



Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre ouest de la Côte d'Ivoire)

Raymond LIGBAN¹, Lanciné Droh GONE^{1*}, Bamory KAMAGATE¹,
Mahaman Bachir SALEY² et Jean BIEMI²

¹Laboratoire Géosciences et Environnement, Université d'Abobo-Adjamé, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement, Université de Cocody, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant, E-mail: dialou25_9@yahoo.fr

RESUME

L'étude des processus hydrogéochimiques des aquifères du degré carré de Daloa à travers la caractérisation des paramètres physico-chimiques et l'analyse des équilibres eau-minéraux a permis de déterminer l'origine des sources naturelles de cette région. Les eaux sont dans l'ensemble acides et faiblement minéralisées. La signature chimique des eaux de sources marquée par de faibles conductivités se rapproche nettement de celle des eaux de puits qui captent les altérites, et s'éloigne de celle des eaux de forages qui interceptent le socle fissuré. Le calcul des indices de saturation par rapport à la dolomie et la calcite, et l'utilisation du diagramme de korjinski montre que les eaux de source et de puits se caractérisent par une faible minéralisation traduisant un bref temps de séjour, contrairement aux eaux de forages plus minéralisées et donc plus anciennes. Ces caractéristiques hydrogéochimiques suggèrent que les sources naturelles du degré carré de Daloa sont des exutoires de nappes d'altérites.

© 2009 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Nappes d'altérites et de fissures, émergence, minéralisation, altération, lessivage.

INTRODUCTION

Les sources sont des émergences naturelles de nappes qui apparaissent d'une manière localisée ou diffuse à la surface du sol. Elles constituent des zones de vidange naturelle ou des exutoires ponctuels d'eaux souterraines. Celles-ci sont dans de nombreuses régions, captées à l'émergence pour l'alimentation en eau des populations (Bourlier et al., 2005; Karakaya, 2006; Omar, 2008). La part des sources dans la consommation mondiale des ressources en eau est estimée à 6,3% (Oi-Wah et Shin-Fai, 2002).

Sur la base de l'origine, des conditions d'émergence et des caractéristiques physico-

chimiques, on peut distinguer les sources thermales, les sources minérales (Canellas, 1995) et les sources thermominérales généralement rencontrées en régions volcaniques (Virgilio et Zilda, 2006). L'origine de ces émergences est souvent liée à des remontées de nappes profondes qui apparaissent par action de l'érosion entraînant l'affleurement des fractures, des flexures ou des failles à la surface du sol (Pouchan, 1995; Favara et al., 1998).

Outre ces émergences de nappes profondes, il est fait état dans la littérature (Faillat et Grillot, 1993; Bourlier et al., 2005) d'émergences correspondant aux exutoires de nappes superficielles, soit du fait de

formations imperméables sous-jacentes, soit du fait de la topographie. Ces eaux sont caractérisées par une faible minéralisation (Faillat et Grillot, 1993) et se rencontrent généralement dans les zones de socle cristallin et cristallophyllien à forte pente. On les observe en particulier dans les zones de socle granitique où les sources constituent pour la plupart, des exutoires de nappes qui suivent généralement la topographie.

Dans le degré carré de Daloa situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, les sources naturelles constituent l'un des principaux points d'accès à la ressource en eau pour les populations majoritairement rurales. Leur abondance dans cette région fait la particularité du Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Les travaux de Maillary (1964) dans le cadre de l'élaboration de la carte hydrogéologique de la Côte d'Ivoire ont permis de dénombrer 98 sources dont 86,73% sont pérennes. Hormis ce travail d'inventaire, l'origine et les caractéristiques physico-chimiques de ces sources n'ont pas encore été abordées dans la littérature. Elles restent de ce point de vue peu connues au plan hydrogéologique alors qu'elles constituent une source potentielle d'alimentation en eau des populations.

L'objectif visé dans cette étude est de mieux connaître l'origine des sources naturelles du degré carré de Daloa à partir de l'étude hydrogéochimique des réservoirs souterrains et des sources à l'émergence. Il s'agit d'une part de rechercher les caractéristiques physico-chimiques majeures des eaux de sources et d'autre part de connaître leur origine sur la base de la différenciation hydrochimique des différents aquifères. Pour atteindre cet objectif, des analyses géochimiques des roches et des analyses physico-chimiques d'eau de sources, d'eau d'altérites (puits) et d'eau de socle (forages) ont été effectuées.

