



ÉTUDE HYDROCHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES NAPPES D'ALTÉRITES SOUS CLIMAT TROPICAL HUMIDE : CAS DU DÉPARTEMENT D'ABENGOUROU (SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

**^{1*}AKA NATCHIA, ²BAMBA SIAKA BARTHELEMY, ¹SORO GBOMBELE,
¹SORO NAGNIN**

¹. Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE),
Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources
Minières (STRM), Université Félix Houphouët Boigny, Cocody-Abidjan, 22 BP 582
Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire)

². Département Environnement (DE), Centre de Recherches Océanologiques (CRO),
BPV 18 Abidjan (Côte d'Ivoire), Tél. (+225) 21 35 58 80

* akanatch@yahoo.fr; ngbakou@gmail.com

RÉSUMÉ

Les qualités physico-chimique et microbiologique des aquifères d'altérites dans le département d'Abengourou ont été évaluées pour l'usage eau de boisson. Les eaux de 32 puits traditionnels et 3 cours d'eau ont été prélevées en décembre (saison sèche) 2009 puis analysées. Les résultats soumis à des traitements statistiques ont montré que les paramètres physico-chimiques les plus déclassant sont le pH, le Fer, l'Aluminium et les nitrates dont respectivement 90%, 30%, 70% et 28% des points d'eau présentent des teneurs supérieures aux normes O.M.S. Les faciès dans 50% des cas sont à majorité chloruré ou nitraté sodi-potassique. Une corrélation significative a été observée entre la conductivité électrique et les Na⁺, K⁺, Mg²⁺, NO₃⁻, Cl⁻.

La minéralisation des eaux est contrôlée par des phénomènes tels que les apports atmosphériques, anthropiques et l'hydrolyse acide des roches. Les analyses microbiologiques ont révélé la présence d'Escherichia coli (10 à 150 ufc/100 ml) dans 28% des puits.

Les ressources en eau du département sont soumises à une pression anthropique importante. La consommation de ces eaux pour un grand nombre de puits en dehors de tout traitement est à proscrire car elle pourrait être une source de risques sanitaires pour les populations.

Mots clés : aquifères d'altérites, pollution, éléments traces métalliques, tropical humide

ABSTRACT

The physico-chemical and microbiological properties of regolith aquifers in the department of Abengourou were evaluated for the use of drinking water. The 32 traditional water wells and three streams were sampled in December (dry season) 2009 and analyzed. The results submitted to statistical treatment showed that most downgrading physicochemical parameters pH, Iron, Aluminium and nitrates which respectively 90%, 30%, 70% and 28% of water points are higher levels to WHO standards. Facies in 50% of cases are most chlorinated or nitrated sodi-potassic. A significant correlation was observed between the electrical conductivity and Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NO_3^- , Cl^- .

Mineralization of water is controlled by phenomena such as atmospheric deposition, and anthropogenic acid hydrolysis rocks. Microbiological analysis revealed the presence of *Escherichia coli* (10 to 150 cfu/100 ml) in 28% of the wells.

Water Resources of department are subject to significant anthropogenic pressure. The consumption of these waters for a large number of wells without any treatment is to be avoided because it could be a source of health risks for populations.

Keywords: regolith aquifers, pollution, trace metals, tropical wet

INTRODUCTION

La conservation de la qualité de l'environnement fait l'objet d'une préoccupation omniprésente dans nos sociétés en ce début du 21^{ème} siècle. L'altération de l'environnement naturel, notamment le milieu des ressources en eau, est devenu progressivement une préoccupation mondiale.

En Afrique, les eaux souterraines en milieu urbain et rural subissent de multiples contraintes dues à une forte croissance démographique et à l'inadaptation ou même l'absence d'assainissement (Boubakar Hassane, 2010). Les réseaux d'égouts, les fosses septiques, les eaux usées des usines et les déchets solides sont les sources principales de pollution des eaux souterraines dans le secteur urbain; dans les zones périurbaines et rurales, l'agriculture, via les intrants agricoles, contribue aussi à dégrader la qualité des nappes et cours d'eau (Bricha et al., 2007).

La croissance démographique que connaît la Côte d'Ivoire après son indépendance a eu pour conséquence l'augmentation des besoins primaires des populations dont l'accès à l'eau potable des populations urbaines et rurales.

Cette grande pression démographique sur les ressources naturelles se traduit par une production de plus en plus importante de déchets de toute nature. Ainsi, depuis ces dernières décennies, les études réalisées sur les ressources en eau de la Côte d'Ivoire par Ahoussi et al. (2008, 2010 et 2012a) et Coulibaly et al. (2008) ont signalé de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux de surface que des eaux souterraines, dans les localités d'Abidjan, de Kossihouen et de N'zianouan. Le département d'Abengourou n'est pas en marge de ces problèmes environnementaux.

La présente étude qui s'intéresse au département d'Abengourou a été entreprise dans un souci de mieux appréhender l'action des pressions anthropiques sur les ressources en eau d'un bassin versant subtropical : la Comoé dans sa partie méridionale située en zone tropicale humide. La zone d'étude a connu durant ces dernières années une pression anthropique due à l'expansion économique et particulièrement agricole. En effet, le département est une des régions pionnières de la culture intensive du binôme café-cacao. Ceci a un impact sur les zones boisées et par ricochet, expose la ressource à différentes pollutions résultant des activités agricoles. L'utilisation excessive d'engrais et de pesticides, les effluents des industries, le rejet de déchets provenant des fermes sont une source de pollution de ces nappes.

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Le département d'Abengourou d'une superficie avoisinant les 5200 km², est situé dans la partie sud-est de la Côte d'Ivoire entre les latitudes 5°45 et 7°10 Nord et les longitudes 3°10 et 3°50 Ouest (figure1). Du point de vue topographique, la région d'Abengourou est composée dans l'ensemble d'un relief relativement plat et monotone avec une altitude comprise entre 100 et 280 m, caractéristique du sud de la Côte d'Ivoire.

