

Caractérisation chimique des eaux de sources naturelles dans le degré carré de Daloa, au Centre-ouest de la Côte d'Ivoire

Raymond LIGBAN^{1*}, Jules Mangoua oi Mangoua¹, Zile Alex Kouadio¹, Aristide DOUAGUI²,
Auguste Kouassi KOUAME² et Droh Lanciné GONE²

¹ Université Jean Lorougnon Guedé de Daloa, Laboratoire Environnement, BP 150 Daloa, Côte d'Ivoire

² Université Nangui Abrogoua, Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE), 02 BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire

* Correspondance, courriel : rligban@gmail.com

Résumé

Les difficultés liées à l'accès, au captage et à la qualité des eaux de forages ont conduit les populations du degré carré de Daloa à s'orienter vers les sources naturelles d'eau. C'est dans ce contexte que cette étude qui porte sur la caractérisation chimique et l'analyse hydrogéochimique des eaux de sources a été menée. Il ressort que les eaux de source du degré carré de Daloa sont acides, faiblement minéralisées et fortement turbides par endroit. Le sodium et le potassium sont les cations prédominant dans ces eaux, alors que pour les anions, le nitrate, les chlorures et l'hydrogénocarbonate sont plus abondants. La signature chimique de ces eaux est marquée par des faciès chloruré-nitraté sodi-potassique et bicarbonaté sodi-potassique. Aussi, note-t-on que ces eaux acquièrent leur minéralisation par échange de bases entre Ca^{2+} et Mg^{2+} par Na^+ et K^+ , et que leur état d'équilibre avec la kaolinite indique leur bref temps de séjour et leur renouvellement rapide. Le caractère récent de ces eaux est également confirmé par les indices de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite.

Mots-clés : *sources naturelles, caractéristiques physico-chimiques, minéralisation, temps de séjour, Daloa.*

Abstract

Chemical characteristics of spring waters in the district of Daloa in western central Ivory Coast

Difficulties related to access, catchment and quality of drilling waters have led Daloa district populations to orient themselves towards natural water sources. It is in this context that this study concerns the chemical characterization and the hydrogeochemical analysis of the spring waters was carried out. It appears that the source waters of the Daloa square degree are acids, mineralization and turbid in some places. Sodium and potassium are the predominant cations in these waters, while for anions nitrate, chlorides and hydrogencarbonate are more abundant. The chemical signature of these waters is marked by the sodi-potassium chloride-nitrate hydrochloride and sodi-potassium bicarbonate. Also note that these waters acquire their mineralization by base exchange between Ca^{2+} and Mg^{2+} by Na^+ and K^+ , and that their state of equilibrium with kaolinite indicates their short residence time and their rapid renewal. The recent character of these waters is also confirmed by the saturation indices with respect to calcite and dolomite.

Keywords : *spring waters, physico-chemical characteristics, mineralization, residence-time, Daloa.*

1. Introduction

L'accès à l'eau potable constitue un besoin universel et un droit fondamental de la personne humaine. Pour assurer ce droit à sa population, l'état ivoirien a consenti de nombreux efforts depuis 1973 en vue de desservir les centres urbains, périurbains et ruraux en eaux de qualité [1, 2]. Ainsi, plus de 13.312 forages et puits sont en exploitation de nos jours [3]. Cependant, dans de nombreuses régions de la Côte d'Ivoire des difficultés demeurent quant à l'approvisionnement des populations en eau potable, notamment dans les zones rurales. L'insuffisance des ouvrages hydrauliques, l'abandon de nombreux forages du fait des pannes mécaniques, de la qualité organoleptique souvent désagréable de l'eau produite et de l'éloignement des points d'eau sont autant de difficultés rencontrées par les populations de plusieurs localités. A cela, s'ajoute la mauvaise qualité des eaux de surface nécessitant des traitements souvent très onéreux pour l'approvisionnement des grandes localités. C'est dans ce contexte que s'inscrit le degré carré de Daloa qui compte plus de 14560 villages et campements. Face aux difficultés d'accès à l'eau potable qui se pose avec acuité dans cette région, les populations ont recours aux nombreuses sources disséminées sur l'ensemble de la zone [4] dont la qualité physico-chimique reste douteuse. Ces sources qui constituent des zones de vidange naturelle et des exutoires localisés d'eaux souterraines sont pérennes pour la plupart [5]. Dans la littérature, les sources sont dans de nombreuses régions, captées à l'émergence pour l'alimentation en eau des populations [6 - 8]. Elles sont sollicitées parce que leur captage est un mode efficace et économique d'exploitation des eaux souterraines comparativement aux systèmes hydrauliques classiques (puits et forages) pour peu que les règles d'hygiène soient respectées. Les sources du degré carré de Daloa sont sans système de protection adéquat pour la plupart et les caractéristiques chimiques de ces eaux restent peu connues. Cette étude a pour objectif de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux de sources du degré carré de Daloa, d'apprécier leur mode d'acquisition de la minéralisation et le niveau de renouvellement des eaux.

