

Étude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoproterozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou

**Kouassi Ernest AHOUSI^{1*}, Ta Marc YOUAN¹, Solange LOKO², Miessan Germain ADJA³,
Théophile LASM¹ et Jean Patrice JOURDA¹**

¹ *Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la terre et des Ressources Minières (STRM); Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

² *Université Technologique et Tertiaire Loko (UTT LOKO), Laboratoire de chimie et de Microbiologie, 05 BP 671 Abidjan 05 Côte d'Ivoire*

³ *Ecole Normale Supérieure (ENS), 08 BP 10 Abidjan 08, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, courriel : ahoussi@gmx.fr

Résumé

La région de Bondoukou, objet de cette étude est une zone soumise à un problème crucial d'approvisionnement en eau potable. Cette étude se propose d'améliorer les connaissances sur les nappes souterraines et de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région à partir d'une combinaison des méthodes hydro-chimiques et de l'Analyse en Composantes Principales. L'étude hydro-chimique montre que les eaux de la région sont agressives, avec un pH qui varie de 5,62 à 7,47, pour une moyenne de 6,23. A l'exception des localités de Motiamo (1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et Malaga (1175 $\mu\text{S}/\text{cm}$) où sont observées de fortes conductivités, ces eaux sont dans l'ensemble faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique qui varie de 134 à 1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pour une moyenne de 347,55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux souterraines de la région sont bicarbonatées calciques (93,75%) et chlorurées calciques (6,25%). On note dans l'ensemble que les eaux des aquifères de fractures sont sous-saturées en calcite et en dolomite. La minéralisation des eaux souterraines de la région a pour origine, l'altération des roches, l'hydrolyse des minéraux silicatés tels que l'anorthite dans les plagioclases et la décomposition des minéraux ferromagnésiens comme la biotite et l'amphibole. A cela s'ajoute le pluviollessivage des sols et une pollution liée aux activités anthropiques.

Mots-clés : *aquifère, Bondoukou, eaux souterraines, hydrochimie, minéralisation.*

Abstract

Hydrogeochemistry study of water from fractured aquifers of the Paeleoproterozoic in the North-East of Côte d'Ivoire: Case of the area of Bondoukou

The area of Bondoukou where the study takes place has a problem of assess of clean water. The main objective of this study is to improve the knowledge of the phenomena of mineralization of groundwater of the region of Bondoukou. The method used for this study is the hydrochemistry method and the multivariate analysis such as Principal Component Analysis. Hydrochemistry analysis show that the pH of groundwater

are acids and range from 5.62 to 7.47, with an average of 6.23. Except, Motiamo (1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and Malaga (1175 $\mu\text{S}/\text{cm}$) where high electrical conductivities are found, groundwater of the area have low electrical conductivities. Those conductivities varied from 134 to 1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$, with an average of 347.55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In this region, groundwater are bicarbonated and calcic (93.75%) and chlorured and calcic (6.25%). Water from rock aquifer are undersaturated in calcite and dolomite. The mineralisation of the water are associated with weathering, hydrolysis of silicates minerals such as anorthite and biotite. Water take also mineral element from antropogenic activities.

Keywords : *aquifer, Bondoukou, groundwater, hydrochemistry, mineralization.*

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. Par ailleurs, l'inégale répartition à travers le monde entier de ce patrimoine fragile, les différentes formes de pollution sont autant de facteurs qui concourent à la raréfaction de cette ressource naturelle dont la demande se fait toujours de plus en plus pressante. Ceci conduit à des situations de difficultés d'approvisionnement en eau potable, voire de pénuries de plus en plus fréquentes à travers le monde [1]. Malheureusement, ces nombreux efforts consentis à travers le monde restent encore insuffisants et n'enregistrent pas de résultats concrets dans le sens de la résolution du problème d'eau.

Face à cet avenir incertain en matière d'eau potable, en Afrique et particulièrement dans la sous région, différents programmes nationaux et sous-régionaux de mise en place d'un observatoire des ressources en eau visant à mieux connaître les ressources en eau et son partage sont devenus une préoccupation pour tous les acteurs du domaine de l'eau [2]. A l'instar des pays d'Afrique subsahariens, la question de l'eau potable n'est guère reluisante en Côte d'Ivoire. L'état ivoirien, conscient de ce danger, a décidé de lancer un vaste programme National de l'Hydraulique (PNH) qui a abouti en 1985 à la réalisation de plus de 12000 ouvrages de captage dans près de 8000 villages. Malheureusement, sur le territoire national, qui est occupé essentiellement par les terrains cristallins et cristallophylliens (97,5% de la superficie totale), les réserves d'eau souterraine sont généralement de faible quantité. Ces réserves sont localisées à travers les aquifères isolés de socle granitique fissuré, d'arènes sablo-argileuses et d'alluvions difficiles à gérer [3]. Ce problème d'eau est aggravé par la baisse presque régulière des précipitations durant les cinquante dernières années, les irrégularités saisonnières, l'avancée galopante de la désertification et la dégradation progressive des facteurs environnementaux.

En effet, ce sont là les principales causes de la baisse importante des ressources en eaux rendant plus critique la question de l'eau déjà préoccupante dans cette région. En plus de ces causes, il faut ajouter l'inégale répartition des ressources en eau et leur contamination par les produits polluants issus des activités humaines (agricoles, industrielles, recherches minières, etc.). En Côte d'Ivoire, les eaux souterraines sont confrontées à un phénomène de pollution d'origine anthropique qui dégrade leur qualité. Les études réalisées par [4-5], ont fait cas de cette pollution dans les régions d'Abidjan et Agboville, situées au Sud de la Côte d'Ivoire. La rareté des points d'eau potables concourt à l'utilisation par les populations rurales des plans d'eau de surface (marigots, rivières qui d'ailleurs ne sont pas pérennes) souvent situés à plusieurs kilomètres des lieux d'habitation et généralement de très mauvaise qualité, ce qui constitue un réel danger pour la santé des populations.

En zone de socle cristallin et cristallophyllien, comme c'est le cas pour la région étudiée, la solution à ces nombreux problèmes se trouve certainement dans la meilleure connaissance des aquifères de fissures. Il y a donc nécessité de mieux connaître l'origine de la minéralisation et la qualité de l'eau de ces réservoirs fracturés car leur importance hydrogéologique est considérable. Les connaissances hydro-chimiques traitées à partir des méthodes appropriées dans le domaine des sciences de l'eau pourront aider à la compréhension du comportement de ces aquifères de fractures.

2. Zone d'étude

2-1. Situation géographique

La zone d'étude se situe entre les latitudes 7°55' et 8°30' N et les longitudes 2°40' et 3°20' O (Figure 1). Cette zone couvre une superficie d'environ 4735 km² et est située Nord-Est de la Côte d'Ivoire, à 300 km au Nord-Est de la ville d'Abidjan. Elle est presque entièrement incluse dans le département de Bondoukou, avec les extrémités nord-ouest et sud-ouest appartenant respectivement aux départements de Bouna et Tanda. La zone d'étude est limitée dans sa partie sud-est par la république du Ghana. La population de la région de Bondoukou est estimée à environ 294 000 habitants au recensement de 1998. Cependant, avec l'avènement de la crise socio-politique qu'a connue la Côte d'Ivoire en 2002, notamment dans les régions du nord, avec son corollaire de déplacement massif des populations, ces estimations sont fortement perturbées à ce jour.

Plus de 70% de la population est concentrée dans la ville de Bondoukou et dans quelques grandes localités comme Bondo-Dioula, Louadi-Bâ, Yézimala. La végétation est essentiellement constituée de savane arborée et arbustive avec des forêts galeries. On rencontre des îlots forestiers sur les plateaux et des forêts galeries liées au réseau hydrographique dans la partie ouest de la zone d'étude. Dans la partie est, on trouve également des forêts galeries qui suivent les cours d'eau, mais surtout de vastes étendues de savanes arborées. Cette végétation est souvent dégradée par l'activité anthropique (agriculture, exploitation forestière, etc.) et les feux de brousse. La zone d'étude présente un réseau hydrographique très dense, avec une longueur totale des drains estimée à 5334 km, soit une densité de drainage de 1,13 km/km² [6]. La région de Bondoukou est soumise au climat baouléen où l'harmattan se manifeste par un air très sec et des températures souvent très basses faisant suite à des périodes de grandes chaleurs, dans un air où le degré hygrométrique est très bas.

