



HYDROCHIMIE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA RÉGION D'ADIAKÉ (SUD-EST CÔTIER DE LA CÔTE D'IVOIRE)

¹EBLIN S.G.*, ¹SORO G.M., ²SOMBO A.P., ¹AKA N., ³KAMBIRÉ O.,
¹SORO N.

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

²Département Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (Côte
d'Ivoire)

³Département Microbiologie, Unité de Formation et de Recherche des Sciences et
Techniques des Aliments, Université Nagui Abrogoua (Côte d'Ivoire)

sampah_e_georges@yahoo.fr , somboabeparfait@gmail.com , kam_ollo@yahoo.fr

RESUMÉ

Dans le but d'évaluer la qualité physicochimique des eaux souterraine et expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux, des analyses physicochimiques ont été effectuées sur 26 échantillons d'eau. L'analyse descriptive des paramètres physicochimiques a montré que les eaux sont acides et très faiblement minéralisées dans l'ensemble. Les teneurs en phosphates, silices et fer sont parfois très élevées et au-dessus de la norme de potabilité OMS des eaux de consommation. Le diagramme de Piper a révélé que les eaux sont à environ 89% chlorurées dont plus de 80% chlorurées sodi-potassiques. L'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) a mis en évidence deux grands phénomènes dans l'acquisition de la minéralisation des eaux. Le principal phénomène est la dissolution de la roche par le contact eau-roche (minéralisation temps de séjour). Le deuxième phénomène est lié aux apports d'eaux par infiltrations superficielles et intrusion d'eaux marines et saumâtres dans la nappe. L'analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a permis d'identifier quatre groupes d'eau de compositions chimiques différentes. Dans l'ensemble, la qualité des eaux souterraines est bonne mais nécessite dans certains cas, un traitement spécifique avant approvisionnement.

Mots-clés : Eaux souterraines, paramètres physico-chimiques, minéralisation, ACPN, CHA, région d'Adiaké, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the physicochemical quality of groundwater and explain phenomenon at the origin to the mineralization of these waters. Methodology based on physicochemical analyses of 26 samples of groundwater. Descriptive analyses of physicochemical parameters show that waters are acid and in the whole very low mineral content. Phosphates, silica and iron contents sometimes have very high levels in the water; above the WHO standard for drinking water. Piper diagram show that groundwater are chlorinated about 89% that above 80% chlorinated sodi-potassium. The Normalized Principal Components Analysis (NPCA) method has enabled to highlight two big phenomena in acquisition of the mineralization of waters. The main phenomenon of production of ions in water is the contact water-rock (the mineralization residence time). The second phenomenon is superficial contributions bound to water inputs through superficial infiltrations and saline and briny waters intrusion in the aquifer. The cluster analysis has enabled to identify four major clusters based chemical composition. The groundwater resources in the region of Adiaké have a good physicochemical quality but need in certain cases a specific treatment before supply.

Keywords: Groundwater, physicochemical parameters, mineralization, NPCA, cluster analysis, region of Adiaké, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

L'eau souterraine est d'une importance capitale dans la plupart des régions du monde. Toutefois, cette ressource qui était jadis de bonne qualité, se trouve actuellement menacée par diverses sources de contamination ponctuelles et diffuses. Les études réalisées en Côte d'Ivoire et principalement au niveau du bassin sédimentaire côtier dans le but d'évaluer la qualité de l'eau souterraine ont signalé plusieurs foyers de pollution (Ahoussi et al., 2012b ; Raya S. et al., 2007 ; Soro et al., 2010). L'eau qui devient impropre à la consommation et même inutilisables pour les autres usages (Keddal et N'dri, 2008). Cette pollution est causée par l'intensification des activités agricoles, industrielles et domestiques (Abdelbaki et Boukli, 2007 ; Bricha et al., 2007 ; Koné et al., 2009 ; OCDE, 2004). Les travaux effectués par Aké et al. (2009) ; Anani et al. (2012) ; Dibi et al. (2007) dans la région du Sud-Comoé dont fait partie la région d'Adiaké, ont montré que cette zone subit une forte pression anthropique. En effet, les excellentes conditions naturelles dont bénéficie la région du Sud-Comoé ont favorisé le développement des activités agricoles,

agro-industrielles, minières, etc. L'eau qui constitue un élément incontournable pour le développement économique est menacée de contamination. Il convient donc de connaître et suivre la qualité de cette ressource. En effet, selon Mourey et Vernoux (2000), le principe de prévention systématique est de loin préférable à celui qui consiste à traiter les eaux pour l'alimentation en eau potable lorsque leur qualité est détériorée. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude qui a pour but d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la région d'Adiaké et expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux. Cette étude s'est basée sur différentes méthodes hydrochimiques et des techniques d'analyse statistique multivariée.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Située dans l'extrême sud-est de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 5°04 et 5°28 Nord et les longitudes 2°43 et 3°32 Ouest. La région d'Adiaké est une plaine côtière de 0 à 200 m d'altitude et. Elle fait frontière avec le Ghana à l'Est et la région de Bonoua à l'Ouest. Elle est limitée au Sud par l'Océan Atlantique et intègre dans sa partie nord, le Sud de la région d'Aboisso (Figure 1). Sa superficie est de 3070 Km² pour une population estimée à 253253 habitants, avec une densité de 78 hbts/km², largement supérieure à la moyenne nationale qui est 48 hbts/km² (JICA, 2001).

La région d'Adiaké est soumise à un climat équatorial de transition (climat Attiéen), caractérisé par 4 saisons dans l'année dont 2 pluvieuses (avril à juillet et octobre à novembre) et 2 sèches (décembre à mars et août à septembre). C'est une zone très humide où les précipitations moyennes annuelles sont supérieures à 2000 mm. Les températures sont comprises entre 24,8°C et 28,6°C (Figure 2). La région appartient au domaine guinéen caractérisé par la forêt dense équatoriale avec des sols ferrallitiques fortement lessivés sous une forte pluviométrie, des sols hydromorphes minéraux, des sols hydromorphes à gley et pseudo-gley, favorables à l'agriculture.

La région est drainée par 2 bassins hydrographiques constitués des rivières côtières Bia et Tanoé et leurs affluents (Soumié, Ehania et Noé), formant avec plusieurs d'autres cours d'eau (Toumanguié, Eholié, Motokpèlè, etc.) et le complexe lagunaire Aby-Tendo-Ehy (427 km²), un important réseau hydrographique.

