

Caractéristiques hydrogéochimiques des aquifères fissurés de la région d'Odienné, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire

Williams Francis KOUASSI¹, Oi Mangoua Jules MANGOUA^{1,2}, Kouamé Auguste KOUASSI^{1*}, Zilé Alex KOUADIO^{1,2}, Paul Henri ALLE¹ et Bi Tié Albert GOULA¹

¹ *Université Nangui Abrogoua, Laboratoire Géosciences et Environnement, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire*

² *Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa, Laboratoire Eau, Géoressource et Environnement, BP150 Daloa*

* Correspondance, courriel : kouameauguste@yahoo.fr

Résumé

L'alimentation en eau potable est de plus en plus orientée de nos jours vers la recherche des eaux souterraines captant les aquifères fissurés. Il est donc important de mieux connaître la qualité physico-chimique des eaux de ces réservoirs de façon à ce qu'elles puissent être utilisées dans des projets spécifiques d'approvisionnement en eau des populations. L'objectif de cette étude est de caractériser les spécificités hydrogéochimiques des aquifères fissurés du département d'Odienné, situé au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire. L'utilisation des cartes de Kohonen SOM (Self Organising Maps), ainsi que les méthodes statistiques descriptives ont été appliquées aux paramètres physico-chimiques de 48 forages afin de caractériser les eaux souterraines de la zone d'étude. Les résultats obtenus montrent que les eaux souterraines du département d'Odienné sont dans l'ensemble acides du fait du caractère acide des roches encaissantes ($\text{SiO}_2 > 60$), avec un pH moyen de 6,9 et une conductivité électrique moyenne de 218,45 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Aussi, note-t-on que ces eaux sont moyennement minéralisées, avec des faciès chlorurés sulfatés calciques et magnésiens à 98 % et hydrogénocarbonatés calco-magnésiens (2 %). Les principaux phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux sont l'hydrolyse acide des roches et la pollution d'origine anthropique liée aux activités agricoles qui génère les sels nutritifs.

Mots-clés : *hydrogéochimie, minéralisation, aquifères de fissures, Odienné.*

Abstract

Hydrogeochemistry characterization of fractured aquifers of Odienné area

Drinking water supply is increasingly directed towards the search for deep groundwaters catching crack aquifers. It is important to know more about the physicochemical quality of the waters in these reservoirs so that they can be used in specific water supply projects of populations. Objective is to characterize the hydrogeochemical specificities of the cracked aquifers of the department of Odienné, located in the North-West of Côte d'Ivoire. The use of SOM (Self Organizing Maps) maps, as well as descriptive statistical methods, were applied to the physicochemical parameters of 48 drillings used to characterize the groundwaters of the study area. The results obtained show that the groundwaters of Odienné are generally acidic due to the acid character of the host rocks ($\text{SiO}_2 > 60$), with an average pH of 6.9 and an average

electrical conductivity of 218.45 $\mu\text{S} / \text{Cm}$. They are moderately mineralized, with chlorinated sulphated calcic facies and magnesian (98 %) and hydrogenocarbonated calco-magnesian (2 %). The main phenomena responsible for the mineralization of waters are the acid hydrolysis of rocks and the anthropogenic pollution due to agricultural activities which are the source of nutrient salts.

Keywords : *hydrogeochemistry, mineralization, fractured aquifers, Odienné.*

1. Introduction

L'eau est un élément essentiel, indispensable à la vie, aux écosystèmes naturels et un bien à caractère socio-économique incontestable. Elle participe directement à la qualité de l'environnement [1]. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) plus de 2 millions de personnes, surtout des enfants de moins de cinq ans des pays en développement où les mesures d'hygiène et d'assainissement sont insuffisantes, meurent chaque année de maladies diarrhéiques. Et près de 90 % des maladies diarrhéiques, à l'échelle mondiale, sont imputables à la mauvaise qualité de l'eau de boisson. L'eau est devenue aujourd'hui un enjeu stratégique mondial dont la gestion doit impérativement s'intégrer dans une perspective politique de développement durable [2]. En Côte d'Ivoire, le manque d'eau s'accroît pendant les périodes sèches dans certaines localités et contraint les populations à effectuer de longues distances pour s'approvisionner aux points d'eau permanents (eau de surface), généralement de mauvaise qualité et vecteurs de nombreuses maladies telles que la dysenterie, le choléra, etc [3]. Face à cette situation, le recours aux eaux souterraines devient incontournable. En outre, l'approvisionnement des populations en eau de bonne qualité, en toutes saisons, demeure l'un des soucis majeurs des différents gouvernements de la Côte d'Ivoire [4]. Ainsi, l'approvisionnement en eau potable est de plus en plus orienté vers la recherche des eaux souterraines profondes dont la qualité répond aux normes internationales de l'OMS [5].

Dans le département d'Odienné, situé au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire, l'approvisionnement en eaux des populations rurales se fait à travers l'implantation de forages qui captent l'eau dans les aquifères fissurés [6]. Cependant, les eaux souterraines sont confrontées à un phénomène de pollution d'origine anthropique qui dégrade leur qualité. Cette pollution est due au transfert des polluants (agricole, industriel, minier, etc.) dans les nappes d'eaux souterraines. Les études menées par certains auteurs [7], révèlent ce type de pollution dans les régions d'Abidjan et d'Agboville. En effet, le développement de l'agriculture avec l'utilisation de plus en plus grandissante d'intrants agricole (engrais chimique, pesticides, etc.) dans le département d'Odienné constitue un risque potentiel de pollution des eaux souterraines de cette région. Il convient donc de mieux connaître les spécificités hydrogéochimiques de ces aquifères. Cela passe par la détermination des hydro-faciès de ces eaux, des paramètres physiques discriminants et de l'identification des phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux des forages du département d'Odienné. L'ensemble des méthodes utilisées pourront nous aider à comprendre le comportement de ces aquifères. Cette étude a pour objectif de caractériser les spécificités hydrogéochimiques des aquifères fissurés du département d'Odienné.

