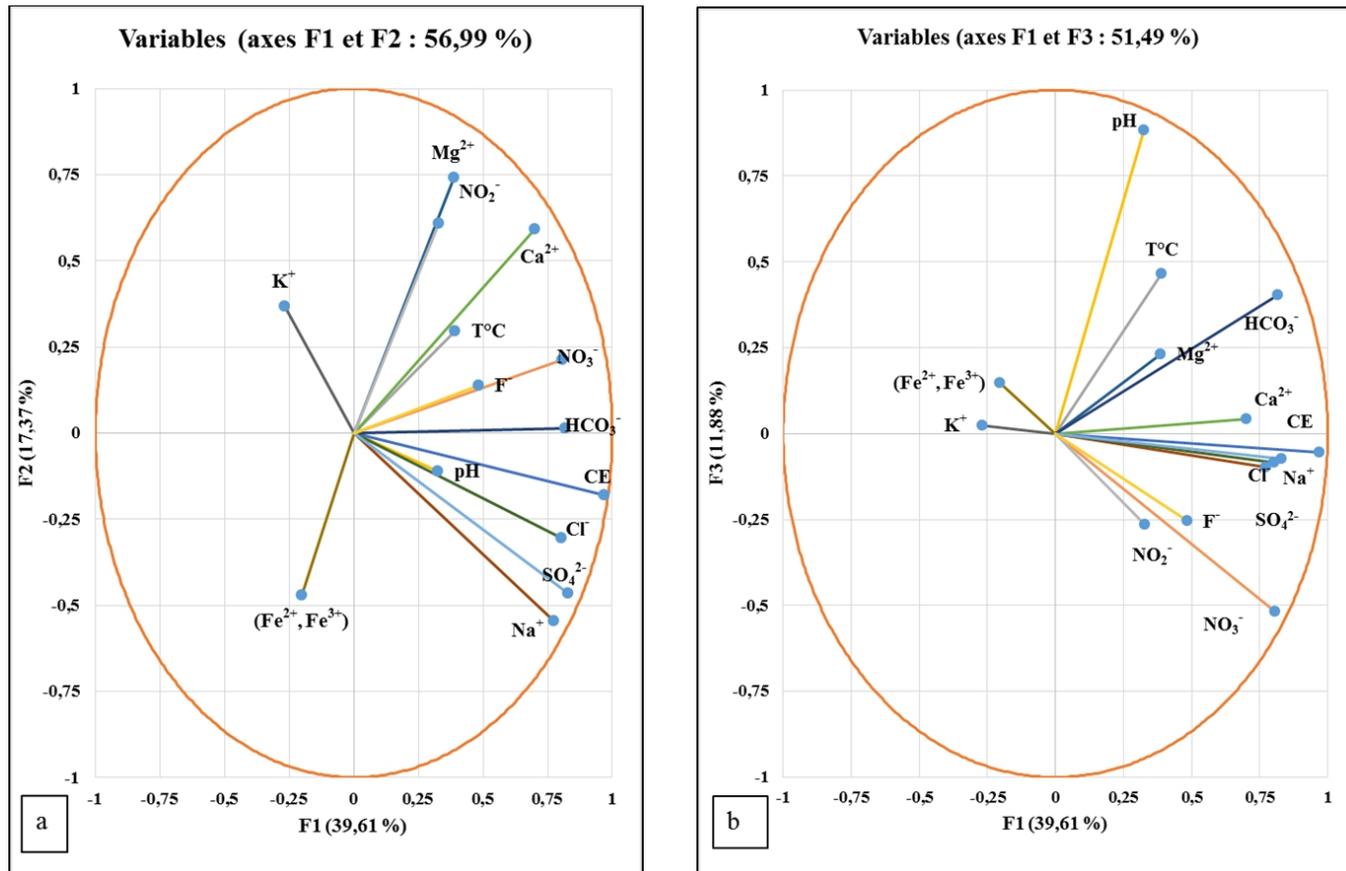


Figure 10 : Espace des variables des plans factoriels a) F1 x F2 et b) F1 x F3 pour les eaux du socle pendant la saison sèche