La pluviométrie pour la chronique 1936–2000 montre que dans cette région quatre (4) saisons sont présentes. Ces différentes saisons se répartissent comme suit. D'avril à juin, il y a la grande saison des pluies, avec le maximum de pluies en mai (159 mm). A partir de juillet, on a la petite saison sèche, on assiste à une baisse des précipitations pour atteindre le niveau de 76 mm au mois d'août. De septembre à octobre, les précipitations remontent, avec un pic (177 mm) au mois de septembre. Cette période correspond à la petite saison des pluies. De novembre à mars, il y a la grande saison sèche caractérisée par une très forte baisse de la pluviosité. Les mois de décembre et janvier constituent les mois les plus « secs », avec respectivement 15 mm et 11 mm de pluies. Les amplitudes pluviométriques annuelles oscillent entre 800 et 1400 mm, avec une valeur moyenne annuelle de 1119 mm. Les températures moyennes mensuelles pour la chronique 1936 - 2000 varient de 24°C à 29°C, soit une amplitude thermique de 5°C. Les mois de février, mars et avril sont les plus chauds, avec des températures moyennes supérieures à 27°C.

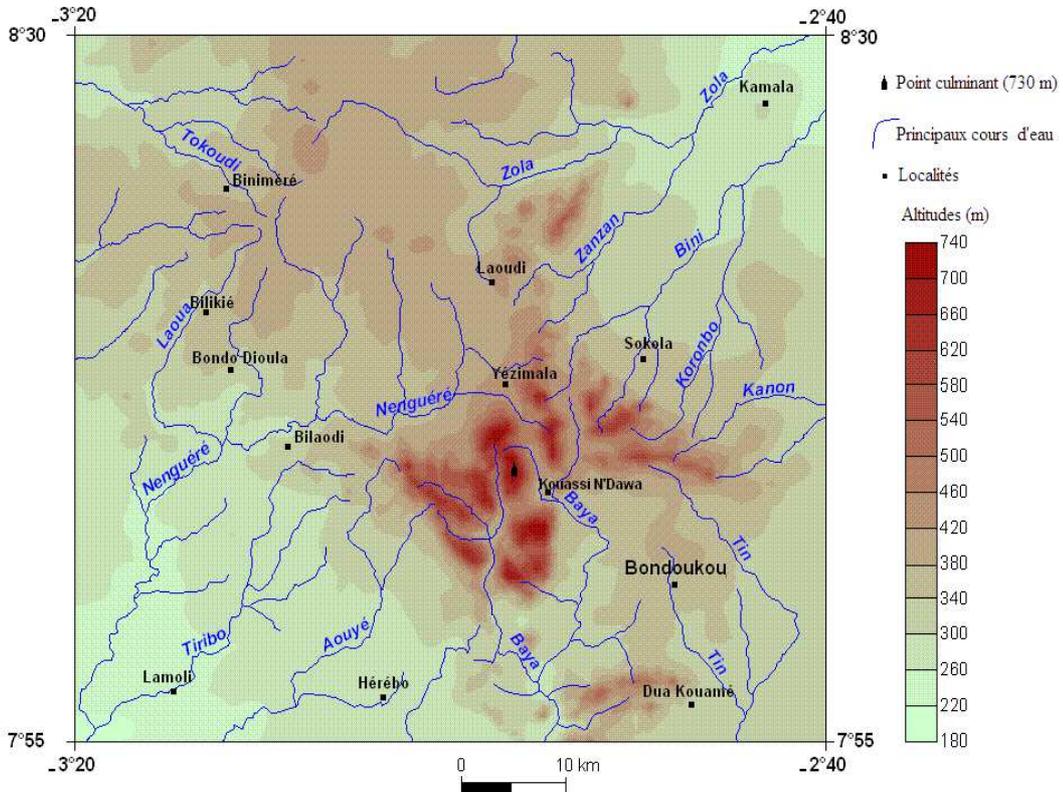
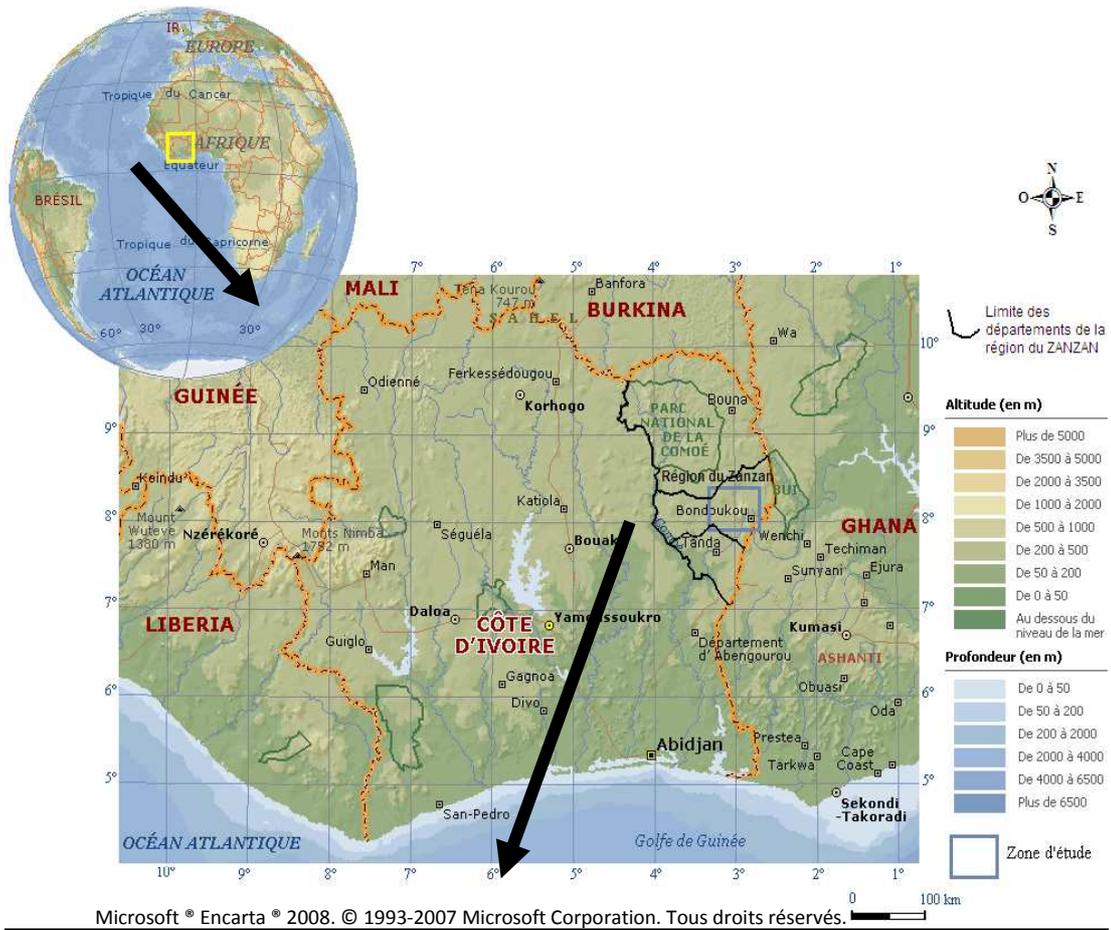


Figure 1 : Situation géographique et aperçu physiographique de la région de Bondoukou

2-2. Contexte géologique de la région de Bondoukou

Situées dans le domaine paléo-protérozoïque, les formations géologiques de la région de Bondoukou ont été structurées lors de l'orogénèse éburnéenne. L'éventail pétrographique très ouvert des formations géologiques de la région de Bondoukou et la complexité des phénomènes structuraux rendent difficile son étude. Du point de vue lithologique, la zone d'étude est recouverte par un ensemble complexe de formations géologiques (*Figure 2*). On y distingue deux grands domaines distincts que sont : le domaine quaternaire (Holocène) et le domaine paléo-protérozoïque.

2-2-1. Domaine quaternaire (Holocène)

Les formations du domaine quaternaire sont les plus récentes de la région de Bondoukou et se sont déposées précisément à Holocène [7]. Elles proviennent de la désagrégation des roches préexistantes. On en distingue deux types : les vases et sables lessivés et les cuirasse latéritique.