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la zone d'étude

Le département d'Odienné, avec une superficie de 10 343 km^2 , se situe au Nord - Ouest de la Côte d'Ivoire entre les longitudes 7° et 8°15 Ouest et les latitudes 9° et 10°25 Nord (*Figure 1*). Le climat de la région d'Odienné est de type tropical humide. Il est caractérisé par une saison sèche allant de novembre à mai et une saison des pluies allant de juin à octobre ayant un pic en août. Le substratum géologique de la région

d'Odienné est constitué par des granites à biotite d'extension régionale qui occupent 42 % de la superficie ; viennent en deuxième position les migmatites (migmatites anciennes et récentes) avec 30 % de la superficie. Les granites à biotites homogènes, les granites à deux micas et les granodiorites occupent 11% de la superficie de la région, les méta-sédiments et méta-vulcanites 5 % et le gneiss 12 %. 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 [8]. 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 [9].

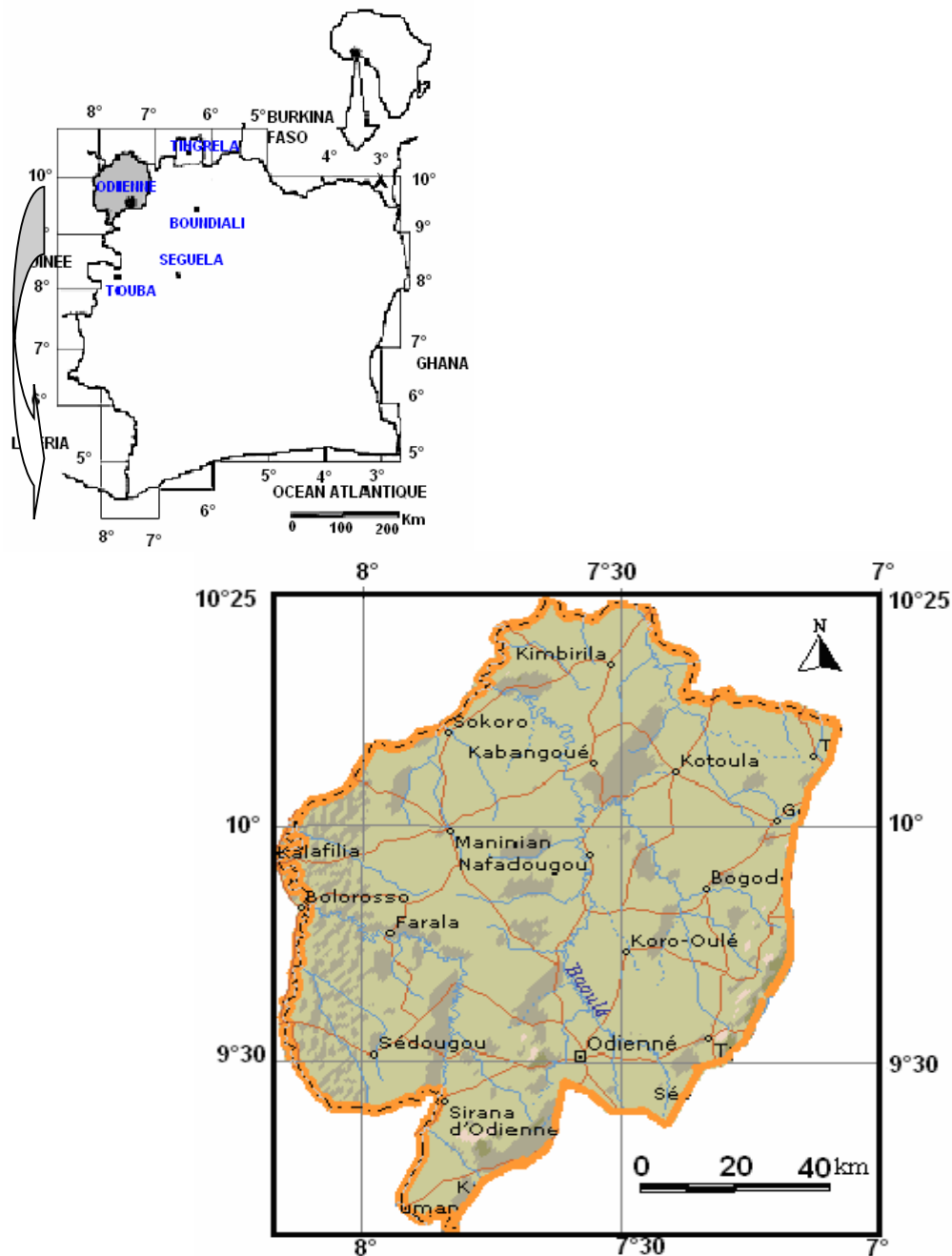


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2-2. Données techniques des forages

Les données utilisées concernent les paramètres physico-chimiques suivants : la température, le pH, la conductivité électrique (CE), le taux d'oxygène dissous (O_2), la couleur, les ions Fe^{2+} , Mn^{2+} , SiO_2 , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et PO_4^{3-} . De 1999 à 2000 un total de 48 échantillons d'eau ont été prélevés sur l'ensemble du département d'Odienné (**Figure 2**). Ces données proviennent de la Direction Territoriale de l'Hydraulique d'Odienné.

