



Paramètres chimiques et source lithologique de la minéralisation des eaux souterraines des aquifères du Plateau Bamoun, Ligne Volcanique du Cameroun (LVC)

Oumar Farouk Mouncherou^{1,2}, Amidou Moundi², Jules Remy Ndam Ngoupayou², Andrew A. Ako^{1,4}, Pierre Wandji³

¹ Institut de recherches géologiques et minières, B.P. 4110 Nlongkak, Yaoundé, Cameroun; E-mail: omouncherou@yahoo.fr

² Department of earth sciences, University of Yaoundé I, P.O. Box 812 Yaoundé, Cameroon;

E-mail: moundiamidou@yahoo.fr; jrndam@yahoo.fr

³ Laboratoire de géologie, École normale supérieure, Université de Yaoundé I, BP 47 Yaoundé, Cameroon;

E-mail: pierrewandji@yahoo.fr

⁴ Graduate school of science and technology, Kumamoto University, Japan; E-mail: akoandr@es.sci.kumamoto-u.ac.jp

Химически параметри и литоложки източници на минерализацията на подземните води от водоносните хоризонти на платото Бамун от вулканската ивица на Камерун (LVC)

Умар Фарук Мунишеру^{1,2}, Амиду Мунди², Жюл Реми Ндам Нгупайу², Андрю А. Ако^{1,4}, Пиер Уанджи³

¹ Институт за минни и геоложки проучвания, П.К. 4110, Нлонгкак, Яунде, Камерун

² Департамент „Науки за Земята“, Университет Яунде I, П.К. 812, Яунде, Камерун

³ Лаборатория по геология, Екол Нормал Супериор, Университет Яунде I, П.К. 47, Яунде, Камерун

⁴ Висше училище за науки и технологии, Университет Кумамото, Япония

Резюме. Базалтовите водоносни хоризонти на платото Бамун от вулканската ивица на Камерун (LVC) представляват главен източник за питейно-битово водоснабдяване, напояване и други селскостопански цели в района. Това е отворена система, на която влияят много фактори, определящи хидрохимичните характеристики на подземните води. Това хидрохимично изследване е предприето поради отсъствие на специфични изследвания в района за влиянието на околната среда върху формирането на водите. Използвани са геохимически софтуер PHREEQC и диаграмата на Коржински при 25 °C (Parkhurst, Appelo, 1999), както и статистически методи, да да се определят процесите на формиране на химическия състав на подземните води. Интерпретацията на получените резултати от анализа на 26 представителни проби от района сочат, че редът на преобладаващите йони е следния: Mg>Na>Ca>K за катионите и HCO₃>Cl>SO₄ за анионите. Според класификацията на водите по Piper изследваните води са предимно хидрокарбонатно-калциево-магнезиеви (Ca-Mg бикарбонатен фашиес), наред с които се среща Ca-Mg хлорно-сулфатен, както и Na-K карбонатен фашиес. Изчисленият индекс на насищане (SI) на пробите сочи, че водата е ненаситена по отношение на карбонатните минерали (калцит, арагонит), на хлорита, сепиолита и талка. При някои проби тя е наситена до слабо наситена по отношение на халцедона, кварца и аморфния SiO₂. Тези резултати сочат, че промяната на силикатните минерали е главният източник на минерализиране на водите в платото Бамун. Концентрацията на йоните е по-висока във водоносните хоризонти на базалтите от равнината Нун (ЮЗ от платото Бамун), отколкото в тези на силно променените базалти на платото. При отсъствие на евапоритни скали наличието на Cl⁻ и NO₃⁻ във водите на равнината Нун говори за антропогенния им произход. Диаграмата на Коржински при 25 °C сочи, че каолинизацията е главният процес на промяна.

Ключови думи: плато Бамун, равнина Нун, водоносни хоризонти, PHREEQC, диаграма на Коржински, Камерунска вулканска ивица (LVC).

Abstract. Basaltic aquifers of Bamoun Plateau (LVC) represent a major source of groundwater supply for drinking, irrigation and other agricultural uses in this area. It is an open system where several factors interact to produce the hydrogeochemical characteristics of groundwater. Following the environmental pressures and at the absence of specific studies on this area, a hydrochemical investigation, through geochemical modelisation of PHREEQC and Korjinski at 25 °C (Parkhurst, Appelo, 1999) was used together with statistical method to determine the lithological sources and the chemical parameters variation of groundwater in these aquifers. The interpretation of analytical data of 26 samples shows that the abundance of major ions is as follows: Mg>Na>Ca>K and HCO₃>Cl>SO₄. The classification results according to Piper revealed primarily calcium bicarbonate magnesium facies, around which we can find chloride sulphate, calcium magnesium and the sodium potassium carbonate facies. The calculated SI of the groundwaters indicated that they are under saturated with respect to carbonates minerals (calcite and aragonite), sepiolite, chlorite and talc, slight super saturation with respect to chalcedony, quartz and silica. These results show the alteration of silicate minerals as the main factor controlling the chemistry of water resources in the Bamoun Plateau. Also, higher concentration of ions is noted in recent basaltic aquifers of the Noun Plain (SW of Bamoun Plateau) than in aquifers from weathering basalt Plateau. In the absence of evaporitic rocks in this region, NO₃⁻ and Cl⁻ are of an anthropogenic origin. In addition the Korjinski diagram at 25 °C indicates kaolinization as the dominant phenomenon of weathering.

Key words: Bamoun Plateau, Noun Plain, aquifers, PHREEQC, Korjinski diagram, LVC.

Résumé. Les aquifères basaltiques du Plateau Bamoun (LVC) représentent une source majeure d'approvisionnement en eau souterraine pour la consommation, l'irrigation et autres usages agricoles de la région. C'est un milieu ouvert où plusieurs facteurs interagissent pour produire l'ensemble des caractéristiques hydrogéochimiques des eaux souterraines. Suites aux pressions environnementales et en absence des études spécifiques sur la zone, une investigation hydrochimique, à travers la modélisation géochimique de PHREEQC et de Korjinski à 25 °C (Parkhurst, Appelo, 1999), ainsi que les méthodes statistiques ont été utilisées conjointement, pour déterminer la source lithologique et les variations des paramètres chimiques des eaux souterraines de ces aquifères. L'interprétation des données des analyses obtenues sur 26 échantillons représentatifs de la région montre que l'ordre d'abondance des ions majeurs est le suivant: Mg>Na>Ca>K pour les cations et HCO₃⁻>Cl⁻>SO₄⁻² pour les anions. Les résultats de la classification de Piper déclinent principalement le faciès bicarbonaté calcique magnésien autour duquel on trouve le faciès chloruré-sulfaté-calci-magnésien, ainsi que le faciès carbonaté sodo-potassique. L'indice de saturation (SI) des échantillons d'eau calculé, indique une sous-saturation par rapport aux minéraux carbonatés (calcite, aragonite), chlorite, sépiolite et talc, la saturation et une faible saturation de certains échantillons par rapport à la calcédoine, le quartz et la silice amorphe. Ces résultats indiquent l'altération des minéraux silicatés comme principale source de minéralisation des ressources en eau dans le Plateau Bamoun. Cependant, la concentration en ions est plus élevée sur les eaux des aquifères basaltiques de la plaine du Noun (SW du Plateau Bamoun) que celles issues des aquifères des basaltes de plateau fortement altérés. Par ailleurs, en absence des roches évaporitiques, la présence du NO₃⁻ et Cl⁻ dans la plaine du Noun, est d'origine anthropogène. Le diagramme de Korjinski à 25 °C indique que la kaolinisation est le phénomène d'altération dominant.

Mots clés: Plateau Bamoun, plaine du Noun, aquifères, PHREEQC, diagramme de Korjinski, LVC.