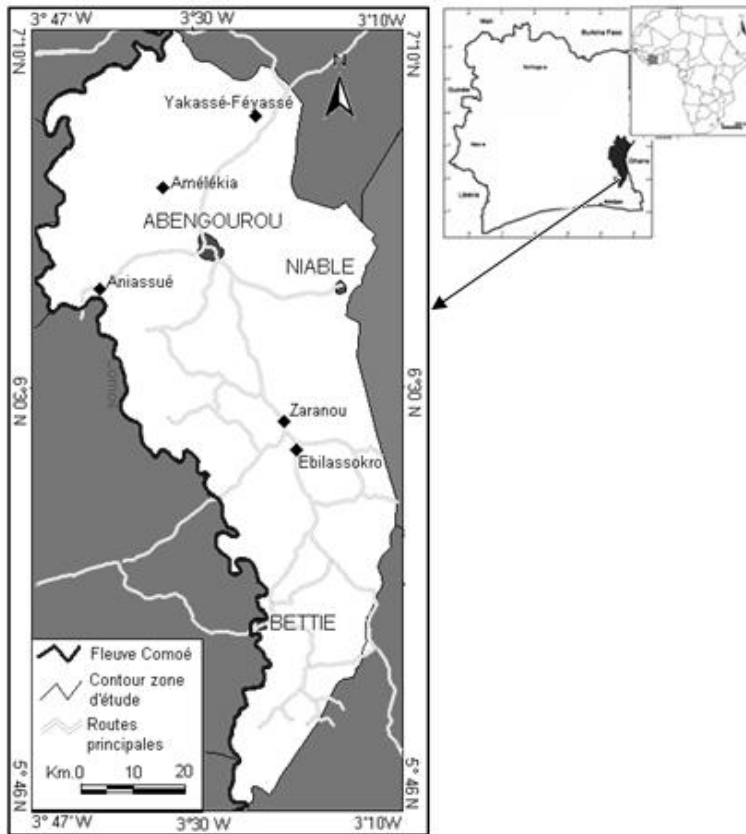


Figure 1 : Situation géographique du département d'Abengourou

La densité du réseau hydrographique montre qu'Abengourou est l'un des départements les moins irrigués de Côte d'Ivoire. Les principaux cours d'eau sont : la Comoé et ses principaux affluents que sont : le Manzan, la Béki, le Brassué, le Bossématié et le Songan dans l'extrême sud-est du département qui est un affluent de la Bia et qui sert de limite entre le département d'Abengourou et celui d'Aboisso. La baisse de la pluviométrie a eu pour effet une diminution des apports d'eau qui transitent dans les cours d'eau de la région.

Située dans la branche sud-est du V Baoulé, le département d'Abengourou est couvert de forêts denses mésophiles dans sa partie nord et de forêts denses ombrophiles dans sa partie sud. Ces forêts sont en voie de disparition à cause de l'action anthropique qui a modifié les paysages naturels par le déboisement et la pratique de certaines cultures telles que le cacao, le café et l'hévéa. C'est un département à vocation agricole. Les régimes climatiques sont le régime de type équatorial de transition atténué dans le nord et équatorial de transition dans l'extrême sud (Béttié). Ces climats sont marqués par quatre saisons.

Dans l'ensemble, la précipitation moyenne annuelle calculée par la méthode des isohyètes dans la période 1940-2000 est de 1241,45 mm dans le département d'Abengourou. Ce faisant, la zone d'étude est très influencée par le régime équatorial de transition atténué.

Le département d'Abengourou du point de vue géologique (figure 2) est constitué à près de 80% par les formations métamorphiques birimiennes que sont les schistes et leurs variantes (métaarénites et métasiltites).

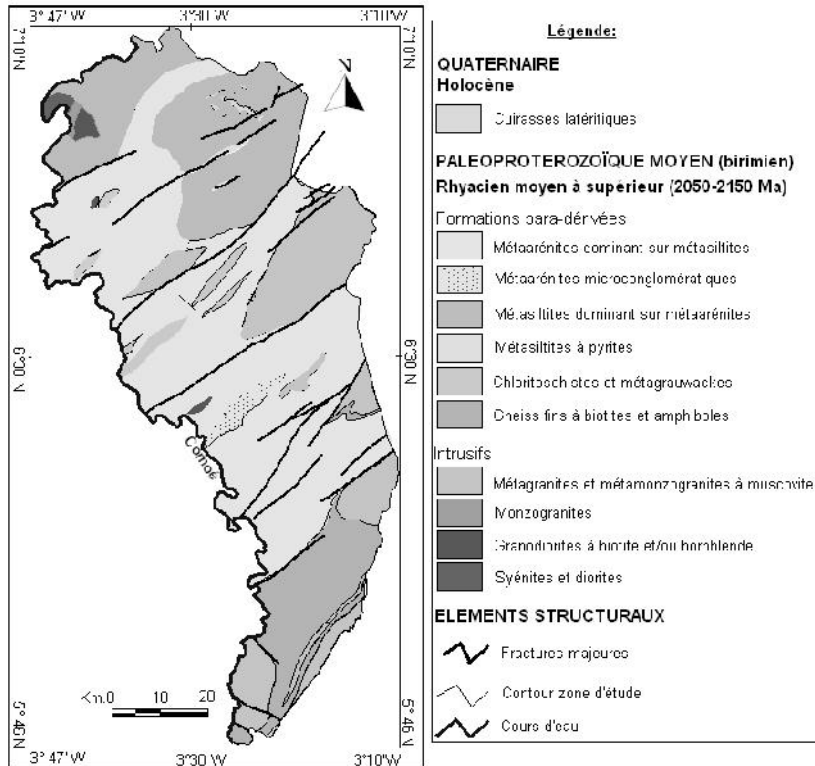


Figure 2 : Carte géologique du département d'Abengourou

Dans ces formations, apparaissent en intrusions des granitoïdes. Dans les roches métamorphiques tendres, l'épaisseur d'altération est plus élevée que sur les granitoïdes qui sont plus résistants. Du point de vue hydrogéologique, la présence de deux types d'aquifères est à noter. L'aquifère d'altérite exploité par des puits modernes ou paysans et l'aquifère de fissure ou de fracture capté par les forages dans le cadre des programmes d'approvisionnement en eau potable des localités. Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes intéressé aux aquifères d'altérites.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les échantillons d'eau ont été collectés dans 32 puits domestiques ainsi que 3 cours d'eau (figure 3) au cours d'une mission effectuée en décembre 2009 qui coïncide avec le début de la saison sèche. Les échantillons ont été soumis à des analyses physico-chimiques et microbiologiques.

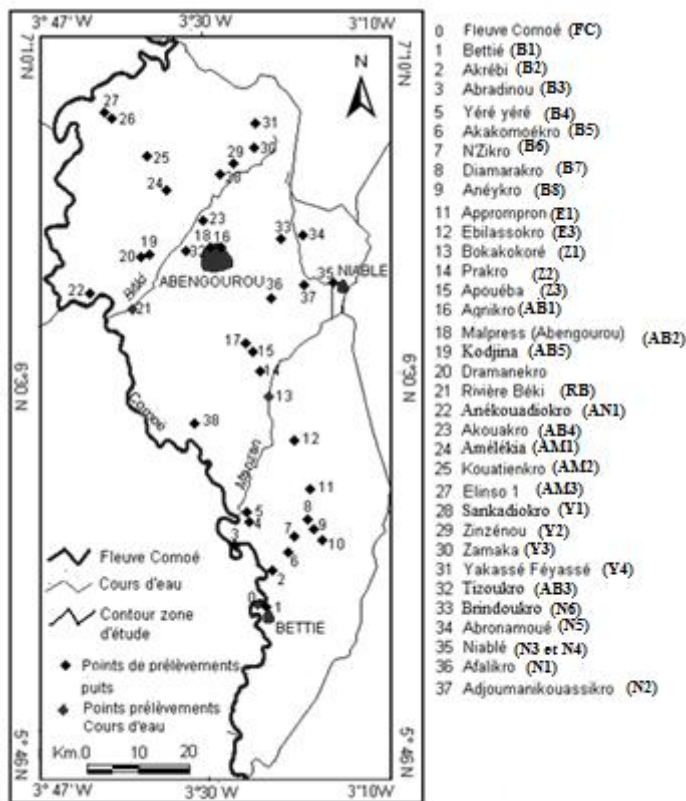


Figure 3 : Carte de répartition des sites de prélèvement

Méthodes d'analyses physico-chimiques

À chaque station, nous avons prélevé deux échantillons dans des contenants de 500 mL en polyéthylène. Les flacons destinés pour les analyses des cations et métaux en trace ont été acidifiés ($\text{pH} < 2$) par deux gouttes d'acide nitrique (HNO_3) suprapur afin d'inhiber la prolifération de bactéries consommatrices de cations.