2. Méthodologie

2-1. Présentation du site d'étude

Le degré carré de Daloa est localisé au centre-ouest de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 6° et 7° Nord et les longitudes 6° et 7° Ouest sur une superficie d'environ 10 000 km² (*Figure 1*). Le climat 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. Le paysage géomorphologique est marqué par la présence d'une vaste pénéplaine avec par endroit de rares hauteurs de roches basiques ou acides ayant souvent la forme d'inselberg dont l'altitude culmine de façon générale autour de 300 m. L'altitude moyenne de la région est de 200 m avec un léger abaissement de direction NE-SO. Cette zone se trouve sur le bassin versant du fleuve Sassandra et est drainée dans sa partie centrale par la rivière Lobo, et à l'extrême sud-est par la rivière Davo. D'un point de vue géologique, le degré carré de Daloa est caractérisé par des 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, 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 [9]. Au plan hydrogéologique, on y observe, à partir des logs de forage, de façon générale les aquifères du socle. Les aquifères d'altérites sont plus superficiels avec des épaisseurs variant entre 0 et 70. En profondeur, se trouve les aquifères de fissures ou de fractures qui ne peuvent être captés que par les forages d'hydraulique villageoise.

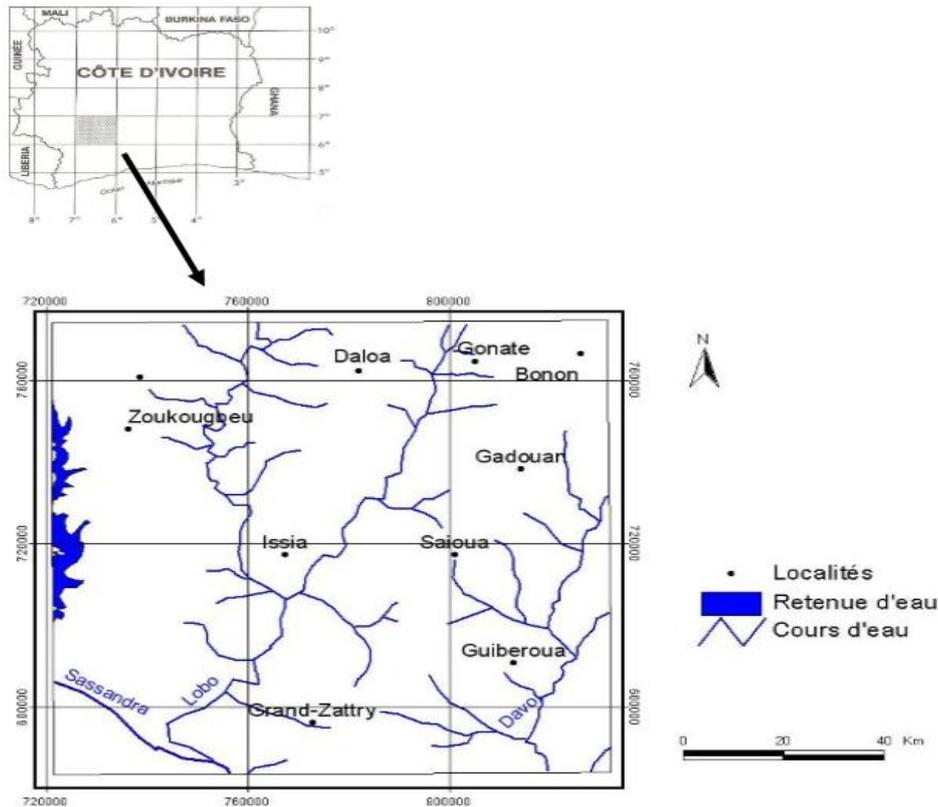


Figure 1 : Situation géographique du degré carré de Daloa

2-2. Échantillonnage et méthodes analytiques

Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées au cours de cette étude et ont porté sur 42 sources, qui s'observent pour la plupart au bas des versants. La température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous et la turbidité ont été mesurés *in situ*. Le multimètre de marque WWT82362 a été utilisé pour la mesure de ces paramètres hormis l'oxygène dissous et la turbidité mesurés 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)). Les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et Fe^{2+}) et anions (Cl^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}) ont été analysés par chromatographie ionique.

2-3. Détermination des hydrofaciès

Les hydrofaciès permettent de mettre en exergue la typologie des eaux. Nous avons utilisé le diagramme de Piper pour mettre en évidence les hydrofaciès. Ce diagramme qui se fonde sur les éléments suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , (Na^+ , K^+) pour les cations et HCO_3^- , ($\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$) et SO_4^{2-} pour les anions possède trois domaines :

- deux triangles servant respectivement à la représentation des cations et des anions ;
- un losange synthétique de deux triangles et divisé en 4 parties sert à déterminer le nom de l'hydrofaciès.

La projection dans le losange des points placés dans les triangles des anions et des cations classe la solution en faciès suivant les ions prédominants. Le logiciel Diagramme 2.0 [10] du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (France) a été utilisé pour l'application de Piper.