Introduction

Le Plateau Bamoun est une unité de la Ligne volcanique du Cameroun (LVC) qui a été le siège des activités géologiques diverses d'âges variées. Les aquifères, mises en place par ces événements, constituent la source principale de réserve en eau de la région, destinée à la consommation humaine et aux usages agro, sylvio, pastorales. Ces différentes sources en eau aux goûts et aux saveurs divers, sont intensément exploitées et certaines personnes leurs attribuent des vertus thérapeutiques. Seulement en l'absence des analyses, l'utilisation de ces ressources peut s'avérer dangereuse à la longue au vue des épidémies de diarrhée récurrentes ces dernières années. Les études menées jusque là ont porté essentiellement sur le répertoire et la localisation des ressources en eau de ce secteur, sur les sources et rivières du Cameroun (Olivry, 1986 ; Tita et al., 2007) et sur les sources thermominérales du Cameroun (Le Maréchal, 1976 ; Tanyileke et al., 1996). Il est entendu que généralement les propriétés géochimiques des eaux souterraines sont en dehors des facteurs climatiques et anthropogènes, tributaires des caractéristiques des roches encaissantes (Jacks, 1973 ; Rajmohan et al., 2000 ; Mohan et al., 2000), surtout des roches basiques vulnérables à l'altération (Jacks, 1973 ; Bartarya, 1993). Il est question dans cette étude d'explorer les propriétés géochimiques et de retrouver l'encaissant, qui a été à l'origine de la minéralisation des ressources en eau du Plateau Bamoun à travers la modélisation de PHREEQC et les méthodes statistiques. Ce qui permettra d'établir une cartographie des ressources en eau de la région et aussi d'envisager une meilleure gestion de cette ressource.

Hydrologie générale de la zone d'étude

Situé entre la longitude 10°32'–10°56' E et la latitude 5°26' et 5°35' N, 5°40' et 6° N (fig. 1), le Plateau Bamoun jouit d'un climat équatorial de mousson, tempéré par l'altitude. Les variations saisonnières sont très faibles. Au cours de la saison de pluie, les

précipitations maximales sont observées en août–septembre et on peut compter environ 185 jours de pluie par an. Il y a deux saisons distinctes, une saison sèche de novembre à juin et une saison de pluie de juillet à octobre. Les données du Centre météorologique de Koutaba et du Barrage Hydroélectrique de Bamendjin obtenues sur 10 ans (CRH/IRGM, 2010), montrent que le Plateau Bamoun a une pluviométrie moyenne annuelle de 2500 mm. L'humidité relative annuelle est de 65%, et la température annuelle moyenne de 25 °C. Ces conditions climatiques ont favorisé une altération poussée des roches environnantes, une extension des activités agro-agropastorales et auraient une conséquence sur l'hydrochimie de la région.

Géologie de la région

Le Plateau Bamoun couvre une surface d'environ 1800 km² sur laquelle se sont déposées en partie des projections pyroclastiques et des cendres volcaniques. Avec une altitude moyenne de 1200 m, il est hérissé de 3 massifs volcano-plutoniques, alignés du nord au sud (le Mbam, 2335 m ; le Nko–Gam, 2268 m ; le Mbatpit, 1988 m) et d'une quarantaine de cônes stromboliens plus récents sur la plaine du Noun. Les basaltes de plateaux affleurent sur plus de la moitié du plateau et leur mise en place a été favorisée par les réactivations des structures panafricaines, marquées par la direction de déformation principale N 30° E (Moreau et al., 1987). Les basaltes de Plateau, datées de 51 à 46 Ma, selon les travaux de Moundi (2004) et Moundi et al. (2007), portent la signature d'une ancienne activité volcanique comme en témoigne leur altération profonde qui forme des sols ferrallitiques. Ce sont les basaltes dits transitionnels qui affleurent dans la partie occidentale, principalement dans la zone de Bangourain et Foumban, ainsi que les basaltes alcalins qui affleurent à l'est, autour de Foumban, Koutaba (Moundi et al., 1996, 2007 ; Moundi, 2004) et de Foubot (Wandji, 1985, 1995). Ils reposent sur un socle précambrien granito-gneissique, affleurant principalement dans le nord du Plateau Bamoun et parsemé par endroit (Njonfang,

Fig. 1. Situation du Plateau Bamoun sur la Ligne Volcanique du Cameroun (LVC)

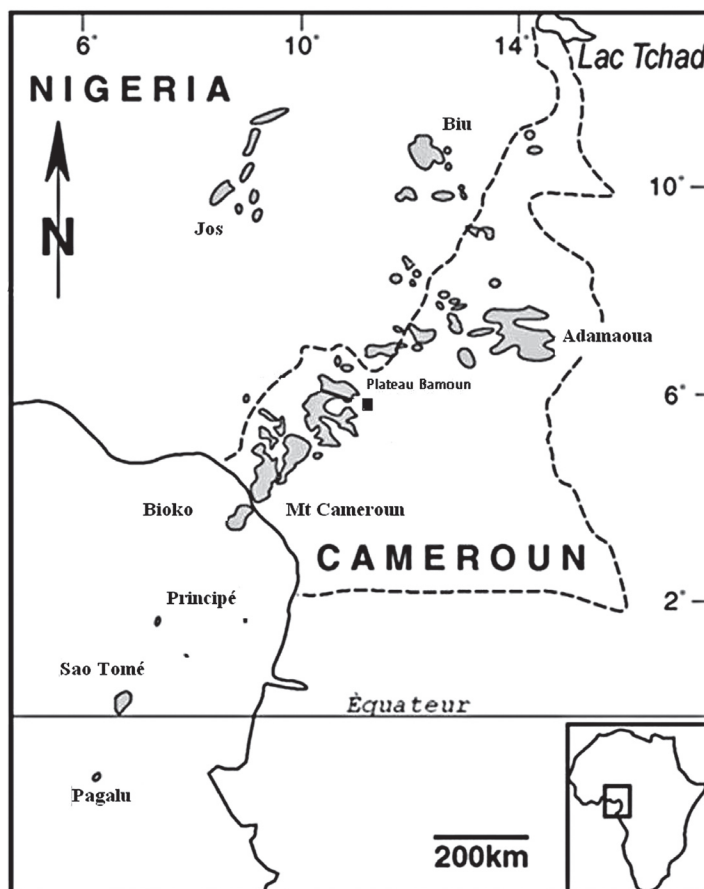
En gris – roches volcaniques recentes de la LVC

Fig. 1. Plateau Bamoun in the Cameroon Volcanic Line (LVC)

In gray, recent volcanic rocks of the LVC

Фиг. 1. Местоположение на платото Бамун върху Камерунската вулканска линия (LVC)

В сиво – младите вулканите на LVC



1998). Le Sud du Plateau Bamoun est caractérisé par des roches volcaniques de diverses origines qui, selon Geze (1943), constituent les phases éruptives suivantes : une ancienne série volcanique (basaltes et andésites), une série volcanique d'âge moyenne (rhyolites, ignimbrites) et la jeune série volcanique (basaltes, cendres, scories et de lapilli). L'épaisseur de ces coulées de lave varie de 10 m (Ngouodam) à 55 m (Nkouondja, Nkouotlouom).

Méthodologie

Échantillonnage

Les points d'échantillonnage ont été sélectionnés sur la base des cartes topographiques et des photos aériennes (Dumort, 1968) et réajustés sur le terrain. L'échantillonnage a été entrepris en avril et en décembre 2009, périodes au cours desquelles 24 échantillons des roches, des sols variés et 26 échantillons d'eau ont été prélevés (fig. 2). Le nombre d'échantillons d'eau, sélectionné en 2009 sur la base des différences entre les paramètres physiques, a été limité lors de l'analyse, par souci de représentativité dans la zone d'étude. Les échantillons analysés proviennent de 4 puits (2 à Foubot, 1 à Baïgom et Mbamkouop) et 4 forages

(2 à Foubot, 1 à Fouban et 1 à Mbamkouop), avec des profondeurs d'eau allant de 6 à 25 m. Neuf des 12 sources proviennent de la plaine du Noun, ainsi que les 5 lacs explorés. Deux événements pluvieux ont été également échantillonnés à Fouban et Foubot.

