

APPLICATION DU MODELE INVERSE AUX INTERACTIONS EAU-ROCHE DANS LES EAUX SOUTERRAINES DES METAGRANODIORITES, SUD-EST COTE D'IVOIRE

Yéi Marie Solange Oga

Bernard Adiaffi

Franck Maxime Gnamba

DSTEGE, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Christelle Marlin

Laboratoire IDES UMR 8148 CNRS Bât. 504

Université Paris Sud 11 Orsay, France

Derving Baka

DSTEGE, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Etche Mireille Elise Amani

GMS, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Et Jean Biémi

DSTEGE, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire

Abstract

In Ivory Cost, few studies have been performed on the process of water-rock interactions in aquifers of basement. The study aim is to provide, from an inverse model by usgs program “phreeqci”, orders of magnitude of the mass transfer from each mineral during the process of water mineralization in the aquifer of metagranodiorites. We use mineralogy and geochemistry of water and rocks. The mineralogical study indicated paragenesis of plagioclase-feldspar-chlorite-biotite and amphibole. Kaolinite is assumed to be the clay product of silicate minerals hydrolysis in the study area. The simulation provided dissolution rate of $8.3 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$ for plagioclase, $1.7 \cdot 10^{-4} \text{ mol l}^{-1}$ for chlorite, $9.4 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$ for biotite and $2.3 \cdot 10^{-5} \text{ mol l}^{-1}$ for amphibole during water-rock interaction process occurred 15,000 years ago.

Keywords: Rock-water interaction, inverse modeling, basement, Ivory Cost

Résumé

En Côte d'Ivoire, très peu d'études ont été menées sur le processus des interactions eau-roche dans les aquifères du socle. L'objectif de cette étude est d'aborder le processus des interactions eau-roche dans les aquifères des méta-granodiorites, à partir du modèle inverse du programme phreeqi. Nous utilisons comme méthodes, la minéralogie et la géochimie de l'eau et des roches. L'étude minéralogique des méta-granodiorites a donné la paragenèse constituée de feldspath (essentiellement des plagioclases), de chlorites, de biotite et d'amphiboles. Choissant la kaolinite comme produit argileux de l'hydrolyse des silicates, la simulation donne une dissolution de $8,3 \cdot 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$ de plagioclases, de $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$ de chlorite, de $9,4 \cdot 10^{-5} \text{ mol.l}^{-1}$ de biotite et de $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ mol.l}^{-1}$ d'amphibole durant le processus de minéralisation de l'eau de 15 000 ans de temps de séjour contenue dans les méta-granodiorites.

Mots clés : Interaction eau-roche, modélisation inverses, socle, Côte d'Ivoire

Introduction

Les ressources en eau des villes et zones rurales du sud-est de la côte d'ivoire sont tributaires des réserves souterraines contenues dans les aquifères sédimentaires côtiers et les formations du socle précambrien à l'exception des localités d'ayamé et d'aboisso alimentées par les eaux de surface (la bia).

Les aquifères du sédimentaire et particulièrement le continental terminal (ct) ont fait l'objet de plusieurs études et géochimiques (Oga, 1998 ; Adiaffi, 2008 ; Adiaffi et *al.*, 2011 ; Assoma et *al.*, 2012) pour plusieurs raisons:

Le secteur est du ct est de plus en plus sollicité au plan national pour soutenir l'approvisionnement en eau potable d'abidjan et ses environs;

Le ct est un aquifère transfrontalier, en partage avec le ghana, situé à l'est de la côte d'ivoire.

Les aquifères du socle peu connus présentent un intérêt certain : les niveaux des altérites sont captés par les puits traditionnels dans les villages et campements tandis que les puits modernes et forages des agglomérations plus importantes, captent les nappes de fractures. La question de la minéralisation des eaux souterraines du socle est généralement étudiée à partir des seules analyses chimiques des eaux du socle, sans tenir compte des minéraux silicatés qui sont les sources potentielles de la minéralisation chimique des nappes.