2-4. Acquisition de la minéralisation

- *Echange de base*

Les échanges entre alcalins et alcalino-terreux ou vis-versa dans les aquifères font partir des divers phénomènes géochimiques, mis en évidence par [11], permettant d'étudier la minéralisation des eaux souterraines. Dans le cadre ce travail, cette approche a été utilisée pour connaître la contribution des échanges de base dans le mécanisme d'acquisition de la minéralisation des eaux de sources comme dans de récents travaux [12, 13]. De façon pratique, l'influence de ces échanges dans la minéralisation des eaux se détermine par le calcul de l'Indice d'Echange de Bases (IEB). Il traduit le rapport entre ions échangés et ions de même nature primitivement existant dans la solution. Il est donné par *l'Équation* suivante :

$$IEB = \frac{[rCl^- - (rNa^+ + rK^+)]}{rCl^-} \quad (1)$$

avec, $r = \text{még/L}$

Cet indice définit le sens d'échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants. Ainsi si :

- l'I.E.B = 0 pas d'échanges ;
- l'I.E.B < 0 Ca^{2+} et Mg^{2+} sont échangés par Na^+ et K^+ ;
- l'I.E.B > 0 Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} et Mg^{2+} .

- *Hydrolyse des silicates*

L'hydrolyse des silicates est le phénomène majeur d'altération des minéraux primaires des roches et donc de minéralisation des eaux souterraines en milieu de socle. Par exemple l'albite qui est le plagioclase du pôle sodique produit de la kaolinite et libère du sodium et de la silice selon la réaction :



Dans ce travail, cette approche a été adoptée par l'analyse du diagramme de stabilité. Ce diagramme permet d'étudier les équilibres d'eaux par rapport aux différents minéraux primaires ou néoformés à partir des concentrations en silice.

2-5. Temps de séjour dans les aquifères

Le temps de séjour des eaux de source au contact des roches encaissantes a été étudié dans ce travail à partir des indices de saturation vis-à-vis de la dolomite et de la calcite qui sont formées des produits classiques de l'altération des roches en milieu cristallin tels que le Ca^{2+} et le Mg^{2+} . Le diagramme ISD / ISC en coordonnées cartésiennes avec ISC en abscisse et ISD en ordonnée donne des informations sur l'âge relatif des eaux (temps de séjour), la perméabilité des aquifères et la vitesse de circulation de l'eau. Le calcul de l'ISC permet également de déterminer le pH d'équilibre dont l'évolution en fonction du pH réel étudie l'agressivité des eaux.

3. Résultats

3-1. Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats d'analyses relatives aux caractéristiques physico-chimiques des eaux de sources du degré carré de Daloa sont consignés dans le *Tableau 1*. Les valeurs de température des eaux de sources du degré carré

de Daloa sont comprises entre 21,80°C et 28,00°C soit sur une gamme d'environ 6°C et moyenne de 24,59 ± 1,05°C. Les valeurs de turbidités sont très hétérogènes d'une source à une autre. Elles vont de 0,17 à 35,85 NTU pour une moyenne de 5,05 ± 6,40 NTU. Le pH des eaux varie de 4,14 à 7,4 avec une valeur moyenne de 4,98 ± 0,64. Les eaux plus ou moins acides (pH < 7,00) représentent environ 98 % des sources étudiées. Les eaux de source de la région de Daloa ont une alcalinité légèrement bicarbonatée et des conductivités électriques qui varient de 21,4 à 118 µS.cm⁻¹. Par ordre d'abondance croissante, on classe les cations majeurs en Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ pour presque la totalité des eaux de sources échantillonnées. Le sodium est le cation le plus abondant dans les eaux de sources de cette région. Ses concentrations varient entre 1,40 mg / L et 14,90 mg / L et demeurent largement inférieures à la valeur admise pour une eau de consommation (200 mg / L). Les concentrations en ion potassium sont faibles d'une manière générale et varient de 0,29 mg / L à 5,94 mg / L. Le magnésium présente des concentrations très faibles qui varient de 0,04 mg / L à 1,69 mg / L avec une moyenne de 0,48 ± 0,37 mg / L. Les concentrations en calcium enregistrées sont comprises entre 0,02 mg / L et 3,83 mg / L. Elles sont de ce fait suffisamment en dessous de la valeur admise pour la consommation (60 mg / L) [14]. Les ions Fe²⁺ sont présents dans les eaux de la région avec des concentrations variant de 0 mg / L à 6,1 mg / L. Sur l'ensemble des sources étudiées, nous notons que 59 % présentent des concentrations en fer supérieures à la valeur recommandées par Organisation Mondiale de la Santé qui est de 0,30 mg / L [14].