La localisation et l'altitude des sites d'échantillonnage sélectionnés ont été déterminées sur le terrain en utilisant un GPS Garmin. L'eau des puits a été tirée à l'aide des seaux de puisage en plastique attachés avec des cordes, tandis que l'eau des forages a été récoltée par pompage pendant 5–15 min avant l'échantillonnage. Les eaux ont été recueillies dans un collecteur après rinçage à l'eau à échantillonner. L'eau du collecteur a été remplie dans les bouteilles en plastique de 500 ml après rinçage à l'échantillon et préservée de l'air afin d'éviter l'évaporation. Les paramètres physiques tels que le pH, la conductivité électrique (CE), la température de l'eau des sources d'eau échantillonnées ont été mesurés *in situ* en utilisant un pH/EC/température DKK TOA-mètre.

Analyse

Les analyses ont été effectuées au laboratoire de géochimie de l'Unité de Surveillance de l'Environnement (USE) du Centre National de l'Énergie, des Sciences et des Techniques Nucléaires (CNESTEN) de Rabat

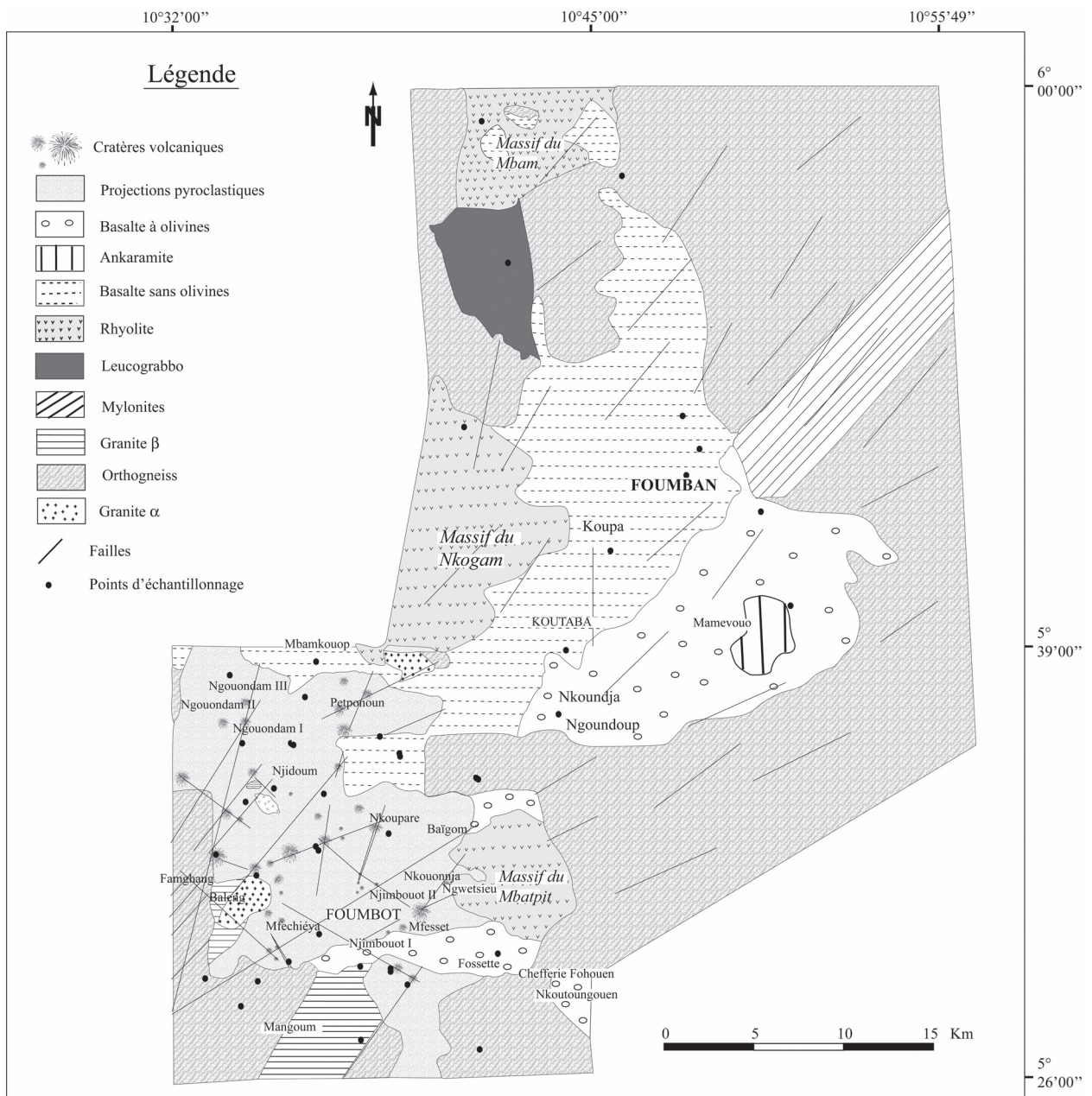


Fig. 2. Géologie du Plateau Bamoun (Wandji, 1995 ; Moundi et al., 2007) et points d'échantillonnage des ressources en eau
Fig. 2. Geology of the Plateau Bamoun (Wandji, 1995; Moundi et al., 2007) and sampling points of water resources
Фиг. 2. Геоложка карта на платото Бамун (Wandji, 1995; Moundi et al., 2007) с местата на опробване на водите

au Maroc. Les ions suivants ont été analysés : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , le bicarbonate HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et la silice dissoute (H_4SiO_4) par spectromètre ICP. Les échantillons dont les CE ont plus de $200 \mu\text{S}/\text{cm}$ ont été soumis à la dilution par l'eau distillée 20 fois avant l'analyse des principaux ions. Aucune dilution n'a été faite pour les échantillons aux conductivités électriques inférieures à $200 \mu\text{S}/\text{cm}$. Tous ces échantillons ont été préalablement passés aux filtres de $0,2 \mu\text{m}$,

avant la détermination des ions majeurs, du phosphate et de la silice dissoute. La fiabilité du produit chimique mesuré a été vérifiée à l'aide d'une équation de la balance de charge (Appelo, Postma, 1999), et il a été dans l'intervalle limité de $\pm 10\%$ pour tous les échantillons. Les mesures d'alcalinité ont été effectuées par titrage acide à partir du volume de $0,02\text{N}$ de H_2SO_4 , ajouté à l'échantillon pour atteindre le point final de titrage, qui a été marquée par un pH de 4,5.

Traitement des données

Les méthodes statistiques et la version Windows 2.1 du programme géochimique de PHREEQC (Parkhurst, Appelo, 1999) ont été utilisées. Il s'agit, sur la base des calculs thermodynamiques (Karpov, Kaz'min, 1972 ; Morel, Morgan, 1972 ; Plummer et al., 1976), d'évaluer les processus géochimiques qui sont à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines dans le Plateau Bamoun. Une attention particulière est accordée aux paramètres chimiques sélectionnés, tels que la pression partielle de CO₂ (P_{CO₂}) et l'indice de saturation (SI) des eaux à l'égard de certains minéraux. Les données thermodynamiques utilisées pour ces calculs sont de Fritz (1975). En utilisant le SI et les diagrammes d'activité, il est possible de prédire la réaction minéralogique à partir des données des eaux souterraines sans recueillir les échantillons de la phase solide et l'analyse minéralogique (Deutsch, 1997). L'indice de saturation d'un minéral donné est défini dans l'équation de Garrels et Mackenzie (1967) :

$$SI = \lg (IAP/K_{sp}),$$

où IAP est le produit de l'activité ionique de la solution et K_{sp} – le produit de solubilité à un moment et à une température donnée (constante thermodynamique d'un échantillon à l'équilibre et à une température donnée).

Un indice SI inférieur à zéro indique que l'eau souterraine est sous-saturée par rapport à ce minéral. Une telle valeur pourrait refléter le caractère de l'eau provenant d'une formation avec une quantité insuffisante de minéraux pour la solution où le temps de séjour est court. Un indice SI supérieur à zéro précise que l'eau souterraine est sursaturée par rapport à la matière minérale particulière et elle est donc incapable de dissoudre plusieurs minéraux. Une telle valeur de l'indice reflète les eaux souterraines de décharge d'un aquifère contenant une quantité suffisante de la matière minérale avec suffisamment de temps de séjour pour atteindre l'équilibre. Néanmoins, la sursaturation peut également être produite par d'autres facteurs qui comprennent la dissolution incongruante, l'effet d'ion commun, l'évaporation, l'augmentation rapide de la température et du CO₂ en solution (Langmuir, 1997 ; Ako et al., 2010).