Le facteur F1 est défini par CE , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- et F^- (figure 9a). Ce facteur traduit les principales sources de minéralisation des eaux du socle de la région de Zinder. Il regroupe l'ensemble des anions majeurs et mineurs et un seul cation majeur. Le regroupement de ces éléments au tour de cet axe montre qu'ils seraient mis en solution par le même phénomène mais, par des mécanismes différents. Les ions Na^+ , HCO_3^- , F^- pourraient provenir de l'hydrolyse des silicates et des roches pouvant contenir les ions fluorures (muscovite, tourmaline, micaschiste...) ce qui traduirait le temps de séjour de l'eau dans le réservoir. Les ions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , NO_2^- pourraient provenir de l'infiltration des eaux des pluies. La présence des ions NO_3^- , NO_2^- pourraient avoir une origine principalement anthropique soit par lessivage des engrais épandus, soit par les rejets des eaux usées domestique ou soit par la dégradation de la matière organique. Cela traduirait le pluviollessivage des sols par les eaux des pluies. Ce facteur est considéré comme un axe de minéralisation d'origine naturelle (contacte eau-roche ou temps de séjour) et anthropique (pluviollessivage des sols). Le facteur F2 est déterminé par T° , Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^+ (figure 9a). Ce facteur regroupe les cations majeurs et la température excepté le sodium. Le rassemblement de ces éléments au tour de cet axe montre qu'ils seraient mis en solution par un phénomène identique mais par des mécanismes différents. Les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} pourraient résulter de l'hydrolyse des roches et de la décomposition des minéraux ferromagnésiens présents dans la zone du socle de la région de Zinder telles que les gneiss à silicates calciques, des quartzites, des micaschistes, des biotites et des amphiboles. Leurs regroupements avec la température pourraient expliquer leur origine naturelle. Quant aux ions K^+ , comme ils sont diamétralement opposés aux ions Ca^{2+} , Mg^{2+} et T° (figure 9a), donc ils pourraient provenir de l'altération des minéraux renfermant le potassium tel que l'orthose. Donc ce facteur est considéré comme un axe de minéralisation naturelle (contact eau-roche). Le facteur F3 est représentatif du pH et (Fe^{2+} , Fe^{3+}) (figure 9b). Les ions (Fe^{2+} , Fe^{3+}) pourraient résulter de l'hydrolyse des minéraux riche en fer qui sont généralement présents dans les aquifères du socle, telles que la biotite et l'oxyde de fer. Leurs regroupements avec le pH pourraient être dû à la réaction consommatrice des ions HCO_3^- par les ions Fe^{2+} libérés par ces minéraux dans l'aquifère, ce qui va entraîner une diminution du pH. Ce facteur traduit donc les différentes réactions probables qui peuvent se produire dans l'aquifère. Pour les eaux de la saison sèche (figure 10a et 10b), le facteur F1 est défini par CE , Ca^{2+} , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- , le facteur F2 est déterminé par Mg^{2+} et NO_2^- et le facteurs F3 est défini uniquement par le pH. La provenance de ses différents éléments a été déjà expliquée pour les eaux de la saison pluvieuse. Mais pour la saison sèche on constate un déplacement des ions Ca^{2+} du facteur F2 vers le facteur F1, celui des ions NO_2^- du facteur F1 vers le facteur F2 et une disparition des

certaines éléments au tour des tous les axes (F1 (disparition de F^-), F2 (disparition de K^+ , $T^\circ C$) et F3 (disparition de (Fe^{2+} , Fe^{3+}))). Ces différents changements pourraient être dus aux différents phénomènes qui peuvent intervenir dans l'aquifère tels que les réactions d'oxydoréduction, échanges d'ions, précipitations, adsorptions Car pendant cette période, les aquifères sont déjà rechargées par les eaux des pluies donc le phénomène d'infiltration est légèrement négligeable. Donc on ne peut parler que de contact eau-roche.