MATERIEL ET METHODES

Site d'étude

Le degré carré de Daloa, avec une superficie de 10 000 km², se situe au Centre - Ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 6° et 7° Nord et les longitudes 6° et 7° Ouest (Figure 1). Le relief de la région est

caractérisé par un abaissement de direction NE-SO. Les altitudes évoluent entre 149 m et 382 m.

Le climat de la région de Daloa est de type tropical humide de transition. Il est caractérisé par une saison sèche allant d'octobre à mars et une saison des pluies ayant deux maxima, l'un en juin et l'autre en septembre. Les saisons sèches et humides alternent avec des températures variant de 24,65 °C à 27,75 °C en moyenne (Figure 2). Avec des pluies annuelles qui sont passées de 1868,5 mm en 1968 à 1120,4 mm en 2005, la région connaît une baisse pluviométrique de l'ordre de 40%.

Le substratum géologique du degré carré de Daloa est caractérisé par les formations du Précambrien moyen. Ces formations sont dominées par les granites, les migmatites et les schistes. Les principaux minéraux rencontrés dans ces roches sont le quartz, les micas, la muscovite, la biotite, les amphiboles, l'albite et la magnétite. De façon accessoire, on observe l'apatite, le microcline, le zircon et l'orthose (Papon, 1973).

L'altération de ces formations conduit à la mise en place d'un recouvrement altéritique d'épaisseur variable capté par les puits villageois. Plus en profondeur, se trouve le socle cristallin fissuré capté généralement par les forages d'hydraulique villageoise (Lasm et al., 2004).

Méthodologie

Une campagne d'échantillonnage des eaux s'est effectuée en mars 2008 ; elle a porté sur 42 sources qui s'observent pour la plupart au bas des versants, 10 puits à grand diamètre de profondeur moyenne 8 m et 14 forages (de profondeur moyenne 70 m) équipés par des pompes à motricité humaine.

La température, le pH, la conductivité électrique ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un multimètre de marque WWT82362. L'oxygène dissous et la turbidité ont également été mesurés sur le terrain respectivement avec un oxymètre Crison Oxi 330 et un turbidimètre de marque Hach 2100 P. Les ions hydrogénocarbonates ont été déterminés par titration avec l'acide chlorhydrique (ISO 9963-2/1994 (F)).

