

Caractérisation de la minéralisation de la nappe des gneiss côtiers éburnéens par modélisation géochimique (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)

[Characterization of groundwater mineralization in the eburnean coastal gneiss by geochemical modeling (South East Ivory Coast)]

Bernard Adiaffi¹, Aimé Koudou², Tchimou Vincent Assoma¹, Franck Maxime Gnamba³, Christelle Marlin⁴, Marie-Solange Oga Yéi¹, Yacouba Coulibaly⁵, and Jean Biémi¹

¹Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

²Département des Sciences de l'Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa, 02 BP 150 Daloa 02, Côte d'Ivoire

³Département des Géosciences, Université Paleforo Gon Coulibaly (UPGC) de Korhogo, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

⁴Laboratoire Géosciences Paris-Sud, UMR GEOPS 8148, Université de Paris-Sud, CNRS, Bâtiment 504, 91405 Orsay, France

⁵Laboratoire de Géologie du Socle et de Métallogénie, UFR STRM, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Fractured aquifers of gneiss are the main drinking water sources for population living in the north area of Alépé. Neglecting geochemical monitoring of such groundwater is able to deliver water consumers taking unacceptable risks. The quality of water from bedrock in terms of taste can lead people to drink surface water whose chemical quality is lower in comparison with the reference quality. The aim of this study is to estimate the major cations concentration of gneiss groundwater in which mineralization was almost due to silicate hydrolysis. To achieve the aim in view, a study of main mineral of the gneiss aquifer was carried out and a geochemical simulation through inverse modeling by PHREEQCI code was applied on water rock process. The study showed that the main silicate minerals of gneiss that contained major cations were albite, K feldspar, plagioclases and amphibole. The dissolution mean rates of minerals able to increase groundwater mineralization by hydrolysis were $1.3 \times 10^{-5} \text{ mol L}^{-1}$ for K-feldspar, $3.8 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ and $1.0 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ for oligoclase and amphibole (ferro-tshermakite), respectively. Through these results, it shown that oligoclase would be the mineral more favourable for hydrolysis among feldspars studied in the gneiss. In gneiss groundwater, sodium was mainly supplied by oligoclase, potassium was supplied by K-feldspar and ferro-tshermakite, magnesium was supplied by ferro-tshermakite only and calcium was supplied by oligoclase and ferro-tshermakite.

KEYWORDS: Aquifer, gneiss, silicate, groundwater, modeling

RESUME: Les aquifères fracturés du gneiss sont les principales sources d'eau potable de la région nord d'Alépé. Négliger le suivi géochimique de telles nappes revient à livrer les consommateurs des eaux de la région à des prises de risques énormes. La qualité de goût incomprise, peut amener certaines populations à se tourner vers les eaux de surface dont la qualité chimique est au plus niveau de l'échelle de référence. L'objectif de l'étude est de cibler la source des cations majeurs et d'estimer leurs concentrations dans la nappe de gneiss dont la minéralisation se fait quasiment suivant le processus

d'hydrolyse. Pour atteindre cet objectif, une étude des principaux minéraux constitutifs de l'aquifère est faite et une simulation géochimique au moyen de modèle inverse par le code PHREEQCI est appliquée sur les interactions entre les minéraux et l'eau. Les résultats montrent que les principaux minéraux du gneiss susceptibles de minéraliser la nappe sont l'albite, le K-feldspath, les plagioclases et les amphiboles. Les taux moyens de dissolution des minéraux favorables à l'hydrolyse sont de $1,3 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹ pour le K-feldspath, de $3,8 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ et de $1,0 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ respectivement pour l'oligoclase et l'amphibole (ferro-tshermakite). L'étude montre que dans l'aquifère du gneiss, l'oligoclase serait plus favorable à la dissolution par rapport aux autres feldspaths de la roche. Le sodium provient majoritairement de l'oligoclase, le potassium provient à la fois du K-feldspath et du ferro-tshermakite, le magnésium provient exclusivement du ferro-tshermakite et la source du calcium est à la fois l'oligoclase et le ferro-tshermakite.

MOTS-CLEFS: Aquifère, gneiss, silicates, eaux souterraines, modélisation.