L'objectif de cette étude est d'aborder le processus des interactions eau-roche dans les aquifères des méta-granodiorites (principales formations géologiques dans la région), à partir du modèle inverse du programme

phreeqi (Parkhurst and Appelo, 1999). La simulation proposée dans cette étude ne donne que des ordres de grandeur du taux de dissolution de chaque minéral silicaté étudié durant le processus de minéralisation des eaux de l'aquifère des métagranodiorites, vu que nos travaux ne sont pas des expériences exécutées en laboratoire mais portent sur les processus complexes d'un milieu naturel.

Site d'étude

La région d'étude est située au sud-est de la côte d'ivoire, dans le golfe de guinée. Elle s'étend sur une superficie d'environ 10 000 km² entre les latitudes 5°00 et 6°00 nord et les longitudes 2°40 et 4°00 ouest.

Le climat est de type équatorial de transition avec quatre saisons: deux saisons humides (de mai à juillet et d'octobre à novembre) séparées par deux périodes relativement sèches (de décembre à mars et d'août à septembre).

Les deux principaux fleuves la tanoé et la bia se jettent dans la lagune aby (92% des apports). Plusieurs petites rivières se jettent également dans la lagune aby, dont la plus importante est l'eholié (40 km).

La géologie de la zone d'étude se résume en deux types de formations lithologiquement différentes. Le socle paléoprotérozoïque affleurant au nord sur lequel se sont déposées les formations sédimentaires.

Du point de vue hydrogéologique, on distingue deux types d'aquifères dans la région:

- les aquifères du bassin sédimentaire et les aquifères du socle. Les premiers sont constitués par les nappes du quaternaire, du ct et du créacé supérieur. Les second sont constitués d'aquifères d'altérites et de fissures.