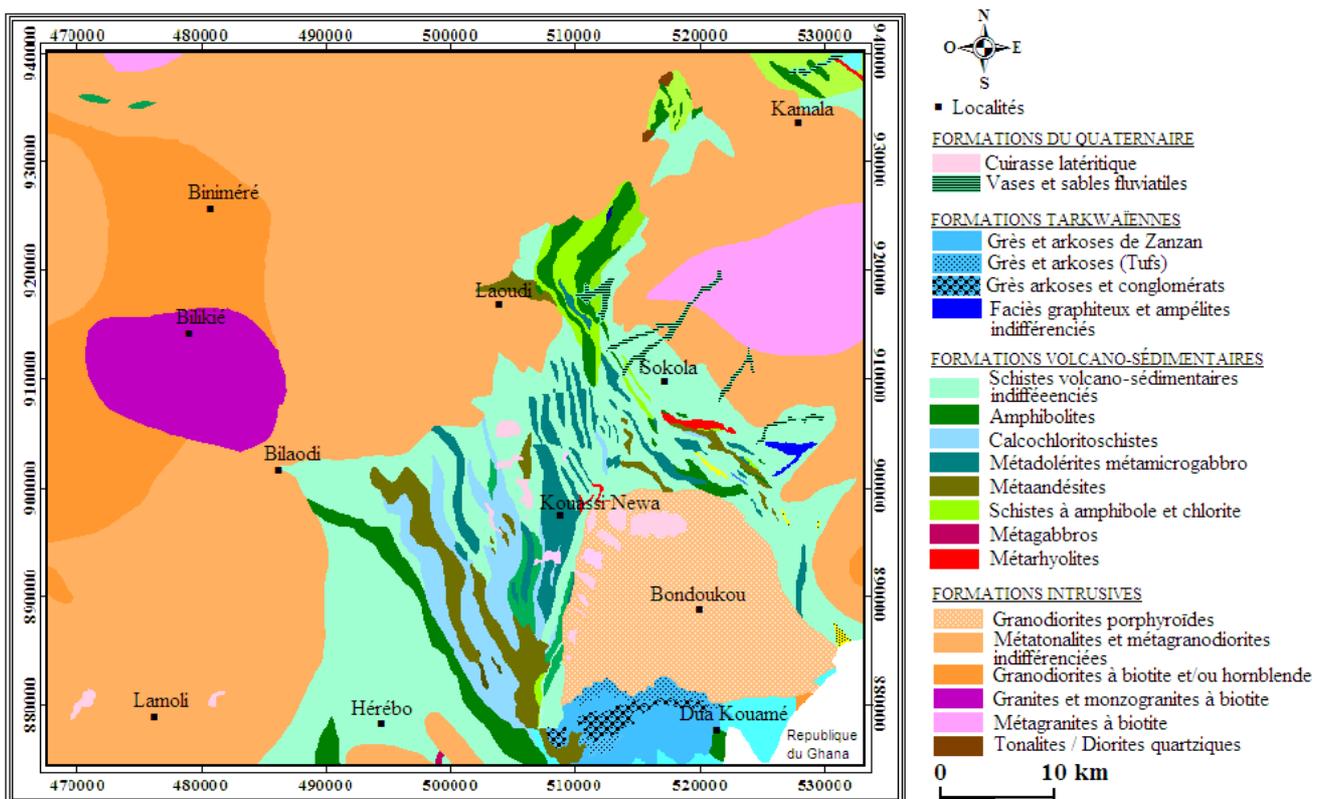


Figure 2 : Carte géologique de la zone d'étude

2-2-2. Domaine paléo-protérozoïque

Ces formations occupent pratiquement toute la surface de la zone d'étude et peuvent être subdivisées en trois ensembles que sont : l'ensemble tarkwaïen, l'ensemble volcanique et sédimentaire et l'ensemble intrusif. L'ensemble tarkwaïen de la région de Bondoukou est constitué essentiellement de conglomérat et de cinérite. La présence de grès, de galets de quartz anguleux, de galets de jaspes et d'andésites est également signalée par [8]. L'ensemble volcanique et sédimentaire affleure dans les régions du Sud et Centre de la zone d'étude, avec des prolongements vers l'Est et le Nord-Est. Les schistes volcano-sédimentaires indifférenciés sont les plus rencontrés dans cet ensemble et constituent le grand massif à l'intérieur duquel affleure toute une séquence de lentilles hectométriques volcaniques et sédimentaires

inter-digitées. Pour les ensembles volcaniques, les dolérites et micro-gabbros qui sont des roches massives, à aspect isotrope ont une texture microgrenue et porphyrique à plagioclase ou ferromagnésiens. Ils affleurent en plusieurs endroits au sein des formations de schistes volcano-sédimentaires. Les schistes à amphibole et chlorite au Nord de la granodiorite de Bondoukou présentent un aspect conglomératique, avec des éléments béchiques ou anguleux [7]. Sur les flancs nord et ouest de la granodiorite de Bondoukou affleurent des méta-andésites se présentant sous forme de coulées et à texture microlithique porphyrique. A côté de ces formations qui occupent relativement des surfaces assez grandes, d'autres formations font leurs apparitions sur de très petites surfaces au Nord de la granodiorite de Bondoukou. Il s'agit des méta-gabbros, des métarhyolites à aspect vitreux pouvant se débiter en esquilles très tranchantes. L'ensemble sédimentaire est représenté par les calchloritoschistes qui font leur apparition à l'Ouest de la granodiorite de Bondoukou. Il présente un aspect conglomératique avec des éléments plus ou moins arrondis et grossiers. De petites lenticules de schistes quartzeux affleurent sur le flanc nord de la granodiorite de Bondoukou. Les complexes volcano-sédimentaires se marquent bien dans la morphologie et sont présents dans tous les intra-géosynclinaux. Les ensembles intrusifs regroupent les granites syntectoniques et les granites intrusifs post-tectoniques [9].

2-3. Contexte hydrogéologique de la zone d'étude

Lorsque la forte fracturation de la masse rocheuse d'une zone donnée est accompagnée de certaines conditions, elle peut constituer un aquifère pouvant fournir d'excellents débits de façon pérenne. Les fractures pénétratives ouvertes constituent de véritables embrasures pour l'infiltration des eaux de pluies et contribuent à l'augmentation de la transmissivité et du coefficient d'emmagasinement des aquifères de fissures. Elles participent à la désagrégation et la fragmentation de la roche. Les plantes sarcicoles jouent un rôle très important dans la déstabilisation progressive de la roche. En effet, la végétation en général colonise les diaclases et les fissures, formées sous l'effet du climat ou sous l'action de l'homme. Au cours de leur croissance, les racines vont alors jouer un rôle mécanique par écartement des parois fracturées, et un rôle biochimique par pompage, sécrétion de sève ou rétention d'humidité en détruisant la roche (Figure 3). Souvent, des fractures peuvent être occupées sur plusieurs dizaines voire des centaines de kilomètres par des plantes. Leur alignement épouse alors la direction des fractures. Leurs racines puisent l'eau contenue dans ces fractures. Tout le réseau de fractures formé par les fractures d'origine tectonique et mécanique prédispose les roches à une altération rapide.

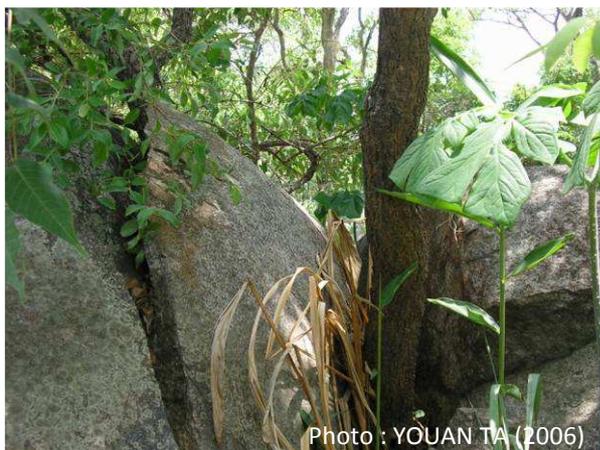
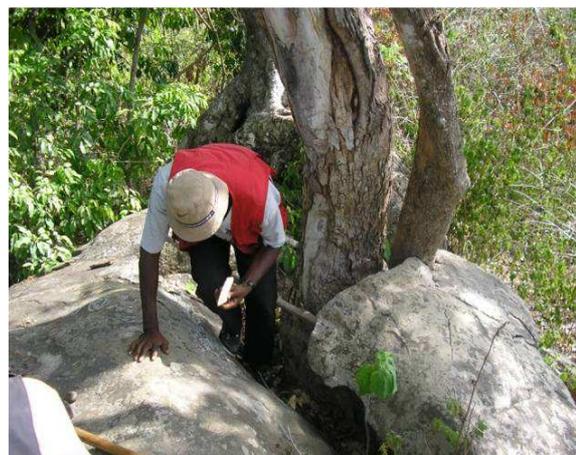


Photo : YOUAN TA (2006)

a) Décollement de grande écaille sous la poussée racinaire d'une plante (Laoudi-Bâ).



b) Fragmentation d'un granite alcalin sous l'action d'un arbre à Bondo Dioula

Figure 3 : Action des plantes sarcicoles dans la fragmentation de la roche

Dans le socle cristallin ou cristallophyllien, les aquifères de fractures peuvent constituer d'importants réservoirs d'eaux souterraines captées par les forages. L'approvisionnement en eau potable de la ville de Bondoukou est assuré par les forages captant la nappe du socle fracturé développée dans la granodiorite porphyroïde intrusive sur laquelle est bâtie cette localité [6]. Les forages utilisés pour l'hydraulique urbaine ont des débits moyens allant de 13 m³/h à plus de 20 m³/h. En zones rurales, l'approvisionnement en eau est parfois assuré par des forages à productivité généralement moyenne.

Les altérites couvrent la roche mère sous-jacente. Ces altérites se présentent suivant un profil dont la composition dépend de la nature et du stade d'évolution de la roche [10].

