



Apport de l'hydrochimie et de l'isotope de l'environnement à la connaissance des ressources en eaux souterraines de Yaoundé, Cameroun

Dorice Kuitcha^{1,2*}, Alain L Fouépé Takounjou^{1,2}, Joséphine Ndjama^{1,2}.

¹ Centre de Recherches Hydrologiques (CRH) / Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM), B.P 4110, Nlongkak-Yaoundé, Cameroun.

² Laboratoire de Géologie de l'Ingénieur et d'Altérologie / Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, Université de Yaoundé I (Cameroun).

* Auteur correspondant : E-mail : doricekuitcha@yahoo.fr; Tel : (237) 99 83 88 13/99 20 67 15

Original submitted in on 5th April 2013 Published online at www.m.elewa.org on 30th July 2013.

<https://dx.doi.org/10.4314/jab.v67i0.95041>

RESUME

Introduction : L'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable de la population de la région de Yaoundé. Cependant, le manque de suivi de l'évolution de la qualité de cette eau et la méconnaissance des caractéristiques hydrochimiques est à noter.

Objectif : Cette étude se propose d'améliorer les connaissances sur ces ressources en eaux les plus exploitées. Il est question de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux souterraines et le mécanisme de recharge de la nappe à partir d'une combinaison des méthodes hydrochimiques et isotopiques.

Méthodologie et résultats : Les travaux ont nécessité des campagnes d'échantillonnages, des mesures *in situ*, des dosages des éléments chimiques et isotopiques et enfin des analyses statistiques. Les résultats montrent que les eaux sont acides (pH= $4,9 \pm 0,2$) et faiblement minéralisées. Le faciès chimique est chloruré sodique et potassique. Les principaux ions à l'origine de la minéralisation des eaux seraient issus de l'hydrolyse des minéraux silicatés, du phénomène d'échange de base et de la pollution anthropique. Les fortes teneurs en CO₂ dissous ($8,6.10^{-4} \pm 3,1 \text{ atm} > 3,16.10^{-4} \text{ atm}$) dans les eaux souterraines témoignent qu'elles circulent en système ouvert par rapport au CO₂ gazeux du sol. Les teneurs moyennes s'établissent pour l'oxygène-18 à $-2,57 \pm 0,23\%$ et pour le deutérium à $-10,93 \pm 5,6 \%$ avec un excès en deutérium de $8,64 \pm 5,2\%$.

Conclusion et application des résultats : La recharge de la nappe est récente et se fait directement par infiltration des précipitations sans aucune modification notable due à l'évaporation. Cet apport récent d'eau est confirmé par les faibles valeurs du bicarbonate. Les fortes teneurs en nitrate dans les eaux souterraines montrent que celles-ci sont chimiquement non appropriées à la consommation humaine et nécessite un traitement préalable.

Mots clefs : Hydrochimie, isotope, recharge, minéralisation, Yaoundé

ABSTRACT

Contribution of hydrochemistry and environmental isotope knowledge of groundwater resources in Yaoundé, Cameroon

Introduction: Groundwater is the main source of drinking water for the population of Yaoundé area. However, the lack of monitoring of the evolution of quality of this water and ignorance of comprehensive hydrochemical characteristics are noteworthy.

Objective: This study aims to improve the knowledge of the most exploited water resources. It is question of identifying the origin of mineralization of groundwater and the mechanism of groundwater recharge using a combination of hydrochemical and isotopic methods.

Methods and results: The work involved sampling campaigns, in situ measurements, dosages of chemical and isotopes elements and statistical analysis. Results showed that the water was acidic ($\text{pH} = 4.9 \pm 0.2$) and weakly mineralized. Water type is sodium chloride and potassium. Major ions at the origin of the mineralization of water would come from hydrolysis of silicate minerals, the phenomenon of cation exchange and anthropogenic pollution. The high levels of dissolved CO_2 ($8.6 \cdot 10^{-4} \pm 3.1 \text{ atm} > 3.16 \cdot 10^{-4} \text{ atm}$) in groundwater testify that they circulate an open system with respect to CO_2 gaseous. Average grades are established for oxygen-18 to $-2.57 \pm 0.23 \text{ ‰}$ and $-10.93 \pm 5.6 \text{ ‰}$ for the deuterium with a deuterium excess of $8.64 \pm 5.20 \text{ ‰}$.

Conclusion and application of result: The groundwater recharge is recent and is done directly by infiltration of precipitation without any significant change due to evaporation. This recent water is confirmed by the low values of bicarbonate. The high nitrate levels in the groundwater show that they are chemically unsuitable for human consumption and require a pre-treatment.

Key words: Hydrochemical, isotopic, recharge, mineralization, Yaoundé

INTRODUCTION

L'eau douce est considérée comme une richesse aussi essentielle au développement durable qu'à la vie. Elle possède des dimensions sociales, économiques et environnementales. Les eaux de consommation humaine proviennent généralement soit des eaux de surface, soit des eaux souterraines. Les eaux souterraines qui représentent 1,69% (Banton et Lumony, 1999) occupent le deuxième rang des réserves mondiales en eau douce après les eaux contenues dans les glaciers et les calottes polaires (1,74%). Ces eaux souterraines devancent largement les eaux continentales de surface (0,0076%). La qualité de cette ressource en eau se dégrade sous l'effet de la pollution et de la surexploitation. Quelle que soit son origine (urbaine, industrielle ou agricole), la pollution constitue un risque majeur susceptible de dégrader les rares ressources disponibles des nappes phréatiques. De tout temps, l'accès à l'eau a été une préoccupation majeure pour l'homme. Aujourd'hui, la principale difficulté au Cameroun n'est pas tant cet accès à l'eau mais plus précisément l'accès à l'eau potable.

En effet, le problème se pose en termes de qualité des ressources en eau et c'est sur ce point que la plupart des attentions se tournent. Au Cameroun, le taux moyen d'accès au réseau de distribution d'eau atteint à peine 32% ; ce taux étant beaucoup plus faible en zone rurale (Kuitcha et al., 2008). En outre, à ce problème d'accès à l'eau potable, s'ajoute celui de la dégradation de la qualité de cette précieuse ressource par les pollutions diverses. En effet, l'utilisation des cours d'eau comme dépotoir des ordures ou encore comme lieux de vidange des fosses septiques engendre la pollution par les excréta et autres déchets. Les eaux souterraines sont le plus souvent polluées dans les grandes villes comme Yaoundé et Douala au Cameroun (Kuitcha et al., 2010 ; Fouépé, 2012) par une diffusion interne à travers la porosité du sol des agents pathogènes provenant des fosses septiques et des latrines. Le chimisme d'une eau peut être interprété en fonction des conditions d'entrée et de sortie dans le système aquifère. A partir des caractéristiques physico-chimiques de la fonction entrée (eau de pluie), le

chimisme final est la résultante des apports par les différents milieux traversés, suivant les conditions physico-chimiques qui y règnent et aussi du temps de séjour des eaux (Thiry et Bariteau, 2003). Les études chimiques et isotopiques peuvent ainsi contribuer à une meilleure compréhension du fonctionnement du système aquifère. L'analyse hydrochimique et isotopique des eaux souterraines constitue des éléments indispensables à l'étude des potentialités hydrogéologiques et à la gestion des ressources en eau. Elle permet d'apporter de nombreuses informations sur le milieu aquifère, la nature de l'encaissant, les zones d'alimentation et de circulation, la potabilité des eaux. Au Cameroun en générale et à Yaoundé en particulier, moins de 50% (Kuitcha *et al.*, 2008) de la population sont connectés