Discussion

Paramètres physiques

Les températures moyennes ($30,7^\circ C$ et $29,98^\circ C$ respectivement pour la saison pluvieuse et pour la saison sèche) enregistrées dans les eaux de notre zone d'étude reflètent la température ambiante annuelle de la région de Zinder. Ces résultats sont presque similaires avec ceux obtenus par Ousmane (1988) dans les eaux du socle de Sud-Zinder. Il semble qu'aucune anomalie géothermique n'a été relevée et que les eaux ne semblent pas provenir de grandes profondeurs. Mais ces températures moyennes obtenues dépassent celles obtenues par Yao (2009) qui a travaillé dans les formations géologiques similaires en Côte d'Ivoire ($27^\circ C$). Cela pourrait être justifié par le fait que le climat n'est pas le même dans les deux pays, donc la température ambiante n'est pas la même. Ces paramètres peuvent avoir une influence sur la température des eaux souterraines surtout dans les ouvrages qui captent les aquifères superficiels. Les valeurs du pH des eaux analysées sont assez homogènes dont plus de 83 % sont légèrement neutres et le reste légèrement acide pendant la saison pluvieuse et la saison sèche. Cette légère acidité enregistrée dans les ouvrages de Yékoua et Kélé pendant les deux saisons pourrait être expliquée d'une part par le fait que ces ouvrages sont distants des autres ouvrages échantillonnés et donc séparés par d'autres formations géologiques (Continental Hamadien, Complexe Terminal et Korama). Ces ouvrages auraient capté les aquifères superficiels du socle qui sont en contact avec les aquifères dont les eaux sont acides. C'est donc à travers des échanges souterrains que ces eaux auraient acquis une légère acidité. D'autre part, les faibles valeurs en hydrogénocarbonate et en fertotal qui ont été enregistrées dans ces ouvrages pendant les deux saisons (tableau 1 et tableau 2), 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 dépassent ceux obtenus par Ousmane (1988) dans la même zone d'étude, mais ils sont similaires avec ceux obtenus par Yao (2009) en Côte d'Ivoire. Cela pourrait s'expliquer par la nature de l'aquifère qui peut être profond, d'où l'hydrolyse des silicates qui va consommer les ions H^+ et augmenter en même temps le pH.

Paramètres chimiques

La prédominance des ions hydrogénocarbonates des eaux souterraines du socle de Zinder analysées pendant les deux saisons est en accord avec les résultats obtenus par plusieurs auteurs en Afrique de l'Ouest qui ont travaillé dans les formations similaires Ousmane (1988), Oga et al. (2009), Yameogo (2008) et Yao (2009), respectivement dans la même zone de notre étude (Zinder), en Côte d'Ivoire, au Burkina Faso et en Côte d'Ivoire. Cependant, les fortes concentrations enregistrées en hydrogénocarbonate dans certains ouvrages peuvent être expliquées soit par la dissolution des carbonates et ou de l'hydrolyse de silicates sous l'action de l'eau météorique plus ou moins chargée en CO₂ selon les réactions suivantes comme l'a suggéré Ousmane (1988) dans ses travaux.

- 1) $2\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 + 2\text{CO}_2 + 11\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + 2\text{Na}^+ + 2\text{HCO}_3^- + 4\text{H}_4\text{SiO}_4$
- 2) $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{HCO}_3^- + 2\text{Ca}^{2+}$

Mais selon les corrélations des différents éléments pris deux à deux, une corrélation significative existe entre le Na⁺ et le HCO₃⁻ pendant les deux saisons ((0,642) et (0,661) respectivement pour la saison des pluies et la saison sèche) ce qui n'est pas le cas avec le Ca²⁺. Cela laisse penser que le HCO₃⁻ proviendrait principalement de la réaction 1. Dans ce cas le pH de l'eau devient de plus en plus alcalin et la concentration des ions HCO₃⁻ va augmenter dès que le CO₂ est disponible. Après les ions HCO₃⁻, viennent les ions Cl⁻ et NO₃⁻ en deuxième position respectivement pendant la saison des pluies et la saison sèche. La prédominance des ions nitrates sur les ions chlorures pendant la saison sèche pourrait être due à la remontée des eaux après recharge jusqu'à la partie superficielle de l'aquifère pouvant être contaminée par des polluants azotés qui sont susceptibles d'augmenter les teneurs en nitrates pouvant dépasser celles des ions chlorures. Mais les ions SO₄²⁻ restent toujours les anions le moins abondant dans les eaux du socle de la région de Zinder pendant les deux saisons.

