

Variation Saisonnière De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Souterraines Des Aquifères d'Altérites Du Département d'Agboville (Sud-Est De La Côte d'Ivoire)

Rodrigue Kotchi Orou

Gbombélé Soro

Université Félix Houphouët BOIGNY, Côte d'Ivoire

Drissa Tanina Soro

Université Jean LOROUGNON GUEDE, Côte d'Ivoire

Rosine Marie N'guessan Fossou

Université Nangui ABROGOUA, Côte d'Ivoire

Oscar Zahibo Onetie

Ernest Kouassi Ahoussi

Nagnin Soro

Université Félix Houphouët BOIGNY, Côte d'Ivoire

doi: 10.19044/esj.2016.v12n17p213 [URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n17p213](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n17p213)

Abstract

The main objective of this study was to evaluate the seasonal quality to explain the phenomena at the origin of the mineralization of groundwater in the department of Agboville. Hydrochemical analysis was performed in 24 wells located throughout the study area. Hydrochemical different methods and techniques of multivariate statistical analysis were used to study these waters. The physicochemical analyzes show that the water is acidic with an average pH of 6.09 in the rainy season and 6.29 in the dry season. Overall, these waters are soft and slightly mineralized with an average electrical conductivity of 172.92 $\mu\text{S} / \text{cm}$ in the rainy season and 196.71 $\mu\text{S} / \text{cm}$ in the dry season. These waters are mineralized in the dry season than rainy. The hydrochemical classification of water from the Piper diagram showed one hydrofacies is calcium chloride-facies. Quality chemical parameters are mostly below the WHO (2011) guideline values, except for some points (29.17%) where levels of nitrites and ammonium sometimes exceed the guide values. The various processes responsible for the acquisition of the chemistry of groundwater are studied: the residence time of water in contact with the host rock, the redox infiltration of

substances linked to human activities and litter decomposition. In the mineralization mechanisms, hydrolysis of silicates is the dominant process.

Keywords : Rainy season, dry season, contamination, nitrogenous compounds, well water

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la qualité saisonnière afin d'expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines du département d'Agboville. Une analyse hydrochimique a été réalisée dans 24 puits répartis sur l'ensemble de la zone d'étude. Les différentes méthodes hydrochimiques et les techniques d'analyse statistique multivariée ont permis d'étudier ces eaux. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux sont acides avec un pH moyen de 6,09 en saison pluvieuse et de 6,29 en saison sèche. Dans l'ensemble, ces eaux sont douces et faiblement minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 172,92 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison pluvieuse et 196,71 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison sèche. Ces eaux sont plus minéralisées en saison sèche que pluvieuse. La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme de Piper a mis en évidence un seul hydrofaciès qui est le faciès chloruré calcique. Les paramètres chimiques de qualité sont pour la plupart au-dessous des valeurs guides de l'OMS (2011), exceptés quelques points (29,17%) où des teneurs de nitrites et ammonium dépassent parfois les valeurs guides. Les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines étudiées sont : le temps de séjour des eaux en contact avec l'encaissant, l'oxydo-réduction, l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques et la décomposition de la litière. Dans les mécanismes de minéralisation, l'hydrolyse des silicates est le processus le plus dominant.

Mots-clés : Saison pluvieuse, saison sèche, contamination, composés azotés, eaux de puits

Introduction

Le problème des ressources en eau se pose avec acuité du fait de leur irrégularité dans le temps et dans l'espace. Cette irrégularité des ressources en eau induit des crises liées soit à son manque ou à son excès. Une eau est contaminée naturellement ou sous l'effet de l'activité humaine, elle devient impropre à toutes utilisations d'où elle présente un danger pour l'environnement. Le degré de contamination ou de pollution est apprécié par la mesure de l'écart ou de la différence entre le chimisme naturel de l'eau qu'il soit à l'échelle locale ou régionale et un certain chimisme nouvellement acquis suite à l'intervention négative de l'homme sur

l'environnement hydrogéologique si la concentration de certains éléments dépasse les normes de potabilité (Belkhir, 2011). 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 visent à mieux les connaître. Le partage de ces ressources est devenu une préoccupation pour tous les acteurs de ce domaine (Jourda, 2005). Malheureusement, le territoire national est occupé à 97,5% par les terrains cristallins et cristallophylliens, et 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 (Biémi, 1992). 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 (Ahoussi et al., 2012b). Dans le département d'Agboville, les forages réalisés dans le cadre des différents programmes d'hydrauliques villageoises sont pour la plupart détériorés ou abandonnés. La population de cette localité qui est essentiellement rurale se tourne de plus en plus vers les eaux de puits et les utilise pour leurs besoins domestiques en ignorant la qualité de ces ressources (Ahoussi, 2008). Les études réalisées en Côte d'Ivoire dans le but d'évaluer la qualité de l'eau souterraine ont signalé plusieurs foyers de contamination dont Soro (2014) dans le bassin versant du Haut Bandama à Tortiya ; Eblin et al. (2014) dans la région d'Adiaké ; Soro (2010) dans le District de Yamoussokro ; Soro et al. (2010), Ahoussi et al., (2012b) et Raya et al. dans la région d'Abidjan et d'Agboville. Cette pollution est causée par l'intensification des activités agricoles, industrielles, domestiques et la variabilité climatique. Les travaux effectués par Ahoussi et al., (2010), Ahoussi (2008) et Goné et al., (2004) dans le département d'Agboville ont montré que cette zone subit une forte pression anthropique. L'eau qui est un élément indispensable à la vie et qui revêt de l'importance pour d'innombrables activités humaines a permis et a favorisé le développement des activités agricoles et agro-industrielles par les bonnes conditions naturelles de la zone d'étude. Un diagnostic plus complet de la situation actuelle de la contamination et un suivi rigoureux de son évolution, s'avèrent d'une grande nécessité pour la sauvegarde de cette ressource. C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail dont le but est d'évaluer la qualité saisonnière des eaux de puits du département d'Agboville afin d'expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux.

Zone d'étude

Situation géographique

Situé dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 5°35N et 6°15N, et les longitudes 3°55W et 4°40W (figure 1). Le département d'Agboville couvre une superficie d'environ 3850 km² avec une population de 292190 habitants (Anonyme, 2014).

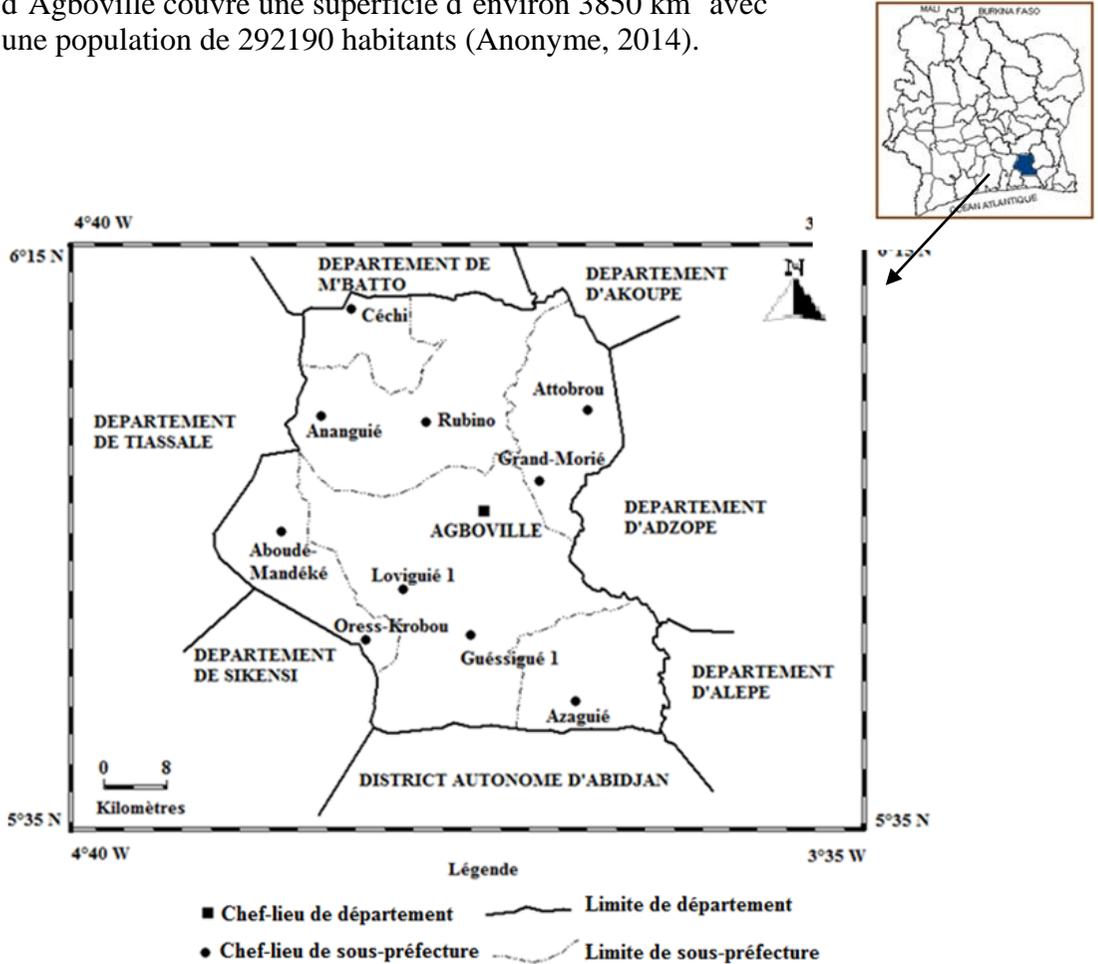


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

La population de cette localité est essentiellement rurale et a pour activités principales l'agriculture. La végétation est marquée par le type ombrophile pour le tiers sud et le reste par le type mésophile dominé par les tulpiers du Gabon et les fromagers.