Lorsque la roche mère est constituée de schistes, l'épaisseur d'altération varie de 30 à 50 m, mais celle-ci peut atteindre par endroits plus de 90 m. Les altérites sur les schistes fournissent une importante réserve d'eau souterraine exploitable. Le profil d'altération sur les granitoïdes est généralement moins développé que celui sur les schistes [3, 10]. Les aquifères d'altérites sont captés par les nombreux puits de la région (Figure 4). Ces nappes présentent un niveau piézométrique qui varie de manière saisonnière [6].



Figure 4 : Puits traditionnel au quartier Hamdalaye (Bondoukou)

3. Matériel et méthodes

3-1. Méthode d'échantillonnage et d'analyse

L'échantillonnage a été réalisé sur les eaux souterraines captées par les forages de la région de Bondoukou. Lors de cette campagne, les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire pour analyse dans l'heure qui suit le prélèvement. La température, le pH, la conductivité électrique (CE), le taux d'oxygène dissous (O₂) et le potentiel d'oxydo-réduction des eaux ont été mesurés à l'aide d'un pH-mètre Star 4 et d'un conductimètre Hach Sension. Un total de 48 échantillons d'eau ont été prélevés. Les paramètres chimiques analysés sont Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻. Les sels nutritifs dosés sont constitués de NO₃²⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, et le PO₄³⁻. Au laboratoire, les cations majeurs, ont été dosés par la méthode de spectrophotométrie à l'aide d'un spectrophotomètre de type AAS VARIAN. Les sels nutritifs ont été dosés par la méthode de spectrophotométrie à partir d'un spectrophotomètre de type UV SHIMADZU. Les bicarbonates ont été dosés à partir de la méthode de dosage à l'aide d'un titrateur digital. Les chlorures ont

été mesurés par la méthode de Mohr par titrage. Les sulfates ont été dosés par spectrophotométrie à l'aide d'un appareil HACH DR 2010. La turbidité des eaux a été mesurée à partir d'un turbidimètre 2020.

3-2. Méthode de traitement des données

Le traitement des données collectées sur les eaux souterraines de la région de Bondoukou a été réalisé à l'aide de méthodes hydrochimique et statistique multivariée. L'étude hydrochimique des eaux a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper pour la classification hydrochimique des eaux. L'utilisation fréquente de ce diagramme dans le domaine de l'hydrochimie par [11-14] a conduit à de très bons résultats. L'approche statistique qui a été utilisée pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux est basée sur l'Analyse en Composantes Principales. Son application dans l'étude hydrochimique des eaux a été réalisée par plusieurs auteurs en Afrique et dans le monde avec des résultats très significatifs [15-19]. L'analyse statistique a été réalisée à partir de 48 descripteurs et 11 variables qui sont : pH, CE, O₂, HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, Mn, Fe et NO₃⁻. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA 6.0. Les résultats des analyses chimiques ont été comparés aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de Santé [20] dans le cadre d'une eau de boisson, non influencée par les activités anthropiques. L'application de toutes ces différentes méthodes a permis de connaître le mécanisme de minéralisation des eaux des aquifères du socle de la région de Bondoukou. Nous présentons ici les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette étude.

4. Résultats

4-1 Résultats des mesures physico-chimiques des eaux

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées sur les eaux souterraines de la région de Bondoukou sont consignés dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de Bondoukou en mg/L

N	Nom	Libellé	T°c	PH	Turb (NTU)	CE (µS/cm)	HCO ₃ ⁻	TH	Mg ²⁺	Cl ⁻	Fer	Mn	O ₂	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Ca ²⁺
1	Adieffé	Forage	28,3	5,68	0,42	134	54,9	14,429	1,458	3,546	0	0	6,8	0	0	0	0	0,09	14,429
2	Amoitini	Forage	25,3	6,54	0,35	412	183	28,056	8,505	10,638	0	0	6,8	10,9	0	0	0	0,26	28,056
3	Attrame Tomora/	Forage	25,7	6,24	0,35	353	198,1	28,056	4,374	3,546	0	0	6,8	0	0	0	0	0,33	28,056
4	Bandakagni	Forage	25,1	6,05	0,82	529	225,7	36,072	9,234	14,184	0,08	0	6,9	15	0	0	26	0,16	36,072
5	Banti	Forage	27,7	6,01	0,34	251	67,1	15,23	3,888	14,184	0,08	0	6,8	0	0	0	0	0,1	15,23
6	Bilikéhi	Forage	25,3	6,1	0,42	188,3	85,4	17,635	4,86	10,638	0,13	0,03	6,8	0	0	0	0	0,05	17,635
7	Biraoudi	Forage	25,3	6,3	0,36	652	262,3	40,882	11,178	10,638	0	0	7,1	29,1	0	0	0	0,21	40,882
8	Bomprou	Forage	26,7	6,46	0,35	198	152,5	—	1,944	3,546	0,25	0,03	—	0	0	0	0	0,05	12,825
9	Bonem Brogodom-	Forage	25,8	7,47	0,53	409	262,3	55,31	8,262	3,546	0,28	0,1	6,8	0	0	0	0	0,25	55,31
10	koulango	Forage	28,1	5,62	0,68	140,3	85,4	12,024	1,458	3,546	0	0	6,9	0	0	0	0	0,1	12,024
11	Déba	Forage	27,1	5,84	0,34	213	73,2	21,643	4,374	10,638	0,05	0	6,9	0	0	0	0	0,1	21,643
12	Dingbi	Forage	25,3	6,7	0,4	427	201,3	27,254	5,346	10,638	0,1	0	6,8	0	0	0	0	0,12	27,254
13	Doumassi	Forage	26	6,54	0,75	315	195,2	33,667	3,888	3,546	0,06	0	6,8	0	0	0	3	0,22	33,667
14	Dua Kouamé	Forage	25,7	6,94	0,35	541	347,7	48,897	8,748	10,638	0	0	7,1	0	0	0	0	0,06	48,897
15	Gaoussou_bakoutou	Forage	28	6,14	0,38	141	54,9	15,23	1,944	3,546	0,03	0	6,9	0	0	0	0	0,05	15,23

16	Gbane	Forage	25,1	6,15	0,35	209	91,5	16,032	4,374	3,546	0,04	0	6,9	0	0	0	0	0,05	16,032
17	Goly	Forage	25,9	5,86	0,45	254	134,2	21,643	3,402	10,638	0,18	0	6,9	0	0	0	3	0,2	21,643
18	Guimini	Forage	25,6	6,72	0,33	254	140,3	24,048	3,402	3,546	0,26	0	6,8	0	0	0	0	0,25	24,048
19	Houmankpin	Forage	27	5,79	0,36	157,6	85,4	18,437	2,916	3,546	0,16	0,03	6,8	0	0	0	0	0,05	18,437
20	Kakobly	Forage	27,7	5,96	0,35	507	54,9	54,509	6,318	53,19	0,01	0	7,1	15	0	0	12	0,28	54,509
21	Kalson	Forage	26,8	7,08	0,35	543	396,5	—	10,206	3,546	0,05	0	—	0	0	0	0	0,13	59,318
22	Kanasse	Forage	25,9	6,8	0,58	428	274,5	46,493	7,776	3,546	0,4	0,15	6,7	0	0	0	0	0,32	46,493
23	Kanguélé	Forage	25,8	6,37	0,36	337	207,4	—	—	3,546	—	—	—	0	0	0	0	0,18	38,477
24	Kémédi	Forage	28,3	5,96	0,4	134,7	61	14,429	0,972	3,546	0,08	0	6,9	0	0	0	0	0,05	14,429
25	Kiendi-Ba	Forage	25,7	6,63	1,06	260	152,5	26,453	2,916	3,546	0,56	0,1	6,6	0	0	0	0	0,13	26,453
26	Koffiékro	Forage	26,3	5,75	0,35	333	122	31,262	5,832	10,638	0	0	6,9	15	0	0	0	0,32	31,262
27	Kouafo Ahinifie	Forage	25,2	6,23	0,37	279	103,7	20,842	3,888	3,546	0,06	0	6,8	5	0	0	0	0,1	20,842
28	Kouassi N'dawa	Forage	26,6	6,63	0,3	644	402,6	81,763	11,178	14,184	0,36	0,1	6,7	0	0	0	0	0,16	81,763
29	Kpédi	Forage	25,9	7,31	0,35	548	366	—	8,748	3,546	0,2	0,03	—	1,2	0	0	0	0,12	44,088
30	Krinkua	Forage	26,3	5,71	0,92	190,9	79,3	12,024	3,888	10,638	0,28	0,09	6,8	0	0	0	0	0,09	12,024
31	Malaga	Forage	26,7	6,66	0,37	1175	366	147,494	24,786	49,644	0,04	0	6,8	10	0	0	26	0,15	147,494
32	Marahui Ahinifié	Forage	25,1	5,81	0,33	156,9	67,1	12,826	3,888	3,546	0	0	7,1	0	0	0	0	0,05	12,826
33	Motiamo	Forage	25,6	5,99	0,34	1236	152,5	165,129	35,964	74,466	0,02	0	6,9	12	0	0	30	0,36	165,129
34	Nanfanbéné	Forage	26,9	6,27	0,8	238	146,4	—	4,374	3,546	0,56	0,15	—	0	0	0	0	0,09	21,643
35	Néguere Nagare	Forage	25,4	5,88	0,39	180	79,3	14,429	3,402	3,546	0,03	0	6,9	0	0	0	0	0,09	14,429
36	Ouakiala	Forage	25,6	6,3	0,36	277	164,7	26,453	3,402	3,546	0,38	0,15	6,6	3,5	0	0	0	0,13	26,453
37	Poukoubé	Forage	27,2	6,25	0,35	639	73,2	—	10,692	60,282	0	0	—	20	0	0,05	15	0,3	50,501
38	Sadiahui	Forage	25,4	6,01	0,36	180	85,4	20,842	2,916	3,546	0,05	0	6,8	0	0	0	0	0,13	20,842
39	Sanguéhi	Forage	26	5,79	0,37	234	97,6	16,032	1,458	3,546	0,15	0	6,8	0	0	0	0	0,33	16,032
40	Sianhodi	Forage	27	6,36	0,3	177	103,7	—	1,944	3,546	0,08	0	—	0	0	0	0	0,1	12,825
41	Sianli	Forage	27,7	6,08	0,34	176,1	115,9	14,429	2,916	3,546	0,06	0	6,8	0	0	0	0	0,05	14,429
42	Tahini Bokoré	Forage	25,3	6,66	0,3	550	372,1	60,921	9,234	3,546	0,02	0	6,9	0	0	0	0	0,11	60,921
43	Toro sanguéhi	Forage	27,8	6,1	1,06	175,5	109,8	12,826	3,888	10,638	0,68	0,2	6,6	0	0	0	0	0,09	12,826
44	Troubiko	Forage	27,5	5,75	0,37	222	79,3	22,445	2,916	10,638	0,06	0	6,8	0	0	0	0	0,1	22,445
45	Wawé	Forage	26,9	6,76	0,36	228	152,5	—	4,374	3,546	0,33	0,03	—	0	0	0	0	0,11	23,246
46	Welekehi	Forage	25,7	6,23	0,38	253	146,4	24,048	1,944	3,546	0,28	0,03	6,9	0	0	0	0	0,09	24,048
47	Yao Attabra	Forage	25,7	6,54	0,33	425	250,1	44,889	9,234	3,546	0	0	7,1	0	0	0	0	0,06	44,889
48	Zadéhi		28,1	5,86	0,56	166,7	103,7	16,834	3,402	10,638	0,28	0,03	6,8	0	0	0	0	0,12	16,834

