



Original Paper

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire)

Michel Amani KOUASSI^{1*}, Alphonse Kouakou YAO¹, Yves Angbo AKE² et Jean BIEMI³

¹ Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Tél. (+225) 30 64 67 15 .

² Ecole de Formation Continue et de Perfectionnement des Cadres (EFCPC), Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP-HB), BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Tél. (+225) 04 75 55 42 ;

E-mail : akesnell@yahoo.fr

³ Université de Cocody, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la terre et des Ressources Minières (STRM) ; 22 BP 582 Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire) ;

E-mail : jbiemi@yahoo.fr

*Auteur correspondant, E-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr

RESUME

Plusieurs études hydrogéologiques ont été réalisées à travers la Côte d'Ivoire pour une meilleure évaluation (quantitative et qualitative) des ressources en eaux souterraines. Les résultats obtenus au cours de ces travaux sont fort encourageants et ont contribué en particulier à une meilleure connaissance de l'hydrogéochimie des eaux souterraines. En dépit de ces résultats considérables, des efforts restent encore à faire. Dans la région Ouest, qui est aujourd'hui la nouvelle boucle du cacao, de telles études sont quasi-inexistantes. C'est donc dans le souci d'apporter une contribution à la connaissance de l'hydrogéochimie des aquifères de l'Ouest de la Côte d'Ivoire que la présente étude a été entreprise. Cette étude a été particulièrement menée dans la zone Guiglo-Duekoué qui est située entre les latitudes 7°00 et 7°42 Nord et les longitudes 6°28 et 6°50 Ouest. L'objectif de cette étude est la caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines pour la compréhension de la minéralisation de celles-ci. Ce travail a été mené à partir des résultats d'analyses de paramètres physico-chimiques des eaux et s'est appuyé sur un échantillon de 48 forages. La méthodologie appliquée est basée une approche statistique multivariée (Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)). La combinaison de ces différentes méthodes a permis d'apporter des réponses à notre problématique. Cette étude a permis d'identifier deux principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la région. Le premier mécanisme est le phénomène de minéralisation couplé au temps de séjour qui met en évidence l'hydrolyse des silicates après l'infiltration des eaux enrichies en CO₂ du sol. Le deuxième mécanisme est le phénomène d'oxydo-réduction, lié à la turbidité, aux teneurs en fer et en manganèse. Ces résultats contribuent à une meilleure connaissance des propriétés hydrogéochimiques des ressources en eaux souterraines du socle cristallin de Côte d'Ivoire.

© 2011 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Analyse en Composantes Principales Normées, Classification Hiérarchique Ascendante, minéralisation, eaux souterraines.

© 2011 International Formulae Group. All rights reserved.

DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i5.35>

INTRODUCTION

Une eau de bonne qualité est source de vie, raison pour laquelle sa disponibilité, son accessibilité et son exploitabilité sont des objectifs majeurs des projets de développement dans le monde. L'accès à l'eau potable par les populations constitue l'un des grands problèmes auxquels sont confrontés les gouvernements du monde en général et celui de la Côte d'Ivoire en particulier. En Côte d'Ivoire, l'alimentation en eau potable des populations se fait à partir des prises d'eau dans les fleuves (Cavally, Sassandra, Bandama et Comoé) et des forages. Particulièrement pour le milieu rural, la Côte d'Ivoire a orienté ses recherches d'eau vers les nappes d'eaux souterraines dont les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques répondent aux normes internationales de l'OMS (Kouassi et al., 2010 ; Yao et al., 2010 ; Lasm et al., 2011), au détriment des eaux de surface qui ont une qualité physico-chimique et bactériologique douteuse et nécessitant des traitements souvent très onéreux. Ainsi, une connaissance hydrogéologique est nécessaire pour une meilleure évaluation (quantitative et qualitative) des ressources en eaux souterraines. Dans ce contexte, plusieurs études ont été réalisées à travers le pays. Parmi ces études, les plus récentes sont celles de Oga (1998) dans la région d'Abidjan, Savané et Soro (2001) dans la région du Nord-Ouest, Soro (2002) dans la région de Grand-Lahou, Ahoussi (2008) dans la région d'Agboville, Oga et al. (2009) dans la région de Tiassalé, Soro (2010) dans la région des lacs, Kouassi et al. (2010) dans la région du N'zi-Comoé, Yao et al. (2010) dans la région de Toumodi et Lasm et al. (2011) dans la région de San Pedro. Les résultats obtenus au cours de ces études sont fort encourageants et ont contribué à une meilleure connaissance de l'hydrochimie des eaux souterraines en Côte d'Ivoire. En dépit de ces résultats considérables, des efforts restent encore à faire. Dans la région Ouest, qui est aujourd'hui la nouvelle boucle du cacao, de

telles études sont quasi-inexistantes. C'est donc dans le souci d'apporter une contribution à la connaissance de l'hydrogéochimie des aquifères de l'Ouest de la Côte d'Ivoire en général et en particulier celle de la zone Guiglo-Duekoué, que la présente étude a été entreprise.