MATERIEL ET METHODES

Cadre de l'étude : La zone urbanisée de Yaoundé couvre une superficie d'environ 256 km² et est limitée par les 3° et 5° parallèles de latitude Nord et les 11° et 12° méridiens de longitude Est. Le climat est de type équatorial à quatre saisons qui s'alternent dans l'année : une grande saison sèche (Décembre- Février), une petite saison de pluie (Mars-Juin), une petite saison sèche (Juillet- Août) et une grande saison de pluie (septembre-Novembre) (Suchel, 1998). La pluie moyenne annuelle à Yaoundé est de 1600 mm, pour une température moyenne de 23°C (Olivry, 1986). Cette répartition du climat y résulte globalement de la circulation des masses d'air atmosphériques qui se fait de l'équateur vers les pôles, sous l'impulsion des vents appelés alizés. La ville de Yaoundé est drainée par un ensemble de rivières pérennes (Mfoundi, Mefou et Mfoulou). Le substratum géologique est formé d'embranchés (gneiss massif riche en quartz) fracturé constituant des réservoirs exploitables par les puits et les forages. Il est couvert par les alluvions argilo sableuses dans les thalwegs et des sols latéritiques sur les flancs des collines (Yongue-Fouateu, 1986). Sur le plan hydrogéologique, le socle cristallin de la région de Yaoundé est constitué essentiellement de deux aquifères superposés: un aquifère supérieure (nappes d'altérites) situé entre 5 et 20 m de profondeur au niveau des arènes et des altérites et un aquifère inférieure (nappe de fracture et de fissure) dont les venues d'eau se situent au delà de 20 m de profondeur et qui est localisé dans les zones de fractures du socle (Djeuda *et al.*, 1999). Dans le cadre de ce travail nos recherches se sont déroulées dans le secteur nord de la ville de Yaoundé (figure 1).

au réseau d'eau potable de la Camerounaise des Eaux. L'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations non raccordées au réseau d'eau potable (Wethé *et al.*, 2003). Cependant, les caractéristiques hydrochimiques exhaustives sont méconnues. D'où la nécessité d'approfondir les recherches sur la qualité et le fonctionnement de cette ressource en eau la plus sollicitée de nos jours. Cette étude a pour objectifs de définir les caractéristiques hydrochimiques et isotopiques des eaux souterraines (puits et sources) du bassin versant amont du Mfoundi de la ville de Yaoundé et d'appréhender l'origine des ions dans les eaux ainsi que le mode de recharge de la nappe des altérites.

Méthodologie : Les échantillons d'eau destinés aux analyses en laboratoire ont été prélevés dans les puits et sources (figure 1) durant les mois de janvier, avril, juillet et octobre de l'année 2008. Ces échantillonnages ont été réalisés dans des flacons en polyéthylène de 1000 ml pour les analyses physico-chimiques et dans des flacons en verre pyrex de 60 ml pour les analyses isotopiques. Au total, 12 échantillons d'eau de sources et 24 échantillons d'eau de puits ont été collectés et destinés aux analyses en laboratoire. Les paramètres physiques (température, pH, conductivité électrique) des eaux souterraines du bassin versant amont du Mfoundi ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un pH-mètre et d'un conductimètre de terrain de marque WTW 330i. Les incertitudes sur les mesures de température, de pH et de conductivité électrique étaient respectivement de 0,1 °C, de 0,02 unité pH et de 2 µS.cm⁻¹. Les éléments majeurs tels que : Chlorure (Cl⁻), Sulfate (SO₄²⁻), Nitrate (NO₃⁻), Calcium (Ca²⁺), Magnésium (Mg²⁺), Sodium (Na⁺) et Potassium (K⁺) ont été analysés par Chromatographie en phase Liquide de Haute Performance (HPLC) au Laboratoire de Radio Analyses et Environnement (LRAE) de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Sfax (Tunisie). L'ion Bicarbonate (HCO₃⁻) a été dosé par la méthode titrimétrie. La précision analytique était de ± 5%. Les résultats sont exprimés en mg/l. Les teneurs isotopiques de l'oxygène-18 (¹⁸O) et du deutérium (²H) des eaux ont été déterminées par spectrophotomètre Laser au LRAE de l'École Nationale Supérieure d'Ingénieurs de Sfax. Le principe de mesure de l'oxygène-18 est basé sur la méthode classique d'équilibration isotopique (Epstein et

Kuicha et al. J. Appl. Biosci. 2013. L'hydrochimie et l'isotope de l'environnement à la connaissance des ressources en eaux souterraines de Yaoundé

Mayeda, 1953). Les teneurs en deutérium sont dosées selon Coleman *et al.* (1982). Les incertitudes analytiques sur les mesures étaient de $\pm 0,2\text{‰}$ pour l'oxygène-18 et de $\pm 2\text{‰}$ pour le deutérium. Le diagramme de Piper, 1953 a été utilisé pour la définition du faciès chimique des eaux. Par ailleurs, afin de préciser le processus primaire

de minéralisation, le programme de modélisation thermodynamique PC Wateq Datagen 2.12 (Smiler, 2007) a été utilisé. Ce logiciel permet de calculer les indices de saturation et de déséquilibre, le coefficient de corrélation entre les paramètres ainsi que la pression partielle des phases gazeuses ($p\text{CO}_2$).