Il ressort de l'analyse de ce tableau que les eaux de la région sont acides, avec un pH qui varie de 5,62 à 7,47, pour une moyenne de 6,23. La conductivité électrique des eaux varie de 134 à 1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 347,55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ces eaux sont faiblement minéralisées dans l'ensemble, cependant on y rencontre par endroit certains points d'eau qui ont une forte minéralisation. Il s'agit des localités de Motiamo (1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; Malaga (1175 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et Kouassi N'dawa (644 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Classification hydrochimique des eaux

La classification hydrochimique des eaux dans la diagramme de Piper met en évidence deux principaux hydrofaciès (Figure 5). Il s'agit des eaux bicarbonatées calciques (93,75%) et des eaux chlorurées calciques (6,25%).

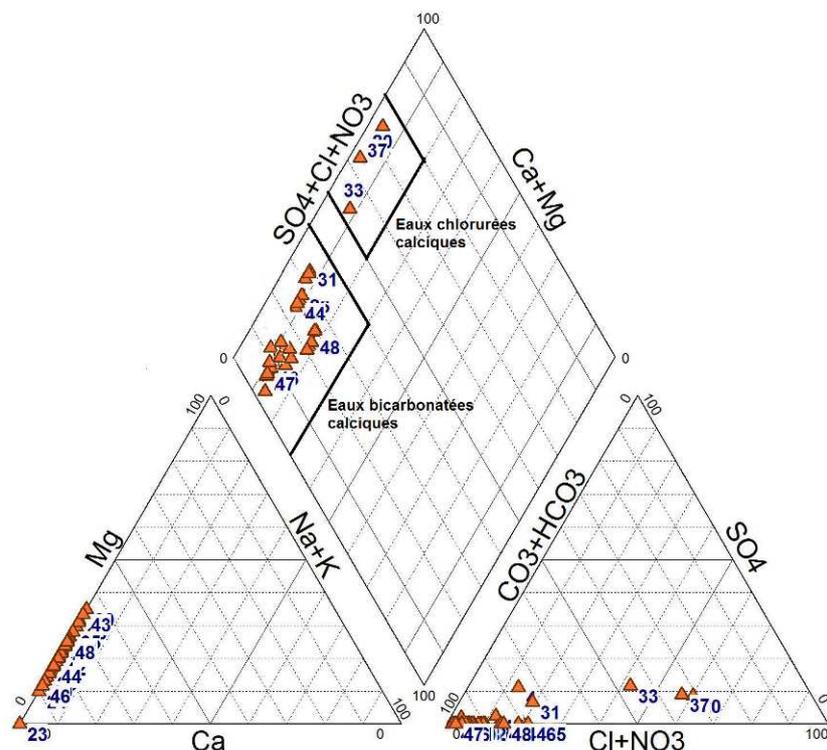


Figure 5 : Classification des eaux à l'aide du diagramme de Piper

4-2. Résultats de l'étude statistique multi-variée

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les résultats de l'ACP donnent de nombreux tableaux dont certains sont résumés dans cette étude. Le tableau des valeurs propres (**Tableau 2**) montre que les trois premiers facteurs représentent 79,97 % de la variance exprimée. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour traduire exactement l'information recherchée.

Tableau 2 : valeurs propres de l'ACP

Facteurs	Valeur propre	% Total de la variance exprimée	Valeur propre cumulée	Variance Cumulée
1	4,16	37,79	4,16	37,79
2	3,00	27,28	7,16	65,07
3	1,93	17,55	9,09	82,62

La matrice de corrélation qui présente les différentes corrélations entre les variables nécessaires pour la compréhension des phénomènes étudiés est présentée par le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables

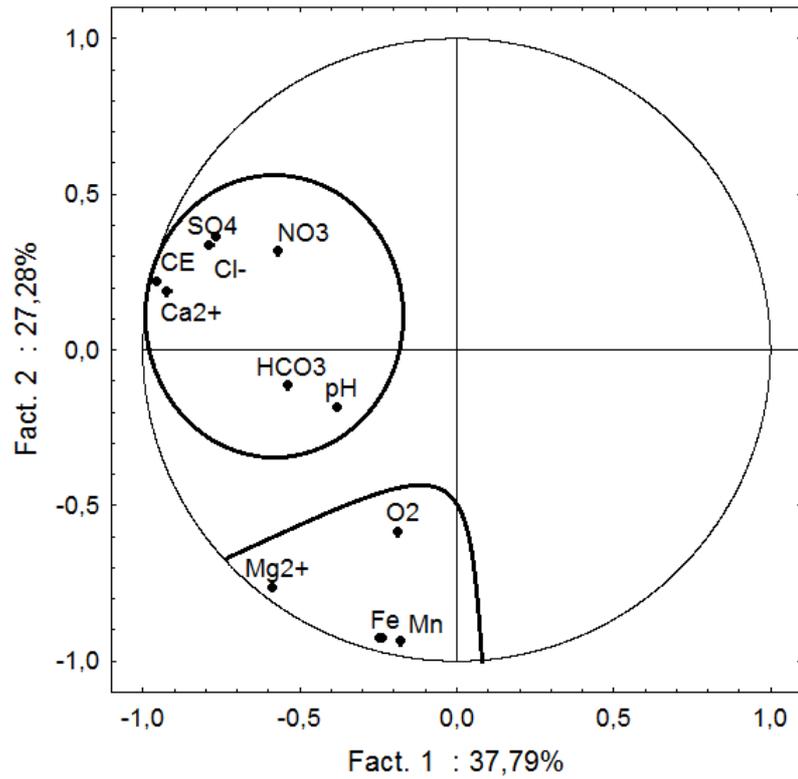
	pH	CE	HCO ₃ ⁻	Mg ²⁺	Cl ⁻	Fe	Mn	O ₂	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺
pH	1,00										
CE	0,38	1,00									
HCO ₃ ⁻	0,77	0,62	1,00								
Mg ²⁺	0,26	0,95	0,48	1,00							
Cl ⁻	-0,10	0,74	0,00	0,75	1,00						
Fe	0,22	-0,20	0,06	-0,18	-0,22	1,00					
Mn	0,21	-0,10	0,13	-0,08	-0,15	0,89	1,00				
O ₂	0,36	0,04	0,16	0,00	0,02	0,17	0,06	1,00			
NO ₃ ⁻	-0,08	0,55	0,07	0,47	0,59	-0,31	-0,20	0,01	1,00		
SO ₄ ²⁻	-0,06	0,75	0,12	0,76	0,82	-0,21	-0,18	-0,02	0,54	1,00	
Ca ²⁺	0,33	0,95	0,56	0,95	0,73	-0,14	-0,05	-0,02	0,37	0,73	1,00

Cette matrice met en évidence une importante corrélation entre CE-Ca²⁺ (0,95) ; Ca²⁺-Mg²⁺ (0,95) ; Mg²⁺-CE (0,95) ; SO₄²⁻-Cl⁻ (0,82) et Fe-Mn (0,89). Il existe également à un degré moindre une corrélation entre les variables telles que SO₄²⁻-CE (0,75) ; SO₄²⁻-Mg²⁺ (0,76) ; SO₄²⁻-Ca²⁺ (0,73) Ca²⁺-Cl⁻(0,73) ; HCO₃⁻-pH (0,77) et HCO₃⁻-CE (0,62). Ces différentes corrélations traduisent l'influence de chaque paramètre dans la minéralisation des eaux de Bondoukou.