La prédominance des cations Ca²⁺ et Na⁺ dans les eaux analysées pendant les deux saisons pourrait être due à la géologie régionale de cette zone, qui est dominée par les formations du paléozoïque dans le Damagaram et permio-jurassique dans le Mounio, constituées principalement des gneiss à silicates calciques, des quartzites (quartz, muscovite, tourmaline et les oxydes de fer), des micaschistes (quartz, muscovite, biotite, feldspaths) et des granites alcalin et hyperalcalin (anciens et jeunes) (Ousmane, 1988). Donc l'hydrolyse de ces roches pourrait expliquer leurs abondances dans ces eaux souterraines selon les réactions suivantes :

- 3) $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8\text{Ca} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 + \text{Ca}^{2+}$
- 4) $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na} + 4,5\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \leftrightarrow 0,5 (\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4) + 2\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Na}^+$
- 5) $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na} + 7\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_4\text{SiO}_4 + \text{Na}^+$

La présence des ions Mg^{2+} pendant les deux saisons pourrait être due à la décomposition des minéraux ferromagnésiens présents dans les roches de cette zone telles que la biotite et l'amphibole. Cette hypothèse peut être appuyée par le fait que les rapports $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$ restent dans l'ensemble des points d'eau inférieurs à 1 et que de bonnes corrélations ((0,913) et (0,814) respectivement pour la saison des pluies et la saison sèche) existent entre ces éléments ce qui suggère une origine commune notamment par l'hydrolyse des roches et de la décomposition des minéraux ferromagnésiens présents dans la zone du socle de la région de Zinder. Dans l'ensemble, la prédominance des différents éléments trouvés dans cette étude pendant la saison des pluies ($\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$) est en accord avec les résultats trouvés par Yameogo (2008) et par Tossou (2016) respectivement au Burkina Faso et au Bénin. Mais pour la saison sèche ($\text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$) une prédominance des ions nitrates sur les ions chlorures a été enregistrée. Cette prédominance est en accord avec les résultats trouvés par Ousmane (1988). La prédominance des ions Na^+ sur K^+ dans les eaux analysées pendant les deux saisons pourrait être due à la grande stabilité de la muscovite et des feldspaths potassiques ou par la sélectivité des plantes qui adsorbent le potassium au détriment du sodium. Cette hypothèse peut être appuyée par le fait qu'aucune corrélation n'existe entre ces deux éléments pendant les deux saisons, donc ils peuvent évoluer différemment dans le milieu ce qui serait confirmé par les rapports Na^+ / K^+ qui sont supérieurs à 1 dans la majorité des points d'eau. La présence des ions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et NO_2^- pourrait provenir des pluies et du lessivage des sols pendant la saison des pluies. Cela pourrait être appuyé par les différentes corrélations significatives qui existent entre ces différents éléments : $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ (0,613), $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_3^-$ (0,734), $\text{SO}_4^{2-} / \text{NO}_2^-$ (0,775), $\text{NO}_3^- / \text{NO}_2^-$ (0,604). Mais cela n'est pas totalement le cas pendant la saison sèche. Les ions Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- pourraient résulter des pluies et de lessivage des sols par celle-ci compte tenue des corrélations existantes entre ces éléments : $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ (0,840), $\text{Cl}^- / \text{NO}_3^-$ (0,665), mais pour les ions NO_2^- ils ne peuvent provenir que d'autres origines. Les faibles valeurs en sulfates et les fortes teneurs en nitrates enregistrées dans certains ouvrages pendant les deux saisons, montrent un apport très limité des ions sulfates à partir de l'oxydation de la pyrite des roches et excluent l'apport naturel des ions nitrates qui ne dépassent pas quelques mg.L^{-1} dans les eaux souterraines selon Ratel. Donc les fortes teneurs en nitrates obtenus suggèrent une pollution d'origine anthropique et la vulnérabilité de la nappe à la pollution (Ousmane, 1988 ; Yameogo, 2008). Selon Faillat et al (1993), des

