

Caracterisation Hydrogeochimique Des Eaux Souterraines Des Aquiferes De Socle De La Commune De Natitingou Au Benin

Tinantikpa N'tcha, MSc

Direction Générale des Hydrocarbures et autres Combustibles Fossiles
Ministère de l'eau et des Mines, Cadjèhoun, Bénin

Wèré Gédéon Sambienou, PhD

Abdoukarim Alassane (Phd, Maître De Conférences)

Moussa Boukari (Phd, Professeur Titulaire)

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Institut National de l'Eau (INE),
Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

Christophe Kaki (PhD, Professeur Titulaire)

Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques,
Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin

Daouda Mama (PhD, Professeur Titulaire)

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Institut National de l'Eau (INE),
Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

Doi:10.19044/esj.2020.v16n6p65

[URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p65](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p65)

Résumé

L'objectif de cette étude est de préciser la nature hydrochimique des eaux souterraines de la commune de Natitingou et d'identifier les processus responsables de leur minéralisation, afin de contribuer à leur gestion durable. La méthodologie appliquée est basée sur une combinaison des techniques hydrochimiques et d'analyses statistiques (ACP et CHA). Les résultats issus des analyses physico-chimiques montrent une minéralisation comprise entre 40 et 3240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour une moyenne de 465,64 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux souterraines étudiées sont généralement acides à neutres, avec un pH variant entre 4,1 et 7,3. Elles se classent, de par leurs anions, en deux principaux faciès hydrogéochimiques : celui bicarbonaté (75% des eaux) dont 45% de bicarbonaté calcique et 30% de bicarbonaté sodique et celui chloruré (25% des eaux) dont 17% de chloruré sodique et 8% de chloruré calcique. Les différentes corrélations entre les ions majeurs et les analyses statistiques ont permis d'identifier trois processus hydrogéochimiques qui participent à la minéralisation des eaux. Le processus dominant est l'hydrolyse des minéraux

silicatés, suivi des échanges cationiques, puis l'apport anthropogénique qui influence la minéralisation en polluant les eaux.

Mots clés : Eaux Souterraines, Faciès Hydrogéochemique, Analyse En Composantes Principales, Classification Hiérarchique Ascendante, Minéralisation, Commune De Natitingou

Hydrogeochemical Characterization of Groundwater In Basement Aquifers in the Commune of Natitingou in Benin

Tinantikpa N'tcha, MSc

Direction Générale des Hydrocarbures et autres Combustibles Fossiles
Ministère de l'eau et des Mines, Cadjèhoun, Bénin

Were Gedeon Sambienou, PhD

Abdoukarim Alassane (Phd, Maître De Conférences)

Moussa Boukari (Phd, Professeur Titulaire)

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Institut National de l'Eau (INE),
Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

Christophe Kaki (PhD, Professeur Titulaire)

Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences et Techniques,
Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Bénin

Daouda Mama (PhD, Professeur Titulaire)

Laboratoire d'Hydrologie Appliquée, Institut National de l'Eau (INE),
Université d'Abomey-Calavi, Cotonou, Bénin

Abstract

The aim of this study is to specify the hydrochemical nature of the groundwater in the commune of Natitingou and to identify the processes responsible for its mineralization, in order to contribute to its sustainable management. The methodology applied is based on a combination of hydrochemical techniques and statistical analysis (PCA and AHC). The results of the physico-chemical analyses show a mineralization between 40 and 3240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ for an average of 465.64 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The groundwater studied is generally acidic to neutral, with a pH varying between 4.1 and 7.3. They are classified, by their anions, in two main hydrogeochemical facies: bicarbonate (75% of the waters) including 45% calcium bicarbonate and 30% sodium bicarbonate

and chlorinated (25% of the waters) including 17% sodium chloride and 8% calcium chloride. The different correlations between the major ions and the statistical analyses made it possible to identify three hydrogeochemical processes that participate in the mineralization of the waters. The dominant process is the hydrolysis of silicate minerals, followed by cationic exchanges, then the anthropogenic contribution which influences the mineralization by polluting the waters.

Keywords: Groundwater, Hydrogeochemical facies, Principal component Analysis, Ascending hierarchical classification, Mineralization, Natitingou Commune

Introduction

L'étude de l'origine et du processus de minéralisation des eaux souterraines est très importante pour l'évaluation qualitative et la gestion de la ressource surtout en régions de socle comme celle de la commune de Natitingou. Dans ces régions, la rareté et la mauvaise qualité des eaux de surface ont pour conséquence, l'exploitation intensive des eaux souterraines sans prise en compte de la vulnérabilité des aquifères à la pollution. Aussi, selon Matini *et al.*, 2009, la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension ou dissoutes de nature minérale ou organique, détermine sa qualité. Cette qualité peut être altérée lorsque des substances extérieures indésirables voire toxiques entrent en contact avec l'aquifère.

La commune de Natitingou est l'une des communes du Bénin où la population est majoritairement rurale. Ainsi, l'agriculture, principale activité socio-économique pourrait jouer un rôle considérable sur la qualité de l'eau. Diverses autres activités menées par les populations urbaine et rurale, ne respectent pas les normes environnementales requises. En conséquence, fournir de l'eau saine pour la consommation humaine devient de plus en plus un problème dans la Commune de Natitingou en l'occurrence, du fait de la contamination chimique des nappes. Ainsi, la prévention systématique est de loin préférable à celui qui consiste à traiter les eaux pour l'alimentation en eau potable lorsque leur qualité est détériorée. C'est dans cet esprit que s'inscrit cette étude qui a pour but d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la Commune de Natitingou et d'expliquer les phénomènes à l'origine de leur minéralisation. Elle est basée sur différentes techniques hydrochimiques et d'analyse statistique multivariée.

1. Description De La Zone D'étude

Située au centre du département de l'Atacora dans le Nord-Ouest du Bénin, la Commune de Natitingou s'étend entre les méridiens 1°12'11''et

1°36'43'' de longitude est et les parallèles 10°00'00'' et 10°27'36'' de latitude nord (**Fig. 1**), avec des altitudes variant entre 300 et 450 m. Elle s'allonge dans une sorte de vallée formée par les deux bourrelets de montagnes de quartzites qui l'entourent. Sur le plan géologique, la Commune de Natitingou, se situe dans l'unité structurale de l'Atacora (Pougnnet, 1957).

La commune de Natitingou est à cheval sur trois grandes unités géomorphostructurales (**Fig. 1 et 2**) d'égales extensions géographiques approximativement : (i) au Nord-Ouest, la bordure orientale de l'unité structurale du Buem constituant la plaine de Tanguiéta, constituée de schistes formant des séquences de métamixites, de métasilexites, d'itabirites et de cipolins calco-dolomitiques; (ii) au Nord-Est, l'unité structurale de l'Atacora, à dominante quartzitique et subdivisée en anticlinorium de Tchakalakou, synclinorium de Toucountouna, zone monoclinale de Natitingou et anticlinorium de Kotopounga ; (iii) au Sud, la bordure occidentale des unités internes des Dahomeyides (Affaton, 1987) constituée de micaschistes quartzeux à deux micas, grenats et tourmaline, associés à des para- et orthogneiss. Ces dernières formations représentent les restes métamorphisés d'une ancienne série sédimentaire d'âge pré-panafricain, probablement kibarien (Mésoprotérozoïque), voire éburnéen selon les âges conventionnels de 1708 ± 220 Ma et 1925 ± 90 Ma obtenus sur les orthogneiss de Kouandé (Bonhomme, 1962).

2. Cadre Hydrogéologique

Du point de vue hydrogéologique (**Fig. 2**), trois différentes zones hydrogéologiques sont distinguées, correspondant aux trois unités géomorphostructurales décrites supra (Ahissou & Goudalo, 2004) :

- la zone à réservoir essentiellement schisteux ;
- la zone à réservoir essentiellement quartzitique ;
- la zone réservoir migmatito-gneissique.

La zone à substratum schisteux : située au Nord-Ouest, elle est composée de schistes avec des intercalations de filons quartzeux ; ces schistes appartiennent à la formation de Tagayéï. C'est une zone où les venues d'eau sont liées à la présence des filons et/ou filonnets de quartz et à des intercalations de quartzites. Les épaisseurs de la couche d'altérites sont inférieures à 25m. Les débits sont généralement faibles et la recharge très lente (Géohydraulique, 1985).

La zone à substratum quartzitique : située au Nord-Est, elle est représentée par les sites situés sur les versants et les plateaux des collines de quartzites micacées ; c'est la zone la plus vaste, avec des formations plissés à certains endroits et présentant plusieurs niveaux de fracturation, et des fractures parfois remplis de quartz. Néanmoins, sa productivité est meilleure à celle de la zone précédente (Géohydraulique, 1985).

La zone à substratum migmatito-gneissique : située au Sud, elle est caractérisée par des couches d'altérites susceptibles d'emmagasiner une certaine quantité d'eau qui peut être localement améliorée par l'existence de différents réseaux de fractures aux mailles parfois serrées surtout si celles-ci ne sont pas remplies par les argiles d'altération. C'est la zone potentiellement favorable où on obtient un débit moyen d'exploitation atteignant $10\text{m}^3/\text{h}$.

Pour toutes ces zones, les nappes sont contenues dans deux types de réservoirs (Ahissou & Goudalo, 2004) :

- un réservoir supérieur fait d'altérites et des résidus provenant de la désagrégation mécanique de la roche mère. Les forages effectués dans ces formations aquifères présentent une succession d'altérites cuirassée ou gravillonnaire, d'altérites argileuses puis d'arènes. l'épaisseur de ces altérites a été évaluée à 17 m en moyenne Sogreah-Scet (1997) ;
- un réservoir inférieur constitué de fissures et de fractures affectant le socle et favorisant l'infiltration de l'eau dans les roches cristallines. Ce type de réservoir surmonte la roche saine. Les fractures profondes s'étendent latéralement sur des dizaines de kilomètres parfois et constitue alors des réservoirs relativement favorables.