Les prélèvements trop troubles sont filtrés sur le terrain par des membranes en acétate de cellulose de porosité $0,45\mu\text{m}$. Les différents échantillons sont conservés dans une glacière à une température n'excédant pas 4°C . Sur le site,

nous avons mesurés les paramètres physiques de l'eau à l'aide d'un multiparamètre de type HANA 9828. Ces paramètres ont concernés la température, le pH et la conductivité. L'alcalinité et les chlorures (Cl^-) ont été dosés par volumétrie sur le terrain à l'aide d'un titrimètre digital de type HACH 16900. Le dosage est fondé sur la neutralisation d'un volume d'eau (100 mL) par un acide minéral (on ajoute une solution titrante d'acide sulfurique dilué, (H_2SO_4 à 0,16 N ou à 1,6 N) en utilisant le vert méthyl rouge de bromocrésol comme indicateur coloré dans le cas de l'alcalinité et par l'ajout progressif d'une solution titrante de nitrate mercurique de molarité 0,226N ou 2,26N en présence d'un indicateur coloré qui est le diphényl-carbazone pour les chlorures. Les sulfates (SO_4^{2-}) et les nitrates (NO_3^-) ont été déterminés selon les protocoles homologués (RODIER, 2009).

Le sodium (Na^+), le calcium (Ca^{2+}), le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}) et les métaux en trace que sont l'aluminium (Al^{3+}), le fer (Fe^{2+}) et le magnésium (Mn^{2+}) ont été analysés par spectrométrie d'émission, utilisant une source à plasma d'argon générée par couplage inductif (ICP-AES). Les données collectées sur le terrain et au laboratoire ont été traitées à partir des méthodes statistiques descriptives et multivariées couplées aux méthodes hydrochimiques. Les méthodes hydrochimiques ont nécessité l'utilisation du diagramme de piper qui est fréquemment utilisé dans le domaine de l'hydrochimie. L'approche statistique est basée sur la statistique descriptive, l'analyse en composante principal (ACP) pour l'étude à l'origine des phénomènes de minéralisation. L'ACP peut être utilisé pour caractériser la qualité des eaux souterraines et peut aussi concourir à la planification d'un contrôle de suivi de celle ci (Zeng et Rasmussen, 2005) *in* Matini et al. 2009. Cette approche a concerné 13 paramètres hydrochimiques qui sont : pH, Conductivité, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ; Fe^{2+} , Mn^{2+} et Al^{3+} , et le logiciel STATISTICA version 7 a été utilisé pour sa réalisation.

Méthode d'analyse microbiologique

Une analyse microbiologique a également été effectuée sur les puits. Dans le cadre de cette étude, seuls les germes normaux, témoins d'une contamination fécale ont été recherchés et les mieux représentés sont les coliformes thermotolérants comme *Escherichia Coli*.

Ces prélèvements sont effectués dans des flacons stériles de 500 ml en verre borosilicaté à bouchon rodé, en laissant dans le flacon un espace d'air afin de faciliter la remise en suspension des micro-organismes par agitation avant l'ensemencement dans les milieux de culture appropriés. La méthode AFNOR BRD 07/1-07/93 a été utilisée pour ces analyses. La norme bactériologique de l'OMS en ce qui concerne l'eau destinée à la consommation humaine est de zéro (0) colonie pour 100 ml d'eau filtrée. Les prélèvements sont acheminés au laboratoire dans une glacière à une température de $\pm 4^\circ\text{C}$.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Résultats

Analyse descriptive

Les différents résultats de mesures in situ et d'analyses de laboratoire des eaux d'altérites du département d'Abengourou sont donnés sur le tableau 1. Le récapitulatif des résultats est donné dans le tableau 2.

La plage des valeurs de pH est comprise entre 3,85 et 6,41 avec une moyenne de 5,13. Les variations de pH sont assez homogènes (coefficients de variation inférieurs à 0,5). Les eaux des nappes d'altérites du département d'Abengourou sont agressives ; celles des eaux de surface sont neutres avec un pH moyen de 7,06 et comportent trois (3) puits où les eaux ont des pH en dessous de 4. Quant aux eaux de surface, elles sont neutres. Les eaux sont peu minéralisées avec des valeurs comprises entre 46 et 676 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et une valeur moyenne de 278 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les températures varient entre 25,3 et 29°C avec une moyenne de 27°C.

Les cations majeurs ont des valeurs dans la plupart des cas très faibles. Dans l'ensemble, la répartition des cations majeurs suit l'ordre de décroissance suivant : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$. Mg^{2+} et K^+ sont dans les mêmes proportions et le rapport Na/K est presque voisin de 4.

La répartition des anions majeurs suit l'ordre de décroissance suivant : $\text{NO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- >> \text{SO}_4^{2-}$. La moyenne des teneurs (50,57 mg/L) est supérieure à la valeur guide fixée par l'OMS. Les puits AB1, B2, AB3, N1, N5, N6, N3, Z2 et Y2 ont les plus fortes concentrations qui sont comprises entre 70 et 157 mg/L. Il faut aussi souligner que dans ces eaux le pH est très acide (situé entre 3,85 et 4,3) et aussi les concentrations en HCO_3^- sont très faibles voire nulles. Les cartes de répartition spatiale des teneurs en NO_3^- et le pH sont représentées à la figure 4 illustrent bien cela.

De par leur pH très acide (5 en moyenne), les eaux souterraines du département ne contiennent que des ions HCO_3^- et pas d'ions CO_3^{2-} . Ce dernier se retrouve en solution pour des pH supérieurs à 8,3. Nous remarquons que les ions HCO_3^- ont une concentration moyenne inférieure par rapport à celle des nitrates dans les aquifères d'altérites (25,89 mg/L contre 50,57 mg/L). Les concentrations en Cl^- sont faibles si on les compare à la valeur guide de non dépassement qui est de 250 mg/L. Avec une moyenne de 33,33 mg/L les ions Cl^- sont situés en deuxième place des anions les plus abondants rencontrés dans les eaux d'altérites du département. Les sulfates avec une moyenne de 3,5 mg/L sont les anions les plus faibles.

Tableau 1: Paramètres physico-chimiques et chimiques des nappes d'altérites du département d'Abengourou