Contexte géologique et hydrogéologique du département d'Agboville

- **Contexte géologique**

La géologie de la zone d'étude est constituée de formations birimiennes et éburnéennes auxquelles sont associées des auréoles

métamorphisées (Ahoussi, 2008). Les formations birimiennes sont les schistes, les quartzites, les métaarénites et les métasilstones (Ahoussi, 2008). Les formations éburnéennes sont essentiellement composées de granites à deux micas, granites à muscovite, granites à biotite, de gneiss et des roches filoniennes (pegmatites et filons de quartz) (Ahoussi, 2008). Les formations qui affleurent dans la région sont attribuées au Paléoprotérozoïque et définissent le cycle de dépôt birimien. Leur origine est essentiellement sédimentaire (Papon, 1973 ; Tapsoba-Sy, 1995 ; Ahoussi, 2008).

- **Contexte hydrogéologique**

Les aquifères des altérites se développent dans les formations argilo-sableuses de la couche d'altération issue de l'altération et du lessivage des formations géologiques (Lasm, 2000 et Tastet, 1979). L'épaisseur des altérites dans le département d'Agboville varie en moyenne entre 4 et 53 m (Ahoussi, 2008 et Orou, 2008). Il s'agit d'aquifères captés par les puits paysans et modernes dont la profondeur n'excède pas 30 m (Biémi, 1992). Ces puits sont les plus exploités dans les zones rurales car ils sont faciles d'accès (profondeur moins de 15 m) (Ahoussi, 2008). Les aquifères de fractures constituent des zones potentielles susceptibles de contenir d'importantes réserves d'eau souterraine capables d'approvisionner les populations en eau potable. Sur l'ensemble de la zone d'étude, ces aquifères sont interceptés par de nombreux forages et leur existence est liée à l'importance des fractures ouvertes.

- **Aperçu climatique et pluviométrique de la zone d'étude**

Le département d'Agboville est soumis à un climat équatorial de transition et caractérisé par 4 saisons dans l'année dont 2 saisons pluvieuses (avril à juillet et septembre à octobre) et 2 saisons sèches (novembre à mars et août à septembre) (Dembélé, 1989). C'est une zone très humide où les précipitations interannuelles sont supérieures à 1500 mm (Ahoussi, 2008). Le mois le plus chaud est celui de mars, avec 28,5°C de moyenne et le mois d'août est le plus froid, avec 24,5°C.

Matériel et méthodes

Matériel

Le matériel utilisé est essentiellement constitué de données cartographiques et hydrochimiques.

Données cartographiques

Pour mener à bien cette étude, les cartes topographiques et géologiques du degré carré d'Abidjan, de Dimbokro et de Grand-Bassam à l'échelle 1/200 000 ont été utilisées respectivement pour localiser et servir de support à la reconnaissance des formations géologiques de la zone d'étude.

Données hydrochimiques

Le rapport des analyses physico-chimiques des échantillons d'eau prélevés constituent les données hydrochimiques. L'échantillonnage a été réalisé sur 24 puits traditionnels dans le département d'Agboville (figure 2). Dans le cadre de cette étude, deux campagnes d'échantillonnage ont été menées en saison pluvieuse (19 au 25 septembre 2014) et en saison sèche (27 février au 04 mars 2015). La température, le pH, le TDS, l'Eh, l'oxygène dissous, la turbidité, la salinité et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés *in situ* avec un pH-mètre Hach HQ11D et un conductivimètre Hanna Instruments HI 98360. Les paramètres chimiques analysés au laboratoire du Centre Ivoirien Anti-pollution (CIAPOL) selon les techniques de Rodier (2009) et les normes AFNOR sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , PO_4^{3-} , NO_2^- et NO_3^- .

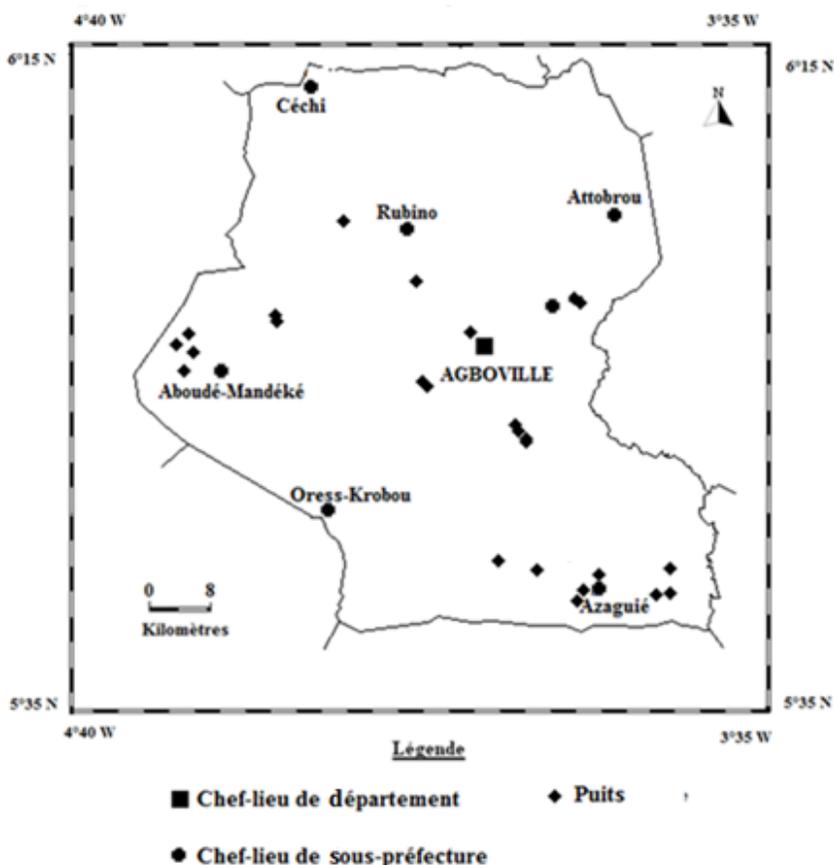


Figure 2 : Carte de répartition des ouvrages échantillonnés

Méthodes

Méthode d'échantillonnage et d'analyse

Les échantillons d'eau ont été prélevés selon les techniques de Rodier (2009) et les normes AFNOR. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire pour analyse. L'échantillonnage est réalisé à l'aide d'un seau muni d'une corde.

Méthode de traitement des données

La balance ionique a été appliquée et une erreur de moins de 10% a été acceptée pour la fiabilité des résultats des analyses. Le traitement des données physico-chimiques collectées sur les eaux souterraines du département d'Agboville a été réalisé à l'aide de méthodes hydrochimiques et statistiques multivariées. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper réalisé sous le logiciel Diagrammes du Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon (Simler, 2007) pour la classification hydrochimique. L'utilisation fréquente de ce diagramme en hydrochimie par de nombreux auteurs dont Soro (2014), Ahoussi et *al.* (2013), Kouzana et *al.* (2007), Kolsi et *al.* (2013), Lasm et *al.* (2012), Soro (2010) et Oga et *al.* (2009) 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, le regroupement des eaux et identifier les facteurs responsables de ces regroupements est basée sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Elle a donc pour but d'établir une relation entre les différents paramètres physico-chimiques et de mieux évaluer l'effet des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines échantillonnées. Son application dans le domaine des sciences de l'eau a déjà été réalisée par plusieurs auteurs en Afrique et dans le monde avec des résultats très intéressants dont les auteurs Reggam et *al.* (2015), Eblin et *al.* (2014), Soro (2014), Ahoussi et *al.* (2013), Gbolo et López (2013), Ahoussi et *al.* (2012a), Thilagavathi et *al.* (2012), AW et *al.* (2011), Kouassi et *al.* (2010), Soro (2010), Yidana et *al.* (2008), Ahoussi et *al.* (2008), El Morhit et *al.* (2008) et Yidana et *al.* (2007). L'analyse statistique a été réalisée sur 24 descripteurs et à l'ensemble des paramètres (18 variables) en période humide et en période sèche. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1. Les valeurs des paramètres ont été comparées aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO, 2011) pour l'eau de boisson non influencée par les activités anthropiques. L'application de toutes ces différentes méthodes a permis d'évaluer la qualité saisonnière afin d'expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines du département d'Agboville.