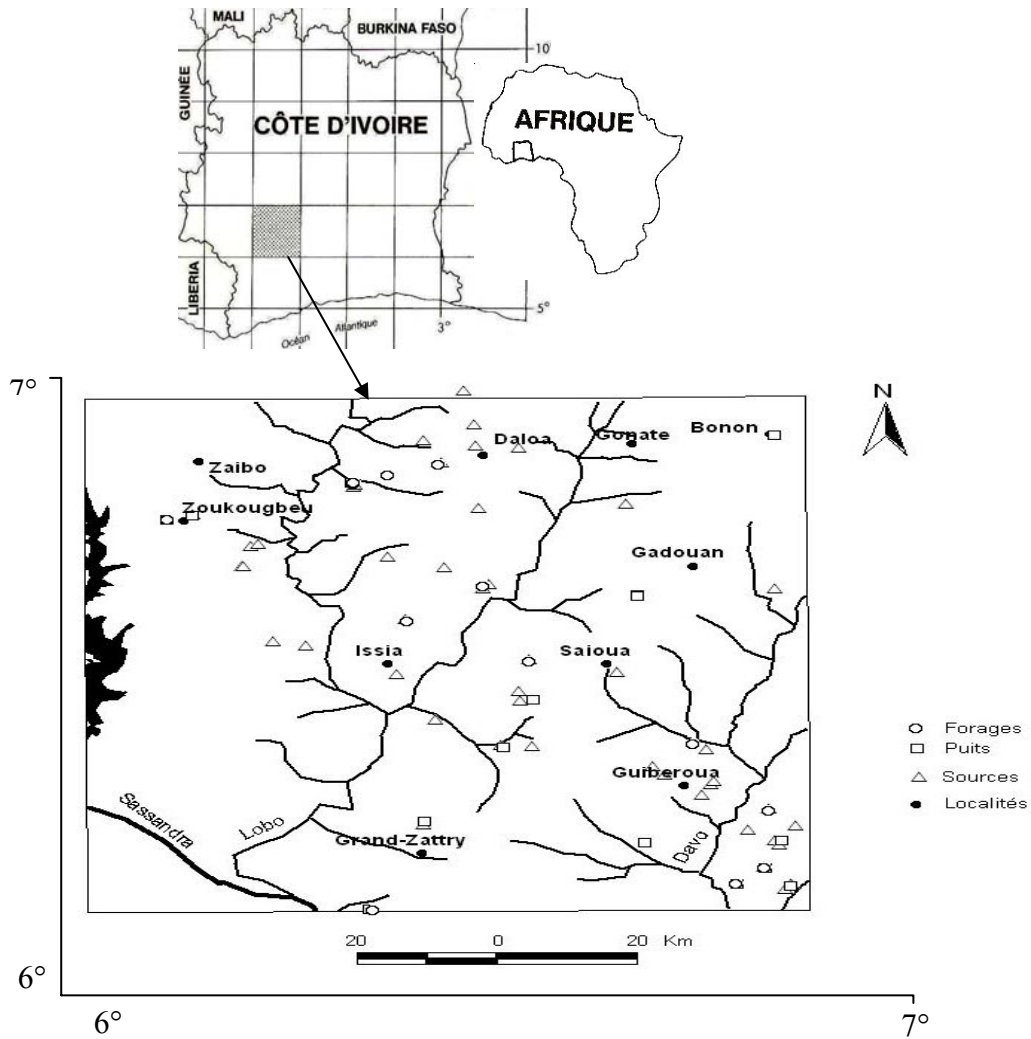


Figure 1 : Situation géographique du degré carré de Daloa et localisation des points d'échantillonnage.

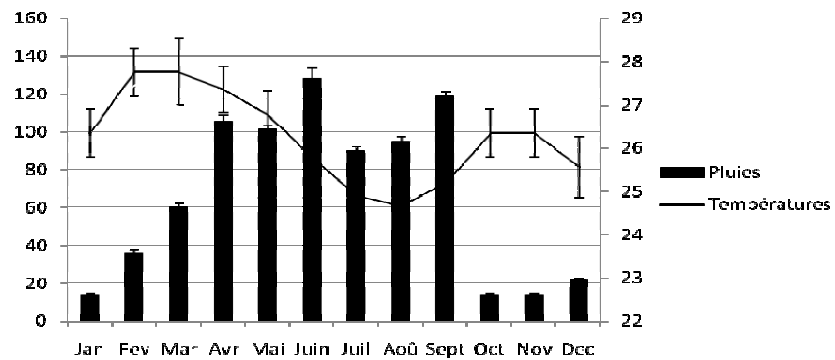


Figure 2 : Pluies moyennes et températures moyennes mensuelles (1979-2006).

Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{2+}) et anions (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) ont été analysés par chromatographie ionique après filtration des échantillons sur membrane en cellulose de porosité 0,45 μm . Les colonnes CS-12 et AS4A-SC ont été utilisées respectivement pour l'analyse des cations et des anions. Outre les analyses d'eau, des données géochimiques de roches ont été collectées à partir des bulletins d'analyses réalisées dans le cadre des missions de levés géologiques.

Les conductivités électriques et les hydrofaciès ont été utilisés pour mettre en évidence la différenciation chimique entre les eaux des différents aquifères. Ces paramètres ont déjà été utilisés comme marqueur dans des études similaires (Grillot et al., 1990; Kamagaté, 2006). Le calcul des indices de saturation par rapport à la calcite et la dolomie et l'analyse des diagrammes de stabilité eau-minéraux ont permis d'abord le fonctionnement hydrogéochimique des aquifères.

