



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger)

Maman Sani ABDOU BABAYE^{1,2*}, Issoufou SANDAO², Mahaman Bachir SALEY³,
Ibrahim WAGANI¹ et Boureima OUSMANE²

¹ Université Dan Dicko Dankoulodo Faculté des Sciences et Techniques, UMR SERMUG, Département de Géologie, BP:465, Marad (Niger).

² Université Abdou Moumouni, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP:10662 Niamey (Niger).

³ Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan – Cocody, UFR SRTM, CURAT – 22 BP 801 Abidjan 22 (Côte d'Ivoire)

*Auteur correspondant ; E-mail : babaye.sani@gmail.com

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée grâce aux soutiens financiers de la CTB et de l'IFS. Nous leur exprimons notre profonde gratitude.

RESUME

Située dans la partie Sud-Ouest du Niger, la zone d'étude appartient à la région de socle précambrien du Liptako. Dans cette zone, la faible couverture en eau est accentuée par le problème de la qualité car certains forages enregistrent une teneur importante en nitrates. L'objectif de cette étude est d'améliorer les connaissances sur la qualité des eaux de socle, et déterminer les sources et les facteurs qui contrôlent leur minéralisation. Ce travail a été réalisé à partir des résultats d'analyses physico-chimiques de cinquante échantillons d'eau prélevés au niveau des puits peu profonds et des forages. Dans cette étude, une méthodologie combinant les approches hydrochimiques classiques et l'analyse en composante principale est utilisée. L'étude du chimisme des eaux souterraines révèle trois types des faciès dont le plus dominant est le type bicarbonaté calco-magnésien (70%). Environ 40% d'ouvrages ont des teneurs en nitrates comprises entre 50 et 690 mg/l (normes OMS 50 mg/l). L'origine de la minéralisation des eaux des aquifères de socle est due à l'hydrolyse des minéraux silicatés, mais aussi aux apports superficiels.

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : aquifères fissurés, qualité des eaux, contamination, hydrogéochimie, Niger.

Hydrogeochemical behavior and contamination of waters cracked aquifer of the precambrian basement in semi-arid areas (southwestern Niger)

ABSTRACT

Located in the southwest part of the Niger, the study area belongs to the precambrian basement of Liptako. In this area, the low water coverage is accentuated by the problem of water quality as in some

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

2817-IJBCS

DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v10i6.26>

boreholes it is recorded a high content of nitrates. The objective of this study is to improve the knowledge basis on the water quality and to determine the sources and factors that control their mineralization. In this study, a methodology combining classical hydrochemical approaches and principal component analysis is used. The groundwater chemistry of reveals three types of facies. The most dominant is the type calc-magnesium bicarbonate with about 70%. Approximately, 40% of boreholes have a nitrate content ranging between 50 and 690 mg/l while the WHO standards is of 50 mg/l. The mineralization origin of the bedrock aquifers of water is due to hydrolysis of the silicate minerals, but also to superficial contributions.

© 2016 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords: fissured aquifers, water quality, contamination, Hydrogeochemistry, Niger.

INTRODUCTION

Depuis la fin des années 1960, les zones sahéliens connaissent de profonds changements climatiques caractérisés par une baisse considérable des précipitations (Taylor et al., 2002). Dans ces zones à l'environnement sensible, les sécheresses répétitives ont eu pour conséquences la dégradation des états de surface, et le changement durable du bilan hydrologique (Leblanc et al., 2008 ; Favreau et al., 2009).

Les ressources en eau souterraine des zones sahéliennes, et plus particulièrement celles des régions de socle du Sud-Ouest du Niger, connaissent de plus en plus une dégradation qualitative et quantitative, du fait des actions climatiques et anthropiques. Si en zone tropicale humide, la nature offre plusieurs alternatives en matière de production d'eau potable de la population, en zone semi-aride de socle, les aquifères fissurés restent les seuls points de recours pendant les longues saisons sèches (2/3 de l'année).

Vu l'importance remarquable de ces ressources pour améliorer le taux de desserte en eau de la population, le suivi de la qualité physico-chimique de ces eaux devient un impératif surtout que certains forages enregistrent des teneurs élevées en nitrate (Elbaz-Poulichet, 2002; Yaméogo, 2008). L'étude de la qualité physico-chimique des eaux devient impérative dans le schéma régional de gestions rationnelles des ressources en eau souterraine de socle. Cette étude a pour objectif de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux

de socle, et de déterminer les sources et les facteurs qui contrôlent leur minéralisation.

MATERIEL ET METHODES

Situation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la partie Nord-Ouest du Liptako nigérien entre les longitudes 0°30' Ouest et 0°50' Est et les latitudes 13°45' et 14°20' Nord. Elle occupe la partie centrale de Dargol qui est un affluent rive droite du fleuve Niger (Figure 1).

Le climat de la zone est du type sahélien caractérisé par l'alternance de deux saisons très contrastées : une saison sèche d'octobre à mai et une saison de pluies allant de juin à octobre. La pluviométrie moyenne annuelle calculée à la station pluviométrique de Téra sur la période 1999 – 2008 est de 409 mm. Au cours de la même période, les valeurs moyennes mensuelles de la température varient entre 15 °C à 43 °C, pour une moyenne annuelle de 29 °C. Les températures les plus basses sont observées en juillet-août (saison hivernale) et décembre-janvier (saison "froide"), tandis que les fortes valeurs s'observent en avril-mai (saison sèche) et octobre-novembre. Pendant la saison sèche, on observe généralement des pics pouvant atteindre 43 °C à l'ombre. Les taux de l'humidité relative de l'air montrent une variation annuelle de 18 à 90%. L'évapotranspiration potentielle annuelle est supérieure à 2000 mm dépassant quatre fois la hauteur pluviométrique annuelle (Abdou Babaye, 2012).

Le réseau hydrographique comprend un cours d'eau temporaire (le Dargol) dont le plus important des affluents est le Tilim. À cette rivière, s'ajoute un chapelet de mares semi-permanentes et des retenues artificielles d'eau parmi lesquelles, seul le barrage de Téra est permanent.

Contexte géologique et hydrogéologique

Le substratum de la zone est constitué des roches précambriennes (Figure 1) réparties entre les formations de la ceinture métamorphique (pyroxénites, amphibolites, épidotites, chloritoschistes, metabasaltes, métagabbros, grauwackes, micaschistes, quartzitoschistes, tufs et brèches rhyolitiques) et celles du pluton granitoïdique (granites, granodiorites et diorites) renfermant par endroit des reliques archéennes (pegmatites, leptynites) (Machens, 1973; Abbou et al., 1998; Soumaila, 2000). Les formations de socle sont surmontées d'une couverture superficielle formée d'altérite (5 à 50 m d'épaisseur), des alluvions et des colluvions. Dans cette zone, l'essentiel des ressources en eau souterraine est contenu dans les aquifères fissurés de socle précambrien dont l'hydrogéologie est mal connue.