Résultats et discussion

Résultats

Résultats des mesures physico-chimiques des eaux

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques réalisées en saison pluvieuse et en saison sèche sur les eaux de puits du département d'Agboville sont consignés dans le tableau 2. 83,33% des analyses d'eaux effectuées ont une balance ionique inférieure à 5%, ces analyses sont donc satisfaisantes. Cependant, 16,67% des analyses effectuées sur les eaux souterraines ont une balance ionique comprise entre 5 et 10%, ces analyses sont donc de qualités acceptables.

Tableau 2 : Variables statistiques et valeurs extrêmes des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines des aquifères d'altérites du département d'Agboville.

Variables			Octobre 2014 (saison pluvieuse)			Mars 2015 (saison sèche)		
	Unités	Normes OMS	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy
T	° C	< 25	28,7	23	26,17	30,1	25,4	27,24
O D	mg/L		11,46	0,29	3,40	13,89	0,46	3,87
pH		6,5 - 9,5	8,2	4,7	6,10	8,9	4,76	6,30
Eh	mV		172,4	-118,4	32,07	150,9	-132	-5,86
CE	µS/cm	> 400	480	10	172,92	520	50	196,71
TDS	mg/L		170	5	77,29	170	20	89,04
Salinité	‰		0,24	0,01	0,08	0,63	0,03	0,126
Turb.	NTU		67,8	2,2	20,79	79,6	3,56	23,63
Ca ²⁺	mg/L	≤ 100	18,3	2,5	9,16	20,85	5,2	11,67
Mg ²⁺	mg/L	≤ 50	7,26	0,78	2,93	9,23	1,35	3,71
Na ⁺	mg/L	≤ 150	10,83	1,25	4,41	12,36	2,03	5,36
K ⁺	mg/L	≤ 12	8,74	0,64	3,59	10,25	0,7	4,47
NH ₄ ⁺	mg/L	≤ 0,5	2,1	0,024	0,43	1,203	0,030	0,28
Cl ⁻	mg/L	≤ 200	28,5	3,1	12,83	30,15	5,2	15,48
SO ₄ ²⁻	mg/L	≤ 250	20	2	8,04	24	4	10,95
HCO ₃ ⁻	mg/L		42,8	1,23	15,55	51,96	3,71	18,97
NO ₃ ⁻	mg/L	≤ 50	30,58	2,57	13,07	25,05	4,03	16,40
NO ₂ ⁻	mg/L	≤ 0,1	0,364	0,041	0,16	0,416	0,009	0,12
PO ₄ ³⁻	mg/L	≤ 6,7	1,08	0,004	0,12	1,25	0,01	0,15

OD : oxygène dissous ; **CE** : conductivité ; **TDS** : taux des matières dissoutes ; **Turb.** : turbidité ; **Moy** : moyenne

Analyse descriptive

Les températures des eaux souterraines échantillonnées varient entre 25,4°C et 30,1°C avec une valeur moyenne de 27,24°C en saison sèche et entre 23°C et 28,7°C avec une valeur moyenne de 26,17°C en saison pluvieuse. Les plus faibles valeurs sont enregistrées en saison pluvieuse. Les températures des eaux souterraines échantillonnées sont à 85,33% supérieures aux valeurs guides de l'OMS en saison pluvieuse et à 100% en saison sèche (figure 3).

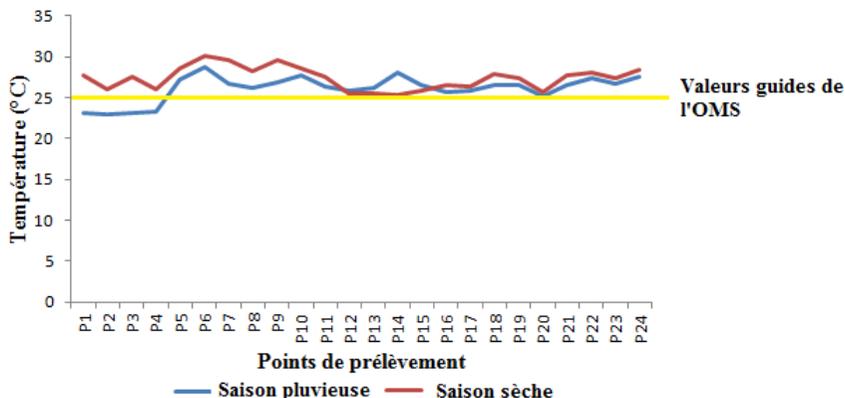


Figure 3 : Variation spatio-temporaire de la température des eaux d’altérites.

En saison pluvieuse, les valeurs du pH varient de 4,7 à 8,2 avec une moyenne de 6,10; en saison sèche, le pH est compris entre 4,76 et 8,9 avec une moyenne de 6,30.

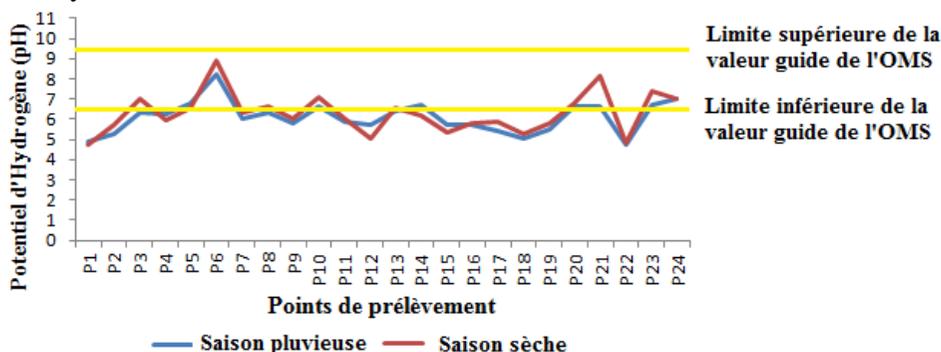


Figure 4 : Variation spatio-temporaire du pH des eaux d’altérites.

La figure 4 montre que 35,7% des eaux souterraines ont des valeurs de pH situées dans l’intervalle de la norme de l’OMS ($6,5 < \text{pH} < 9,5$). En saison pluvieuse et en saison sèche, les eaux souterraines échantillonnées dans la région sont acides avec respectivement un pH moyen de 6,10 et 6,30 (tableau 2). Les valeurs de l’oxygène dissous (OD) des eaux souterraines oscillent entre 0,29 et 11,46 mg/L avec une valeur moyenne de 3,4 mg/L en saison pluvieuse, tandis qu’en saison sèche, elles varient de 0,46 à 13,89 avec une moyenne de 3,87 mg/L (tableau 2). L’analyse du tableau 2 montre que les valeurs d’Eh varient de -118,4 à 172,4 mV avec une moyenne de 32,07 mV en saison pluvieuse et en saison sèche, ces valeurs sont comprises entre -132 et 150,9 mV avec une moyenne de -5,86 mV. On constate que la valeur centrale est positive en saison pluvieuse et négative en saison sèche. La salinité mesurée dans la zone est comprise entre 0,01‰ et 0,24‰ avec une moyenne de 0,08‰ en saison pluvieuse et celle mesurée en saison sèche

varie entre 0,03 et 0,63‰ avec une moyenne de 0,126‰ (tableau 2). Dans l'ensemble, ces eaux sont faiblement salées cependant cette salinité est importante en saison sèche qu'en saison pluvieuse. Les concentrations du TDS en saison sèche et pluvieuse varient respectivement entre 20 et 170 mg/L avec une moyenne égale à 89,04 mg/L; et entre 5 et 170 mg/L avec une moyenne de 77,29 mg/L (tableau 2). Les valeurs de la turbidité varient de 2,2 à 67,8 UTN avec une moyenne de 20,79 UTN pour la saison pluvieuse. En saison sèche, les valeurs sont plus élevées et sont comprises entre 3,56 et 79,6 UTN avec une moyenne de 23,63 UTN (Tableau 2). Les conductivités électriques mesurées varient de 10 à 480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison pluvieuse avec une moyenne de 172,92 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En saison sèche, la conductivité électrique est comprise entre 50 et 520 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 196,71 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les écarts considérables observés entre les valeurs extrêmes dans les deux campagnes d'échantillonnage indiquent une forte hétérogénéité de la minéralisation des eaux (tableau 2). En saison sèche comme en saison pluvieuse, 95,83% des eaux souterraines échantillonnées dans le département d'Agboville sont caractérisées par des valeurs de CE inférieures à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (figure 5). La conductivité électrique des eaux est plus importante en saison sèche qu'en saison pluvieuse et dans l'ensemble, les eaux souterraines échantillonnées sont douces et faiblement minéralisées.

