

Étude hydrogéochimique du système aquifère granito-gneissique dans la préfecture du Moyen-Mono, Togo

**Kossitse Venyo AKPATAKU^{1,2*}, Masamaéya Dadja-Toyou GNAZOU¹,
Limam Moctar BAWA¹, Gbandi DJANEYE-BOUNDJOU¹ et Serigne FAYE²**

¹*Laboratoire de Chimie des Eaux, Département de Chimie, Université de Lomé, BP 1515 Lomé, Togo*

²*Laboratoire d'Hydrologie et d'Hydrochimie, Département de Géologie,
Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP 5005 Dakar, Sénégal*

* Correspondance, courriel : avenyo@gmail.com

Résumé

La gestion des ressources en eau est déterminante pour le développement socioéconomique durable en milieu rural. La préfecture du Moyen-Mono renferme des ressources en eau souterraine qui sont appréciées diversement selon leur quantité et leur qualité. On y trouve des aquifères discontinus avec un taux important de forages négatifs et à faibles débits. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'état de qualité de la nappe de même que les caractéristiques hydrogéochimiques et les processus responsables. Un réseau de 33 ouvrages a permis de déterminer les caractéristiques hydrochimiques en période de basse eau 2009, qui sont traitées par des méthodes conventionnelles couplées aux analyses statistiques. Les résultats indiquent majoritairement des eaux acides et douces avec des pH entre 5,17 et 7,46 et des TDS entre 62 et 1504 mg/L. Les anions et cations majeurs sont respectivement abondants dans l'ordre $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ puis $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. La classification des eaux révèle les faciès hydrochimiques majoritairement mixtes tels que Ca/Mg/Na-HCO₃, Ca/Na-HCO₃, Na-HCO₃, Na/Mg-HCO₃ et Ca/Mg-Cl, qui sont très probablement contrôlés par l'hydrolyse des silicates, les échanges de base, les réactions redox, la dissolution des sels surfaciques et le phénomène de dilution. Ces processus sont accompagnés de flux ponctuels de nitrate anthropique, qui limitent l'usage de certains forages comme sources d'approvisionnement en eau potable. Il s'avère important d'associer des investigations environnementales aux études d'implantation des ouvrages.

Mots-clés : *eau souterraine, silicate, nitrate, Moyen-Mono, Togo.*

Abstract

Hydrogeochemical study of granito-gneissic aquifer system of Moyen-Mono Prefecture, Togo

Water resources management is crucial for the sustainable development in rural areas. The study area of this study is the prefecture of Moyen-Mono where groundwater resources are appraised differently depending on their quantity and quality. The prefecture is characterized by discontinuous aquifers where non-productive boreholes rate is relatively important. The objective of this study is to assess groundwater quality and hydrogeochemical characteristics as well as geochemical processes that are responsible.

A network of 33 boreholes sampled during low water stage 2009, is used to determine the hydrochemical characteristics that are processed using conventional methods coupled with statistical analysis. The results indicate predominantly acidic and low mineralized water with pH values between 5.17 and 7.46, and TDS values between 62 and 1504 mg/L. The major anions and cations are respectively abundant in the order $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ and $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Groundwater classification reveals mixed hydrochemical facies that include Ca/Mg/Na- HCO_3 , Ca/Na- HCO_3 , Na- HCO_3 , Na/Mg- HCO_3 and Ca/Mg-Cl which are probably controlled by silicates weathering, ion exchange, redox reactions, and dilution phenomenon. These processes are accompanied by punctual flow of anthropogenic nitrate, restricting the use of some boreholes for drinking water supply. It appears important to associate environmental investigations to boreholes implantation.

Keywords : *groundwater, silicate, nitrate, Moyen-Mono, Togo.*

1. Introduction

L'évaluation et la gestion des ressources en eau en milieu rural jouent un rôle très important pour le développement socioéconomique de ces terroirs. Au regard des risques de contamination, les ressources en eau souterraine ont pris l'avantage sur les eaux de surface en devenant la source privilégiée d'approvisionnement en eau potable (AEP). Ceci, en raison de leur proximité des habitats et de leur moindre vulnérabilité à la pollution et aux variabilités saisonnières [1, 2]. C'est ainsi que dans la plupart des pays en voie de développement et surtout en Afrique sub-saharienne, des projets d'hydraulique villageoise sont mis en œuvre le plus souvent en milieu rural [1-4]. Ces projets de développement visent à améliorer les conditions de vie des populations par la réalisation des forages équipés de pompe à motricité humaine. Au Togo précisément, ces types de projets sont exécutés depuis les années 1980 et se sont bien accentués cette dernière décennie avec l'appui des bailleurs et ceci dans le cadre de l'atteinte des objectifs du millénaire pour le développement (OMD) [4]. Malheureusement, les taux de desserte restent insuffisants avec une demande plus forte que l'offre et une répartition inégale du potentiel hydraulique des systèmes aquifères [5].

Près de 94 % du territoire national repose sur des aquifères de socle localisés dans les altérites et les fractures des formations granito-gneissique [5, 6]. Les ressources en eau souterraine sont appréciées diversement selon leur quantité et leur qualité avec des taux de succès d'implantation des forages autour de 65 % [4-6]. La préfecture du Moyen-Mono qui constitue le cadre de notre étude, est l'une des préfectures les plus enclavées de la Région des Plateaux du Togo. La région est caractérisée par des aquifères de socle d'une assez bonne productivité mais avec une qualité variable des eaux [4, 6]. A part un fort potentiel agricole, la préfecture du Moyen-Mono dispose de valorisables sites touristiques et constitue une zone tampon d'importants flux commerciaux internationaux et de fortes transhumances [7]. Par conséquent, l'essor socio-économique de la préfecture repose considérablement sur la garantie de la durabilité de l'AEP dans le cadre d'une gestion intégrée des ressources en eau. L'objectif de cette étude est d'évaluer les caractéristiques hydrogéochimiques découlant des processus géochimiques majeurs, mais également d'évaluer l'état de qualité de la nappe en rapport avec la nature du milieu. La méthodologie utilisée est basée sur une approche d'analyse statistique couplée aux méthodes conventionnelles incluant la stœchiométrie et les ratios ioniques.

2. Description de la zone d'étude

2-1. Physiographie

La préfecture du Moyen Mono est située à la bordure Est au sud du Togo, faisant frontière avec le Bénin. Elle couvre une superficie d'environ 600 km² et se situe entre les longitudes 1°26'33"-1°38'11" Est et les latitudes 7°00'00"-7°24'30" Nord. La zone est essentiellement rurale avec une population d'environ 77 500 habitants vivant de l'agriculture sous pluie avec un régime de climat tropical humide. La saison pluvieuse s'étant d'Avril à Octobre avec une pluviométrie annuelle de l'ordre de 1000 mm qui entretient une végétation de forêt claire et de savane humide. Les températures moyennes mensuelles varient entre 26,0 °C en août et 31,0 °C en Mars. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 27,0°C [8]. La préfecture est totalement drainée par les affluents du fleuve Mono qui représente sa limite occidentale. Le principal affluent est la rivière Klikou qui est à écoulement saisonnier. Le réseau de drainage caractérisé par un écoulement de direction NE-SO, et E-O suit la géomorphologie très ondulée avec des altitudes variant entre 70 et 245 m.