Nom	Cond	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Al ³⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺
B3	83	6,09	9,2	1,55	3,61	8,22	0,06	62	3	0	0,09	0,11	0,97
N5	340	4,53	2,9	5,83	25,2	13	83	0,1	38	0	0,57	0,17	2,79
N2	60	4,98	2,2	0,78	7,43	0,89	2,11	12,5	10	3	1,02	0	0,02
N1	676	4,08	12,3	5,12	43,5	38,5	157	0	48	5,5	2,61	0,46	0,07
AB1	490	3,96	9,05	7,3	42,2	10,4	131	0	50	0,3	1,62	0,31	0,4
B5	165	5,87	14,7	2,02	7,56	1,78	25,7	67	6	4,5	3,03	0	0,05
AB4	72	5,28	6,7	0,97	4,37	0,29	10,5	7,01	10	7	0,18	0,02	0,11
B2	107	5,48	5,4	1,08	70	0,89	121	0	50	25,6	0,49	0,05	0,03
AM1	69	4,74	4,14	0,83	7,85	0,59	1	2,13	19,6	9	0,2	0,06	0,15
AN1	121	4,57	2,95	2,44	12,4	0,59	17,6	17	14,5	0,1	0,36	0,65	0,04
B8	149	5,82	14,6	1,12	10,3	1,18	22,4	60	5	0,9	0,48	0,43	0,01
Z3	118	5,86	16,61	0,64	5,26	0,29	1,29	49	7	0,1	0,49	0,06	0,05
E1	106	4,74	3,38	1,45	12,2	0,59	18,5	30,5	9	0,07	1,9	0	0,05
B1	194	4,06	34,1	1,97	16,1	0,29	39	0	50	10	0,02	0,1	0,03
Z1	521	5,66	15,4	23,1	53,7	2,37	116	19,5	115	0,11	0,04	0,07	0,12
N6	405	4,15	4,92	4,6	50,3	8,59	141	0	33,5	0	1,06	0	0,52
B7	360	5,68	2,88	2,1	12	9,02	31,01	10	16	0,1	0,12	0,11	0,05
E3	654	5,89	11,2	12,31	58,5	20,1	42	110	75	7,11	0,8	0,07	0,03
AM3	361	6,3	13	5,84	24,3	1,48	28	79	29,5	0	0,07	0,05	0,05
AB2	342	6,02	31,8	2,29	23	1,78	37	46,3	37	10	0,03	0,05	0,08
AB5	46	5,07	2,66	0,62	4,45	0,29	2,63	11	9	3	0,17	0,57	0,04
AM2	318	6,41	3,24	2,94	14,8	2,66	28	42,7	13	0,1	1,14	0,42	0,08
B6	123	5,56	17,3	0,46	5,71	0,29	5,92	34,1	7	12	0,1	0,06	0,02
N3	444	4,53	7,81	7,51	51	12,1	114	11,6	63,5	0,1	0,29	0,41	0,23
N4	307	4,85	4,39	2,76	39,4	5,33	17,4	24,4	56	1,2	0,62	0,27	0,06
Z2	294	4,22	2,27	3,69	37,4	2,66	70,5	4,9	40	0	0,74	0,24	0,06
Y1	72	4,54	1,65	4,4	5,62	0,29	2,22	3,65	16,6	6	0,13	0	0,02
AB3	561	3,85	11,7	10,02	18,8	32,6	120	0	49	0,08	3,44	0,01	0,4
Y4	345	6,27	15,5	0,37	38,6	3,26	3,6	68	70	0,1	1,14	0,05	0,08
B4	345	6,27	7,55	3,64	19,3	1,48	32	42,7	15,8	0,2	1,24	0,21	0,07
Y3	240	4,21	4,53	3,35	21,3	2,96	23	13,4	23,9	13	0,79	0,22	0,21
Y2	393	4,7	8,77	5,42	38	14,5	125	4,26	49,8	0	0,39	0	0,33
FC	87	7,18	2,39	3,05	6,18	1,48	1,97	50	16,5	2	7,91	0	0,04
RB	97	6,99	12,4	4,74	1,63	0,56	1,72	27,8	13,3	4,25	-	-	-
RM	139	7,01	8,4	2,79	13	1,48	0,83	45,1	23,5	2	1,36	1,93	0,05

N.B. La conductivité (Cond) est en $\mu\text{S/cm}$. A partir de la colonne 4, les unités sont en mg/L.

Tableau 2 : Statistique descriptive des résultats physico-chimiques des nappes d'altérites d'Abengourou

Paramètres statistiques	Min (m)	Moy (μ)	Max (M)	Ecart-T ()	CV (/μ)	Normes OMS
pH	3,85	5,13	6,41	0,79	0,16	6,5 pH 8,5
Cond(μS/cm)	46	278	676	190,19	0,66	400
HCO ₃ ⁻	<1	25,89	110	22,91	1,02	-
Cl ⁻	3	33,3	115	25,9	0,78	200
SO ₄ ²⁻	<1	3,54	37,7	8,19	2,31	250
NO ₃ ⁻	< 1	52,8	157	24,5	0,46	50
Ca ²⁺	1,65	9,74	34,12	8,07	0,83	100
Mg ²⁺	0,31	4,05	23,1	4,66	1,15	50
Na ⁺	3,61	24,8	70	19,41	0,78	150
K ⁺	0,3	6,5	39	9,5	1,5	12
Al ³⁺	0,022	1,017	7910	1478	1,45	0,4
Fe ²⁺	13	204	1,93	0,35	1,71	0,3
Mn ²⁺	<5	0,21	2,79	0,49	2,33	0,5

N.B. À partir de la colonne 4, les concentrations sont en mg/L

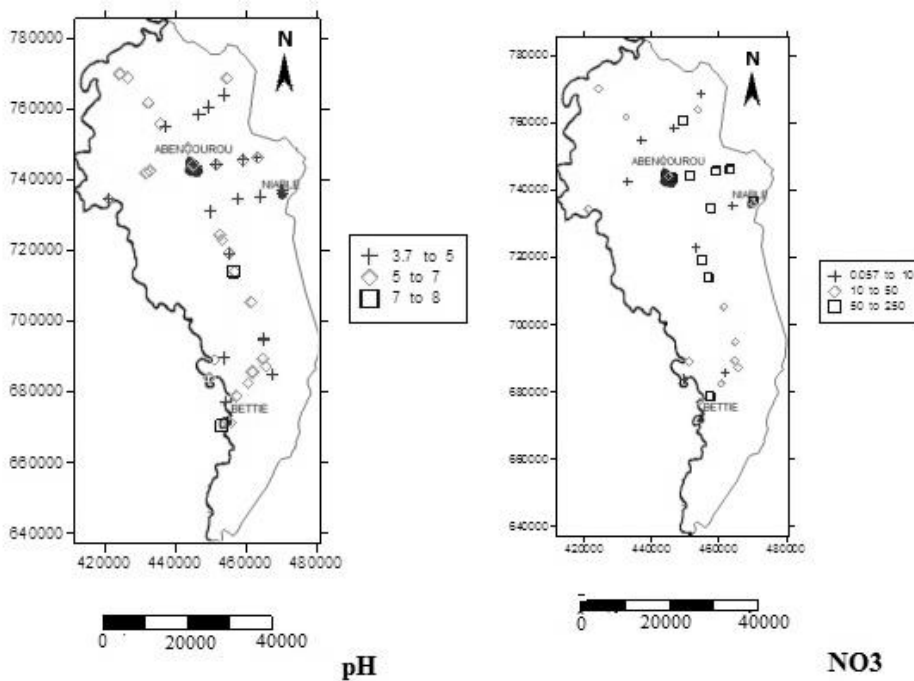


Figure 4 : Répartition spatiale des du pH et des teneurs en NO₃⁻ du département d'Abengourou

Faciès hydrochimique

La figure 5 reproduit la position des eaux dans le diagramme de Piper. Cette représentation permet de comparer aisément des échantillons d'eau.