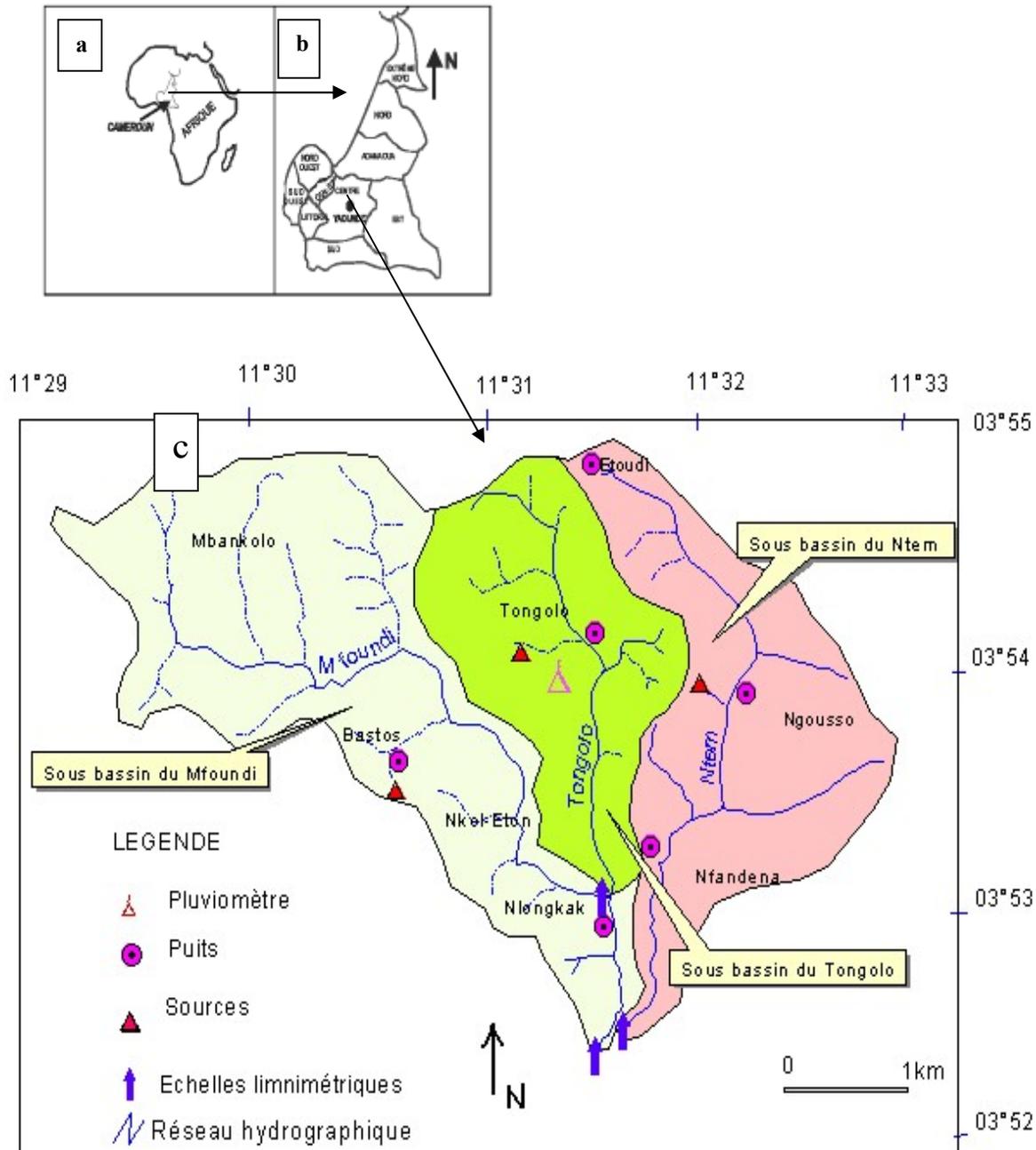


Figure 1 : Localisation de Yaoundé. A : le Cameroun dans l'Afrique ; b : la région de Yaoundé ; c : le sous bassin amont du Mfoundi

RESULTATS

Hydrochimie : La température des eaux varie entre 24,6°C et 25,1°C avec une moyenne de 24,8°C. Ces températures sont dans l'ensemble assez proches de la température de l'air qui est de 25°C. La conductivité électrique des eaux souterraines varie entre 84 et 823 $\mu\text{S/cm}$, avec une valeur moyenne de 294 $\mu\text{S/cm}$. Ces valeurs indiquent une minéralisation faible à moyenne car elles sont toutes globalement inférieures à 1000 $\mu\text{S/cm}$ et n'atteignent pas les normes OMS, 2000 (soit 1500 mg/l). En effet, la minéralisation correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau. Le pH est compris entre un minimum de 4,3 et un maximum de 5,9 pour une moyenne de 4,9. Ces eaux souterraines sont par conséquent acides. Pour les cations, on observe par ordre pondéral décroissant : sodium, calcium potassium, magnésium. Le sodium est le cation le plus abondant dans les eaux souterraines de Yaoundé, il varie de 9,5 à 71,9 pour une moyenne de $35,5 \pm 21,2$ mg/l, toutes les valeurs sont inférieures à la norme OMS (soit 150 mg/l). Pour le calcium, les teneurs vont d'un minimum de 1,1 mg/l à un maximum de 23,9 mg/l, pour une moyenne de $6,2 \pm 3,2$ mg/l, inférieure à la norme OMS (250 mg/l). Les concentrations en potassium varient de 1,1 mg/l à 15,4 mg/l, la valeur moyenne est de $6,1 \pm 3,1$ mg/l, 10% des points d'eau enregistrent des teneurs supérieures à la norme OMS (soit 12 mg/l). Le magnésium, avec une concentration moyenne de $3,4 \pm 2,1$ mg/l, pour un minimum de 0,8 mg/l et un maximum de 9,2 mg/l, est le cation le plus dilué et toutes les valeurs obtenues sont inférieures à la norme OMS (soit 50 mg/l).

Pour les anions, l'ordre pondéral décroissant est le suivant : nitrate, chlorure, bicarbonate, sulfate. Le nitrate représente l'anion dominant, les teneurs oscillent entre

15,8 mg/l et 149,2 mg/l pour une moyenne de $68,4 \pm 46,2$ mg/l. Les concentrations en nitrates sont très élevées dans la plupart des points d'eaux. En effet 62% ont des teneurs supérieures à 50 mg/l (seuil de potabilité OMS, 2004). Pour le chlorure, la moyenne est de $38,3 \pm 15,3$ mg/l avec un minimum de 8,6 mg/l et un maximum de 97,1 mg/l, toutes les valeurs ont les teneurs inférieures à la norme OMS (soit 250 mg/l). Le bicarbonate varie entre 0,6 mg/l et 24,1 mg/l pour une moyenne de $9,5 \pm 6,4$ mg/l. Les teneurs en ions sulfate sont faibles elles varient entre 0,1 mg/l et 16,1 mg/l, pour une moyenne de $3,7 \pm 1,2$ mg/l. Les valeurs sont toutes inférieures à la norme OMS (soit 250 mg/l). En effet, l'examen des teneurs en éléments majeurs montre que la minéralisation des eaux est régie par le sodium pour les cations et par le nitrate et le chlorure pour les anions. Ainsi, les eaux souterraines du bassin versant amont du Mfoundi sont caractérisées par le faciès chloruré sodique et potassique (figure 2). Les résultats des indices de saturation en calcite (CaCO_3), en dolomite ((Ca, Mg) $(\text{CO}_3)_2$), en anhydrite ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en gypse (CaSO_4) et en halite (NaCl) montrent que toutes les eaux sont sous saturées vis-à-vis de la calcite (-4,6), de la dolomite (-9,1), de l'anhydrite (-4,6), du gypse (-4,4) et de la halite (-7,6). Les valeurs de la force ionique oscillent entre un minimum de $0,5 \cdot 10^{-4}$ et un maximum de $16,8 \cdot 10^{-4}$ atm, pour une valeur moyenne de $8,6 \cdot 10^{-4} \pm 3,1$ atm. La plupart des eaux sont très riches en CO_2 dissous, les valeurs obtenues se montrent dans l'ensemble plus élevées que celle de l'atmosphère ($3,16 \cdot 10^{-4}$ atm) et suggèrent que le système des eaux souterraines du bassin versant du Mfoundi à Yaoundé est ouvert sur le CO_2 du sol.

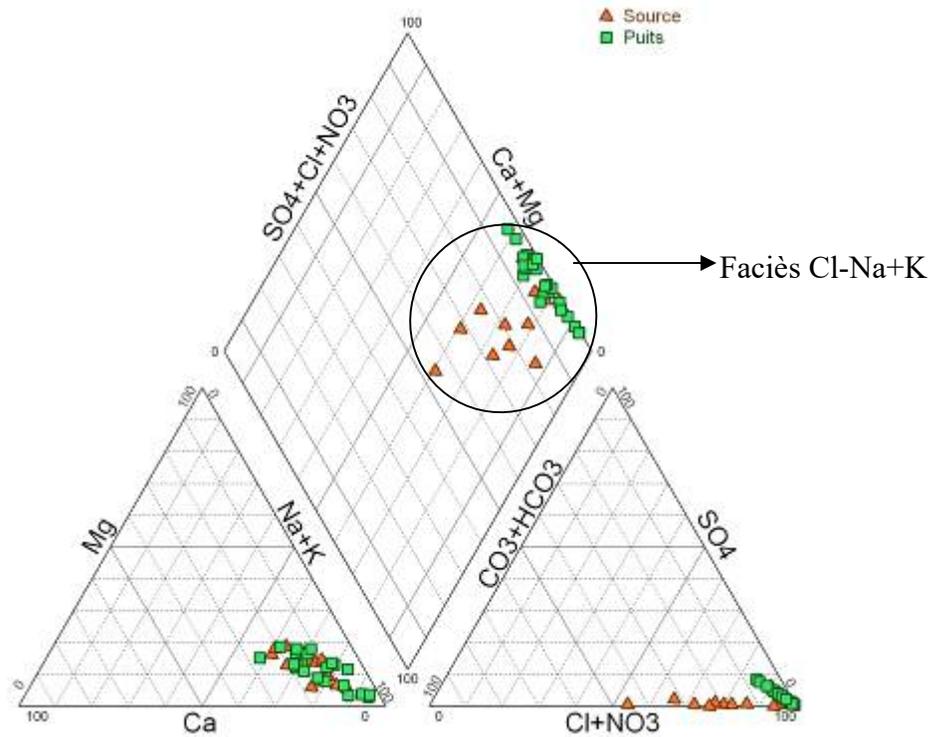


Figure 2 : Faciès chimique des eaux souterraines du bassin versant amont du Mfoundi

Géochimie isotopique : La synthèse des résultats relatifs à l'isotopie est consignée dans le Tableau 1. Il y ressort que les teneurs en isotopes stables (^{18}O et ^2H) des eaux souterraines de Yaoundé varient de $-3,68$ à $-0,18\text{‰}$ vs-VSMOW pour l'oxygène-18 et de $-18,93$ à $-1,24\text{‰}$ vs-SMOW pour le deutérium. Les teneurs

moyennes s'établissent pour l'oxygène-18 à $-2,57 \pm 0,23\text{‰}$ vs-SMOW et pour le deutérium à $-10,93 \pm 5,6\text{‰}$ vs-VSMOW. La valeur moyenne de l'excès en deutérium est de $8,43 \pm 5,2\text{‰}$ vs-VSMOW pour un minimum de $0,68 \text{‰}$ vs-VSMOW et un maximum de $17,80 \text{‰}$ vs-VSMOW.