RESULTATS

Caractéristiques géochimiques des roches

Le tableau 1 montre les teneurs en éléments chimiques des différentes roches. D'une manière générale les teneurs en SiO_2 sont les plus importantes. Elles sont dans l'ensemble supérieures à 60,00%. Outre SiO_2 , la proportion en Al_2O_3 est relativement élevée dans toutes les roches avec une contribution

maximale de 18,75%. Les alcalins sont dominés par NaO avec des teneurs qui varient de 0,32% à 7,85%. En revanche, les alcalino-terreux dont CaO est l'élément dominant ont des valeurs qui restent inférieures à 5,00%. Les fortes proportions en silice et alcalins contrairement aux alcalino-terreux dont les contributions restent faibles montrent que ces roches sont acides.

Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les concentrations moyennes des paramètres physico-chimiques analysés sont reportées dans le tableau 2. Les températures enregistrées, avec des moyennes de 25,04 °C, 24,87 °C, 25,16 °C respectivement dans les sources, puits et forages, sont sensiblement similaires. Les turbidités moyennes des eaux de sources (4,85 NTU) et de puits (4,68 NTU) sont similaires et nettement plus élevées que celles des eaux de forages (0,68 NTU).

Les eaux sont dans l'ensemble acides, avec une acidité plus marquée pour les sources et les puits.

L'ensemble des eaux échantillonnées apparaît peu minéralisé avec des conductivités généralement inférieures à 165 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette faible minéralisation est plus marquée pour les eaux de sources et de puits qui présentent des conductivités moyennes respectives de $51,18 \pm 20,20 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $77,91 \pm 45,82 \mu\text{S}/\text{cm}$ contre $110,11 \pm 35,82 \mu\text{S}/\text{cm}$ dans les forages.

Tableau 1 : Teneurs (%) des éléments chimiques dans les roches.

Roches	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Granophyte	61,40	15,60	3,20	0,16	4,75	2,20	7,85	0,35
Schiste greseux	66,99	15,64	3,43	0,04	2,07	3,24	3,65	1,35
Schistes sericiteux	64,20	18,75	6,55	0,05	0,50	1,65	3,15	0,85
Micaschiste	71,30	13,50	3,90	0,05	1,55	1,05	2,45	2,20
Métarhyolite	76,90	11,58	1,96	0,18	0,12	0,67	5,70	1,80
Granodiorite	64,96	15,14	0,83	0,05	2,18	2,69	4,90	4,20
Granite à biotite	69,76	14,13	0,53	0,03	0,68	3,86	4,70	3,50
Granite à 2 micas	72,05	14,89	0,71	0,02	0,40	1,28	3,70	5,15

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques moyennes des eaux échantillonnées.

	Source (n = 42)			Puits (n = 10)			Forages (n = 14)		
	Min	Max	Moy ± σ	Min	Max	Moy ± σ	Min	Max	Moy ± σ
T (°C)	23,80	26,50	25,04 ± 0,67	24,10	26,10	24,87 ± 0,56	24,10	26,00	25,16 ± 0,62
Turb (NTU)	0,17	22,71	4,85 ± 5,57	0,26	22,35	4,68 ± 6,90	0,13	2,68	0,68 ± 0,81
pH	4,14	6,06	4,69 ± 0,37	4,60	5,80	4,75 ± 0,57	4,55	6,06	5,51 ± 0,38
Eh (mV)	37,00	155,00	121,21 ± 22,46	55,00	185,00	117,60 ± 33,73	37,00	129,00	71,43 ± 22,97
Cond (µS/cm)	21,40	103,30	51,18 ± 20,2	33,30	159,30	77,91 ± 45,82	32,00	164,90	110,11 ± 35,82
O ₂ (mg/L)	0,98	7,94	2,70 ± 1,31	1,72	4,39	3,07 ± 0,86	1,88	4,89	2,94 ± 0,91
Na ⁺ (mg/L)	1,52	14,90	6,25 ± 2,78	1,81	90,46	22,17 ± 33,18	0,41	17,48	7,54 ± 4,67
K ⁺ (mg/L)	0,29	5,95	2,08 ± 1,20	0,90	7,55	2,21 ± 2,03	0,77	4,98	2,69 ± 1,40
Ca ²⁺ (mg/L)	0,00	3,83	1,18 ± 0,89	0,00	3,10	1,36 ± 1,11	0,35	6,41	2,93 ± 1,77
Mg ²⁺ (mg/L)	0,04	4,65	0,61 ± 0,74	0,05	2,76	0,61 ± 0,82	0,24	5,34	1,92 ± 1,67
Cl ⁻ (mg/L)	2,75	17,63	6,85 ± 3,58	3,02	24,65	11,43 ± 6,05	4,13	13,31	7,43 ± 2,46
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	0,09	6,00	0,87 ± 1,08	0,06	1,36	0,98 ± 0,44	0,19	5,00	1,63 ± 1,87
Fe ²⁺ (mg/L)	0,00	6,10	0,34 ± 0,92	0,02	6,10	0,73 ± 1,89	0,01	1,53	0,28 ± 0,43
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	6,10	21,35	8,84 ± 3,42	6,10	7,93	7,02 ± 0,72	34,77	67,10	46,01 ± 9,56
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,65	18,60	5,99 ± 4,84	0,01	42,01	10,35 ± 11,70	4,83	25,25	10,38 ± 5,00
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,00	0,72	0,09 ± 0,14	0,00	0,84	0,14 ± 0,26	0,00	0,12	0,02 ± 0,03
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	0,00	2,18	0,96 ± 0,64	0,30	13,40	2,51 ± 3,88	0,00	3,15	1,74 ± 1,11