2-2. Géologie et hydrogéologie

La préfecture est principalement caractérisée par des formations granito-gneissiques de la zone interne de la chaîne des Dahomeyides (*Figure 1*). On distingue des gneiss à biotite et amphibole avec quelques passées de dolomies cristallines à l'est, des gneiss à biotite plus ou moins amphibole encaissant des plutons de granitoïdes calco-alcalins et correspondant à une zone de cisaillement vertical où se manifestent de fortes épaisseurs de mylonites à l'Ouest, des orthogneiss mylonitiques à biotite et des granites au Sud-Est, et des méta-arénites au sud autour Tohou, chef-lieu de préfecture. L'ensemble de ces formations constitue des systèmes aquifères d'altération et de fractures ayant un intérêt hydrogéologique appréciable. Les débits exploitables varient fréquemment entre 0,8 et 20 m³/h et les premières venues d'eau généralement entre 40 et 45 m de profondeur.

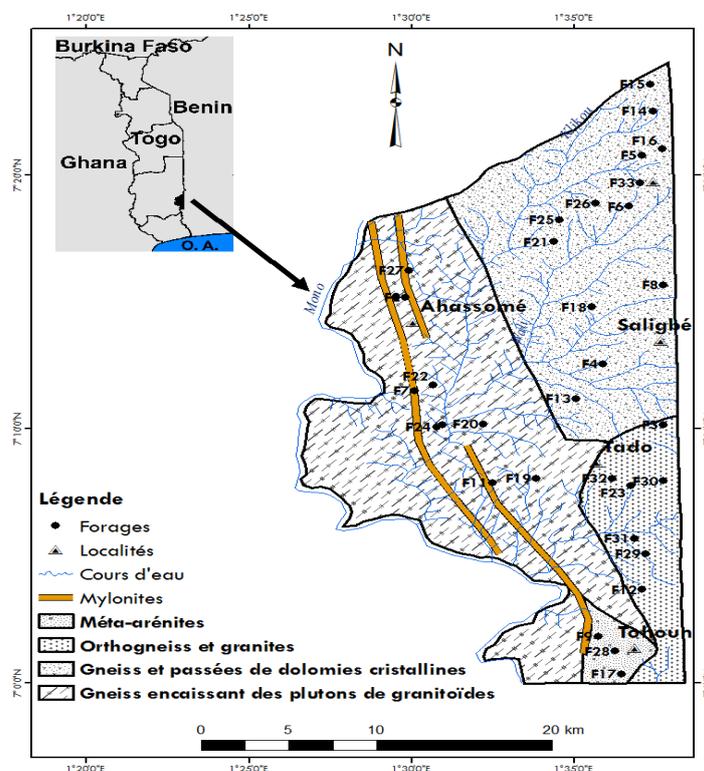


Figure 1 : Géologie de la zone d'étude [6] et localisation des forages échantillonnés

3. Matériel et méthodes

Les fiches techniques de forages et les données d'analyses physico-chimiques des forages réalisés et réhabilités dans le cadre du Projet de Réhabilitation et de Création des Points d'Eau (PRCPE) [4] dans la Région des Plateaux ont été collectées auprès de la Direction des Ressources en Eau et auprès de la Direction Régionale de l'Hydraulique Villageoise. Les échantillons d'eau de ces forages étaient prélevés dans des bouteilles en plastique de 1,5 L, et convoyés au Laboratoire de Chimie des Eaux où les analyses sont effectuées selon les normes AFNOR [9]. Le pH et la conductivité sont mesurés à l'aide des sondes de type WTW. Les incertitudes sont respectivement $\pm 0,01$ et $\pm 0,5$ %. La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre DRT100B, model 20012 de précision $\pm 0,01$ NTU. Les autres paramètres sont déterminés comme suit : la volumétrie pour HCO_3^- , la spectrophotométrie d'absorption moléculaire pour Fe_{total} , Mn^{2+} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , F^- et SO_4^{2-} . La complexométrie à l'EDTA pour les Ca^{2+} et Mg^{2+} , la spectroscopie d'absorption atomique pour Na^+ et K^+ et l'oxydabilité au KMnO_4 pour la matière organique. Afin d'évaluer la fiabilité des données collectées, de corriger les erreurs de saisie et les valeurs erronées sur les fiches d'analyses collectées, ces données collectées ont été confrontées aux données d'archives du Laboratoire de Chimie des Eaux de l'Université de Lomé. La balance ionique et l'écart entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée par l'approximation de WATEQ Bebye-Hückel ont été déterminés à l'aide du logiciel « Diagramme » [10]. Les données ont été validées pour les valeurs de balance ionique entre -5 % à $+5$ % et un écart de -10 % à $+10$ % entre les conductivités mesurées et calculées. Au total, un réseau de 33 forages de la préfecture a été retenu et les interprétations sont faites sur les données de la période de Décembre 2008 à mai 2009.

L'évaluation de l'aptitude des eaux comme eau de boisson est basée sur la comparaison des données analytiques aux valeurs recommandées de l'OMS [11, 12]. Les données validées sont également soumises à l'analyse statistique et à la détermination des faciès hydrochimiques reflétant la composition chimique des eaux [13, 14]. Les concentrations des ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^-) en méq/L sont d'abord converties en pourcentage. Le cation dominant est celui ayant une proportion en pourcentage équivalente ou supérieure au double de chacune des proportions des autres cations. Dans le cas échéant, on considère ceux dont les proportions sont semblables et deux fois plus grandes que celles des autres. On obtient dans ce cas un faciès mixte. Le même principe est appliqué aux anions sauf que, l'anion nitrate n'est pas considéré dans la classification des eaux à cause de son origine habituellement anthropique. L'analyse factorielle par la méthode d'analyse en composante principale (ACP), l'analyse des clusters hiérarchiques par la méthode d'agrégation de Ward et des distances euclidiennes, les diagrammes binaires et les ratios ioniques sont appliqués pour déterminer les principaux facteurs et processus hydrogéochimiques de minéralisation des eaux [13-20] en utilisant le logiciel STATISTICA 7.1. Les teneurs en NH_4^+ , NO_2^- , PO_4^{3-} , et Mn^{2+} n'ont pas été considérées car plus de 35 % de leurs valeurs sont nulles. Les autres variables à l'exception du pH sont d'abord log-transformées puis standardisées à une distribution normale. Pour extraire les facteurs, seules les composantes dont les valeurs propres sont supérieures ou égales à 1 sont retenues après avoir appliqué la rotation Varimax avec la normalisation Kaiser.

4. Résultats et discussion

4-1. Statistique descriptive des paramètres hydrochimiques et qualité des eaux

Les résultats des analyses chimiques sont résumés sous forme statistique dans le **Tableau 1**. Le pH de l'eau varie entre 5,17 et 7,46. Les valeurs acides (5,17 à 6,50) se retrouvent généralement dans les formations d'orthogneiss et granites, et dans les méta-arénites alors que les valeurs neutres (7,00 à 7,46) se retrouvent

fréquemment dans les formations de gneiss. 75,8 % des valeurs de pH sont dans la gamme désirable de l'OMS [12, 16]. La conductivité électrique des eaux varie entre 82 et 2120 $\mu\text{s/cm}$ avec une moyenne de 716 $\mu\text{S/cm}$. En considérant les valeurs guides pour le TDS [11, 12], les eaux douces sont prépondérantes dans la préfecture avec 58 % des échantillons dans la gamme désirable (< 500 mg/L) et 33 % dans la gamme licite (500 - 1000 mg/L). La distribution spatiale des valeurs de TDS est présentée à la **Figure 2**.