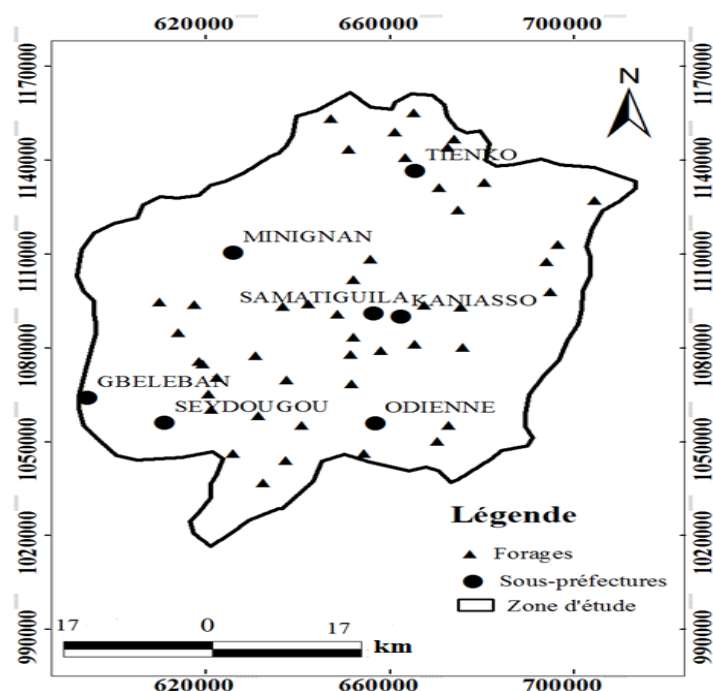


Figure 2 : Répartition des forages sélectionnés dans la zone d'étude

2-3. Méthodes d'échantillonnage et d'analyse

La caractérisation physico-chimique des eaux souterraines nécessite la quantification des différents paramètres. La température, le pH, la conductivité électrique, la turbidité et l'oxygène dissous ont été mesuré *in situ*. Les paramètres chimiques (anions et cations) ont nécessité une analyse au laboratoire : les méthodes d'analyse des paramètres chimiques sont présentées dans le **Tableau 1**. Les ions nitrate, fer, manganèse et ammonium ont été dosés par absorption moléculaire. Le dosage des ions magnésium et calcium a été effectué par émission atomique alors que la méthode titrimétrique a été utilisée pour déterminer les ions hydrogénocarbonates et chlorures.

Tableau 1 : Méthodes d'analyse des paramètres chimiques des eaux souterraines

Paramètres	Méthodes	Normes
Nitrate Phosphate	Spectrométrie d'absorption moléculaire	NFT90 012
Ammonium, Silice,	Spectrométrie d'absorption moléculaire	NFT90 015
Chlorures	Titrimétrie	NFT90014
Calcium / Magnésium	Absorption atomique	NFT90112
Fer	Spectrométrie d'absorption moléculaire	NFT 90 017
Hydrogénocarbonate	Titrimétrie	NFT90036

2-4. Méthodes de traitement des données

Les données collectées ont été traitées en utilisant une combinaison de méthodes statistiques mutli-variées et de méthodes hydrochimiques. L'étude hydrochimique des eaux a nécessité l'utilisation du logiciel DIAGRAMMES (version 2.00) pour la classification chimique des eaux à partir du diagramme de Piper. Aussi, le diagramme de Stiff a été utilisé pour connaître l'influence des roches encaissantes sur la minéralisation des eaux. En outre à partir du même logiciel, les indices de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite ont été déterminés afin d'évaluer le taux de saturation de l'eau. Les diagrammes binaires ont été réalisés à partir du logiciel Excel en vue de comprendre l'origine de certains ions. Quant à l'étude statistique basée sur la méthode SOM « Self Organizing Maps (SOM) » ou cartes de [10]. Elle a été utilisée dans ce travail pour ordonner les points d'échantillonnage en fonction des paramètres physico-chimiques d'une part et d'autre part pour observer la contribution de la conductivité électrique au processus de minéralisation des eaux de la zone d'étude. Cette méthode a fait l'objet de plusieurs travaux en Côte d'Ivoire, donc pour plus de détails nous vous renvoyons aux travaux de [11].

3. Résultats

3-1. Résultats des mesures des paramètres physico-chimiques

Les différents paramètres analysés sont comparés aux normes en vigueur. Le **Tableau 2** donne les résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques du département d'Odienné en fonction des recommandations OMS [12]. L'analyse du **Tableau 2**, nous montre que : la température, le pH, la turbidité de même que les anions (HCO_3^- , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- et PO_4^{3-}) dans leur ensemble respectent les recommandations fixées par l'OMS [12]. En somme, les ouvrages étudiés ne présentent pas de risques potentiels vis-à-vis des recommandations OMS de potabilité.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des eaux échantillonnées

Paramètres	min	max	Moy $\pm \sigma$	Directives OMS (2011)
T (°C)	25,3	32,5	29,57 $\pm$ 2,09	25°C à 30°C
pH	5,66	10,1	6,87 $\pm$ 0,43	6,5 < pH < 8,5
Turb (NTU)	0,00	1,5	0,43 $\pm$ 0,48	<5
Coul (UVC)	4	25	7,92 $\pm$ 3,92	<15
CE ($\mu\text{S} / \text{cm}$)	82	218,45	128,04 $\pm$ 3,24	
HCO_3^- (mg / L)	3,85	22,6	9,4 $\pm$ 4,56	-
Ca^{2+} (mg / L)	2	88,4	19,44 $\pm$ 14,48	-
Mg^{2+} (mg / L)	0,6	18	6,88 $\pm$ 4,27	-
Cl^- (mg / L)	2,73	190,63	43,14 $\pm$ 36,53	≤ 250
Fe^{2+} (mg / L)	0	0,12	0,017 $\pm$ 0,029	< 0,3
Mn^{2+} (mg / L)	0	0,01	0,002 $\pm$ 0,0036	< 0,05
O_2dis (mg / L)	2,24	79	22,74 $\pm$ 3,24	-
NO_3^- (mg / L)	0,01	5,01	0,34 $\pm$ 0,99	≤ 50
NH_4^+ (mg / L)	0,025	2,12	0,31 $\pm$ 0,56	$\leq 1,5$
PO_4^{3-} (mg / L)	0,2	9	0,14 $\pm$ 0,10	< 5
SiO_2 (mg / L)	0	20	6,03 $\pm$,14	-
NO_2^- (mg / L)	0	0,1	0,014 $\pm$ 0,52	≤ 3

3-2. Signature chimique des eaux

L'analyse du diagramme de Piper portant sur les compositions chimiques révèle que les eaux Chlorurées sulfatées Calco-magnésienne se rencontrent dans la quasi-totalité (98 %) des eaux souterraines du département d'Odienné à l'exception des eaux souterraines du village de Kongohila qui présentent un faciès hydrogénocarbonaté calco-magnésien (**Figure 3**).