La forte dispersion des points, particulièrement au niveau du triangle des anions, indique que plusieurs processus de minéralisation interagissent au sein des aquifères et eaux superficielles. Les eaux du département d'Abengourou, toutes formations confondues, montrent dans le losange majoritairement, 4 classes hydrochimiques : nous avons les eaux chlorurées calco-magnésiennes (28%), les eaux bicarbonatées, calco magnésiennes (34%), les eaux chlorurées ou nitratées, sodi-potassiques qui sont les plus nombreuses (50%). Un seul échantillon se retrouve dans la classe bicarbonatée sodi-potassique. La majorité des eaux de forage se retrouve dans les classes bicarbonatées et chlorurées calco-magnésiennes et les eaux de puits dans la classe chlorurée sodi-potassique.

Dans chaque classe, on rencontre une diversité de lithologie de l'encaissant. À cette échelle d'analyse, on peut dire que la chimie des eaux du département est indépendante de la lithologie des aquifères rencontrés.

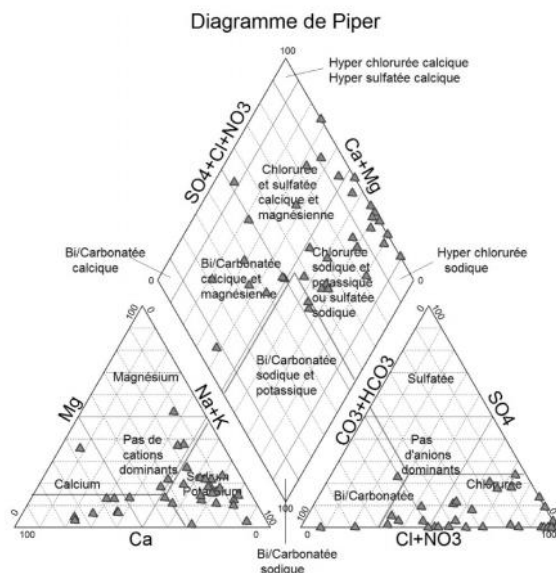


Figure 5: Représentation des eaux du département dans le diagramme de Piper.

Analyse en composante principale (ACP)

- **Analyse des matrices de corrélation**

Les analyses en composantes principales (ACP) ont porté sur les variables suivantes : pH, conductivités et ions majeurs. La conductivité est bien corrélée aux ions NO₃⁻(0,71), Cl⁻(0,71), Na⁺(0,67), K⁺ (0,76), Mg²⁺ (0,68) (Tableau 3). Ces corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations de teneurs de ces différents ions. Ceci indique également que ces différents paramètres ont tendance à évoluer concomitamment, soit par concentration sous l'effet de l'évaporation, soit par des apports d'ions issus de sources communes par exemple. Il n'existe pas de corrélation entre les alcalino-terreux (Ca²⁺ et Mg²⁺). Mg²⁺ est moyennement corrélé avec les alcalins, principalement Na⁺ (0,53) et les anions Cl⁻ (0,76) et NO₃⁻ (0,54). Ces derniers (Na⁺, NO₃⁻ et Cl⁻) sont également très bien corrélés entre eux. Le pH est fortement corrélé à l'anion HCO₃⁻ (0,74), et il existe une moyenne corrélation négative avec NO₃⁻ (-0,52) et une faible corrélation négative avec K⁺ (-0,34). La corrélation est également négative pour NO₃⁻ et

Tableau 3 : Matrice de corrélation des nappes d'altérites

	Cond	pH	Fe	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Al ³⁺	Mn	K ⁺	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻
Cond	1,0												
pH	-0,2	1,0											
Fe	-0,1	0,2	1,0										
Ca²⁺	0,2	0,1	-0,1	1,0									
Mg²⁺	0,7	-0,1	-0,0	0,1	1,00								
Na⁺	0,67	-0,2	-0,1	0,0	0,5	1,0							
Al³⁺	0,7	0,2	-0,0	-0,2	0,0	-0,1	1,0						
Mn	0,1	-0,2	-0,1	-0,16	0,1	0,0	-0,1	1,0					
K⁺	0,8	-0,4	-0,0	0,0	0,4	0,4	0,2	0,3	1,0				
NO₃⁻	0,7	-0,5	-0,1	0,0	0,5	0,7	0,1	0,2	0,7	1,0			
HCO₃⁻	0,0	0,7	0,0	0,3	0,0	-0,1	0,1	-0,2	-0,1	-0,5	1,0		
Cl⁻	0,7	-0,2	-0,1	0,3	0,8	0,8	-0,1	0,1	0,4	0,6	-0,1	1,0	
SO₄²⁻	-0,2	-0,1	-0,1	0,2	-0,2	0,2	-0,1	-0,2	-0,1	0,0	-0,1	0,0	1,0

HCO₃⁻ (-0,46). Le pH présente également une faible corrélation négative avec la conductivité électrique et le Cl⁻ de l'ordre de -0,2. La baisse des pH (acidification) semble être liée à une hausse de la minéralisation totale (conductivités) et à des apports en ions NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺ suivis d'une baisse des concentrations en HCO₃⁻.

Aucune corrélation n'est observée entre le SO_4^- , ion le moins présent dans les aquifères et les autres variables. Les cations échangeables Na^+ - Ca^{2+} , Na^+ - Mg^{2+} , K^+ - Na^+ sont corrélés positivement. Aucune corrélation négative entre ces cations n'est observée.

Il est probable que la hausse et/ou la baisse des teneurs en cations soit liée aux effets combinés des apports de surface (atmosphériques et anthropiques), d'eaux de formations différentes (aquifère du socle sous-jacent), et des processus de concentration par évaporation.

La faible corrélation entre le HCO_3^- et les cations montrent que la dissolution incongruente des minéraux silicatés comme pour les aquifères de fracture, n'est pas le seul processus conduisant à la mise en solution de ces cations. D'autres sources (atmosphérique et anthropique) et d'autres processus interviennent dans la minéralisation de ces eaux comme le montrent les différentes corrélations observées.

- **Analyse de l'espace des variables du plan factoriel F1xF2**

Les données sont représentées dans l'espace réduit des deux premières composantes principales sur la figure 6.

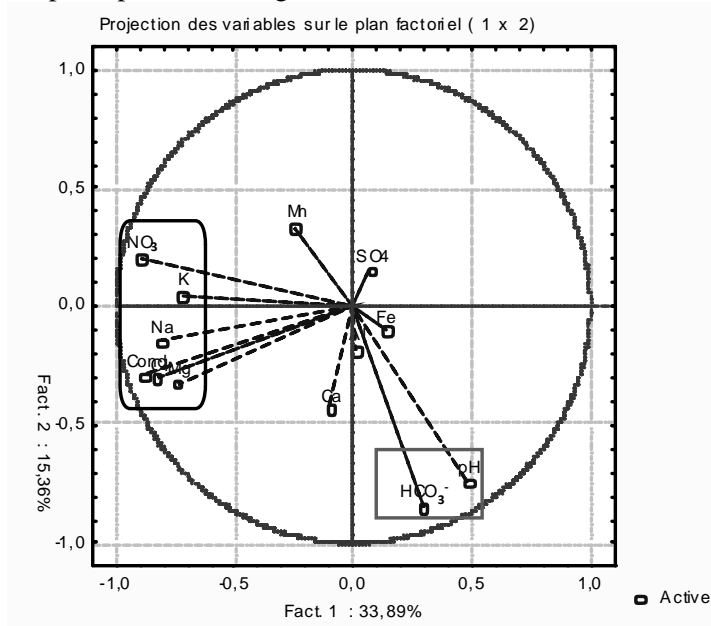


Figure 6 : Espace des variables du plan factoriel F1xF2

Ce plan représente 49,25% de la variance pour l'analyse des variables utilisées. Le facteur 1 avec 33,89% de la variance totale est représenté par la conductivité, les cations K^+ , Mg^{2+} et Na^+ ainsi que les anions NO_3^- et Cl^- . Cet axe exprime une

minéralisation superficielle d'origine anthropique ou atmosphérique. Le facteur 2 avec 15,38% de la variance regroupe l'ion HCO_3^- et le pH et représente l'hydrolyse acide des roches. La répartition des analyses dans le plan des axes 1-2 montre d'une part, l'influence du pH et de l'ion HCO_3^- sur les eaux les moins chargées, d'autre part que les eaux les plus chargées sont caractérisées le plus souvent par le groupement K^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- et NO_3^- .