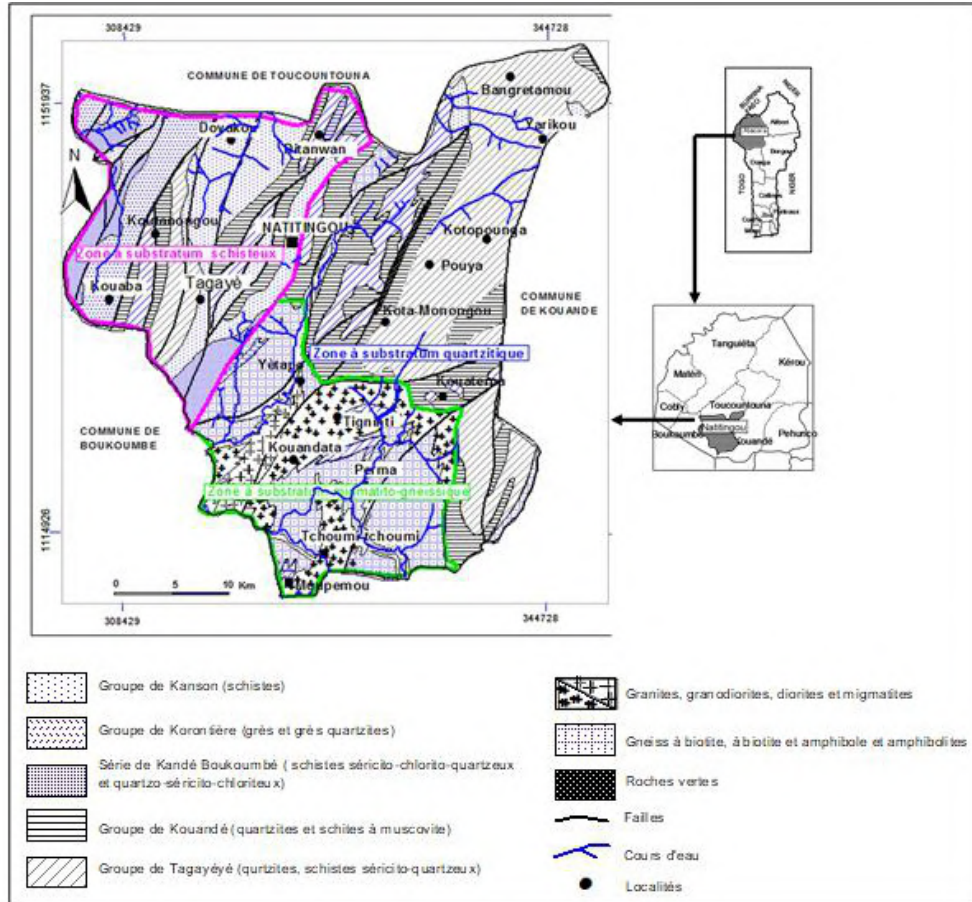


Figure 1 : Localisation et géologie de la zone d'étude

3. Matériel Et Methodes

3.1- Echantillonnage

L'échantillonnage a été réalisé sur les eaux souterraines captées par les forages et les puits dans la Commune de Natitingou (**Fig. 2**). Lors de cette campagne, les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1,5 litre, préalablement lavées à l'acide chlorhydrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été rincées trois fois avec l'eau à prélever. Au niveau des puits, l'eau est prélevée à l'aide d'une puisette puis embouteillée de façon à éviter l'emprisonnement des bulles d'air. Par contre, au niveau des forages, le prélèvement des échantillons d'eau a été direct à la pompe manuelle.

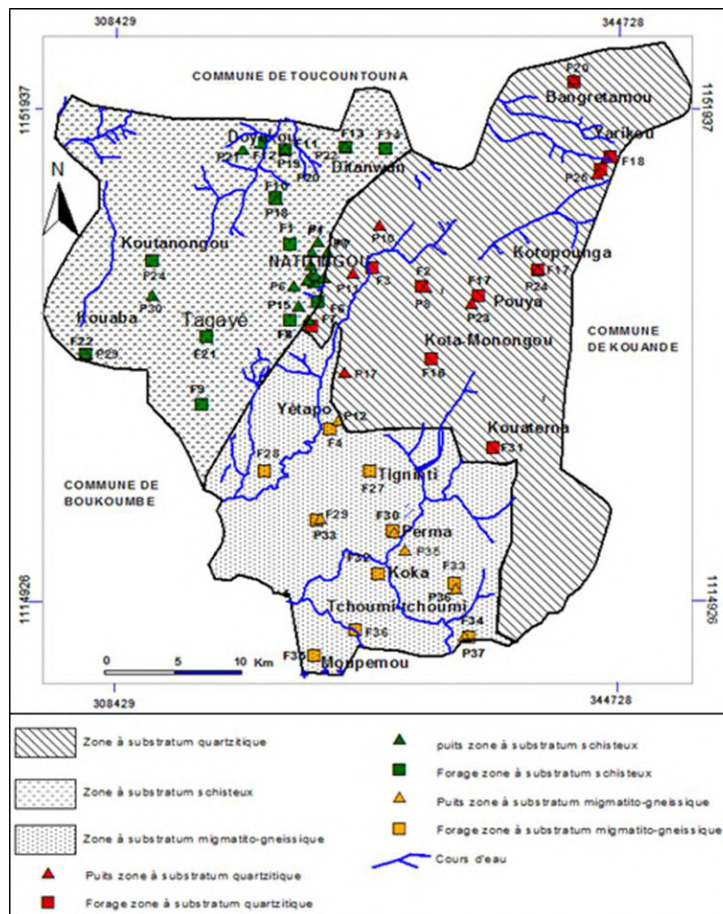


Figure 2 : Localisation des puits et forages dans la commune de Natitingou

Les échantillons ainsi prélevés ont été conservés au frais dans le laboratoire de la Société National des Eaux du Bénin (SONEB) de Natitingou pendant toute la durée de la campagne de terrain. Ils ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire pour analyse. Sur le terrain, les mesures des paramètres physico-chimiques in-situ ont concerné la température, le pH, la conductivité, les Solides Totaux Dissous (TDS), l’oxygène dissous. Les mesures du pH ont été faites avec le pH mètre RS 232 CYBER CAN 200. Le même instrument a servi aux mesures de la température. Les paramètres tels que la conductivité électrique, l’oxygène dissous et le TDS ont été mesurés à l’aide de l’appareil multiparamétrique CONSORT C532. Les mesures ont été faites courant septembre-octobre 2009.

3.2- Analyse

Un total de 73 échantillons d’eau prélevé, a été analysé au Laboratoire d’Hydrologie Appliquée (LHA) de l’Institut National de l’Eau de l’Université

d'Abomey Calavi à l'aide du chromatographe ionique DIONEX-ICS 1000. Les paramètres chimiques analysés sont : Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, F⁻, Br⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻, ainsi que les sels nutritifs de NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, et le PO₄²⁻. Les résultats de ces analyses sont reportés dans le **tableau 1**. Ces résultats ont été testés pour l'équilibre des charges ioniques selon la formule suivante (Freeze & Cherry, 1979) :

$$BalanceIonique = 100 \times \left(\sum Z \cdot m_c - \sum Z \cdot m_a \right) / \left(\sum Z \cdot m_c + \sum Z \cdot m_a \right)$$

Z représente la valeur absolue de la valence ionique, m_c la molalité des espèces cationiques et m_a la molalité des espèces anioniques.

Pour tous les échantillons, l'erreur analytique sur l'équilibre entre les cations et les anions ne dépasse pas 5% (-0,7% à 5%), ce qui signifie que les résultats des analyses de laboratoire sont valables pour l'interprétation.

Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la Commune de Natitingou.

Ech.	pH	T°C	CE	HCO3	Cl	NO3	PO4	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca	NO2	F	Br	TDS	Salinité
FO1	4,86	29	43,8	15	1,4	0,62	0,06	0,02	2,4	0,23	1,2	0,44	1,91	0,02	0	0	42	0
P1	6,27	28	366	12	20	13,95	0,22	2,07	14,1	0,46	3,2	0,64	3,95	0	0	1,3	355	0
P2	4,59	27	315	78	0,3	0,65	0,18	0	23,8	0,36	3,8	0,73	3,03	0	0	0,1	304	0
P3	5,46	27	712	200	0,4	1,22	0,2	0,12	20	0,29	4,6	12,4	28	0,04	0	0	690	0
P4	5,68	29	1307	325	1,8	5,05	0,06	0,11	74	1,84	20	4,85	35,9	0,14	0	0,1	1268	0,4
P5	5,82	28	3240	12	285	437,7	49,4	0,02	178	20,2	73	13,9	47,5	0	1,7	0	71	1,6
P6	6,61	29	622	175	13	13,77	0,64	2,81	18,8	1,1	9,5	14,1	27,7	0	0	0	604	0
P7	5,21	27	87,6	2	21	70,37	0,18	0,05	4,19	0,07	1,2	0,37	2,9	0	0	0	82	0,1
FO2	4,83	29	50,7	15	2,1	0,35	0	0,15	3	1	2,2	0,27	1,6	0	0	0,1	49,1	0
P8	5,96	30	188	71	0,1	0,07	0,23	0,02	11,6	0,67	6,3	0,86	11,2	0	0	0	183	0
P9	5,96	29	1699	194	0	0,06	0,06	0,44	43,7	0	16	4,8	17,4	0,02	0	0	1648	0,7
P10	6,88	29	478	121	3,3	5,16	0,44	1,9	3,78	0	3,8	1,95	35,7	0	0	0	464	0
FO3	6	28	584	164	3,1	0,13	4,61	0,03	23,8	0,27	2,6	10,5	22,5	0	0	0	567	0
P11	6,4	27	665	172	9,4	4,83	4,77	0,03	8,64	0,48	5,1	10,8	41,3	0,15	0,1	0,1	645	0,1
FO4	5,9	30	674	206	3,1	1	1,33	0,03	18,8	0	4	12,4	28,3	0,97	0	0	653	0
P12	6	29	239	161	4,3	0,26	0,41	0,1	38,2	4,68	13	2,26	17,2	2,3	0	0	232	0
Ech.	pH	T°C	CE	HCO3	Cl	NO3	PO4	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca	NO2	F	Br	TDS	salinité
F5	4,1	29	783	41	27	96,28	0,25	0,31	24,6	3,07	14	4,6	28,9	0	0	0	760	0,1
P13	5,7	28	1488	367	2	3,3	1,68	0,11	61,9	0,81	33	10,6	46,2	0,07	0	0	1444	0,6
FO6	5,3	25	81,5	36	1,6	0,57	4,1	0,04	2,98	0,46	2	0,82	9,44	0,05	1	0,1	79	0
P14	5,1	29	373	35	14	50,78	6,71	0,02	23,4	0	2,3	0,7	9,5	0,08	0,5	0	361	0
FO7	6	28	47,8	5	1,7	1,17	1,54	0,04	0,76	0,08	1,2	0,16	1,09	0,02	0	0	46	0
P15	7,1	28	363	15	18	54,7	0	1,38	13,2	0,12	1,8	1,34	14,4	0	0	0	352	0
FO8	5,4	29	101	31	2,8	1,27	0,16	0,04	4,62	0	2,4	0,3	5,95	0,02	0	0	98	0
P16	6,8	29	592	170	0	0,21	1,6	0,08	5,23	0	3,2	1,26	52,6	0,11	0	0,3	573	0
FO9	5,3	28	69,4	194	1,9	0,93	0,13	0,02	6,62	1,06	3,2	1,03	3,8	0,21	0	0	67	0