Tableau 1 : Statistique descriptive des caractéristiques physico-chimiques des eaux de source du degré carré de Daloa

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type (±)
T °C	21,8	28	24,59	1,05
Turb (NTU)	0,17	35,55	5,05	6,40
pH	4,14	7,4	4,98	0,64
Eh (mV)	-42	155	103,31	38,66
Cond (µS / cm)	21,4	118	51,41	19,86
O ₂ (mg / L)	0,98	7,94	2,50	1,17
Na ⁺ (mg / L)	1,4	14,90	6,12	2,77
K ⁺ (mg / L)	0,29	5,94	1,98	1,18
Ca ²⁺ (mg / L)	0,02	3,83	1,06	0,81
Mg ²⁺ (mg / L)	0,04	1,69	0,48	0,37
Cl ⁻ (mg / L)	2,75	17,62	6,71	3,25
SO ₄ ²⁻ (mg / L)	0	4,36	0,82	0,80
Fe ²⁺ (mg / L)	0	6,1	0,70	1,02
HCO ₃ ⁻ (mg / L)	5,4	12,4	8,61	2,68
NO ₃ ⁻ (mg / L)	0,65	18,6	7,01	4,54
NH ₄ ⁺ (mg / L)	0	0,72	0,07	0,11
PO ₄ ³⁻ (mg / L)	0	2,11	0,60	0,63
SiO ₂ (mg / L)	0,02	25,3	9,38	7,16

Les nitrates et les chlorures sont les anions prédominants dans les eaux de sources de cette région avec des concentrations comprises respectivement entre 0,65 mg / L et 18,6 mg / L, et 2,75 et 17,62 mg / L. Les concentrations des sulfates oscillent entre 0 mg / L et 4,36 mg / L alors que les phosphates vont de 0 mg / L à 2,11 mg / L. les anions ont dans l'ensemble des concentrations qui restent acceptable pour la consommation. La signature chimique globale des eaux de source du degré carré de Daloa est indiquée sur le diagramme de

piper de la **Figure 2**. Deux hydrofaciès sodi-potassiques bien distincts s'observent majoritairement sur cette figure. Il s'agit des eaux marquées par une signature chlorurée nitratée sodi-potassique et les eaux à faciès bicarbonaté sodi-potassiques. Le faciès chloruré nitraté sodi-potassique est présenté par 77 % des sources échantillonnées alors que 22 % de ces sources sont bicarbonatés. Le faciès bicarbonaté calcique représenté par un seul échantillon est un cas singulier.

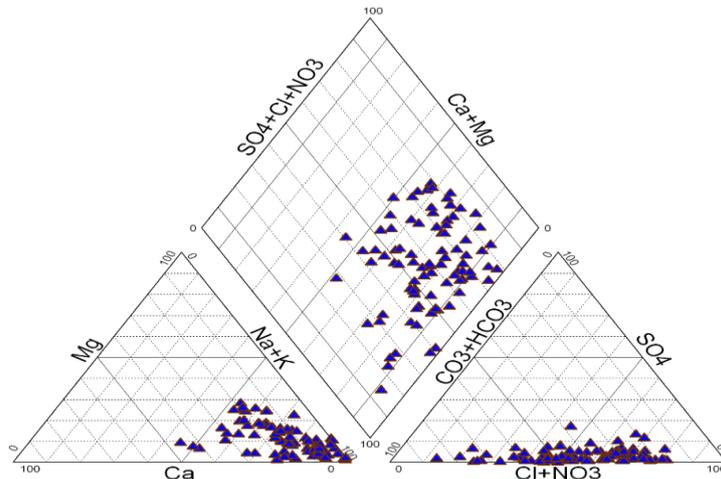


Figure 2 : Diagramme de piper des eaux de sources du degré carré de Daloa

3-2. Fonctionnement hydrogéochimique et acquisition de la minéralisation

3-2-1. Indices d'échanges de base (I.E.B)

Les indices d'échanges de bases obtenus pour les eaux échantillonnées sont reportés sur la **Figure 3**. Ces indices permettent de distinguer deux groupes d'eau de sources. Les indices positifs (I.E.B > 0) se lisent pour 9 % des sources étudiées. Ces indices traduisent des échanges de bases cationiques, notamment ceux de Na^+ et K^+ par le Ca^{2+} et Mg^{2+} au moment de l'échantillonnage. Contrairement au premier groupe, les échantillons du second groupe sont marqués par des indices négatifs. Ce groupe est composé de 91 % des échantillons. Ce qui indique des échanges entre Ca^{2+} et Mg^{2+} par Na^+ et K^+ . Les eaux échantillonnées sont dans ce cas caractéristiques d'un déficit d'échanges avec l'encaissant.