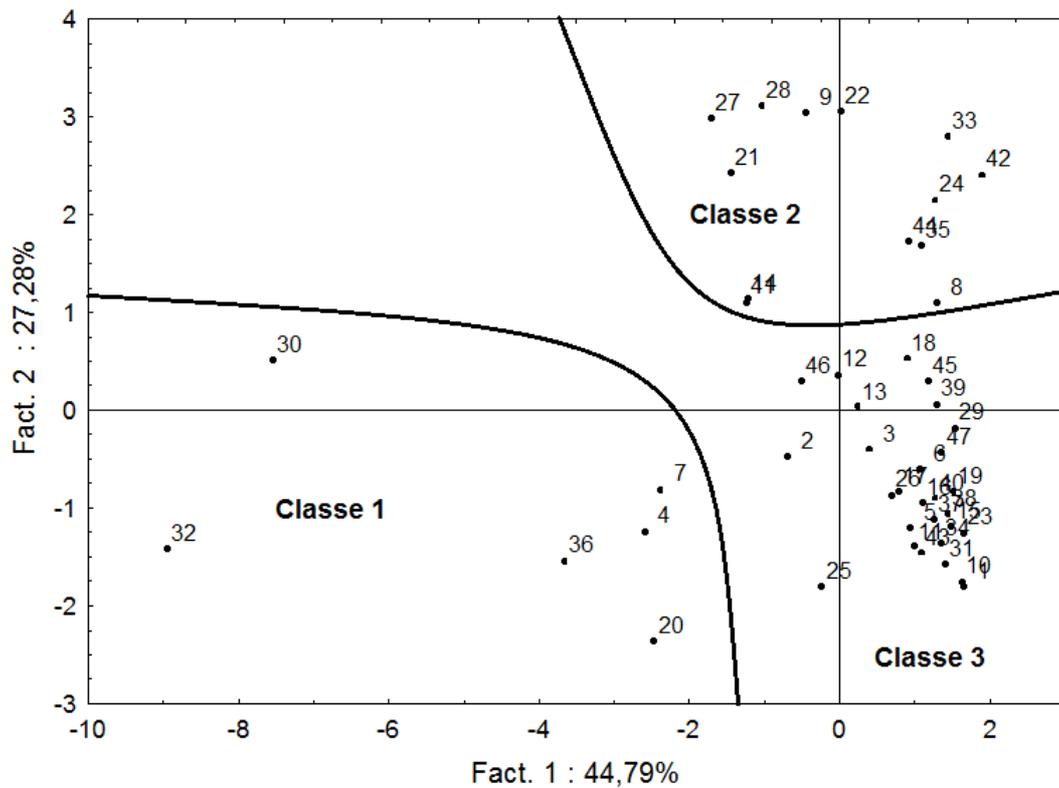
L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 permet de mettre en évidence deux grands regroupements des variables (Figure 6a). La première classe prend en compte CE, pH, Ca²⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, NO₃⁻ et Cl⁻. Les fortes corrélations qui lient ces variables entre elles montrent leur implication dans la minéralisation des eaux de la région. Le facteur F1 qui est défini par ces variables met en évidence l'hydrolyse acide des minéraux silicatés à l'origine de la production des différents ions. Le deuxième regroupement contient Mg²⁺, Fe, Mn et O₂. Cette classe met en évidence le phénomène d'oxydo-réduction du fer en présence d'oxygène. Le fer s'oxydant en présence d'oxygène pour donner une coloration rouille à l'eau. Dans les formations géologiques de la région d'étude, le fer est couramment associé au Mn.

L'analyse des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F2 met en évidence trois regroupements des points d'eau (Figure 6b). La classe 1 prend en compte toutes les eaux fortement minéralisées de la localité d'étude. La classe 2 regroupe toutes les eaux faiblement minéralisées et à faible teneur en fer. Quant à la classe 3, elle contient les eaux riches en fer. L'étude des eaux dans l'espace des variables du plan factoriel F2-F3 met en évidence les regroupements de variables suivants les différents axes d'étude (Figure 7a). Le facteur F2 exprime 27,28% de la variance et prend en compte deux regroupements. Il s'agit premièrement des variables Mn, Fe, O₂ et Mg²⁺ et des paramètres CE, Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ et Cl⁻. De par ces regroupements, le facteur F2 met en évidence le phénomène d'oxydo-réduction et la minéralisation superficielle d'origine anthropique. Le facteur F3 qui représente 12,78% de la variance exprimée est défini par HCO₃⁻ et pH. Il met en évidence la minéralisation acide liée à l'hydrolyse des minéraux carbonatés.

L'observation des unités statistiques dans le plan factoriel F2-F3 présente trois regroupements des eaux souterraines (Figure 7b). La première famille présente les eaux fortement minéralisées, la famille 2 contient les eaux riches en fer ou les eaux acides. La classe 3 contient les eaux à faible minéralisation de la région. Les différents regroupements étudiés montrent que la minéralisation des eaux étudiées est liée à deux phénomènes importants qui se déroulent au sein de l'aquifère. Il s'agit de l'hydrolyse acide des minéraux silicatés et de l'oxydo-réduction.