Résultats et discussions

Paramètres physico-chimiques

Les données physico-chimiques et le résumé statistique des ressources en eau sont présentés sous formes brutes dans le tableau 2. Ainsi, le pH de l'eau des pluies et des lacs est en moyenne de 5,9 et 5,4 respectivement. Les sources, les puits et les forages ont des valeurs moyennes de 6,1 ; 6,0 et 6,0. Dans l'ensemble, les eaux

de la nappe libre du Plateau Bamoun ont un pH variant entre 4,1 et 7,1. Ces résultats leur confèrent un caractère acide. Cette acidité est probablement liée à l'hydrolyse des silicates et des acides humiques provenant de la décomposition de la matière organique des zones d'infiltration. Le total des solides dissous (TDS) varie entre 14 (pluies) et 323 mg/l (puit de Foubot centre). En référence à la norme internationale des eaux douces qui ont un TDS < 600 mg/l (Davis, De Wiest, 1966 ; Freeze, Cherry, 1979) ces eaux sont suffisamment diluées pour être potable. L'alcalinité, qui est la composante essentielle d'anions de l'eau, montre une large gamme des valeurs, variant de 0,51 à 257,84 mg/l. Les valeurs élevées se retrouvent dans les sources, les puits et les forages de la plaine du Noun. Cela atteste dans l'ensemble que la minéralisation est acquise dans la zone non saturée. Les minéralisations des ressources en eau, issues des basaltes de Plateau sont faibles car les conductivités électriques sont dans l'ensemble inférieures à 200 µS/cm (Detay, 1993 ; tableau 1). Par contre, les ressources de Fossette, Koupare, Njidoun (plaine du Noun) présentent des conductivités moyennes à importantes, en se référant au tableau de conductivité de Detay (1993). Ces différences de valeurs permettent de distinguer les eaux liées au volcanisme ancien, fortement altéré, ou au volcanisme récent de la plaine du Noun.

Mg et HCO₃ sont respectivement le cation et l'anion dominant dans l'eau des lacs, des sources et des puits ; l'eau des forages ayant plutôt le Na comme cation dominant. L'abondance relative des cations majeurs dans les eaux est Mg > Na > Ca > K, tandis que celle des anions est HCO₃ > NO₃ > SO₄ > Cl (tableau 2). Les températures de l'eau varie de 23 °C pour la source de Njognom (plaine du Noun) à 29 °C pour la source Royale de Fouban, avec une valeur moyenne générale de 26 °C. La plage de valeurs montre que la température de l'eau dans le Plateau Bamoun n'est pas uniforme.

Tableau 1
Relation entre conductivité et minéralisation (Detay, 1993)

Table 1
Relationship between conductivity and mineralization (Detay, 1993)

Таблица 1
Връзка между проводимостта и минерализацията (Detay, 1993)

Conductivité électrique (µS/cm)	Minéralisation
<100	très faible
100 à 200	faible
200 à 400	peu accentuée
400 à 600	moyenne
600 à 1000	importante
>1000	excessive

Tableau 2

Données physico-chimiques et statistiques des ressources en eau du Plateau Bamoun

Table 2

Physico-chemical data and statistics of the Plateau Bamoun water resources

Таблица 2

Физикохимични и статистически параметри на водните запаси от платото Бамун

Echantillon	Source	TDS (mg/l)	T (°C)	pH	CE (µs/cm)	TZ ⁺ (meq)	TZ ⁻ (meq)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	SiO ₂ (mg/l)	Dureté (°THf)
Fp1	pluie	14	28	5,4	26	0,1	0,2	0,25	0,1	0,5	0	10,00	1	0,8	0	0,4	0
Fp2	pluie	14	27	6,3	26	0,1	0,2	0,32	0,1	0,4	0	9,00	1	1,1	1	0,7	0
	moyenne	14	27	5,9	26	0,1	0,2	0,29	0,1	0,4	0	9,50	1	0,9	1	0,5	0
Cvm	lac	73	25	5,0	635	1,1	0,9	5,23	5,5	7,2	3	31,00	2	3,1	16	0,7	4
Klp	lac	83	24	5,6	375	1,0	1,1	4,54	4,3	6,4	4	36,00	2	0,2	21	4,5	3
Flk	lac	61	26	4,3	145	0,8	0,8	5,23	1,9	6,2	2	13,00	1	1,6	24	4,0	2
Flf	lac	67	25	6,5	176	0,8	0,9	4,93	3,3	4,2	2	11,00	1	1,7	33	4,4	3
Flf	lac	59	25	5,5	128	0,9	0,7	5,33	4,2	5,3	3	13,00	2	0,2	23	3,7	3
	moyenne	68,6	25	5,4	292	0,9	0,9	5,05	3,8	5,9	3	21,00	1	1,4	23	3,4	3
FKbs2	source	20	24	4,1	48	0,2	0,3	0,05	0,0	2,3	1	5,00	1	0,2	0	6,2	0
FFKA1	source	181	25	6,4	421	1,6	2,8	2,48	10,0	9,3	9	95,00	8	6,0	17	19,0	5
J1	source	118	23	5,1	132	1,3	2,0	2,61	9,6	4,9	6	19,00	11	0,8	30	27,0	5
FJS1	source	60	25	6,7	410	0,8	0,8	2,49	4,1	6,5	2	28,00	2	1,2	10	2,5	2
KFf2	source	104	26	6,7	529	1,8	1,3	4,22	6,2	20,0	6	41,00	3	1,4	3	15,0	4
KF1	source	197	25	5,1	165	1,9	2,8	1,03	11,0	14,0	13	130,96	4	6,3	5	10,0	5
Fs1	source	195	26	6,9	167	1,8	2,9	8,54	10,0	12,0	0	130,28	3	6,4	3	16,0	6
FS4	source	117	26	7,1	765	1,6	1,8	3,94	11,0	9,2	4	49,00	10	5,7	4	17,0	6
FkP3	source	137	26	5,2	466	0,7	2,5	1,39	6,3	2,8	1	80,00	3	6,8	1	27,0	3
FS2	source	111	29	6,3	591	0,6	2,0	0,87	4,4	2,1	2	61,00	11	6,7	1	17,0	2
FCA3	source	194	25	6,9	486	1,5	3,2	4,32	12	4,2	3	129,35	9	5,3	3	19,0	6
FF3	source	231		6,5	585	2,3	3,1	11,6	9,3	9,5	21	123,65	10	6,8	38	0,5	7
	minimum	20	23	4,1	48	0,2	0,3	0,05	0,0	2,1	0	5,00	1	0,2	0	0,5	0
	maximum	231	29	7,1	765	2,3	3,2	11,6	12,0	20,0	21	130,96	11	6,8	38	27,0	7
Statistique des sources	moyenne	138,8	25	6,1	397	1,3	2,1	3,63	7,8	8,1	6	74,00	6	4,4	10	15,0	4
	ecartype	62,6	1,5	0,9	221	0,6	0,9	3,36	3,6	5,5	6	47,00	4	2,7	13	8,4	2
FFK3	puits	323	25	6,7	365	1,9	5,0	10,5	9,7	8,6	6	257,84	5	6,1	4	12,0	7
FS5	puits	197	26	6,6	479	1,6	3,0	4,96	10,0	9,6	3	142,51	9	6,4	4	5,6	5
Fjf1	puits	78	27	5,8	321	1,3	1,4	2,31	9,5	4,9	6	1,00	11	1,3	10	26,0	4
Bp2	puits	76		4,8	301	1,2	1,4	2,31	9,3	4,2	5	1,00	12	1,9	9	25,0	4
	moyenne	168,5	26	6,0	367	1,5	2,7	5,01	9,7	6,8	5	100,36	9	3,9	7	17,0	5
Ffst	forage	113		6,3	275	0,9	1,8	2,81	4,4	5,6	6	61,00	4	6,7	1	17,0	2
BF3	forage	107		6,1	205	0,8	1,8	2,21	3,4	5,3	5	60,00	3	6,2	1	16,0	2
Ff	forage	29	26	5,6	40	0,5	0,4	1,00	2,3	3,2	5	5,00	1	4,0	1	4,4	1
	moyenne	83	26	6,0	173	0,7	1,3	2,01	3,3	4,7	5	42,00	3	5,6	1	12,0	2