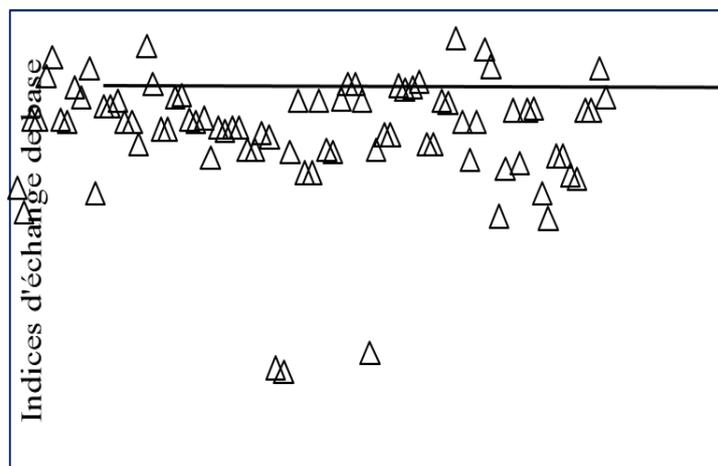


Figure 3 : Variation des indices d'échange de bases dans les eaux de sources du degré carré de Daloa

3-2-2. Hydrolyse des silicates

La projection des eaux de source dans le diagramme de Korjinski, représenté à partir du diagramme d'équilibre de l'albite et de l'anorthite qui constituent respectivement les minéraux du pôle sodique et calcique, est représentée à la **Figure 4**. Les eaux sont localisées majoritairement (90 % des sources) dans le domaine de stabilité de la kaolinite. Seuls 9 % appartiennent au domaine de la gibbsite et 1 % en stabilité vis-à-vis de la montmorillonite. Cette disposition est en relation avec la minéralisation des eaux, l'appartenance de ces eaux au domaine de la kaolinite montre qu'elles contiennent la silice en faible concentration. Ce qui indique que le phénomène d'hydrolyse à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines se réalise partiellement dans ces aquifères. Elles pourraient provenir d'aquifères assez perméables dans lesquels l'écoulement des eaux de lessivage de la silice facilite l'évolution vers la stabilité de la kaolinite. Ce qui justifie leur faible minéralisation (faibles conductivités) résultant de leur bref temps de contact avec l'encaissant.

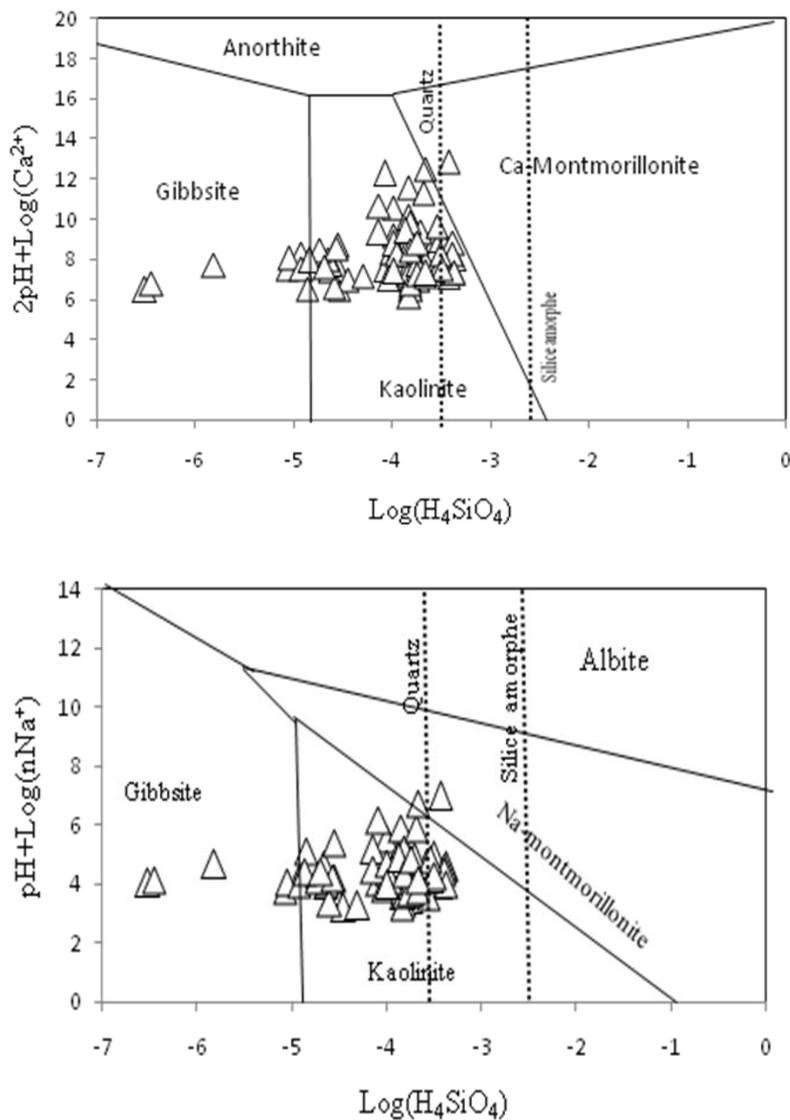


Figure 4 : Équilibre entre phase solide et phase aqueuse : domaine de stabilité du système $CaO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ et $Na_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$.