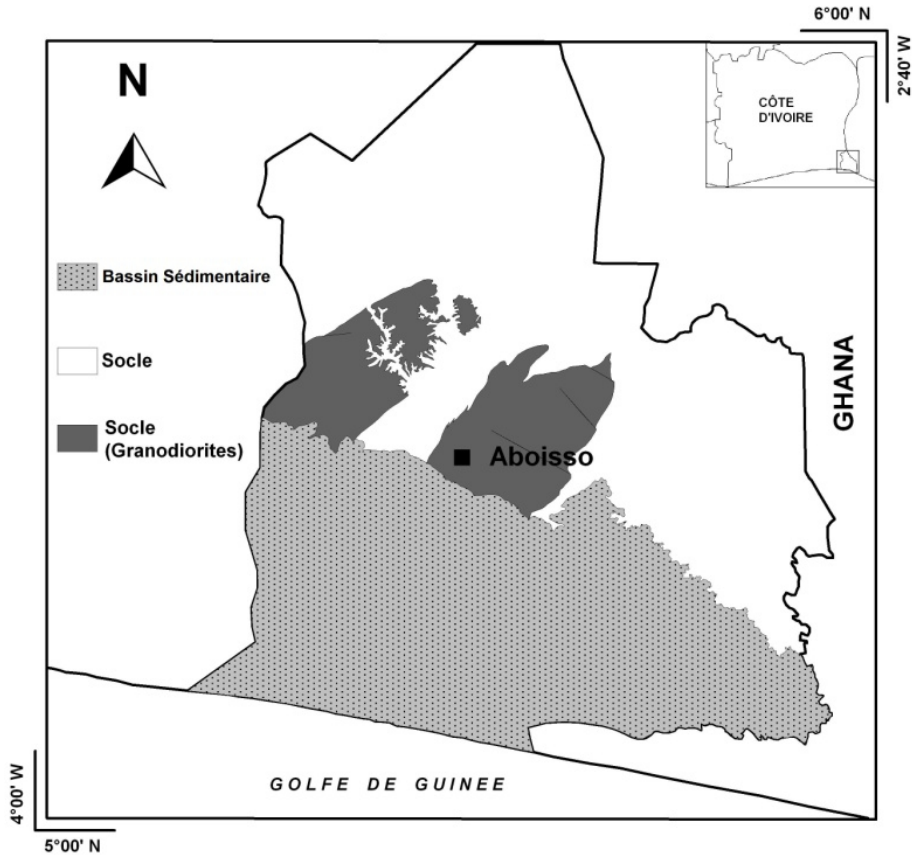


Figure 1. Géologie de la zone d'étude

Méthodologie

La méthodologie utilisée s'appuie sur la minéralogie et la géochimie de l'eau et des roches. Elle est basée sur la modélisation inverse de la minéralisation des eaux des aquifères étudiés à partir d'un modèle inverse. Il s'agit dans cette étude, du modèle inverse du programme phreeqi. On utilise comme données d'entrée du modèle inverse deux composantes. La première composante des données d'entrée du modèle inverse (par phreeqi) est la composition chimique de deux solutions :

- (1) une solution initiale constituée d'eau de recharge de la nappe, faiblement minéralisée ;
- (2) une solution finale constituée d'eau de temps de résidence relativement élevé. L'interprétation du temps de résidence de la nappe des métagranodiorites est basée sur les conclusions des précédents travaux (Adiaffi et *al.*, 2009).

La deuxième composante des données d'entrée du modèle est composée des principaux minéraux primaires silicatés dont la formule structurale est déterminée par analyse à la microsonde électronique. A ces

données s'ajoute la phase gazeuse constituée essentiellement de CO_2 dissous dans l'eau.

Les eaux initiale et finale ont été analysées au laboratoire des de l'université Paris-Sud (Orsay France), (Tableau 1).

Tableau 1. Composition chimique de l'eau initiale (1) et de l'eau finale (2)

Solution	1	2
Ph	4,6	7,5
Si	0,190	0,648
Ca	0,010	1,117
Mg	0,000	0,642
Na	0,050	0,297
K	0,000	0,086
Alcalinité	0,020	3,733
S (6)	0,010	0,063
Cl	0,030	0,218

L'étude minéralogique consiste à identifier les minéraux au microscope optique et à les étudier à la microsonde électronique en vue d'obtenir leurs pourcentages quantitatifs en poids d'oxyde. L'étude des minéraux à la microsonde (Cameca SX100) a été faite à l'université Pierre-et-Marie-Curie, France. La modélisation inverse de la minéralisation des eaux des métagranodiorites a consisté à choisir un seul minéral parmi les groupes de minéraux identifiés. La formule structurale de ces minéraux a été établie en vue d'écrire les équations de dissolution incongruente. Le modèle ne prend pas en compte les vitesses de dissolution des minéraux.

Résultats

L'étude minéralogique des métagranodiorites a mis en évidence par ordre d'importance les minéraux suivants : le quartz, l'amphibole, le plagioclase et la chlorite. La roche est accessoirement composée d'orthoclases (orthose+microcline), d'épidote, de sphène, de zircon et d'oxyde de fer (figures 2 a et b). Les feldspaths (plagioclase) sont très altérés et la quasi-totalité des chlorites des métagranodiorites proviennent de la recristallisation de la biotite durant le métamorphisme. Pour la simulation inverse, nous avons utilisé les minéraux essentiels les plus abondants tels que les amphiboles, les plagioclases, les chlorites auxquels nous avons ajouté la biotite qui ne serait pas totalement transformée en chlorites afin de minimiser les erreurs liées à la recristallisation durant le métamorphisme.