1 INTRODUCTION

En Côte d'Ivoire, la nappe de fractures est très sollicitée car elle constitue parmi les sources d'eaux exploitables, la principale source d'eau potable qui alimente environ deux tiers soit une quinzaine de million de la population ivoirienne. La qualité des eaux de fractures dépend de la lithologie de l'aquifère. La minéralisation des nappes se fait par altération ou hydrolyse des minéraux au contact de l'eau. Dans la zone d'étude, la nature du socle est constituée en grande partie de gneiss mais on y rencontre également des métamonzogranites, des métagranites à muscovite et des métamonzonites à biotite [4]. Ces roches métamorphisées sont beaucoup fracturées [1] et les débits enregistrés sont parfois considérables ; ils sont de l'ordre de 3m³/h dans les roches granito-gneissiques d'après les conclusions d'une étude réalisée en Côte d'Ivoire [5] et de 2,9m³/h dans les granites [19] de Côte d'Ivoire. La nappe de fractures des gneiss de la région située au Nord de Alépé est très éprouvée car elle sert de source d'approvisionnement d'eau potable aux populations rurales qui s'y trouvent. Les eaux souterraines de cet aquifère sont de bonne qualité et méritent un suivi en ciblant et les différentes sources d'approvisionnement et en estimant les taux de dissolution, des cations majeurs dans l'eau par hydrolyse au dépens de la roche. Plusieurs travaux ont été menés dans plusieurs localités et montrent que l'activité des microorganismes participe à la dissolution de l'albite et des amphiboles [14], [8]. En milieu anoxique à pH 6,86 à 25°C et en 65 jours, de tel processus bactérien se produit amenant une dissolution de la biotite et la phlogopite à des taux respectifs de $\sim 10^{-5}$ mol.L⁻¹ pour le K⁺ et $\sim 10^{-6}$ mol.L⁻¹ pour le Mg²⁺ et le Si⁴⁺ [6]. [17] ont également montré que le taux de dissolution des minéraux augmente en milieu acide.

L'objectif de cette étude est d'utiliser la modélisation inverse par le code PHREEQCI pour simuler la dissolution des principaux minéraux de l'aquifère fracturé du gneiss au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Il s'agit plus spécifiquement d'étudier premièrement les principaux minéraux du gneiss par microscopie optique et par la microsonde électronique et secondairement d'étudier les interactions eau-roche. Le processus d'hydrolyse entre l'eau et la roche est couramment simulé en géochimie [12], [16]. La simulation oppose deux types d'eau : (1) une solution 1 qui représente les eaux d'infiltration, acides et moins minéralisées et (2) une solution 2, moins acide et relativement plus minéralisée qui présente les caractéristiques de l'eau de la nappe au moment du prélèvement.

2 GENERALITES SUR LE GNEISS DE LA ZONE D'ETUDE

Les travaux de [4] ont montré que le gneiss regroupe un faciès fin à biotite et un autre faciès amphibolitique sont des faciès paradérivés qui présentent des recristallisations métamorphiques plus élevées. Ces faciès sont localisés autour des métamonzogranites et des métamonzonites à biotite (Figure 1). Ces gneiss sont facturés [1] et mézozonaux. Ils sont très hétérogènes et leur répartition reste très circonscrite à la périphérie des grands massifs monzogranitiques à monzozonitiques [4].