Principaux faciès hydrogéochimiques

Le report des analyses dans le diagramme de Piper (1944) de la figure 3 montre que 80% des eaux, constituées essentiellement des sources et des lacs, ont une composition Mg–Na–Ca/HCO₃ ; 15% sont de type Ca–K/HCO₃ et 5% de type Cl+SO₄–Ca–Mg. Ce qui veut dire que la dissolution des roches silicatées a été le mécanisme de l'acquisition de solutés dans les systèmes aquatiques. Toutefois, les produits d'altération des silicates sont difficiles à quantifier parce que leur dégradation génère une variété de phase solide (argiles principalement) ainsi que des espèces dissoutes. Les proportions relatives des divers ions en solution dépendent de leur abondance relative et de la solu-

bilité de la roche d'accueil. L'abondance de divers ions peut être modélisée en terme d'altération de la roche formant divers minéraux (Singh, Hasnain, 2002 ; Pandey et al., 1999). Ainsi le diagramme ternaire des anions, CO₃+HCO₃–SO₄–Cl montre que la plupart des échantillons d'eau contiennent une grande quantité de CO₃+HCO₃ (fig. 3). Le ratio HCO₃/(HCO₃+SO₄) équivalant à 0,9 dans la plupart des ressources en eau (tableau 3) signifie que l'acide carbonique a été le principal producteur de protons au cours de l'altération (Pandey et al., 1999). Les bicarbonates proviennent principalement du CO₂ du sol et de l'altération des minéraux primaires.

Les résultats de la corrélation entre les ions majeurs (tableau 4) ont été réalisés en utilisant une analyse de

Fig. 3. Diagramme de Piper (1944) montrant les types d'eau dans la zone d'étude

Fig. 3. Piper's diagram (1944) showing the types of water in the study area

Фиг. 3. Диаграмата на Piper (1944), показваща типовете вода в изследвания район

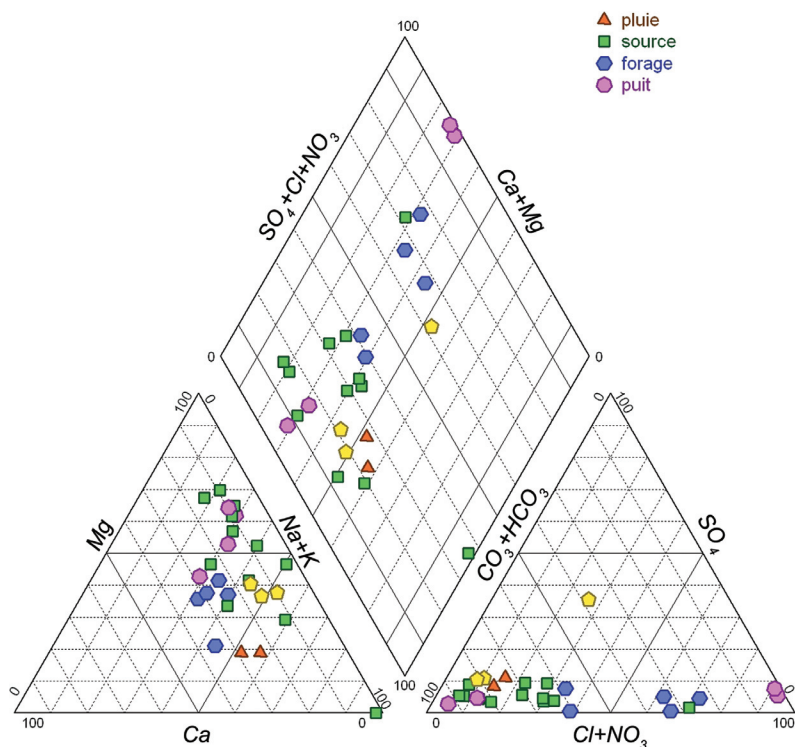


Tableau 3

Constituants chimiques représentatifs des ressources en eau du Plateau Bamoun (26 échantillons)

Table 3

Representative chemical constituents of the Bamoun Plateau water resources (26 samples)

Таблица 3

Представителни химически параметри на водните запаси в платото Бамун (26 проби)

Paramètres	Minimum	Maximum	Médiane	Moyenne	Ecartype
T (° C)	19,200	26,700	23,550	23,096	1,920
CE (µs/cm)	25,59	765,00	311,00	691,90	1437,40
Redo (mV)	-49,00	210,00	164,50	200,57	66,35
DCO (mg/l)	0,18	48,99	31,31	27,78	14,14
pH	4,10	7,05	5,96	5,72	0,96
Alcalinité (meq/l)	0,228	72,000	9,450	23,09	25,090
Mg (mg/l)	0,00	11,85	9,64	9,14	12,45
Na (mg/l)	0,37	20,18	6,48	18,91	54,82
K (mg/l)	0,41	20,62	4,88	4,99	4,16
Ca (mg/l)	0,050	11,600	2,711	10,26	16,830
Cl (mg/l)	0,5	53,0	3,7	7,0	10,0
NO ₃ (mg/l)	0,12	38,25	4,05	10,08	11,20
SO ₄ (mg/l)	0,2	27,0	4,6	4,6	5,3
HCO ₃ (mg/l)	0,51	257,84	77,70	86,00	2205,00
∑anions (mg/l)	22,20	1268,79	846,49	746,21	1179,79
HCO ₃ /∑anions (mg/l)	0,02	0,99	0,85	0,81	0,78
Mg+Ca/HCO ₃ (mg/l)	0,00	0,60	0,02	0,25	0,24
HCO ₃ /HCO ₃ +SO ₄ (mg/l)	0,75	0,99	0,94	0,99	0,99
TDS (mg/l)	4,330	377,750	30,455	60,480	77,180
SiO ₂ (mg/l)	0,35	26,72	11,21	20,48	8,98

Tableau 4
Coefficients de corrélation de Spearman des ions majeurs des eaux de la zone d'étude (26 échantillons)

Table 4
Spearman correlation coefficients of major ions in waters of the study area (26 samples)

Таблица 4
Коефициенти на корелация на Spearman между главните йони във водите на изследвания район (26 проби)

	TDS	pH	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Dureté (°THf)
TDS	1										
pH	0,45	1									
Ca	0,65	0,38	1								
Mg	0,77	0,39	0,43	1							
Na	0,51	0,34	0,45	0,52	1						
K	0,51	0,11	0,40	0,44	0,43	1					
HCO ₃	0,95	0,46	0,59	0,60	0,43	0,36	1				
Cl	0,46	0,26	0,14	0,74	0,09	0,41	0,26	1			
SO ₄	0,72	0,45	0,28	0,51	0,26	0,36	0,72	0,38	1		
NO ₃	0,04	-0,10	0,47	0,10	0,06	0,42	-0,15	0,10	-0,27	1	
Dureté (°THf)	0,85	0,43	0,71	0,93	0,60	0,52	0,69	0,60	0,49	0,29	1

Note : en gras les valeurs significatives des coefficients de corrélation

Note: in bold are presented the significant coefficients of correlation

Заб.: с черно са дадени значимите коефициенти на корелация при дадения брой проби

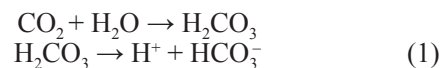
corrélation de Spearman (1904). Parmi les anions, les fortes corrélations positives existent entre le SO₄ et le HCO₃ (r=0,72). Les mêmes corrélations positives existent également entre le total de solides dissous (TDS) et Ca, Mg, HCO₃, SO₄ (respectivement r= 0,65, 0,77, 0,95 et 0,72), ce qui suggère que le TDS provient principalement du Mg, Ca et HCO₃. On peut ainsi déduire de ces relativement bonnes corrélations positives entre différents ions que la plupart des échantillons d'eau (à l'exception des échantillons de pluie) proviennent d'une source commune. La faible proportion relative des ions d'origine météorique comme Cl⁻ amène à penser que le processus d'évaporation n'influence pas vraiment la minéralisation dans la zone d'étude. Ces résultats montrent que l'infiltration est relativement rapide sur toute la région.