En milieu cristallin et cristallophyllien, les zones aquifères correspondent aux niveaux superficiels altérés (altérites et alluvions) et profonds de socle (fissures et/ou fractures), qui sont dans bien des cas superposés et forment un même système aquifère (Dewandel et al., 2006). L'aquifère supérieur est formé par des matériaux semi-perméables au rôle capacitif, suivi d'un horizon fissuré (zone intermédiaire décomprimée), à perméabilité élevée formant le deuxième niveau aquifère. Ce type de fonctionnement a été indiqué comme adapté à celui relatif au socle précambrien de la zone d'étude (Ousmane, 1988; Girard et al., 1997). Le troisième niveau aquifère se trouve dans le substratum sain affecté par des fractures d'origine tectonique (failles). Cet aquifère

profond de socle fissuré et fracturé est en général confiné, tout en étant par endroit drainant par rapport aux horizons supérieurs. Les zones les plus fracturées contribuent donc à sa fonction essentiellement conductrice. Le degré de confinement est fonction du pourcentage des matériaux argileux. Dans le domaine schisteux et de roches vertes, la couche altérée est très épaisse (15 à 40 m) et à dominance argileuse, contrairement au terrain granitique (Ousmane, 1988).

Méthodologie

Echantillonnage et analyses chimiques

La présente étude est basée sur cinquante échantillons d'eau prélevés au niveau des puits peu profonds et des forages. Les prélèvements ont été réalisés au cours des périodes de hautes (45 échantillons en octobre à décembre 2009) et de basses eaux (6 échantillons en avril-mai 2010) et les échantillons sont distinctement étiquetés selon la nappe et la date d'échantillonnage. Les points d'échantillonnage sont choisis de manière à représenter les différents ensembles géologiques rencontrés dans la zone d'étude. La quasi-totalité des mesures ont porté sur les aquifères fissurés de socle. Néanmoins, une analyse a concerné la nappe superficielle d'altérites. Certains points ont fait l'objet de deux ou trois prélèvements. Au cours de chaque campagne d'échantillonnage, les paramètres physico-chimiques *in situ* (pH, température, conductivité électrique) sont mesurés *in situ*. Les mesures de ces paramètres et les prélèvements ont été effectués sur les ouvrages en fonctionnement après au moins 30 minutes de pompage (forages) ou de puisage (puits) pour obtenir une eau plus représentative de la nappe. Les analyses chimiques réalisées par méthodes usuelles présentent les balances ioniques variant autour de $\pm 3\%$. Les dosages des éléments chimiques sont réalisés sur une électrophorèse capillaire. Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et la silice sont déterminés

par absorption atomique de flamme. L'analyse des nitrates (NO_3^-) et des chlorures (Cl^-) a été faite par titration potentiométrique directe, alors que les ions carbonatés (CO_3^{2-}) et bicarbonatés (HCO_3^-) sont obtenus par le calcul après la détermination du pH et du titre alcalimétrique complet (TAC).

Traitements des données

Les résultats analytiques sont traités à l'aide des diagrammes et par les techniques statistiques.

La classification hydrogéochimique des eaux a été réalisée grâce au diagramme de Piper. Ce dernier est fréquemment utilisé pour la typologie des eaux. Les éléments chimiques considérés pour ce traitement concernent les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) et les anions HCO_3^- , ($\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$) et SO_4^{2-} . Ainsi, les faciès géochimiques des eaux sont obtenus en fonction de la prédominance des cations et des anions dans la solution.

Pour mieux apprécier l'influence des ions sur la minéralisation des eaux, deux approches statistiques ont été utilisées. La

première consiste à l'analyse bivariable afin de mettre en évidence les corrélations des ions pris deux à deux d'une part, et leurs apports sur l'évolution hydrogéochimique des eaux. La deuxième analyse est basée sur l'exploitation des résultats obtenus à partir la technique d'Analyse en Composantes Principales (ACP). L'ACP centrée réduite a été réalisée avec 12 paramètres (conductivité électrique (CE), la minéralisation totale (MT), le pH, la pression partielle en CO_2 (pCO_2), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-) à l'aide du logiciel STATISTICA 6.1. L'intérêt de cette technique est qu'elle permet de résumer à quelques axes factoriels le maximum d'informations contenues dans la masse de données. La projection des individus sur un plan factoriel offre l'avantage d'appréhender la similitude ou l'opposition entre les caractéristiques des individus et les sources de leur variabilité. Le nuage des points formés par le regroupement de certains ions impose une étude bivariable afin d'apprécier l'apport de chaque ion dans la minéralisation des eaux.

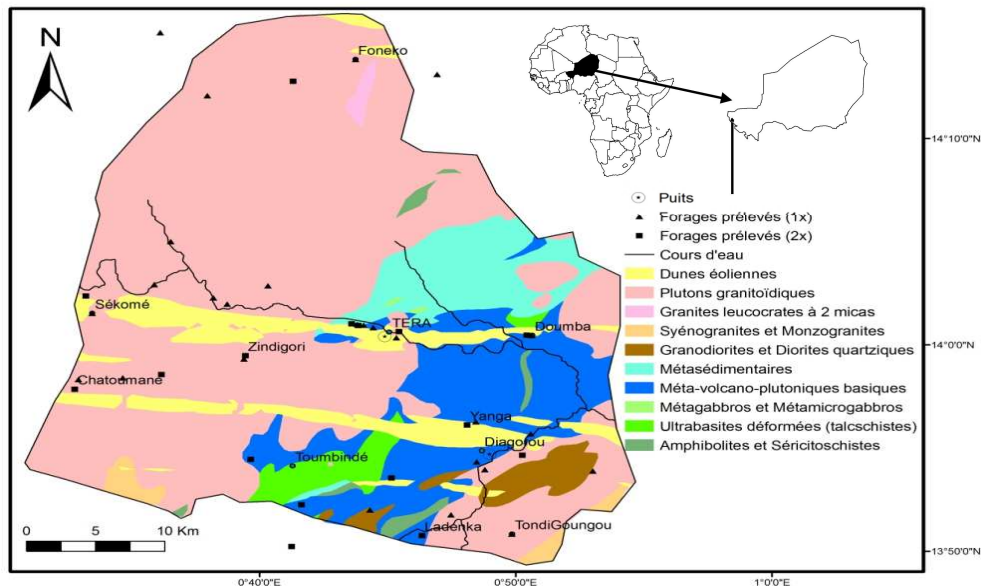


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude, contexte géologique et distribution des points d'eau échantillonnés. (1×) : prélevés une fois.

RESULTATS

Analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques (Tableau 1) révèlent que les eaux souterraines sont légèrement acides à neutres, avec un pH qui varie de 6,30 à 7,30. Elles se caractérisent par une minéralisation très variable (266 à 1731 $\mu\text{s/cm}$) avec une moyenne de 617 $\mu\text{s/cm}$. Cette grande variation montre l'hétérogénéité notable dans la distribution de la charge minérale des eaux souterraines. Elle montre aussi que la minéralisation des eaux souterraine en zone de socle est en générale plus élevée au niveau des aquifères des roches vertes (schiste) que sur le terrain granitique. Cela est lié au confinement de ces aquifères par d'épaisse couche argileuse. Les valeurs de la température de l'eau varie de 29 à 34 °C dans l'ensemble des échantillons d'eaux souterraines. Pour ce qui est des anions, les bicarbonates, avec une valeur moyenne de 258 mg/l, dominent largement tous les anions. En ce qui concerne les ions Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- , leurs valeurs maximales sont respectivement 106,81 mg/l, 294,95 mg/l et 0,3 à 690,16 mg/l. La teneur en sulfates est acceptable selon les normes OMS (400 mg/l), mais pour les nitrates, 40% d'ouvrages enregistrent des teneurs dépassant les normes de potabilité acceptées par l'OMS (≤ 50 mg/l). Cette pollution nitratée s'observe au niveau de toutes les catégories des eaux souterraines (puits et forages).