Min = minimum; Max = maximum; Moy = moyenne; σ = écart-type

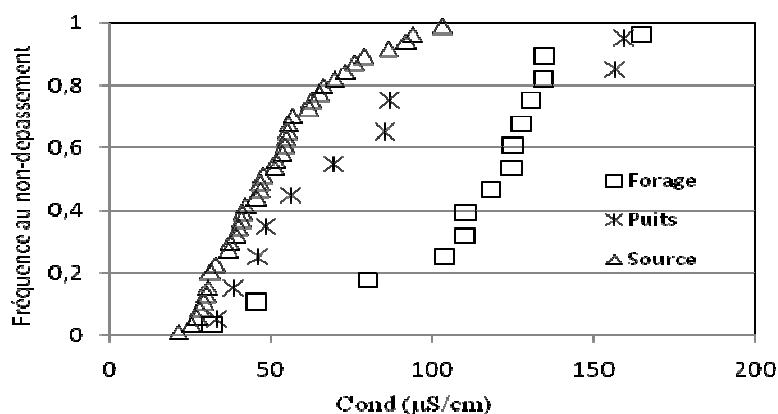


Figure 3: Fréquence au non-dépassement des conductivités des différents échantillons prélevés.

Les fréquences au non-dépassement des conductivités (Figure 3) montrent dans l'ensemble une nette distinction entre les différents types d'eaux. Elles indiquent que 50% des échantillons de sources, puits et forages ont des conductivités respectivement

inférieures à 50 µS/cm, 100 µS/cm et 150 µS/cm.

Le faciès chloruré nitraté sodi-potassique domine la majorité des eaux de sources et puits (Figure 4). En revanche dans les forages, le faciès bicarbonaté est dominant.

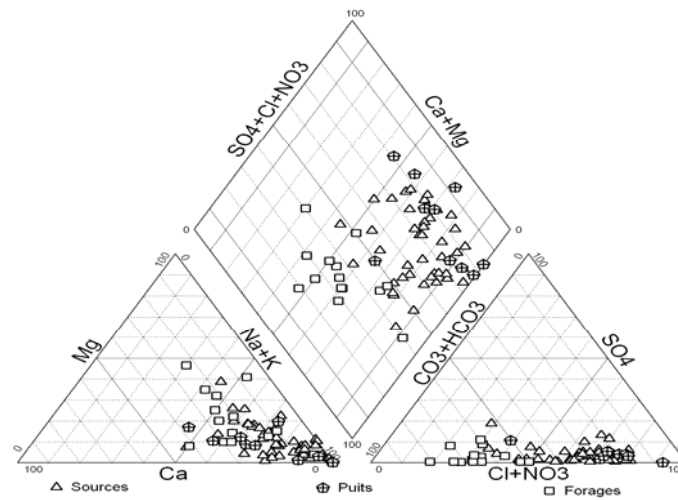


Figure 4 : Représentation des différents échantillons dans le diagramme de Piper.