Interactions eau – roche

Les valeurs de SI calculées des eaux étudiées et la pression partielle du CO₂ (P_{CO₂}) à l'égard des minéraux carbonatés et de minéraux siliceux sont résumées dans le tableau 5.

Les valeurs de P_{CO₂} varient entre 10^{0,63} (source Royale) et 10^{-2,97} atm (puits de Njognom). Ces valeurs plus élevées que celle de l'atmosphère (10^{-3,5} atm), suggèrent que le système des eaux souterraines est ouvert au CO₂ du sol. L'origine du CO₂ peut être principalement attribuée à la remontée mantélique liée au

volcanisme actuel, à la respiration des racines et/ou à la décomposition des matières organiques du sol. Cela indique aussi l'interaction eau-roche pour le système des eaux souterraines, ce qui est confirmé par le rapport HCO₃/Σanions (0,02–0,90) (tableau 3), tel que suggéré par Kortatsi et al. (2008). Le ratio (Mg+Ca)/HCO₃ des eaux de source des puits et des lacs de la région, toujours inférieur à 1 (tableau 3), élimine la possibilité selon laquelle la calcite et la dolomite contribuent à la présence de Ca et Mg du sol. La forte pression de CO₂ se combine avec l'eau de pluie pour former du bicarbonate, selon les équations suivantes (Drever, 1988) :



Le CO₂ induit l'hydrolyse des roches silicatées (Mazor, 2004) :

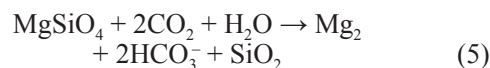
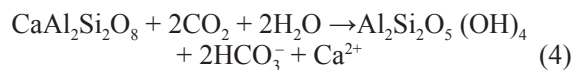
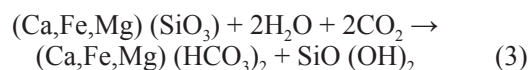
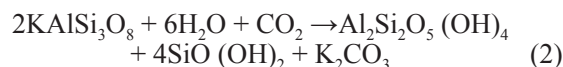


Tableau 5
Indice de saturation (SI) et pression partielle du CO₂ (P_{CO₂}) des eaux du Plateau Vatouin (26 échantillons)

Table 5
Saturation index (SI) and CO₂ partial pressure (P_{CO₂}) of the Vatouin Plateau water (26 samples)

Таблица 5
Индекс на насищане (SI) и парциално налягане на CO₂ (P_{CO₂}) на водите в платото Бамун (26 проби)

Ech.	SI = lg (IAP/Ksp)													Lg P _{CO₂} (atm)
	anhydrite	aragonite	calcite	chalcédoine	chrysothite	dolomite	gypse	quartz	sépiolite	sépiolite (d)	SiO ₂ (a)	talc	halite	
Cvm	-3,44	-3,61	-3,46	-1,38	-22,76	-7,39	-3,21	-0,94	-20,47	-20,47	-2,22	-21,83	-9,01	-0,31
Klp	-4,61	-3,78	-3,63	-0,57	-22,41	-7,72	-4,39	-0,14	-18,95	-18,95	-1,41	-19,86	-9,05	-0,03
Ffk	-3,72	-4,39	-4,25	-0,61	-24,41	-9,03	-3,50	-0,18	-20,34	-20,34	-1,46	-21,96	-9,65	-0,10
Fif	-3,70	-4,37	-4,22	-0,58	-23,61	-8,94	-3,48	-0,15	-19,77	-19,77	-1,42	-21,08	-9,13	-0,27
Fif	-4,70	-4,54	-4,39	-0,61	-25,39	-9,34	-4,47	-0,17	-20,77	-20,77	-1,47	-22,97	-9,19	-0,01
FFK3	-3,77	-1,26	-1,12	-0,10	-10,92	-2,53	-3,54	0,35	-10,29	-10,29	-0,95	-7,47	-8,89	-0,96
FSS	-3,98	-2,18	-2,03	-0,42	-11,92	-4,03	-3,74	0,02	-11,44	-11,44	-1,28	-9,13	-8,59	-1,44
Bp2	-4,76	-6,19	-6,04	0,23	-21,13	-11,76	-4,53	0,67	-16,56	-16,56	-0,63	-17,04	-8,83	-1,63
Fjfl	-4,93	-5,55	-5,40	0,26	-15,29	-10,49	-4,69	0,71	-12,49	-12,49	-0,60	-11,14	-8,80	-2,97
FFKA1	-4,28	-2,77	-2,63	0,05	-11,51	-4,86	-4,06	0,48	-10,67	-10,67	-0,79	-7,71	-8,65	-1,39
J1	-5,34	-3,09	-2,95	0,21	-19,19	-5,54	-5,12	0,65	-15,50	-15,50	-0,63	-15,07	-8,87	0,92
KFF2	-4,13	-0,90	-0,76	-0,02	-8,66	-0,56	-3,91	0,41	-8,89	-8,89	-0,86	-5,01	-6,51	0,05
KF1	-5,46	-2,98	-2,84	-0,18	-20,75	-4,82	-5,28	0,24	-17,40	-17,40	-1,02	-17,38	-8,97	1,83
Fsl	-3,94	-0,79	-0,65	-0,03	-8,83	-1,41	-3,72	0,40	-9,03	-9,03	-0,87	-5,19	-8,98	-0,86
FS4	-4,35	-0,98	-0,83	0,02	-8,11	-1,46	-4,12	0,46	-8,33	-8,33	-0,83	-4,40	-8,60	-0,98
FRP3	-4,69	-3,30	-3,16	0,25	-19,61	-5,92	-4,46	0,68	-15,56	-15,56	-0,61	-15,46	-9,60	0,84
FS2	-4,89	-2,34	-2,20	0,01	-13,37	-3,91	-4,67	0,44	-11,96	-11,96	-0,83	-9,66	-9,23	-0,28
FCA3	-4,27	-1,23	-1,09	0,07	-8,71	-1,96	-4,04	0,51	-8,70	-8,70	-0,77	-4,89	-8,98	-0,97
FKbs2	-7,27	-6,95	-6,80	-0,42			-7,04	0,02			-1,26		-10,29	0,63
FF3	-3,60	-1,89	-1,75	-1,47	-14,08	-3,82	-3,37	-1,04	-14,86	-14,86	-2,32	-13,35	-8,72	-1,41
FJS1	-4,90	-2,94	-2,79	-0,82	-12,47	-5,60	-4,67	-0,39	-12,71	-12,71	-1,67	-10,43	-9,51	-2,24
Ff	-4,73	-5,12	-4,97	-0,56	-19,30	-9,81	-4,50	-0,12	-16,80	-16,80	-1,40	-16,74	-10,03	-1,84
Ffst	-4,41	-1,88	-1,73	0,06	-13,97	-3,56	-4,17	0,51	-11,97	-11,97	-0,79	-10,22	-9,20	-0,27
BF3	-4,26	-3,29	-3,14	0,03	-14,93	-6,38	-4,03	0,48	-12,72	-12,72	-0,82	-11,23	-9,28	-1,36

Note : sépiolite (d) – sépiolite d'Eskişehir, variété retrouvée en Turquie

Note: sepiolite (d), sepiolite of Eskişehir, variety found in Turkey

Заб.: сепиолит (d) – сепиолит от Ескишехир (Турция)