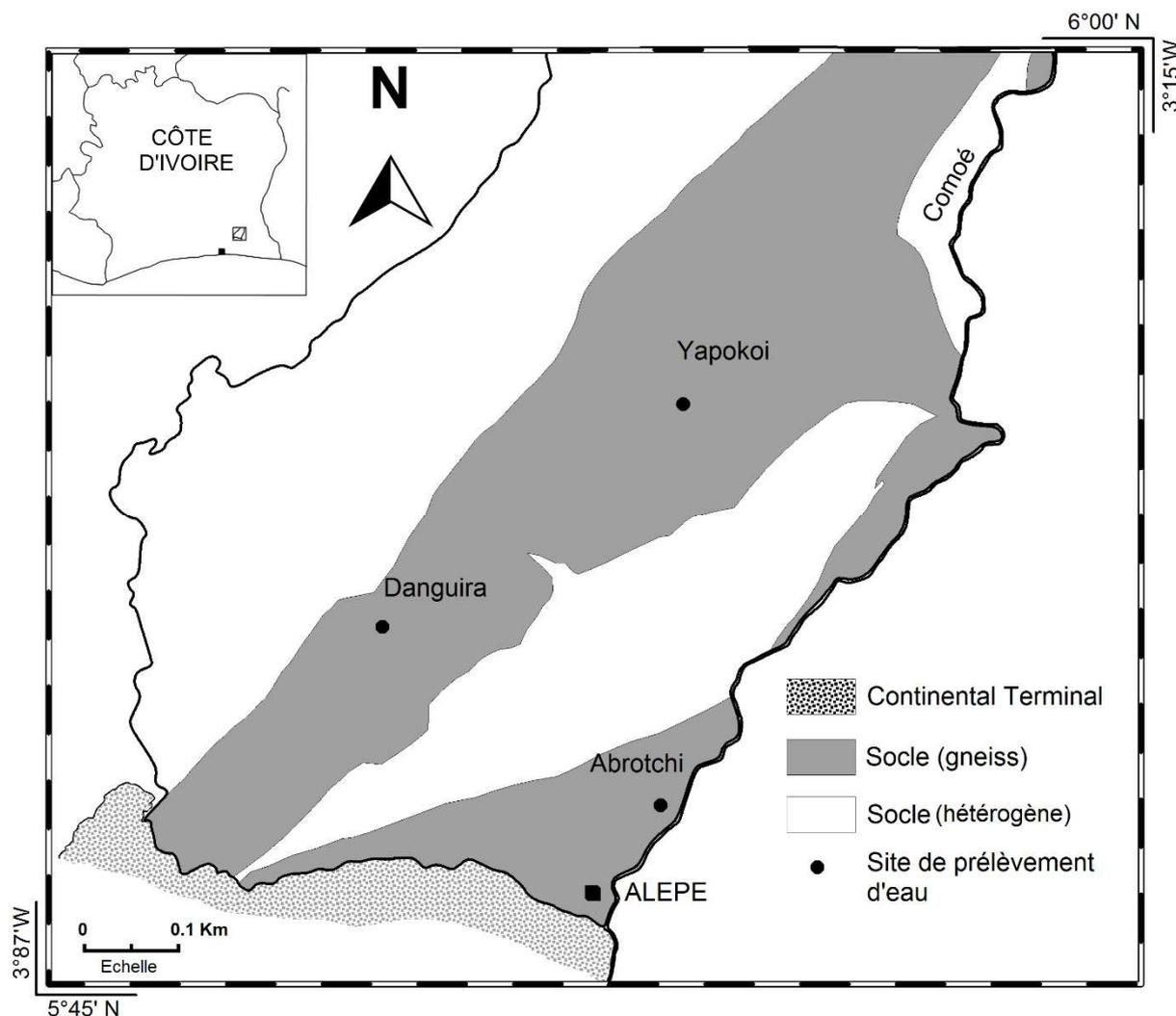


Figure 1 : Situation de la zone d'étude

3 MATERIEL ET METHODES

3.1 ECHANTILLONNAGE D'EAU ET DE ROCHE

Trois échantillons d'eau ont été prélevés dans l'aquifère du gneiss précisément à YAPOKOI, à DANGUIRA et à ABROTCHI. Le matériel d'échantillonnage est composé d'un pHmètre et d'un conductimètre pour la mesure de pH et de la conductivité électrique (CE). Le pHmètre a également servi à faire la mesure *in situ* de l'alcalinité des eaux souterraines. Ces eaux ont été conservées dans des flacons en Nalgène de différentes capacités : 500 ml pour les cations et 125 ml pour les anions.

Deux échantillons de roche ont été prélevés dans la partie saine du gneiss à différents points et non loin des forages qui ont servi à prélever les échantillons d'eau.

3.2 ETUDE EN LABORATOIRE

L'analyse des échantillons d'eau a été faite à l'UMR GEOPS (Géosciences Paris-Sud). Les cations et anions majeurs ont été mesurés respectivement sur un ICP-AES emission spectrometer Varian-liberty 200 et une chromatographie ionique-Dionex. L'incertitude sur la mesure des ions par chromatographie ionique est fonction du nombre d'échantillon analysé entre deux calibrations et est estimée à 4 % dans cette étude tandis que l'incertitude maximale acceptée sur l'ICP est de 5 %.

Les échantillons de gneiss ont servi à confectionner des lames minces à l'UMR GEOPS. Ces lames minces portent sur les niveaux sombres de la foliation pour avoir un ensemble représentatif des minéraux. L'étude minéralogique du gneiss s'est faite en plusieurs étapes : d'abord au microscope optique en lumière transmise à GEOPS (Figure 2) puis à la microsonde électronique CAMECA SX100 l'Université Pierre et Marie Curie.