Au plan hydrogéologique, la zone d'étude est à cheval sur deux domaines géologiques constitués des formations du bassin sédimentaire côtier (au Sud) et celles du socle cristallin et cristallophyllien (au Nord). Au sud du complexe lagunaire Aby-Tendo-Ehy, le bassin sédimentaire est constitué de "Bas-Plateaux" de nature sablo-argileuse, des cordons littoraux sableux, de vases de marécages et de sables lessivés des dépressions fluvio-lagunaires. Au nord de ce complexe lagunaire, il est représenté par les "Hauts-Plateaux"

constitués de sables, d'argiles et de grès ferrugineux. Le socle précambrien est constitué de schistes et de granitoïdes parsemés de filons de quartz et dykes. Sur le plan hydrogéologique, la région dispose de deux types d'aquifères : les aquifères continus du bassin sédimentaire constitués des aquifères du Quaternaire et du Mio-Pliocène (Continental Terminal) et les aquifères discontinus du socle précambrien constitués des aquifères des altérites et du socle fissuré.

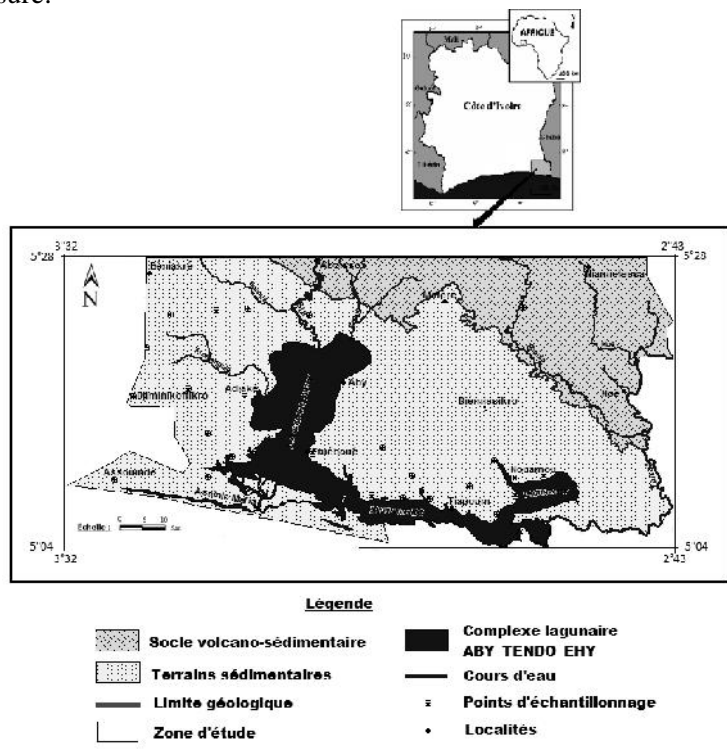


Figure 1 : Situation de la région d'Adiaké

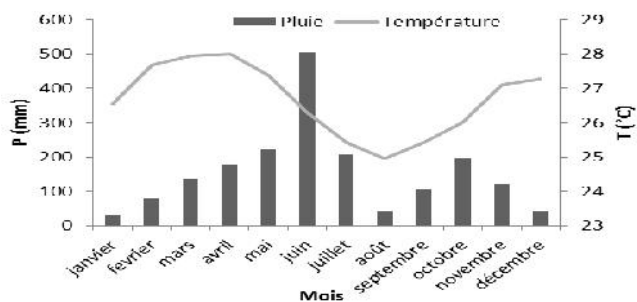


Figure 2 : Pluviométries et températures moyennes mensuelles de la région d'Adiaké de la période 2008 à 2011.

MATERIEL ET METHODES

Echantillonnage et analyses hydrochimiques

Echantillonnage

Une série de trois (3) campagnes de prélèvement organisées respectivement le 13 et 24 juillet ainsi le 8 août 2013, a permis de recueillir 26 échantillons d'eau à partir de 13 forages d'hydraulique villageoise (HV), 7 forages d'hydraulique villageoise améliorée (HVA) et 6 forages d'hydraulique urbaine (HU). Seulement un échantillon a été prélevé en zone de schistes volcano-sédimentaires, dans le nord-est de la zone d'étude. Tous les autres points d'eau se situent en terrains sédimentaires (Figure 1). Ces échantillons d'eau ont été recueillis dans des flacons en polyéthylène de capacité 1 litre, conservés dans des glacières contenant des carboglaces et analysés juste après la campagne de prélèvement.

Méthodes d'analyses

Nous avons déterminé 17 paramètres sur le terrain (*in situ*) et aux laboratoires selon les techniques de Rodier (2009).

Mesures *in situ* : Les mesures effectuées sur le terrain concernent les paramètres physiques que sont la température (T°C), le potentiel d'hydrogène (pH) et la conductivité électrique (CE). Elles ont été faites immédiatement après prélèvement des échantillons d'eau, à l'aide de deux appareils portatifs : le pH-mètre WTW pH 330 (de précision 0.01 unité pH) et le conductimètre WTW 315i (de précision ± 1 digit).

Analyses au Laboratoire : Plusieurs méthodes analytiques ont été utilisées. Les méthodes de dosage colorimétrique ont permis de déterminer les nitrates (NO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}), le fer total (Fe), le potassium (K^+), le manganèse (Mn^{2+}), l'Aluminium (Al^{3+}), les phosphates (PO_4^{3-}), les silices (SiO_2), à partir spectrophotomètre DR 2400 (précision ± 1 nm). La méthode volumétrique à l'EDTA a servi à doser le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}) et déterminer la dureté totale de l'eau, à l'aide du titrateur digital. Elle a servi également à doser les chlorures (Cl^-), au nitrate d'argent et les bicarbonates (HCO_3^-) avec l'acide chlorhydrique 0,1 N à partir du titrateur digital. Le sodium (Na^+) a été déterminé par spectrophotométrie d'absorption atomique avec flamme.

Traitement des données

Les résultats des analyses physico-chimiques ont été traités par des méthodes d'analyse statistique multivariée couplées aux méthodes hydrochimiques. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper réalisé sous le logiciel Diagrammes, pour la classification hydrochimique des eaux. Ce diagramme est beaucoup utilisé en hydrochimie et donne des résultats satisfaisants par Ahoussi et al. (2013), Kouzana et al. (2007), Kolsi et al. (2013), Lasm et al. (2012) et Oga et al. (2009). L'approche statistique est basée sur l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux, le regroupement des eaux et identifier les facteurs responsables de ces regroupements. Ces deux méthodes statistiques sont couramment utilisées dans le domaine des sciences de l'eau, avec d'excellents résultats par Ahoussi et al. (2008), AW. et al. (2011) et Yidana et al. (2006). Les analyses ont porté sur les 17 variables suivantes : T°C, CE, pH, THT, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺, Mn²⁺, HCO₃⁻, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, Fe et SiO₂. Les analyses statistiques ont été réalisées sous le logiciel XLSTAT 2011. Les valeurs des paramètres ont été comparées aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2011) pour l'eau de boisson.