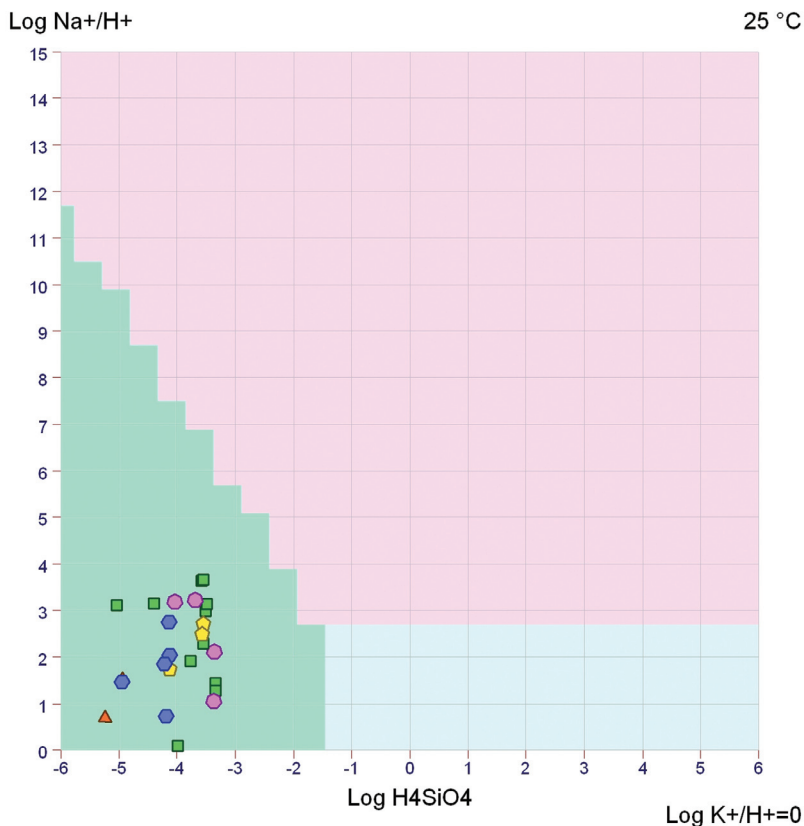


Fig. 4. Diagramme de Korjinski montrant la position des échantillons d'eau du Plateau Bamoun

Pour explication voir le texte
(log K⁺/H⁺ est l'axe Z)

Fig. 4. Korjinski diagram showing the position of the Bamoun Plateau water samples

For explanation see text
(log K⁺/H⁺ is Z axis)

Фиг. 4. Диаграмата на Коржинский с разположението на изследваните водни проби от платото Бамун

За обяснение виж текста
(log K⁺/H⁺ е оста Z)

Les réactions ci-dessus sont régies par un niveau de pression partielle de CO₂ du sol relativement élevé. Ainsi, l'eau contenant HCO₃ induit les interactions entre le CO₂ et les roches ; l'équilibrage des cations indique que les alcalino-terreux Mg et Ca, qui constituent l'essentiel des cations de la zone d'étude, sont libérés au cours de la dissolution des minéraux primaires des roches, en particulier les feldspaths potassiques et/ou les minéraux ferromagnésiens (pyroxènes et olivines) par les relations de dissolution (2), (3) et (5). Le diagramme de Korjinski (1965) (fig. 4) présente 3 champs (vert, rose, gris), qui sont des domaines caractéristiques des minéraux. Le champ vert qui héberge les échantillons d'eau du Plateau Bamoun, est celui de la goéthite, du quartz, de la kaolinite et de la wairakite. Ainsi le lg H₄SiO₄ de l'eau de la source Royale et de la plupart des lacs est de -4, celle des sources, des puits et des forages se situent autour de -3, mais il existe aussi les valeurs isolées de 0,55 et -38. Cela identifie la silice dissoute, la goéthite (la cuirasse ferrugineuse de certaines roches) et la kaolinite comme produits types d'altération dans le Plateau Bamoun.

Sur la base des SI obtenues (tableau 4), 100% des eaux souterraines analysées sont sous-saturées en minéraux carbonatés (aragonite, calcite et dolomite). Par contre elles sont saturées ou légèrement saturées par rapport aux minéraux silicatés (quartz, calcédoine et de silice amorphe). Cela représente l'eau qui provient d'un milieu pauvre en calcite, dolomite, gypse et an-

hydrite. Dans ce milieu, les Ca et Mg existent sous d'autres formes. En ce qui concerne les minéraux silicatés, 100% des échantillons d'eau analysés sont sous-saturés en chrysotile, sépiolite et talc. Les échantillons issus de la plaine volcanique du Noun sont sursaturés à la calcédoine et au quartz ; quand à ceux du plateau basaltique, ils tendent plutôt vers la saturation au quartz et à la calcédoine. Leurs indices de saturation, variant respectivement entre -0,94 et 0,02 pour les basaltes récents et entre -1,47 et -1,04 pour les basaltes anciens, révèlent que les eaux issues des basaltes de plateaux fortement altérés sont moins minéralisées que celles issues des coulées récentes de la plaine volcanique. La concentration en silice dissoute varie globalement de 0,54 à 27 mg/l ; celle des ressources en eau de la plaine du Noun est supérieure à la concentration moyenne de silice dans les eaux souterraines (17 mg/l) proposée par Hem (1991). Ce qui amène à penser que la dissolution des aluminosilicates est responsable de la libération de Mg, Ca et K conduisant à la formation de minéraux secondaires.

Activité anthropogène

Les concentrations en nitrates des échantillons d'eau du Plateau Bamoun sont de l'ordre de 0,12 à 38,25 mg/l sur 8 échantillons localisés dans la plaine du Noun. Ces concentrations en nitrates pour la plupart supérieure

à 10 mg/l, sont déjà très proches du seuil de la potabilité de l'eau indiqué par l'OMS (WHO, 2004). Par ailleurs, le taux élevé de NO₃ est un indicateur de diagnostic d'activité anthropogène sur la qualité de l'eau (Demlie et al., 2007 ; Tita et al., 2007). En outre, la variation négative de la concentration des nitrates à partir des 20 premiers mètres de profondeur indique que les espèces de nitrate des eaux souterraines sont d'origines anthropogènes. Ces résultats révèlent aussi un système d'aquifère ouvert à la dynamique hydrique.

Les principales sources d'azote dans les eaux souterraines du Plateau Bamoun, sont à la lumière des études de Berner et Berner (1996) : la fixation biologique, les précipitations et l'application d'engrais à partir des : (1) sources ponctuelles comme les eaux usées, les décharges rejetées directement dans les eaux de surface; (2) sources diffuses que sont les eaux de ruissellement et le lessivage des terres par les précipitations.

Conclusions

L'application de la modélisation de PHREEQC et des méthodes statistiques sur les données physico-chimiques représentatives des aquifères basaltiques du Plateau Bamoun montrent des variations subtiles qui ont fournies des renseignements précieux sur l'hydrochimie des ressources en eau de la région. La concentration en nitrate en fonction de la profondeur, indique un système naturellement ouvert

et par conséquent une infiltration rapide et directe. L'évaluation du temps de séjour des eaux souterraines en liaison avec les données hydrochimiques ont démontré que les eaux souterraines dans les aquifères du Plateau Bamoun doivent être considérés comme des ressources en eau renouvelables. Les résultats hydrogéochimiques ont montré que les eaux souterraines sont fraîches (TDS <600 mg/l). Les eaux étudiées sont de types Mg-Na-Ca/HCO₃, Ca-K/HCO₃ et Cl+SO₄-Ca-Mg. Ces paramètres chimiques sont principalement contrôlées par l'interaction eau-roche, selon : (1) l'altération des minéraux silicatés et (2) les activités anthropogènes. Ces réactions sont régies dans la plupart des cas par une phase gazeuse de CO₂ d'origine biogénique et mantellique. La silice dissoute est contrôlée par l'altération des minéraux silicatés et aussi par la solubilité de certains minéraux siliceux, tels que l'olivine, d'où la forte concentration du Mg. Il s'avère donc que la plupart des ressources en eau du Plateau Bamoun ont une signature basaltique et les eaux issues essentiellement des basaltes de plateau sont peu minéralisées que celles issues de la plaine du Noun.

Remerciements : Cet article constitue une partie des données de la thèse de Doctorat (PhD) du premier auteur, qui a bénéficié du soutien des laboratoires tels que l'USE/CNESTEN et le CRH/IRGM. Merci au ass. prof. Y. Yanev, au prof. J.-M. Bardintzeff et au ass. prof. T. Orehova, editeur et reviewers, qui ont contribué à l'amélioration de ce papier en terme de fond et de forme.