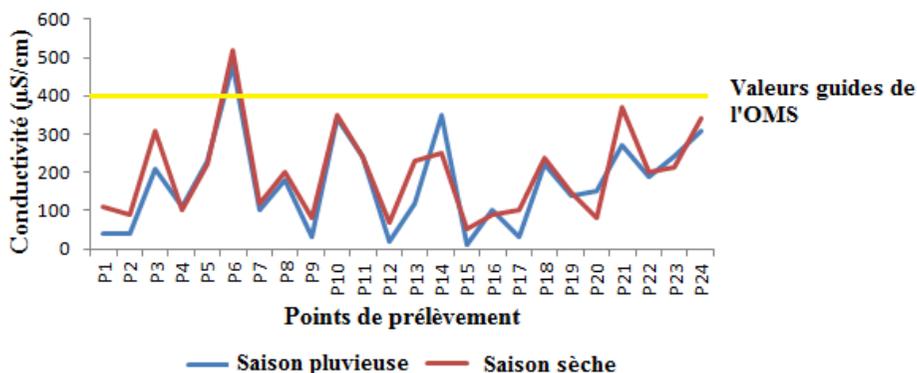


Figure 5 : Variation spatio-temporaire de la conductivité électrique des eaux d'altérites.

Les teneurs en calcium en saison pluvieuse s'inscrivent dans la gamme de 2,5 mg/L à 18,3 mg/L avec une moyenne de 9,16 mg/L. En saison sèche, les concentrations en calcium varient de 5,2 mg/L à 20,85 mg/L avec une moyenne de 11,67 mg/L. La quasi-totalité des points d'eau de la région présentent des concentrations inférieures à la valeur guide de l'OMS qui est de 100 mg/L (tableau 2). Le calcium est plus important dans les eaux souterraines échantillonnées en saison pluvieuse qu'en saison sèche. En saison pluvieuse, les concentrations du magnésium s'étendent de 0,78 mg/L à 7,26 mg/L avec une valeur moyenne de 2,93 mg/L. Les

concentrations obtenues en saison sèche varient de 1,35 mg/L à 9,23 mg/L avec une moyenne de 3,71 mg/L. On remarque qu'aucune concentration ne dépasse 50 mg/L qui la valeur guide de potabilité définie pour les eaux d'alimentation par l'OMS (tableau 2). Les eaux souterraines présentent des concentrations en sodium très variables dans la saison pluvieuse. Elles sont comprises entre 1,25 mg/L et 10,83 mg/L avec une concentration moyenne est de 4,41 mg/L. Elles varient de 2,03 mg/L à 12,36 mg/L avec une moyenne de 5,36 mg/L en saison sèche (tableau 2). En saison pluvieuse dans la zone d'étude, les teneurs en potassium oscillent entre 0,64 mg/L et 8,74mg/L avec une teneur moyenne de 3,59 mg/L. En saison sèche, elles sont comprises entre 0,7 et 10,25 mg/L avec une teneur moyenne est de 4,47 mg/L. Aucune valeur ne dépasse 12 mg/L comme le recommande l'OMS (tableau 2). Les valeurs caractéristiques du bicarbonate en saison pluvieuse varient de 1,23 mg/L à 42,8 mg/L. Les teneurs sont très variables avec une moyenne de 15,55 mg/L. Cependant en saison sèche, elles sont comprises entre 3,71 à 51,96 mg/L avec une moyenne de 18,97 mg/L. Les valeurs de sulfates dans les eaux souterraines du département en saison pluvieuse, varient de 2 à 20 mg/L avec une moyenne de 8,04 mg/L. Les teneurs en sulfate sont comprises entre 4 à 24 mg/L avec une moyenne de 10,95 mg/L pendant la saison sèche. Ces eaux sont aptes à la consommation humaine car toutes les valeurs sont en dessous de la valeur guide de l'OMS qui est de 250 mg/L. Les teneurs en chlorures obtenues en saison pluvieuse oscillent de 3,1 mg/L à 28,5 mg/L avec une moyenne de 12,83 mg/L. Les concentrations obtenues en saison sèche varient de 5,2 mg/L à 30,15 mg/L avec une moyenne de 15,48 mg/L (tableau 2). Toutes ces valeurs sont inférieures à la valeur guide de l'OMS qui est de 200 mg/L définie pour les eaux de consommation. Les valeurs de phosphates sont comprises entre 0,004 et 1,08 mg/L avec une moyenne de 0,12 mg/L en saison pluvieuse. En saison sèche, elles varient de 0,01 à 1,25 mg/L avec une moyenne de 0,15 mg/L. D'une manière générale, les valeurs rencontrées dans les eaux souterraines sont très faibles et sont toutes en dessous de la la valeur guide de l'OMS définie pour les eaux de boisson qui est de 6,7 mg/L (tableau 2). Les valeurs du nitrate en saison pluvieuse, varient de 2,57 mg/L à 30,58 mg/L avec une moyenne de 13,07 mg/L. En saison sèche, les valeurs du nitrate oscillent de 4,03 mg/L à 25,05 mg/L avec une moyenne de 16,40 mg/L (tableau 2). L'analyse de la figure 6 montre que les valeurs de nitrate obtenues sont inférieures à la valeur guide de l'OMS fixées à 50 mg/L.

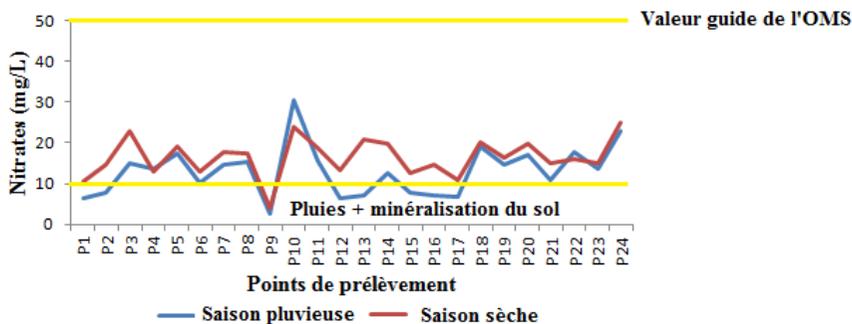


Figure 6 : Variation spatio-temporaire du nitrate des eaux d’altérites.

33,33% et 4,17% des points ont une concentration inférieure 10 mg/L respectivement en saison pluvieuse et en saison sèche qui est la teneur naturelle du nitrate dans les eaux souterraines, tandis que 66,67% et 95,83% des eaux sont caractérisées par des apports anthropiques ($\text{NO}_3^- > 10 \text{ mg/L}$) respectivement en saison pluvieuse et en saison sèche. Les puits de faibles profondeurs enregistrent les plus fortes valeurs par rapport aux puits de grandes profondeurs.

Les valeurs de nitrites en saison pluvieuse, varient de 0,041 à 0,364 mg/L avec une moyenne de 0,16 mg/L. En saison sèche, les eaux des puits ont une teneur qui oscille entre 0,009 et 0,416 mg/L avec une valeur moyenne de 0,12 mg/L (tableau 2). L’analyse de la figure 7 montre que 58,33% des eaux souterraines en saison pluvieuse et 45,83% des eaux souterraines en saison sèche ont une concentration supérieure à la valeur guide de l’OMS pour la potabilité des eaux de boisson fixée à 0,1 mg/L.

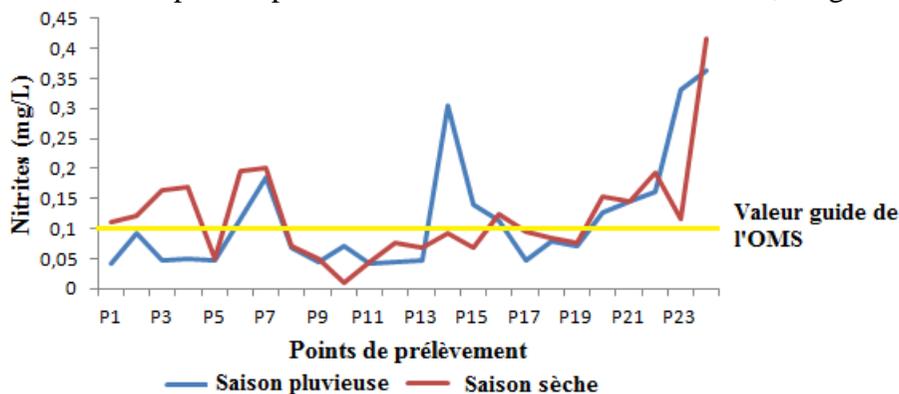


Figure 7 : Variation spatio-temporaire des nitrites des eaux d’altérites.

En saison pluvieuse, les teneurs d’ammonium sont comprises entre 0,024 mg/L et 2,1 mg/L tandis qu’en saison sèche, elles varient de 0,03 à 1,203 mg/L. Les concentrations moyennes en saison pluvieuse et saison sèche sont respectivement de 0,43 mg/L et de 0,28 mg/L (tableau 2).

Cependant, 29,17% des eaux souterraines échantillonnées en saison sèche et 16,67% des eaux souterraines échantillonnées en saison pluvieuse sont caractérisées par une concentration supérieure à la valeur guide de potabilité qui est de 0,5 mg/L (figure 8).