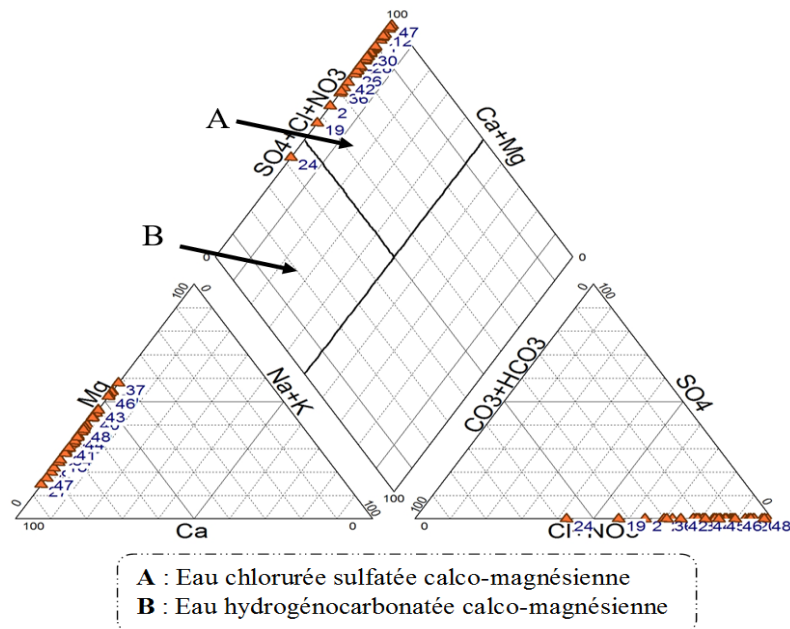


Figure 3 : Représentation des eaux souterraines de la région d'Odienné selon la nature géologique de la roche encaissante dans le diagramme de Piper

3-3. Processus de minéralisation

3-3-1. Indices de saturation vis-à-vis de la calcite et de la dolomite

En première analyse, le diagramme de l'ISD en fonction de l'ISC (**Figure 4**) montre que la presque-totalité (89,58 %) des eaux analysées présente une sous-saturation à la fois vis-à-vis de la calcite ($ISC < 0$) et de la dolomite ($ISD < 0$). Les points représentatifs des échantillons d'eau s'alignent d'une manière générale suivant une droite de régression dont l'équation :

$$ISD = 2,0022 \times ISC - 0,1119 \quad (1)$$

La répartition des valeurs des ISD permet de distinguer trois groupes ;

- Groupe 1 ($0 \leq ISD < 4$) : ces eaux représentent 10,12 % des forages (F21, F22, F23, F25 et F26) échantillonnés et sont saturées vis-à-vis de la dolomite et de la calcite. Ce sont des eaux très anciennes ayant un temps de séjour long, leur vitesse de circulation est lente ;
- Groupe 2 ($-4 < ISD < 0$) : ce groupe (F10, F15, F18, F27, F42 et F43) représente les eaux sous-saturé vis-à-vis de la calcite et de la dolomite (12,5 % des forages échantillonnés). Ces eaux sont anciennes ayant un temps de séjour moyen et une vitesse de circulation des eaux moyenne ;
- Groupe 3 ($ISD < -4$) : ce groupe représente les eaux sous-saturées vis-à-vis de la calcite et de la dolomite. Il représente également 77,38 % des forages. Ces eaux sont récentes, et ont eu un court temps de séjour dans l'aquifère avec une vitesse de circulation élevées.

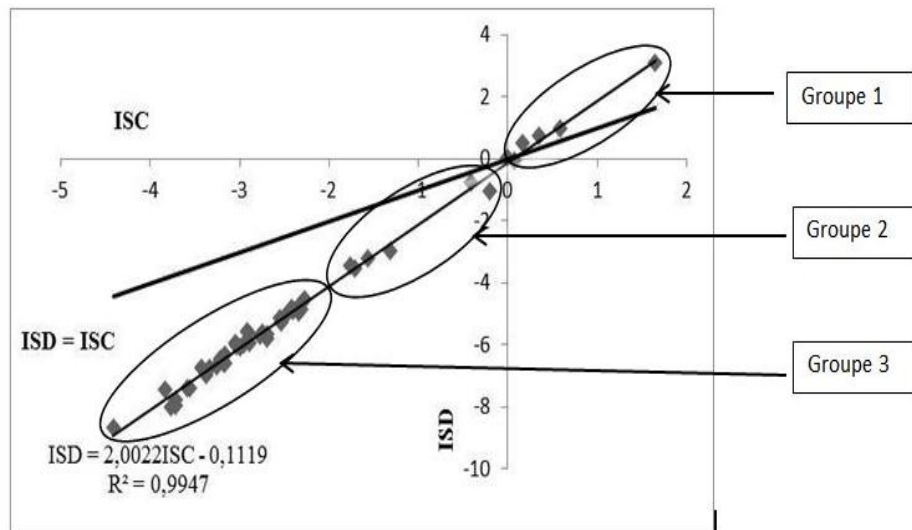


Figure 4 : Indice de saturation des points d'eau vis-à-vis de la dolomite et de la calcite

3-3-2. Diagramme calcium-hydrogénocarbonate

Sur le diagramme Ca^{2+} par rapport aux HCO_3^- , la droite de pente 1 : 1 représente la droite de dissolution de la calcite. La quasi-totalité des échantillons très peu corrélés sont au-dessous de cette droite. Le graphe nous montre un enrichissement du milieu en ions Ca^{2+} par rapport aux ions HCO_3^- . Cette abondance d'ions Ca^{2+} est probablement liée à l'hydrolyse des plagioclases calciques. Par contre, onze (11) échantillons (F1, F3, F10, F11, F12, F29, F33, F37, F45, F46 et F47) sont fortement corrélés à la droite de dissolution de la calcite (**Figure 5**).