Tableau 1 : Synthèse des teneurs en ^{18}O et en ^2H (en ‰ vs-SMOW) des eaux souterraines

Points d'eaux	Statistique	^{18}O	^2H	Excès en deutérium
Eaux souterraines (n=36)	Min	-3,68	-18,93	0,68
	Max	-0,18	-1,24	17,80
	Moy	-2,57	-10,93	8,43
	Écart-type	$\pm 0,23$	$\pm 5,6$	$\pm 5,2$

DISCUSSION

Origine des éléments dans les eaux souterraines : L'étude des corrélations établies entre les concentrations des principaux éléments majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et la conductivité des eaux (tableau 2) ont permis de remonter à l'origine de la minéralisation des eaux du bassin versant amont du Mfoundi à Yaoundé. La présence d'une corrélation

positive entre les ions majeurs et la conductivité traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.

Les alcalins (Na^+ et K^+) : L'ensemble des eaux analysées donne des concentrations en Na^+ supérieures à celles du K^+ . Ceci pourrait s'expliquer d'une part par la plus grande stabilité des feldspaths et des micas

potassiques et d'autre part par l'absorption et la mobilisation du K^+ dans les minéraux néoformés au cours de l'altération (Le Marechal, 1976). D'après Banton et Lumony (1999), la dominance des Na^+ sur le K^+ est également due à l'absorption sélective des argiles, le K^+ ayant une masse atomique plus élevée que le Na^+ , il s'en suit donc que les eaux contiennent plus de sodium que de potassium. Les teneurs de ces deux ions sont en outre corrélées positivement 0,88 (tableau 2). Les teneurs pondérales des eaux en alcalins sont plus fortes que celles des alcalino-terreux. Généralement, le sodium est présent dans quelques minéraux silicatés, mais, il provient principalement d'eau marine (cependant, notre zone d'étude se trouve à environ 250 km de la côte atlantique, ce qui minimiserait l'apport marin). Les échanges ioniques sont les plus importants processus chimiques qui affectent la concentration en sodium (Post, 2002). Les ions sodium et potassium pourraient provenir de la décomposition des minéraux (feldspaths, pyroxènes, micas et amphiboles), des échanges ioniques avec les minéraux argileux et ainsi que de la pollution issue des activités humaines.

Les alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) : Les ions calcium pourraient provenir de l'altération des feldspaths plagioclases, des grenats, des hornblendes contenus dans les schistes et les granito-gneiss de Yaoundé. La relative importance des teneurs en Ca^{2+} , supérieures à 20 mg/l dans certains points d'eaux, pourrait être expliquée par le lessivage du profil de sols riches en minéraux calciques (Kamgang Kabeyene et Ekodeck, 1991; Vicat *et al.*, 2002). Les ions magnésium proviendraient essentiellement de l'altération des minéraux ferromagnésiens (biotite, chlorite, pyroxènes...) existant dans la région de Yaoundé. L'étude pétrographique des unités géologiques du secteur de Yaoundé a montré que les roches (schistes, granito-gneissique, micaschistes, sont constituées d'une proportion importante de feldspaths plagioclases, de hornblende et de ferromagnésiens tous susceptibles de libérer par altération des quantités appréciables d'alcalino-terreux. La corrélation est positive entre Mg et Ca (0,64), ceci pouvant être dû au fait que la mise en solution de ces deux éléments est en relation avec la présence des ions bicarbonates ce qui se traduit par des corrélations positives HCO_3^- -Ca et HCO_3^- -Mg respectivement 0,69 et 0,4 (tableau 2).

Les nitrates : Les nitrates sont les principales formes d'azote dans les eaux. Ils peuvent être utilisés comme indicateurs de pollution chimiques des eaux. Plusieurs auteurs (Antonakos et Lambrakis, 2000) relient la présence des nitrates dans les eaux en plus du cycle

normale de l'azote, à différentes sources à savoir : les engrais chimiques organiques et inorganiques, les pesticides et les herbicides, les installations d'élevages des animaux, les effluents domestiques et industriels (eaux usées). Dans la zone d'étude, les concentrations en nitrate sont élevées (62% d'échantillons ont de teneurs >50 mg/l lequel est le standard international de potabilité des eaux (OMS, 2000). La forte corrélation entre le Cl^- et NO_3^- (0,71) et entre le SO_4^{2-} et NO_3^- (0,64) des eaux souterraines étudiées a déjà été mise en évidence dans les eaux souterraines (socle cristallin) du Nord-Ouest du Massif-Centrale en France et dans celle de Bafoussam au Cameroun et leur origine attribuée à des apports anthropiques, les engrais étant la forme la plus probable (Petelet *et al.*, 2003 ; Npakam, 2009).

Les chlorures : Les teneurs en chlorure sont relativement élevées dans les eaux souterraines. La présence des ions chlorures dans les eaux souterraines de Yaoundé est une caractéristique des eaux souterraines des régions de socle de Côte d'Ivoire et d'Afrique (Biémi, 1992 ; Oga, 2009). Les coefficients de corrélation (tableau 2) entre l'ion Cl^- et les autres éléments majeurs (Mg^{2+} , Na^+ et K^+) sont fortes ($r^2 > 0,70$). En effet, la description minéralogique des échantillons de roches analysés dans la région de Yaoundé montre la présence de minéraux tels que hornblende, biotite (Nzenti *et al.*, 1998) ceci pouvant par substitution ou échange Cl^- -OH libérer les ions Cl^- dans l'eau. Ces ions Cl^- dans les eaux souterraines proviendraient donc de plusieurs sources : atmosphérique (Sigha *et al.*, 2003), altération des minéraux silicatés, phénomène d'échange (Cl^- -OH) et anthropique (Ngeugang *et al.*, 2008)

Les bicarbonates : La présence des bicarbonates dans les eaux souterraines de Yaoundé pourrait provenir de plusieurs sources: la dissolution du CO_2 originaire de l'atmosphère et du sol (Schwoerer *et al.*, 1965 ; Kortatsi *et al.*, 2007); les facteurs anthropiques (présence des latrines aux environs des points d'eaux). L'appauvrissement en HCO_3^- dans les eaux souterraines pourrait s'expliquer par : la diminution de l'activité microbienne lorsque l'on passe de la surface vers les profondeurs ; la nature de la roche mère qui est granito-gneissique et ne comportant pas les minéraux carbonatés (Vicat *et al.*, 2002) et les faibles valeurs du pH des eaux souterraines (pH $4,9 \pm 0,2$) puisque la libération des bicarbonates est favorisée lorsque le pH du milieu augmente (Michard, 2002).