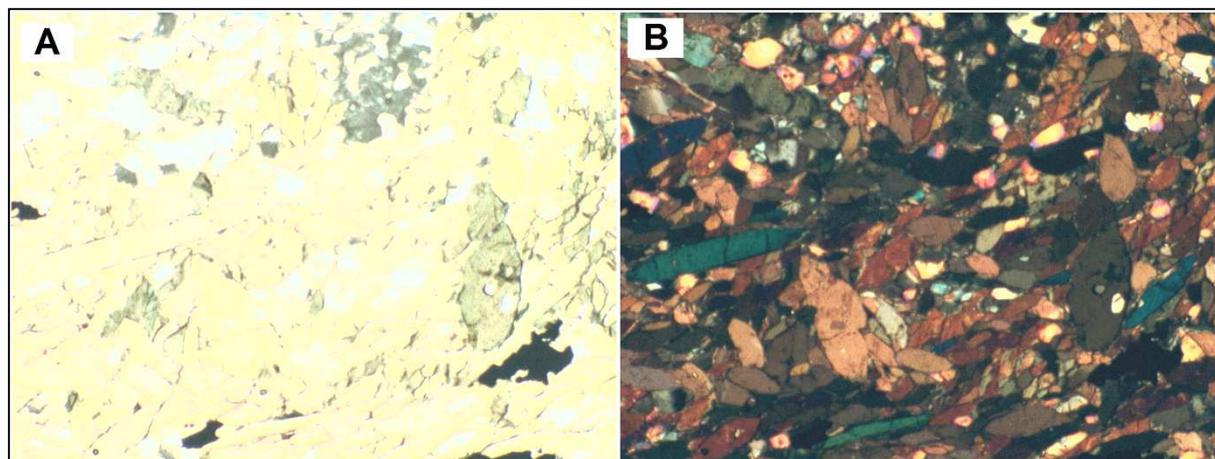


Figure 2 : Minéralogie du gneiss (A : Lumière Naturelle ; B : Lumière Polarisée)

3.3 MODELISATION GEOCHIMIQUE

La modélisation géochimique inverse simule les interactions eau-roche dans l'aquifère du gneiss en impliquant la connaissance d'une part de la chimie des eaux de recharge et celle de l'échantillon d'eau prélevée et d'autre part de la minéralogie de l'aquifère rocheux. L'eau de recharge qui est la solution 1 est acide et moins minéralisée tandis que l'eau de la nappe échantillonnée représentant celle qui a interagi avec l'aquifère est la solution 2 est moins acide et relativement plus minéralisée [3]. La température de simulation est de 25°C. Les interactions eau-roche montrant la minéralisation de la nappe en cations majeurs, ont été simulées à partir du code USGS (PHREEQCI). Ce programme de modélisation est couramment utilisé pour expliquer et interpréter les processus géochimiques [7], [9], [18]. Les données d'entrée du modèle se présentent suivant la Figure 3. Les minéraux silicatés servant de données d'entrée de modèle ne concernent que les principaux minéraux dont la dissolution est susceptible de minéraliser la nappe souterraine [3]. Les minéraux comme le quartz ne possédant pas de cations majeurs dans leurs formules structurales ne sont pas pris en compte.

```

TITLE Inverse modelling of South ivorian Gneiss Groundwater
SOLUTION_SPREAD
-units mmol/l
Number pH Si Ca Mg Na K Alkalinity s(6) Cl
1 6.1 0.020 0.290 0.005 0.035 0.010 0.200 0.017 0.218
2 7.3 0.771 0.491 0.242 0.622 0.044 1.995 0.003 0.188
INVERSE_MODELING 1
-solutions 1 2
-uncertainty 0.265 0.265
-phases
Albite dis
K-Feldspar dis
Plagioclase dis
Amphibole dis
Kaolinite pre
Halite
Gypsum
Fe(OH)3(a)
CO2(g)
CH4(g)
-range 1000
-tolerance 1e-010
-mineral_water true
PHASES
Albite
Na0.96Al0.96Si3.04O8 + 8H2O = 0.96Al(OH)4- + 3.04H4SiO4 + 0.96Na+
log_k 0
K-Feldspar
K1.63Al1.63Si2.37O8 + 8H2O = 1.63Al(OH)4- + 2.37H4SiO4 + 1.63K+
log_k 0
Plagioclase
Na0.86Ca0.21Al1.2Si2.78O8 + 4.88H+ + 3.12H2O = 1.2Al+3 + 0.21Ca+2 + 2.78H4SiO4 + 0.86Na+
log_k 0
Amphibole
Ca2.81Na0.45K0.13Mg1.71Fe1.18Al2.94Si6.30O22(OH)2 + 20.8H+ + 1.2H2O = 2.94Al+3 + 2.81Ca+2 + 1.18Fe+2 +
6.30H4SiO4 + 0.13K+ + 1.71Mg+2 + 0.45Na+
log_k 0
END
    
```

Figure 3 : Données d'entrée du modèle

L'équation générale de bilan de masse prise en compte dans la simulation s'écrit :

$$\Delta m_{T,k} = m_{T,k(\text{final})} - m_{T,k(\text{initial})} = \sum_{p=1}^p \alpha_p b_{p,k} \quad (1)$$

Où ; $\Delta m_{T,k}$ est la différence de concentration de l'élément k entre l'eau finale et l'eau initiale ; p est le nombre de phases ; α_p est le transfert de masse de la phase p et $b_{p,k}$ est le coefficient stœchiométrique de l'élément k dans la phase p [3].