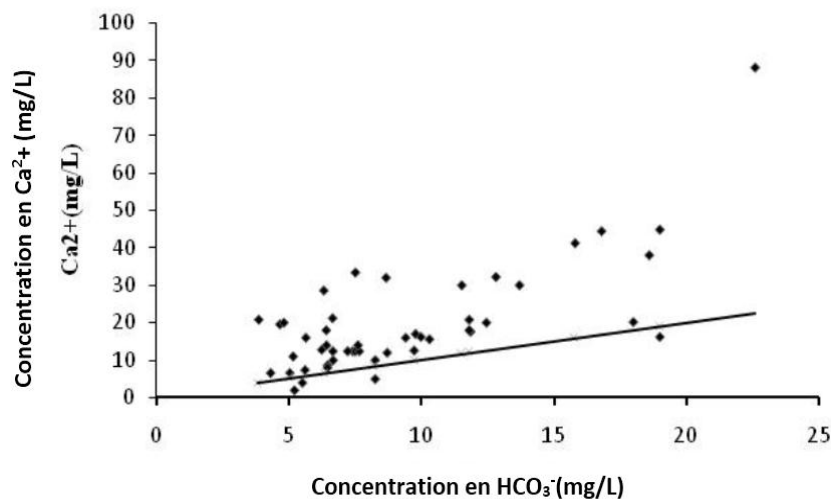


Figure 5 : Relation entre Ca^{2+} - HCO_3^-

3-3-3. Diagramme calcium-magnésium

Le diagramme Ca^{2+} versus Mg^{2+} (**Figure 6**), montre que la majorité des eaux des forages sont situés au-dessus de la droite de dissolution de la dolomite (droite de pente 1 : 1). Le Ca^{2+} est donc en excès par rapport au Mg^{2+} . Cela indique que le Ca^{2+} est d'origine lithologique, provenant donc de l'hydrolyse des silicates. En revanche, sept échantillons (F21, F23, F30, F37 et F38) présentent une forte corrélation avec la droite de dissolution de la dolomite. L'origine des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} serait sans doute liée à la dissolution de la dolomite.

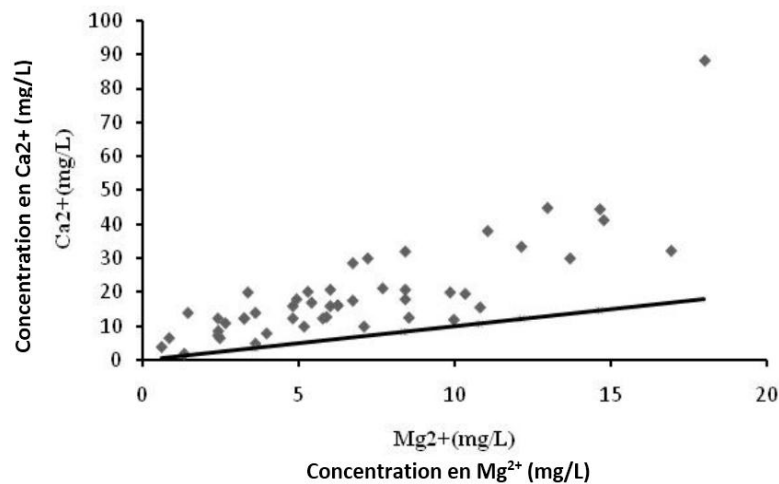


Figure 6 : Relation entre le calcium et le magnésium

3-4. Minéralisation des eaux au contact des formations de granitoïdes

Les paramètres étudiés pour la minéralisation sont variables (**Figure 7**). L'analyse de cette **Figure** a permis l'élaboration du **Tableau 3**. Les eaux de la première famille se caractérisent par des valeurs élevées de turbidité, Cl^- et PO_4^{3-} . Les familles 2 et 3 se caractérisent par des eaux acides, faiblement minéralisées et marquées par les NO_3^- , NO_2^- et NH_4^+ . On constate que les familles 4 et 5 regroupent les eaux à fort gradient de turbidité, marquée en Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 et HCO_3^- . L'abondance de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 et HCO_3^- dans les eaux familles 4 et 5 met en évidence un phénomène d'hydrolyse acide lié au contact eau-roche. Pour les eaux des familles 2 et 3 les gradients élevés de NO_3^- , NO_2^- , et NH_4^+ obtenus montrent un apport en sels nutritifs dans le milieu, tout comme la famille 1 marquée par des teneurs élevées en Cl^- , PO_4^{3-} .

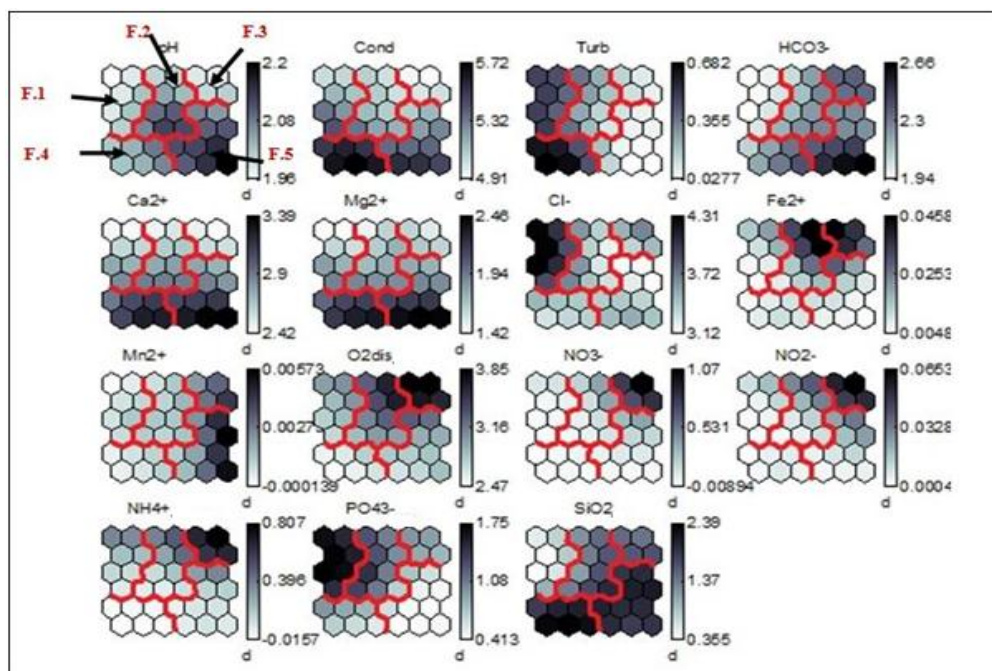


Figure 7 : Gradient de valeur de chaque paramètre sur la carte de Kohonen (d = échelle indiquant les valeurs transformées des paramètres par le logarithme; couleur foncée = valeurs fortes pour le paramètre considéré; couleur pâle = valeur faible)