Les sulfates : Les sulfates proviennent généralement de plusieurs sources ; les minéraux sulfurés, les produits organiques soufrés et les minéraux sulfatés. Dans les eaux, le sulfate et le calcium (tableau 2) sont faiblement

corrélés ($SO_4/Ca = 0,31$). Cette faible corrélation entre ces éléments amène à exclure les minerais tels que le gypse et l'anhydrite comme étant à l'origine du sulfate. En effet, les études antérieures (Vicat *et al.*, 2002) ont montré que les roches granito-gneissiques de la région de Yaoundé ne contiennent pas des minéraux carbonatés

(gypse, anhydrite). L'origine des sulfates serait lié à la décomposition de la pyrite existant dans les formations gneissiques de Yaoundé (Nzenti *et al.*, 1998), des apports météoriques (Kuitcha *et al.*, 2012) et ainsi que de la pollution anthropiques (Ngeugang *et al.*, 2008).

Tableau 2: Matrice de corrélation des eaux souterraines du bassin versant amont de Mfoundi

	Cond	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻
Cond	1								
Ca ²⁺	0,54	1							
Mg ²⁺	0,86	0,64	1						
Na ⁺	0,83	0,42	0,86	1					
K ⁺	0,85	0,64	0,8	0,74	1				
HCO ₃ ⁻	0,58	0,69	0,41	0,38	0,7	1			
Cl ⁻	0,89	0,48	0,89	0,96	0,79	0,47	1		
SO ₄ ²⁻	0,33	0,31	0,5	0,37	0,32	0,04	0,4	1	
NO ₃ ⁻	0,53	0,53	0,77	0,65	0,44	0,23	0,71	0,64	1

Mécanisme de minéralisation des eaux

Phénomène d'échange de Base : Au cours de leur trajet souterrain et en fonction du temps qu'elles passent au contact des formations géologiques dans lesquelles elles circulent, les eaux souterraines échangent leurs ions avec ceux contenus dans ces formations. D'une façon générale, ces roches appelées permutolites peuvent céder à l'eau des alcalins contre l'alcalino-terreux vice versa. L'examen des résultats (tableau 3) montre que 67% d'échantillons ont des indices d'échange de base négatif, ce qui pourrait confirmer à posteriori, que ces eaux échangent effectivement leurs ions Ca²⁺ et Mg²⁺ contre les ions Na⁺ et K⁺ des permutolites. 33% d'échantillons présentent un indice d'échange de base positif. Ceci pouvant être attribué à plusieurs phénomènes : soit aux échanges des alcalins des eaux contre les alcalino-terreux des permutolites ; soit aux apports anthropiques causant un excès en ions chlorures dans les eaux. Les fortes teneurs ioniques des alcalins (Na⁺ et K⁺) par rapport aux valeurs ioniques des alcalino-

terreux (Ca²⁺ et Mg²⁺) obtenus dans les eaux souterraines de Yaoundé font dire qu'il y a probablement eu échange des alcalino-terreux des eaux contre les alcalins des permutolites. Ces échanges contribuent d'une part à augmenter considérablement les teneurs ioniques et pondérales de ces alcalins dans l'eau et d'autre part à faire baisser les teneurs en alcalino-terreux. D'après Sracek et Hirata, 2002, l'échange cationique avec les minéraux argileux faisant intervenir le Ca²⁺, le Mg²⁺ et le Na⁺ implique une augmentation des Na⁺ et une diminution des Ca²⁺ et Mg²⁺ dans l'eau. En effet, la figure 3 illustre l'évolution des teneurs en sodium en fonction des teneurs en calcium dans les eaux souterraines de Yaoundé. On constate sur ce graphique que la diminution des alcalino-terreux se fait au profit des alcalins grâce aux échanges cationiques avec les minéraux argileux de la matrice favorisant une fixation de calcium contre une libération du sodium (Garcia *et al.*, 2002), ceci est corroboré par le faciès sodique obtenu dans les eaux souterraines de Yaoundé.

Tableau 3 : Résultats des indices d'échange de base des eaux souterraines (sources et puits) du bassin versant amont du Mfoundi

Sources	Période	[Cl-(Na+K)/-Cl]	[Cl-(Na+K)-Cl]/[(S04+HCO3+NO3)]
Ngousso	jan	-0,63	-0,96
Tongolo	jan	-0,51	-0,96
Bastos	jan	-0,14	-0,39
Ngousso	avril	-1,41	-2,16
Tongolo	avril	-1,00	-1,04
Bastos	avril	0,18	0,23
Ngousso	juillet	-0,37	-1,27
Tongolo	juillet	-0,84	-1,04
Bastos	juillet	-0,20	-0,60
Ngousso	octobre	-0,38	-1,40
Tongolo	octobre	-0,74	-0,89
Bastos	octobre	-0,16	-0,54
Puits	Période	[Cl-(Na+K)/-Cl]	[Cl-(Na+K)-Cl]/[(S04+HCO3+NO3)]
Elig-Edzoa	jan	0,03	0,01
Etoa-Meki	jan	0,00	0,00
Ngousso	jan	-0,55	-1,97
Tongolo	jan	-0,10	-0,15
Etoudi	jan	-0,76	-1,68
Nkol-Eton	jan	0,24	0,23
Elig-Edzoa	avril	0,06	0,03
Etoa-Meki	avril	0,06	0,06
Ngousso	avril	-0,28	-1,28
Tongolo	avril	-0,60	-1,17
Etoudi	avril	-1,13	-2,62
Nkol-Eton	avril	-0,06	-0,10
Elig-Edzoa	juillet	0,03	0,01
Etoa-Meki	juillet	0,15	0,10
Ngousso	juillet	0,18	0,06
Tongolo	juillet	-0,09	-0,08
Etoudi	juillet	-0,87	-1,96
Nkol-Eton	juillet	0,25	0,35
Elig-Edzoa	octobre	-0,01	0,00
Etoa-Meki	octobre	0,14	0,12
Ngousso	octobre	-0,01	-0,03
Tongolo	octobre	-0,14	-0,20
Etoudi	octobre	-0,71	-1,28
Nkol-Eton	octobre	0,01	0,01