4 RESULTATS

4.1 COMPOSITION CHIMIQUE DES SOLUTIONS ET COMPOSITION MINÉRALOGIQUE

La composition chimique moyenne de la nappe de fractures (solution 2) est présentée dans le Tableau 1. Celle de la solution 1, représentative des eaux de recharge de la région est donnée par [3] (Tableau 1).

Les résultats de l'étude minéralogique du gneiss révèlent d'une part, un assemblage de minéraux essentiels que sont : le quartz, les amphiboles, les plagioclases et le feldspath potassique et d'autre part, un seul minéral accessoire qu'est l'épidote. La Figure 4 montre que les amphiboles contenues dans cette roche sont des ferro-stshermakites selon la classification de [2]. Les plagioclases sont constitués de l'albite et de l'oligoclase et le feldspath potassique est l'orthose.

Tableau 1 : Composition chimique moyenne des solutions 1 et 2

N° Solution	pH	Si ⁴⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	alcalinité	S(6)	Cl ⁻
1	6,1	0,020	0,290	0,005	0,035	0,010	0,200	0,017	0,218
2	7,3	0,771	0,491	0,242	0,622	0,044	1,995	0,003	0,188

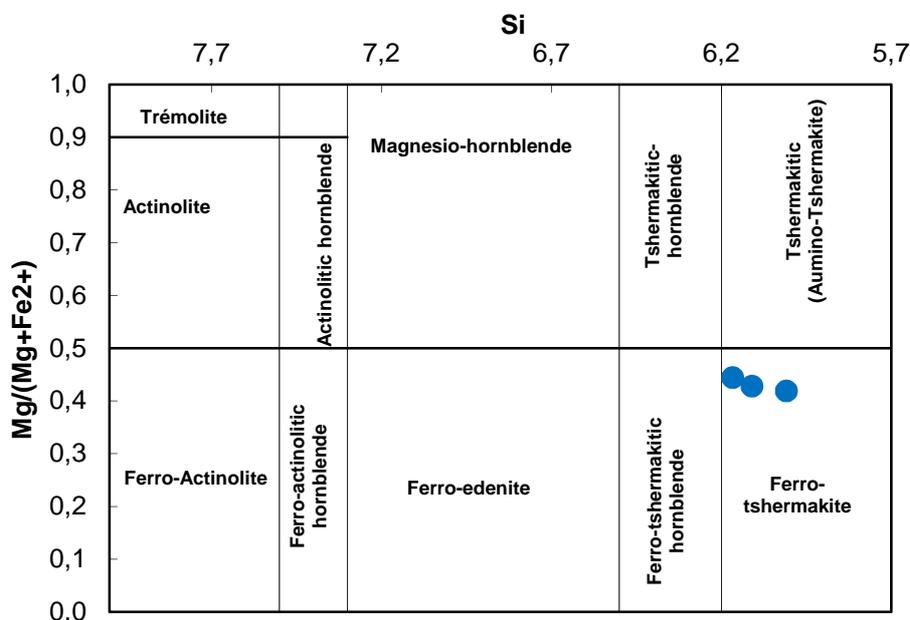


Figure 4 : Classification des amphiboles [2]

Les formules structurales des minéraux essentiels (Tableau 2) utilisés comme données d'entrée du modèle, abondants dans la roches et contenant des cations majeurs sont :

Amphiboles

- Ferro-tshermakite : $Ca_{2,81}Na_{0,45}K_{0,13}Mg_{1,71}Fe_{1,18}Al_{2,94}Si_{6,30}O_{22}(OH)_2$

Plagioclases

- Albite : $Na_{0,96}Al_{0,96}Si_{3,04}O_8$

- Oligoclase : $Na_{0,86}Ca_{0,21}Al_{1,20}Si_{2,78}O_8$

Feldspath potassique (orthose) : $K_{1,63}Al_{1,63}Si_{2,37}O_8$

Tableau 2 : Proportion des cations dans les principaux minéraux silicatés

Principaux minéraux	Si ⁴⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺	Fe ²⁺
Albite	3,04	–	–	0,96	–	0,96	–
Oligoclase	2,78	0,21	–	0,86	–	1,25	–
K-feldspath	2,37	–	–	–	1,63	1,63	–
Amphibole	6,30	2,81	1,71	0,45	0,13	2,94	1,18