Tableau 3 : Tableau des paramètres physico-chimiques discriminants

Familles	Nombre	Densité des paramètres : (+) = faible, (++) = moyen, (+++) = fort, (+++++) = très fort			
		pH	Turb	C.E	Paramètres chimiques discriminants
1	9	+	++++	+	Cl ⁻ , PO ₄ ³⁻
2	9	++	+	+	SiO ₂ , O ₂ dis, Fe ²⁺ , PO ₄ ³⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄
3	5	+	+	+	Fe ²⁺ , Mn ²⁺ , O ₂ diss, HCO ₃ ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ , SiO ₂
4	11	+	++++	++++	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , SiO ₂ , HCO ₃ ⁻
5	9	++++	++++	+	SiO ₂ , HCO ₃ ⁻ , Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺

3-5. Signature chimique des eaux au moyen du diagramme de Stiff

Sur la **(Figure 8)** nous avons 5 familles issues des réservoirs de granitoïde. On remarque que dans l'ensemble ces eaux sont chlorurées calcique. On observe également des ressemblances entre la famille 1 et 3. Cette ressemblance se voit au niveau des teneurs en chlorure élevées ($\geq 1,5$ méq / L). On note également des ressemblances chez les familles 4 et 5 qui regroupent des eaux ayant des concentrations élevées de calcium (> 1 méq / L). La famille 2 regroupe les eaux souterraines les moins minéralisées.

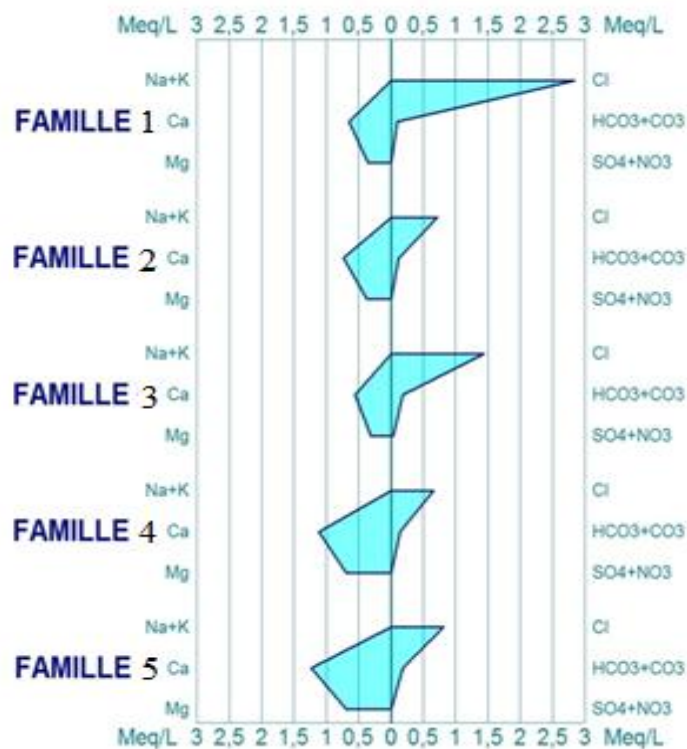


Figure 8 : Représentation graphique de la composition chimique moyenne des eaux souterraines du département d'Odienné

- Répartition spatiale des familles de kohonen sur la zone d'étude

Les eaux de la famille 2 sont les plus répandues sur la zone d'étude **(Figure 9)**. Les eaux de la famille 1 et 3 sont moins réparties et se retrouvent plus au centre de la zone d'étude. Les forages de la famille 4 se regroupent au centre et au Sud du département. Enfin les eaux de la famille 5 se retrouvent plus au Nord-Est et au Sud-Est de la zone d'étude.

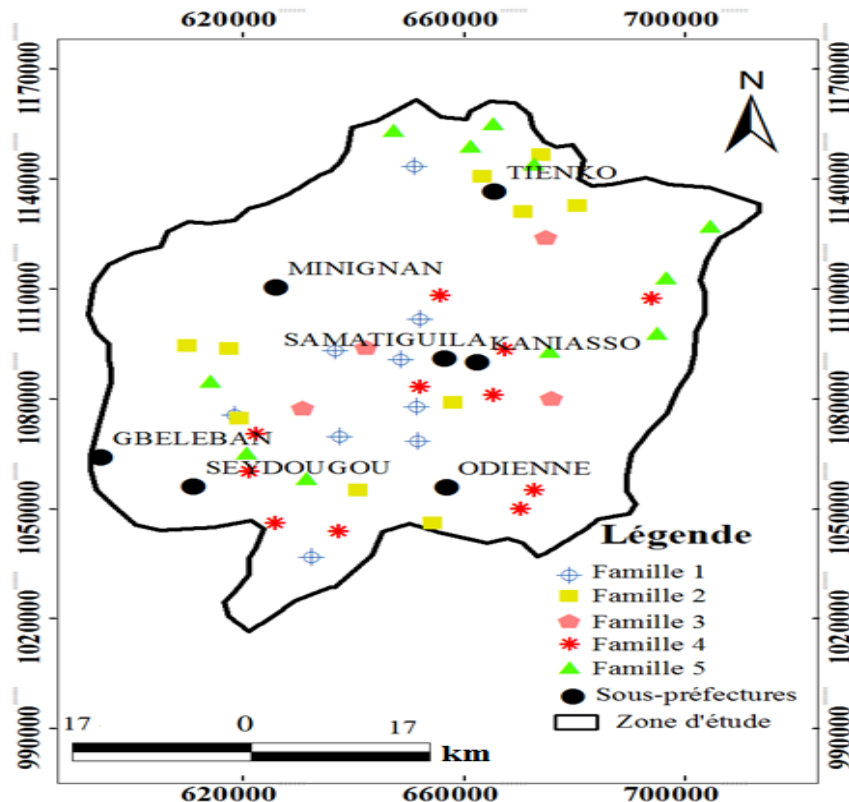


Figure 9 : Distribution spatiale des grandes familles d'eaux souterraines de la zone d'étude