RESULTATS

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région ont été consignés dans le tableau 1. Pour la fiabilité des résultats des analyses, nous avons appliqué la méthode de la balance ionique et une erreur de moins 5 % a été acceptée. Seul l'échantillon prélevé en zone de schistes volcano-sédimentaires (Affiénou) présente une balance excédentaire en cations (dû à une forte teneur en fer).

Tableau 1: Variables statistiques et valeurs extrêmes.

Paramètres physicochimiques	Unités	Normes OMS 2011	Min	Max	Moy	Ecart-type
Température	°C	NE	22,700	28,500	26,727	1,299
pH		6,5-8,5	3,550	6,270	4,588	0,599
Conductivité	µS/cm	180-1000	21,300	228,000	49,100	42,214
Chlorures	mg L ⁻¹	250	3,000	25,000	11,977	6,394
Sulfates	mg L ⁻¹	250	1,000	11,000	4,035	3,040
Silices	mg L ⁻¹	10	6,500	32,800	14,604	5,284
THT	°F	10	0,100	10,800	0,952	2,097
Calcium	mg L ⁻¹	NE	0,280	27,200	3,308	6,464
Magnésium	mg L ⁻¹	NE	0,020	9,720	1,283	2,135
Bicarbonates	mg L ⁻¹	NE	0,000	11,200	0,751	2,213
Fer total	mg L ⁻¹	0,3	0,000	5,940	0,466	1,150
Manganèse	mg L ⁻¹	0,1	0,000	0,596	0,051	0,119
Aluminium	mg L ⁻¹	0,2	0,000	0,237	0,078	0,048
Nitrates	mg L ⁻¹	50	0,000	88,700	7,996	18,024
Phosphates	mg L ⁻¹	0,5	0,007	1,010	0,348	0,260
Sodium	mg L ⁻¹	200	1,620	15,370	5,748	3,127
Potassium	mg L ⁻¹	12	0,000	1,900	0,788	0,577

Résultats des mesures « *in situ* »

Les mesures *in situ* ont concerné trois paramètres physiques : la température (T°C), le potentiel d'hydrogène (pH) et la conductivité électrique (CE) (Tableau 2). Les températures enregistrées dans les eaux varient entre 22,7 °C à Krindjabo et 28,5°C à Affiéno, pour une moyenne de 26,727±1,299°C. Les pH donnent des valeurs comprises entre 3,55 à Adiaké à 6,27 à Affiéno, avec une valeur moyenne de 4,588±0,599. Les eaux souterraines de la région sont acides. Dans l'ensemble, elles sont très faiblement minéralisées, sauf les eaux d'Adiaké et d'Affiéno où les conductivités sont respectivement 117,2 µS/cm et 228 µS/cm. La conductivité électrique varie de 21,3 µS/cm à Mélékoukro à 228 µS/cm à Affiéno, pour une moyenne de 49,1±42,214 µS/cm.

Résultats des paramètres chimiques

Cations majeurs

Les teneurs en calcium sont très faibles, oscillant entre 0,28 mg/L à Assinie Mafia à 27,2 mg/L à Affiénoù, pour une moyenne de $3,308 \pm 6,464$ mg/L. Les valeurs de magnésium obtenues varient de 0,02 mg/L à Aboutou à 9,72 mg/L à Affiénoù avec une valeur moyenne de $1,283 \pm 2,135$ mg/L. Le sodium présente également de faibles allant de 1,62 mg/L à Kacoukro à 15,37 mg/L à Etuéboué, pour une valeur moyenne de $5,748 \pm 3,127$ mg/L. Les valeurs de potassium, tout comme le sodium sont très basses. Elles varient de 0,00 mg/L à Kacoukro et N'Zikro à 1,9 mg/L à Assouindè, pour une moyenne de $0,788 \pm 0,577$ mg/L.

Anions majeurs

Tout comme les cations, les anions existent à faibles doses dans les eaux souterraines de la région. Les bicarbonates (HCO_3^-) affichent des teneurs comprises entre 0,00 mg/L dans 10 localités, soit 38,5% de l'effectif total à 11,2 mg/L à Affiénoù, avec une moyenne de $0,751 \pm 2,213$ mg/l. Les taux de chlorures enregistrés sont très faibles et varient de 3 mg/L à Kacoukro à 25 mg/L à Etuéboué, pour une moyenne de $11,977 \pm 6,394$ mg/L. Les teneurs en sulfates varient entre 1 mg/L dans 6 localités, soit 23% de l'effectif total et 11 mg/L à Assinie Mafia et Assué Bonou, avec une moyenne de $4,035 \pm 3,04$ mg/L.

Eléments métalliques en trace

Les éléments métalliques en trace considérés sont : le fer total, le manganèse et l'aluminium. Les teneurs en fer dans les eaux souterraines de la région sont hétérogènes. Elles varient de 0,00 mg/L à Soumié Centre à 5,94 mg/L Affiénoù, pour une moyenne de $0,466 \pm 1,15$ mg/L. Les teneurs en manganèse sont généralement faibles dans l'eau, sauf à Affiénoù (0,596 mg/L), N'Guiémé (0,179 mg/L) et Aboutou (0,144 mg/L) où les teneurs sont supérieures à la norme. 23% des localités affichent des teneurs nulles. Les taux d'aluminium varient de 0,00 mg/L au niveau de Krindjabo à 0,237 mg/L à Frambo, pour une moyenne de $0,078 \pm 0,048$ mg/L.

Autres paramètres étudiés

La dureté totale de l'eau (THT), la silice (SiO_2) et les sels nutritifs tels que les phosphates (PO_4^{3-}), les nitrates (NO_3^-) ont été pris en compte dans cette étude. Les valeurs de phosphates enregistrées dans les eaux souterraines varient de 200

0,007 mg/L à Krindjabo à 1,01 mg/L à Babadougou, pour une moyenne de $0,348 \pm 0,260$ mg/L. Les taux de nitrates dans les eaux sont compris entre 0,0 mg/L à Bodoua à 88,7 mg/L à Krindjabo, avec une moyenne de $7,996 \pm 18,024$ mg/L. Les teneurs en silices varient de 6,5 mg/L à Nouamou à 32,8 mg/L à N'Guiémé, pour une moyenne de $14,604 \pm 5,284$ mg/L. La dureté totale des eaux varient de 0,10°F au niveau de Mélékoukro à 10,80°F à Affiénu, pour une valeur moyenne de $0,952 \pm 2,097$ °F. Ces très faibles valeurs de la dureté de l'eau témoignent que les eaux souterraines de la région d'Adiaké sont très douces.