P17	4,8	27	50,6	15	1,7	1,22	1	0,13	1,68	0	0,6	1	2,61	0,1	0,5	0	49	0
F10	5,93	29	208	351	0,1	0,03	0,47	0,1	78,1	0,98	21	5,14	37,7	0,02	0	0	202	0
P18	5,74	29	145	74	3	0,03	2,74	0,03	8,93	1,06	3,9	1,06	12,5	0,24	0	1	141	0
F11	6,39	30	416	150	1,3	1,23	1,77	1,22	16,3	0,4	2,3	6,62	16,1	0,12	0	0	404	0
P19	11,2	30	2120	280	0,1	0,02	0,08	0,03	3,3	7,1	29	0,17	68	0,14	0	0	400	0,9
P20	5,15	28	106	1	3,8	20,82	0,02	0,54	1,36	0,13	0,6	0,1	0,53	0	0	0,3	102	0
F12	6,75	29	278	162	0,2	0	0,43	0,03	22,7	0,4	1,3	7,27	29,8	0,01	0	0,4	270	0
P21	6,13	28	699	91	11	10,26	0,07	3,24	30,8	0,58	4,6	0,37	14,5	3,4	0	0	678	0,1
F13	4,97	30	44,9	6	1,3	0,1	0,37	0,03	1,34	0,1	0,8	0,27	0,92	0,01	0	0	43	0
F14	4,94	29	40	83	1,3	2,38	0,3	0,05	3,6	0,1	3,1	1,4	25	0	0	0	39	0
P22	4,82	28	271	15	11	37,13	1,4	1,78	6,93	0,47	8,1	2,55	9,57	0	0	0	263	0
F15	4,93	28	137	142	8,2	10,31	0,4	0,23	37,8	4,4	21	0,93	10,5	0	0	0	133	0
F16	4,76	28	44,6	3	2,9	4,32	0,23	0,06	1,91	0,12	0,9	0,35	1,38	0	0	0,1	43	0
F17	4,71	28	145	41	0,2	0,55	0,13	0,06	7,9	0,3	2,7	0,88	3,71	0,03	0	0	141	0
P23	5,93	27	263	56	9,7	27,11	3,43	0,02	15,5	0,92	8,7	1,08	13,2	0,7	0,4	0	255	0
F18	4,92	27	40,1	3	0,1	0,01	0,47	0,04	1,98	0,11	0,5	0,16	1,9	0,02	0	0	39	0
P24	4,53	26	604	3	26	133,7	0,62	0,73	19	0,34	11	3,3	14	0	0	0	586	0
F19	4,69	28	122	37	5,5	18,34	0,77	0,3	4,68	0,13	2,5	0,51	3,03	0	0	0	118	0
P25	5,52	28	259	54	5,6	18,05	0,33	0,08	17,7	0,52	4,3	0,35	5,8	0	0	0	251	0
F20	4,6	28	444	4	18	25,62	0,46	1,67	22,6	0,25	14	1,56	6,25	0,3	0	0	431	0
P26	6,21	27	572	80	17	39,43	7,67	0,02	16,1	0	12	1,35	29,2	0	0	0	556	0
F21	4,6	28	90,1	35	6,1	10,51	0,05	0,36	3,73	0,11	1,7	0,43	2,92	0	0	0	87	0
P28	5,59	27	636	31	31	97,78	0,4	5,68	17,7	0,63	41	3,48	14,1	0	0	0	617	0,1
F22	5,12	29	162	42	6,2	14,32	11	0,04	2,47	0	3,6	1,41	11,4	0,4	0	0	157	0
F23	5,84	29	177	22	3,4	6,03	1,52	0,03	1,56	0	3,2	1,35	11,5	0,3	0	0	172	0
P29	5,64	30	106	67	4,1	0,13	0,13	0,2	17,1	0,9	6	1,25	7,83	0,08	0	0	103	0
F24	5,1	29	75,8	18	2,4	4,2	0,22	0,17	3,76	0,15	2,9	0,85	3,44	0	0	0	72	0
Ech.	pH	T°C	CE	HCO3	Cl	NO3	PO4	SO4	Na	NH4	K	Mg	Ca	NO2	F	Br	TDS	salinité
P30	6,24	27	174	23	2,7	2,46	0	0,63	2,33	0,2	0,9	0,96	5,26	0,02	0	0	169	0
F25	4,81	29	57,8	47	2,8	0,08	0,1	1,66	4,96	0,11	1,4	0,13	2,33	0	0	0	56	0

F26	5,62	29	148	86	1,2	1,06	0,11	1,45	4,68	0,2	1,7	3,37	6,5	0	0	0	144	0
P31	5,74	28	93,3	36	0,1	0,3	0,4	0,04	8,16	0,2	2,1	0,74	2,05	0	0	0	90	0
F27	6,47	29	473	114	11	9,61	0,83	5,64	7,83	0,13	7,7	1,28	26,6	0	0	0	460	0
P32	6,35	28	485	45	11	11,83	0,75	7,17	16,8	1,64	13	0,67	5,65	0	0	0	470	0
F28	5,6	30	375	92	1,4	0,05	1,11	0,3	17,8	0	5,3	3,05	14,3	0,04	0	0	364	0
F29	6,25	29	182	35	4,4	1,11	0,44	1,04	17,7	0,31	3,6	1,6	15,5	0	0	0	176	0
F30	6,26	30	403	285	1,3	0	1,12	0,4	5,3	0,09	1,2	2,01	2,85	0	0	0	391	0
P33	6,32	29	442	45	27	30,43	0,17	2,12	25,9	0,5	2,6	0,32	14,3	0	0	0	428	0
F31	6,4	29	888	39	0,1	0,06	0,26	0,17	31,2	0,47	5,1	10,1	52	0	0	0,1	861	0,2
P34	5,9	28	205	56	5,1	0,1	3,4	0,12	5,81	0,22	2,1	0,52	12,5	0,01	0	0	199	0
F32	5,52	28	132	236	2,1	0,58	0,35	0,19	3	0,14	1,1	3,2	4,35	0	0	0,1	128	0
F33	6,6	29	938	236	12	9,9	5,63	0,02	24,3	0,8	6,1	21,2	37,8	0	4, 2	0	910	0,2
P35	6,62	28	858	201	14	9,26	1,86	5,43	23,7	0,4	5,3	5,02	45,1	0	0	0,6	831	0,2
F34	7,3	31	1661	102	5,4	0,2	0,04	175	55,3	2,57	22	19,8	58,3	0	0	0	1610	0,7
P36	5,92	30	332	36	24	18,8	0	5,38	16	0,38	4,3	3,54	9,01	0	0	0,8	322	0
F35	6,33	30	551	315	1,9	0,24	0,08	0,98	14	0,41	7,3	0,7	14,3	0	0	0	534	0
P37	5,44	31	122	132	2,2	11,72	0,16	3,24	32,8	1,5	12	3,07	16,1	0	0	0	118	0
F36	6,4	30	1201	95	4	0,02	228	0,62	27,6	0	6,2	14,4	70,3	0	1, 5	0	1165	0,4
F37	6,7	30	845	224	0	0,18	0,08	0,13	6,48	0	2	5,52	14	0	0	0,1	820	0,2

3.3- Traitement des données

Le traitement des données collectées sur les eaux souterraines de la Commune de Natitingou a été réalisé à l'aide des méthodes hydrochimiques et statistique multivariée. Pour l'étude hydrochimique, le diagramme de Piper a été nécessaire pour la classification hydrochimique des eaux. En effet, l'utilisation de ce diagramme dans le domaine de l'hydrochimie par bon nombre d'auteurs (Biémi, 1992 ; Yaméogo, 2008 ; Abdou Babaye, 2012 ; Sambiénou et *al.*, 2018b) a conduit à de très bons résultats. L'approche statistique qui a été utilisée pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux, le regroupement des eaux et identifier les facteurs responsables de ces regroupements est basée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Leur application dans l'étude hydrochimique des eaux a été réalisée par plusieurs auteurs en Afrique et dans le monde avec des résultats très significatifs (Biémi, 1992 ; Yaméogo, 2008 ; Sambiénou et *al.*, 2018 b). L'applicabilité de la technique exploratoire ACP repose sur le choix du nombre d'axes représentant le maximum d'inertie conservée avec le minimum possible de facteurs. En général, l'ACP d'une région n'est valable que lorsque les plans factoriels étudiés retiennent au moins 70% d'informations (Faillat & Drogue, 1993 ; Abdou Babaye, 2012 ; Sambiénou, 2019). En dessous de cette limite, on considère que l'étude de la région n'a pas tenu compte d'une grande quantité d'informations. Les analyses statistiques ont porté sur les 18 variables suivants : pH, T°C, TDS, CE, Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, Cl⁻, F⁻, Br⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃²⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄²⁻ et la Salinité.