Les valeurs moyennes des cations des eaux analysées présentent l'ordre d'abondance suivant : $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Parfois, le sodium devient prépondérant dans les eaux des ouvrages proches des zones potentielles de recharge (koris, mares). Aussi, la teneur en sodium se voit dans certains cas dépasser par le magnésium dû à l'importance de terrain schisteux dans la zone et aux intrusions doléritiques dans les massifs granitoïdiques.

La classification chimique des eaux révèle une abondance des eaux bicarbonatées calco-magnésiennes (70%) suivies des eaux chloruro-sulfatées calciques (25% et des eaux bicarbonatées sodiques (5%) (Figure 2). La signature chloruro-sulfatée calcique des eaux marque l'évolution des anions du pôle

bicarbonaté vers le pôle chloruré-nitraté. Cette évolution est principalement due à une augmentation des nitrates, et de manière secondaire par l'apport des sulfates dans l'évolution géochimique vers un troisième faciès.

Analyses statistiques

Le Tableau 2 fait ressortir les corrélations existantes entre les 12 variables prises deux à deux. Ainsi, le pH est bien corrélé aux HCO_3^- (0,73) mais anti-corrélé au pCO_2 (-0,83); la conductivité électrique est fortement corrélée avec MT (0,94), Ca^{2+} (0,91), NO_3^- (0,85), Cl^- (0,80), Mg^{2+} (0,78) et assez bien corrélée au Na^+ (0,55); le HCO_3^- est corrélé au Na^+ (0,55); le Ca^{2+} est bien corrélé avec les NO_3^- (0,89), Cl^- (0,84), Mg^{2+} (0,71); le Mg^{2+} est corrélé avec les NO_3^- (0,62) et peu corrélé aux SO_4^{2-} (0,49) et HCO_3^- (0,43); et enfin, le Na^+ est corrélé aux HCO_3^- (0,53).

Les résultats de l'ACP centrée réduite (Figure 3) montrent que la variance exprimée par les axes factoriels F_1 - F_2 est assez significative (près de 70%) pour observer le comportement global des échantillons (Tableau 3). Néanmoins, nous avons aussi considéré l'axe F_3 pour pouvoir mettre en évidence les tendances non exprimée et avoir des projections de bonne qualité ($> 70\%$). Les trois premiers axes factoriels (F_1 , F_2 , F_3) expriment près de 80% de la variance totale, ce qui est très significatif pour faire la classification et étudier les tendances et corrélations qui peuvent exister entre les paramètres afin de mieux en déduire les mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.

La projection des variables sur le plan factoriel F_1 - F_2 (Figure 3) montre que le facteur F_1 est le plus important. Il contrôle à lui seul environ 47% de l'inertie du nuage des points représentatifs des échantillons et regroupe au pôle négatif la majorité des variables en présence (CE, MT, Ca^{2+} , NO_3^- , Cl^- , Mg^{2+} , Na^+ et SO_4^{2-}). Le regroupement de ces variables autour de l'axe F_1 montre que cet axe factoriel exprime les sources principales

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques (mg/l) des eaux.

Nom	N°	Aquifère	Long	Lat	CE 25°	pH	T °C	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
Diagourou	F3	RV	0,80809	13,90552	599	6,8	32,2	33,30	19,43	76,97	4,24	13,97	17,49	10,52	338,24
Diagourou jardin	F2	RV	0,8154	13,90968	376	6,8	30,4	31,84	16,59	31,17	2,12	5,88	9,88	12,58	218,99
Lambandou	F5	RV	0,83768	13,91097	814	6,4	31,5	18,72	10,51	19,11	2,97	4,05	3,69	2,04	146,81
Pate Kouara	F8	RV	0,81334	13,89929	385	6,6	32,9	24,49	12,27	47,75	3,01	11,23	9,75	1,40	229,60
Fanta Faouta	F10	RV	0,75254	13,89263	441	7,1	31,5	42,86	18,58	25,90	8,00	2,05	17,07	13,32	268,19
Tchantiga	F11	RV	0,69412	13,87092	573	6,9	32	48,24	36,83	33,41	3,73	3,41	9,19	6,30	390,18
Tampiana	F12	RV	0,68766	13,83725	582,8	6,9	32,2	68,73	20,68	31,32	7,20	2,67	46,14	50,66	289,28
Ladanka	F14	RV	0,77255	13,84599	583	7	32,8	39,46	40,54	46,28	2,32	6,18	18,88	12,41	377,14
Toumbinde	F15	RV	0,68814	13,90215	706,3	6,9	32,8	50,53	29,78	66,18	2,98	10,31	50,53	108,68	292,33
Kalbara	F16	RV	0,66111	13,90774	605	6,8	31,5	61,26	23,68	41,87	2,71	6,46	32,03	79,16	277,52
Doumba	F37	RV	0,8406	14,00804	1150,5	6,6	29,4	128,28	48,66	70,64	6,01	21,78	294,95	98,93	294,77
Doun Diyal	F38	RV	0,84386	14,00761	582	6,4	30,9	49,08	15,63	59,19	4,57	13,53	17,12	74,23	261,48
Warigountou	F41	RV	0,84308	13,92813	545,8	7,3	30,7	36,75	30,47	49,36	4,16	5,88	18,51	0,30	347,69
Yanga 1	F44	RV	0,80184	13,93535	968	6,9	32,8	95,68	39,16	51,04	4,77	11,50	33,78	281,35	275,81
Yanga 2	F45	RV	0,80736	13,93793	1123,3	7	32,3	111,38	45,18	71,58	4,74	23,43	178,06	231,10	250,94
Lata	F60	RV	0,73856	13,86664	630	6,8	31,9	48,47	27,74	47,78	3,53	12,05	31,65	32,61	300,87
Tondi Gougou	F6	G	0,8308	13,84719	985	6,7	32,1	79,68	26,86	55,53	1,04	27,99	27,42	187,70	258,56
Tondi Gougou II	F7	G	0,83446	13,84605	976	6,8	31,4	83,66	26,48	84,06	4,77	38,86	36,31	281,33	218,20