L'objectif de cette étude est la caractérisation hydrogéochimique des eaux de la zone Guiglo-Duékoué pour une compréhension de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de cette région. Ce travail a été mené à partir des résultats d'analyses de paramètres physico-chimiques des eaux et s'est appuyé sur un échantillon de 48 forages. La méthodologie appliquée est basée sur une approche statistique multivariée (Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)). La combinaison de ces différentes méthodes a permis d'apporter des réponses à notre problématique.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

La Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'Ouest, dans la zone intertropicale, entre l'équateur et le tropique du cancer, précisément entre les latitudes 4°30' et 10°30' Nord et les longitudes 8°30' et 2°30' Ouest. Elle couvre une superficie de 322 462 Km² et fait frontière avec le Golf de Guinée au Sud, le Ghana à l'Est, le Libéria et la Guinée à l'Ouest, le Mali et le Burkina-Faso au Nord. La zone Guiglo-Duékoué est située à l'Ouest de la Côte d'Ivoire précisément dans la région du Moyen-Cavally. Cette zone est située entre les latitudes 7°00' et 7°42' Nord et les longitudes 6°28' et 6°50' Ouest (Figure 1).

Le régime climatique régnant au niveau de la zone Guiglo-Duekoué est un climat subéquatorial de type montagneux. Il est caractérisé par des précipitations annuelles variant en moyenne entre 1 600 mm et 2 000 mm. La température moyenne oscille autour de 25 °C par an. La végétation est constituée de forêts denses humides marquées par

endroits de prairies (Brou, 2005). Cette végétation est soumise à l'action anthropique. En effet, l'Ouest de la Côte d'Ivoire est devenu la nouvelle « boucle du cacao » (Brou, 2005). Le relief fait partie du massif montagneux de l'Ouest du pays ; il est assez accidenté, avec une altitude moyenne de 300 m. On y rencontre de vastes et hauts plateaux, de plaines, de bas-fonds très étendus et de chaînes de monts. Les sols sont de type ferrallitique à fertilité chimique moyenne et constituent un large domaine pour le développement de l'agriculture. Il existe également des sols développés sur des roches basiques potentiellement riches en sels minéraux et des sols hydromorphes (bas-fonds). La couverture hydrographique de la région de Guiglo-Duékoué est assurée par le fleuveassandra et ses affluents.

Le secteur Guiglo-Duékoué est à cheval sur le domaine Archéen (Guiglo) et le domaine SASCA (Duékoué). La géologie de la zone d'étude s'intègre dans celle des deux domaines cités plus haut. La pétrographie des formations géologiques de la zone Guiglo-Duékoué est marquée par trois unités principales que sont (Figure 2) (Kouamé, 2011): l'unité des monts Gao, l'unité des monts Douan et l'unité des migmatites à biotite et microcline. L'unité des monts Gao est constituée de métasédiments et de granitoïdes associées ou non à des quartzites ferrugineux. L'unité des monts Douan est composée de gneiss charnockitique et leptynitiques, (constitué de quartz et feldspath alcalin dominants, souvent riches en grenat, pauvres en mica et/ou amphiboles) et de gneiss à pyroxène. Elle est aussi composée de charnockites qui est une roche magmatique composée de quartz, de microclines, de plagioclases et de feldspaths alcalins. La disposition des faciès pétrographiques au sein de cette unité suggère une organisation en antiforme avec, au cœur, les charnockites et les gneiss leptynitiques sur les flancs. L'unité des migmatites à biotite et microcline est un ensemble migmatitique qui témoigne d'un important épisode de fusion anatectique des

unités pétrographiques précitée. L'unité est composée principalement de quartz, de microcline, d'oligoclase, de la biotite, d'autres minéraux accessoires comme le grenat, et la muscovite. Les formations de la zone d'étude présentent une orientation préférentielle (NNE-SSW) due aux phases de tectonique souple des deux (2) orogénèses (léonienne et libérienne) qui s'y sont manifestées. A ces phases, on associe le métamorphisme et la migmatisation des roches antécinématiques accompagnés du rubanement des migmatites, de la schistosité de l'ensemble schisteux et de la foliation des amphibolites. Outre ces phases de tectonique souple, une phase cassante a participé à la déformation des roches du secteur. Elle a occasionné la mise en place de filons de pegmatites, de dolérites plus ou moins importants, quelques rares filons de quartz et une granitisation considérable. La zone d'étude est très fracturée (Lasm, 2000 ; Kouamé, 2011), ce qui est favorable à l'infiltration des eaux qui vont contribuer à la recharge des nappes et à la modification de la minéralisation des eaux souterraines. La région Guiglo-Duékoué, située en zone de socle cristallin, est recouverte par des couches d'altérites d'épaisseur plus ou moins importante, avec des affleurements de roches granitiques par endroits. Deux types d'aquifères y ont pris naissance au cours des temps géologiques qui sont les aquifères d'altérites et les aquifères de fractures (Lasm, 2000).