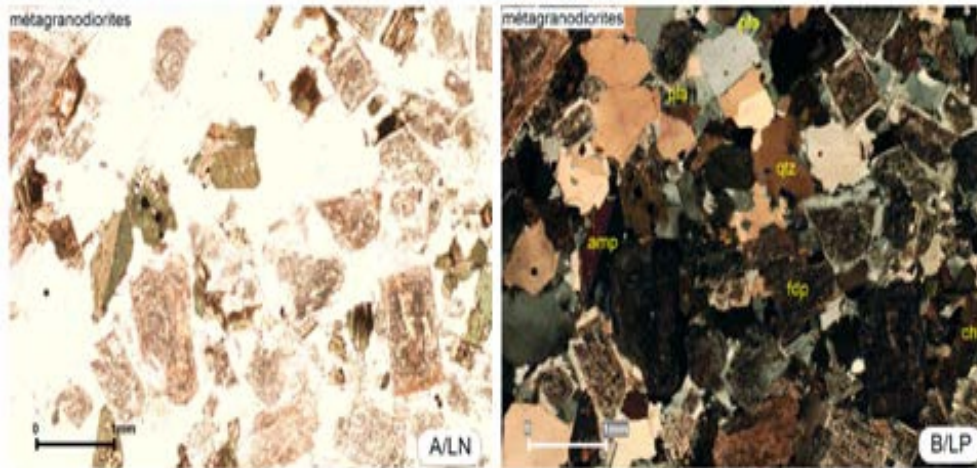


Figure 2. Minéralogie des métagranodiorites d’aboisso (ln = lumière naturelle ; lp = lumière polarisée ; pla = plagioclase ; chl = chlorite ; amp = amphibole ; qtz = quartz ; fdp = feldspath)

Les coefficients stœchiométriques ou proportions des éléments chimiques dans la formule structurale des minéraux des métagranodiorites du sud-est de la Côte d’Ivoire, obtenus après analyse à la micro sonde électronique sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2. Proportions des éléments dans les minéraux des métagranodiorites d’aboisso

Principaux minéraux de la roche	Plagioclase	Chlorite	Biotite	Amphibole
Si	2,69	2,94	3,00	6,88
Ca	0	-	-	1,70
Mg	-	2,76	1,27	2,90
Na	0,66	-	-	0,17
K	-	-	0,90	0,06
Al	1,30	2,43	1,47	1,95
Fe	-	1,72	1,07	1,60

Ces résultats ont permis d’écrire les formules structurales des minéraux :

- plagioclases : $na_{0,66}ca_{0,34}al_{1,30}si_{2,69}o_8$
- chlorite: $mg_{2,76}fe_{1,72}al_{2,43}si_{2,94}o_{10}(oh)_8$
- biotite $fe_{1,07}k_{0,90}mg_{1,27}al_{1,47}si_{3,00}o_{10}(oh)_2$
- amphibole: $ca_{1,70}na_{0,17}k_{0,06}mg_{2,90}fe_{1,60}al_{1,95}si_{6,88}o_{22}(oh)_2$

Le tableau 3 présente les données d’entrée du modèle y compris les équations de dissolution des minéraux. Le domaine de stabilité des eaux de la région est celui de la kaolinite.

Tableau 3. Données d'entrée du modèle inverse

Number	pH	Si	Ca	Mg	Na	K	Alkalinity	S(6)	Cl
1	4.6	0.190	0.010	0.000	0.050	0.000	0.020	0.010	0.030
2	7.5	0.648	1.117	0.642	0.297	0.086	3.733	0.063	0.218
INVERSE_MODELING 1									
-solutions		1	2						
-uncertainty		0.06	0.025						
-phases									
Plagioclase			dis						
Chlorite			dis						
Biotite			dis						
Amphibole			dis						
Kaolinite			pre						
Halite									
Gypsum									
Fe(OH)3(a)									
CO2(g)									
CH4(g)									
Calcite									
Al(OH)3(a)									
-range			1000						
-tolerance			1e-010						
-mineral_water			true						
PHASES									
Plagioclase									
Na0.661Ca0.339Al1.299Si2.691O8 + 5.236H+ + 2.764H2O = 1.299Al+3 + 0.339Ca+2 + 2.691H4SiO4 + 0.661Na+									
log_k 0 # No log_k, Inverse modelling only									
Chlorite									
Mg2.760Fe1.720Al2.432Si2.936O10(OH)8 + 16.256H+ = 2.432Al+3 + 1.72Fe+2 + 6.256H2O + 2.936H4SiO4 + 2.76Mg+2									
log_k 0 # No log_k, Inverse modelling only									
Biotite									
Fe1.07K0.90Mg1.269Al1.474Si3O10(OH)2 + 10H+ = 1.474Al+3 + 1.07Fe+2 + 3H4SiO4 + 0.90K+ + 1.269Mg+2									
log_k 0 # No log_k, Inverse modelling only									
Amphibole									
Ca1.70Na0.17K0.06Mg2.90Fe1.60Al1.95Si6.88O22(OH)2 + 18.48H+ + 3.52H2O = 1.95Al+3 + 1.70Ca+2 + 1.60Fe+2 + 6.88H4SiO4 + 0.06K+ + 2.90Mg+2 + 0.17Na+									
log_k 0 # No log_k, Inverse modelling only									

Le plagioclase utilisé pour la modélisation est l'andésine avec 66% de na et 34% de ca. D'après les diagrammes de foster (1962) les chlorites utilisés sont du type brunsvigite (figure 3) et la majorité des amphiboles obtenues, du type magnésio-hornblende (figure 3).