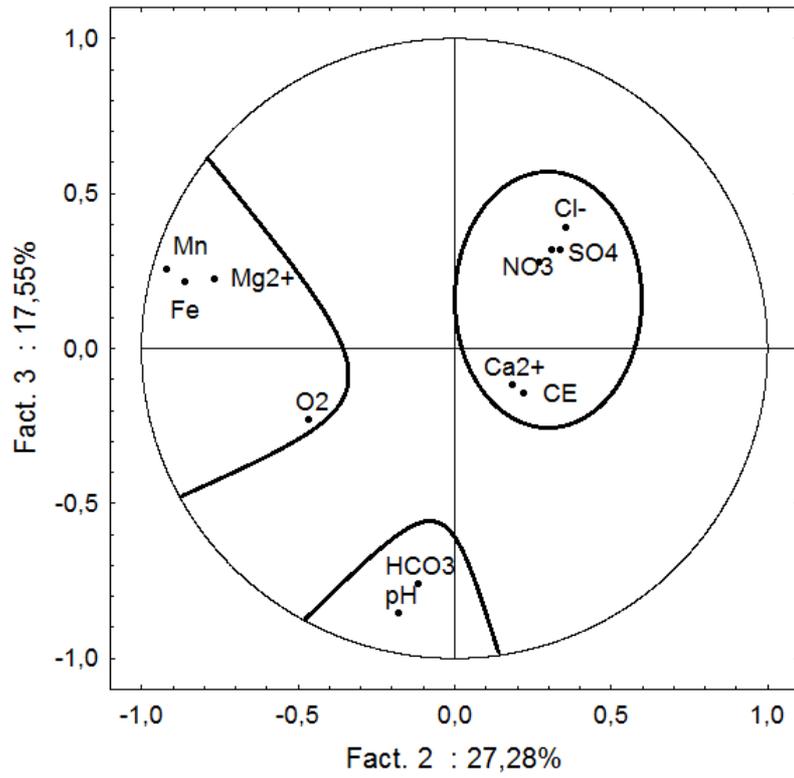


a) Analyse dans le plan factoriel F1-F2

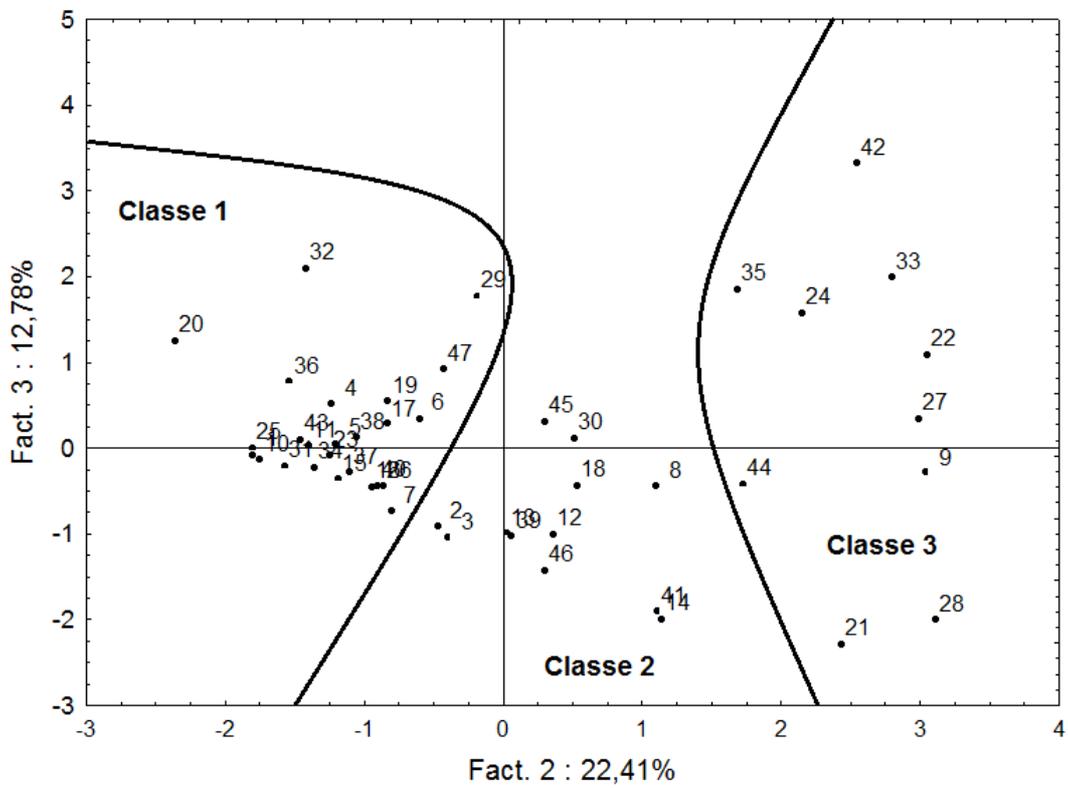


b) Analyse des US dans le plan factoriel F1-F2

Figure 6 : Analyse dans le plan factoriel F1-F2



a) Analyse dans le plan factoriel F2-F3



b) Analyse des US dans le plan factoriel F2-F3

Figure 7 : Analyse dans le plan le plan factoriel F2-F3

4-3. Résultats des ISC-ISD et temps de séjour des eaux souterraines

Les indices de saturation en calcite (ISC) varient de -2,7 à 0,24 tandis que ceux de la dolomite varient de -4 à -0,54. Le graphique de la représentation de ISC en fonction de l'ISD s'alignent suivant une droite de régression d'équation : $ISD = 1,993x ISC - 0,953$, avec un coefficient de corrélation de 0,991 (Figure 8). On note que la quasi-totalité des eaux du socle présentent une sous-saturation à la fois en calcite ($ISC < 0$) et en dolomite ($ISD < 0$). Néanmoins, il existe quelques échantillons d'eau qui présentent une sursaturation en calcite. Il s'agit des eaux de Kalson ($ISC = 0,06$), Kpédi ($ISC = 0,12$) et Bonem ($ISC = 0,24$).

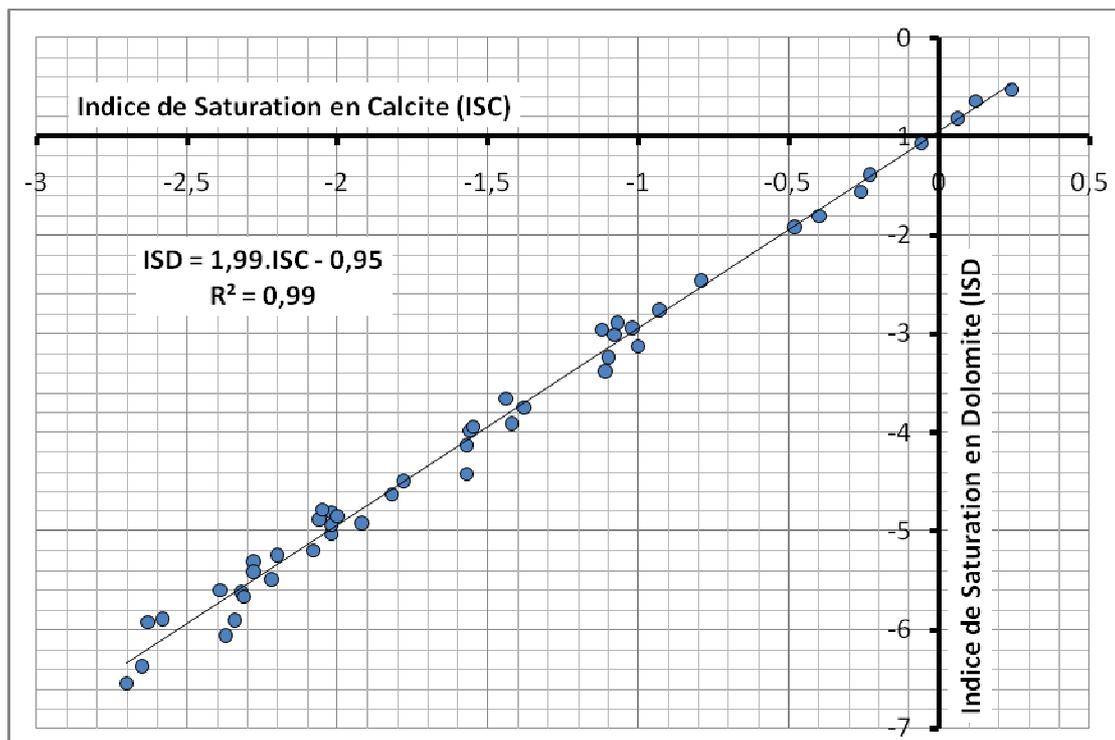


Figure 8 : Répartition des ISD en fonction des ISC des eaux souterraines

Qualité des eaux par rapport aux normes OMS

La comparaison des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la région aux valeurs guides de l'OMS [20] sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau IV). Cette comparaison montre qu'à l'exception du fer, les eaux souterraines présentent des teneurs en éléments minéraux largement en-dessous des valeurs guides de l'OMS. Ces eaux sont de bonne qualité et peuvent être utilisées pour une consommation humaine.

Tableau 4 : Récapitulatif des mesures des paramètres physico-chimiques des eaux de Bondoukou

Paramètres physico-chimiques	Valeur Guide			
	OMS	Moyenne	Min	Max
T°C		26,37	25,10	28,30
pH	6-8,5	6,27	5,62	7,47
CE (µS/cm)	-	347,55	134	1236
O ₂	-	21,02	6,60	102
Turb (NTU)	-	0,45	0,30	1,06
HCO ₃ ⁻	-	161,26	54,90	402,60

Cl ⁻	250 mg/L	10,79	3,55	74,47
SO ₄ ²⁻	-	2,45	0	30
NH ₄ ⁺	-	0,001	0	0,05
PO ₄ ³⁻	-	0,15	0	0,36
NO ₃ ⁻	50 mg/L	2,91	0	29,10
Fe	0,3 mg/L	0,14	0	0,68
Mn	-	0,03	0	0,20
Ca ²⁺	-	33,75	12,02	165,13
Mg ²⁺	-	6,08	0,97	35,96

5. Discussion

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Bondoukou montrent que les eaux sont acides. Celles-ci s'intègrent dans la gamme des eaux rencontrées en Côte d'Ivoire dans les aquifères de socle. En effet, les études antérieures réalisées par [14] dans la région de Guiglo ; [12] dans la région de Tiassalé ; [21] dans la région de San-Pédro ont mis en évidence le caractère agressif des eaux souterraines du pays. Ces eaux sont faiblement à moyennement minéralisées, avec la présence par endroits de certains foyers d'eau à forte minéralisation. C'est le cas des eaux rencontrées dans les localités telles que Malaga (1175 µS/cm) et Motiamo (1236 µS/cm). En effet, selon [13, 22, 23], l'acidité des eaux en zone tropicale humide est principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO₂ dans les premières couches du sol. La présence dans l'eau de CO₂ provenant des sols facilite l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO₃⁻. En effet, les résultats de l'Analyse multivariée montrent que dans la région l'hydrolyse acide des roches constitue un phénomène important dans la minéralisation des eaux.

L'Analyse en Composantes Principales a donné des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région. Celle-ci révèle que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la région. En effet, l'origine des ions dans les eaux souterraines est contrôlée par le contact eau-roche comme l'indique les résultats des différentes statistiques. La géologie de la région est dominée par les formations telles que les granites, les gneiss et les schistes. L'hydrolyse de telles roches riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides, explique les teneurs en Ca²⁺ dominantes pour les cations dans les eaux souterraines. Ces ions sont issus de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux silicatés [24]. La proportion assez importante d'anorthite dans les plagioclases, variété la plus facilement altérable [25] justifie les fortes concentrations de Ca²⁺. En effet, le calcium est inclus dans la structure des plagioclases. Selon Edmunds (1985) *in* [26], le calcium est libéré, au cours de l'hydrolyse acide des plagioclases.