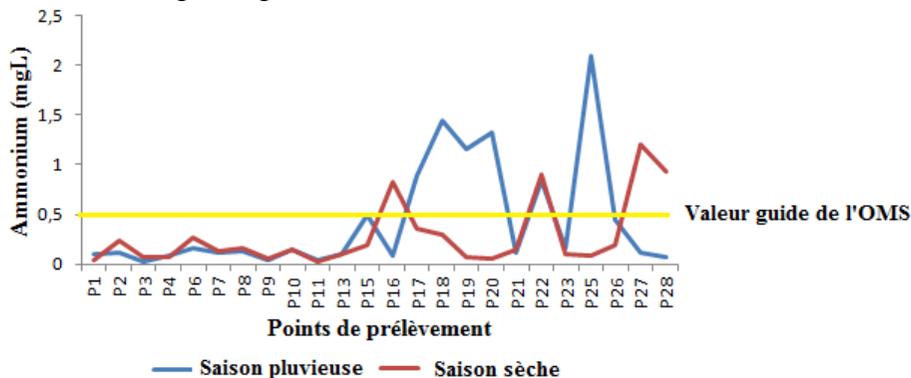


Figure 8 : Variation spatio-temporelle de l’ammonium des eaux d’altérites

Si l’on considère les valeurs moyennes exprimées en mg/L, les cations présentent un ordre d’abondance de type $Ca^{2+} > Na^+ > K^+ > Mg^{2+} > NH_4^+$. L’ordre d’abondance à retenir pour les anions en fonction des valeurs moyennes exprimées en mg/L est le suivant : $HCO_3^- > NO_3^- > Cl^- > SO_4^{2-} > NO_2^- > PO_4^{3-}$.

Classification hydrochimique des eaux

La classification hydrochimique des eaux souterraines échantillonnées à l’aide du diagramme de Piper (figures 9 et 10) met en évidence un seul faciès : **le faciès chloruré calcique**.

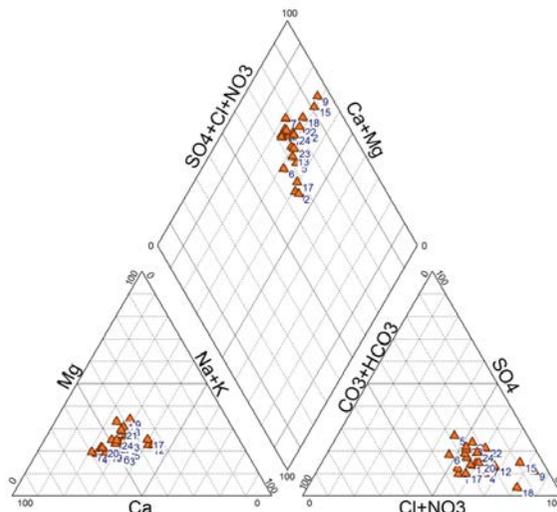


Figure 9 : Classification des eaux de puits à l’aide du diagramme de Piper en saison pluvieuse.

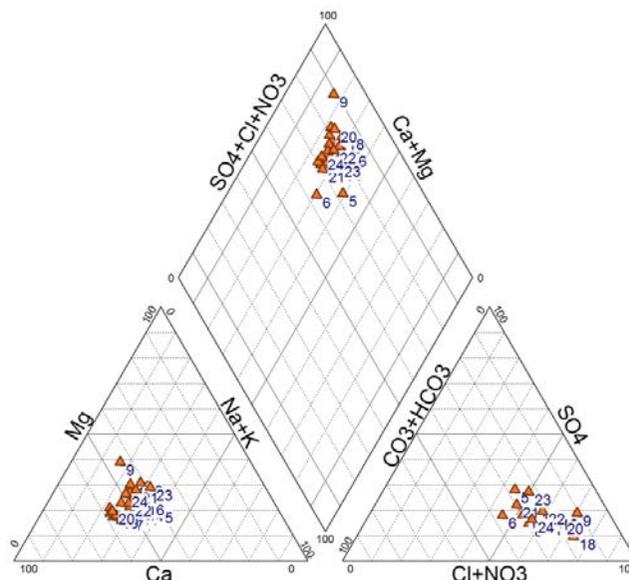


Figure 10 : Classification des eaux de puits à l'aide du diagramme de Piper en saison sèche.

Résultats de l'étude statistique multivariée Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les tableaux 3 et 4 montrent que les 3 premiers facteurs représentent respectivement 75,41% et 74,24% de la variance exprimée. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour donner l'information recherchée.

Tableau 3 : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée en saison pluvieuse.

	F1	F2	F3
Valeurs propres	10,87	2,01	1,44
% Variance propre	57,21	10,60	7,6
% Variance exprimée cumulée	57,21	67,81	75,41

Tableau 4: Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée en saison sèche.

	F1	F2	F3
Valeurs propres	10,36	1,87	1,67
% Variance propre	54,85	9,86	8,80
% Variance exprimée cumulée	54,57	64,44	74,24

Analyse de la projection dans l'espace des variables et des individus

L'analyse des variables de l'ACP dans le plan factoriel se fera en fonction des saisons.

Saison pluvieuse

L'analyse des variables de l'ACP dans le plan factoriel F1-F2 est présentée par la figure 11. L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 permet de mettre en évidence trois regroupements des

variables. Le facteur F1 est commandé dans sa partie négative par les variables pH, CE, Ca^{2+} , TDS, Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et à un degré moindre NO_3^- . Dans sa partie positive, le facteur 1 est commandé par la variable Eh. Le groupe de variables Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- traduit la minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne acquise suite aux interactions eau-roche. Par contre, le groupe de variables Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et NO_3^- semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Ces variables ont une origine superficielle et témoignent d'une pollution anthropique. Le regroupement de ces variables dans la partie négative du facteur F1 signifie que ces variables chimiques sont acquises après un temps de séjour court. Ce regroupement exprime une minéralisation liée aux activités agricoles. Le facteur F1 est déterminé par la variable Eh dans sa partie positive à laquelle s'oppose le pH et à un degré moindre la température ($T^\circ\text{C}$). Eh permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). L'opposition de cette variable avec le pH qui est un indicateur de l'hydrolyse des silicates rend compte des conditions du milieu sur l'acquisition de la minéralisation. Le facteur F1 est considéré comme un axe de **minéralisation d'origines à la fois naturelle (contact eau-roche) et anthropique**. Le facteur 2 est mis en relief par les variables NH_4^+ , NO_2^- et Turb dans sa partie négative. Les variables NH_4^+ et NO_2^- sont des paramètres de surface qui se retrouvent en profondeur à la suite d'infiltration. En effet, NH_4^+ et NO_2^- proviendraient des engrais utilisés dans les activités agricoles. La turbidité est importante dans les puits peu profonds ou mal aménagés montrant une possible contamination par l'eau de surface, surtout après des pluies abondantes. La turbidité de l'eau souterraine est généralement surtout inorganique et causée par des facteurs géologiques naturels. Le facteur F2 renseigne donc sur l'origine spatiale des ions par infiltration directe **des eaux superficielles et la dégradation anthropique d'origine agricole de la qualité de l'eau**. Le facteur F2 est un indicateur **des apports superficiels**.

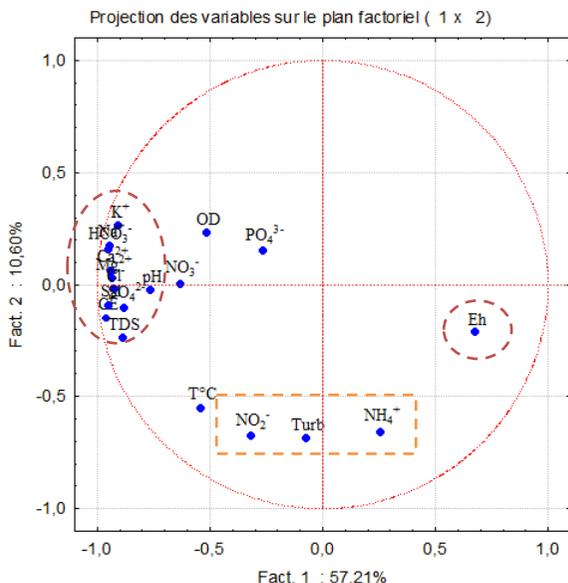


Figure 11 : Cercle de communauté du plan factoriel F1-F2

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 (figure 12) montre 3 classes. 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 forte teneur en Eh. Quant à la classe 3, elle contient les eaux troubles riches en nitrites et en ammonium.

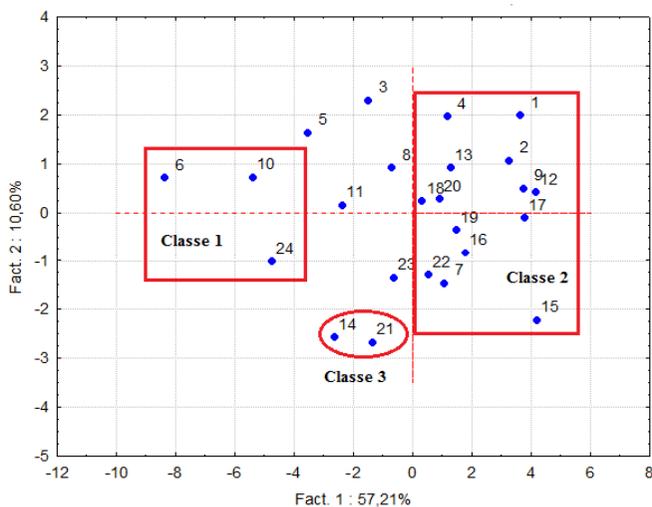


Figure 12 : Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F2

L'étude des eaux dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F3 met en évidence les regroupements de variables suivants les différents axes d'étude (figure 13). Le facteur F3 est commandé par l'oxygène dissous (OD) dans sa partie positive. En effet, l'oxygène dissous dans l'eau est

dépendante de la température. La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique. La forte présence de matière organique, dans un plan d'eau par exemple, permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène. Dans notre étude, les activités agricoles constituent la source de matières organiques. La dégradation de ces matières organiques se fait rapidement. Le facteur F3 exprime le phénomène de **pollution organique des eaux souterraines**.