Linlingo	F9	G	0,79126	13,86277	369	7	34	39,08	18,76	16,32	6,01	1,72	2,92	0,30	254,78
Foneko	F17	G	0,72917	14,23055	610,5	6,6	31,5	44,76	25,55	60,49	0,01	16,73	8,79	49,52	315,50
Kabangou	F18	G	0,73035	14,23062	1184,5	6,8	31,1	108,10	62,61	53,73	0,01	45,22	15,42	405,83	278,98
Fala I	F20	G	0,68854	14,21298	348,8	6,5	32,1	39,52	7,04	27,05	1,14	5,51	4,79	52,49	159,49
Zindigori	F25	G	0,65764	13,99133	350	6,5	31,2	26,29	9,36	34,53	1,62	10,74	11,94	57,45	128,39
Zindigori N	F26	G	0,65671	13,98874	665	6,7	31	55,07	22,49	69,47	3,47	14,52	12,58	32,74	372,44
Kababangou H	F27	G	0,60293	13,97608	338,5	6,6	31,5	35,34	11,03	27,80	2,13	4,88	4,99	2,66	218,01
Handaga	F28	G	0,57778	13,97346	641	6,8	31,1	50,03	25,46	58,46	5,59	11,23	8,98	37,95	356,59
Chatoumane Chatoumane cardia	F30 F31	G G	0,54651 0,54885	13,96425 13,97198	784 623	6,9 6,8	32,3 32,9	60,86 51,94	23,09 11,29	80,33 69,34	4,39 3,01	16,19 21,92	19,63 10,16	129,63 104,55	329,77 244,17
Sekomi Gorla	F33	G	0,55387	14,03962	285,1	6,5	31,6	31,05	7,94	13,06	3,78	8,28	2,22	58,81	100,41
Tondi Karia	F36	G	0,60907	14,08355	227,7	6,3	30,5	18,52	10,17	17,67	1,43	2,66	2,24	0,30	149,98
Tera Mosquée	F50	G	0,75584	14,00587	1731	6,4	32,4	215,88	45,69	57,15	8,01	106,81	28,27	690,16	129,43
Sirfi Kouara	F49	G	0,76413	13,99906	541	6,7	29,1	55,66	10,57	53,03	3,44	8,44	40,67	15,82	269,47
Tera Campt	F47	G	0,751	14,01037	286,8	6,1	33	26,24	9,11	21,28	5,17	11,69	9,99	3,32	154,61
Tera Beria	F54	G	0,72677	14,0172	542	7	32,7	33,85	25,56	54,83	5,55	9,80	22,38	4,23	318,91
Tera Pont	F48	G	0,75746	14,0109	531	6,7	31,5	42,97	18,93	53,67	3,10	15,27	30,42	22,68	270,57
Tera T7	F55	G	0,73444	14,01593	585	6,9	31,4	45,11	23,44	47,10	10,41	5,21	28,33	1,74	323,24
Tera T2	F56	G	0,74077	14,01401	441,5	6,9	31	46,72	14,38	30,28	5,87	4,04	8,79	3,02	264,47
Fogou	F57	G	0,67227	14,04778	543	6,7	32,6	55,95	10,87	39,56	3,57	4,23	6,63	26,84	277,46

Bogue II	F58	G	0,59832	14,04871	410	6,2	33	45,91	10,52	32,37	2,03	14,48	15,05	73,77	163,33
Ayoum Gam	F59	G	0,60216	14,25224	266,8	6,3	31,1	21,80	5,51	29,41	2,82	5,35	5,17	28,52	129,37
Sinessika	F61	G	0,88354	13,89807	539	6,9	32,2	36,78	20,14	63,39	2,92	10,28	17,44	16,82	306,72
SATOM	F24	G	0,731	14,01581	549,3	7,1	32,2	36,62	11,58	75,52	2,79	3,50	26,10	1,05	353,60
Begorou	F35	G	0,63666	14,03795	448	6,3	32,2	41,51	7,05	49,98	1,57	22,27	22,70	26,93	204,05
Tera Prison	P2	Altérites	0,74809	14,0066	719	7,1	32,9	74,78	27,38	33,62	6,26	42,10	21,75	138,24	211,25

Conductivité électrique (CE) en $\mu\text{s}/\text{cm}$, Température en $^{\circ}\text{C}$, Roches vertes (RV), Granitoïdes (G)

Tableau 2 : Matrice de corrélations sur les analyses globales des eaux souterraines.

Paramètres	CE	pH	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	NO ₃	HCO ₃	MT	pCO ₂
CE	1											
pH	0.12	1										
Ca	0.91	0.02	1									
Mg	0.78	0.39	0.71	1								
Na	0.55	0.32	0.39	0.42	1							
K	0.21	0.19	0.29	0.15	0.02	1						
Cl	0.80	-0.22	0.84	0.50	0.37	0.11	1					
SO ₄	0.47	0.08	0.49	0.49	0.37	0.23	0.15	1				
NO ₃	0.85	-0.09	0.89	0.62	0.33	0.10	0.91	0.18	1			
HCO ₃	0.14	0.73	-0.01	0.43	0.53	0.17	-0.22	0.13	-0.21	1		
MT	0.94	0.24	0.92	0.86	0.64	0.24	0.75	0.55	0.81	0.29	1	
pCO ₂	-0.16	-0.83	-0.10	-0.29	-0.10	-0.12	0.06	0.00	-0.10	-0.29	-0.19	1

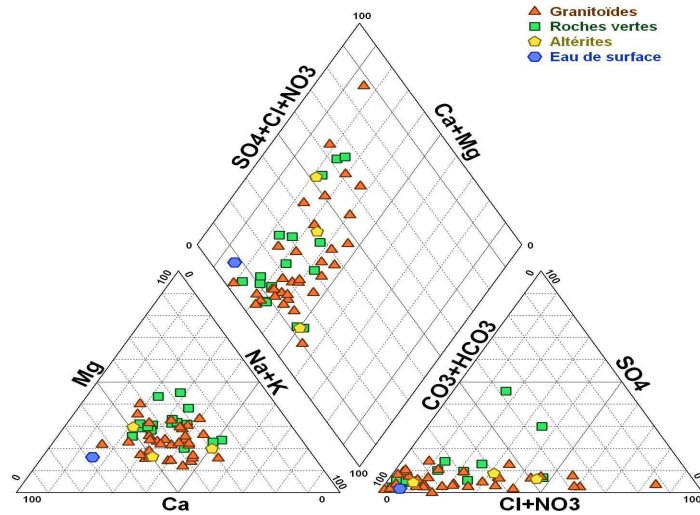


Figure 2 : Faciès chimiques de l'ensemble des eaux.