4.2 MODELE INVERSE DE LA MINERALISATION

Le modèle inverse est appliqué dans cette étude comme dans plusieurs travaux [11], [13] en vue d'expliquer la minéralisation de la nappe de gneiss. De l'équation (1) générale de bilan de masse, découlent les équations (2) à (6) par le calcul du taux de dissolution de chaque espèce minérale, en tenant compte à la fois de la concentration et de la proportion de chaque cation majeur respectivement dans la nappe et dans les minéraux contenus dans le gneiss:

$$\Delta m_{T,Na} = 0,622 - 0,035 = 0,96\alpha_{albite} + 0,86\alpha_{oligoclase} + 0,45\alpha_{amphibole} \quad (2)$$

$$\Delta m_{T,K} = 0,044 - 0,010 = 1,63\alpha_{K-feldspath} + 0,13\alpha_{amphibole} \quad (3)$$

$$\Delta m_{T,Ca} = 0,491 - 0,290 = 0,21\alpha_{oligoclase} + 2,81\alpha_{amphibole} \quad (4)$$

$$\Delta m_{T,Mg} = 0,242 - 0,005 = 1,71\alpha_{amphibole} \quad (5)$$

$$\Delta m_{T,Si} = 0,771 - 0,020 = 3,04\alpha_{albite} + 2,37\alpha_{K-feldspath} + 2,78\alpha_{oligoclase} + 6,30\alpha_{amphibole} \quad (6)$$

4.3 TAUX DE DISSOLUTION DES MINÉRAUX

Une seule possibilité de simulation de dissolution partielle des minéraux primaires a été proposée à travers le modèle dont les résultats sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Résultats de la simulation de la minéralisation des eaux de fractures des gneiss

	Phase solide (minéraux)	Taux de dissolution des minéraux		
		modèle		
		minimum	maximum	moyenne
Oligoclase	Na _{0,86} Ca _{0,21} Al _{1,20} Si _{2,78} O ₈	3,65E-04	3,93E-04	3,84E-04
K-feldspath	K _{1,63} Al _{1,63} Si _{2,37} O ₈	3,29E-06	2,16E-05	1,28E-05
Ferro-tshermakite	Ca _{2,81} Na _{0,45} K _{0,13} Mg _{1,71} Fe _{1,18} Al _{2,94} Si _{6,30} O ₂₂ (OH) ₂	1,00E-04	1,13E-04	1,01E-04
Kaolinite	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-3,97E -04	-3,78E -04	-3,89E-04
CO _{2g}	CO ₂	9,39E -04	2,40E -03	1,67E-03

La combinaison proposée par le modèle présente l'oligoclase comme la principale source de sodium. Le taux moyen de dissolution du feldspath potassique est de $1,3 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹. Ceux de l'oligoclase et de l'amphibole (ferro-tshermakite) sont respectivement de $3,8 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ et de $1,0 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹. Les taux de dissolution pour la phase solide et de production pour la phase gazeuse sont de signe positif alors que ceux de précipitation de phase solide sont affectés d'un signe négatif.

5 DISCUSSION

5.1 ORIGINE DES CATIONS MAJEURS

Les différentes sources majeures des cations dans les eaux souterraines de fractures sont les minéraux de l'aquifère, au contact avec l'eau. L'influence des eaux de pluie se situe au niveau du sodium dont la concentration milli molaire de ces eaux avant infiltration dans le sol est de 0,23 ; la concentration du reste des cations majeurs est inférieure à 3×10^{-5} mol.L⁻¹ [3]. Pour corriger cet effet, les données d'entrée du modèle intègrent la concentration du sodium des eaux de pluie (cf. Figure 3). En ce qui concerne les alcalins, la seule source de sodium obtenue dans la simulation est l'oligoclase qui est le plagioclase calcosodique proche de l'albite. La concentration de $8,6 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ de sodium dans l'oligoclase implique un taux de dissolution de $3,8 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ de ce minéral au profit de la minéralisation de la nappe du gneiss. Cela implique que la dissolution de l'albite ne semble pas contrôler la minéralisation en sodium de la nappe de gneiss. L'étude révèle quant au potassium dans la nappe de gneiss, les sources de feldspaths potassiques et de ferro-tshermakite (amphibole). Dans l'aquifère du gneiss, les différentes concentrations de potassium dans le K-feldspath et dans le ferro-tshermakite respectivement de $1,6 \times 10^{-3}$ mol.L⁻¹ et $1,3 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ favorisent un taux de dissolution de K-feldspath et de ferro-tshermakite respectivement de $1,3 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹ et de $1,0 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹. En ce qui concerne les alcalinoterreux, le calcium provient à la fois de l'oligoclase et du ferro-tshermakite. Mais la source privilégiée du calcium est l'oligoclase qui a une vitesse de dissolution supérieure à celle de l'amphibole [15]. Les concentrations en calcium de $2,1 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹ et de $2,8 \times 10^{-3}$ mol.L⁻¹ respectivement dans l'oligoclase et dans le ferro-tshermakite d'une part, et d'autre part, la concentration en magnésium de $1,71 \times 10^{-3}$ mol.L⁻¹ dans le ferro-tshermakite, favorisent également les mêmes taux de dissolution ($1,3 \times 10^{-5}$ mol.L⁻¹ et de $1,0 \times 10^{-4}$) de ces minéraux dans l'aquifère. Les taux négatifs du Tableau 3 de la kaolinite renseignent sur la