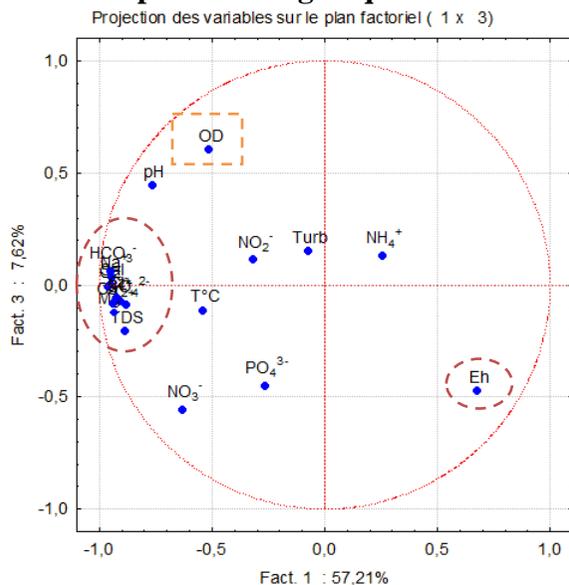


Figure 13 : Cercle de communauté du plan factoriel F1-F3

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 (figure 14) montre trois (3) classes. La classe 1 est composée d'un seul point d'eau riche en oxygène dissous et caractérisée par de faible teneur en nitrates. La classe 2 est constituée des eaux fortement minéralisées. La classe 3 est située dans partie négative du facteur 1 et regroupe les eaux faiblement minéralisées.

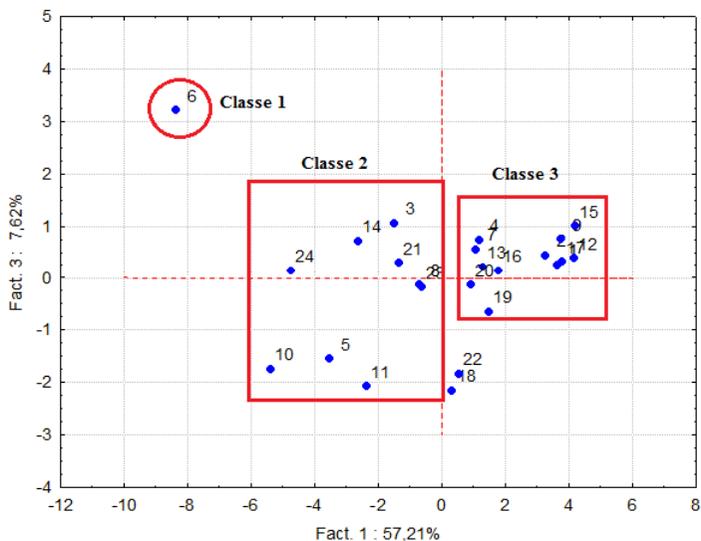


Figure 14 : Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F3

Saison sèche

Le facteur F1 qui représente 54,85% de la variance totale est commandé dans sa partie négative par les variables pH, CE, Ca^{2+} , TDS, Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} et à un degré moindre T°C , OD, (figure 15). Dans sa partie positive, le facteur 1 n'est pas commandé par une variable. Le groupe de variables Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- traduit la minéralisation bicarbonatée calcique et magnésienne acquise suite aux interactions eau-roche. Le groupe de variables Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} semble caractériser une évolution qui s'effectuerait près de la surface du sol. Le regroupement de ces variables dans la partie négative du facteur F1 signifie que ces variables chimiques sont acquises après un temps de séjour court. Le facteur F1 semble rendre compte des conditions d'acquisition de la minéralisation et du temps de séjour des eaux dans l'aquifère. F1 exprime donc le phénomène **de minéralisation temps de séjour des eaux**. Le facteur F2 est déterminé dans sa partie négative par le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) et à un degré moindre les nitrates (NO_3^-). En effet, l'Eh permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction). Le facteur F2 exprime donc le phénomène **d'oxydo-réduction**. La représentation graphique dans l'espace des u.s (figure 10) rend compte de la répartition des ouvrages en fonction de la minéralisation et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh). Trois classes ont été distinguées : la classe 1 regroupe les eaux fortement minéralisées et dont l'acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour. Ces points d'eau sont riches en bicarbonates et ont des valeurs de CE élevées. Les classes 2 et 3

regroupent respectivement les eaux dont la minéralisation est moyenne et faible.

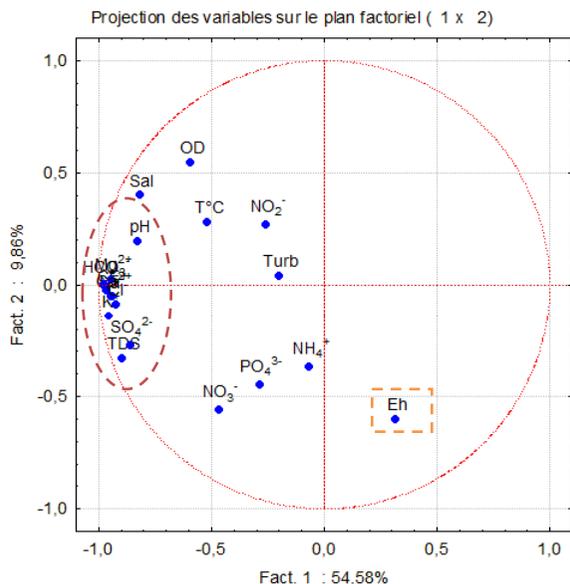


Figure 15 : Cercle de communauté du plan factoriel F1-F2 des eaux d’altérites

La représentation graphique dans l’espace des u.s (figure 16) rend compte de la répartition des ouvrages en fonction de la minéralisation et du potentiel d’oxydo-réduction (Eh). Trois classes ont été distinguées : la classe 1 regroupe les eaux fortement minéralisées et dont l’acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour. Ces points d’eau sont riches en bicarbonates et ont des valeurs de CE élevées. Les classes 2 et 3 regroupent respectivement les eaux dont la minéralisation est moyenne et faible.

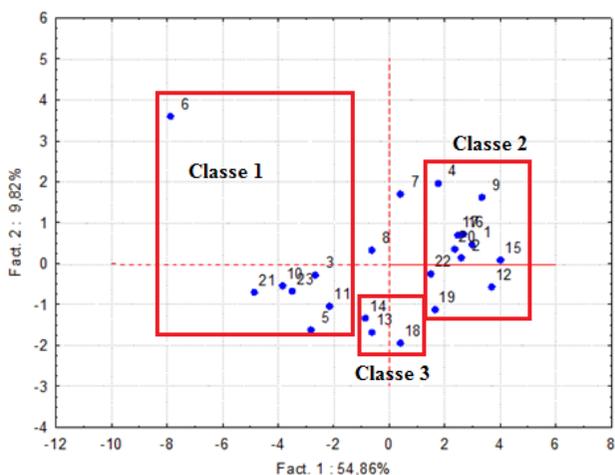


Figure 16 : Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F2 des eaux d’altérites

La figure 17 présente le cercle de communauté du plan factoriel F1-F3. Le facteur 3 bien que représentant seulement 9,46% de l'inertie du nuage de points est mis en relief par les variables NO_2^- et NH_4^+ dans sa partie positive et par la variable PO_4^{3-} dans sa partie négative. Les variables PO_4^{3-} , NO_2^- et NH_4^+ sont des paramètres de surface qui se retrouvent en profondeur à la suite du lessivage des terres agricoles et d'infiltration. L'infiltration des phosphates est plus rapide que celles des nitrites et des ions ammonium. Le facteur F3 renseigne donc sur **l'origine spatiale des ions par infiltration directe des eaux et la dégradation anthropique de la qualité de l'eau**. F3 est un **indicateur des apports superficiels**.