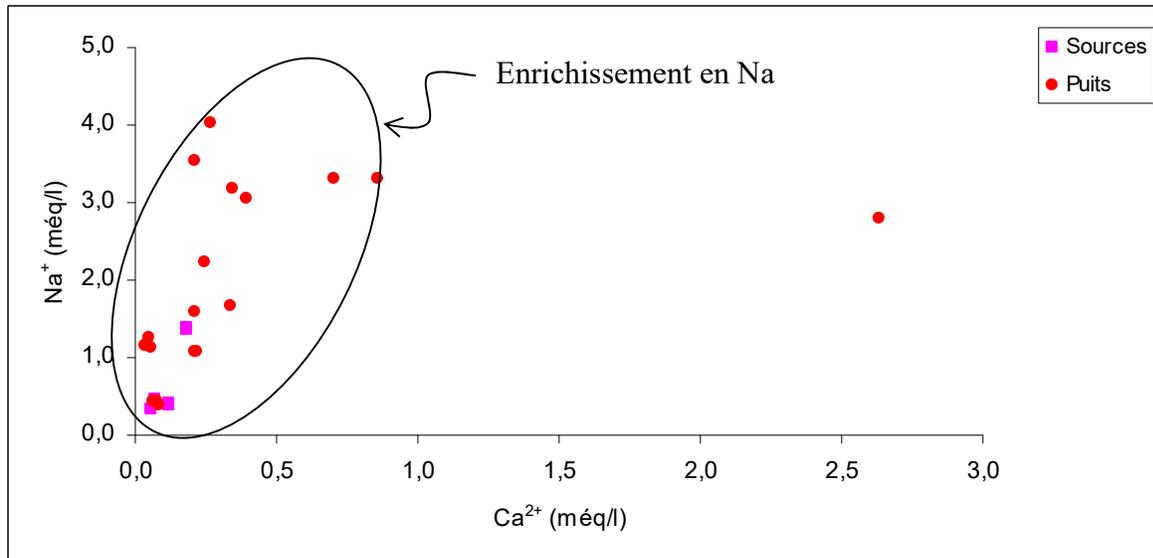


Figure 3 : Rapport entre sodium et calcium des eaux souterraines

Rôle de la lithologie : L'hydrolyse des silicates est le phénomène majeur d'altération des minéraux primaires des roches. A partir d'une roche mère au contact avec l'atmosphère, ce processus aboutit à la formation des sols mais c'est un processus lent. Les interactions eau roche sont beaucoup plus influencées par la composition minéralogique de la roche considérée que par sa composition chimique. Ces interactions sont principalement régies par l'agressivité de l'eau riche en CO₂ (pH acide), les valeurs de log PCO₂ calculées à l'aide du programme Wateq (Plummer *et al.*, 1976) dans la zone d'étude restent compatibles avec le milieu ouvert (Drever, 1997). L'abondance du CO₂ dissous dans les eaux souterraines de Yaoundé est similaire à l'observation faite par Sorro, 2002 dans les régions du socle de la Côte d'Ivoire. L'eau d'infiltration en traversant la zone non saturée du sol se charge en CO₂ libéré par les activités biologiques. Cette eau riche en CO₂ a la capacité d'attaquer les minéraux aluminosilicatés (plagioclase, biotite) de la roche réservoir existante dans la région de Yaoundé. La réaction générale traduisant les interactions de l'eau et des roches silicatées peut s'écrire (Garrels and Machkenzie, 1967) :



Dans cette réaction d'altération des silicates, Na est dans l'albite (NaAlSi₃O₈), Ca dans les plagioclases (CaAl₂Si₃O₈), Mg dans les minéraux silicatés magnésiens (MgAl₂Si₃O₈) et K dans les minéraux silicatés potassiques (biotites et K-feldspars). D'après l'équation ci-dessus, plus

l'altération des silicates progresse, plus la composition chimique de l'eau évolue, ce qui se traduit par une augmentation de la concentration en cations, en HCO₃⁻ et en silice. L'abondance du Na dans les eaux du bassin versant amont de Yaoundé proviendrait en partie de l'altération des aluminosilicates. La teneur en bicarbonate de l'eau peut renseigner sur le stade d'évolution atteint lors de l'échantillonnage des eaux. Compte tenu de ce qui précède, il apparaît que l'interaction eau-roche dans le Bassin versant amont de Mfoundi est faible. Ceci est justifié par la faible quantité des ions HCO₃⁻ (absence du faciès bicarbonaté) ainsi que par la nature acide (pH = 4,9±0,2) des eaux souterraines de cette région qui ont gardé leur caractère acide d'eaux de pluie (Kuitcha *et al.*, 2012). L'acidité des eaux souterraines de Yaoundé est donc due à la production du CO₂ dans les couches superficielles du sol sous l'action des activités biologiques et racinaires (Kortatsi *et al.*, 2007) et à la nature de la roche mère granito-gneiss.

Temps de séjour des eaux souterraines dans les altérites : La sous saturation en calcite, dolomite, aragonite, gypse et anhydrite des eaux souterraines de la région de Yaoundé est en parfait accord avec la quasi inexistence de formations carbonatées et évaporites dans cette région. Des résultats similaires ont été obtenus sur les eaux souterraines dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire (Soro, 2002). L'abondance du CO₂ dissous dans les eaux souterraines du bassin versant amont de Mfoundi est un indicateur de la présence dans l'aquifère d'eaux récentes. En effet, la réaction d'hydratation du CO₂ libère de l'acide carbonique qui attaque les roches. L'altération des minéraux (dissolution de feldspaths et

précipitation de silicates en feuillets) conduit à une production d'alcalinité. La faible teneur en bicarbonate des eaux souterraines additionnés à leur nature acide est donc le reflet d'un temps de séjour moins long de ces eaux dans l'encaissant et d'une vitesse de renouvellement plus rapide traduisant la présence dans l'aquifère d'eaux récentes. La teneur élevée en pression partielle (pCO_2) des eaux souterraines pourrait également témoigner un âge relativement jeune de ces eaux. Dans la zone d'étude, l'acquisition du CO_2 se fait en système ouvert pour la quasi totalité des échantillons d'eaux. Ceci indiquerait par conséquent, des excellentes conditions de circulation et une bonne infiltration des eaux de pluie dans le sol.

Mode de recharge de la nappe : L'hétérogénéité spatiale des teneurs en isotopes stables observé dans le bassin versant amont de Mfoundi d'un point d'eau à l'autre pourrait être le témoin, soit de recharges directes dont les cachets isotopiques n'ont pas été « tamponnés » par les processus de diffusion et de mélanges en relation avec des temps de résidence très courts; soit des discontinuités hydrauliques qui ne favorisent pas les processus de mélanges. Le premier cas a été illustré par les hétérogénéités de recharge dans les aquifères du socle cristallin au Niger, notamment dans le Liptako (Ousmane *et al.*, 1984), dans la région de Maradi et Zinder et dans l'Air (Joseph *et al.*, 1993) et dans la région du Nord Cameroun (Njitchoua *et al.*, 1995 ; Ngounou Ngatcha *et al.*, 2007; Fanton *et al.*, 2009).

Sur la figure 4 les teneurs en isotopes définissent deux types d'eau:

(1)- Les eaux non évaporées, localisées au dessus ou sur la droite météorique mondiale (DMM). Ces eaux proviennent d'une infiltration rapide des eaux météoriques sans aucune modification de leur teneur isotopique.

(2)- Les eaux légèrement évaporées, situées en dessous de la droite météorique mondiale. L'évaporation pouvant être produite soit avant la recharge lors du passage des

pluies dans une atmosphère à faible teneur en eau ; soit après la recharge par lessivage des isotopes lourds accumulés pendant la saison sèche dans la zone non saturée (Aranyossy *et al.*, 1989). La droite d'évaporation de $\delta^{18}O/\delta^2H$ (Craig, 1961a) de ces points a une pente égale à 4 (figure 4). Cette droite reflète l'effet d'évaporation qui affecte les eaux pendant leur infiltration dans la zone non saturée et au sein de l'aquifère. L'intersection de la droite d'évaporation avec celle de la précipitation mondiale (DMM) affiche une valeur de -2,70 ‰ vs SMOW pour l'oxygène-18 et -11,10 ‰ Vs-SMOW pour le deutérium. Ces valeurs pourraient représenter la composition isotopique initiale des eaux des précipitations qui ont contribué à la recharge de la nappe avant leur infiltration et avant toute évaporation. Ce résultat se rapproche de celui obtenu par Kuitcha *et al.*, 2012 ($\delta^{18}O = -2,47$ et $\delta^2H = -8,06$ ‰ Vs-SMOW) dans les pluies de Yaoundé. En comparant des teneurs isotopiques en oxygène-18 des eaux souterraines ($^{18}O = -2,57$ ‰ Vs-SMOW) avec celles des pluies moyennes pondérées aux précipitations ($^{18}O = -2,47$) (Kuitcha *et al.*, 2012), on remarque que ces résultats sont très rapprochés l'un de l'autre (tableau 3). Ceci indiquerait qu'il existe une communication ou une relation directe entre les eaux de pluie et celles de la nappe. Ainsi, les eaux de pluie alimenteraient la nappe phréatique sans subir une évaporation intense. Ceci signifie également que la principale source d'alimentation des eaux souterraines provient des précipitations qui n'ont subi aucun autre processus isotopique. En effet, la recharge des eaux souterraines a été récente et s'est produite par les précipitations locales actuelles avec absence de modification de la composition isotopique originelle par la reprise évaporatoire. Ce constat avait déjà été fait en Casamance (Sénégal) par Tandia (1990) qui observait une identité de faciès isotopique entre les eaux prélevées successivement avant et après la recharge.