précipitation de ce minéral au cours du processus de minéralisation de la nappe au dépens des principaux minéraux de l'aquifère. Le taux positif du CO₂ dans le Tableau 3 indique que ce gaz dissous dans l'eau au moment de l'échantillonnage est en début de consommation dans le processus d'alcalinisation comme indique le pH 7,3 de l'eau.

5.2 CARACTERISTIQUES DE LA NAPPE DE FRACTURES DES GNEISS

Le processus de dissolution d'amphibole de l'aquifère du gneiss est relativement dynamique. Le taux d'amphibole est 10 fois plus grand (10^{-4} mol.L⁻¹ contre 10^{-5} mol.L⁻¹) que celui se produisant par exemple dans les granodiorites d'Aboisso plus à l'Est [20]. Le taux de dissolution des plagioclases est encore plus important (4 fois plus grand) que celui de l'amphibole dans l'aquifère du gneiss. Le taux de précipitation de kaolinite dans cet aquifère ($3,89 \times 10^{-4}$ mol.L⁻¹) révèle que l'eau de la nappe était sursaturée vis-à-vis de ce minéral. Ce qui est en parfait accord avec les conclusions de [10] qui montrent que la majeure partie du socle cristallin est recouverte d'altérites essentiellement constitués d'altération kaolinique surmontée de cuirasses ferrugineuses dont l'aspect diffère selon la position topographique qu'elles occupent. Il a nécessité un taux de production de dioxyde de carbone (CO₂) de $1,67 \times 10^{-3}$ mol.L⁻¹ pour produire ces différents taux de dissolution des minéraux primaires silicatés et essentiels dans la nappe de gneiss. Il faut beaucoup plus de CO₂ dans cet aquifère de gneiss que n'en trouvent [20] dans les aquifères des granodiorites dans la même région soumise au même climat.

6 CONCLUSION

La minéralisation des eaux de l'aquifère de gneiss du Sud-Est de la Côte d'Ivoire est modeste. L'étude révèle que les principaux minéraux : les plagioclases (oligoclase), les feldspaths potassiques et les amphiboles (ferro-tshermakite) minéralisent la nappe respectivement à des taux de dissolution de 0,38 mmol.L⁻¹; 0,013 mmol.L⁻¹ et de 0,10 mmol.L⁻¹. Des plagioclases aux amphiboles en passant par les feldspaths potassiques, le taux de dissolution décroît montrant ainsi une minéralisation orientée et gouvernée par les feldspaths. Les ions sodium dans la nappe proviennent majoritairement de l'oligoclase tandis que les ions potassium proviennent majoritairement des feldspaths potassiques. Les alcalino-terreux à savoir le calcium et le magnésium tirent majoritairement et respectivement leurs origines de l'oligoclase et du ferro-tshermakite. Le ferro-tshermakite est la seule source d'approvisionnement de la nappe en magnésium.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient énormément les Directeurs de l'ONEP (Office National de l'Eau Potable) et la Direction de l'Hydraulique Humaine de la Côte d'Ivoire et les DTH (Directeurs Territoriaux de l'Hydraulique) de la grande région d'étude pour avoir permis de faire l'échantillonnage des eaux souterraines. Ils remercient en outre, les différents chefs de village qui ont collaboré pendant les différentes campagnes d'échantillonnage de roche et d'eau.