auteurs qui ont étudié l'apport par des eaux des pluies concernant ces éléments en Corse (France), en Margeride (France) et dans les Vosges (France), montrent que dans certains cas la totalité des anions d'acides forts (Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) et plus de la moitié des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) pouvaient, en zone de socle, être apportées par les précipitations. Cela corrobore donc notre hypothèse. Les fortes teneurs en nitrates enregistrées dans les forages de Yékoua, Dan Ladi, Kazoé et Bourbourwa pourraient avoir principalement une origine anthropique. Mais selon les travaux de Faillat Faillat, et Drogue (1993), 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 forages de Kazoé et de Yékoua pourraient être dues aux polluants domestiques, parce que le forage de Kazoé se trouve au bord du village où l'insalubrité est très remarquable. En outre ce forage est presque immergé dans une eau stagnante contenant des ordures ménagères et des déjections animales. Le forage de Yékoua se trouve aussi au milieu des habitations où l'insalubrité est aussi très marquante. Mais pour les forages de Dan Ladi et Bourbourwa, les teneurs en nitrates pourraient se justifier par le fait que ces forages sont implantés dans les champs de culture. Ces ions pourraient donc provenir des engrais chimiques ou des fumiers utilisés (Kouassi et al., 2010). Pendant la saison sèche ces teneurs en nitrates augmentent dans certains ouvrages, ce qui est en faveur de notre hypothèse avancée ci-haut.

Aspect qualitatif par rapport aux valeurs guides de l'OMS

Sur le plan qualitatif, la consommation d'une eau dont les teneurs en nitrates et en fluorures dépassent les valeurs guides de l'OMS (50 mg.L^{-1} pour les nitrates et $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$ pour le fluorures) peut provoquer des problèmes sanitaires chez les consommateurs (Yao et al., 2012 ; Pontié et al., 1996), 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) (Ratel) et la fluorose dentaires ou osseuse (qui se traduit par des dents marbrées (coloration définitivement jaune ou marron foncé (Travi et al., 1982), ou la déformation des membres chez les enfants). Donc les fortes teneurs en nitrates enregistrées dans les ouvrages FM_4 et FM_1 pendant les deux saisons et les teneurs en fluorures enregistrées à FM_2 , FM_4 et FM_5 montrent que ces eaux présentent des risques pour la consommation.

Faciès hydrogéochimique

Les résultats issus de l'analyse hydrochimique a permis de mettre en évidence quatre types de faciès avec une prédominance bicarbonatée calcique et magnésienne dans les eaux souterraines du socle de la région de Zinder pendant les deux saisons. De nombreux auteurs qui ont étudié l'hydrochimie des aquifères du socle en Afrique de l'Ouest ont abouti à la conclusion selon laquelle le faciès bicarbonaté calcique est le plus abondant dans les eaux souterraines du Socle (Ousmane, 1988 ; Yameogo, 2008 ; Oga et al., 2009 ; Ahoussi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2010 ; Lasm et al., 2011 ; Tossou, 2016 ; Abdou Babayé et al., 2016). Cette prédominance bicarbonatée peut se justifier par des teneurs importantes en bicarbonate enregistrées dans les eaux de cet aquifère.

Analyse en composantes principales

Au regard des résultats des analyses en composantes principales, les paramètres chimiques influençant la minéralisation des eaux de la région de Zinder selon les matrices de corrélations sont : Ca^{2+} Na^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- (Tableau 3) pendant la saison des pluies et Ca^{2+} Na^+ , HCO_3^- , Cl^- (tableau 5) pendant la saison sèche. En effet, il semble que deux principaux mécanismes gouvernent la minéralisation des eaux du socle de la région de Zinder : le temps de séjour et le pluviollessivage des sols pendant la saison des pluies, le temps de séjour et les différentes réactions chimiques qui pourraient avoir lieu dans l'aquifère pendant la saison sèche. L'abondance des ions hydrogénocarbonates dans les eaux de cet aquifère montre qu'ils proviennent principalement de la dissolution des roches silicatées et ils renseignent sur le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère (Lasm et al., 2011). Ces résultats nous permettent de dire que les teneurs en hydrogénocarbonates obtenues dans cette étude sont en accord avec la formation géologique de notre zone d'étude dont les principaux constituants géologiques sont les roches silicatées. L'ACP a permis de mettre en évidence les polluants azotés d'origine anthropique et les ions d'origine atmosphérique (Cl^- , SO_4^{2-}). Cela montre la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution et montre que les ouvrages présentant des fortes teneurs en nitrates pourraient capter l'aquifère superficiel du Socle de la région de Zinder. Donc à la fin de la saison des pluies, les eaux présenteraient des teneurs maximales en nitrates. Cela pourrait être appuyé par le fait que les principales activités socio-économiques de la population de cette zone sont l'agriculture et l'élevage qui sont susceptibles d'augmenter le taux de nitrate dans l'aquifère par la décomposition de la matière organique ou par l'infiltration des engrais. Des nombreux auteurs qui ont travaillé dans les formations géologiques similaires que notre zone d'étude, ont trouvé des teneurs en nitrates relativement élevée dans certaines localités et la majorité d'entre eux (Yao, 2009 ; Yameogo, 2008 ; Boukari, 1998 ; Abdou Babayé et