3-3. Temps de séjour et agressivité des eaux

La **Figure 5**, montre la variation d'une part des indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite et de la dolomite et d'autre part le rapport entre la saturation en dolomie (ISD) et la saturation en calcite (ISC). Les eaux de sources étudiées présentent dans l'ensemble une sous-saturation à la fois vis-à-vis de la calcite ($ISC < 0$) et de la dolomite ($ISD < 0$). Ce qui indique qu'elles ont de façon générale un bref séjour dans l'aquifère. Cependant, suivant les valeurs de l'ISD, les eaux de source peuvent être subdivisées en deux familles. Cette subdivision est subjective mais permet de différencier les eaux de sources suivant leur temps de séjour dans l'aquifère. La famille 1 est constituée des échantillons pour lesquels la valeur de l'ISD est supérieur à -10 ($ISD > -10$). Cette famille est composée de 6 échantillons, soit 7,14 %. Ces échantillons sont caractérisés par un temps de résidence plus élevé dans l'aquifère. Le renouvellement de ces eaux et leur vidange est par conséquent moins important. La famille 2, avec des valeurs de l'ISD < -10 , regroupe la quasi-totalité (92,86 %) des sources étudiées. Elles traduisent des eaux plus récentes par rapport à l'ensemble des échantillons et sont marquées de ce fait par un fort taux renouvellement. Les points représentatifs des échantillons d'eau s'alignent d'une manière générale suivant une droite de régression dont **l'Équation** est :

$$ISD = 2,089 * ISC \quad (2)$$

La saturation pour la calcite se fait plus rapidement par rapport à la dolomite. Cette rapidité de la calcite est liée à la mobilité des ions constitutifs de ces éléments. En effet, la calcite et la dolomite sont des carbonates secondaires constitués essentiellement de calcium pour le premier et de l'association calcium-magnésium pour le second. La mobilité étant plus élevée pour le calcium que le magnésium, la formation des calcites sera plus rapidement que celle de la dolomite.

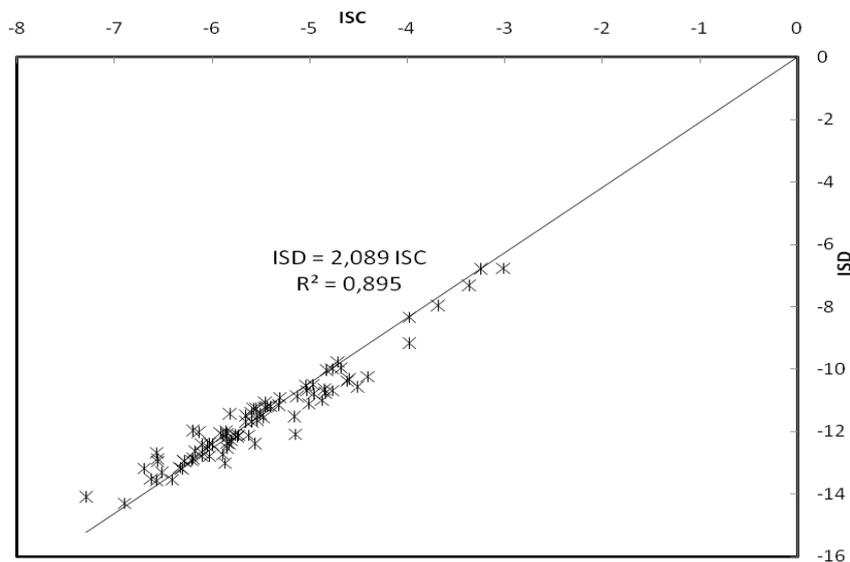


Figure 5 : Diagramme ISC / ISD des eaux de sources dans le degré carré de Daloa

Le diagramme ($pH_{\text{éq}}$ en fonction des $pH_{\text{réel}}$) de la figure 6 comprend deux domaines que sont le domaine des eaux agressives et celle des eaux incrustantes. L'observation de cette **Figure** montre que les eaux de source provenant du degré carré de Daloa appartiennent de façon globale au domaine des eaux agressives. Cette agressivité des eaux est majoritairement liée à l'acidité due au proton H^+ par rapport à l'acidité minérale libre.

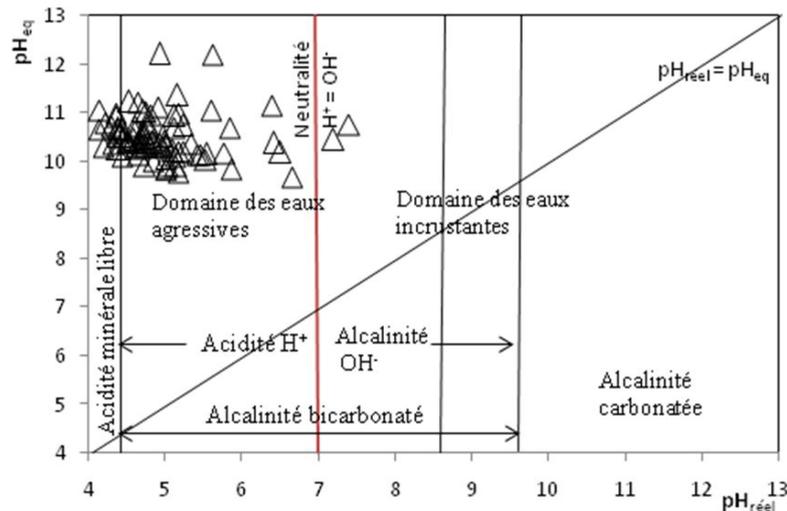


Figure 6 : Diagramme $pH_{\text{équilibre}}$ en fonction des $pH_{\text{réel}}$ des eaux de sources