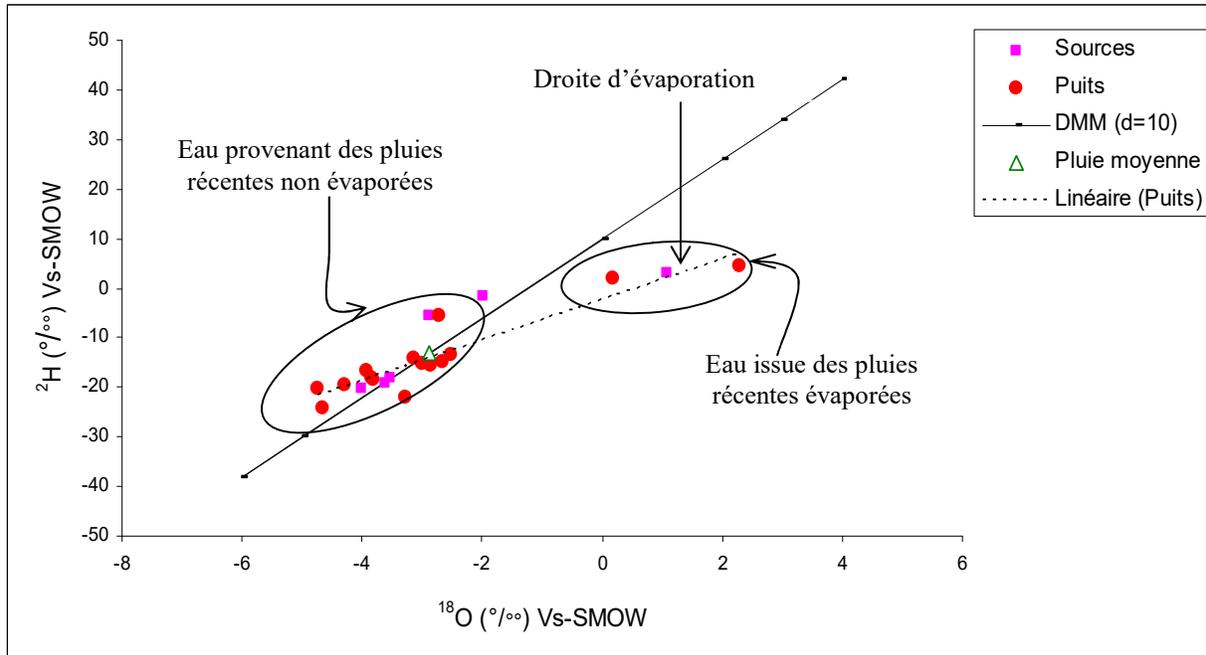


Figure 4: Origine et mode d'alimentation des eaux Avec : DMM= droite météorique mondiale ; d = Excès en deutérium

Tableau 3 : Comparaison des teneurs moyennes en ^{18}O et en ^2H dans les eaux

Points d'eau	^{18}O (‰ vs SMOW)
Pluie moyenne pondérée (n=18)	-2,47
Eaux souterraines (n= 36)	-2,57

Une telle ressemblance isotopique des eaux de la nappe avec celles des pluies pourrait également être expliquée par l'homogénéisation de la température de formation des

précipitations actuelles et celles qui ont contribué à la recharge de la nappe.

CONCLUSION

Cette étude sur les eaux souterraines de la nappe phréatique du bassin versant amont du Mfoundi à Yaoundé a pu mettre en évidence, les différents phénomènes géochimiques pouvant avoir lieu au sein de cet important aquifère. L'application des outils hydrochimiques et isotopiques a permis de préciser son fonctionnement. Sur le plan hydrochimique, les eaux sont faiblement à moyennement minéralisées (conductivité entre 84 à 823 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et acides ($\text{pH} = 4,9 \pm 0,2$). Le faciès chimique est chloruré sodique et potassique. Les concentrations en nitrates sont très élevées dans la plupart des points d'eau (62% > 50 mg/l). Les principaux ions à l'origine de la minéralisation des eaux seraient issus de l'altération des roches, de l'hydrolyse des minéraux silicatés, du phénomène d'échange de base

avec les minéraux argileux et de la pollution anthropique. La minéralisation de l'eau dépend donc de l'environnement superficiel et de la nature des roches traversées, du temps de séjour et des contrôles chimiques. Les fortes teneurs en CO_2 dissous dans les eaux souterraines témoignent qu'elles circulent en système ouvert par rapport au CO_2 du sol. L'étude isotopique montre que la composition isotopique moyenne pondérée de la masse d'air ayant généré les précipitations dans le bassin du Mfoundi ($^{18}\text{O} = -2,47\text{‰}$ Vs-SMOW) est proche de celle obtenue dans les eaux souterraines ($^{18}\text{O} = -2,57\text{‰}$ Vs-SMOW). Ainsi, la recharge de la nappe des altérites a été récente et s'est produite par les précipitations actuelles non évaporées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA), la Fondation Internationale pour la Science (FIS) et l'Agence Norvégienne pour le Développement (START/NORAD) pour l'aide multiforme apportée pour la réalisation de cette étude. Nos

remerciements également au Docteur Hell Joseph Victor (Directeur de l'IRGM) et au Docteur Ntonga Jean Claude (Chef du CRH) pour la logistique ainsi aux évaluateurs anonymes qui ont grandement aidé à améliorer la qualité de ce manuscrit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Antonakos N et Lambrakis A, 2000. The hydrogeochemistry of the lake Wako drainage basin, Texas. *Environmental Geology*, Vol. 45 (1): 106-114.
- Aranyossy JF, Filly A, Tandia AA, Louvat D, Ousmane B, Joseph A et Fontes JCh, 1989. Estimation des flux d'évaporation diffuse sous couvert sableux en climat hyper aride (Erg de Bilma, Niger), In *Isotope techniques in water resources development* » IAEA-SM-319/39: 309-324.
- Biémi J, 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle du socle précambrien d'Afrique de l'ouest : hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimique et isotopique des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (côte d'Ivoire). Thèse Doc. Univ. Nationale de Côte d'Ivoire, 493 p.
- Coleman ML, Sherpherd TJ, Durham JJ, Rousse JE, Moore GR, 1982. Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 54: 993-995.
- Craig H, 1961a. Isotopic variation in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703.
- Dansgaard W, 1964. Stables isotopes in précipitations. *Tellus XVI*, 4: 436-468.
- jeuda Tchapgna H.B, Tanawa E, Temgoua E, Siakeu J et Ngo Massana B, 1999. Mode de circulation, mécanismes de recharge et temps relatifs de séjour des eaux des nappes souterraines des altérites du milieu cristallin : cas du bassin versant de l'Anga'a, Yaounde, Cameroun. Press. Univ. Yaoundé: 117-126.
- Drever JI, 1997. *The chemistry of natural waters*. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-hall, 388p.
- Epstein S, Mayeda TK, 1953. Variations of the $^{18}O/^{16}O$ ratio in natural waters. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 4: 213-224.
- Fantong WY, Satake H, Aka FT, Ayonghe SN, Kasuyoshi A, Mandal AK and Ako Ako A, 2009. Hydrochemical and isotopic evidence of recharge, apparent age, and flow direction of groundwater in Mayo Tsanaga River Basin, Cameroon: bearings on contamination. *J Environ Earth Sci*. Vol 60 (1): 107-120.
- Fouépé Takoundjou AL, 2012. Groundwater flow modelling and mass transport simulation of a shallow aquifer on crystalline basement: the case of the Anga'a river watershed. Thèse Doct. Ph.D. Univ, Yaoundé I, 155 p.
- Garcia M.D, Hidalgo M.DV and Blesa M.A, 2002. Geochemistry of groundwater in the alluvial Plain of Tucuman Province, Argentina. *Hydrogeology Journal*. 9: 597-610.
- Garrels R.M. et Mackenzie FT, 1967. Origin of the chemical composition of some springs and lakes. In W. Stumm (ed). *Equilibrium concepts in natural water systems*. Advances in geochemistry series, 67: 173-222.
- Joseph A, Frangi JP and Aranyosy JP, 1993. Isotope characteristics of meteoric water and groundwater in the sahelo-sudanese zone. *J. Geophys. Res.*, 97: 7543-7551.
- Banton O et Lumony B Kamgang Kabeyene Beyala V et Ekodeck GE, 1991. Altération et bilans géochimiques des biotites des gneiss de Nkolbisson (NW de Yaoundé, Cameroun). *Géodynamique*, 6 (2): 191-199.
- Kortatsi K, Tay K, Anomu G, Hayford E et Dartey A, 2007. Hydrogeochemical evaluation of groundwater in the lower Offin basin, Ghana. *Environ Geol 2*: Springer-Verlag, 12 p.
- Kamgang Kabeyene Beyala V et Ekodeck GE, 1991. Altération et bilans géochimiques des biotites des gneiss de Nkolbisson (NW de Yaoundé, Cameroun). *Géodynamique*, 6 (2), pp 191-199.
- Kuété M, 1977. Etude géomorphologique du massif de Yaoundé. Thèse de Doctorat 3^{ème} Cycle Université de Bordeaux III, 279 p.
- Kuitcha D, Kamgang Kabeyene BV, Sigha-Nkamdjou L, Lienou G et Ekodeck GE, 2008. Water supply, sanitation, and health risks in Yaoundé,