Données de l'étude

La présente étude est essentiellement basée sur l'analyse des fiches techniques de 48 forages d'eau couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Les paramètres physiques étudiés sont la température, le pH, la turbidité et la conductivité électrique. Pour les paramètres chimiques, cette étude s'est intéressée au bicarbonate, au calcium, au magnésium, au sodium, au potassium, au chlore, au fer, au manganèse, au nitrate, au nitrite et au sulfate. Les paramètres physiques ont été mesurés *in situ*. Les échantillons d'eau

destinés aux analyses chimiques ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène pour être analysés au Laboratoire d'Analyse d'Abengourou (LPA) en 2009. Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre DR 2010 de type HACH. Ces données ont été recueillies lors du projet CESPPCC (Comité d'Examen et de Suivi des Projets et Programmes de la filière Café-Cacao) concernant la réalisation des forages d'exploitation équipés de pompes à motricité humaine dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Elles sont issues de la consultation des fiches techniques de forages fournies par la Société Africaine de Forage (AFRIFOR).

La fiabilité des données a été effectuée à partir de la régression linéaire réalisée entre la somme des cations majeurs et la somme des anions majeurs. Les données sont jugées fiables lorsque le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7 (Bahiri et al., 2008 ; Ahoussi, 2008 ; Kouassi et al., 2010). Une analyse de la conductivité électrique a aussi été utilisée pour l'étude de la fiabilité des données. En effet, la conductivité électrique nous renseigne sur le degré de minéralisation du fait qu'elle soit étroitement liée à la présence des espèces ioniques en solution (Lallahem, 2002 ; Zourhi et Carlier, 2002). L'analyse a consisté à l'étude de la corrélation linéaire entre les conductivités électriques mesurées et celles obtenues par calcul (Lalbat, 2006). Deux formules ont été utilisées pour le calcul de la conductivité électrique. La première formule définit la conductivité électrique (CE) de la façon suivante (Soro, 2002) :

$$CE = \frac{Résidu \text{ sec}}{0,65}$$

(1)

La deuxième formule est utilisée par le logiciel diagramme et définit la conductivité électrique (CE) comme étant la somme des conductivités électriques élémentaires des espèces ioniques selon la formule suivante (Lalbat, 2006) :

$$CE = \sum (Ch \text{ arg } e \times Cond \text{ .mol} \times 1,109 \times Activité)$$

(2)

Dans cette formule, « *Cond.mol* » est la conductivité molaire de l'ion à 20 °C et « *Activité* » est le coefficient d'activité de l'ion défini par la loi de Debye-Huckel (Lalbat, 2006).

La courbe représentative de la corrélation des sommes des concentrations des anions en fonction de celles des cations (Figure 3) met en évidence un coefficient de corrélation d'une valeur de 0,89 (supérieure à 0,70). Ce résultat traduit une bonne corrélation linéaire entre ces deux variables et par conséquent une balance ionique satisfaisante. On peut donc conclure que les différentes données utilisées sont fiables.

Le résultat de la corrélation linéaire entre les conductivités mesurées et les conductivités calculées selon la première formule est de 0,98 (Figure 4). La valeur du coefficient de corrélation entre les conductivités mesurées et les conductivités calculées selon la deuxième formule est de 0,82 (Figure 5). Les deux valeurs de corrélations linéaires sont supérieures à 0,70. En absence de mesure *in situ*, la méthode de calcul de conductivité qu'il conviendrait le mieux d'utiliser est donc la première formule (résidu sec divisé par 0,65) (équation 1). Ces résultats confirment la bonne qualité des données utilisées.

Méthodes statistiques de traitement des données

La méthodologie adoptée dans cette étude est basée sur une combinaison de l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

Des analyses en composantes principales normées (ACPN) des variables physico-chimiques ont été effectuées. Cette méthode a été déjà utilisée avec succès par d'autres auteurs (Touaïbia et al., 2006 ; Lasm et al., 2008 ; Ahoussi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2010). L'ACPN utilisée dans le cadre de cette étude a pour but de suivre l'évolution chimique des eaux souterraines. C'est une méthode statistique multidimensionnelle

descriptive utilisable comme outil d'aide à l'interprétation d'une matrice de données (Travi et Mudry, 1997 in Ahoussi et al., 2010). Cette analyse permet de synthétiser et de classer un nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leurs relations propres. L'ACP permet de mettre en évidence les ressemblances et la position graphique que présenteraient deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution. Son utilisation permet de réduire et d'interpréter les données sur un espace réduit (Lagarde, 1995 in Ahoussi et al., 2010). La méthode utilisée dans le cadre de cette étude est basée sur l'interprétation des différents facteurs de même que la matrice de corrélation obtenue à la suite du traitement des données. Deux variables seront considérées comme corrélées lorsque leur coefficient de corrélation est supérieur ou égal à 0,70 (Kouassi et al., 2010). L'ACP a été effectuée sur 48 échantillons d'eau. Les variables physico-chimiques prises en compte pendant cette analyse sont au nombre de 13 (pH, minéralisation totale (MT), la Conductivité Cond., Turbidité, Ca^{2+} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Fe^{2+} et Mn^{2+}). Les différents traitements ont été réalisés à partir du logiciel STATISTICA 6.0.