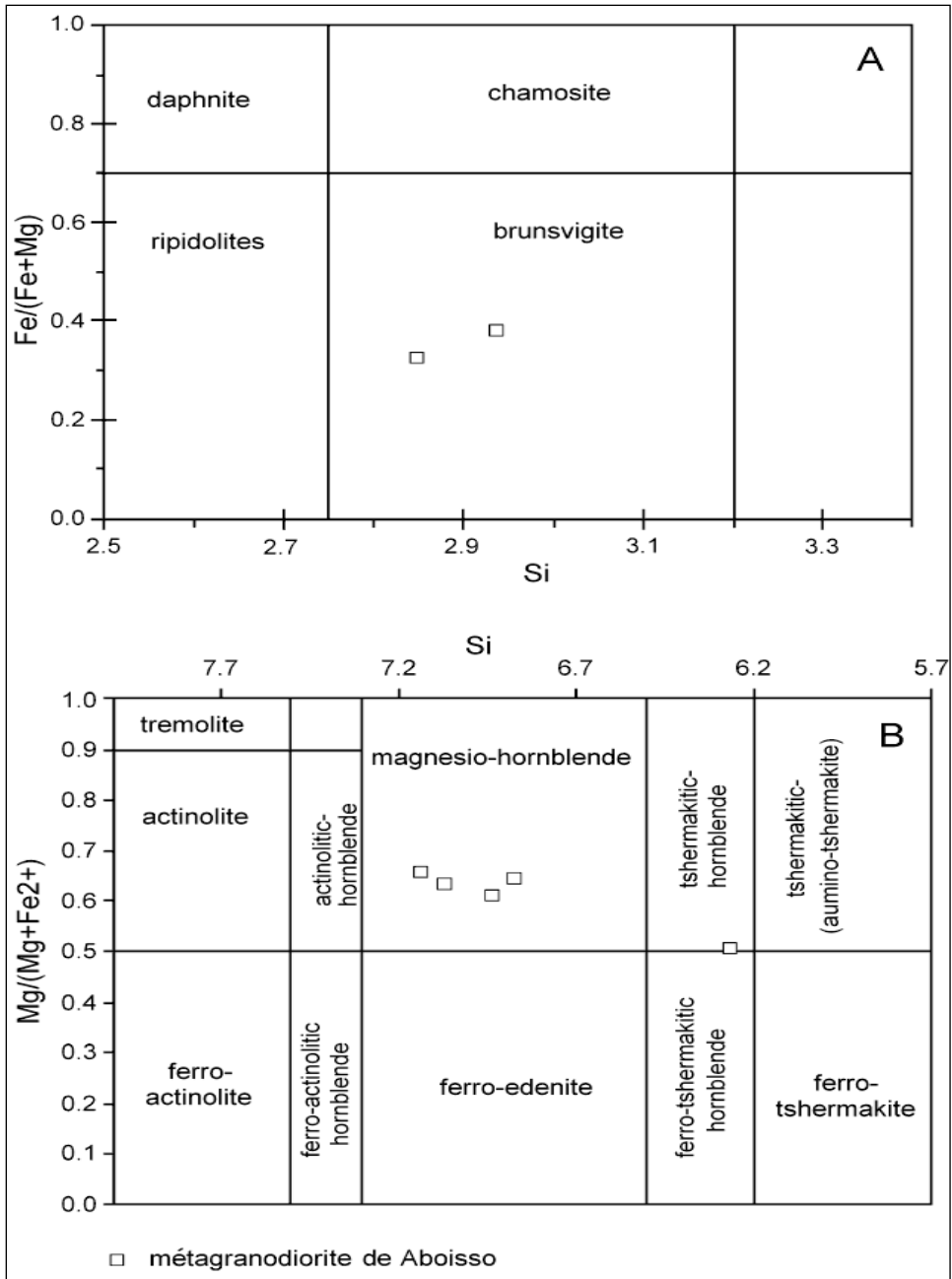


Figure 3. Diagrammes de classification des chlorites et des amphiboles

Dans le programme de simulation, l'équation du bilan de masse prise en compte s'écrit :