Tableau 1 : Statistique descriptive des paramètres hydrochimiques

Paramètre	Min	Max	Moy	Méd	E-T	CV (%)	Valeurs guides OMS [12]	Effectif des valeurs admissibles	% des valeurs admissibles
pH	5,2	7,5	6,7	6,8	0,5	7,3	6,50 8,50	25,0	75,8
CE [$\mu\text{s/cm}$]	82,0	2120,0	716,4	524,0	496,9	69,4	-	-	-
TDS [mg/L]	62,0	1504,0	557,5	399,0	365,1	65,5	1000,0	30,0	90,9
Ca [mg/L]	7,2	240,0	51,0	38,4	42,9	84,1	100,0	30,0	90,9
Mg [mg/L]	0,5	90,0	31,0	22,1	22,9	73,8	50,0	26,0	78,8
Na [mg/L]	6,0	161,5	50,2	32,1	37,8	75,2	150,0	32,0	97,0
K [mg/L]	1,2	9,9	5,0	4,5	2,3	45,3	12,0	33,0	100
HCO3 [mg/L]	24,4	683,2	274,3	219,6	160,3	58,4	> 30	32,0	97,0
Cl [mg/L]	3,5	200,2	52,4	28,0	55,5	105,9	250,0	33,0	100
SO4 [mg/L]	1,0	123,5	19,8	8,0	33,3	168,6	400,0	33,0	100
NO3 [mg/L]	<LD	626,9	73,5	11,6	144,7	196,9	50,0	26,0	78,8
NO2 [mg/L]	<LD	3,0	0,2	0,0	0,6	255,9	3,0	33,0	100
NH4 [mg/L]	<LD	0,1	0,0	0,0	0,0	140,8	1,5	33,0	100,0
PO4 [mg/L]	<LD	0,4	0,0	0,0	0,1	226,6	-	-	-
F [mg/L]	<LD	1,8	0,4	0,4	0,4	90,0	1,5	32,0	97,0
Fe_total [mg/L]	<LD	1,3	0,1	0,1	0,3	189,0	0,3	30,0	90,9
Mn [mg/L]	<LD	0,5	0,1	0,1	0,1	192,5	0,4	32,0	97,0
Turb [NTU]	1,0	97,5	5,6	1,4	17,4	308,7	5,0	29,0	87,9
Oxy_KMnO4 [mgO2/L]	<LD	1,0	0,4	0,3	0,2	57,3	2,0	33,0	100

Min = minimum, Max = maximum, Moy = moyenne, Med = médiane, E-T = écart type, C.V = coefficient de variation, LD = limite de détection

Les teneurs en alcalino-terreux Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les eaux sont respectivement conformes aux valeurs guides de l'OMS à 90,91 et 78,79 %. Les fortes teneurs en Magnésium tout comme celles du calcium peuvent contribuer considérablement à l'augmentation de la dureté de l'eau et entrainer des problèmes de goût et d'entartrage [11, 12, 16]. Les degrés de dureté des eaux [12, 16] sont consignés dans le **Tableau 2**.

Considérant les métaux alcalins, un seul échantillon a une teneur en sodium un peu supérieure à la valeur limite de l'OMS. Les teneurs en potassium sont à 100 % dans la gamme de valeurs désirables.

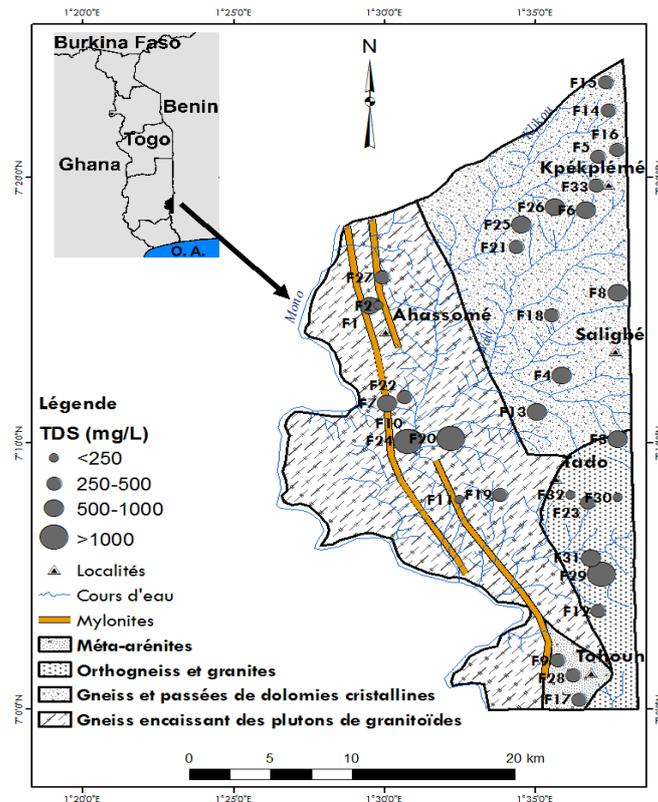


Figure 2 : Distribution spatiale des valeurs de TDS

Tableau 2 : Degré de dureté des eaux

Intervalle de dureté (mg CaCO ₃ /L)	Degré de dureté	Nombre d'échantillons	Pourcentage d'échantillon
< 75	Très douce	2	6,06
75 – 150	Douce	8	24,24
150- 200	Eau moyennement dure	9	27,27
200-500	Eau dure	11	33,33
> 500	Eau très dure	3	9,10

Parmi les anions, l'ion bicarbonate est le plus abondant. Un seul forage a une teneur en dehors de la gamme désirable de l'OMS. Ce point présente une valeur de TDS semblable à celle des eaux de pluie et de sources [21]. Les teneurs en Cl⁻ et SO₄²⁻ présentent des teneurs conformes à 100 % aux valeurs guides de l'OMS. Les teneurs en nitrate NO₃⁻ indiquent que 21,21 % des échantillons ont des teneurs supérieures à la valeur guide l'OMS et sont comprises entre 89,6 et 626,9 mg/L. Ces fortes teneurs en nitrate montrent l'état de vulnérabilité des ressources en eau à la pollution anthropique.

4-2. Faciès hydrochimiques

La composition des eaux en ions majeurs révèle Les anions et cations majeurs sont respectivement abondants dans l'ordre $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$ puis $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$. Ainsi, les eaux sont caractérisées des faciès bicarbonatés prépondérants : Ca/Mg/Na-HCO_3 (15/33), Ca/Na-HCO_3 (4/33), Na-HCO_3 (6/33), Na/Mg-HCO_3 (5/33) et un faciès chloruré minoritaire (3/33). Le tableau 1 montre qu'à part le pH qui a une variation presque uniforme ($\text{CV} < 10 \%$), la variation des autres paramètres est hétérogène ($\text{CV} > 50 \%$). Mais l'analyse de la distribution spatiale des faciès (**Figure 3**) révèle une certaine cohérence spatiale par le regroupement des eaux de même faciès. Cette tendance à l'hétérogénéité des valeurs des variables et à une cohérence spatiale des faciès reflète bien un système aquifère où l'intensité des processus hydrogéochimiques est très variable dans les conduits d'écoulement préférentiels [20, 22]