• **Projection dans l'espace des individus**

À l'observation de la projection des individus sur le plan factoriel F1×F2 (figure 7), nous pouvons regrouper les puits en trois familles :

- Famille 1 est constituée des eaux très acides, fortement minéralisées et ayant des teneurs très élevées en nitrates (NO_3^-) (supérieures à la norme OMS) et chlorures. Cette famille regroupe 12 puits c'est-à-dire 37,5% du total des puits échantillonnés ;
- La famille 2 est constituée de puits ayant des eaux très acides, faiblement minéralisées et des teneurs faibles de nitrates. Ces eaux proviennent de 10 puits ;
- La famille 3 quant à elle représente les eaux peu minéralisées à pH moyennement acides à neutre et ayant des teneurs élevées en HCO_3^- . Ces eaux proviennent aussi de 10 puits.

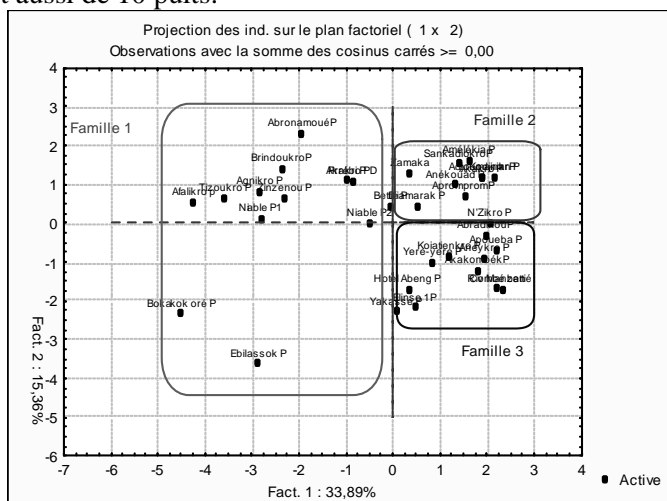


Figure 7 : Espace des unités statistiques du plan factoriel F1×F2

Il faut souligner que les deux premières familles montrent l'importance des apports superficiels (végétation, sols, pollution) dans la minéralisation des nappes d'altérites. Et la famille 3 est liée à la lithologie et à l'hydrodynamique.

Pour le suivi hydrochimique des puits du département, nous pouvons nous référer à seulement 8 puits au lieu des 32. Un nombre de 4 puits peuvent être pris dans la classe 1, 2 puits dans la classe 2 et 2 autres dans la classe 3.

Éléments métalliques en traces

Le fer

La concentration moyenne en fer des eaux du département est de 160 µg/L, et est en dessous du taux de non dépassement qui pourrait causer des problèmes d'ordre esthétique, 200 µg/L, fixée par l'OMS. On constate néanmoins que 10 points d'eaux souterraines soit 31% du total des puits échantillonnés, ont des concentrations supérieures à la concentration maximale admise. La plus forte concentration a été obtenue dans les eaux superficielles principalement dans la rivière Manzan (RM) et est de 1,93 mg/L.

Le manganèse

Les teneurs en Mn sont faibles dans la plupart des ouvrages échantillonnés. Sa concentration varie de 2 µg/L à 2800 µg/L avec une valeur moyenne de 226 µg/L et est supérieure à 400 µg/L (valeur supérieure admissible par les normes OMS) dans 4 puits du département (B3, N5, N6, AB3). Nous remarquons que ces puits ont des valeurs de pH très bas.

L'aluminium

L'aluminium est le métal en trace le plus représenté dans les nappes d'altérites du département d'Abengourou. Les concentrations varient de 0 à 3140 µg/L avec une valeur moyenne de 871 µg/L. On rencontre les concentrations les plus élevées dans les eaux de surface (4630 µg/L) et les altérites (871 µg/L). Approximativement 69% (22 points de prélèvement) des eaux souterraines étudiées ont des concentrations supérieures à la norme OMS dont la teneur de non dépassement est fixée à 200 µg/L. Tous les cours d'eau ont des teneurs élevées et la valeur maximale (7912 µg/L) a été enregistrée dans les eaux de la Comoé à Abradinou (FC).

Etat microbiologique des eaux de puits en Août 2010

Les résultats des analyses qui ont été faites uniquement sur les eaux d'aquifères d'altérites concernent 32 puits domestiques et sont indiqués dans le tableau IV.

L'étude bactériologique a pour but la détection de la pollution fécale. Les déjections humaines et animales constituent la principale source potentielle de germes pathogènes (causes d'entéropathies chez l'homme) (Boubakar Hassane, 2010).

La classification des eaux en fonction de la quantité de coliformes contenus dans celles-ci établie par l'OMS en 1992 met en évidence trois classes (Ahoussi, 2008) :

- classe I : eau de bonne qualité ; elle est représentée par des taux de coliformes inférieurs à 10 coliformes/100 ml. Cette eau peut être utilisable après désinfection ;
- classe II : eau moins bonne ; le taux de coliformes est compris entre 10 à 100 coliformes/100 ml. Cette eau est polluée et ne doit être utilisée qu'après un traitement approprié ;
- classe III : eau de mauvaise qualité ; taux de coliformes supérieur à 100 coliformes/100 ml.

À l'analyse du tableau, les valeurs de CF dans les échantillons d'eau prélevés dans 9 puits du département sont hors normes. Sur ces 9 puits, 7 sont représentés dans la classe II et seulement deux (2) sont dans la classe III. Ce sont les puits E1, situé en contre bas d'un cimetière et E3 situé à proximité de latrines. Quant aux autres puits, l'origine des contaminations en germes d'origine fécale proviendrait des cordelettes qui servent à puiser l'eau. Ces dernières sont la plupart du temps exposées à même le sol ou souvent contaminées par les mains souillées de certains utilisateurs. Sur le plan microbiologique, la qualité des eaux du département, n'est pas à déplorer malgré qu'un grand nombre de puits soient mal entretenus. Cela pourrait être imputé à l'acidité des eaux d'altérites qui inhiberait la prolifération d'organismes microbiologiques dans ces milieux. Car l'analyse du tableau 4 montre que les eaux exemptes d'E. Coli proviennent des puits ayant un pH compris entre 3 et 5. En effet, Samaké (2002) a montré dans une étude menée dans les eaux de la commune de Bamako que pour des pH compris entre 3 et 5, l'activité des microorganismes était faible à nul.