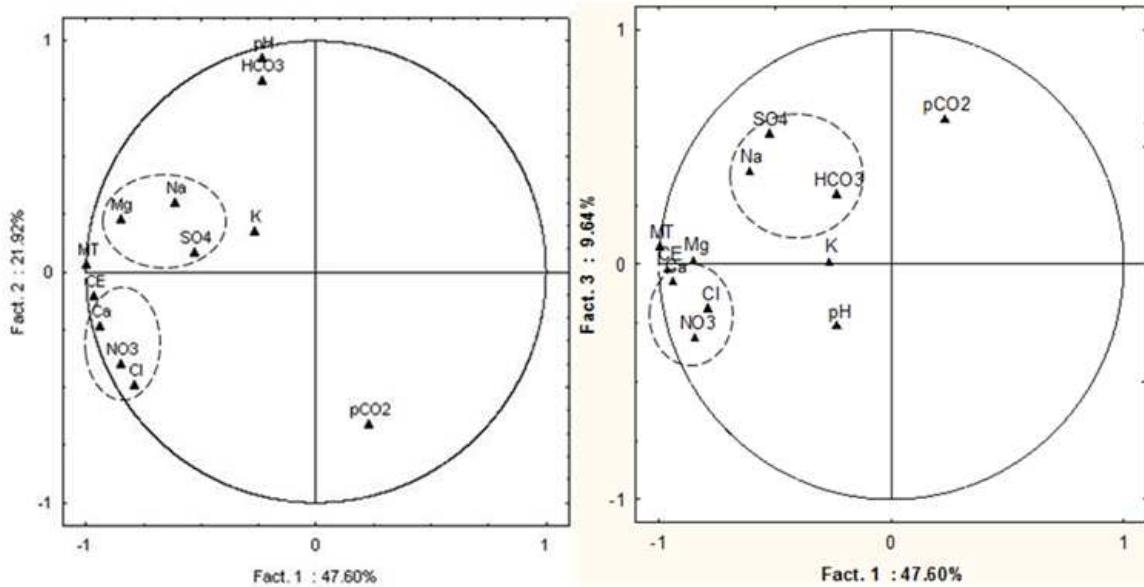


Figure 3 : Projection des variables sur les plans factoriels F₁-F₂ et F₁-F₃.

de la minéralisation de l'eau dans l'aquifère. La corrélation Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} met en évidence la relation eau-roche, tandis que la présence des nitrates en excès dans le groupe Ca^{2+} - NO_3^- - Cl^- exprime la minéralisation rapide due aux activités anthropiques. Le facteur F₂

explique près de 22% de l'inertie totale, discrimine la source principale de minéralisation et oppose la pCO_2 au groupement HCO_3^- -pH. La corrélation de l'ion HCO_3^- avec le pH montre que cet ion provient en majorité de l'hydrolyse acide des minéraux

silicatés due à la présence de CO₂ du sol. L'axe F₃ contrôlant 10% d'informations, discrimine davantage les 2 sources de minéralisations déjà identifiées. Dans le plan factoriel F₁-F₃, l'opposition du groupement Cl⁻ - NO₃⁻-Ca²⁺ à celui du HCO₃⁻-Na⁺-Mg²⁺ confirme que la production des ions composant ces deux sous-groupes est dominée respectivement par la minéralisation superficielle et l'interaction eau – roche. La

présence de l'ion Ca²⁺ entre ces deux sous-groupes montre qu'il pourrait avoir deux origines.

La projection des individus sur le plan factoriel F₁ x F₂ montre que le regroupement des échantillons se fait selon la minéralisation et le taux du CO₂ contenu dans l'eau (Figure 4). Les eaux fortement minéralisées se placent sur le pôle négatif de l'axe F₁ et celles ayant une minéralisation faible à l'opposé.

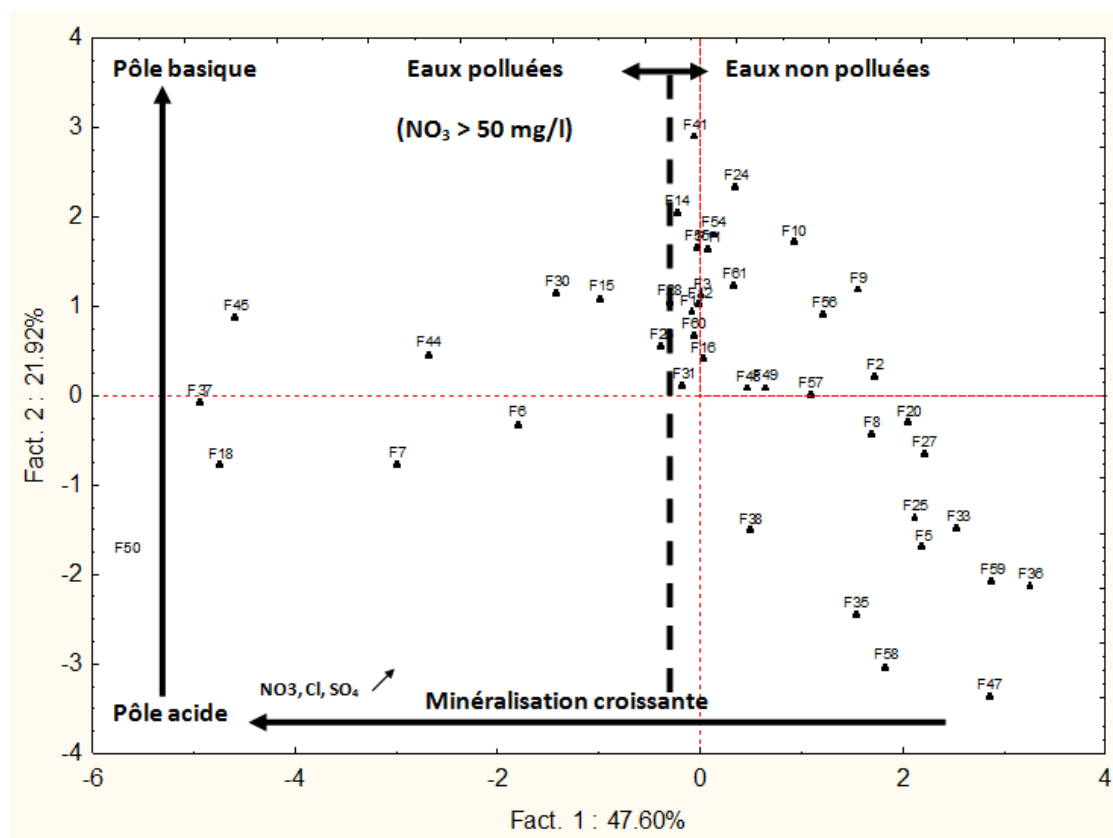


Figure 4 : Projection des individus sur le plan factoriel F₁ x F₂.

Tableau 3 : Valeurs propres et pourcentages des variances exprimées par les axes principaux.

Plans factoriels	Valeurs propres	% de variance exprimée	cumul de valeurs propres	% de variance exprimée cumulée
F1	5,71	47,6	5,71	47,6
F2	2,63	21,92	8,34	69,52
F3	1,16	9,64	9,5	79,16