La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est un outil puissant pour déterminer des groupes statistiques naturels ou des structures dans les données. C'est un système de classification qui utilise la distance euclidienne pour des mesures de similitude et la méthode de la tutelle pour lien qui produit la classification la plus distinctive où chaque membre dans un groupe est plus semblable à ses collègues qu'à n'importe quel membre à l'extérieur du groupe (Güler et al., 2002 in Ahoussi et al., 2010). La Classification Hiérarchique Ascendante permet donc de faire un regroupement des observations ou variables en fonction des similarités qui existent entre celles-ci ou non. Cette méthode est donc couramment utilisée pour analyser les données hydrochimiques des eaux et vient

en appoint de l'ACP (Yidana et al., 2007 ; Ahoussi et al., 2010). Le résultat de cette méthode est donné sous forme d'un dendrogramme horizontal ou vertical qui classe les observations ou variables par groupes ou sous-groupes ayant le même poids ou les mêmes caractéristiques. Les variables utilisées sont les mêmes que celles de l'ACP. Les différents traitements ont été également réalisés à partir du logiciel STATISTICA 6.0.

L'application des méthodes statistiques multivariées (Analyse en Composantes Principales Normées et Classification Hiérarchique Ascendante) permettra d'identifier les phénomènes responsables de la minéralisation des eaux souterraines de la zone Guiglo-Duekoué.

RESULTATS

Résultats de l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACP)

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales Normées sont présentés sous forme de tableaux ou graphiques. 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 2). Le tableau 1 montre que la turbidité présente une bonne corrélation avec le manganèse (0,74) et à un degré moindre avec le Fe^{2+} (0,65). La conductivité est fortement corrélée avec les éléments majeurs à l'exception du sulfate et du chlorure. La corrélation de la conductivité électrique avec ces éléments se présente comme suit : Ca^{2+} (0,81), HCO_3^- (0,75), Na^+ (0,70), et K^+ (0,70). Les chlorures sont fortement liés aux alcalino-terreux (Ca^{2+} (0,82), Mg^{2+} (0,81)). Les bicarbonates sont fortement corrélés avec Na^+ (0,99), K^+ (0,97), et a un alcalino-terreux (Ca^{2+}) (0,72). La minéralisation totale est fortement liée aux ions majeurs à l'exception du sulfate. Ces corrélations avec les ions majeurs se présentent comme suite : HCO_3^- (0,87), Cl^- (0,70), aux alcalins (0,72), Ca^{2+} (0,80) et Mg^{2+} (0,70). Les variables ne

présentant apparemment aucune relation satisfaisante avec les autres variables sont le fer, les sulfates et le pH. La minéralisation totale et la conductivité électrique présentent une bonne corrélation avec la majeure partie des variables. Ces fortes corrélations entre ces variables mettent en évidence la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux souterraines de la zone Guiglo-Duékoué.

Le tableau 2 présente les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque facteur et leur cumul. Le facteur F1, avec une variance exprimée de 69,69%, est le plus important de tous, ensuite viennent les facteurs F2 et F3, avec respectivement 21,17% et 9,14% de la variance exprimée. Le cumul de la variance exprimée est de 100% pour les trois facteurs. Ces axes factoriels retenus pour cette analyse statistique sont donc représentatifs de la variance de l'ensemble des données. Les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 représentent donc respectivement des variances cumulées égales à 90,85% et à 78,82%. Au vu de ces pourcentages exprimés, nous pouvons dire que les mécanismes qui contrôlent l'évolution chimique des eaux de la région sont largement contenus dans les deux premiers facteurs. De ce fait, notre analyse portera uniquement sur le plan factoriel F1-F2 qui met en évidence les tendances générales.

Les paramètres chimiques sont regroupés dans la partie négative du cercle de communauté et sont représentés par la conductivité, MT, Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Mg^{2+} (Figure 6). La forte corrélation qui existe entre ces différentes variables et leur proximité dans le cercle de communauté montre que la mise en solution de ces différents ions est régie par le même phénomène. La plus grande partie des variables est corrélée positivement avec ce phénomène montrant ainsi que le principal phénomène à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région est l'hydrolyse. En effet, l'hydrolyse étant un processus lent de mise en solution des ions, il revient que le facteur F1 semble rendre