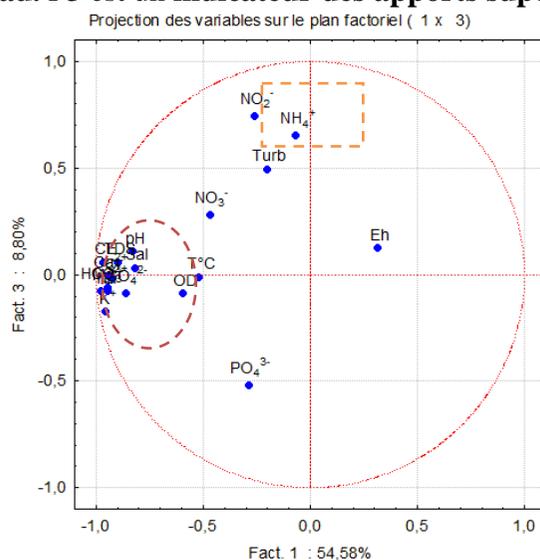


Figure 17 : Cercle de communauté du plan factoriel F1-F3 des eaux d'altérites

La projection des individus dans le plan factoriel F1-F3 (figure 18) montre que la majorité des échantillons sont dans la classe 3. Les eaux de la classe 3 sont faiblement et moyennement minéralisées et qui ont de fortes valeurs de potentiel d'oxydo-réduction (Eh). Toutefois, on remarque un détachement de deux classes dans la partie négative de l'axe 1 (classe 2 : eaux fortement minéralisées et dont l'acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour) et dans la partie positive de l'axe 3 (classe 1 : minéralisation importante avec de fortes teneurs en nitrates, en nitrites et en ammonium).

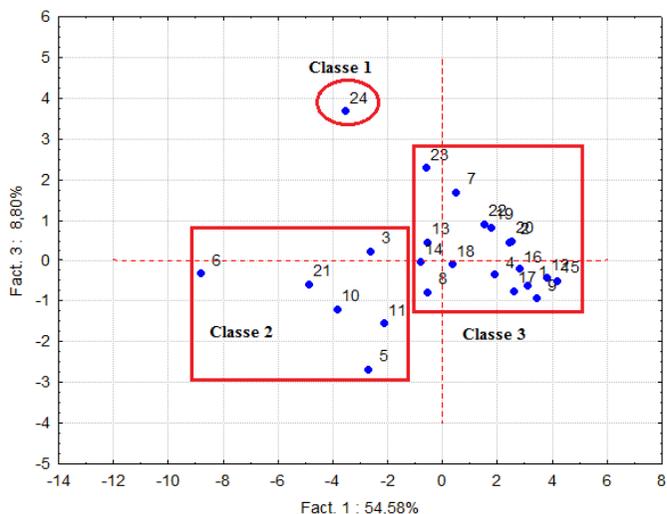


Figure 18 : Graphe des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F3 des eaux d'altérites

Discussion

Les analyses des eaux souterraines du département d'Agboville montrent que les eaux sont acides. Ces eaux sont légèrement acides en saison sèche qu'en saison pluvieuse. Cette acidité des eaux est en accord avec celle obtenue par Goné et *al.* (2004) et Ahoussi (2008) sur les eaux souterraines du département d'Agboville. Cette acidité est conforme aux eaux rencontrées en Côte d'Ivoire dans les aquifères de socle. Cet aspect des eaux souterraines du socle a été signalé dans plusieurs études dont Soro (2014) dans bassin versant du Haut Bandama à Tortiya où les eaux de puits ont un pH moyen de 5,1. Oga et *al.*, (2009) à Tiassalé, Ahoussi et *al.*, (2012a) à Bondoukou, Soro (2010) à dans le district de Yamoussoukro et le département de Tiébissou. Cette variation d'acidité pourrait être due d'une à l'évaporation des eaux de puits qui est assez importante en saison sèche (Meybeck et *al.*, 1996) et d'autre part aux ions H^+ et surtout à la concentration de CO_2 libre dans le sol. En effet, en zone tropicale humide, cette acidité provient principalement de la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO_2 dans les premières couches du sol. La présence dans l'eau de CO_2 provenant des sols facilite l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO_3^- (Ahoussi et *al.*, 2010). Ces eaux sont très faiblement minéralisées avec les valeurs de conductivité inférieures à $400 \mu S/cm$ soit 95,83% des points d'eau. Les valeurs de la conductivité électrique moyennes montrent que les eaux étudiées sont plus minéralisées en saison sèche ($196,71 \mu S/cm$) qu'en saison pluvieuse ($172,92 \mu S/cm$). Cette faible minéralisation des eaux souterraines en saison pluvieuse est due à la dilution par l'apport des eaux pluviales car la majorité des puits ne sont pas aménagés et reçoivent directement les eaux de

ruissellement. Les eaux échantillonnées sont plus chaudes en saison sèche avec une température moyenne de 27,24°C qu'en saison pluvieuse avec une température moyenne de 26,17°C. Nos résultats sont similaires à ceux Rodier (1984) où la température moyenne des eaux en zone tropicale humide est de 30°C. La température de l'eau, est un facteur écologique qui entraîne d'importantes répercussions écologiques (Leynaud, 1968). La croissance et le développement des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les micro-organismes, les réactions chimiques et biochimiques, la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous dépendent de la température (WHO, 1987). Les températures au-dessus de 25°C obtenues dans notre étude ne constituent pas un danger pour le consommateur. Ces variations de température sont fortement influencées par les conditions environnementales liées à la situation géographique de la localité, la géologie des terrains traversés, l'hydrologie de l'écosystème et surtout du climat (Rodier, 1984). En saison sèche comme en saison pluvieuse, les plus faibles valeurs de température ont été obtenues soit tôt ou tard dans la journée. En effet, les études antérieures réalisées par Reggam et *al.* (2015) en Algérie et Makhoukh et *al.* (2011) au Maroc ont montré des fortes valeurs de températures durant la saison sèche et les plus faibles pendant la saison des pluies. En saison pluvieuse, la valeur moyenne du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) est de 32,07 mV tandis qu'en saison sèche elle est de -5,86 mV. Elles sont inférieures à celle obtenue par Ahoussi (2008) dans les eaux de la région d'Abidjan-Agboville qui est de 103,7 mV et par Soro (2014) dans le bassin versant du Haut Bandama qui est de 147,7 mV. Les valeurs positives obtenues signifient que les eaux sont bien oxygénées et qu'elles appartiennent à un système ouvert à l'atmosphère. Cependant, les valeurs positives pourraient témoigner des facilités d'infiltration des eaux superficielles et par conséquent des variations importantes des paramètres physico-chimiques (Soro, 2014) mais les valeurs très élevées du potentiel d'oxydo-réduction sont le signe d'une pollution anthropique (Lallahem, 2002). Ces valeurs sont plus négatives en saison sèche qu'en saison pluvieuse d'où une dégradation de la qualité de ces eaux en saison sèche. Cette dégradation de la qualité de ces eaux en saison sèche est confirmée par les concentrations moyennes des différents cations et anions à l'exception de l'ion l'ammonium sont toutes importantes en saison sèche. Les nitrates constituent le composé azoté dominant dans les eaux de puits échantillonnées. Cette observation est en accord avec celle d'Ahoussi (2008) dans la région d'Abidjan-Agboville où les nitrates constituent l'un des composés azotés dominants dans les eaux de la région d'Abidjan-Agboville. Cette variabilité de la qualité des eaux de puits pourraient s'expliquer par le fait qu'en saison sèche il y a concentration et en saison pluvieuse il y a dilution

des ions dans les eaux échantillonnées. Cependant, les nitrites sont abondants dans les eaux en saison pluvieuse qu'en saison sèche et leur origine est due à la réduction des nitrates en nitrites dans les eaux ou par le pluvio-lessivage des sols. L'étude du mécanisme d'acquisition du chimisme des eaux du département d'Agboville par les méthodes de l'analyse statistique multivariée (ACPN), a permis dans une première approche d'observer trois principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude. Les trois principaux mécanismes sont : la minéralisation-temps de séjour, l'oxydo-réduction et l'origine spatiale des ions. L'acquisition des ions se fait de façon rapide par l'hydrolyse acide des silicates et les interactions eaux-roches qui constitue le phénomène important dans la minéralisation des eaux. Les granites, les gneiss et les schistes sont riches en feldspaths alcalins et en plagioclases acides. Ces roches dominent la géologie de la région comme dans plusieurs régions du socle cristallophyllien ivoirien. L'hydrolyse de telles roches explique les teneurs en Ca^{2+} dominantes pour les cations dans les eaux souterraines (Faillat et Drogue, 1993 ; Savané et Soro, 2001). La présence dans l'eau de CO_2 provenant des sols facilite l'hydrolyse des silicates qui permet la formation de HCO_3^- (Tapsoba, 1995). C'est la raison pour laquelle HCO_3^- est l'anion dominant dans les eaux souterraines. L'acidité des eaux et l'abondance des précipitations provoquent une altération très intense et complète des minéraux primaires de la roche mère par hydrolyse (Eblin et al., 2014). Cette hydrolyse est donc importante en saison pluvieuse que sèche. En effet, en saison pluvieuse comme en saison sèche la minéralisation des eaux étudiées est d'origine à la fois naturelle (contact eau-roche) et anthropique mais le degré anthropisation est moindre en saison sèche. Le phénomène d'oxydo-réduction a montré que les conditions du milieu influencent l'acquisition des éléments chimiques. Une autre source d'acquisition de la minéralisation est sans doute les apports superficiels qui dégradent la qualité des eaux. Dans ce cas, la destruction de la végétation, la décomposition de la litière et les activités anthropiques menées dans la zone (agriculture, élevage) sont des apports d'éléments chimiques dans les eaux et peuvent contribuer aussi à la dégradation de leur qualité. C'est le cas du Cl^- , du NO_3^- , du NO_2^- , du NH_4^+ et du PO_4^{3-} provenant dans la zone des engrais chimiques utilisés pour les cultures et la décomposition de la matière organique. Ce processus est contrôlé par l'infiltration directe des éléments dans la nappe occasionnant une pollution anthropique. Ces trois principaux mécanismes responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux souterraines ont été signalés par plusieurs travaux dans le bassin sédimentaire et dans le socle cristallo-phyllien. On peut citer en autres les travaux de Eblin et al. (2014) dans la région d'Adiaké, de Ahoussi (2008) dans la région d'Abidjan-Agboville, de Soro (2014) dans le bassin versant

du Haut Bandama à Tortiya et Soro (2010) Dans le district de Yamoussoukro et le département de Tiébissou.