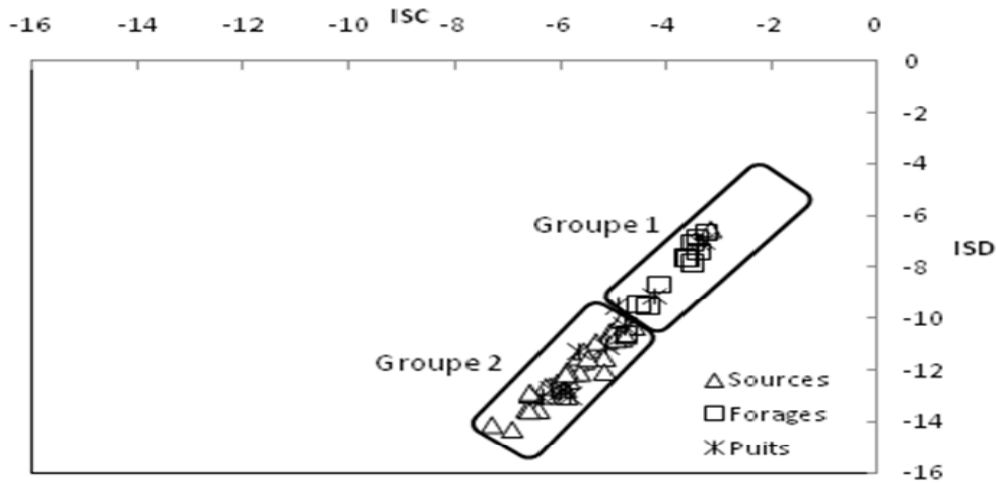


Figure 5: Evolution des échantillons dans le diagramme $ISD = f(ISC)$.

Equilibre eau-minéraux dans les aquifères

L'évolution des indices de saturation par rapport à la dolomie (ISD) en fonction des indices de saturation par rapport à la calcite (ISC) (Figure 5) montre que les eaux sont sous-saturées vis-à-vis de ces deux minéraux. Toutefois, deux groupements d'eau se dégagent et permettent une distinction entre les différents réservoirs échantillonnés.

Le groupe caractérisé par des indices de saturation relativement plus élevés est essentiellement dominé par les eaux de forage.

En revanche, le second groupe caractérisé par des indices de saturation plus faibles est composé d'eaux de puits et de sources. Cette disposition des échantillons d'eau dans le diagramme ISC – ISD indique que les eaux de sources et de puits ont un bref temps de séjour dans leur aquifère par rapport aux eaux de forage. Aussi, la position rapprochée des échantillons de sources et de puits permet-elle de supposer l'existence probable d'un échange entre ces deux systèmes.

Dans le diagramme de Korjinski, les eaux appartiennent aux domaines de stabilité de la kaolinite, de la gibbsite, et de la Ca-montmorillonite (Figure 6).

Les échantillons provenant des sources et puits se situent majoritairement dans le domaine de la kaolinite (Figure 6a). Leur état d'équilibre avec la kaolinite et la gibbsite est caractéristique de leurs faibles teneurs en silice. Ces teneurs montrent que le phénomène d'hydrolyse à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines se réalise partiellement dans ces aquifères, ce qui justifie leur faible minéralisation (faibles conductivités) résultant de leur bref temps de contact avec l'éncaissant

plus lessivé et/ou drainé. En revanche, la majorité des échantillons de forages se situent dans le domaine de stabilité de la Ca-montmorillonite ou proche de celui du Na-montmorillonite qui sont des minéraux plus solubles que la kaolinite. Dans ce cas, le phénomène d'hydrolyse des minéraux primaires enrichi les eaux en silice dissoute et en cations rapprochant la solution de l'équilibre avec ces minéraux de néoformation (montmorillonite). Les eaux de forage sont donc caractérisées par un temps de contact plus long avec l'éncaissant en accord avec les résultats précédents.