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel XLSTAT 2015. Les valeurs propres, les poids factoriels des variables et les poids factoriels des individus issus de ce traitement sont reportés dans les **tableaux 2, 3 et 4** ci-après :

Tableau 2 : Valeurs propres de l'ACP

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	6,767	3,244	1,365	1,209	1,046
Variabilité (%)	37,596	18,022	7,582	6,719	5,809
% cumulé	37,596	55,619	63,200	69,919	75,727

Tableau 3 : Poids factoriels des variables

	F1	F2	F3	F4	F5
pH	0,415	0,568	-0,299	0,404	0,173
T°C	0,191	0,471	-0,201	-0,010	-0,058
CE	0,946	0,094	-0,095	-0,010	0,037
HCO3	0,415	0,752	-0,024	0,314	0,013
Cl	0,725	-0,608	0,007	0,151	-0,060
NO3	0,665	-0,660	0,029	0,067	-0,079
PO4	0,361	0,157	0,619	0,102	0,141
SO4	0,298	0,389	-0,312	-0,455	-0,362
Na	0,836	-0,292	-0,078	-0,145	0,014
NH4	0,789	-0,472	-0,174	0,146	0,059
K	0,834	-0,331	-0,191	-0,091	-0,017
Mg	0,666	0,408	0,325	-0,220	-0,112
Ca	0,732	0,499	0,056	0,066	0,083
NO2	0,001	0,004	-0,246	-0,129	0,869
F	0,436	0,018	0,684	0,110	0,073
Br	-0,051	0,126	-0,181	0,662	-0,260
TDS	0,513	0,589	0,021	-0,332	0,003
Salinité	0,915	-0,074	-0,116	-0,006	-0,027

Tableau 4 : Poids factoriels des individus

	F1	F2	F3	F4	F5
FO1	0,719	0,141	0,007	0,015	0,013
P1	0,027	0,000	0,035	0,419	0,073
P2	0,371	0,260	0,019	0,060	0,020
P3	0,004	0,013	0,093	0,178	0,003
P4	0,438	0,018	0,026	0,087	0,001
P5	0,749	0,237	0,000	0,005	0,000
P6	0,168	0,265	0,007	0,013	0,006
P7	0,245	0,422	0,018	0,000	0,012
FO2	0,596	0,135	0,000	0,005	0,026
P8	0,381	0,014	0,033	0,000	0,006
P9	0,283	0,054	0,016	0,094	0,000
P10	0,008	0,403	0,032	0,039	0,004
FO3	0,017	0,282	0,072	0,027	0,003
P11	0,084	0,236	0,034	0,006	0,005
FO4	0,048	0,394	0,001	0,011	0,145
P12	0,002	0,016	0,106	0,007	0,663
FO5	0,135	0,210	0,003	0,163	0,027
P13	0,478	0,023	0,002	0,119	0,000

FO6	0,176	0,140	0,182	0,004	0,001
P14	0,115	0,186	0,120	0,042	0,003
F7	0,646	0,112	0,000	0,006	0,001
P15	0,053	0,036	0,010	0,028	0,001
FO8	0,795	0,083	0,000	0,002	0,007
P16	0,005	0,435	0,026	0,222	0,003
FO9	0,681	0,186	0,000	0,009	0,007
P17	0,497	0,180	0,123	0,005	0,000
F10	0,104	0,000	0,018	0,008	0,000
P18	0,073	0,001	0,043	0,406	0,036
F11	0,005	0,487	0,009	0,012	0,001
P19	0,341	0,125	0,116	0,126	0,029
P20	0,614	0,143	0,001	0,046	0,063
F12	0,000	0,389	0,013	0,323	0,020
P21	0,000	0,000	0,069	0,030	0,740
F13	0,560	0,063	0,000	0,008	0,020
F14	0,494	0,073	0,018	0,021	0,010
P22	0,329	0,344	0,026	0,109	0,058
F15	0,002	0,487	0,016	0,035	0,005
F16	0,700	0,190	0,010	0,010	0,024
	F1	F2	F3	F4	F5
F17	0,618	0,204	0,024	0,041	0,010
P23	0,085	0,212	0,009	0,005	0,331
F17	0,593	0,222	0,024	0,015	0,004
P24	0,001	0,361	0,037	0,060	0,015
F18	0,568	0,292	0,027	0,034	0,017
P25	0,458	0,277	0,002	0,011	0,005
F19	0,088	0,445	0,000	0,256	0,003
P26	0,004	0,016	0,007	0,000	0,003
F20	0,636	0,217	0,020	0,028	0,022
P28	0,153	0,181	0,011	0,039	0,013
F21	0,452	0,030	0,002	0,026	0,051
F22	0,525	0,006	0,022	0,001	0,046
P29	0,364	0,043	0,027	0,004	0,001
F23	0,627	0,087	0,000	0,015	0,020
P30	0,490	0,010	0,000	0,029	0,000
F24	0,681	0,106	0,003	0,017	0,023
F25	0,528	0,007	0,000	0,001	0,023
P31	0,717	0,118	0,000	0,001	0,004

F26	0,002	0,327	0,023	0,077	0,000
P32	0,018	0,048	0,064	0,000	0,002
F27	0,106	0,150	0,012	0,011	0,007
F28	0,429	0,001	0,031	0,017	0,002
F29	0,155	0,172	0,028	0,011	0,003
P33	0,023	0,015	0,073	0,001	0,004
F30	0,255	0,501	0,000	0,003	0,000
P34	0,686	0,011	0,001	0,014	0,000
F31	0,768	0,006	0,007	0,014	0,034
F32	0,184	0,118	0,333	0,002	0,001
P35	0,121	0,284	0,018	0,247	0,020
F33	0,330	0,269	0,069	0,145	0,076
P36	0,005	0,062	0,051	0,400	0,106
F34	0,015	0,263	0,100	0,017	0,002
P37	0,024	0,029	0,029	0,039	0,019
F35	0,212	0,182	0,357	0,004	0,016
F36	0,033	0,542	0,020	0,020	0,001

L'application des différentes méthodes retenues a permis de décrire la minéralisation des eaux des aquifères du socle de la commune de Natitingou ainsi que les mécanismes mis en jeu.

4. Resultats Et Discussion

4.1- Paramètres Physico-Chimiques Des Eaux

Les résultats du tableau 1 et de la figure 3 montrent que les valeurs de TDS des eaux étudiées sont très variables d'une zone hydrogéologique à l'autre comme le montre, avec 89% de ces valeurs comprises entre 0 et 800 mg/L et 11% entre 800 et 1500 mg/L. On note que les valeurs élevées concernent les eaux du substratum migmatito-gneissique et celles de la zone schisteuse, la zone quartzitique affichant les valeurs les plus faibles.

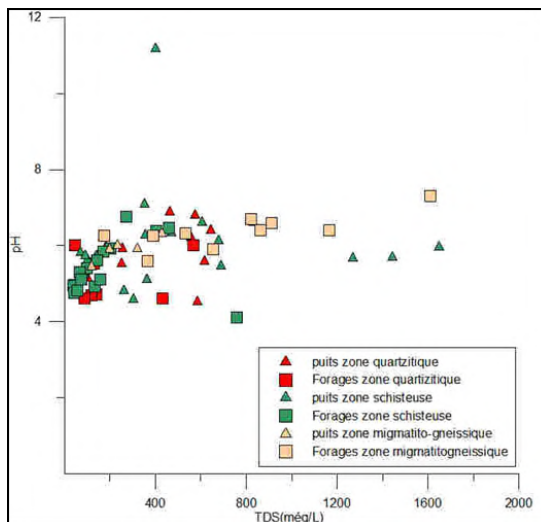
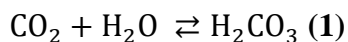


Figure 3: Relation pH /TDS dans les eaux étudiées

Les **figures 3 et 4** montrent que les eaux de la zone à substratum migmatito-gneissique ont un pH compris entre 5,3 et 7,3. Par contre, les eaux des forages situés dans la zone schisteuse et celle quartzitique plus acides, ont des pH situés entre 4,1 et 6,75. Les eaux de la zone quartzitique présentent les pH les plus faibles compris entre 4,6 et 5,12. Ce caractère acide des eaux souterraines de la commune pourrait s’expliquer par une forte production du CO₂ biogénique dans le milieu (Faillat & Drogue, 1993). La commune de Natitingou étant une zone dont les principales activités rémunératrices sont l’agriculture et l’élevage, l’activité biologique peut libérer de fortes quantités de CO₂ dans le sol qui en solution dans l’eau donne de l’acide carbonique selon la réaction **(1)** :



Les variations des valeurs de pH sont en relation avec la pression partielle du CO₂ dans l'eau, et plus cette pression augmente, plus le pH diminue (**Figure 4**) et tend à se stabiliser à 4,5.