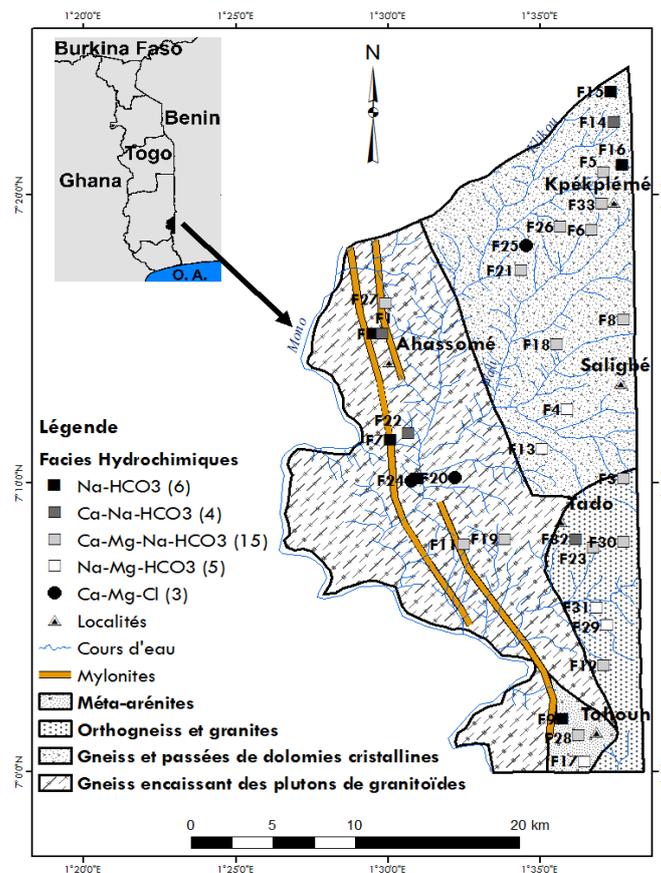


Figure 3 : Distribution spatiale des faciès hydrochimiques

Les relations faciès vs TDS et faciès vs altitude représentées aux **Figures 4 (a) et (b)** montrent une valeur médiane des teneurs en solides totaux dissous qui augmente dans l'ordre des faciès Ca-Na-HCO_3 , Ca-Mg-Na-HCO_3 , Na-HCO_3 , Na-Mg-HCO_3 et Ca-Mg-Cl . Par contre, la valeur médiane des altitudes, évolue en sens inverse. Les contrastes du relief dans la zone d'étude jouent probablement un rôle important sur la recharge, l'écoulement souterrain et les processus de minéralisation [1-3, 20, 22].

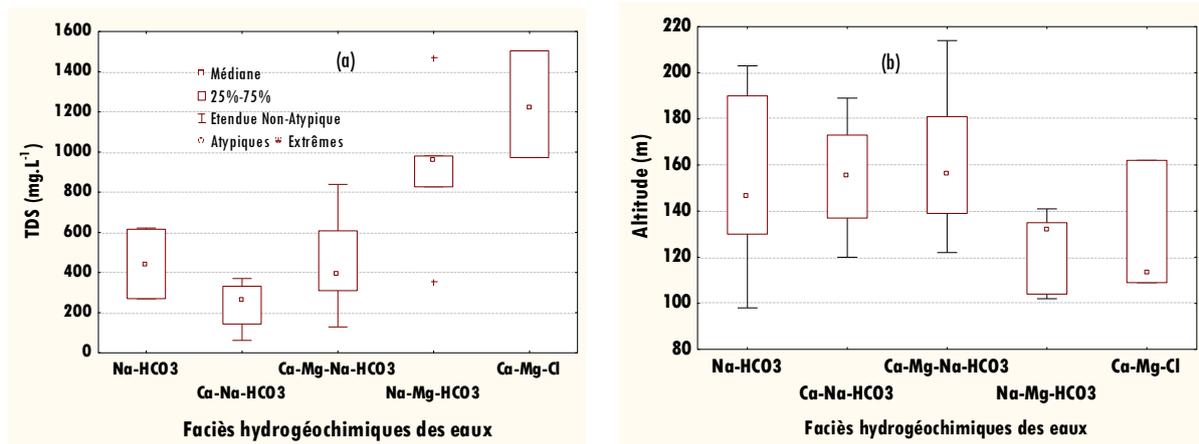


Figure 4 : Boîtes à moustache des TDS (a) et de l'altitude (b) en fonction des faciès

Dans la plupart des modèles hydrogéochimique les eaux de faciès Ca-(Na)-HCO₃ caractérisent les eaux de recharge dans les zones où elles sont à une étape primaire de leur minéralisation alors que les eaux minéralisées riches en Na⁺ et/ou Mg²⁺ caractérisent souvent celles ayant atteint une étape avancée dans leur processus de minéralisation [1, 16, 20, 22]. Sur cette base, et vu l'absence des formations d'évaporites dans notre zone d'étude, il apparait que la recharge a lieu généralement en haute altitude suivi d'un écoulement souterrain vers les zones de décharge en basse altitude. La disposition des quartiles à 25 % et à 75 % des trois premiers faciès, dans des intervalles comparables de TDS et d'altitude, indique une origine commune des eaux [3, 20]. L'idée d'un faible degré de minéralisation associé à une recharge moderne pour les eaux de faciès Na-HCO₃ et Ca-Na-HCO₃ et d'un stade de minéralisation plus ou moins avancé pour les faciès Na-Mg-HCO₃, Ca-Mg-Cl, est supportée dans la **Figure 5** par des indices de saturation de calcite et de dolomite négatifs avec $ISC > ISD$ pour le premier groupe de faciès et des indices positifs avec $ISC < ISD$ pour le deuxième groupe de faciès.

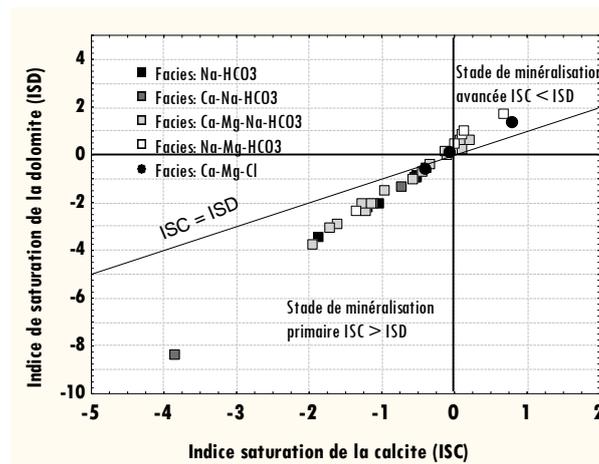


Figure 5 : Variation de l'indice de saturation de la dolomite en fonction de l'indice de saturation de la calcite