DISCUSSION

Contrôle hydrogéochimique des eaux

Les eaux des aquifères profonds de socle montrent une diversité des faciès avec une dominance bicarbonaté calco-magnésien. En région de socle cristallin et cristallophyllien, le facteur le plus déterminant dans l'acquisition des cations est l'hydrolyse des minéraux silicatés. Le contact prolongé de l'eau chargée en CO_2 avec l'encaissant se traduit par un enrichissement en cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) et en ions bicarbonates. L'abondance de ces ions dans les eaux souterraines de socle de l'Afrique de l'Ouest est confirmée par plusieurs études (Oga, 2009 ; Lasm et al., 2011 ; Ahoussi et al., 2012 ; Abdou Babaye, 2012). Néanmoins, ces eaux enregistrent une faible teneur en potassium du fait de leur adsorption par les argiles de néoformation et les plantes (Oga, et al., 2009). Selon Abdou Babaye (2012), les eaux circulant dans les roches basiques seront plus riches en alcalino-terreux, alors que celles des roches acides sont à dominance alcaline (Figure 5a). À travers ce graphe, on perçoit clairement que la minéralisation des eaux est intimement liée à la nature pétrographique de l'encaissant (Adiaffi et al., 2009 ; Kouassi et al., 2012). Cela est aussi mieux discriminé par le rapport caractéristique Mg/Na . Plus de 90% des eaux de forages captant les roches acides ont un rapport $\text{Mg}/\text{Na} < 1$ alors qu'il devient négatif pour 77% des eaux circulant dans les fissures des roches basiques. Certains forages (F_3 , F_8), bien étant sur le terrain schisteux, leur proximité avec la zone de recharge perturbe cet équilibre avec l'apport superficiel de Na^+ (Lasm et al., 2011) dépassant largement le Mg^{2+} ($\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$). Par contre, d'autres forages, bien qu'ils soient sur le terrain granitique, peuvent avoir des intrusions doléritiques riches en ferromagnésiens. L'utilisation de HCO_3^- comme indicateur du processus chimique dominant de production d'ions dans les nappes de socle, est à relier

avec le mode de sa formation (Kouassi et al., 2011). Les bicarbonates sont produits suite à l'apport du CO_2 par l'eau d'infiltration, qui par réaction d'hydrolyse des silicates permet, d'une part la formation du HCO_3^- , et d'autre part, l'augmentation du pH en supposant une évolution en milieu fermé. On observe une corrélation linéaire entre les ions Na^+ et Mg^{2+} avec les bicarbonates (Figure 5b, 5c). Cette tendance à l'augmentation est moins significative avec le sodium. S'il est admis que l'ion Mg^{2+} provient en majorité de l'altération des minéraux silicatés ferromagnésiens (Ahoussi et al., 2012), une partie non négligeable de Ca^{2+} , Na^+ et K^+ pourrait avoir une origine indépendante de l'hydrolyse des minéraux (Lasm et al., 2011). Cela est prouvé par l'ACP avec un regroupement des ions $\text{Ca}^{2+}\text{-NO}_3^-\text{-Cl}^-$ opposé à celui de $\text{Mg}^{2+}\text{-Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$. La présence de deux sous-groupes au niveau du F_1 relate respectivement l'affinité des ions $\text{Ca}^{2+}\text{-NO}_3^-\text{-Cl}^-$ et $\text{Mg}^{2+}\text{-Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$ et leurs actions dans la minéralisation de l'eau. Le premier sous-groupe exprime l'influence des activités anthropiques dans l'acquisition de la minéralisation des eaux qui s'explique en partie par la présence de l'ion NO_3^- (Yaméogo, 2008 ; Adiaffi, 2008 ; Ahoussi et al., 2012).

La Figure 5d discrimine les échantillons ayant une teneur appréciable de Ca^{2+} qui s'accompagne avec des teneurs importantes en NO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} . A l'image de toutes les zones arides, la zone d'étude est soumise à une évaporation importante due aux températures élevées pendant les longues saisons sèches. Ce phénomène va favoriser la formation et la concentration des certains sels minéraux comme le gypse (CaSO_4). Le dépôt de ces sels dans les zones des fractures et leur mise en solution par l'eau d'infiltration favorisent leur migration vers les nappes (Zuppi et al., 2004 ; Ahoussi et al., 2012). Selon Schoeller (1962), le processus de la dissolution des sels refermant les ions Ca^{2+} entraîne la diminution des ions HCO_3^- et CO_3^{2-}

dans les eaux. La figure 6a met en évidence ce phénomène et par conséquent, on admet qu'une partie des ions Ca^{2+} provient de la dissolution du gypse. S'agissant de l'origine des ions NO_3^- et Cl^- , leur forte corrélation prouve une même origine superficielle différente de celle des sulfates (Figure 6b). Les points à forte minéralisation se caractérisent par des teneurs élevées en NO_3^- et Cl^- qui ne s'accompagnent pas avec celle des SO_4^{2-} . Cette différence exprimée sur les forages de Téra ($\text{NO}_3^- = 690,5 \text{ mg/l}$, $\text{Cl}^- = 106,81 \text{ mg/l}$) et de Kabangou ($\text{NO}_3^- = 405,83 \text{ mg/l}$, $\text{Cl}^- = 45 \text{ mg/l}$), qui ont des teneurs faibles en SO_4^{2-} , sont respectivement de 28,27 mg/l et 15,42 mg/l. L'isolement de certaines fractures favorisent le contact prolongé eau-roche et limite l'arrivée d'eau venant d'autres fractures. Les hétérogénéités pétro-structurale et géomorphologique accentuent la forte variabilité des charges minérales des eaux souterraines de socle (Lasm et al., 2011 ; Ahoussi et al., 2012 ; Kouassi et al., 2012).

Pollution des nappes

Les activités anthropiques constituent un aspect important dans l'acquisition de la minéralisation des eaux. L'agriculture et l'élevage apportent divers éléments chimiques (Na^+ , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , ...) qui seront entraînés jusqu'à la nappe par les eaux d'infiltration (Schwiede et al., 2005 ; Ahoussi et al., 2012). L'accumulation de ces éléments dissous dans les nappes peut parfois dépasser les normes de potabilité et augmente de ce fait le risque des maladies d'origines hydriques. L'ACP réalisée sur les eaux souterraines (Figure 3) montre que l'ion NO_3^- est d'origine superficielle. Si on admet l'hypothèse selon laquelle les nitrates sont d'origines superficielles, la nappe aurait donc sa teneur maximale en fin des saisons pluvieuses. La Figure 7 montre que la totalité des ouvrages atteint le seuil maximum en nitrates pendant la saison pluvieuse. Cette observation illustre bien l'apport de cet ion par les eaux

d'infiltration récentes (Hamza et al., 2007 ; Lasm et al., 2011). On remarque aussi que les aquifères des roches basiques sont moins sensibles à la pollution que ceux des roches acides. Cette faible sensibilité est due à la nature géologique de leurs produits d'altération composés des matériaux à dominance argileuse, moins perméables que ceux des roches granitiques, mais aussi dû à la présence des matières organiques dans les argiles favorisant les activités bactériennes. L'importance des pollutions nitrées (40% d'ouvrages) dans cette région aride sans activités agricoles de grande envergure impose la recherche des différentes sources de contamination. Les premiers indices indiquent que cet ion arrive dans la nappe par les eaux d'infiltration et que tous les forages contaminés se trouvent soit à proximité des mares ou dans le creux des dunes pour les zones rurales, soit proche des latrines ou d'égout pour le centre sémi-urbain de Téra. La zone d'étude est par essence une zone d'élevage où les animaux et les hommes sont alimentés par les eaux des forages (ou puits) pendant toute la période sèche (8 mois). Cette pollution est certainement liée au long séjour des excréments des animaux aux abords des points d'eau lors de leur abreuvement (Schwiede et al., 2005 ; Chibane et al., 2010). Cette observation est cohérente en ce sens que tous les points d'eau ruraux contaminés sont à proximité des villages d'éleveurs peulhs ou touaregs. Donc, la teneur anormalement élevée des nitrates dans les eaux souterraines est liée aux activités anthropiques accentuées par le caractère pastoral de la zone. On remarque bien que l'origine des nitrates en zone de socle de l'Afrique de l'Ouest est très diversifiée (Yaméogo, 2008 ; Ahoussi et al., 2012). Les travaux de Schwiede et al. (2005) ont prouvé la présence des teneurs élevées de nitrate sous les termitières et les arbres (acacia). La disparition de ces derniers suite à la déforestation aigüe constatée ces dernières années pourrait être à l'origine de la