4. Discussion

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région d'Odienné montrent que les eaux sont légèrement acides avec un pH moyen de $6,9 \pm 1,16$. Cette acidité est due au caractère acide des roches rencontrées dans la zone, comme démontré par certains auteurs [1, 13, 14] qui ont travaillé respectivement dans la région de Bondoukou, de Guiglo-Duekoué et de Tiassalé dans le socle de la Côte d'Ivoire. Les eaux du département d'Odienné sont moyennement minéralisées ($218,45 \pm 128,03 \mu\text{S} / \text{cm}$) avec la présence par endroit de quelques minéralisation assez élevée. C'est le cas des eaux rencontrées dans les localités telles que Niamana ($704 \mu\text{S} / \text{cm}$) et Moriblamadougou ($649 \mu\text{S} / \text{cm}$). Cette minéralisation moyenne des eaux pourrait s'expliquer par le caractère très peu soluble des roches encaissantes. En effet, ces roches ont un taux de $\text{SiO}_2 > 60 \%$, elles sont donc peu solubles et les échanges minéralogiques eau-roche sont faibles. Les résultats d'acidité et de minéralisation moyenne des eaux souterraines d'Odienné sont en accord avec ceux des travaux des références [15, 16] qui ont porté sur les eaux des aquifères fissurés dans la région de Ferké et du N'zi-Comoé. L'analyse des diagrammes binaires a donné des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux souterraines. Celle-ci révèle que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la zone. En effet, l'origine des ions est contrôlée par le temps de contact eau-roche comme l'indiquent les résultats des différentes analyses effectuées. La géologie de la zone d'étude est dominée par les formations telles que : les granites et les gneiss. L'hydrolyse des roches riches en feldspath alcalins et en plagioclases acides, explique aussi les fortes concentrations en Ca^{2+} . Ces ions sont issus de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux silicatés comme l'ont démontré ces auteurs [17]. La proportion assez importante d'anorthite dans les plagioclases, variété la plus facilement altérable justifie les fortes concentrations de Ca^{2+} [18]. L'analyse des

graphes ISD en fonction des ISC montre que les eaux sont dans l'ensemble sous-saturées (89,58 %) à saturées (10,42 %) vis-à-vis de la dolomite et de la calcite. Ces eaux sont dans l'ensemble récentes dans l'aquifère avec un faible temps de contact eau-roche. Ceci pourrait expliquer en partie la faible minéralisation de ces eaux. L'analyse par la méthode de SOM nous montre que les familles 4 et 5 renferment les eaux faiblement à fortement minéralisées. Elles sont surtout caractérisées par des teneurs élevées en SiO_2 , Mg^{2+} et Ca^{2+} . L'observation de ces minéraux dans les eaux indiquerait des phénomènes de dissolution de la dolomite par les mécanismes d'hydrolyse acide des minéraux silicatés. En effet, comme le montre les études menées par [19] dans un environnement carbonaté, l'enrichissement simultané en Ca^{2+} et l'appauvrissement en Mg^{2+} est expliqué surtout par le phénomène d'interaction eau-roche comme la dissolution ou la précipitation de la dolomite. Les familles 2 et 3 sont caractérisées par des eaux faiblement minéralisées et sont marquées par les ions Fe^{2+} , Mn^{2+} , HCO_3^- , NO_3^- , NH_4^+ , SiO_2 et $\text{O}_{2\text{diss}}$. Le marquage de ces groupes par ces ions montre que la minéralisation de ces eaux n'est pas seulement liée au phénomène d'hydrolyse des minéraux des roches mais aussi au phénomène d'oxydo-réduction, mentionné par [20]. La présence de fer et de manganèse dans les eaux pourraient aussi être attribuées aux formations géologiques de la région comme signalé par [21] sur le bassin versant de la Baya, et par [22] travaillant sur les eaux souterraines de la Martinique.

En effet, ces deux éléments en présence de l'oxygène vont être oxydés. Le fer et le manganèse confèrent à l'eau un goût désagréable, un aspect et une couleur rouge brun et marron noir. Cette situation contraint les populations rurales à se tourner vers d'autres sources d'approvisionnement. La présence du NO_2^- , NO_3^- et PO_4^{3-} indiquerait une pollution liée aux activités anthropiques dans le processus de la minéralisation des eaux. Ceci se justifierait par l'utilisation de fertilisants au cours des activités agricoles comme le souligne [23]. En outre l'insalubrité observée autour des forages dans certains villages (présence d'eaux usées, dépôts d'ordure etc.) expliquerait la présence de nitrate dans les eaux souterraines. En effet les ions nitrate issus de la décomposition des déchets organiques pourraient s'infiltrer dans la nappe et contaminer les eaux souterraines. On note également des concentrations très élevées de chlorure dans les villages de Foula (190,63 mg / L), de Feredougou (125 mg / L) et de Tougoussou (109,16 mg / L). Ces fortes teneurs en chlorure pourraient être d'origine superficielle et s'expliqueraient par une pollution fécale. L'infiltration des effluents de fosses septiques pourrait être à l'origine de cet élément. Ces résultats corroborent ceux de [24], qui montrent qu'une pollution par les effluents de fosses septiques et les réseaux d'assainissement (comme c'est le cas des puits dont le périmètre de protection n'est pas défini) sont généralement à l'origine de ces concentrations élevées en chlorure.