La minéralisation calcique des eaux du socle est sous l'influence de l'altération et de l'hydrolyse des minéraux alumino-silicates, riches en Ca²⁺ comme l'anorthite. Le rapport Mg²⁺/Ca²⁺ des eaux varie de 0,11 à 0,53 pour une moyenne de 0,30, ce qui reste pour l'ensemble des points d'eau, inférieur à 1. Cela indique que les ions Mg²⁺ sont issus de la décomposition des minéraux ferro-magnésiens tels que la biotite et l'amphibole présentes dans les roches de la région. La présence dans l'eau de CO₂ provenant des sols facilite l'hydrolyse des silicates qui permet la formation de HCO₃⁻ [22]. C'est la raison pour laquelle l'eau de la nappe de fissures présente simultanément les plus fortes teneurs en HCO₃⁻ (274,5 mg.L⁻¹) et les plus forts pH (proche de 7). C'est d'ailleurs, cette hydrolyse acide des roches encaissantes qui contrôle la diversité des faciès bicarbonatés des eaux souterraines. Selon [22], la contribution des roches notamment les sels

intergranulaires et les sulfures dans la mise en solution des ions Cl^- et SO_4^{2-} reste faible dans les eaux souterraines en zone de socle cristallin. Les ions Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et une partie des cations, proviennent des eaux de pluie et du lessivage des sols par celles-ci comme l'indique les résultats de l'analyse multivariée. Les faibles teneurs en sulfates rencontrées dans les eaux souterraines de la zone constituent une particularité des eaux souterraines de la Côte d'Ivoire [3, 22, 26, 27]. Selon ces auteurs, les eaux de pluie représentent la source de production des ions SO_4^{2-} dans les eaux souterraines. En effet, pour [28], les teneurs en chlorures et sulfates sont habituellement faibles dans les réservoirs du socle cristallin de l'Afrique de l'Ouest.

Dans la zone d'étude, l'origine du fer dans l'eau est essentiellement liée à la nature des formations géologiques. En effet, cet élément se retrouve dans les eaux souterraines après altération de la roche mère. Les indices de saturations calculés, montrent que les eaux présentent une sous-saturation en calcite et en dolomite. Cependant, la présence d'indice positif dans certaines eaux montre la participation de l'hydrolyse acide des roches dans la minéralisation des eaux souterraines de la région. Ainsi, selon [19], la présence des ions calcium et bicarbonates dans l'eau provient de l'altération des carbonates d'après la formule suivante :



En effet, c'est cette réaction qui explique la dominance du faciès bicarbonaté calcique dans les eaux de la région.

6. Conclusion

L'étude réalisée sur les eaux souterraine de la région de Bondoukou a permis de connaître les caractéristiques des eaux des nappes profondes de cette zone. Il ressort de ce travail que les eaux souterraines sont acides, avec un pH qui varie de 5,62 à 7,47, pour une moyenne de 6,23. Ces eaux sont faiblement minéralisées dans l'ensemble, avec une conductivité électrique qui varie de 134 à 1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pour une moyenne de 347,55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. On y rencontre cependant, dans certaines zones de fortes conductivités, notamment dans les localités de Motiamo (1236 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; Malaga (1175 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et Kouassi N'dawa (644 $\mu\text{S}/\text{cm}$). La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme de Piper a montré que les eaux se classent en deux principaux hydrofaciès. Il s'agit des eaux bicarbonatées calciques (93,75%) et des eaux chlorurées calciques (6,25%). Dans la région de Bondoukou, les eaux des aquifères de fractures présentent une sous-saturation en calcite et en dolomite. L'Analyse en Composantes Principales indique que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques. Les principaux ions sont issus de l'altération des roches, de l'hydrolyse des minéraux silicatés comme l'anorthite dans les plagioclases, de la décomposition des minéraux ferromagnésiens tels que la biotite et l'amphibole. Par ailleurs, c'est l'hydrolyse acide des roches encaissantes qui contrôle la diversité des faciès bicarbonatés des eaux souterraines. Les ions Cl^- et SO_4^{2-} proviennent de la pluie et du lessivage des sols. Les ions NO_3^- sont issus d'une pollution liée aux des activités anthropiques.

Références

- [1] - Lasserre, Le prochain siècle sera-t-il celui des guerres de l'eau ? Revue internationale et stratégique (IRIS, Paris), n°33, (1999)
- [2] - Jourda J. P., Méthodologie d'application des techniques de Télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest. Concept de l'hydrotechniquespatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat d'état ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, (2005) 430 p.
- [3] - Biémi J., Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat d'état ès Sciences Naturelles, Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1992), 480 p.
- [4] - Ahoussi K. E., Soro N., Soro G., Oga M. S., Zadé S., 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.
- [5] - Ahoussi K. E., Oga Y. M. S., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro N., Biémi J., Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire : cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5(5)**, (2011) 2114-2132.
- [6] - Youan Ta M., Contribution de la télédétection et des systèmes d'informations géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou Nord Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat unique, Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), (2008) 236 p.
- [7] - Zeade Z, Delor C, Simeon Y, Yao B D, Vidal M, Sonnendrucker P, Diaby I, Cautru JP., Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, Feuille Bondoukou, *Mémoire de la Direction des Mines et de la Géologie de la Côte d'Ivoire*, n°10 Abidjan, Côte d'Ivoire, (1995)
- [8] - Touré S., Pétrologie et geochronology du massif granitoïde de Bondoukou. Nord-Est de la Côte d'Ivoire. Évolution magmatique et contexte géodynamique au Protérozoïque inférieur. Relations avec le volcano-détritique du Zanzan, Koun, Tanda attribué au Tarkwaïen du Ghana. Implications paléogéographiques. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, University d'Abobo Adjamé, (2007) 224p.
- [9] - Tempier P., Données récentes sur la géologie de socle de la Côte d'Ivoire. *Ann. Univ. Abidjan (Côte d'Ivoire)*, vol.5, (1969) 55-92.
- [10] - Lasm T., Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (Domaine Archéen). Thèse unique de doctorat Université de Poitier, (2000) 272 p.
- [11] - Kouzana L., Ben Mammou A., Gaaloul N., Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop.*, **31**, (2007) 57-70.
- [12] - Oga M. S., Lasm T., Yao T. K., Soro N., Saley M. B., Kouassi D., Gnamba F., 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.
- [13] - Ahoussi K. E., Soro N., Koffi Y. B., Soro G., Biémi J., Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire: cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4(3)**, (2010) 782-797.

- [14] - Kouassi A. M., Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Aké Y. A., Biémi J., 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] - Güler C., Thyne G. D., Mccray J. E., Tuner A. K., Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*(10), (2002) 455-474.
- [16] - Yidana S.M., Ophori D., Banoeng-Yakubo B., A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data – The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, **86**, (2008) 80-87.
- [17] - Kouassi A. M., Yao K. A., Ahoussi K. E., Seki L. C., Yao N. A., Biémi J., 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 Sciences*, **4**(5), (2010) 1816-1838.
- [18] - Thilagavathi R. Chidambaram S. Prasanna M. V. Tivya C. Singaraja C. A., study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of pondicherry region, southeast India. *Applied Water Science*, **2**, (2012) 253-269
- [19] - Gbolo P., López D. L., Chemical and geological control on surface water within the Shade river watershed in southeastern Ohio. *Journal of Environmental Protection*, **4**, (2013) 1-11
- [20] - OMS, Guidelines for Drinking-water Quality. Third edition, incorporating the first and second Addenda, Recommendations, Geneva, Volume 1, (2008) 515 p.
- [21] - Lasm T, Lasmé O, Oga M. S., Youan Ta M., Baka D., Kouamé K. F., Yao K. T., 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.
- [22] - Tapsoba S. A., Contribution à l'étude Géologique et Hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : Hydrochimie, Isotopie et Indice de vieillissement des eaux souterraines, Thèse de 3^e cycle de l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, (1995) 200 p.
- [23] - Matini L., Moutou J.M., Kongo-Mantono M.S., Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science* **05**(1), (2009) 82-98.
- [24] - Savané I., Soro N., 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.
- [25] - Faillat J. P., Drogue C., Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, **38**, **3**(6), (1993) 215-229.
- [26] - Soro N., 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 naturelles, Université de Cocody, (2002) 272 p
- [27] - Oga. M. S., Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approche Hydrochimique et Isotopique, Thèse Université d'Orsay, Paris, France, (1998) 311 p.
- [28] - Travi Y., Mudry J., Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères du socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Revue d'Hydrogéologie*, **1**, (1997) 13-21