4. Discussion

La température des eaux de sources du degré carré de Daloa sont similaires à celle du milieu ambiant ($25,8 \pm 3^{\circ}\text{C}$). Ces eaux ont presque dans l'ensemble des pH acides, du fait principalement de la production de CO_2 dans les couches superficielles du sol sous l'action des activités biologiques [15]. En effet, l'hydratation du CO_2 aboutit à la mise en solution des ions H^+ , responsables de l'acidité des eaux naturelles et de leur agressivité. Ceci correspond aux observations faites par les Auteurs [16 - 19] dans différentes régions de la Côte d'Ivoire. Les eaux de sources apparaissent par endroit très turbides. Cette turbidité observée traduit la position superficielle des réservoirs captées par ces sources tel qu'expliqué par [5]. La turbidité est une mesure globale qui prend en compte toutes les matières en suspension, soit colloïdales, soit insolubles, d'origine minérale ou organique [20]. Les eaux étudiées sont caractérisées par des conductivités faibles ($21,40\text{-}118 \mu\text{S} / \text{cm}$). Ces valeurs de conductivité indiquent une faible minéralisation de ces eaux. La faible minéralisation des eaux de source en zone de socle a déjà été étudiée par [21] en travaillant sur la différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissure en socle granitique. Cette faible minéralisation est à relier à la nature cristalline de l'encaissant. Ce qui se justifie par les faibles concentrations en Ca^{2+} , Mg^{2+} qui sont des produits de l'altération des roches.

Elle pourrait également être un indicateur du caractère récent des eaux et d'un temps de renouvellement faible. Les indices de saturation négatifs des eaux vis-à-vis de la calcite et de la dolomie, et l'équilibre avec la kaolinite dans les diagrammes de stabilité confirment l'existence d'un bref temps de séjour et un taux de renouvellement important. Le chimisme de ces eaux de sources est marqué par une prédominance des éléments HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , Na^+ et SiO_2 . La prédominance des ions HCO_3^- est une caractéristique des eaux souterraines dans les régions de socle en Côte d'Ivoire [17, 22]. Elle est liée au CO_2 dissous dont l'abondance dans ces eaux a déjà été signalée. Toutefois, cette abondance peut également être liée à l'altération de certains minéraux (orthose, albite, anorthite, etc.). Na^+ apparaît comme le cation qui domine la signature chimique de ces eaux. Ces éléments sont à la base du faciès bicarbonaté sodi-potassique observé. Ce faciès a déjà été obtenu en Côte d'Ivoire par de nombreux auteurs [2, 15, 16] travaillant sur l'hydrochimie des eaux souterraines. Cette présence marquée des Na^+ par rapport aux autres cations peut s'expliquer par le phénomène d'échange de bases mise en évidence par les indices d'échanges de bases négatifs déterminés. Ces résultats concordent avec ceux de [12, 13]. En effet, d'après ces auteurs, pour des indices d'échanges de

bases inférieurs à zéro ($IEB < 0$), il s'établit des échanges entre Ca^{2+} et Mg^{2+} par Na^+ et K^+ . Concernant les anions, la signature chimique est marquée par NO_3^- et Cl^- qui confèrent aux eaux le faciès chloruré nitraté sodi-potassique. L'origine de ces éléments est associée aux apports d'intrants agricoles et à la décomposition de la litière forestière pour les nitrates. Des travaux similaires réalisés par plusieurs auteurs [23, 24] ont abouti aux mêmes résultats. Pour eux, l'importance de NO_3^- dans les eaux souterraines est à relier à une origine anthropique et biogénique. Quant aux ions chlorures, ils sont dus essentiellement soit aux piégeages des apports atmosphériques dans les couches superficielles, soit à l'altération de l'apatite tel que décrit en Côte d'Ivoire par [25]. Les eaux de source du degré carré de Daloa sont alors sujettes à un phénomène de pollution même si les concentrations de ces éléments (NO_3^- , Cl^-) restent inférieures à la recommandation de l'OMS pour les eaux destinées à la consommation.

5. Conclusion

L'étude des caractéristiques chimiques des eaux de sources naturelles dans le degré carré de Daloa a permis de connaître la signature chimique de ces eaux. Elles sont pour la plupart acides, faiblement minéralisées et parfois fortement turbides. Les concentrations en nitrates, chlorures, hydrogénocarbonates et en sodium prédominent le chimisme de ces eaux de sources. Pour cela, elles sont classées majoritairement chlorurées nitratées sodi-potassiques à partir de leur projection dans le diagramme de piper. On note également qu'elles acquièrent leur minéralisation à partir des échanges de bases et sont en état d'équilibre avec la kaolinite. Le diagramme ISD / ISC et celui du pH d'équilibre en fonction du pH réel indiquent que les eaux sont agressives et ont un temps de séjour bref dans l'aquifère.