Références

- Ako, A., J. Shimada, K. Ichianagi, K. Koike, T. Hosono, G. T. Eyong, I. Iskandar. 2010. Isotope hydrology and hydrochemistry of water in the Banana plain (Mungo division) of Cameroon Volcanic line. – *J. Environm. Hydrology*, 18, 4, 1–20.
- Appelo, C. A. J., D. Postma. 1999. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd Ed. Netherlands, A. A. Balkema Publisher, 635 p.
- Bartarya, S. K. 1993. Hydrochemistry and rock weathering in a sub-tropical lesser Himalayan river basin in Kumaun, India. – *J. Hydrology*, 146, 149–174.
- Berner, E. K., R. A. Berner. 1996. *Global Environment: Water Air and Geochemical Cycles*. New York, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 376 p.
- CRH/IRGM. 2010. *Rapport d'évaluation des ressources en eau du Cameroun*. Centre de Recherche Hydrologique, Institut de Recherches Géologiques et Minières. Yaoundé, 96 p.
- Davis, S. N., R. J. M. De Wiest. 1966. *Hydrogeology*. New York, Wiley, 463 p.
- Demlie, M., S. Wohnlich, F. Wisotzky, B. Gizaw. 2007. Groundwater recharge, flow and hydrogeochemical evolution in a complex volcanic aquifer system, central Ethiopia. – *J. Hydrogeology*, 15, 1169–1181.
- Detay, M. 1993. *Forage d'eau : réalisation, entretien, minéralisation*. Paris, Ed. Masson, 380 p.
- Deutsch, W. J. 1997. *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and the Applications to Contamination*. US Geological Survey. New York, Lewis, 221 p.
- Drever, J. I. 1988. *The Geochemistry of Natural Water*. 2nd Ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 437 p.
- Dumort, J. C. 1968. *Carte géologique de reconnaissance à 1/500.000 avec notice explicative. Feuille Douala – Ouest Yaoundé*. Direction des Mines et Géologie du Cameroun.
- Freeze, A. R., J. A. Cherry. 1979. *Groundwater*. New Jersey, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, 604 p.
- Fritz, B. 1975. Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. – *Mem. Sci. Geol. Univ. Strasbourg*, 41, 152 p.
- Garrels, R. M., F. T. Mackenzie. 1967. Origin of the chemical composition of some springs and lakes. – In: Gould, R. F. (Ed.). *Equilibrium Concepts in Natural Water Systems. Advances in Chemistry*, 67, 222–242.
- Geze, B. 1943. Géographie physique et géologie du Cameroun occidental. – *Mém. Mus. Hist. Nat., Paris*, 17, 273 p.
- Hem, J. D. 1991. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural waters supply. – In: *USGS Water Survey, paper 2254, 3rd Ed.*, 76–122.
- Jacks, G. 1973. Chemistry of groundwater in a district in Southern India. – *J. Hydrology*, 18, 185–200.

- Karpov, I. K., L. A. Kaz'min. 1972. Calculation of geochemical equilibria in heterogeneous multicomponent systems. – *Geochem. Intern.*, 9, 252–265.
- Korjinski, D. S. 1965. The theory of systems with perfectly mobile components and processes of minerals formations. – *Amer. J. Sci.*, 263, 193–205.
- Kortatsi, B. K., C. K. Tay, G. Anornu, E. Hayford, G. A. Darty. 2008. Hydrogeochemical evolution of groundwater in the lower Offin basin, Ghana. – *Environm. Geol.*, 53, 1651–1662.
- Le Marechal, A. 1976. *Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun*. MESIRES-ORSTOM, 168 p.
- Langmuir, D. 1997. *Aqueous Environmental Geochemistry*. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 600 p.
- Mazor, E. 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology*. New York, Marcel Drekker Inc. Publ., 451 p.
- Mohan, R., A. K. Singh, J. K. Tripathi, G. C. Chowdhary. 2000. Hydrochemistry and quality of groundwater in Naini industrial area, Allahabad District, Uttar Pradesh. – *J. Geol. Soc.*, 55, 77–89.
- Moreau C., J. M. Regnault, B. Deruelle, B. Robineau. 1987. A new tectonic model for the Cameroon Line, Central Africa. – *Tectonophys.*, 139, 317–334.
- Morel, F., J. J. Morgan. 1972. A numerical method for computing equilibria in aqueous chemical systems. – *Environm. Sci. Technol.*, 6, 58–67.
- Moundi, A. 2004. *Les basaltes du Plateau Bamoun: pétrologie, géochimie et géochronologie ; implications sur les sources des magmas, leurs contexte et évolution géodynamiques*. Thèse Doctorat Etat. Univ. Yaoundé, 259 p.
- Moundi, A., J. J. Ménard, E. Reusser, F. M. Tchoua, V. J. Dietrich. 1996. Découverte de basaltes transitionnels dans le secteur continental de la Ligne du Cameroun (Massif du Mbam, Ouest Cameroun). – *C. R. Acad. Sci. Paris*, 322, IIa, 831–837.
- Moundi, A., P. Wandji, J.-M. Bardintzeff, J.-J. Ménard, L.-C. Okomo Atouba, O.-F. Mouncherou, E. Reusser, H. Bellon, F. M. Tchoua. 2007. Les basaltes éocènes à affinité transitionnelle du Plateau Bamoun, témoins d'un réservoir mantellique enrichi sous la ligne volcanique du Cameroun. – *C. R. Géosciences*, 339, 396–406.
- Njonfang, E. 1998. *Contribution à l'étude de la relation entre la "Ligne du Cameroun." et la direction de l'Adamaoua*. Thèse doctorat Etat, Univ. Yaoundé, 392 p.
- Olivry, J. C. 1986. *Fleuves et rivières du Cameroun*. Monographie hydrologique, MESRES-ORSTOM, 09, 733 p.
- Pandey, S. K., A. K. Singh, S. I. Hasnain. 1999. Weathering and geochemical processes controlling solute acquisition in Ganga headwater – Bhagirathi River, Garhwal Himalaya, India. – *Aquatic Geochem.*, 5, 4, 357–379.
- Parkhurst, D. L., C. A. J. Appelo. 1999. *PHREEQC for Windows Version 1.4.07. A Hydrogeochemical Transport Model*. US Geological Survey, File Report, 82–1024, 49 p.
- Piper, A. M. 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. – *American Geophysical Union, Transcript* 25, 914–923.
- Plummer, L. N., B. F. Jones, A. H. Truesdell. 1976. WATEQF: a Fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. – In: *US Geological Survey. Water Research Investigation Report*, 76–13.
- Rajmohan, N., L. Elango, S. Ramachandran, M. Natarajan. 2000. Major ion correlation in groundwater of Kancheepuram region, South India. – *Indian J. Environm. Protection*, 20, 3, 188–193.
- Singh, A. K., S. I. Hasnain. 2002. Aspects of weathering and solute acquisition processes controlling chemistry of sub-alpine proglacial streams of Garhwal Himalaya, India. – *Hydrolog. Processes*, 16, 835–849.
- Spearman, C. 1904. The proof and measurement of association between two things. – *Amer. J. Psychol.*, 15, 72–101.
- Tanyileke, G. Z., M. Kukasabe, W. C. Evans. 1996. Chemical and isotopic characteristics of fluids along the Cameroon Volcanic Line, Cameroon. – *J. African Earth Sci.*, 22, 4, 433–441.
- Tita, M. A., G. N. Tsala, K. V. B. Kamgang, J. C. Parisot, J. Ndjama. 2007. Macrophytes and water quality of the Nkoup river system (Foumbot, Cameroon). – *Cameroon Acad. Sci.*, 7, 2, 59–70.
- Wandji, P. 1985. *Contribution à l'étude pétrographique, géochimique et géotechnique des projections volcaniques de la région de Foumbot*. Thèse 3-ème cycle. Univ. Yaoundé, 158 p.
- Wandji, P. 1995. *Le volcanisme récent de la plaine du Noun (Ouest Cameroun)*. *Volcanologie, pétrologie, géochimie et pouzzolanité*. Thèse doctorat Etat, Univ. Yaoundé I, Cameroun, 295 p.
- WHO. 2004. *Guidelines for Drinking Water Quality. Volume 1: Recommendations*. World Health Organization, Geneva, 515 p.

(Постъпила на 23.03.2011 г., приета за печат на 27.09.2011 г.)
Отговорни редактори Йоцо Янев и Татяна Орехова