concentration élevée des ions NO_3^- dans les eaux souterraines. Ce fait est observé dans les pays sahéliens à travers les défrichages d'arbres pour les utilisations domestiques, mais aussi la baisse de la pluviométrie entraînant la disparition des certains gros arbres (Favreau, 2009) qui favorisera à son tour la drainance d'azote non fixé par les eaux d'infiltration vers la nappe. Ainsi, la pollution des forages profonds est due à l'héritage d'une forte activité biologique au moment de la recharge. En revanche, certaines études dans les villes Ouest africaines (Yaméogo, 2008 ;

Ahoussi et al., 2010) lient cette pollution aux activités anthropiques de la population entraînant la production des déchets domestiques. La proximité des ouvrages très pollués avec le réseau d'égout et des latrines montre l'effet de la contamination anthropique des eaux souterraines. La présence des teneurs importantes des nitrates rencontrées dans des nappes profondes de socle que proches de la surface, est due aux mécanismes d'écoulement préférentiel favorisant leur migration rapide et leur dispersion à travers des macropores dû aux fractures.

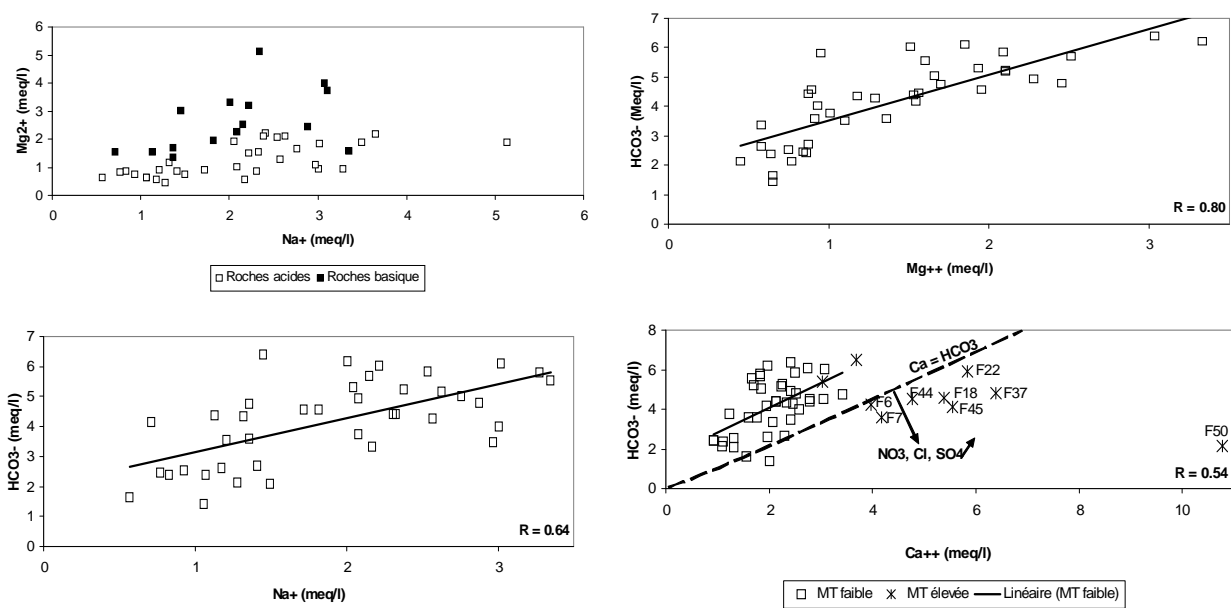


Figure 5 : Relations Mg^{2+} et Na^+ (a) et cations avec les bicarbonates (b, c, d).

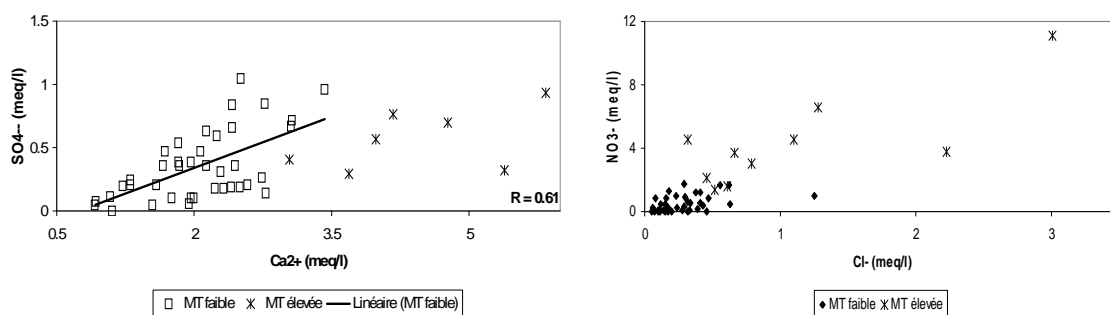


Figure 6 : Relation entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} (a) et NO_3^- avec Cl^- (b).

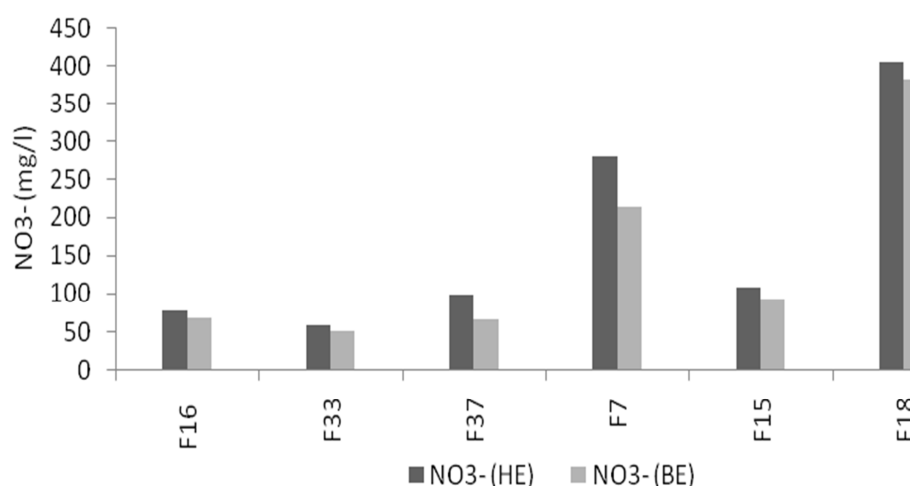


Figure 7 : variation de NO_3^- entre hautes eaux (HE) et basses eaux (BE).