- Cameroon. African Journal of Environmental Science and Technology, 2 (11): 379-386.
- Kuitcha D, Ndjama J, Tita Awah M, Lienou G, Kamgang Kabeyene BV, Ateba Bessa H et Ekodeck GE, 2010. Bacterial contamination of water points of the upper Mfoundi Watershed, Yaoundé, Cameroun. African Journal of Microbiology Research. Vol. 4 (7): pp 568-574.
- Kuitcha D, Fouépé Takounjou¹ AL, Ndjama J, Takem Eneke G, Tita Awah M and. Kamgang Kabeyene BV, 2012. Chemical and isotopic signal of precipitation in Yaounde-Cameroon. Archives of Applied Science Research. 4 (6): 2591-2597.
- Le Marechal A, 1976. Géologie et géochimie des sources thermominérales du Cameroun. Travaux de Doc., ORSTOM, 176 p.
- Michard G, 2002. Equilibre chimique dans les eaux naturelles. Ed, Publisud ISBN. 2- 86600-446-9. 357p.
- Mpakam HG, 2009. Vulnérabilité à la pollution des ressources en eaux à Bafoussam et incidences socio-économiques et sanitaires : modalités d'assainissement. Thèse de Doctorat/PhD, Université de Yaoundé I, 267 p.
- Ngounou Ngatcha B, Murdry J et Sarrot RJ 2007. Groundwater recharge from rainfall in the southern border of Lake Chad in Cameroon. World Appl Sci, 2: 125-131.
- Nguegang P, Parrot L, Lejoly J et Joiris V, 2008. Mise en valeur des bas-fonds à Yaoundé : système de production, savoir-faire traditionnel et potentialités d'une agriculture urbaine et périurbaine en développement. In Parrot L. (coord.) Agricultures et développement urbain en Afrique subsaharienne, environnement et enjeux sanitaires. L'Harmattan, Paris: 97-108.
- Njitchoua R, Aranyosy JF, Fontes JCh, Michelot JL, Naah E et Zuppi GM, 1995. Oxygen-18, deuterium et chlorures dans les précipitations à Garoua (Nord-Cameroon) : implications météorologiques. C R Acad Sci Paris Ser Ila 321: 853-860.
- Nzenti, JP, 1998. Neoproterozoic alkaline meta-igneous rock from the Pan-African North Equatorial Fold Belt (Yaoundé, Cameroon): biotites and magnetite rich pyroxenites. Journal of African Earth Sciences, 26 (1): 37-47.
- Oga YMS, Lazm T, Koffi Yao T, Soro N, Bachir Saley M, Dongo, D et Gnanba F, 2009. Caractérisation Chimique Des Eaux des Aquifères de Fracture : Cas de la Région de Tiassalé en Cote d'Ivoire. European Journal of Scientific Research, 31 (1) : 72-87.
- Olivry JC, 1986. Fleuve et rivières du Cameroun. Collection Monographie Hydrologie. MESRES/ORSTOM, n°9, 733p.
- Organisation Mondiale de la Santé, 2000. Directive pour l'eau de boisson. Critères d'hygiène et document à l'appui. Organisation Mondiale de la Santé. 2^{ème} édition, 1050 p.
- Petelet G.E, Négrel P et Casanova J, 2003. Variability of ⁸⁷Sr/ ⁸⁶Sr in water draining granite revealed after a double correction for atmospheric and anthropogenic inputs. Hydrol. Sci. 48: 729-742.
- Piper AM, 1953. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. US Geol Surv Groundwater Note 12 Sulin VA (1948), Water of petroleum formation in systems of natural waters. Costoptekhizdat, Moscow, 96 p.
- Plummer LN, Jones BF et Truesdell AH, 1976. WATEQ-a fortran IV version of W ATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Geol. Surv. Wat. Res. Invest., 76, 61 p.
- Post VEA. 2002. Chemistry for modellers aqueous geochemistry in coastal area. 17 th Salt Water intrusion Meeting. Delft. The Netherlands. 6-10 May : 3-12.
- Schwoerer P, Dassibat C et Rister JJ, 1965. Hydrogéologie du Nord Cameroun. Rapport final de la mission de recherches hydrogéologiques. DMG.BRGM, YAO. 65. A13, 117p.
- Sigha-Nkamdjou ., Galy-Lacaux C, Pont V Richard S., Sighomnou D et Lacaux JP, 2003. Rainwater chemistry and wet deposition over the Equatorial forested ecosystem of Zoétélé (Cameroon). Journal of Atmospheric Chemistry: 173-198.
- Smiler, 2007. Diagramme. Logiciel libre du Laboratoire d'Hydrogéologie, Université d'Avignon, France.
- Soro N, 2002. Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doctorat d'État ès Sciences Nat. Univ. Cocody Abidjan, 272 p.
- Sracek O et Hirata R, 2002. Geochemical and stable isotopic evolution of the Guarani Aquifer System in the state of São Paulo, Brazil. Hydrogeology Journal, 10: 643-655.
- Suchel JB, 1988L. Les climats du Cameroun. Thèse Doct. d'Etat, Univ. Saint Etienne, 188p.
- Tandia A, 1990. Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes.

- Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Louga-Nord Sénégal. Thèse. 3e cycle, Univ. Dakar, 138p.
- Thiry M et Bariteau A, 2003. Nappe de Beauce: Hydrochimie et altération de sables de Fontainebleau. Centre d'Information Géologique, Ecole des Mines de Paris, France. 108 p.
- Vicat JP, Mvondo H, Willems L et Pouclet A, 2002. Phénomènes karstiques fossiles et actuels au sein des formations métamorphiques silico-alumineuses de la nappe pan-africaine de Yaounde (Sud- Cameroun). C. R. Geosci. 334: 545–550.
- Wethé J, Radoux M et Tanawa E, 2003. Assainissement des eaux usées et risques socio sanitaires et environnementaux en zone d'habitats planifiés de Yaoundé (Cameroun). Vertigo. Revue des sciences de l'environnement, 4 (1) : 1-12.
- Yongue-Fouateu R, 1986. Contribution à l'étude pétrographique de l'altération et de faciès de cuirassement ferrugineux des gneiss migmatitiques de la région de Yaoundé. Th. Doct. 3eme cycle .Univ.Yaoundé. 214p.