compte des conditions d'acquisition du chimisme de l'eau. Cette mise en solution est due au contact pendant un temps de séjour suffisant des eaux avec les formations géologiques encaissantes. De tout ce qui précède, nous considérons le facteur F1 comme un axe de minéralisation naturelle - temps de séjour des eaux. C'est le mécanisme le plus dominant dans le processus d'acquisition d'ions par l'eau en milieu de socle. Le regroupement de la majorité des variables soutenu par la minéralisation totale (MT), autour de cet axe montre l'influence de l'altération-hydrolyse dans la mise en solution des ions. Le facteur 2 est surtout représentatif du fer (Fe^{2+}), du manganèse (Mn^{2+}) et de la turbidité (Turb). Chacune de ces variables présente une corrélation faible et négative avec le facteur 1. Ces résultats montrent que le facteur 2 n'est pas lié au phénomène d'hydrolyse mais plutôt au phénomène d'oxydo-réduction. En effet, le fer peut être en solution vraie, à l'état colloïdal, plus ou moins combiné à la matière organique, sous forme de complexes organiques ou minéraux ou sous forme de particules en suspension. Le facteur F2 exprime donc un phénomène d'oxydo-réduction qui favorise la mise en solution du fer et du manganèse.

La représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques (Figure 7) rend compte de la répartition des points d'eau en fonction des différents facteurs F1-F2. L'analyse de ce graphe montre trois principaux regroupements des points d'eau :

- classe 1 : elle regroupe les échantillons d'eaux ayant les plus fortes conductivités électriques dont l'acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour. Cette classe concerne 35% des eaux. Ces eaux sont riches en bicarbonates et constituent les eaux les plus minéralisées des eaux de la zone d'étude. Ces eaux sont caractérisées par des teneurs en fer proches de la norme de l'OMS ;

- classe 2 : elle renferme les eaux moyennement minéralisées. Elle représente

42% des eaux de la localité d'étude. Elles sont surtout caractérisées par des valeurs de turbidité les plus faibles de la région et/ou des teneurs en fer et en manganèse nulles ;

- classe 3 : ce sont des forages dont les eaux présentent une forte minéralisation mais ils se différencient des autres forages par leurs teneurs en fer et en manganèse élevées. Elle représente 22% des eaux étudiées. Elles sont surtout caractérisées par les valeurs de turbidité les plus grandes de la région et/ou des teneurs en fer et en manganèse dépassant les normes de l'OMS.

Résultats de l'Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Les résultats de la Classification Hiérarchique Ascendante sont présentés par la figure 8. Le dendrogramme obtenu montre deux grandes classes statistiques distinctes. La première est déterminée par la conductivité, le pH et les éléments majeurs (HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et SO_4^{2-}). L'influence prépondérante de HCO_3^- (anion) et du Ca^{2+} (cation) sur la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude est mise en évidence. Cette classe traduit la minéralisation naturelle des eaux. Elle peut être subdivisée en deux :

- les éléments HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ sont liés au phénomène d'hydrolyse des silicates. Les éléments de cette classe présentent une très bonne corrélation avec la conductivité. Ces éléments ont une grande influence sur la minéralisation des eaux ;

- un groupe avec les éléments pH, Mg^{2+} , K^+ et dans une moindre mesure SO_4^{2-} et NO_3^- . Ce groupe est lié au phénomène de dissolution des minéraux. Il a une faible influence sur la minéralisation des eaux de la zone Guiglo-Duekoué.

La deuxième classe statistique comprend la turbidité, le manganèse (Mn^{2+}) et le fer (Fe^{2+}). Ce regroupement traduit le phénomène d'altération par hydrolyse des silicates. Le fer et le manganèse sont issus du phénomène d'oxydo-réduction. L'analyse du dendrogramme permet de mettre en évidence deux phénomènes qui sont à la base du mécanisme d'acquisition du chimisme des eaux souterraines de la zone Guiglo-Duekoué. Le phénomène majeur de la minéralisation dans la zone est l'altération par hydrolyse des silicates. Le deuxième phénomène est le phénomène d'oxydo-réduction qui entraîne la précipitation du fer et du manganèse dans les eaux.

Tableau 1: Matrice de corrélation entre les variables étudiées.

	Tub	MT	CE	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Fe^{2+}	Mn^{2+}	NO_3^-	pH
Tub	1													
MT	-0,37	1												
CE	-0,61	0,65	1											
Ca^{2+}	-0,36	0,80	0,81	1										
Mg^{2+}	-0,37	0,70	0,75	0,97	1									
K^+	-0,43	0,72	0,70	0,65	0,54	1								
Na^+	-0,42	0,72	0,70	0,62	0,51	0,98	1							
HCO_3^-	-0,43	0,87	0,75	0,72	0,62	0,99	0,97	1						
Cl^-	-0,35	0,70	0,75	0,82	0,81	0,57	0,54	0,61	1					
SO_4^{2-}	-0,20	0,35	0,05	0,21	0,23	0,36	0,35	0,31	0,07	1				
Fe^{2+}	0,65	-0,33	-0,10	-0,15	-0,19	-0,21	-0,18	-0,21	-0,01	-0,27	1			
Mn^{2+}	0,74	-0,40	-0,20	-0,29	-0,36	-0,23	-0,22	-0,24	-0,26	-0,24	0,57	1		
NO_3^-	-0,12	0,36	0,34	0,41	0,44	0,25	0,27	0,28	0,25	0,37	0,05	-0,17	1	
pH	-0,32	0,41	0,53	0,42	0,42	0,39	0,40	0,41	0,45	0,01	-0,02	-0,21	0,32	1

Tableau 2: Valeurs propres et pourcentages exprimés pour les axes principaux.