Tableau 4 : Résultats microbiologiques des puits du département d'Abengourou

Localités	pH	E. Coli (UFC/100mL)	Localités	pH	E. Coli (UFC/100 mL)
Bettié (B1)	4,12	0	Niab 2 (N3)	5,11	0
Akrébi (B2)	3,76	0	Abron (N5)	4,7	0
Eau source	5,18	20	Brind (N6)	4,33	0
Yere (B4)	4,93	0	Tizou (AB3)	4,16	0
Akaco (B5)	5,7	100	Zinzé (Y2)	5,16	0
N'zikro (B6)	5,42	30	Zamaka (Y3)	4,69	0
Diamb (B7)	5,43	0	Yaka (Y4)	6,89	0
Aney (B8)	6,01	10	Sanka (Y1)	4,75	10
Aprom (E1)	5,06	120	Akak (AB4)	5,17	60
Ebila (E3)	5,99	160	Abeng (AB2)	5,95	0
Boka (Z1)	5,58	0	Agni (AB1)	3,8	0
Prakro (Z2)	4,4	0	Amé (AM1)	4,42	0
Apoue (Z3)	5,41	0	Koit (AM2)	6,19	0
Afali (N1)	4,23	0	Elins (AM3)	5,63	10
Adjou ((N2)	5,25	0	Kodji (AB5)	4,6	0
Nia 2 (N4)	5,21	0	Anék ((AN1)	4,7	0

DISCUSSIONS

Les analyses *in situ* réalisées sur les eaux des nappes superficielles du département d'Abengourou montrent que les eaux sont peu minéralisées avec une conductivité moyenne de 278 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux d'altérites sont acides avec un pH qui varie de 3,85 à 6,4. Quant aux eaux de surface, elles ont un pH neutre. L'acidité des eaux constitue un des caractères essentiel des eaux souterraines en Côte d'Ivoire (Ahoussi et al, 2013) et particulièrement dans les eaux du sud-est de la Côte d'Ivoire à substratum schisteux (Faillat et Blavoux, 1989, Kortatsi, 2007) dont fait partie le département d'Abengourou. En effet des études récentes (Matini et al., 2009, Ahoussi, 2008) ont montré que l'acidité des eaux en zone tropicale humide est essentiellement liée à la décomposition de la matière organique végétale. Le département étant une zone d'activité agricole, la minéralisation de la matière organique présente dans le sol, sous l'action de l'oxygène, dégage du CO_2 . La présence dans l'eau de CO_2 provenant des sols facilite l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO_3^- selon la réaction :

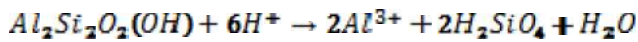
Les analyses multivariées ont montré une étroite corrélation entre le pH et le HCO_3^- . En effet, nous avons remarqué que pour des pH très acides, les valeurs

de HCO_3^- étaient très faibles, voire nulle. Le département étant une zone forestière à dominance agricole, l'utilisation des fertilisants dans la minéralisation a favorisé l'enrichissement des eaux en sels nutritifs principalement en nitrate. En effet si les teneurs en ions majeurs dans les eaux du département sont dans la majeure partie des cas, inférieures aux normes OMS ce n'est pas le cas des ions nitrates. La concentration moyenne en cet élément (50,57 mg/L) est supérieure à la norme. Nous avons plus de 28% des ouvrages qui présentent des eaux dont la teneur en NO_3^- est largement supérieure à 50 mg/L et plus de 40% dont la teneur est comprise entre 15 et 50 mg/L. Or selon Ratel (1992), la concentration en ion NO_3^- dans les eaux naturelles en absence de pollution est de quelques milligrammes par litre. Cela montre l'ampleur de la pollution nitratée de la zone. Les sources de cette pollution aux nitrates dans le département d'Abengourou sont nombreuses. On peut citer pêle mêle une origine domestique et industrielle rencontrée dans les villes du département d'Abengourou (Abengourou, Niablé, Béttié) et leurs environs à travers les égouts, les déchets organiques rejetés par les fosses septiques ou épandus sur le sol ; une origine agricole car les productions agricoles sont dépendantes de la qualité de matières azotées présente dans le sol. C'est pourquoi les agriculteurs utilisent largement des engrais azotés, dont les nitrates pour suppléer le faible rendement des terres de la région, fortement dégradées par les exploitations abusives. Mais la source qui est de loin la plus importante en pollution nitratée est la déforestation. En effet les fortes teneurs en nitrates rencontrées dans les ouvrages qui sont dues au lessivage des sols et à la décomposition de la matière organique ou bien à une rupture du cycle de l'azote sont liées à la déforestation (Elbaz-Poulichet et al., 2002). Selon Lavollay (1980), l'azote représente environ 3,5% en poids d'une plante banale vivante et 1,5% de sa matière sèche. Or en forêt intertropicale humide comme le souligne Rougerie (1983), la matière végétale peut représenter jusqu'à 1500 tonnes à l'hectare.

La zone d'étude à l'instar de la Côte d'Ivoire a vu son couvert forestier diminuer de plus de 90% depuis les années 1950 à aujourd'hui. Si bien que dans les sols, sur une épaisseur de 50 cm, Faillat et al. (1988) on estimé le stock de matière végétale de l'ordre de 2 à 7 tonnes par hectare dans le sud de la Côte d'Ivoire. Nous avons aussi remarqué que les ouvrages dont les eaux ont un pH très acide ont une très faible teneur en HCO_3^- et une concentration élevée en NO_3^- . Cette même acidité a une incidence sur les teneurs en métaux en trace. En effet, selon Helmer et al (1995), la solubilité du Mn^{2+} et du Fe^{2+} sont dépendantes du pH et du potentiel d'oxydo-réduction de l'eau. Quant à l'aluminium, les concentrations élevées rencontrées sont dues aux lessivages des aluminosilicates contenus dans les argiles et dans des conditions de pH très acides (pH 4,5). Kortatsi (2007) a fait les remarques similaires lors d'une étude menée dans le bassin versant de la rivière Ankobra au Ghana.

Pour lui, la dissolution de la kaolinite ou de l'alunite dans les horizons d'altérites fournit une capacité supplémentaire de neutralisation de l'acide par

l'eau souterraine et semble être la principale source d' Al^{3+} dans les eaux à faible pH. La réaction de dissolution de la kaolinite dans les eaux à faible pH est donnée par l'équation suivante :



L'encyclopédie libre Wikipédia affirme selon des études que dans certaines conditions, l'aluminium est reconnu pour ses effets neurotoxiques. L'« encéphalopathie des dialysés » (ou « démence des dialysés ») observée dès 1972, a pu être attribuée en 1978 à l'aluminium contenu dans le dialysat, qui s'ajoute à un apport oral d'hydroxyde d'aluminium visant à contrôler l'hyperphosphorémie du patient. Des personnes exposées à l'aluminium (suite à un traitement de dialyse) peuvent développer des complications au niveau du système nerveux central, la myofasciite à macrophages, l'encéphalopathie, l'épilepsie et des troubles de mémoire. Une étude récente (Guillard et al., 2012) a montré *in vitro* les effets néfastes des sels d'aluminium (chlorhydrate d'aluminium et chlorure d'aluminium) sur les cellules épithéliales mammaires humaines. Tout cela avec des doses 1500 à 100000 fois inférieures à celles que l'on retrouve dans les déodorants contenant des sels d'aluminium du commerce. Les eaux étudiées contiennent des coliformes fécaux du type *Escherichia Coli* dans 28% des cas. La présence de ces bactéries dans l'eau démontre que celle-ci a été polluée par des déchets d'origine humaine ou animale. Comme ces déchets pourraient provenir de personnes souffrant de maladies intestinales ou porteuses de germes de ces maladies, il s'ensuit que, dans l'eau qui en a été polluée, il est probable qu'il existe, outre les bactéries coliformes, des bactéries intestinales pathogènes (Samaké, 2002).