Conclusion

L'étude hydrogéochimique des eaux souterraines a permis de caractériser les aquifères de socle. Les eaux de ces aquifères ont un pH acide avec une tendance vers la neutralité. Dans l'ensemble, ces eaux sont faiblement minéralisées. Cependant, on rencontre des eaux très chargées avec des valeurs de conductivité électrique pouvant atteindre $1731 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cette hausse de la minéralisation est due à la contamination des eaux à des teneurs élevées de NO_3^- rendant celles-ci impropres à la consommation humaine. La classification chimique des eaux révèle une dominance des eaux bicarbonatées calco-magnésiennes (70%), suivies des eaux chloruro-sulfatées calciques (25%) et des eaux bicarbonatées sodiques (5%). L'origine de la minéralisation dans les aquifères de socle, est en partie liée à la nature pétrographique et géochimique de l'encaissant, par l'action d'hydrolyse des minéraux silicatés, mais aussi aux apports superficiels. Les nitrates proviennent des pollutions anthropiques notamment les effluents d'égout ou des latrines dans le centre semi-urbaine, et des déjections animales dans les zones rurales. Les études isotopiques permettront de préciser à l'avenir ces hétérogénéités hydrochimiques,

afin de comprendre leur rôle dans l'hydrodynamisme des nappes, mais aussi de bien discriminer les sources des ions NO_3^- et SO_4^{2-} .

CONFLIT D'INTERETS

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont aucun conflit d'intérêts.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée avec l'aide logistique de l'Université Abdou Moumouni (UAM). Nous lui exprimons notre profonde gratitude.

RÉFÉRENCES

- Abdou A, Bonnot H, Bory KD, Chalamet D, St Martin M, Younfa I. 1998. Notice explicative des cartes géologiques du Liptako à 1/100 000 et 1/200 000. Ministère des mines et de l'énergie du Niger, p.64.
- Abdou Babaye MS. 2012. Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako Niger). PhD Thesis, Université Liège, p235.
- Adiaffi B. 2008. Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des

- aquifères de la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Paris Sud, p.230.
- Adiaffi B, Marlin C, Oga YMS, Massault M, Noret A, Biémi J. 2009. Palaeoclimatic and deforestation effect on the coastal fresh groundwater resources of SE Ivory Coast from isotopic and chemical evidence. *J. Hydrol.*, **1-2**: 130-141. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.02.046.
- Ahoussi KE, Soro N, Koffi BY, Soro G, Biémi 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. DOI : <http://ajol.info/index.php/ijbcs>.
- Ahoussi KE, Youan TM, Loko S, Adja MG, Lasm L, Jourda JP. (2012). Étude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoprotérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou. *Afriq. Sci.*, **08**(3) : 51 – 68. <http://www.afriquescience.info/document.php?id=2565>.
- Chibane B, Boutaleb A, Lacroix M. 2010. Etude hydrochimique et Approche isotopique en Région semi-aride: cas du Synclinal de Djelfa (Algérie). *Eur. J. Sci. Res.*, **45**(2): 270-290. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>.
- Dewandel B, Lachassagne P, Wyns R, Marechal JC, Krishnamurthy NS. 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. *Journal of Hydrology*, **330**: 260–284. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.026.
- Elbaz-Poulichet F, Favreau G, Leduc C, Seidel JL. 2002. Major ion chemistry of ground waters in the Continental Terminal water table of southwestern Niger (Africa). *Applied Geochemistry*, **17**: 1343–1349. PII: S0883-2927(02)00024-0.
- Favreau G, Cappelaere B, Massuel S, Leblanc M, Boucher M, Boulain N, Leduc C. 2009. Land clearing, climate variability, and water resources increase in semiarid southwest Niger: A review. *Water Resour. Res.*, **45** : 1-18. DOI:10.1029/2007WR006785.
- Girard P. 1993. Techniques isotopiques (¹⁵N, ¹⁸O) appliquées à l'étude des Nappes des altérites et du socle fracturé de l'ouest africain. Étude de cas: l'Ouest du Niger. Thèse de doctorat Université Québec, Montréal, p141.
- Hamza MH, Added A, France A, Rodriguez R. 2007. Validité de l'application des méthodes de vulnérabilité DRASTIC, SINTACS et SI à l'étude de la pollution par les nitrates dans la nappe phréatique de Metline–Ras Jebel–Raf Raf (Nord-Est tunisien). *C. R. Geoscience*, **339** : 493–505. doi:10.1016/j.crte.2007.05.003.
- Kouassi MA, Ahoussi EK, Koffi BY, Ake YA, Biémi J. 2012. Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **6**(1): 504-518. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.45>.
- Kouassi MA, Yao AK, Ake YA, Biémi J. 2011. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **5**(5): 2155-2169. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i5.35>
- Leblanc M, Favreau G, Massuel S, Tweed S, Loireau M, Cappelaere B. 2008. Land clearance and hydrological change in the Sahel. SW Niger. *Global and Planetary Change*, **61**(3-4): 135-150. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.08.011.
- Lasm T, De Lasmé O, Oga MSY, Youan Ta M, Baka D, Kouame F, Yao TK. 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.
<http://ajol.info/index.php/ijbcs>
- Machens E. 1973. Contribution à l'étude des formations du socle cristallin et de la couverture sédimentaire de l'Ouest de la République du Niger. Mém. BRGM, (82) : p167.
- Oga MS, Lasm T, Yao TK, Soro N, Saley MB, Kouassi D, Gnamba F. 2009. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fractures: Cas de la Région de Tiassalé en Côte D'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, **31**(1): 72-87. <http://www.eurojournals.com/ejsr.htm>
- Ousmane B. 1988. Étude géochimique et isotopique des aquifères du socle de la bande sahélienne du Niger (Liptako, Sud-Maradi, Zinder-Est). Thèse de doctorat d'Etat, Université Niamey, p175.
- Schoeller H. 1962. *Les Eaux Souterraines : Hydrologie Dynamique et Chimique, Recherche, Exploitation et Évaluation des Ressources*. Edi. Masson et C^{ie}. ; 642.
- Schwiede M, Duijnsveld WHM, Bottcher J. 2005. Investigation of processes leading to nitrate enrichment in soils in the Kalahari Region, Botswana. *Physics and Chemistry of the Earth*, **30**: 712–716. doi:10.1016/j.pce.2005.08.012.
- Soumaila A. 2000. Étude structurale, pétrographique et géochimique de la ceinture de Diagorou-Darbani, Liptako, Niger Occidental (Afrique de l'Ouest). Thèse de doctorat, Université Franche-Comté, p253.
- Taylor C, Lambin E, Stephenne N, Harding R, Essery R. 2002). The influence of land use change on climate in the Sahel. *J. Climate*, **15**: 3615–3629. DOI: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015)
- Yameogo OS. 2008. Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso, qualité et vulnérabilité. Université Avignon et pays de Vaucluse, Université Ouagadougou, p245.
- Zuppi GM, Jean-Paul NJP, Martial DM, Darmendrail X, Fudral S, Jusserand C, Nicoud G. 2004. Eaux fortement minéralisées et circulations profondes dans le socle. Exemple des Alpes franco-italiennes. *C. R. Geoscience*, **336** :1371–1378. doi:10.1016/j.crte.2004.08.004