4-3. Classification hiérarchique

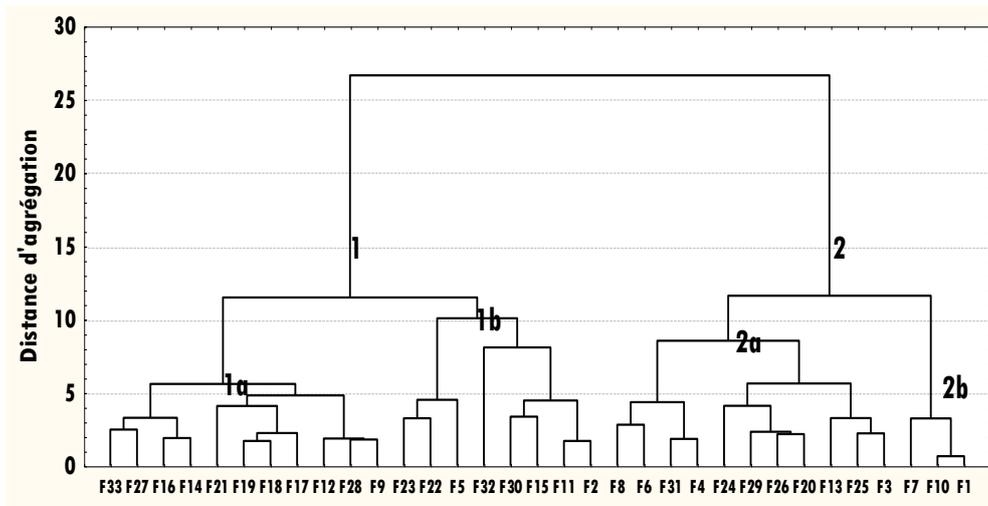


Figure 6 : Dendrogramme de l'ACH

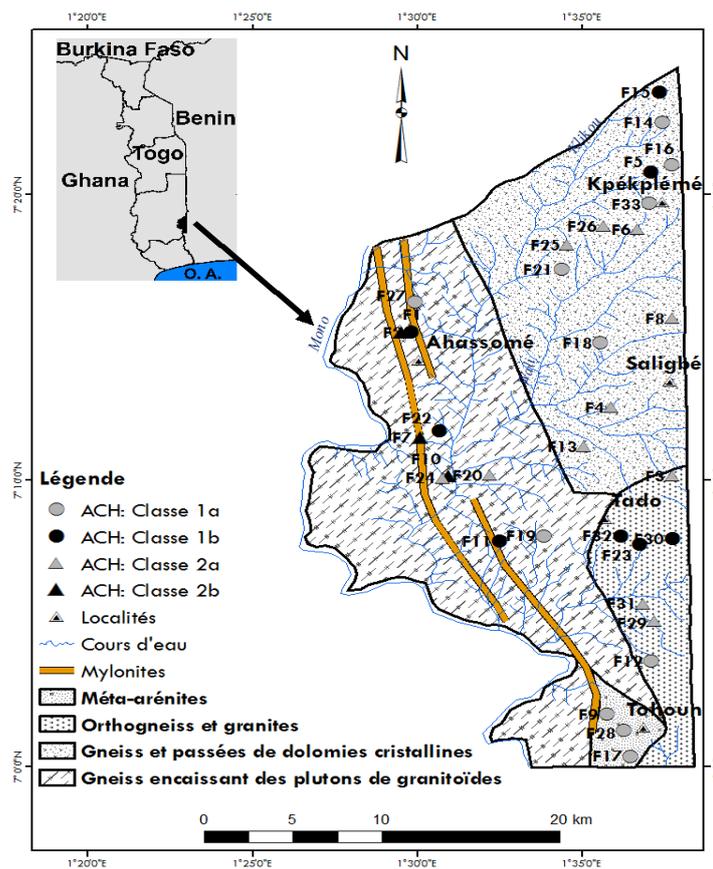


Figure 7 : Distribution spatiale des groupes et classes d'échantillons issus de l'ACH

Le résultat de l'analyse des clusters hiérarchiques est représenté par le dendrogramme de la **Figure 6** qui met en évidence deux groupes d'échantillons. Chacun des deux groupes peut être subdivisé en deux classes à un premier niveau. La distribution spatiale des groupes et classes est présentée à la **Figure 7**.

Le groupe 1 constitué de 19 échantillons, est caractérisé par de faibles valeurs de TDS comprises entre 62 et 450 mg/L. Ces eaux présentent des teneurs en nitrate inférieures à 50 mg/L. Les eaux de la classe 1a, plus présentes dans les méta-arénites et gneiss affichent des valeurs de TDS plus grandes que celles de la classe 1b qui se retrouvent dans les domaines granitiques. Le groupe 2 constitué de 14 échantillons est caractérisé par des teneurs moyennes à élevées de TDS (528 à 1504 mg/L). Ces eaux reflètent bien l'état de contamination de la nappe où la moyenne et la médiane des teneurs en nitrates sont respectivement 154,85 et 61,37 mg/L. Les deux classes d'eaux constituant ce groupe, se distinguent par leur degré de minéralisation et les teneurs en sulfate et chlorure élevées. Les eaux de la classe 2a se retrouvent dans toutes les formations autres que les méta-arénites et ont des valeurs de TDS allant de 608 à 1504 mg/L avec des teneurs en SO_4^{2-} de 2,4 à 40 mg/L et des teneurs en Cl^- de 48 à 200 mg/L. Par contre, les trois forages de la classe 2b se retrouvent dans la bande mylonitisée avec des TDS allant de 528 à 622 mg/L et des teneurs en SO_4^{2-} allant de 116,9 à 123,5 mg/L et en Cl^- compris entre 19 et 20 mg/L. Ces trois points sont probablement soumis aux mêmes sources et aux mêmes processus de minéralisation. Le contexte géologique ne permet pas la formation des minéraux évaporitiques tels que le gypse et l'anhydrite mais les ratios SO_4/Cl élevés peuvent être dus à un flux prédominant des eaux de lessivages des surfaces à forte exploitation agricole [15, 23]. L'analyse spatiale montre une cohérence entre la distribution des facies, l'environnement géologique et les groupes/classes issus de l'ACH. Il apparaît donc une signification réelle des résultats de l'ACH en termes de description des similarités dans la composition chimique des eaux [1, 20].

4-4. Analyse factorielle

Tableau 3 : Matrice de corrélation de Pearson

	pH	TDS	Ca	Mg	Na	K	Fer total	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	F	Turbidité	Ox. KMnO ₄
pH	1													
TDS	0,63	1												
Ca	0,67	0,93	1											
Mg	0,66	0,92	0,83	1										
Na	0,50	0,87	0,72	0,73	1									
K	0,09	0,33	0,34	0,29	0,21	1								
Fer total	0,31	-0,04	-0,05	-0,02	-0,07	0,03	1							
HCO ₃	0,74	0,79	0,7	0,85	0,76	0,19	0,07	1						
Cl	0,33	0,85	0,75	0,76	0,65	0,42	-0,07	0,46	1					
SO ₄	0,09	0,46	0,38	0,29	0,61	0,09	0,01	0,21	0,34	1				
NO ₃	0,08	0,53	0,55	0,46	0,28	0,37	-0,21	0,05	0,79	0,22	1			
F	0,26	0,35	0,19	0,4	0,44	-0,12	0,02	0,41	0,21	0,19	0,04	1		
Turbidité	0,23	0,07	0,04	0,17	0,01	0,07	0,73	0,12	0,05	0,17	0,13	0,03	1	
Ox.KMnO ₄	0,21	0,36	0,34	0,15	0,34	0,17	0,22	0,05	0,39	0,26	0,26	0,09	0,06	1

Les valeurs en gras sont à un niveau de confiance de 95 % soit statistiquement significatives à $p < 0,05$

Tableau 4 : Chargement des facteurs issus de l'ACP

Variables	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 3	Facteur 4
pH	0,80	0,04	-0,06	0,33
TDS	0,83	0,38	0,37	-0,05
Ca	0,76	0,46	0,26	-0,03
Mg	0,90	0,31	0,13	0,00
Na	0,75	0,08	0,54	-0,11
K	0,13	0,71	-0,02	0,10
Fer total	0,01	-0,07	0,06	0,93
HCO ₃	0,96	-0,01	0,00	0,07
Cl	0,53	0,65	0,40	-0,09
SO ₄	0,19	-0,01	0,81	0,01
NO ₃	0,16	0,79	0,28	-0,25
F	0,52	-0,44	0,31	-0,12
Turbidité	0,08	0,01	0,08	0,87
Oxydabilité KMnO ₄	0,03	0,27	0,65	0,22
Valeurs propres	4,83	2,28	1,95	1,91
% de la variance	34,53	16,31	13,96	13,64
% de variance cumulée			78,44	

L'analyse factorielle par ACP est appliquée afin d'expliquer les similarités ou les variations dans la composition chimique des eaux par les corrélations entre les paramètres hydrochimiques en termes de facteurs ou processus géochimiques majeurs [14, 19, 20]. Les résultats de l'ACP sont consignés dans les **Tableaux 3 et 4**.