Conclusion

Cette étude a permis de connaître les caractéristiques des eaux souterraine des aquifères d'altérites du département d'Agboville. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux sont acides avec un pH moyen de 6,14 en saison pluvieuse et de 6,31 en saison sèche. Dans l'ensemble, ces eaux sont douces et faiblement minéralisées avec une conductivité électrique moyenne de 198,28 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison pluvieuse et 211,96 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en saison sèche. Les eaux de puits sont plus minéralisées en saison sèche qu'en saison pluvieuse. La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme de Piper a mis en évidence un seul hydrofaciès qui est le faciès chloruré calcique. Les paramètres chimiques de qualité sont pour la plupart au-dessous des valeurs guides de potabilité de l'OMS, exceptés quelques points où des teneurs de nitrites et ammonium dépassent parfois ces valeurs guides qui est respectivement de 0,1 mg/L et de 0,5 mg/L. Les eaux de puits étudiés sont plus contaminées en saison sèche qu'en saison pluvieuse. Les méthodes de l'analyse statistique multivariée (ACPN) montrent que les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines étudiées sont : le temps de séjour des eaux en contact avec l'encaissant, l'oxydo-réduction, l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques et la décomposition de la litière.

References:

- 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. Thèse de Doctorat Unique, Université de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p.
- AHOUSSE K. E., SORO N., KOFFI Y. B., SORO G. et BIEMI J. (2010). 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), pp. 782-797.
- AHOUSSE K. E., YOUAN T. M., LOKO S., ADJA M. G., LASM T. et JOURDA J. P. (2012a). Étude hydrogéochimique des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoprotérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou. *Afrique SCIENCE* 08(3), pp. 51 – 68.
- AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., SORO G., SORO N. et BIEMI J. (2012b). Caractérisation physico- chimique et bactériologique des ressources en eau des localités situées aux abords de la lagune Ébrié dans la

commune de Marcory (District d'Abidjan, Côte Ivoire) : cas du village d'Abia Koumassi. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 89 No 3, pp. 359-383.

AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., SORO G. et 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, pp. 4703-4719.

ANONYME (2014). Recensement générale de la population et de l'habitat de la Côte d'Ivoire 2014, 22 p, /http : ins.ci

AW S., N'GORAN E.B.Z., SIAKA S. et PARINET B. (2011). Intérêt de l'analyse multidimensionnelle pour l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau d'un système lacustre tropical : cas des lacs de Yamoussoukro (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 38, pp. 2573-2585.

BELKHIRI L. (2011). Étude de la pollution des eaux souterraines : cas de la plaine d'Ain Azel - Est Algérien. Doctorat en Sciences de l'Université Hadj Lakhdar BATNA, Algérie, 121p.

BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahariens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université Nationale d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 493 p.

DEMBELE O. (1989). Logiques et stratégies de développement urbain comparées à Abengourou, Agboville et Bonoua. Thèse de Doctorat, 3^e cycle de Géographie, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 666p.

EBLIN S.G., SORO G.M., SOMBO A.P., AKA N., KAMBIRÉ O. et SORO N. (2014). Hydrochimie des eaux souterraines de la région d'Adiaké (Sud-Est côtier de la Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, n° 17, pp 193-214.

EL MORHIT M., FEKHAOUI M., SERGHINI A., EL BLIDI S., EL ABIDI A., BENNAAKAM R., YAHYAOUI A. et JBILOU M (2008). Impact de l'aménagement hydraulique sur la qualité des eaux et des sédiments de l'estuaire du Loukkos (côte atlantique, Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre*, n°30, pp. 39-47.

FAILLAT J. P et DROGUE C. (1993). Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 38, 3(6), pp. 215-229.

GBOLO P. et LOPEZ D. L. (2013). Chemical and geological control on surface water within the Shade river watershed in southeastern Ohio. *Journal of Environmental Protection*, 4, pp. 1-11.

GONE D. L., SAVANE I. et GOBLE M. M. (2004). Caractéristiques physico-chimiques majeurs des eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Revue Ivoire Sciences Technologies* n°05, pp.117-133.

JOURDA J. P. (2005). 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'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody, Côte d'Ivoire, 430 p.

KOUASSI A. M., YAO K. A., AHOUSSE K. E., SEKI L. C. YAO N. A. et BIÉMI J. (2010). 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), pp. 1816-1838.

KOLSI S. H., BOURI S., HACHICHA W. et DHIA H. B. (2013). Implementation and evaluation of multivariate analysis for groundwater hydrochemistry assessment in arid environments: a case study of Hajeb Elyoun-Jelma, Central Tunisia. *Environmental Earth Science*, 70, pp. 2215-2224.

KOUZANA L., BEN MAMMOU A. et GAALOUL N. (2007). Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop.*, 31, pp. 57-70.

LALLAHEM S. (2002). Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, France, 242 p.

LASM T. (2000). Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes en Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse Unique de Doctorat, Université de Poitiers, France, 272 p.

LASM T., FOSSOU R. M. N., ONETIE O.Z., BAKA D., YOUAN T.A.M., OGA M-S. et SORO N. (2012). Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du département de Ferké (nord de la Côte d'Ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable. *Revue Ivoire Sciences et Technologies*, 19, pp. 114-135.

LEYNAUD G. (1968). Les pollutions thermiques, influence de la température sur la vie aquatique. B.T.I. Ministère de l'agriculture, pp. 224-881.

MAKHOUKH M., SBAA M., BERRAHOU A. et CLOOSTER VAN M. (2011). Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss Journal*, n° 09, pp. 149-169.

- MEYBECK M., FRIEDRICH G., THOMAS R., CHAPMAN D. et RIVERS (1996). Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2 ed. E & FN Spon, London.
- OGA M. S., LASM T., YAO T. K., SORO N., SALEY M. B., KOUASSI D. et GNAMBA F. (2009). 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): pp.72-87.
- OROU K. R. (2008). Influence de l'utilisation des engrais NPK sur la qualité des eaux souterraines dans les zones agricoles en milieu soudano-guinéen : cas du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), Mémoire DEA, Université Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 68 p.
- PAPON A. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire. Mémoire du Bureau de Recherche en Géologie Minière, Paris, France, Vol. 80, 284 p.
- RAYA S., AMANI A. et OTCHET A. (2007). Une mine d'or bleu en manque de protection. *Horizons ; Planète SCIENCE*, Vol.5, No.3, pp. 16-19.
- REGGAM A., BOUCHELAGHEM H. et HOUHAMDI M. (2015). Qualité physico-chimique des eaux de l'Oued Seybouse (Nord-Est de l'Algérie): caractérisation et analyse en composantes principales. *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (5), pp. 1417-1425.
- RODIER J. (1984). L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, et eau de mer. 7ème édition, Dunod Technique, 1136 p.
- RODIER J. (2009). « (L'analyse de l'eau » 9^{ème} édition, Dunond, Paris,
- SAVANE I. et SORO N. (2001). 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), pp. 379-390.
- SIMLER R. (2007). Logiciel Diagramme 4.0. Université d'Avignon, France.
- SORO G. (2010). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du district de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 250 p.
- SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO K. E., AHOUSI K. E., SORO G., OGA Y. M-S., SAVANE I. et BIEMI J. (2010). Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (6), pp. 2203-2219.

- SORO T. D. (2014). Evolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques : impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat Unique, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 243p.
- TAPSOBA-SY A. (1995). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : Hydrochimie, isotopie et indice cationique de vieillissement des eaux souterraines. Thèse de Doctorat 3^e cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 200 p.
- TASTET J-P. (1979). Environnements sédimentaires et structuraux Quaternaires du littoral du golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences. Université de Bordeaux I, France.
- THILAGAVATHI R. CHIDAMBARAM S. PRASANNA M. V. TIVYA C et SINGARAJA C. A. (2012). Study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of pondicherry region, southeast India. Applied Water Science, 2, pp. 253-269.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (1987). Global pollution and health results of related environmental monitoring. Global Environment Monitoring system, WHO, UNEP.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2011). Guidelines for Drinking-water Quality, 4th éd., 518 p.
- YIDANA S. M., OPHORI D. and BANOENG-YAKUBO B. (2007). Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. Environmental Geology, Vol. 54, n° 9, pp. 1751-1762.
- YIDANA S.M., OPHORI D. et BANOENG-YAKUBO B. (2008). A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data – The Ankobra Basin, Ghana. Journal of Environmental Management, 86, pp. 80-87.