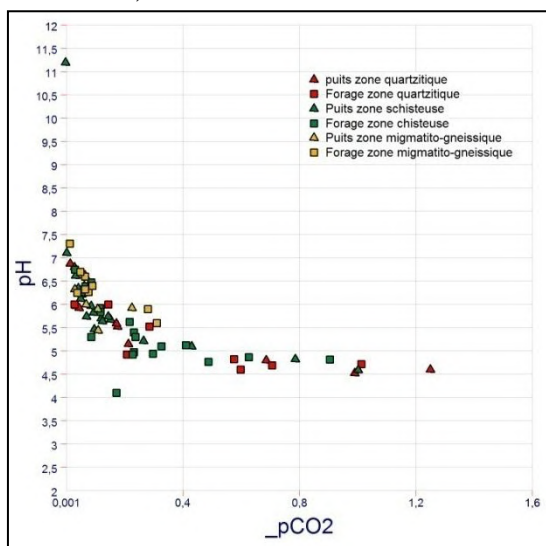


Figure 4: Relation pH/pCO₂ dans les eaux étudiées

La conductivité électrique (CE) des eaux de la plaine à substratum métamorphique ont des conductivités variables qui vont de moins de 100 µS/cm (69,4 µS/cm au niveau du forage A3040 de Koussantikou) à plus de 1500 µS/cm (1661 µS/cm au niveau du forage A2925 de Pam-Pam). La minéralisation des eaux de cette zone est donc très variable allant des eaux très peu minéralisées aux eaux fortement minéralisées. Les eaux de la zone quartzitique présentent des conductivités variant entre 40 et 444 µS/cm tandis que celles de la zone schisteuse présentent des conductivités comprises entre 47,8 et 783 µS/cm. Ces deux dernières zones présentent donc des eaux faiblement minéralisées. Les conductivités électriques de ces deux dernières zones, montrent que certains points d'eau sont très faiblement minéralisés et d'autres présentent les minéralisations importantes.

4.2- Paramètres chimiques des eaux

L'essentiel de nos échantillons, reportés sur le diagramme Piper, correspondent à des faciès bicarbonatés calciques et bicarbonatés sodiques. Le reste est représenté par les faciès chlorurés sodiques et chlorurés calciques (**Figure 5**). Il s'agit des eaux bicarbonatées à 75% dont 45 % de bicarbonatés calciques et 30% de bicarbonatés sodique et à 25% des eaux chlorurées dont 16,5% chlorurés calciques et 8.5% de chlorurés sodiques.

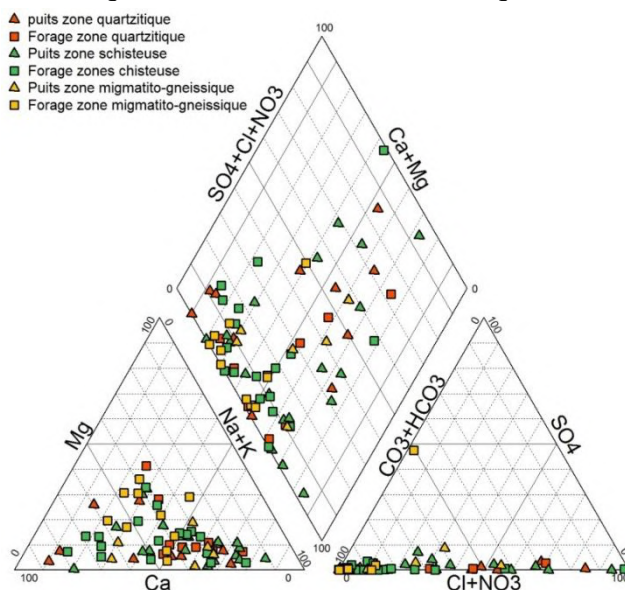


Figure 5: Diagramme de Piper des eaux de puits et de forages (septembre 2009)

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. Les bicarbonates sont produits suite à l'apport du CO_2 par l'infiltration qui, par réaction d'hydrolyse, permet d'une part la formation du HCO_3^- et d'autre part l'augmentation du pH en supposant une évolution en milieu fermé (Abdou Babaye, 2012). C'est partant de ces faits que les hydrogéologues utilisent le HCO_3^- et le pH pour mettre en relation le contact eau-roche et la production d'ions dans l'eau.

Le **tableau 5**, avec les coefficients de corrélation, met en évidence les relations existantes entre les teneurs en cations majeurs pris individuellement et les bicarbonates. Les différentes valeurs montrent qu'il existe d'une part, une corrélation moyenne entre les ions bicarbonates et les ions Mg^{2+} ($r=0,53$) et d'autre part, entre les ions bicarbonates et les ions Ca^{2+} ($r=0,66$). Par contre il n'est noté aucune corrélation entre les ions bicarbonates et les ions Na^+ et K^+ . La dépendance moyenne entre les ions bicarbonates et les ions Mg^{2+} , Ca^{2+} d'une part, et la non corrélation des ions Na^+ et K^+ avec HCO_3^- d'autre part, montrent qu'en dehors de l'hydrolyse il existerait un autre mécanisme de mise

en solution de ces ions. Par ailleurs, les teneurs en Na^+ excèdent celles de Cl^- (**Figure 6a**). Cet excès peut être expliqué par les phénomènes d'échange cationique qui s'opèrent via les minéraux argileux (Abid, 2000). Ce phénomène est confirmé par la libération des ions Na^+ et la fixation des ions Ca^{2+} (**Figure 7**). Cette situation est également notée dans le rapport K^+/Cl^- (**Figure 6b**). La **figure 6c** illustrant la relation $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, montre un excès des ions Ca^{2+} qui pourrait provenir soit de dissolution du gypse ou de l'anhydrite soit des échanges de base avec les minéraux présents en abondance dans les niveaux aquifères (Abid, 2000). En effet, à l'image de toutes les zones chaudes, la zone d'étude est probablement soumise à une évaporation importante due aux températures élevées pendant les saisons sèches. Ce phénomène favoriserait la formation et la concentration de certains sels minéraux comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ou l'anhydrite (CaSO_4). La mise en solution de ces sels minéraux par les eaux d'infiltration pendant la saison des pluies, favorise leur migration vers les nappes. Ainsi, cette dissolution de minéraux gypseux ou de l'anhydrite serait le deuxième processus d'acquisition des ions Ca^{2+} dans les eaux souterraines de socle de Natitingou, la première source étant l'hydrolyse des minéraux silicatés. L'excès de calcium à comparer au contenu de sulfate, observé dans la majorité des échantillons, (**Figure 6c**) confirme qu'en dehors de l'hydrolyse, il existe d'autres sources de Ca^{2+} telles que la dissolution du gypse ou de l'anhydrite.

Pour apprécier la part de l'hydrolyse dans l'acquisition des ions, les éléments chimiques majeurs sont mis en relation avec le pH (**Figure 8**). En effet, le pH est l'élément indicateur sur les processus chimiques mis en jeu dans la minéralisation. Sa corrélation avec un ion donne une idée précise sur la provenance de cet élément (Abdou Babaye, 2012). On observe que les ions Ca^{2+} se dégagent des autres par leur corrélation faible avec le pH ($R^2=0,612$), alors que celle-ci est presque nulle avec les ions Na^+ (0,072), K^+ (0,191) et Mg^{2+} (0,2) (**Tableau 5**). La dépendance négligeable de ces trois ions avec le pH prouve également qu'en dehors de l'hydrolyse, d'autres mécanismes interviennent dans leur mise en solution.

Variables	pH	T°C	CE	HCO ₃	Cl	NO ₃	PO ₄	SO ₄	Na	NH ₄	K	Mg	Ca	NO ₂	F	Br	TDS	Salinité
pH	1																	
T°C	0,291	1																
CE	0,487	0,152	1															
HCO ₃	0,725	0,427	0,446	1														
Cl	-0,012	-0,090	0,603	-0,060	1													
NO ₃	-0,098	-0,182	0,556	-0,152	0,955	1												
PO ₄	0,078	0,140	0,284	0,209	0,182	0,150	1											
SO ₄	0,200	0,293	0,263	0,282	-0,013	-0,036	-0,025	1										
Na	0,072	0,104	0,731	0,057	0,749	0,686	0,197	0,173	1									
NH ₄	0,200	0,049	0,685	0,032	0,871	0,802	0,139	0,071	0,768	1								
K	0,191	0,015	0,770	0,054	0,730	0,724	0,129	0,162	0,821	0,812	1							
Mg	0,259	0,245	0,591	0,530	0,249	0,193	0,327	0,399	0,479	0,252	0,346	1						
Ca	0,612	0,253	0,725	0,661	0,196	0,154	0,411	0,283	0,461	0,340	0,459	0,661	1					
NO ₂	0,059	0,013	0,015	-0,023	-0,028	-0,057	-0,039	-0,029	0,083	0,067	-0,004	-0,056	-0,003	1				
F	0,084	-0,015	0,317	0,235	0,325	0,277	0,364	0,278	0,278	0,277	0,202	0,524	0,280	-0,067	1			
Br	0,111	0,011	-0,048	0,182	0,001	-0,068	-0,040	-0,037	-0,047	-0,053	-0,117	-0,058	0,006	-0,044	-0,067	1		
TDS	0,335	0,193	0,641	0,499	-0,068	-0,057	0,224	0,398	0,338	-0,039	0,288	0,631	0,641	0,053	0,153	-0,006	1	
Salinité	0,388	0,137	0,932	0,290	0,670	0,605	0,284	0,278	0,743	0,776	0,794	0,464	0,592	-0,036	0,313	-0,069	0,440	1

Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les variables

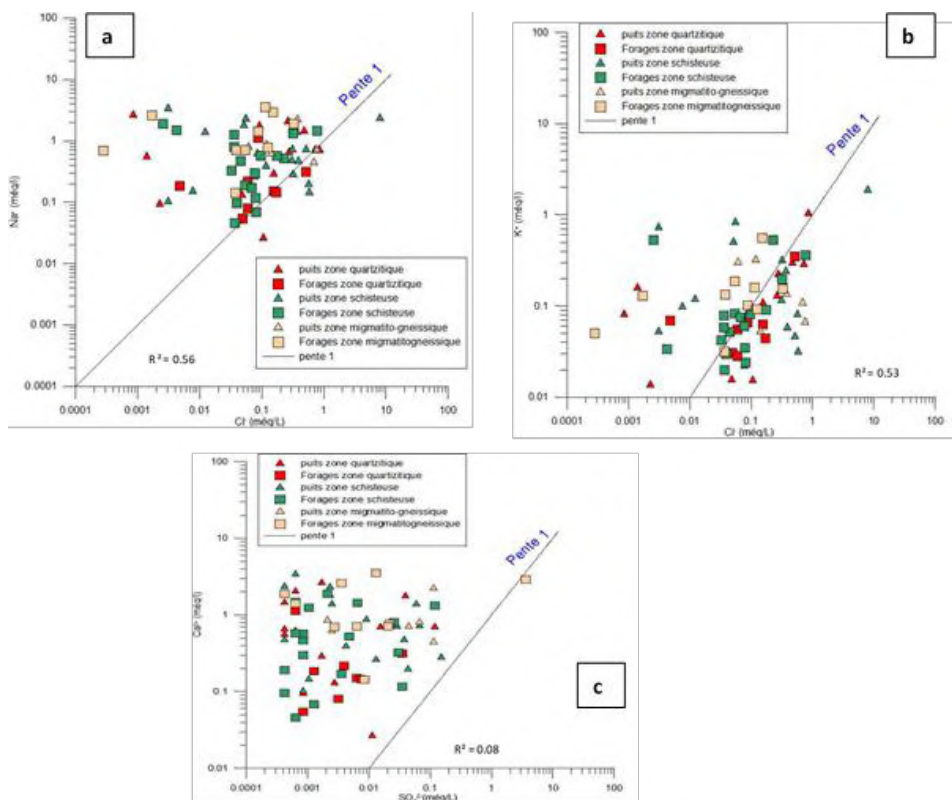


Figure 6 : Relations entre les cations et les bicarbonates

Les phénomènes d'échanges de base qui s'opèrent dans les aquifères de la zone étudiée, sont mis en évidence par la relation $[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})]$ en fonction de $[Na^++K^+-Cl^-]$ représentée sur la **figure 7** (Garcia *et al.*, 2001). Ces échanges se traduisent par la relation de pente -1 tracée par la position des échantillons. L'opération de soustraction réalisée entre les deux paramètres $[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(HCO_3^-+SO_4^{2-})]$ et $[Na^++K^+-Cl^-]$, permet de se débarrasser des ions issus éventuellement d'autres réactions de dissolution des minéraux carbonatés et évaporitiques. En cas d'absence de ces réactions d'échanges de bases, tous les points représentant les échantillons doivent se placer près du point origine selon McLean *et al.*, (2000) comme c'est le cas des eaux des zones quartzitique, et de certains échantillons des zones migmatito-gneissique et schisteuse. On observe le déficit en calcium et l'excès en sodium caractérisant quelques points d'eau prélevés des nappes de la zone schisteuse et de la zone migmatito-gneissique qui peut être en partie attribué aux mécanismes d'échange ionique, par lesquels les ions Ca^{2+} sont absorbés à la surface des minéraux argileux contre la libération des ions Na^+ (**Figure 7**). Ce phénomène pourrait éventuellement expliquer l'excès des ions Na^+ par rapport aux ions Cl^- (**Figure 6a**).

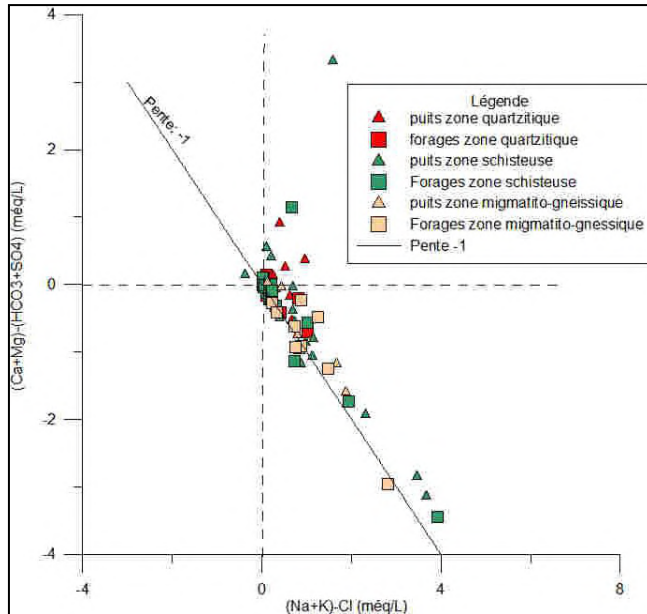


Figure 7 : Relation ionique montrant les échanges cationiques dans les eaux étudiées

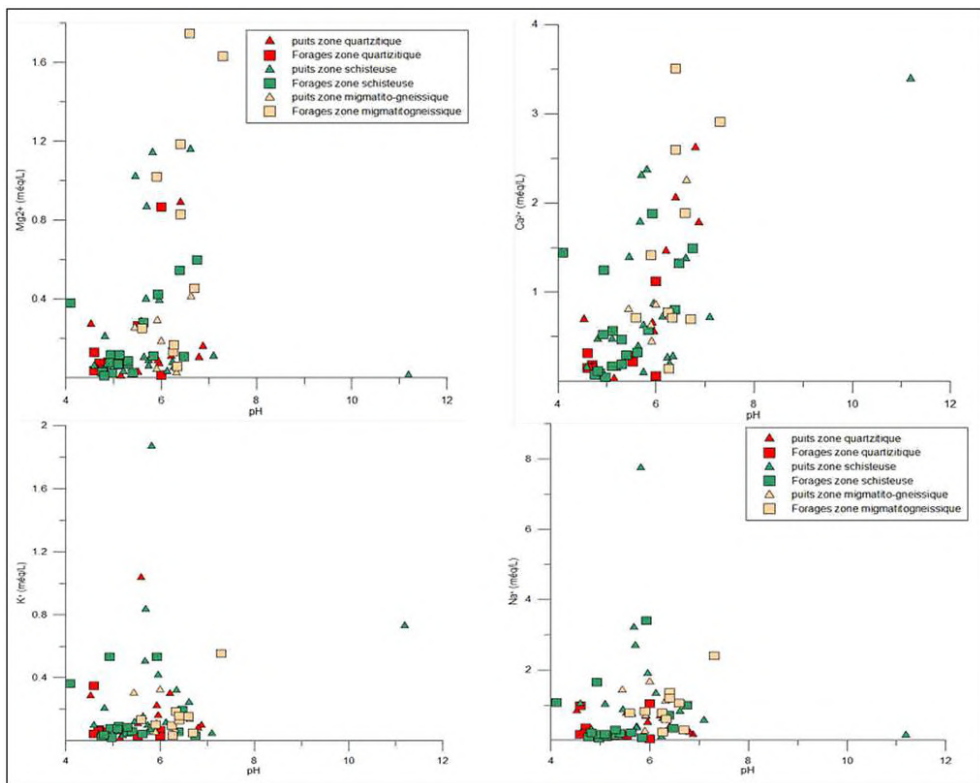


Figure 8 : Relations entre les cations et le pH

4.3- Analyses statistiques

Matrice de corrélation de Pearson

La liaison existant entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (**Tableau 5**). Ce tableau qui présente les différentes corrélations entre les variables peut aider à la compréhension des différents processus intervenant dans la minéralisation des eaux étudiées. Il met en évidence une importante corrélation NO_3^- - Cl^- (0,95), salinité-CE (0,93), NH_4^+ - Cl^- (0,87), NO_3^- - NH_4^+ (0,80), Na^+ - K^+ (0,82 et NH_4^+ - K^+ (0,81). Il existe également, mais à un degré moindre, une bonne corrélation pH- HCO_3^- (0,70), K-CE (0,77), Na^+ - Cl^- (0,74), K^+ - Cl^- (0,73), K^+ - NO_3^- (0,72), Na^+ - NH_4^+ (0,76), salinité- Na^+ (0,74), salinité- NH_4^+ (0,77) et salinité- K^+ . Ces fortes corrélations observées entre les variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Ces différentes corrélations traduisent l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation des eaux de cette commune.

Analyse en Composante Principale

La variance exprimée 55,62% par le plan factoriel F1-F2 (**Tableau 2**) n'est pas très significative pour observer le comportement global des échantillons. Pour cette raison, nous avons aussi considéré les plans factoriels F3-F4 et F4-F5 qui expriment respectivement 14,30% et 12,53% de la variance, soit au total 26,83%, afin de mettre en évidence les autres tendances des échantillons et avoir des projections de bonne qualité (>70%). Les cinq premiers axes factoriels (F1, F2, F3, F4, F5) expriment 83,45% (>75%) de la variance totale. Ce pourcentage est significatif pour faire la classification et étudier les tendances et corrélations qui peuvent exister entre les paramètres et en déduire les mécanismes d'acquisition de la minéralisation dans le milieu.

La projection des variables sur les plans factoriels F1xF2 (**Figure 9**) montre que le facteur F1 est le plus important. Il contrôle à lui seul, 37,6% de l'inertie du nuage des points représentatifs des échantillons. Ce facteur regroupe les variables telles que la conductivité électrique (CE), Cl^- , Na^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} , K^+ , salinité et le NO_3^- (**Tableau 3**). Le regroupement de ces variables autour de l'axe F1 montre que cet axe exprime la principale source de minéralisation de l'eau de l'aquifère. On constate par analyse de la principale source de minéralisation deux sous-groupes qui révèlent d'une part l'affinité des ions Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ et d'autre part celle des ions Na^+ , K^+ . Le premier sous-groupe manifeste l'influence des activités anthropiques dans l'acquisition de la minéralisation des eaux se traduisant surtout par la présence de l'ion NO_3^- (Abdou Babaye, 2012 ; Alassane *et al.*, 2015 ; Sambiénou *et al.*, 2018b). Le second sous-groupe provient très souvent de l'hydrolyse des minéraux silicatés surtout en régions de socle. Quant à l'ion Ca^{2+} exprimé par

le facteur F1 dont on ne remarque pas l’affinité avec les autres ions Na^+ et K^+ , il est aussi généralement fourni par l’hydrolyse des minéraux des formations encaissantes. Cependant, plusieurs auteurs Faillat & Drogue (1993), Biemi (1992), Yaméogo (2008), Adiaffi (2008), Abdou Babaye (2012), ont démontré qu’une partie non négligeable de Ca^{2+} , Na^+ et K^+ pourrait avoir une origine superficielle (pollution, sols, pluie...) indépendante de l’hydrolyse des minéraux, mais très rarement pour l’ion Ca^{2+} .