La matrice de corrélation de Pearson indique de fortes corrélations du TDS avec Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻ et Cl⁻. Il s'agit des ions majeurs qui contribuent principalement à la minéralisation des eaux. La contribution de NO₃⁻ et SO₄²⁻ est non négligeable. La turbidité est fortement corrélée avec le fer total mais non pas avec l'oxydabilité au KMnO₄. L'ensemble de ces résultats indique que la composition chimique des eaux est contrôlée par des processus assez diversifiés et plus ou moins complexes. Néanmoins, 4 facteurs dominants ont pu être extraits à partir de l'ACP (**Tableau 4**). Les quatre facteurs représentent 78,44 % de la variance total des données. Le Facteur 1 explique 34,53 % de la variance totale et est fortement corrélé avec les variables pH, TDS, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et HCO₃⁻. Ce facteur reflète bien les produits d'hydrolyse des minéraux silicatés et carbonatés. Les fortes corrélations du HCO₃⁻ avec le pH, le TDS et les cations majeurs Ca²⁺, Mg²⁺ et Na⁺ (**Tableau 3**) indiquent que le facteur 1 représente l'influence de l'altération naturelle des minéraux silicatés (feldspaths alcalins, plagioclases, biotite et amphibole) qui dominent l'environnement géologique. La variation de la somme des alcalino-terreux en fonction des ions bicarbonate (**Figure 8**) montre que la majorité des points s'écarte sensiblement de part et d'autre de la droite de dissolution des carbonates (y = x). Les excès de HCO₃ sont *de facto* compensés par les alcalins provenant probablement de l'hydrolyse des silicates alors que les excès d'alcalino-terreux seraient compensés par les anions d'acide fort. De plus, dans le diagramme (Ca+Mg) vs Σ cations (**Figure 9**) tous les points sont en dessous de la bissectrice avec un rapport (Ca+Mg)/Σcations qui tend vers 0,5. Ces résultats confirment bien la prédominance de l'hydrolyse des silicates [23, 24].

La relation entre pH et HCO_3^- représentée à la **Figure 10** révèle que les eaux ont une forte $p\text{CO}_2$ dans l'ordre de $10^{-1,5}$ atm. Cette pression est caractéristique des zones racinaires [3, 14, 21, 23, 25]. Les minéraux sont probablement hydrolysés au contact des eaux d'infiltration enrichies voire supersaturées en CO_2 produit en zone racinaire [3, 23, 25]. Ces résultats sont consistants à une cinétique rapide des eaux d'infiltration et à un écoulement subsurface topographique [21].

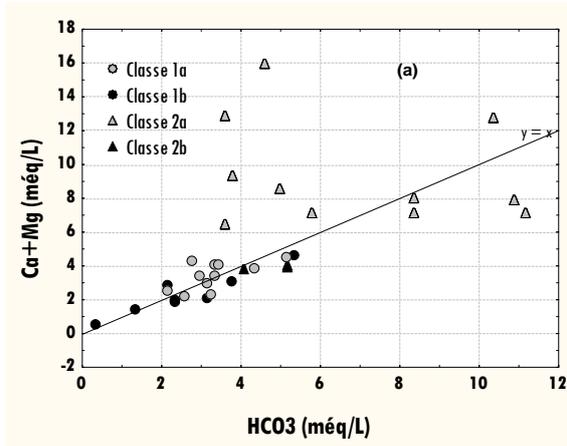


Figure 8 : $(Ca+Mg)$ vs HCO_3

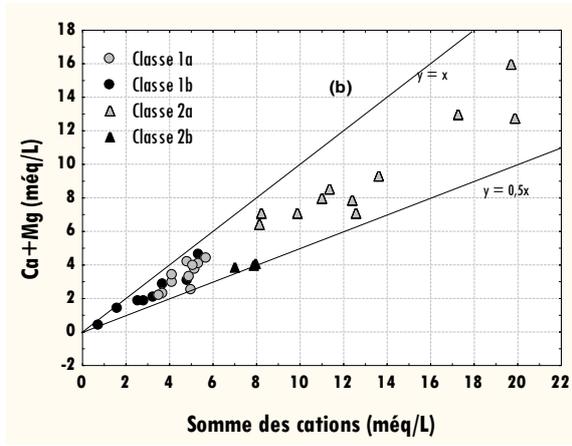


Figure 9 : $(Ca+Mg)$ vs Σ cations

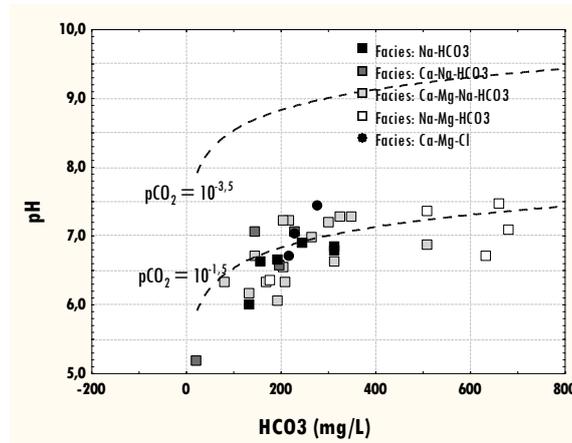
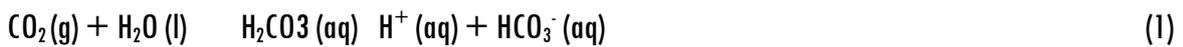


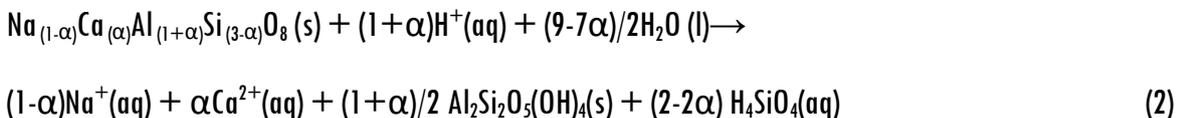
Figure 10 : Variation du pH en fonction du HCO_3^- et courbes théoriques pour des $p\text{CO}_2$ égales à $10^{-3,5}$ et $10^{-1,5}$

Les **Equations** des différentes réactions possibles sont modélisées comme suit [16, 17, 21, 23, 25] :

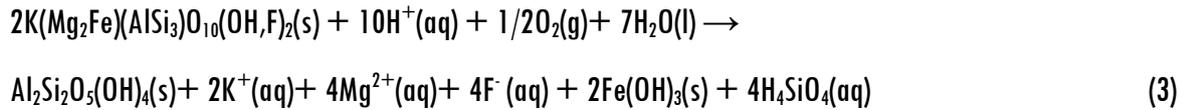
- Dissolution du CO_2 (g)



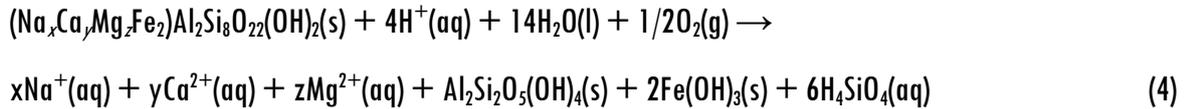
- Plagioclases



- Biotite



- Amphibole



Le diagramme (Ca + Mg - HCO₃ - SO₄) vs (Na - Cl) à la **Figure 11** est utilisé Pour mettre en évidence l'influence des échanges cationiques [1,24]. Les points marqués par les échanges Ca/Na ou Mg/Na s'alignent sur la droite de pente -1. La **Figure 8** montre un probable échange de base entre les ions alcalino-terreux de l'eau et l'ion Na⁺ fixé au substrat argileux. Les échanges inverses entre Na⁺ de l'eau et les ions alcalino-terreux du substrat argileux sont accessoires.