	F1	F2	F3
Valeurs propres	2,09	0,63	0,27
% Total de la variance exprimée	69,68	21,17	9,14
Cumul de valeurs propres	2,09	2,72	3,00
Cumul de la variance exprimée (%)	69,68	90,85	100

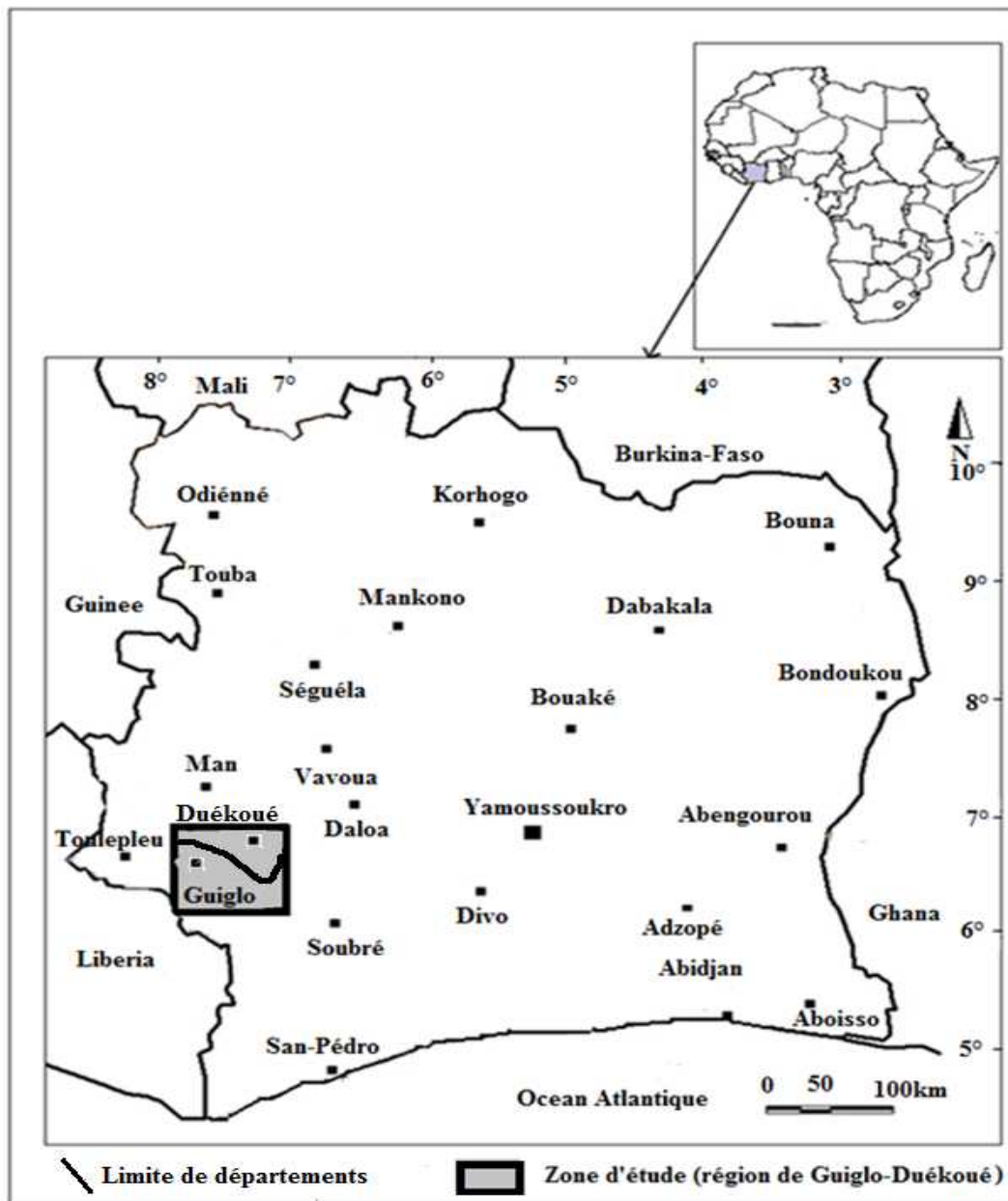


Figure 1 : Présentation de la zone Guiglo-Duékoué (Ouest de la Côte d'Ivoire).