En effet les localités dans lesquelles ont été prélevés les échantillons, comme dans la quasi-totalité des villages de la Côte d'Ivoire sont dépourvues d'un système d'assainissement adéquat. Les latrines étant inexistantes, les populations font leur besoin personnel dans la nature, ajoutée à ceux des animaux d'élevage. En Côte d'Ivoire, l'origine de la pollution fécale des ressources en eau a été mise en évidence par Ahoussi et al., (2008, 2012a, 2013) dans les eaux de surface et les eaux souterraines des localités d'Abidjan, de N'Zianoua, de Mangouin-Yrongouin. Dans la communauté urbaine de Niamey au Niger, Boubakar Hassane (2010) a fait le même constat dans les eaux de surface et souterraine. L'influence des activités anthropiques sur la qualité des eaux s'observe également dans la région de l'oued Khoumane au Maroc (Ben Moussa et al, 2012).

CONCLUSION

Les études réalisées dans le département d'Abengourou ont permis une caractérisation hydrochimique et microbiologique des aquifères d'altérites. Cette étude montre que les eaux de puits sont très vulnérables à la pollution

d'origine anthropique. Les eaux, dans leur grande majorité ne sont pas aptes à être consommées comme eau de boisson. Les paramètres tels que le pH, les nitrates (NO_3^-), le fer (Fe^{2+}), l'Aluminium (Al^{3+}) et les coliformes fécaux les déclassent de l'utilisation eau de boisson. La présence des microorganismes dans les eaux du département d'Abengourou montre que celles-ci sont exposées à une pollution microbiologique fécale d'origine humaine. Cette pollution détériore gravement la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux. Malheureusement les populations de cette zone utilisent ces eaux souterraines comme eau de boisson. Ceci représente un problème grave de santé publique.

L'application des méthodes exploratoires multivariées (analyse factorielle et classification ascendante hiérarchique) a permis d'identifier les paramètres les plus importants qui décrivent la qualité de ces eaux souterraines et aussi la réduction du nombre des points de prélèvements dans le cadre d'une étude possible du suivi temporel et spatial de leur qualité.

La minéralisation des eaux est contrôlée par des phénomènes tels que les apports atmosphériques, anthropiques et l'hydrolyse acide des roches.

REFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AHOUSSE K. E. (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville, mém. de thèse de l'Univ. de Cocody, option hydrologie, hydrogéologie, 270 p.
- AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., SORO G., SORO N., BIEMI J. (2012a). Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 6(4): 1854-1873
- AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., SORO G., BIEMI J. (2013).: Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman). Journal of Applied Biosciences 63: 4703 – 4719.
- BEN MOUSSA A., CHAHLAOUI A., ROUR E.H., CHAHBOUNE M., ABOULKACEM A. (2012). Étude du changement de l'état des eaux de l'oued Khoumane a la confluence avec les eaux thermales de la source Ain Hamma Moulay Idriss (Maroc), Larhyss Journal, 11 (2012), 17-36
- BRICHA S., K. OUNINE, S. OULKHEIR, N. EL HALOUI et B. ATTARASSI (2007). Étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra, Maroc. Afrique SCIENCE 03(3), 391 – 404.
- BOUBAKAR HASSANE A. (2010). Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER), Thèse de l'Univ. Abdou Moumouni de Niamey (Niger), 198 p.

- BOUKARI M., GAYE C. B., FAYE A. ET FAYE S. (1996). The impact of urban development on coastal aquifers near Cotonou, Benin. *J Afr Earth Sci*, 22: 403-408.
- CISSÉ FAYE S., FAYE S., WOHLNICH S. ET GAYE C. B. (2004). An assessment of the risk associated with urban development in the Thiaroye area (Senegal). *Environ Geol*, 45: 312-322.
- COULIBALY A., MONDÉ S., WOGNIN V. A., AKA K. (2008). State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metalelements traces. *European Journal of Scientific Research*, 19(2): 372-390.
- ELBAZ-POULICHET F., FAVREAU G., LEDUC C. ET SEIDEL J. L. (2002). Major ion chemistry of groundwaters in the Continental Terminal water table of southwestern Niger (Africa). *Applied Geochemistry*, 17: 1343-1349.
- FAILLAT J.P. ET BLAVOUX B. (1989). Caractères hydrochimiques des nappes des roches endogènes fissurées en zone tropicale humide : l'exemple de la Côte d'Ivoire. *J. Afri. Earth. Sc.*, Vol. 9, n°1, 31- 40.
- FOSTER S. S. D. (2001). The interdependence of groundwater and urbanisation in rapidly developing cities. *Urban water*, 3(185-192).
- GUILLARD O, FAUCONNEAU B, FAVREAU F, MARRAUD A, PINEAU A.(CHU Poitiers, Laboratoire de Biochimie, Poitiers, France) (2012). An analytical procedure for the determination of aluminum used in antiperspirants on human skin in Franz™ diffusion cell; *Toxicol Mech Methods*. Apr;22(3):205-10. doi: 10.3109/15376516.2011.610386.
- HELMER, R., PAUL BLANC M., BALLANCE R.C. (1995) : Guide pratique GEMS/EAU, chapitre III, 40 p.
- KORTATSI B.K. (2007). Hydrochemical framework of groundwater in the Ankobra Basin, Ghana. *Aquat. Geochem.* 13, pp. 41-74.
- LAVOLLAY J. (1980). La chimie des êtres vivants. Que sais-je ? *Presse Univ. Fr.*, Vol. 163, 7e Éd., 127 p.
- MATINI L., MOUTOU J.M. ET KONGO-MANTONO M.S. (2009). Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo, *Afrique SCIENCE 05(1) (2009)*, pp : 82 – 98.
- NKHUWA D. C. W. (2003). Human activities and threats of chronic epidemics in a fragile geologic environment. *Physics and Chermistry of the Earth*, 28: 1139-1149.
- RATEL M-O. (1992). Elimination des nitrates des eaux potables. Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. Direction de l'espace rural et de la forêt, doc. technique fndae hors série n°4 fonds national pour le développement des adductions d'eau. Office international de l'eau snide. 71 p.
- RODIER J. (2009). L'analyse de l'eau. Ed. Dunod Paris. ISBN: 978- 2-10-054179-9.
- ROUGERIE G. (1983). Les milieux Forestiers. Presse Universitaires de France, Paris, 171 p.

- SAMAKE H. (2002). Analyse physico-chimique et bactériologique au L.N.S. des eaux de consommation de la ville de Bamako durant la période 2000 et 2001, mémoire de thèse de la faculté de Médecine, de Pharmacie et d'Odonto-Stomatologie de l'Univ. de Bamako, Mali, 71 p.
www.google.wikipédia/aluminium, consultée le 07 juillet 2013.
- ZENG X., RASMUSSEN T.C. (2005). «Multivariate statistical characterization of water quality in lake Lanier, Georgia, USA». *J. Environ. Qual.*, 34, 1980-1991.