REFERENCES

- [1] B. Adiaffi, *Apport de la Géochimie isotopique, de l'Hydrochimie et de la Télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "Socle-Bassin sédimentaire" du Sud-est de la Côte d'Ivoire*, Thèse, Université de Paris-Sud, Orsay, France, pp. 230, 2008.
- [2] B. E. Lake, "Nomenclature of amphiboles", *American Mineralogist*, vol. 63, pp. 1023-1053, 1978.
- [3] C. A. J. Appelo et D. Postma, *Geochemistry, groundwater and pollution*, 2nd edition, 2005.
- [4] C. Delor, I. Diaby, J-P. Tastet, B. Yao, Y. Simeon, M. Viadal, A. Dommanget, *Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000, feuille de Grand Bassam et d'Abidjan*, 1992.
- [5] DGE, Etude de faisabilité des forages manuels, identification des zones potentiellement favorables, 2009. [En ligne] Disponible : <http://www.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=2111>
- [6] H. Sugimori, T. Yokoyama, T. Murakami, "Kinetics of biotite dissolution and Fe behavior under low O₂ conditions and their implications for Precambrian weathering", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 73, pp. 3767-3781, 2009.
- [7] H. W. T. Mapoma, X. Xie, L. Zhang, M. T. Nyirenda, A. Maliro, D. Chimutu, "Hydrochemical characteristics of rural community groundwater supply in Blantyre, southern Malawi", *Journal of African Earth Sciences*, vol. 114, pp. 192-202, 2016.
- [8] J. Hopf, F. Langenhorst, K. Pollok, D. Merten, E. Kothe, "Influence of microorganisms on biotite dissolution: An experimental approach", *Chemie der Erde-Geochemistry*, Vol. 59, pp. 45-56, 2009.

- [9] J. Moran-Ramirez, R. Ledesma-Ruiz, J. Mahlknecht, J. A. Ramos-Leal, "Rockwater interactions and pollution processes in the volcanic aquifer system of Guadalajara, Mexico, using inverse geochemical modeling", *Applied Geochemistry*, vol. 68, pp. 79-94, 2016.
- [10] J-P. Tastet, *Environnements sédimentaires et structuraux Quaternaires du littoral du golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin)*, Thèse, Université de Bordeaux I, France, 1979.
- [11] K. L. Lecomte, A. I. Pasquini, P. J. Depetris, "Mineral Weathering in a Semiarid Mountain River: Its assessment through PHREEQC inverse modeling", *Aquatic Geochemistry*, vol. 11, pp. 173-194, 2005.
- [12] K. L. Locsey, M. Grigorescu, M. E. Cox, "Water–Rock Interactions: An Investigation of the Relationships Between Mineralogy and Groundwater Composition and Flow in a Subtropical Basalt Aquifer", *Aquatic Geochemistry*, vol. 18, pp. 45-75, 2012.
- [13] L. Belbhiri, A. Boudoukha, L. Mouni, T. Baouz, "Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater — A case study: Ain Azel plain (Algeria) ", *Geoderma*, vol 159, pp. 390-398, 2010.
- [14] L. Frankel, "Microorganism induced weathering of biotite and hornblende grains in estuarine sands", *Journal of Sedimentary Research*, vol. 47, pp. 849-854, 1977.
- [15] M-H. Derron, *Interaction eau-roche de basse température : géochimie des métaux dans l'altération météorique des roches mafiques alpines*, Sciences de la Terre, Université de Lausanne, 209pp, 1999.
- [16] M. Tallini, R. A. Falcone, V. Carucci, A. Falgiani, B. Parisse, M. Petitta, "Isotope hydrology and geochemical modeling: new insights into the recharge processes and water–rock interactions of a fissured carbonate aquifer (Gran Sasso, central Italy) ", *Environmental Earth Sciences*, vol. 72, pp. 4957-4971, 2014.
- [17] P. Frogner and P. Schweda, "Hornblende dissolution kinetics at 25°C", *Chemical Geology*, Vol. 151, no. (1-4), pp. 169-179, 1998.
- [18] P. Rodriguez-Escales, A. Floch, G. Vidal-Gavilan, B. M. van Breukelen, "Modeling biogeochemical processes and isotope fractionation of enhanced in situ biodenitrification in a fractured aquifer", *Chemical Geology*, vol. 425, pp. 52-64, 2016.
- [19] Y. A. N'Go, D. L. Goné, I. Savané, M. M. Goblé, "Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique", *Afrique Science*, vol. 1 no. 1, pp. 127-144, 2005.
- [20] Y. M-S. Oga, B. Adiaffi, F. M. Gnamba, C. Marlin, D. Baka, E. M. E. Amani, J. Biémi, "Application du modèle inverse aux interactions eau-roche dans les eaux souterraines des métagranodiorites, Sud-Est Côte d'Ivoire", *European Scientific Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 57-67, 2015.