al., 2016) lient cette pollution aux activités anthropiques (production des déchets domestiques, réseau d'égout et latrines).

Conclusion

L'étude de la qualité physico-chimique des eaux souterraines du Socle de la région de Zinder 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) respectivement dans les forages de Yékoua (5,01 et 5,32) et Kélé (6,04 et 6,05) et Kazoé (130,68 mg.L⁻¹ et 124,52 mg.L⁻¹), Dan Ladi (123,64 mg.L⁻¹ et 146,96 mg.L⁻¹), Bourbourwa (64,68 mg.L⁻¹ et 80,08 mg.L⁻¹) et Yékoua (62,04 mg.L⁻¹ et 63,36 mg.L⁻¹) ne respectent pas les valeurs guides de l'OMS et rendent ces eaux impropres à la consommation. De même que les teneurs en fluorures enregistrées à Kazoé (1,5 mg.L⁻¹), Midik (1,6 mg.L⁻¹) et Bourbourwa (2,98 mg.L⁻¹). Ces ouvrages doivent donc faire l'objet d'un traitement avant consommation. Les eaux du socle analysées pendant la saison des pluies sont classées majoritairement bicarbonatées calciques et magnésiennes (42 %). Pendant la saison sèche, ces eaux se répartissent équitablement dans deux faciès majoritaires (41,7 % bicarbonaté calcique et magnésien et 41,7 % chloruré calcique et magnésien). La présence des nitrates en quantité importante montre une infiltration des eaux de précipitation. Les fortes teneurs en nitrate peuvent provoquer des maladies telles que la méthémoglobinémie ou le cancer digestif. Les fortes teneurs enregistrées en fluorures qui dépassent 1,5 mg.L⁻¹ peuvent provoquer des maladies telles que la fluorose dentaire. Il est donc important de proposer des solutions pour ramener ces teneurs aux normes internationales des eaux de consommation. L'analyse en composantes principales indique que la minéralisation des eaux étudiées est gouvernée par deux grands phénomènes : le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère et le pluviolessivage des sols. Les perspectives de nos travaux nous conduiraient à proposer des mécanismes simples et pas onéreux de l'élimination des ions nitrates et fluorures dans les eaux étudiées par un mécanisme d'adsorption sur des argiles naturelles.

References:

1. Abdou Babayé, M.S., Sandao, I., Saley, M.B., Wagani, I. & Ousmane, B. (2016) : *Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger)*. Int. J. Biol. Chem. Sci. 10(6) : 2728-2743.
2. Abid, K. (2010) : *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. 196p
3. AHOUSSE, E.K., SORO, N., KOFFI, B.Y, SORO, G. & BIEMI, J. (2010) : *Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville*. Int. J. Biol. Chem. Sci, 4 (3) : 782-797.
 4. Ahoussi, K.E., Koffi, Y.B, Kouassi, A.M., Soro, G. & Biemi, J. (2013) : *Etude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : cas du village de Mongouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouma)*. J.Appl. Biosci 63 : 4703-4749
 5. Amadou, H., Laouali, M.S. & Manzola, A.S. (2014) : *Caractérisation hydro chimique des eaux souterraines de la région de Tahoua (Niger)*. Journal of Applied Bioscience, 80, 7161-7172.
 6. Boukari, M. (1998) : *Fonctionnement du système aquifère exploité pour l'approvisionnement en eau de la ville de Cotonou sur le littoral béninois. Impact du développement urbain sur la qualité des ressources*. Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Sénégal. 345p
 7. Cadilhac, O. (1990-1991) : *Atlas des ressources hydrauliques du département de Zinder, Arrondissement de Mirriah, Magaria et Matamèye*. Rapport. Direction départementale de l'hydraulique de Zinder.
 8. Chemseddine, F., Abderrahmane, B., Abdelkader, R. & Elias, S. (2009) : *Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien)*. Afrique Science, 05 (2) 217-231
 9. Faillat, J. P. & Drogue, C. (1993) : *Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique*. Hydrological Sciences Journal. 38 :3, 215-229.
 10. Greigert, J. & Pougnet, R. (1965) : *Republique du Niger, Carte géologique. Echelle 1/2000000*.
 11. Issa, S., Mama, D., Zanguina, A., Natatou, I., Boukari, M. & Sohounhloué, D. (2015) : *Hydrogeochemical characterization of Continental Intercalary Terminal, the base and the Korama aquifers groundwater found in five local Governments in the Zinder region in the Republic of Niger*. Research Journal of Chemical and Environmental Sciences. Vol. 3, n° 4. 09-16
 12. Jessen P. (1992). *Analyse des conditions hydrogéologiques en vue d'un programme d'hydraulique rurale dans le département de Zinder*. Rapport. Direction départementale d'hydraulique de Zinder.