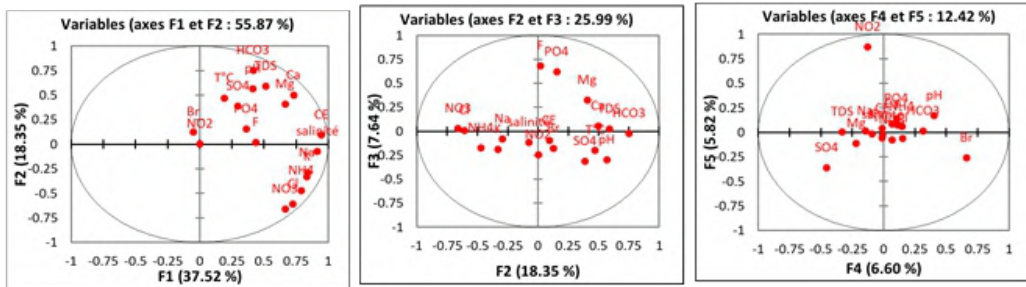
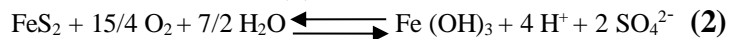


Figure 9 : Analyse dans l’espace des variables des plans factoriels F1–F2 ; F2-F3 et F4-F5.

Le facteur F2 explique environ 18% de l’inertie totale des points et regroupe les variables HCO_3 , TDS, pH, SO_4^{2-} , Mg^{2+} , T°C , Ca^{2+} (**Figure 9**). Ce regroupement met en évidence une minéralisation de l’eau par le phénomène de dissolution de la roche. Selon Abdou Babaye (2012), la corrélation de l’ion HCO_3^- avec le pH ($r= 0,72$), montre que cet ion provient en majorité de l’hydrolyse des minéraux des formations de l’aquifère mais aussi de la diffusion et dissolution du CO_2 atmosphérique et du sol. L’ion SO_4^{2-} exprimé par cet axe, pourrait avoir pour origine probable l’oxydation de la pyrite (conditions oxydantes en saison des pluies) (Matini *et al.*, 2009), minéral présent dans les formations géologiques de la région. Leur passage dans l’eau se serait fait suivant la réaction (2) :



Si les sulfates (SO_4^{2-}) peuvent provenir des roches (de la zone quartzique et schisteuse), notamment des sulfures, il est aussi vraisemblable que ces anions, en plus des nitrates (NO_3^-), et une partie des cations, pourraient avoir aussi leur origine dans les eaux de pluie et du lessivage des sols par celles-ci. En effet, plusieurs auteurs, Sarazin *et al.*, (1976), Bourrié (1978), Lelong *et al.*, (1989) et Faillat & Drogue (1993), ont montré que la totalité des anions d’acides forts (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) et plus de la moitié des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+), pouvaient, en zone de socle, être apportées par les précipitations dans certains cas. De tels bilans hydrochimiques ne peuvent être faits dans cette étude faute d’analyses des eaux de pluies.

Le facteur F3 explique 7,6% de la variance totale et contient les variables fluorure et orthophosphate. Ce regroupement de variables met également en évidence une minéralisation de l’eau par dissolution des

minéraux. Selon les auteurs Ravindra & Garg (2007) et Matini *et al.*, (2009), le fluor dans l'eau provient principalement de la dissolution des minéraux naturels présents dans les roches et les sols avec lesquels l'eau réagit. La fluorine (CaF_2), la cryolithe (Na_3AlF_6), le fluoapatite ($\text{Ca}_5\text{F}(\text{PO}_4)_3$) et les micas sont les principaux minéraux qui contiennent l'ion F^- (Matini *et al.*, 2009). Les ions fluorures dans les eaux analysées pourraient provenir de la dissolution de ces minéraux car l'ion F^- a un rayon ionique identique à celui de l'ion OH^- et peut donc se substituer à lui dans ces minéraux (Jordana & Batista, 2004 ; Matini *et al.*, 2009). Le quatrième facteur F4, quant à lui, contient l'élément Br et explique 6,60% de la variance totale. Cet ion, pourrait être également issu de la dissolution des minéraux de roches. Enfin, le facteur F5, contient les ions nitrites NO_2^- et explique 5,8% de variance totale. Cet élément tout comme les nitrates pourrait avoir une origine exogène.

La représentation graphique dans l'espace factoriel des individus (**Fig. 10**) et le **tableau 4** rendent compte de la répartition des points d'eau en fonction des différents facteurs F1, F2, F3, F4 et F5. L'analyse de la projection des individus sur les plans F1-F2 et F2-F3, montre trois principaux regroupements des échantillons d'eau concernant leur teneur en des différentes variables étudiées. Le premier regroupement concerne tous les individus dont les teneurs des variables T°C , NO_3 , TDS, Cl, Na, pH, HCO_3 , NH_4 , Mg, Ca, F et salinité est en dessous de la teneur moyenne. Ce groupe concerne 93,15% des individus étudiés à l'exception de F33, F35, F3, P5 et P19.

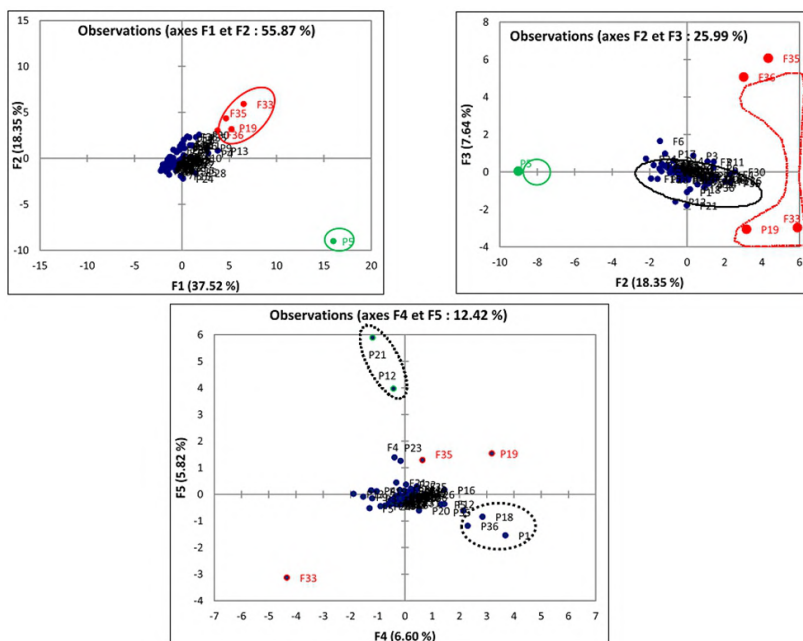


Figure 10 : Analyse dans l'espace des individus des plans factoriels F1–F2 ; F2-F3 et F4-F5

Le deuxième regroupement qui concerne 6,84% des individus est caractérisé les échantillons d'eau dont les teneurs des variables HCO_3 , F, pH, SO_4 , PO_4 , CE, salinité, TDS, T°C est au-dessus de la teneur moyenne, à l'exception de l'individu P5. Le troisième regroupement qui concerne les individus dont les teneurs en Cl, NO_3 , NH_4 , Na, K, salinité, CE et Mg sont largement au-dessus de la moyenne. La projection des individus sur le plan F4-F5 révèle deux autres sous-groupes. Il s'agit du groupe des échantillons P1, P18 et P36 caractérisés par un taux moyen en ion bromure et du groupe des échantillons P12 et P21 se particularisent par un taux élevé en ions nitrites NO_2^- .

4.4- Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Le dendrogramme (**Fig. 11**) issu de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a mis en évidence quatre principaux regroupements des points d'eau échantillonnés. La première famille qui prend en compte 68% des échantillons d'eau analysés, est caractérisée par les conductivités électriques inférieures à 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Du point de vue de leur situation géographique, les points d'eau de cette catégorie sont répartis dans les trois zones hydrogéologiques. Ce sont les eaux faiblement minéralisées en majorité. Mis à part les échantillons FO1, FO5, FO7, F16, F18, F19, F20, F21, F36, P5, P14, P15, P22, P23, P26, P28, P33 et P36 qui sont chlorurés, les 32 points d'eau restants de cette classe sont bicarbonatés, soit calciques ou sodiques. Le second regroupement constitué de 22% des échantillons comprend les eaux dont la conductivité électrique est comprise entre 500 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette classe regroupe les eaux à minéralisation importante qui sont également bicarbonatées soit calciques, soit sodiques. La troisième famille qui regroupe environ 7% des échantillons concerne les eaux à conductivités électriques comprises entre 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($1000 < \text{CE} < 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Enfin, le quatrième regroupement d'environ 3% des échantillons d'eau analysés est caractérisé par les eaux dont la conductivité électrique est supérieure à 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ($\text{CE} > 2000 \mu\text{S}/\text{cm}$). Les deux dernières classes sont donc caractérisées par les eaux à très forte minéralisation.