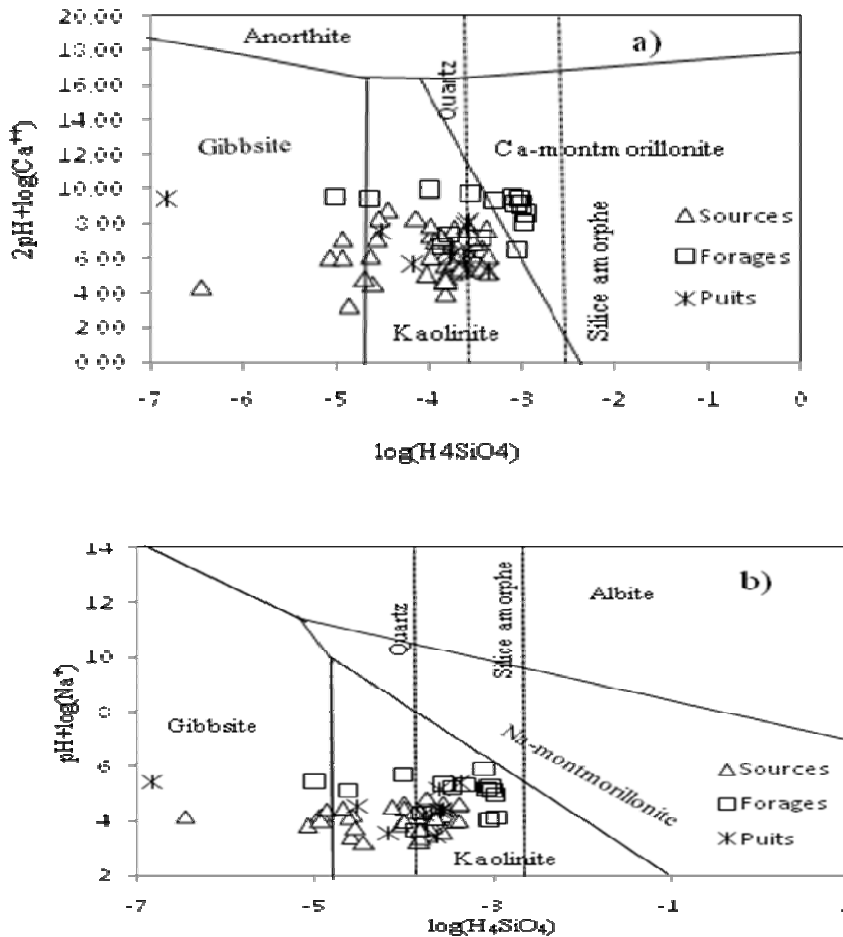


Figure 6 : Equilibre entre phase solide et phase aqueuse: domaine de stabilité du système CaO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O et Na₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O.

En plus des travaux de Maillary (1964), ces résultats constituent une étape préliminaire dans la connaissance du fonctionnement hydrogéologique des sources naturelles du degré carré de Daloa. La seconde étape de cette étude sera l'évaluation de la qualité microbiologique de ces eaux de sources consommées par les populations rurales.