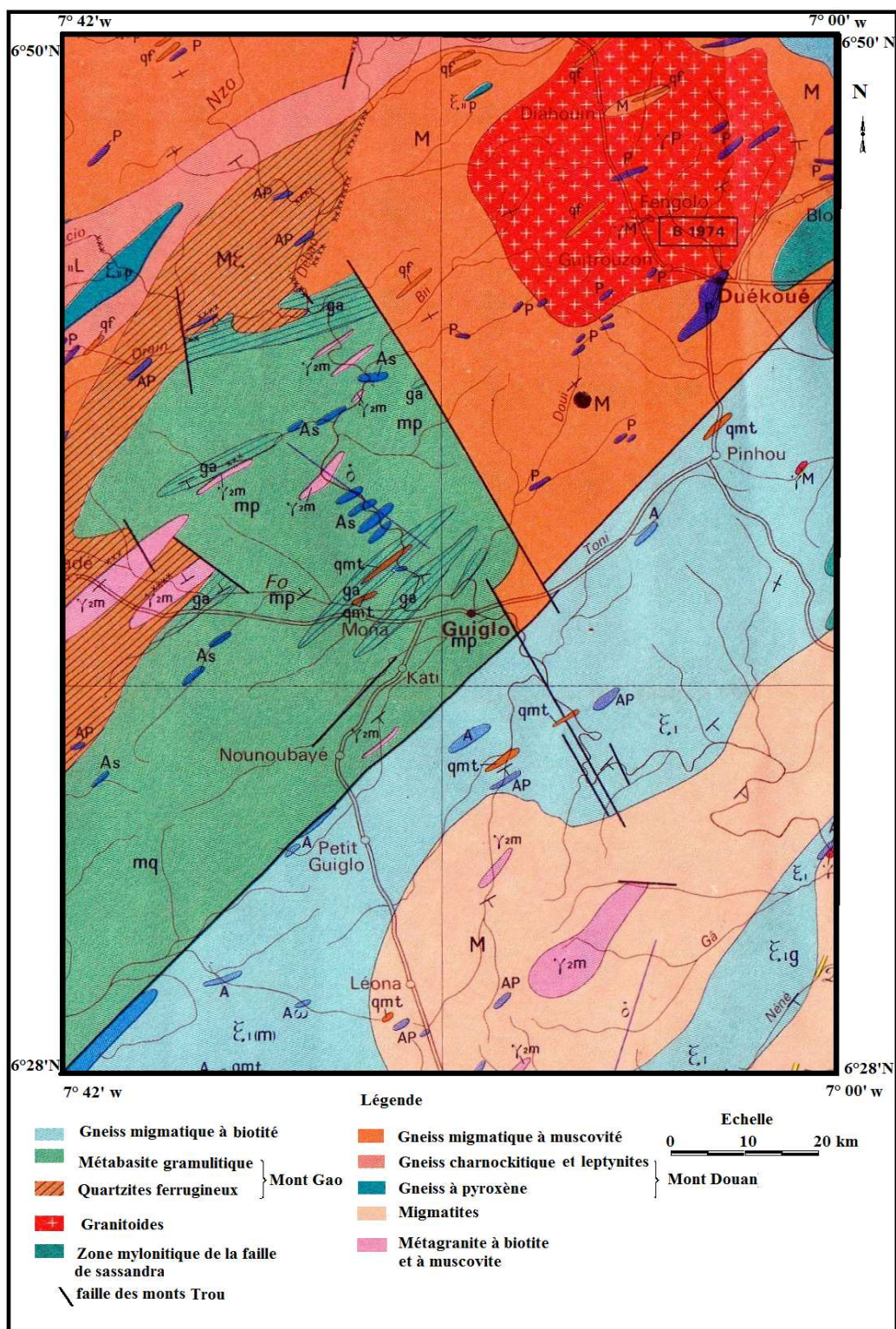


Figure 2: Carte géologique de la zone Guiglo-Duékoué (Ouest de la Côte d'Ivoire).

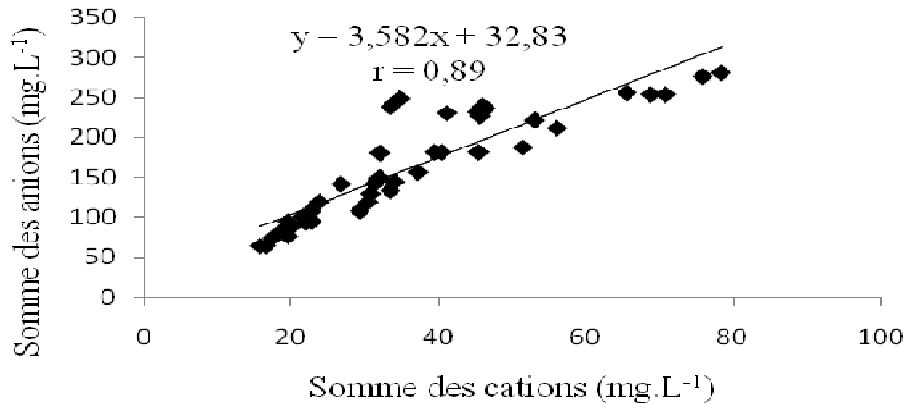


Figure 3 : Corrélation entre la somme des anions et la somme des cations.