Parmi les éléments majeurs, les principaux ions sont le sodium pour les cations et les chlorures pour les anions. Le Na^+ représente 54% des cations ; après viennent le Ca^{2+} (27%), le K^+ (12,6%) et le Mg^{2+} (6,4%). Quant aux anions, les plus importants sont les Cl^- (63%) ; ensuite les SO_4^{2-} (30%) et les HCO_3^- (7%). L'ordre d'importance des principaux ions dans les eaux souterraines de la région d'Adiaké se résume comme suit : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$ pour les cations et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ pour les anions.

Classification hydrochimique des eaux souterraines

Le faciès chimique des eaux souterraines de la région d'Adiaké est donnée par le diagramme de Piper (Figure 3).

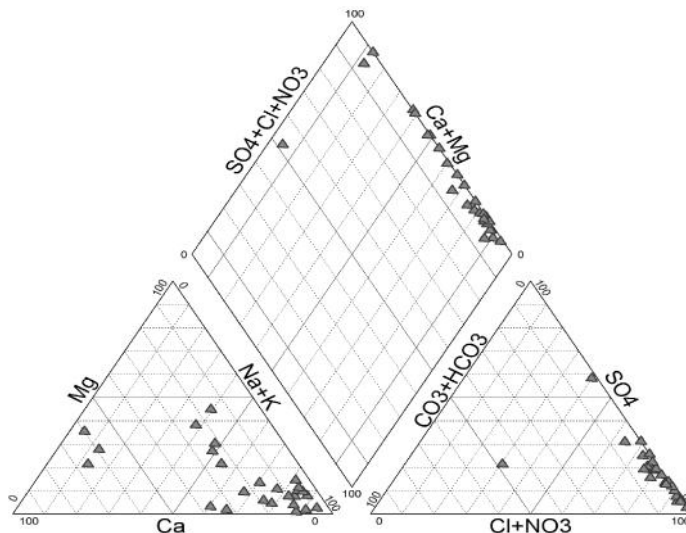


Figure 3 : Classification hydrochimique des eaux de surface d'Adiaké

Deux (2) grandes familles d'eau se distinguent dans les eaux souterraines de la région : les eaux sulfatées et les eaux chlorurées qui sont les plus fréquentes. Ces grandes familles font ressortir chacune deux (2) sous-familles : les eaux chlorurées ou sulfatées sodiques et calciques (Tableau 2).

Tableau 2 : Classification des faciès chimiques des eaux souterraines

Formules	Hydrofaciès	Echantillons d'eau	Fréquence (%)
$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$ et $r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+} > rMg^{2+}$	Eaux chlorurées sodi-potassiques	1; 3; 4; 5; 7; 8; 9; 10 ;11 ;14 ;15; 16; 17; 18; 19; 21; 22; 23; 24; 25; 26	80,8
$rCl > rSO_4^{2-} > rHCO_3^-$ et $rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$	Eaux chlorurées calciques	12 ; 20	7,7
$rSO_4^{2-} > rCl > rHCO_3^-$ et $r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+} > rMg^{2+}$	Eaux sulfatées sodi-potassiques	2 ; 6	7,7
$rSO_4^{2-} > rCl > rHCO_3^-$ et $rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$	Eaux sulfatées calciques	13	3,8

Résultats de l'étude statistique multivariée

Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN)

Les valeurs propres des facteurs sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée

	F1	F2	F3
Valeur propre	6,968	3,014	2,108
% de Variance exprimée	40,987	17,730	12,398
Cumul de valeur propre	6,968	9,982	12,09
% de Variance exprimée cumulé	40,987	58,717	71,115

Le pourcentage de variances exprimées est de 40,987% pour le facteur 1, 17,73% pour le facteur 2 et 12,398% pour le facteur 3. La représentation à l'aide des deux premiers facteurs rend compte de manière satisfaisante de la structure des nuages de points. La liaison existant entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (Tableau 4). On note de

nombreuses corrélations faibles et négatives, faibles, fortes et positives entre certaines variables. Ainsi, la CE présente de fortes corrélations avec THT (0,87), Ca (0,7), Mg (0,78), HCO₃ (0,87), Fe (0,89), Mn (0,87). Il existe de fortes corrélations entre THT et Ca (0,89), Mg (0,91), HCO₃ (0,92), Fe (0,93), Mn (0,93). Les corrélations sont également importantes entre Ca et Mg (0,93), HCO₃ (0,79), Fe (0,77), Mn (0,81); mais négative avec Al (-0,40) et très faible avec NO₃ (0,47). Fe et Mn sont aussi très corrélés. Les très faibles corrélations s'observent entre le pH et CE (0,45), THT (0,47), Ca (0,40), Fe (0,58), et négative avec NO₃ (-0,39). Il existe également de très faibles corrélations entre les Cl et SiO₂ (0,43), PO₄ (0,53), Na (0,58) et K (0,67).



Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les variables

	T(°C)	pH	CE	Cl	SO4	SiO2	THT	Ca	Mg	HCO3	Fe	Mn	Al	NO3	PO4	Na	K
T(°C)	1,00																
pH	0,31	1,00															
CE	0,39	0,45	1,00														
Cl	0,06	-0,26	-0,14	1,00													
SO4	-0,02	0,02	0,08	0,30	1,00												
SiO2	0,23	0,30	0,19	0,43	0,15	1,00											
THT	0,13	0,47	0,87	-0,23	0,07	-0,01	1,00										
Ca	-0,09	0,40	0,74	-0,07	0,24	0,09	0,89	1,00									
Mg	-0,05	0,29	0,78	-0,05	0,34	0,01	0,91	0,93	1,00								
HCO3	0,30	0,72	0,87	-0,23	0,07	0,21	0,92	0,79	0,79	1,00							
Fe	0,32	0,58	0,89	-0,14	0,10	0,10	0,93	0,77	0,83	0,96	1,00						
Mn	0,29	0,71	0,87	-0,25	0,09	0,15	0,93	0,81	0,80	0,97	0,93	1,00					
Al	0,09	-0,32	-0,11	0,23	0,03	0,18	-0,34	-0,40	-0,33	-0,29	-0,20	-0,34	1,00				
NO3	-0,52	-0,39	0,07	-0,04	0,11	-0,25	0,19	0,47	0,37	-0,10	-0,10	-0,03	-0,27	1,00			
PO4	0,02	-0,04	-0,08	0,53	0,30	0,69	-0,27	-0,16	-0,15	-0,14	-0,17	-0,16	0,10	-0,22	1,00		
Na	0,08	-0,27	-0,29	0,58	-0,06	0,10	-0,27	-0,33	-0,31	-0,31	-0,29	-0,36	0,08	-0,04	0,17	1,00	
K	0,43	-0,13	0,26	0,67	0,16	0,25	0,04	0,01	0,09	0,01	0,17	0,04	0,30	-0,12	0,25	0,32	1,00