13. Kouassi, M.A., Yao, A.K., Ahoussi, E.K., Seki, C.L., Yao, A.N., Kouassi, I.K. & Biemi, J. (2010) : *Apport des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (centre-Est de la Côte d'Ivoire)*. Int. J. Biol. Chem. Sci. 4 (5) : 1816-1838.
14. Lasm, T., Lasm, O.D., Oga, M.S.Y., Youanta, M., Baka, D., Kouame, F. & Yao, T.K. (2011) : *Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Int. J. Biol. Chem. Sci. 5 (2) : 642-662
15. Loukman, B., Samuel Nakolendousse, S., Mahamat, N.A. & Nguinambaye, M.M. (2017) : *Caractérisation hydrochimique de la nappe de Yao et ses environs : relations entre eaux de surface (lac-Fitri) et eaux souterraines*. Int. J. Bio. Chem. Sci. 11 (3) : 1336-1349.
16. Oga, M.S., Lasm, T., Yao, T.K., Soro, N., Saley, M. B., Kouassi, D. & Gnamba, F. (2009) : *Caractérisation chimique des eaux des Aquifères de Fracture : cas de la Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire*. European Journal of Scientific Research. Vol 31, N° 1. pp 72-87.
17. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture 7. (1987) : *Les eaux souterraines des roches dures du socle*. Projet 8.6 du Programme hydrologique international. Place de Fontenoy, 75700 Paris, France
18. Ousmane, B. (1988) : *Etude géochimique et Isotopique des aquifères du Socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi et Zinder-Est)*. Thèse de Doctorat, Université de Niamey. Niger. 182p
19. Pontié, M., Rumeau, M., Ndiaye, M. & Diop, C.M. (1996) : *Sur le problème de la fluorose au Sénégal : bilan des connaissances et présentation d'une nouvelle méthode de défluoruration des eaux de boisson*. Cahier Santé, vol.6: p. 27-36.
20. Ratel, M.O. *Elimination des nitrates des eaux potables, Document Technique FNDAE Hors-Série N°4*. Direction de l'Espace Rural et de la Forêt.
21. Rodier, J., Legube, B. & Merlet, N. (2009) : *L'analyse De L'eau* (9^E Edition). Ed Dunod. Paris. 1579 pp.
22. Tossou, Y.Y.J. (2016) : *Caractérisation des anomalies fluorées des eaux souterraines du socle cristallin précambrien du Benin central Afrique de l'Ouest ~ Apport des outils hydrochimiques pétrographiques et minéralogiques*. Thèse de doctorat, Université de Liège et Université Abomey Calavi.
23. Travi, Y. & Le Coustour, E. (1982) : *Fluorose dentaire et eaux souterraines : l'exemple du Sénégal*. EAU DU QUÉBEC, VOL. 15, No 1.

24. Yameogo ; S.O. (2008) : *Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso qualité et vulnérabilité*. Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. 254p
25. Yao, T.K. (2009) : *Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du sud-ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie*. Thèse de doctorat, Université Cocody, Côte d'Ivoire. 337p