$$\Delta(m)_{t,k} = m_{t,k(\text{final})} - m_{t,k(\text{initial})} = \sigma \alpha_p b_{p,k} \quad [1]$$

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 . Ce qui donne sur l'ensemble de la simulation les équations suivantes :

$$\Delta(m)_{t,na} = 0,297 - 0,050 = 0,66\alpha_{\text{plagioclase}} + 0,17\alpha_{\text{amphibole}} \quad [2]$$

$$\Delta(m)_{t,ca} = 1,117 - 0,010 = 0,34\alpha_{\text{plagioclase}} + 1,70\alpha_{\text{amphibole}} \quad [3]$$

$$\Delta(m)_{t,k} = 0,086 = 0,900\alpha_{\text{biotite}} + 0,06\alpha_{\text{amphibole}} \quad [4]$$

$$\Delta(m)_{t,k} = 0,642 = 2,760\alpha_{\text{chlorite}} + 1,27\alpha_{\text{biotite}} + 2,90\alpha_{\text{amphibole}} \quad [5]$$

Les données de sortie de la simulation présentent trois cas possible de transfert de masse :

-le modèle1 propose une minéralisation de la nappe sans les chlorites ;

-le modèle 2 propose une minéralisation de la nappe avec l'ensemble des minéraux silicatés utilisés ;

-le modèle 3 propose une minéralisation sans l'amphibole. Le tableau 4 présente l'ensemble des résultats obtenus dans cette étude.

Tableau 4. Résultats de la simulation de la minéralisation des eaux des méta granodiorites

Phase	Taux de dissolution des minéraux		
	Modèle1	Modèle2	Modèle3
Plagioclase	$4,05 \cdot 10^{-5}$	$8,34 \cdot 10^{-4}$	$8,93 \cdot 10^{-5}$
Chlorite	–	$1,70 \cdot 10^{-4}$	$1,94 \cdot 10^{-4}$
Biotite	$8,29 \cdot 10^{-5}$	$9,40 \cdot 10^{-5}$	$9,56 \cdot 10^{-5}$
Amphibole	$1,89 \cdot 10^{-4}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	–
Kaolinite	$-6,03 \cdot 10^{-4}$	$-3,53 \cdot 10^{-4}$	$-3,19 \cdot 10^{-4}$
Co _{2(g)}	$5,78 \cdot 10^{-4}$	$3,14 \cdot 10^{-4}$	$2,77 \cdot 10^{-4}$

Discussion

Le temps de résidence de l'eau finale a été estimé à partir des modèles piston flow (~8000 ans) et mélange parfait (~15000 ans) (Adiaffi et al., 2009). Des trois modèles (1, 2 et 3) proposés par la simulation, il semble raisonnable de retenir le modèle 2 qui prend en compte toutes les phases solides utilisées dans les données d'entrée. Les deux autres modèles ne prenant pas en compte les chlorites (pour le 1) et les amphiboles (pour le 3), ne donnent raisonnablement pas de résultats pertinents d'autant plus que ces minéraux existent dans la roche encaissante. Vu la rareté des minéraux accessoires dans la roche encaissante, ceux-ci ne sont pas pris en compte dans la modélisation. La détermination des taux de dissolution a été faite

sans la prise en compte de la vitesse de dissolution (Appelo and Postma, 2005) qui classerait par priorité de stabilité vis-à-vis de l'eau agressive. Dans ces eaux paléoclimatiques dont le temps de résidence d'après Adiaffi et *al.* (2009) est fixé entre 8000 et 15000 ans, l'hydrolyse partielle des minéraux se fait suivant les taux :

- Dissolution de $8,34 \times 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$ de plagioclases ;
- Dissolution de $1,70 \times 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$ de chlorites ;
- Dissolution de $9,40 \times 10^{-5} \text{ mol.l}^{-1}$ de biotites ;
- Dissolution de $2,29 \times 10^{-5} \text{ mol.l}^{-1}$ d'amphibole.