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification p 5%

L'analyse des variables de l'ACPN dans le plan factoriel F1-F2 est présentée par la figure 4. Ce graphe met évidence trois grands regroupements des paramètres étudiés dans les eaux souterraines. Le premier regroupement autour de l'axe factoriel F1 et qui prend en compte CE, pH, HCO₃⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, THT, Fe, Mn²⁺, met en évidence une minéralisation de l'eau par le phénomène de dissolution de la roche. Le facteur F1 définit donc un axe de minéralisation globale de l'eau. Cependant, les regroupements de part et d'autre de cet axe montrent que ces éléments sont issus de deux mécanismes différents de mise en solution. Le Ca²⁺, le Mg²⁺ et THT sont issus de l'altération des roches suite à un long temps de contact eau-roche et de l'hydrolyse acide des minéraux silicatés, tandis que la mise en solution du fer et du manganèse est contrôlée par un même processus : l'oxydoréduction. Cela est justifié par forte corrélation (0,93) entre ces deux variables. La faible corrélation du pH avec CE (0,45), THT (0,47) et Ca (0,40) montre que mécanisme le mécanisme d'oxydoréduction prépondérante sur celui de l'hydrolyse acide. Le facteur F1 donc un axe de minéralisation globale de l'eau par le phénomène de dissolution de la roche suite à un long temps de contact eau-roche (minéralisation temps de séjour par hydrolyse acide des minéraux) et à l'oxydoréduction qui est le mécanisme dominant dans l'acquisition des ions dans les eaux souterraines de la région. Le facteur 2 explique à lui seul 17,73% de l'inertie du nuage des points représentatifs des ouvrages et est déterminé par T°C, SO₄²⁻, Al³⁺, Na⁺, K⁺, PO₄³⁻, Cl⁻, SiO₂ et NO₃⁻. Ce regroupement indique que ces paramètres sont mis en solution par le même phénomène. Les nitrates (NO₃⁻) ont une origine superficielle et indiquent une pollution d'origine anthropique.

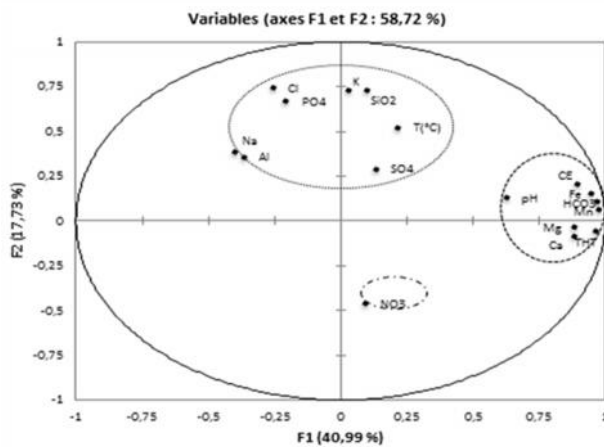


Figure 4 : Analyse des variables dans le plan factoriel F1-F2

Cela se voit par leur faible corrélation avec Ca (0,47). Le facteur F2 représente donc un axe de minéralisation par infiltration d'eaux dans la nappe. Le sodium (Na^+) provient de l'altération des feldspaths contenus dans les roches ignées, de l'attaque des minéraux argileux et de la dissolution de grains de sel soluble contenus dans les roches sédimentaires ou dans les lits d'évaporites. Le potassium (K^+) est moins répandu que le sodium dans les roches ignées mais il est plus abondant dans les roches sédimentaires. Les sources communes de chlorures (Cl^-) sont l'halite (NaCl) et les minéraux reliés aux dépôts d'évaporite. On les retrouve également dans les sédiments marins, et en milieu côtier (Boisvert E. et al., 2008). Le regroupement des paramètres dans le pôle positif de l'axe F2 indique donc une intrusion d'eaux marines et/ou saumâtres dans la nappe. Cela explique un processus rapide et facile de production d'ions dans l'aquifère du bassin sédimentaire tel que la dissolution des amas de sels ou l'intrusion des eaux saumâtres (Ahoussi, 2008). L'axe factoriel 2 est donc un axe de minéralisation par infiltrations d'eaux superficielles et d'eaux marines et/ou saumâtres.

La minéralisation des eaux souterraines est donc acquise par deux phénomènes dont le phénomène de dissolution par hydrolyse acide des minéraux de la roche, avec le mécanisme d'oxydoréduction et le phénomène d'infiltration d'eaux superficielles et souterraines (intrusion d'eaux marines e/ou saumâtres).

Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Le dendrogramme (Figure 5) issu de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a mis en évidence quatre principaux regroupements des variables. La première famille qui prend en compte la CE traduit une forte minéralisation de l'eau. Le second regroupement qui est constitué de SiO_2 , Cl^- et $T(^{\circ}\text{C})$ explique une infiltration d'eaux marines et/ou saumâtres dans les nappes. La troisième famille qui concerne uniquement les nitrates (NO_3^-) montre une minéralisation liée aux apports superficiels d'origine anthropique (pollution anthropique). Enfin, le quatrième regroupement des variables composées par la majorité des paramètres physico-chimiques tels SO_4^{2-} , pH, Na^+ , Ca^{2+} , HCO_3^- , THT, Fe, Mg^{2+} , Al^{3+} , Mn^{2+} , PO_4^{3-} et K^+ met en évidence le phénomène de dissolution de la roche par les mécanismes d'hydrolyse acide des minéraux et d'oxydoréduction. La classification des points d'eau selon leur ressemblance est donnée par la Figure 6. A l'analyse de ce dendrogramme, il ressort trois classes d'eau :

- **Classe 1** : ce sont les eaux dont la minéralisation est fortement influencée par l'intrusion d'eaux marines et/ou saumâtres. Les teneurs en silices sont élevées dans l'eau. Ce sont les localités situées surtout autour du complexe lagunaire Aby-Tendo-Ehy et sur le cordon littoral. Cette classe comprend les

localités d'Assouindè, Assinie Mafia, Mélékoukro, Adiaké, Diémissikro, Etuéboué, Mohoua, Eboko, N'Guiémé, Bodoua, Assué Bonou, Frambo, Allangouanou, Edjambo, Bléourékro, Nouamou.