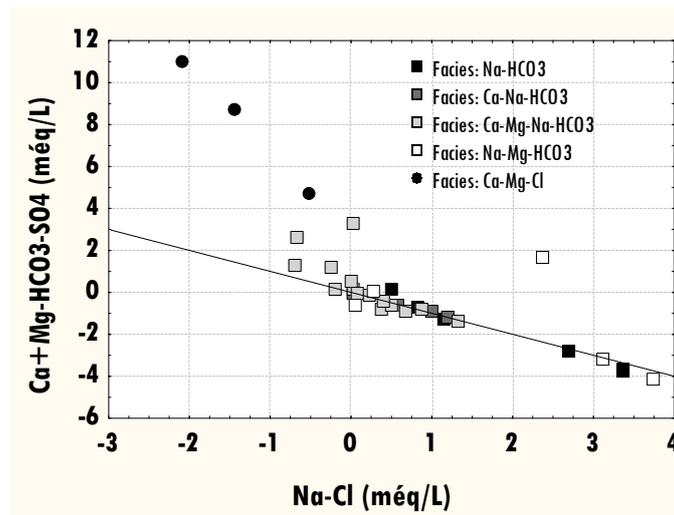


Figure 11 : (Ca + Mg - HCO₃ - SO₄) vs (Na - Cl)

Le facteur 2 est fortement corrélé avec les ions NO₃⁻, Cl⁻ et K⁺ et contient 16,31 % de la variance totale. Les fortes teneurs en NO₃⁻ et Cl⁻ étant ordinairement d'origine anthropique, le facteur 2 désigne donc les processus de contamination anthropique. Les points marqués par ce facteur sont fortement décalés de la droite de pente -1 dans la **Figure 11**, et présente un excès d'alcalino-terreux par rapport au bicarbonate. Lors des processus de nitrification, les protons libérés auront tendance à réduire l'alcalinité des eaux ou à participer éventuellement à des réactions d'échanges cationiques avec les ions alcalino-terreux [22-24, 26]. Il apparait donc un excès de cations bivalents dû à la contamination nitrique. L'analyse spatiale montre une incohérence de la distribution spatiale des teneurs en nitrate. Ceci indique que les sources de contamination sont ponctuelles. La **Figure 12** montre que la contamination par les nitrates s'accompagne d'une augmentation des teneurs en chlorure. Cette signature indique des sources potentielles telles que les déjections animales et humaines, les déchets ménagers et l'agriculture [20, 23, 26].

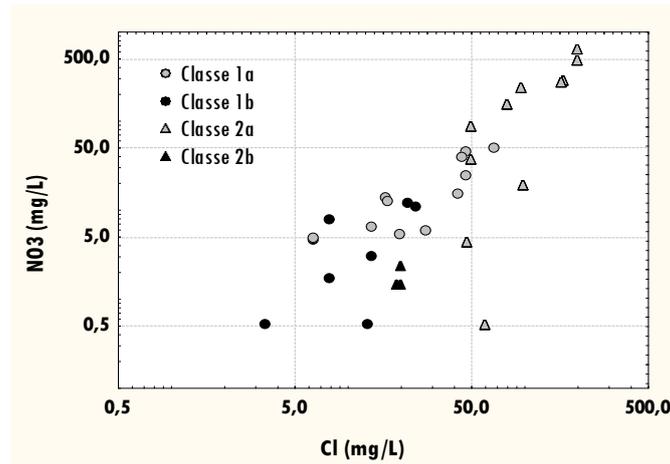


Figure 12 : Relation entre Cl et NO_3

Bien que les nitrates et chlorure semblent avoir les mêmes sources, le degré de contamination dépendrait de la nature de la source ainsi que du régime et du degré de connectivité des sources de contamination aux conduits d'écoulement souterrain. Des travaux de terrain ont permis de constater la proximité des latrines, et des activités de pâturage autour des points d'eau. La préfecture fait également partie des zones à forte culture de coton. Elle est donc sujette à une importante utilisation des engrais chimiques tels que l'urée, le NPK et le NPKSB. L'apport d'engrais semble se confirmer par un fort chargement du potassium sur ce facteur. Le facteur 3 qui explique 13,96 % de la variance totale est corrélé avec l'oxydabilité au $KMnO_4$, le sulfate et le sodium. Le facteur 4 lui explique 13,64 % de la variance totale et est fortement corrélé avec la turbidité et le fer total. Le facteur 3 désigne probablement l'influence des sels précipités à la surface et l'oxydation des composés sulfurés. Le facteur 4 affecte plus les eaux des classes 1b et 2a. Les eaux de recharge ayant subi un parcours assez court auraient tendance à être plus chargées en matières en suspension associées aux éléments abondants de la croûte terrestre comme le fer. L'influence des sels surfaciques et hypothétiques comme Na_2SO_4 , K_2SO_4 , $CaSO_4$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $NaCl$ et KCl , est mis en évidence par le diagramme de la **Figure 13** où on aperçoit dans une certaine mesure l'augmentation concomitante des alcalins et de la somme ($Cl+SO_4$). En effet, ces sels peuvent se former en surface dans les zones à fortes exploitations agricoles ou à forte dégradation du couvert végétal [23, 26]. Les conditions de climat soudano-guinéen associées à une saison sèche plus ou moins longue et à une végétation de savane pourraient favoriser la formation de ces sels surfaciques.