REMERCIEMENTS

Nous voudrions remercier le Laboratoire Hydrosience de Montpellier (France) pour leur contribution aux analyses physico-chimiques. Nous remercions également la Société de Développement Minière de la Côte d'Ivoire (SODEMI) pour les données géochimiques mises à notre disposition.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bécher BT, Khalifa R, Houda B. 2007. Elimination de la turbidité par oxygénation et filtration successives des eaux de la station de Sfax (Sud de la Tunisie). *Rev. Sci. Eau*, **20**(4): 355-365.
- Boukari M. 1982. Contribution à l'étude hydrogéologique des régions de socle de l'Afrique intertropicale : l'hydrogéologie de la région de Dassa-zoumé (Bénin). Thèse de doctorat, Université de Dakar, Dakar, p.147.
- Bourlier JP, Lachassagne P, Desprats JF, Emmanuel G. 2005. Nouveaux éléments sur la structure et le fonctionnement hydrogéologique du plateau basaltique de l'aubrac (massif central, France). Première évaluation des potentialités en eau souterraine. *C R. Géos.*, **337**: 663-673.
- Canellas J. 1995. Au sujet de la définition et de la réglementation des eaux minérales naturelles. *Houil. Bl.*, **2**(3): 32-36.
- Dakouré D. 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudéni (Burkina Faso - Mali) - essai de modélisation. Thèse de doctorat, Université Paris VI - Pierre et Marie Curie, Paris, p.225.
- Faillat JP, Grillot C. 1993. Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissure en socle granitique. *J. Sci. Hydr.*, **38**: 3-6.
- Favara R, Grassa F, Inguaggiato S, D'Amore F. 1998. Geochemical and hydrogeological characterization of thermal springs in western Sicily, Italy. *J. Volc. Geoth. Res.*, **84**: 125-141.
- Goné DL, Savané I, Yao NA, Biémi J. 2005. Mobilité relative des cations majeurs lors de l'altération des roches et acquisition de la minéralisation des eaux souterraines dans le degré carré de Man. *Sci. Nat.*, **2**(1): 85-94.
- Goné DL, Savané I, Goblé MM. 2004. Caractéristiques physico-chimiques majeures des eaux des aquifères fissurées de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la côte d'ivoire). *Rev. ivoir. Sci. Technol.*, **5**: 117-133.
- Grillot JC, Ferry L. 1990. Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère (hautes terres de Madagascar). *Cahier ORSTOM, Section Hydrol. Cont.*, **5**(1): 3-12.
- Kamagaté B. 2006. Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant de milieu tropical de socle au Bénin : bassin versant de la donga (haute vallée de l'ouème). Thèse de doctorat. Université de Montpellier 2, Montpellier, p.320.
- Karakaya N, Karakaya MC, Nalbantçilar MT, Yavuz F. 2006. Relation between spring-water chemistry and hydrothermal alteration in the Saplica volcanic rocks sebinkarahisar (Giresun, Turkey). *J. Geoch. Expl.*, **93**(1): 35-46.
- Lasm T, Kouamé F, Oga MS, Jourda JRP, Soro N, Kouadio HB. 2004. Etude de la productivité des réservoirs fracturés des zones de socle. Cas du noyau archéen de Man-Danané (ouest de la côte d'ivoire). *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, **5**: 97-115.
- Maillary JC. 1964. Notice explicative de la carte hydrogéologique à 1/200000 de Daloa (Côte d'Ivoire). Contribution à la carte hydrogéologique de reconnaissance de la Côte d'Ivoire. BRGM-SODEMI, p.23.
- Mathieu P. 1976. Influence des apports atmosphériques et du pluviolésivage forestier sur la qualité des eaux de deux bassins versants en Côte d'Ivoire. *Cah. ORSTOM, Sér., Geol.*, **8**(1): 11-32.

- Oi-wah L, Shiu-fai L. 2002. A survey on the composition of mineral water and identification of natural mineral water. *Int. J. F. Sci. Technol.*, **37**: 309-317.
- Omar A A. 2008. Assessment of the spring water quality in the Shoubak area, Jourdan. *Environ.*, **28**: 203-215.
- Papon A. 1973. Géologie et minéralisation du sud-ouest de la côte d'ivoire. *Bulletin de la Direction des Mines et de la Géologie* n°6, Abidjan: 27.
- Pouchan P. 1995. Emergence thermominérale. *Houil. Bl.*, **2**(3): 46-50.
- Poulichet FE, Favreau G, Leduc C, Seidel JL. 2002. Major ion chemistry of groundwaters in the Continental Terminal Water table of southwestern Niger (Africa). *Appl. Geoch.*, **17**: 1343-1349.
- Schoeller H J. 1980. Influence du climat, de la température sur la teneur en HCO_3 et H_2CO_3 des eaux souterraines. *J. hydrol.*, **46**: 365-376.
- Soro N. 2002. Hydrochimie et géochimie et isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-lahou et ses environs (sud-ouest de la côte d'ivoire). Implications hydrologiques et hydrogéologiques. Thèse, de doctorat, Université de Cocody, Abidjan, p 256.
- Virgilio C, Zilda F. 2006. Hydrogeochemistry of thermal and mineral water springs of the Azores archipelago (Portugal). *J. Volc. Geoth. Res.*, **151**: 382-398.