Références

- [1] - E. K. KOUADIO, I. SAVANE, T. LASM & J. BIEMI, Hydrogeology prospecting in crystalline and metamorphic area by spatial analysis of productivity potential. *European Journal of Scientific Research*, 22 (3) (2008) 373 - 390
- [2] - M. S OGA, T. LASM, K. T. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, K. F. DONGO, K. GNAMBA, Caractérisation chimique des eaux des aquifères de fracture : cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European journal*, Vol. 31, N°1 (2009) 72 - 87
- [3] - JICA, Agence Japonaise de Coopération Internationale : plan directeur de gestion Intégrée des ressources en eau en République de Côte d'Ivoire ; rapport final, Janvier N° 37 (2001) 212 p.
- [4] - J. C. MAILLARY, 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, (1964) 23 p.
- [5] - R. LIGBAN, L. D. GONE, B. KAMAGATE, B. M. SALEY et J. BIEMI, Processus hydrogéochemiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 3 (1) (2009) 38 - 47 p.
- [6] - J. P. BOURLIER, P. LACHASSAGNE, J. F. DESPRATS, G. EMMANUEL, 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 (2005) 663 - 673 p.
- [7] - N. KARAKAYA, M. C. KARAKAYA, M. T. NALBANTÇILAR, F.YAVUZ, Relation between springwater chemistry and hydrothermal alteration in the Saplica volcanic rocks sebinkarahisar (Giresun, Turkey). *J. Geoch. Expl.*, 93 (1) (2006) 35 - 46 p.

- [8] - A. A. OMAR, Assessment of the spring water quality in the Shoubak area, Jourdan. *Environ*, 28 (2008) 203 - 215 p.
- [9] - A. PAPON, Géologie et minéralisation du sud-ouest de la côte d'ivoire. Bulletin de la Direction des mines et de la géologie, N° 6 (1973) 28 p.
- [10] - SMILER, Diagramme. Logiciel libre du Laboratoire d'Hydrogéologie, Université d'Avignon, France, (2007).
- [11] - H. SCHOELLER, Les eaux souterraines. Masson et c^{ie}, Paris, (1962)
- [12] - G. F. ZHU, Y. H. SU, Q. FENG, The hydrochemical characteristics and evolution of groundwater and surface water in the heihe basin, northwest china. *Hydrogeol. J.*; (2008) 167 - 182 p.
- [13] - M. T. BOUZIANE, A. LABADI, Les eaux profondes de la région de biskra (algerie). *Eur. J. Scie Res*, Vol. 25, No 4 (2009) 526 - 537 p.
- [14] - WHO, Guidelines or Drinking-Water Quality. 4th Edition, World Health Organization, Geneva, (2011).
- [15] - K. KORTATSI, K. TAY, G. ANOMU, E. HAYFORD et A. DARTEY, Hydrogeochemical evaluation of groundwater in the lower Offin basin, Ghana; *Environ Geol 2* : Springer-Verlag, (2007) 12 p.
- [16] - M-S. Y. OGA, Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approches hydrochimiques et Isotopiques. Thèse de Doct. Univ. Paris XI, Orsay, (1998) 241 p.
- [17] - N. SORO, 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, (2002) 272 p.
- [18] - D. L. GONE, I. SAVANE, M. M. GOBLE, 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 (2004) 117 - 133 p.
- [19] - D. L. GONÉ, G. A. DOUAGUI, L. BAI, K. BAMORY, R. LIGBAN, Using Graphical and Multivariate Statistical Methods for Geochemical Assessment of Groundwater Quality in Oumé Department (Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, 5 (2014) 1255 - 1265 p.
- [20] - B. T. BECHIR, R. KHALIFA, B. HOUDA, 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) (2007) 355 - 365 p.
- [21] - J. P. FAILLAT, et C. DROGUE, Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Journal des sciences hydrologiques*, 38 (3) (1993) 215 - 229 p.
- [22] - J. BIEMI, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : hydro structurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopique des aquifères discontinus de sillons et des aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire), Thèse d'Etat, Univ. Cocody, (1992) 480 p.
- [23] - J. C. GRILLOT, L. FERRY, Approche des échanges surface-souterrain en milieu cristallin altéré aquifère (hautes terres de Madagascar). *Cahier ORSTOM, Section Hydrol. Cont.*, 5 (1) (1990) 3 - 12 p.
- [24] - D. DAKOURE, 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, (2003) 225 p.
- [25] - J. P. FAILLAT et B. BLAVOUX, Caractères hydrochimiques des nappes des roches endogènes en zone tropicale humide : l'exemple de la Côte d'Ivoire. *Journal of Africa Earth Sciences*, Vol. 9, N° 1 (1989) 31 - 40 p.