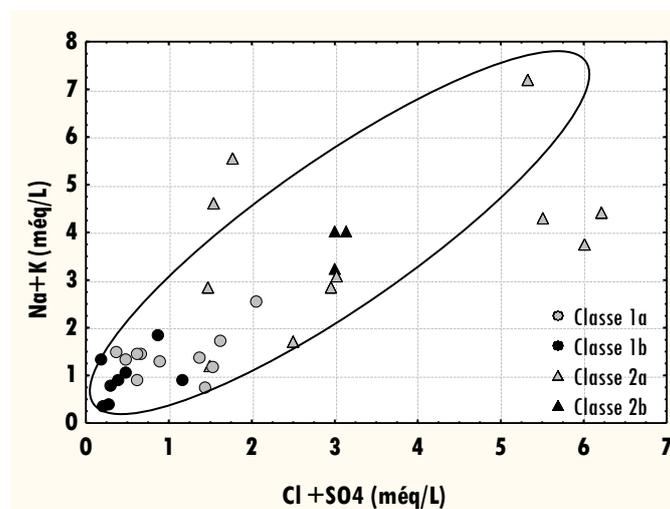


Figure 13 : $(Na+K)$ vs $(Cl+SO_4)$

5. Conclusion

Les eaux souterraines de la préfecture du Moyen-Mono (Région des Plateaux/Togo) présentent dans l'ensemble une qualité physicochimique assez bonne pour l'usage domestique. Néanmoins, les eaux de quelques forages présentent de fortes teneurs en Nitrate. Ainsi, ces eaux sont déconseillées comme eau de boisson aux nourrissons, aux femmes enceintes et au bétail. Dans l'ensemble, les eaux présentent des faciès mixtes bicarbonatés dont la distribution spatiale dépend probablement de l'extension locale des nappes et de la variabilité spatiale de l'intensité des processus de minéralisation et d'écoulement. Les eaux récentes sont préférentiellement calcosodiques et se situent plus ou moins en hautes altitudes, alors que celles ayant un temps de séjour plus ou moins long sont plus enrichies en magnésium vers les basses altitudes. Le chimisme des ressources en eaux souterraine dans la préfecture est principalement contrôlé par l'hydrolyse incongrue des minéraux silicatés, l'échange cationique de base, la dégradation de la matière végétale, ainsi que la dissolution des sels surfaciques et l'oxydation des composés sulfurés dans une certaine mesure. Ces processus sont parfois accompagnés des flux ponctuels de composés azotés d'origine anthropique. L'ensemble des résultats révèle la nécessité d'associer des investigations environnementales aux études d'implantation des forages.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude pour le soutien obtenu dans le cadre des programmes de mobilité PIMASO et UNESCO/Keizo OBUCHI afin d'entreprendre des travaux de recherche académique à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Nous adressons également nos remerciements aux referees anonymes pour leurs commentaires constructifs.

Références

- [1] - D. ADOMAKO, S. FAYE, S. OSAE, T. T. AKITI and P. MALOSZEWSKI Geochemical and isotopic studies of groundwater conditions in the Densu River Basin of Ghana, *Environmental Earth Sciences* 62 (2011) 1071-1084.
- [2] - T. K. YAO, Hydrodynamisme dans les aquifères de socle cristallin et cristallophyllien du sud-ouest de la Côte d'Ivoire : cas du département de Soubré. Apports de la télédétection, de la géomorphologie et de l'hydrogéochimie, *Thèse de Doctorat*, Conservatoire National des Arts et Métiers (France) et Université de Cocody (Côte d'Ivoire), (2009).
- [3] - T. EL-FAHEM, Hydrogeological conceptualisation of a tropical river catchment in a crystalline basement area and transfer into a numerical groundwater flow model - Case study for the Upper Ouémé catchment in Benin, *PhD thesis*, Universität Bonn, Germany (2008).
- [4] - MEAHV/DGEA, Projet de Réhabilitation et de Création des Points d'Eau dans la région des Plateaux, Rapport Final, *Volume 1* (2011).
- [5] - K. GNANDI, F. FABLO. et A. FREDERIK, Etude de faisabilité des forages manuels au Togo : Identification des zones potentiellement favorables (2009).
- [6] - J. P. SYLVAIN, A. AREGBA, J. COLLART et K.S. GODONOU, Notice explicative de la carte géologique du Togo 1/500000. Direction Generale des Mines de la Géologie et du Bureau National de Recherches Minières. *Mémoire N°6* (1986).
- [7] - MTESS-Togo, Carte de potentialités d'emplois des jeunes et des femmes dans les préfectures et sous-préfectures du Togo (2011).

- [8] - T. C. ADDRA, ATLAS de développement régional du Togo, Région des Plateaux, (1981) 109-141.
- [9] - AFNOR, Eaux : Méthode d'Essai. Recueil de normes françaises (1986).
- [10] - R. Simler, Diagrammes : Logiciel d'hydrochimie multilingue en distribution libre V6.5.; Disponible sur le site : <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>. consulté le 29/10/2014.
- [11] - M. DIÉDHIOU, S. C. FAYE, O. C. DIOUF, S. FAYE and S. WOHNLIICH, Groundwater Quality Assessment in a Coastal Sand Aquifer : Implications for Drinking Water and Agricultural Use, *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2014. 8(5) p. 585-594.
- [12] - WHO, Guidelines for Drinking-water Quality. 4th ed. (2011).
- [13] - Cloutier, V., Origine et évolution géochimique des eaux souterraines du système aquifère des Basses-Laurentides dans les roches sédimentaires Paléozoïques des basses-terres du Saint-Laurent, Québec, Canada, *Thèse de Doctorat*, Université du Québec, Canada (2004).
- [14] - N. MONTCOUDIOL, J. MOLSON and J.-M. LEMIEUX, Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada) : a regional-scale study, *Hydrogeology Journal*, (2014) DOI: 10.1007/s10040-014-1190-5.
- [15] - M. DIEDHIOU, S. C. FAYE, O. C. DIOUF, S. FAYE et S.WOHNLIICH, Origine de la salinisation des eaux souterraines dans un aquifère à forte pression anthropique : cas de la nappe de Thiaroye, Dakar, Sénégal, *Bulletin IFAN Ch. A. Diop, Dakar sér. A*, 53(2) (2014) 5-26.
- [16] - M. D. T. GNAZOU, L. M. BAWA., O. BANTON, G. DJANÉYÉ-BOUNDJOU, Hydrogeochemical characterization of the coastal Paleocene aquifer of Togo (West Africa), *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 3(1) (2011) 10-29.
- [17] - I. MALL IBRAHIMA, M. DIAW, M. N. DIENG, D. H. MADIOUNE, M. P. NGOM AND S. FAYE, Evaluation of Water Resources Quality in Sabodala Gold Mining Region and Its Surrounding Area (Senegal), *Journal of Water Resource and Protection*, 7 (2015) 247-263.
- [18] - L. TAMPO, M. GNAZOU, V. AKPATAKU, L. BAWA, G. DJANEYE-BOUNDJOU, Y. NUTO, A. OUEDA et W. GUENDA Application des méthodes statistiques à l'étude hydrochimique des eaux d'un hydrosystème tropical : cas du bassin versant de la rivière Zio (Togo), *European Scientific Journal*, 11(14) (2015) 204-225.
- [19] - C. GÜLER, G. D. THYNE, J. E. MCCRAY and K. A. TURNER, Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, *Hydrogeology Journal*, 10(4) (2002) 455-474.
- [20] - G. THYNE, C. GÜLER and E. POETER, Sequential Analysis of Hydrochemical Data for Watershed Characterization, *Ground water*, 42(5) (2003) 711-723.
- [21] - S. DIOP, F. D., M. SAMB and R. SARR, Hydrogeochemical Relationships between Spring and Subsurface Waters in the Dindéfello Area of South Eastern Senegal, *Journal of Water Resource and Protection*, 6 (2014) 1743-1754.
- [22] - S. FAYE, M. I. BA., M. DIAW and S. NDOYE, The groundwater geochemistry of the Saloum delta aquifer: Importance of silicate weathering, recharge and mixing processes, *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(12) (2010) 815-830.
- [23] - K. SRINIVASAMOORTHY, M. GOPINATH, S. CHIDAMBARAM, M. VASANTHAVIGAR and V.S. SARMA, Hydrochemical characterization and quality appraisal of groundwater from Pungar sub basin, Tamilnadu, India, *Journal of King Saud University – Science*, (26) (2014) 37-52.
- [24] - A. GIBRILLA, S. OSAE, T. T. AKITI, D. ADOMAKO, S. Y. GANYAGLO, E. P. K. BAM and A. HADISU, Hydrogeochemical and Groundwater Quality Studies in the Northern Part of the Densu River Basin of Ghana, *J. Water Resource and Protection*, 2 (2010) 1071-1081.
- [25] - S. DIOP and M. N. TIJANI, Chemical Evolution of Groundwater in the Dindéfello Plain Area in South-Eastern Senegal, *Journal of Water Resource and Protection* 6(2014) 1793-1815
- [26] - J.-K. BÖHLKE, Groundwater recharge and agricultural contamination, *Hydrogeology Journal*, 10 (2002) 153-179.