5. Conclusion

L'étude hydrogéochimique des eaux souterraines du département d'Odienné a permis de caractériser cette ressource naturelle. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux sont faiblement acides ($\text{pH} = 6,9$ en moyenne) et très faiblement minéralisées dans l'ensemble ($\text{C.E} = 218,45 \mu\text{s} / \text{cm}$). Les paramètres chimiques de qualité sont en dessous de la norme de potabilité de l'OMS. Les éléments métalliques en traces retrouvés dans certains forages ont des teneurs très faibles dans les eaux. Ces eaux sont majoritairement chlorurées sulfatées calco-magnésiennes et hydrogénocarbonatées calco-magnésiennes. La caractérisation hydrochimique a permis de montrer que les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la zone d'étude sont : le phénomène hydrolyse acide lié au temps de séjours des eaux en contact avec l'encaissant et l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques. Les principaux ions qui gouvernent la minéralisation des eaux sont issus de l'altération des roches, de l'hydrolyse des minéraux silicatés et des réactions d'oxydo-réductions. Les ions NO_3^- , PO_4^{3-} et Cl^- sont issus d'une pollution d'origine humaine liée aux activités anthropiques. En somme, ce travail a contribué à la compréhension globale du fonctionnement hydrogéochimique des aquifères fissurés du département d'Odienné.

Références

- [1] - K. AHOUSI, T. YOUAN, S. LOKO, M. ADJA, T. LASM et J. JOURDA, Étude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléo-protérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou. *Afrique SCIENCE*, 08 (3) (2012) 51 - 68
- [2] - P. SERVAIS, G. BILLEN, T. GARCIA-ARMISEN, I. GEORGE, A. GONCALVEZ et S. THIBERT, La contamination microbienne dans le bassin de la Seine, *Edition. Agence de l'Eau Seine Normandie*. 50 ISBN : 978-2-918251-07-1, (2009) 120 p.
- [3] - M. MANGOUA, Évaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissures du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat. Université Nangui- Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), (2013) 171 p.
- [4] - S. HAWA, Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001. Thèse de Doctorat en pharmacie, Université de Bamako (Mali), (2002) 177 p.
- [5] - J. BIEMI, Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versant subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructural, hydrodynamique et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, (1992) 479 p.
- [6] - N. COULIBALY, Conception d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans la région du Denguélé (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Abidjan (Côte d'Ivoire), (2009) 173 p.
- [7] - K. AHOUSI, N. SORO, G. SORO, M. OGA et S. ZADE, Caractérisation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Africa Geoscience Review*, 16 (3) (2009) 199 - 211
- [8] - A. PAPON, Géologie et minéralisations du Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. *Synthèse des travaux de l'opération SASCA Mémoire*, BRGM, N°80 (1973) 286 p.
- [9] - T. LASM, O. LASME, M. S. OGA, TA M. YOUAN, D. BAKA, K. F. KOUAME, K. T. YAO, Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pédro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5 (2) (2011) 642 - 662
- [10] - T. KOHONEN, Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, 43 (1982) 59 - 69
- [11] - M. J. MANGOUA, D. L. GONE, K. A. KOUASSI, K. G. N'GUETTIA, G. A. DOUAGUI, I. SAVANE and J. BIEMI, Hydro-geochemical assessment of groundwater quality in the Baya watershed (Eastern of Côte d'Ivoire), *African Journal of Agricultural Research*, 10 (49) (2015) 4477 - 4489
- [12] - OMS, Directives de qualité pour l'eau de boisson, Quatrième édition, Genève, Suisse, (2011) 307 - 447
- [13] - M. OGA, T. LASM, T. YAO, N. SORO, M. SALEY, D. KOUASSI, et F. GNAMBA, Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture : Cas de La Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, 31 (1) (2009) 72 - 87
- [14] - A. M. KOUASSI, K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, Y. A. AKE, J. BIEMI, Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 6 (1) (2012) 504 - 518
- [15] - T. LASM, K. YAO, M. OGA, K. KOUAME, P. JOURDA, K. KOUADIO et D. BAKA, Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale area (Southern Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 20 (3) (2008) 526 - 543

- [16] - A. KOUASSI, K. YAO, K. AHOUSSE, L. SEKI, N. YAO et J. BIEMI, Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical*, 4 (5) (2010) 1816 - 1838
- [17] - I. SAVANE et N. SORO, Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte : recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné. *Africa Géoscience Review*, 8 (4) (2001) 379 - 390
- [18] - J. FAILLAT et C. DROGUE, Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique, *Journal des sciences hydrologiques*, 38 (1993) 215 - 229
- [19] - C. FEHDI et E. SALAMEH, Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morcott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien)", *Revue Afrique SCIENCE*, 05(2) (2009) 217 - 231
- [20] - J. ZOBRIST, Les processus biogéochimiques qui font la qualité des eaux souterraines. *EAWAG news*, (2001) 16 - 17
- [21] - M. J. MANGOUE, S. TOURE, B. GOULA, K. YAO et J. BIEMI, Evaluation des caractéristiques des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya ou Bâ, Est de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, 16 (2010) 243 - 259
- [22] - A. BRENOT, B. VITTECOQ, P. NEGREL et V. MARDHEL, Système d'information sur les eaux souterraines de Martinique : Caractérisation physico-chimique naturelle des eaux souterraines. BRGM/RP-56266-FR *Rapport final*, (2008) 74 - 91
- [23] - E. NAMIRA, O. LAROCQUE et B. BANTON, Simulation de la contamination des eaux souterraines du delta du rio Adra et des albuferas (Almérie, Espagne). *Revue Scientifique de l'Eau*, 20 (1) (2007) 15 - 25
- [24] - I. OUATTARA, Processus hydrogéochimique en milieu soudano-tropical de socle cristallin en Côte d'Ivoire (bassin versant du Bandama). *Mémoire de DEA*, Université d'Abobo-Adjamé, (2008) 77 p.