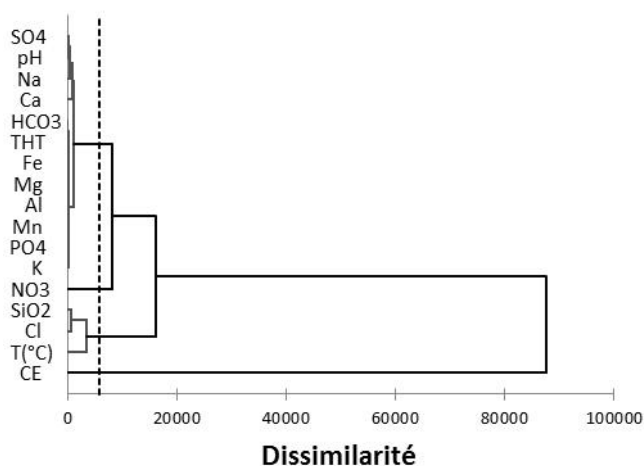


Figure 5 : Dendrogramme des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région d'Adiaké.

- **Classe 2 :** elle représente les eaux dont les éléments minéraux sont mis en solution par dissolution de la roche suite à une hydrolyse acide des minéraux de la roche. Elle regroupe les localités de Kacoukro, d'Aboutou, Djiminikoffikro, Kakoukro Limite, N'Zikro, Babadougou, Soumié Centre.

- **Classe 3 :** elle regroupe les eaux fortement minéralisées de la région. Ces eaux se rencontre en zone de schistes volcano-sédimentaires et concerne uniquement la localité d'Affiéno. Le contact eau-roche favorise une oxydoréduction qui met en solution le fer, le manganèse...

- **Classe 4 :** ce sont les eaux qui subissent une forte pression anthropique. Les teneurs en nitrates sont très élevées. Cette classe concerne les eaux de Krindjabo.

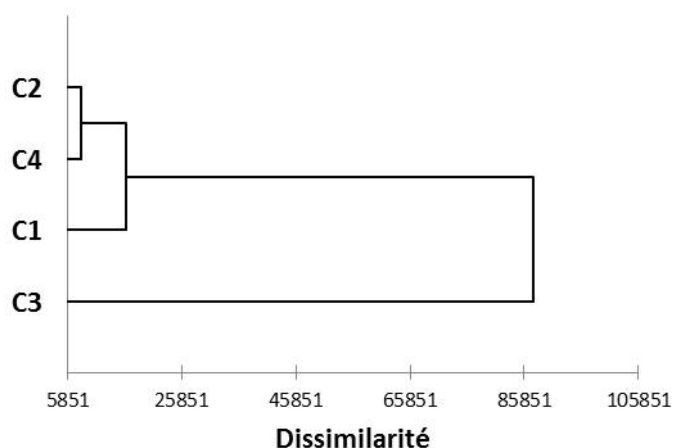


Figure 6 : Dendrogramme de la classification des eaux souterraines de la région

Potabilité des eaux souterraines de la région d’Adiaké

Les eaux souterraines de la région sont généralement acides. Cet aspect peut conduire à la fois à une dégradation des matériaux à base de ciment et à une corrosion des conduites d’eau et des appareils métalliques. La teneur anormale de nitrates à Krindjabo peut occasionner la méthémoglobinémie qui est à craindre pour les nouveaux nés qui peuvent souffrir d’un manque d’oxygène. La hausse des teneurs en phosphates constitue un indice de pollution. Les fortes teneurs en fer et un degré moindre le manganèse ont inconvéniens sur l’aspect ou le goût de l’eau. En effet, ils confèrent respectivement à l’eau des colorations noirâtre et rougeâtre. Une teneur élevée en aluminium est susceptible d’introduire une gêne pour le consommateur (coloration, dépôts). Des teneurs élevées en silice, comme c’est le cas dans la zone d’étude (85% des échantillons) ont pour conséquences des manifestations pathologiques au niveau du poumon liées à l’inhalation.

DISCUSSION

Les analyses des eaux souterraines de la région d’Adiaké montrent que ces eaux sont très faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique moyenne de 49,1 µS/cm. Cependant les eaux d’Adiaké et Affiénu présentent une minéralisation respectivement faible et moyenne. Les eaux sont acides, avec un pH qui varie de 3,55 à 6,27, pour une moyenne de 4,6. Ce pH moyen est en accord avec celui obtenu par Ahoussi (2008) qui est 4,53 sur les eaux souterraines du bassin sédimentaire. Cet aspect des eaux souterraines du bassin