L'on note une précipitation de $3,53 \times 10^{-4} \text{ mol.l}^{-1}$ de kaolinite, produit d'altération des minéraux primaires. La simulation a nécessité une pression partielle de CO_2 gazeux de $3,14 \times 10^{-4} \text{ atm}$. Cette pression partielle est conforme aux valeurs généralement trouvées dans les études antérieures des nappes côtières du sud forestier ivoirien (Oga, 1998 ; Adiaffi, 2008).

Conclusion

L'étude menée dans la région d'aboisso située au sud-est de la côte d'ivoire nous a permis de mettre en évidence des plagioclases principalement constitués d'andésine, des chlorites qui résultent de la recristallisation de la biotite durant le métamorphisme. Ces chlorites sont du type brunsvigite. Les amphiboles, majoritairement constituées de magnésio-hornblende ont été également mises en évidence. A ces minéraux utilisés pour la simulation inverse, s'ajoutent le quartz, le microcline, l'orthose, l'épidote, le sphène le zircon et les oxydes de fer qui sont accessoirement mis en évidence. La modélisation inverse des interactions entre l'eau et l'aquifère des métagranodiorites d'aboisso a été basée sur la phase solide (minéraux essentiels mis en évidence), la phase liquide (solutions initiale et finale), et la phase gazeuse constituée principalement de CO_2 gazeux produit dans la zone non saturée. Les résultats obtenus sont des ordres de grandeur des taux de dissolution dans un milieu forestier, naturel et complexe, où les eaux souterraines tirent leur acidité aux dépens du CO_2 biogénique gazeux.

Remerciements

Les données utilisées dans cette étude ont été réalisées au laboratoire umr 8148, et au service de microanalyse camparis, umr 7097. Nous disons notre reconnaissance aux responsables des laboratoires pour leur collaboration.

Références:

Adiaffi, B. 2008. Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "socle-

- bassin sédimentaire”du Sud-est de la Côte d’Ivoire. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, France.,217 p.
- Adiaffi, B., Marlin, C. Oga, Y.M.S. 2011. Évolution Amont-Aval de la Minéralisation de la Nappe Côtière du Sud-Est de la Côte d’Ivoire *European Journal of Scientific Research*, Vol.66 No.4, pp. 563-574.
- Appelo, C.A.J. and Postma, D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd adition.
- Assoma, T., Adiaffi, B., Koudou, A. 2012. Contribution of Remote Sensing, Multi-Criteria Analysis and GIS for Mapping Recharge Areas of the Coastal Aquifers in Southeast Ivory Coast. *American Journal of Scientific Research*, Issue 80, pp. 112-125.
- Charles-Dominique E. 1993 Exploitation de la lagune Aby (Côte d'Ivoire) par la pêche artisanal. Dynamique des ressources, de l'exploitation et des pêcheries. Biologie des populations et Ecologie, Université de Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc. 403 p.
- Foster, M.D. 1962. Interpretation of the composition and a classification of the chlorites. *US. Geol. Surv. Pap.* 414A.
- Claon 1993. Évaluation de l’exposition au mercure, à l’arsenic et au sélénium de l’écosystème et des populations de la lagune Aby (Côte d’Ivoire) -Impacts de l’extraction aurifère au Ghana. Mémoire de DEA Université Joseph Fourier, 55p.
- Oga, Y.M.-S. 1998 Ressources en eau souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d’Ivoire): Approches hydrochimique et isotopique. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Paris-Sud, Orsay, France, 241 p.
- Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J. 1999. User’s guide to PHREEQC (version2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemistry calculations. *U.S. Geol. Surv. Water Resour. Inv. Rep.* 99-4259, 312 pp.