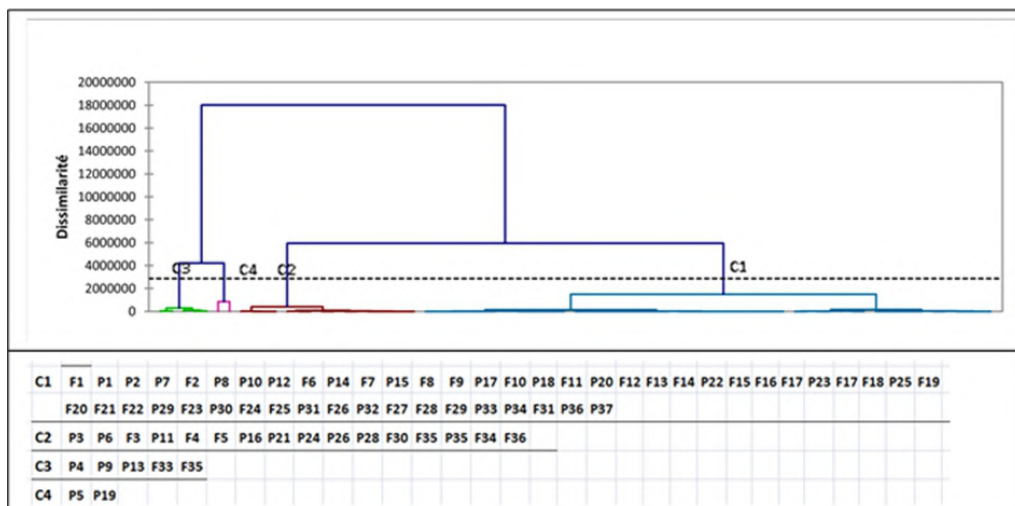


Figure 11 : Dendrogramme de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) des échantillons d'eau prélevés dans la zone d'étude

Au total, le processus de minéralisation de l'eau est très complexe dans la zone d'étude, du fait d'une part de son contexte géologique et hydrogéologique, à l'origine de la nature discontinue de l'aquifère, d'autre part de la variation spatio-temporelle de la recharge. L'acquisition naturelle des ions du fait de l'altération des roches encaissantes est fortement influencée par un apport exogène d'une partie des cations de l'eau et des ions Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ qui proviennent des eaux de pluie et du lessivage des sols par celles-ci comme l'indique les résultats de l'analyse multivariée.

4.5- Origine anthropique des nitrates : pollution des eaux

Le **tableau 5**, montre une très mauvaise corrélation ($r = -0,068$) entre les ions chlorures et les TDS. Cette observation traduirait l'existence d'origine(s) autre(s) que celles d'une minéralisation naturelle en ces ions. Cependant, la corrélation très significative ($r=0,95$), notée entre les ions NO_3^- et Cl^- prouve que ces deux ions proviennent d'une même origine. De l'analyse statistique, l'affinité des ions Cl^- , NO_3^- et NH_4^+ observée en projetant les variables sur l'axe F1, manifeste l'influence des activités anthropiques dans l'acquisition de la minéralisation des eaux se traduisant surtout par la présence de l'ion NO_3^- . Le **tableau 1**, montre que sept échantillons P5 (437,72 mg/L), P24 (133 mg/L), P28n (97,78 mg/L), F5 (96,28 mg/L), P7(70,37 mg/L), P14 (50,78mg/L) et P15 (54,7mg/L) désignant respectivement les localités de Djindjirébéri, Kotopounga, Banguirétamou, Winkè, Boriouré, Kantaborifa et Ouroubouga présentent des concentrations en NO_3^- supérieures à la valeur guide de l'O.M.S qui est de 50 mg/L pour l'eau de boisson (WHO, 2008). On remarque que les échantillons à forte teneur en NO_3^- sont majoritairement ceux

des puits traditionnels qui captent la nappe superficielle d'altérites très accessible par les apports exogènes. De plus, les localités concernées ici, sont pour la plupart des quartiers de la ville de Natitingou ou le siège d'arrondissement où l'influence humaine très marquée participe à la pollution de la nappe.

Conclusion

L'étude réalisée sur les eaux souterraines de la commune de Natitingou a permis de connaître leurs différentes caractéristiques. Elles sont acides à neutre avec une minéralisation importante dont la moyenne est de 465,64 $\mu\text{S/cm}$. La classification hydrochimique des eaux a montré une dominance du faciès bicarbonaté calcique suivi du faciès bicarbonaté sodique. Le faciès chloruré, représenté à 25%, traduit l'apport anthropique dans l'acquisition de la minéralisation. Cela se confirme également par l'interprétation des ACP qui précise que les eaux des localités de Djindjirébéri, Kotopounga, Banguirétamou, Winkè, Boriouré, Kantaborifa et Ouroubouga, siège d'arrondissement où l'influence humaine est très marquée, sont polluées.

Remerciements

Nous remercions le Laboratoire d'Hydrologie Appliquée pour son appui financier lors des travaux de terrain et d'analyses chimiques. Nos vifs remerciements vont également à l'endroit des lecteurs anonymes pour leurs précieuses contributions.

References:

1. Abdou Babaye M.S. (2012). Evaluation des ressources en eau dans le bassin de Dargol (Liptako-Niger). Thèse de Doctorat, Université de Liège & Université Abdou Moumouni, 265p.
2. Abid K. (2010). Identification et caractérisation hydrogéologique et géochimique de la nappe du Continental Turonien dans le Sud tunisien et sa relation avec les aquifères adjacents. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie, 192p.
3. 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, Univ. Paris Sud, 230p.
4. Affaton P. (1987). Le Bassin des Volta (Afrique de l'Ouest): une marge passive, d'âge protérozoïque supérieur, tectonisée au Panafricain ($600 \pm 50\text{Ma}$). Thèse de doctorat, Editions de l'ORSTOM, Collection Etudes et Thèses, Paris, 496 p.
5. Ahissou S.R. & Goudalo N. (2004). Potentialités hydrogéologiques en relation avec les ensembles pétrographiques et la tectonique du

- département de l'Atacora. Mémoire de maîtrise en Géologie Fondamentale et Appliquée, Université d'Abomey Calavi, 55p.
6. Alassane A., Trabelsi R., Dovonon L.F., Odeloui D.J., Boukari M., Zouari K., Mama D. (2015). Chemical Evolution of the Continental Terminal Shallow Aquifer in the South of Coastal Sedimentary Basin of Benin (West-Africa) Using Multivariate Factor Analysis. *Journal of Water Resource and Protection*, 7, 496-515.
 7. Biémi J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Univ. Natio. Côte d'Ivoire, 493p.
 8. Bonhomme M., (1962). Contribution à l'étude géochronologique de la plateforme de l'Ouest africain. *Ann. Fac. Sc., Université de Clermont-Fernand, Géol. Minéral.* N°5, France.
 9. Bourrié G. (1978). Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré. Application aux granites des Vosges et de la Margeride. *Persée-Portail des revues scientifiques en SHS*, 52, 1.
 10. Eblin S.G., Soro G.M., Sombo A.P., Aka N., Kambiré O., Soro N. (2014). Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'Adiaké (sud-est côtier de la côte d'ivoire). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°17, pp. 193-214.
 11. Faillat J.P. & DROGUE C. (1993). Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Hydrological sciences journal*, 38, 3, pp. 215-229.
 12. Freeze R.A., Cherry J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NJ, 604p.
 13. García G.M., Hidalgo M.D.V., Blesa M.A. (2001). Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 9(6), pp. 597-610.
 14. Géohydraulique (1985). *Hydraulique villageoise dans les provinces de l'Atacora, du Mono et de l'Ouémé, rapport final*, Direction de l'Hydraulique, Cotonou, Bénin, 236 p.
 15. Jordana S. & Batista E. (2004). Natural groundwater quality and health. *Geologica Acta: an international earth science journal*, 2, 2, pp. 175-188.
 16. Lelong F., Durand P., Vannier C., Guillet B., Rouiller J. (1989). Importance de la rétention des ions sulfates dans des sols granitiques acides en région de moyenne montagne (Mont Lozère): relation générale avec le pouvoir tampon des sols. *Comptes rendus de*

- l'Académie des sciences. Série 2, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre, 309(19), 1991-1996.
17. Matini L., Moutou J.M., Kongo-Mantono M.S. (2009). Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 5, 1.
 18. McLean W., Jankowski J., Lavitt N. (2000). Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia. Groundwater, past achievements and future challenges. A Balkema, Rotterdam, 567-573.
 19. Pougnet R. (1957). Le précambrien du Dahomey Bulletin de la Direction Fédérale des Mines et de la Géologie de l'Afrique Occidentale Française.
 20. Ravindra K., Garg V.K. (2007). Hydro-chemical survey of groundwater of Hisar city and assessment of defluoridation methods used in India. *Environmental monitoring and assessment*, 132(1-3), 33-43.
 21. Sambiénou W.G., Orou Pete Allou G.S., Alassane A., Mama D., Boukari M. (2018). Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du bassin versant de Pendjari (nord-ouest du Bénin), *Revue Internationale des Sciences Appliquées*, ISSN-1840-8869, Vol 1, n° 02, pp 18-30.
 22. Sambiénou W.G. (2019). Contribution à la compréhension du fonctionnement et à l'évaluation des potentialités en eau du système aquifère du bassin versant de la Pendjari (Nord-Ouest du Bénin) : Apports des outils piézométriques, hydrogéochimiques, isotopiques et de la télédétection. Thèse de Doctorat, Université d'Abomey-Calavi, CIPMA, Bénin, 202p.
 23. Sarazin G., Fouillac C., Michard G. (1976). Etude de l'acquisition d'éléments dissous par les eaux de lessivage des roches granitiques sous climat tempéré. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40, 12, pp.1481-1486.
 24. SOGREA-H-SCET-Tunisie. (1997). Etude de la stratégie nationale de gestion des ressources en eau du Bénin ; Rapports, R1 à R7. Cotonou, Bénin.
 25. WHO. (2008). Guidelines for Drinking water Quality. Third Edition Incorporating the First and Second Addenda. In: Recommendations, vol. 1, Geneva.
 26. Yaméogo O.S. (2008). Ressources en eau souterraine du centre urbain de Ouagadougou au Burkina Faso, qualité et vulnérabilité. Thèse de doctorat, Univ. Avignon et pays de Vaucluse, Univ. Ouagadougou, 245p.