sédimentaire a été signalé dans plusieurs études dont Ahoussi et al., (2008). L'acidité des eaux constitue l'un des traits caractéristiques des eaux de Côte d'Ivoire et particulièrement dans le sud côtier. Il serait lié soit à la présence de CO₂ libre en quantité élevée 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 CO₂ dans les premières couches du sol (Ahoussi et al., 2010). Dans cette zone climatique (zone tropicale humide), la température moyenne des eaux est de 30°C (Rodier, 1984). Ainsi, les températures au-dessus de 25°C obtenues ne constituent pas un danger pour le consommateur. Cependant, les teneurs en fer sont élevées dans environ 31% des localités. Ces fortes teneurs en fer dans les aquifères sont attribuées aux formations géologiques de la région comme l'ont signalé Ahoussi et al. (2013) dans l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire. En effet, la quasi-totalité des sols de la région appartient au groupe de sols ferrallitiques fortement lessivés sous une forte pluviométrie avec l'apparition en lambeau dans la partie nord-est de sols ferrallitiques moyennement lessivés (Dabin B. et al., 1960; Perraud et De la Souchère, 1971). L'abondance des précipitations provoque une altération très intense et complète des minéraux primaires de la roche mère par hydrolyse. Cette altération aboutit à l'individualisation des oxydes métalliques et aussi la libération des éléments quartzes résiduels en abondance. Ce mécanisme a été mis en évidence dans le processus de mise en solution des ions par l'analyse multivariée. D'autre part, ces teneurs anormales de fer peuvent s'expliquer par la concentration d'ions métalliques au niveau des boues tapissant le lit des rivières. Dans cette zone, l'activité cellulaire développe une anaérobiose conduisant à la réduction du fer et du manganèse et à leur solubilisation (Rodier, 2009). Ce mécanisme a été mis en évidence par l'ACPN dans l'acquisition de la minéralisation des eaux. Un autre mécanisme intervenant dans la minéralisation des eaux est régi par les apports superficiels liés aux activités anthropogéniques et l'intrusion d'eaux de mer ou de la lagune. L'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines constitue un problème majeur d'ordre mondial et fait l'objet de plusieurs études : Bricha et al. (2007); El Asslouj et al. (2007). Ces différents travaux ont montré également l'influence des apports anthropiques dans la qualité des eaux souterraines. En effet, la teneur très élevée en nitrates dans les eaux de Krindjabo justifie une pratique intense d'activités agricoles dans la zone. D'autre part, les teneurs en phosphates sont en hausse dans les eaux. Plus 27% des localités présentent des teneurs avoisinant la norme et 31% au-dessus de la norme. Selon Rodier (2009), la contamination des eaux de nappes par cet élément est liée aux rejets industriels et domestiques ou par le lessivage des terres cultivées renfermant des engrais phosphatés ou traités par certains pesticides. Des travaux menés dans la région par Dibi et al. (2007) ; Hauhouot (2004) ont montré que la région subit une forte pression anthropique liée à l'intensification des activités agricoles. En effet selon Bendra et al. (2005), l'agriculture est considérée comme le principal responsable de

l'augmentation des concentrations des produits phytosanitaires dans le milieu récepteur, le premier émetteur de la pollution azotée et le second émetteur du phosphore. De plus, une étude réalisée par Aké et al. (2012) dans la région de Bonoua a montré que 71% des terrains de la région sont à moyenne et forte vulnérabilité au phénomène d'érosion hydrique. Parallèlement à l'infiltration d'eaux superficielles, source de pollution anthropique des nappes, on constate une intrusion d'eaux salines et saumâtres dans les aquifères du fait de la situation géographique de la région. Le phénomène de pollution des aquifères côtiers par l'intrusion des eaux marines et saumâtres ont fait l'objet des plusieurs travaux dont Kouzana et al. (2007) et Srinivas et al. (2013). Selon Choudhury et al. (2001), ce mécanisme est influencé par plusieurs facteurs dont les formations géologiques présentes. Dans la zone, elles sont représentées par les sables quaternaires et ceux des cordons marins, constitués de sables fins à grossiers, de perméabilité variant de 10^{-3} m/s à 4.10^{-5} m/s (Aghui et Biemi, 1984). Les pompages excessifs dans le but de satisfaire les différents usages est à la base de l'intrusion des eaux salines et saumâtres dans la nappe. Ce phénomène a été mis en évidence par l'analyse multivariée. Cet événement se justifie par les teneurs élevées en silices et les teneurs relativement élevée en chlorures et sodium ; d'où le faciès chloruré rencontré dans la plupart des eaux (88,5%) de la région. Les eaux chlorurées sodi-potassiques représentent 80,8%. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux trouvés par Ahoussi (2008) dans le bassin sédimentaire, à Abidjan. L'influence des mécanismes intervenant dans l'acquisition de la minéralisation des eaux a révélé quatre groupes d'eau parmi les eaux souterraines de la région. Des études menées ailleurs ont permis également de distinguer des groupes d'eaux au sein des eaux souterraines. L'étude réalisée par El Asslouj et al. (2007) sur l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza de Chaouia (Maroc), a révélé trois groupes d'eau. De même, dans le but d'évaluer les caractéristiques physico-chimiques des nappes phréatiques et profondes de la province de Mazandaran (Iran), Shahbazi et al. (2009) ont mis en évidence trois principaux groupes d'eau, sur la base des corrélations entre les caractéristiques similaires à 88 sites d'échantillonnage. Néanmoins, les eaux souterraines de la région sont très douces avec une dureté comprise entre 0,28 à 1,6°F, largement inférieure à la norme. Cet aspect est lié aux terrains cristallins (granitiques), sableux et gréseux (riches en minéraux siliceux et silicatés) qui donnent des eaux douces, peu minéralisées mais acides et agressives pour les conduites (Beauchamp, 2006).

CONCLUSION

L'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région d'Adiaké a permis de caractériser cette ressource naturelle. Les analyses physicochimiques montrent que les eaux sont acides (3,55 pH 6,27) et très faiblement minéralisées dans l'ensemble. Les paramètres chimiques de qualité sont pour la plupart au-dessous de la norme de potabilité OMS, excepté en quelques points où des teneurs de phosphates, nitrates et silices sont élevées et dépassant parfois largement la norme. Les éléments métalliques en traces présentent également des teneurs élevées dans les eaux, avoisinant de fois la norme et parfois dépassant largement la norme (le fer). Dans l'ensemble, les eaux de la région sont très douces, avec une dureté très faible liée aux terrains cristallins (granitiques), sableux et gréseux de la région. Les eaux de la région se regroupent autour de deux principales familles d'eaux dont les eaux sulfatées et les eaux chlorurées qui sont les plus rencontrées. La caractérisation hydrochimique a permis de montrer que les différents processus responsables de l'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la d'Adiaké sont : le temps de séjours des eaux en contact avec l'encaissant, l'oxydoréduction, l'infiltration des substances liées aux activités anthropiques et l'intrusion d'eaux marines et/ou saumâtres. Par conséquent, quatre classes d'eaux ont été distinguées dans la région.

Cette étude a donné des résultats certes intéressants mais méritent d'être complétés par d'autres investigations notamment une étude des paramètres chimique de pollution, les métaux lourds, les pesticides ainsi qu'une étude bactérienne. Ces travaux permettront de disposer d'une base de données pour un suivi de la qualité physico-chimique et bactérienne des eaux souterraines de la région.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELBAKI C. ET BOUKLI H. F. (2007). Etude du phénomène de dégradation des eaux souterraines du groupement urbain de Tlemcen. *Revue des Energies Renouvelables* ; Vol. 10 N°2, 257-263
- AGHUI ET BIÉMI J. (1984). Géologie et Hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contaminations. *Annales de l'Université de Côte d'Ivoire, série C (Sciences)*, tome 20, 313-347.
- AHOUSSE K. E., SORO N., SORO G., LASM T., OGA M. S., ZADE S. (2008). Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, 20(2), 302-316.
- 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 de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270 p.

- AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., SORO G., SORO N., 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, 359-383.
- 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.
- AKE G.E., KOUASSI D., KOUADIO, B.H., BROU D., MAHAMAN B. S., BIEMI J. (2009). Contribution des méthodes de vulnérabilité intrinsèque DRASTIC et GOD à l'étude de la pollution par les nitrates dans la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire), *European Journal of Scientific Research*, vol. 31, no. 1, 157-171.
- AKE G. E., KOUADIO B.H., ADJA M.G., ETTIEN J.B., EFFEBI K. R., BIEMI J. (2012). « Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire) », *Physio-Géo* [En ligne], Volume 6|2012, mis en ligne le 06 avril 2012, Consulté le 30 septembre 2013. URL : <http://physio-geo.revues.org>.
- ANANI T. A., KOUAME K. J., SALEY M. B., ANOH K.A., DEH K. S., KOUA J.J.T., EFFINI T.A., SIGNO H. K., JOURDA J.P., BIEMI J. (2012). Contribution of multicriteria analysis and GIS for the specific vulnerability mapping to agricultural inputs of groundwaters in Bonoua area (Southeast of Côte d'Ivoire). *Journal of Engineering Studies and Research*-Volume 18, No. 3, 11-19.
- AW S., N'GORAN E.B.Z., SIAKA S., 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, 2573-2585.
- BEAUCHAMP J. (2006) : Qualité et pollution des eaux souterraines. <http://www.u-picardie.fr/~beaucham/cours-du/du-8.htm> (Consulté en 2012)
- BENDRA B., FETOUANI S., SBAA M., GHARIBI E., EL HALOUANI H., Y. RHOMARI (2005). Étude de l'impact de la pollution agricole diffuse sur la qualité de l'eau et du sol au niveau de la plaine de Triffa. 3ème Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement. El Jadida les 8, 9 et 10 juin 2005. Communication affichée.
- BOISVERT E., BOURQUE É., CLOUTIER V., KIRKWOOD D., LAUZIÈRE K., LEFEBVRE R., MARTEL R., MICHAUD Y., NASTEV M., OUELLET M., PARADIS D., ROSS M., ROUSSEAU N., SAVARD M.

- M. (2008). Guide méthodologique pour la caractérisation régionale des aquifères en roches sédimentaires fracturées.
- BRICHA S., OUNINE K., OULKHEIR S., EL HALOUI N., ATTARASSI B. (2007). Etude de la qualité physicochimique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique SCIENCE* 03 (3), 391-404.
- CHOUDHURY K, SAHA D.K., CHAKRABORTY P. (2001). Geophysical study for saline water intrusion in a coastal alluvial terrain. *Appl Geophys* 46,189–200
- DABIN B., LENEUF N., RIOU G. (1960). Notice explicative de la carte pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle de 1/2.000000 ; *ORSTOM*, Institut d'Enseignement et de Recherches Tropicales d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire).
- DIBI B., DOUMOUYA I., KOFFI K., SORO N., SAVANE I., KOUAME K. (2007). Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution en aquifère confiné selon la méthode DRASTIC: cas de la région d'Aboisso, Sud-est de la Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research* ; Vol.18, No.3, 500-513.
- EL ASSLOUJ J., KHOLTEI S., EL AMRANI-PAAZA N., HILALI A. (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, vol. 20, n° 3, 309-321.
- HAUHOUCOT C. (2004). Les pressions anthropiques sur les milieux naturels du sud-est ivoirien. *Geo-Eco-Trop*, 28, 1-2: 69-82.
- JICA (2001). « Plan Directeur de Gestion intégrée des ressources en eau en Côte d'Ivoire - Rapport Final ».
- KEDDAL H., N'DRI Y. J. (2008). Impacts de l'intensification agricole sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. Art.1 (*HTE 138*)13-29.
- KOLSI S. H., BOURI S., HACHICHA W., 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, 2215-2224
- KONE M., BONOU L., BOUVET Y., JOLY P., KOULIDIATY J. (2009). Etude de la pollution des eaux par les intrants agricoles : cas de cinq zones d'agriculture intensive du Burkina Faso. *Sud Sciences et Technologies* ; Semestriel N°17, 5-15.
- KOUZANA L., BEN MAMMOU A., GAALOUL N. (2007). Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop.*, 31, 57-70.
- LASM T., FOSSOU R. M. N., ONETIE O.Z., BAKA D., YOUAN T.A.M., OGA M-S., 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, 114-135
- MOUREY V. ET VERNOUX J. (2000) : Les risques pesant sur les nappes d'eau souterraine d'Ile-de-France. *Annales des mines*.
- OCDE (2004). Agriculture et environnement : Enseignement tirés de dix ans (1993-2003) des travaux de l'OCDE.
- OGA M. S., LASM T., YAO T. K., SORO N., SALEY M. B., KOUASSI D., 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):72-87.
- PERRAUD A. ET DE LA SOUCHERE P. (1971). *Esquisse pédologique de la Côte d'Ivoire à l'échelle de 1/500000. Feuille Sud-Est. Édit. ORSTOM, Centre d'Adiopodoumé.*
- RAYA S., AMANI A. OTCHET A. (2007). Une mine d'or bleu en manque de protection. *Horizons ; Planète SCIENCE*, Vol.5, No.3, 16-19.
- RODIER J. (1984) : L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, et eau de mer. 7^{ème} édition, *Dunod Technique*, 1136 p.
- RODIER J., LEGUBE B., MERLET N. et Collaborateurs (2009). L'Analyse de l'eau. 9e édition ; Entièrement mise à jour, Ed. Dunod, Paris, 1511 p.
- SHAHBAZI A. AND ESMAEILI-SARI A. (2009). Groundwater Quality Assessment in North of Iran: A Case Study of the Mazandaran Province. *World Applied Sciences Journal* 5 (Special Issue for Environment), 92-97.
- SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO K. E., AHOUSSE K. E., SORO G., OGA Y. M-S., SAVANE I., 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), 2203-2219.
- SRINIVAS Y., MUTHURAJ D., HUDSON D.O., A. STANLEY A.R., CHANDRASEKAR N. (2013). Environmental applications of geophysical and geochemical methods to map groundwater quality at Tuticorin, Tamilnadu, India. *Environmental Earth Science*, 70, 2143–2152.
- WHO (2011). Guidelines for Drinking-water Quality. Recommendations; Fourth Edition; 518p.
- YIDANA S. M., OPHORI D., BANOENG-YAKUBO B. (2006). A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, 8p.