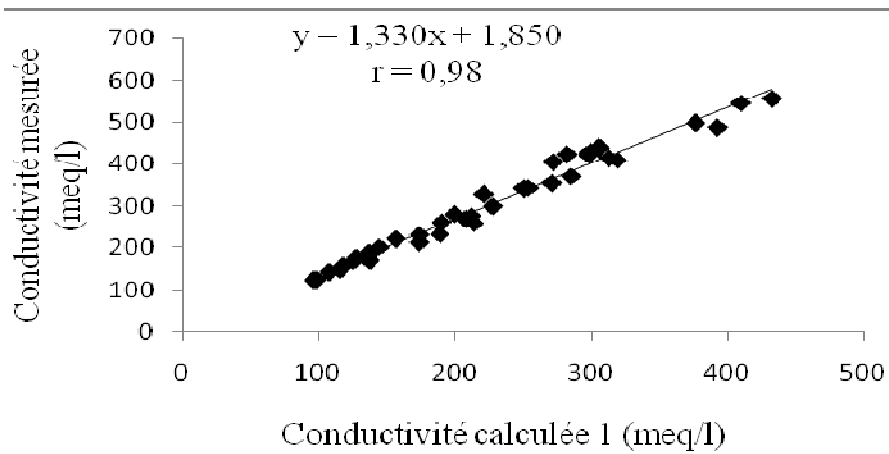


Figure 4 : Corrélation entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée à partir de la formule 1.

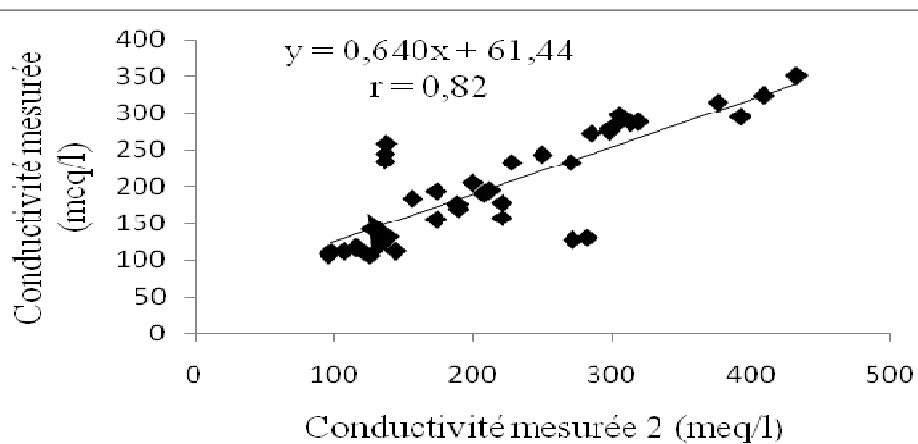


Figure 5 : Corrélation entre la conductivité mesurée et la conductivité calculée à partir de la formule 2.

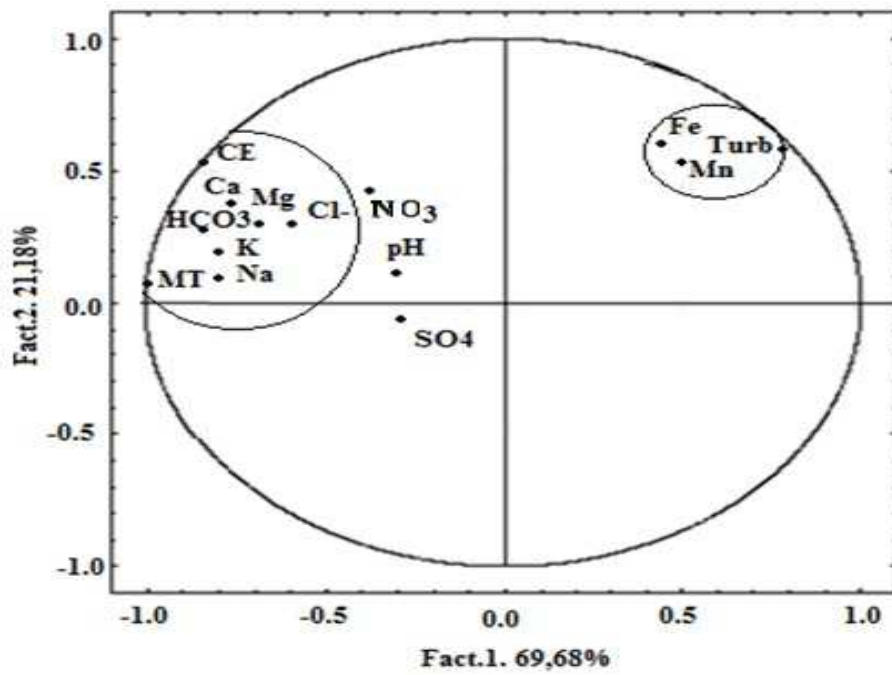


Figure 6: Analyse dans l'espace des variables (plan factoriel F1 – F2).

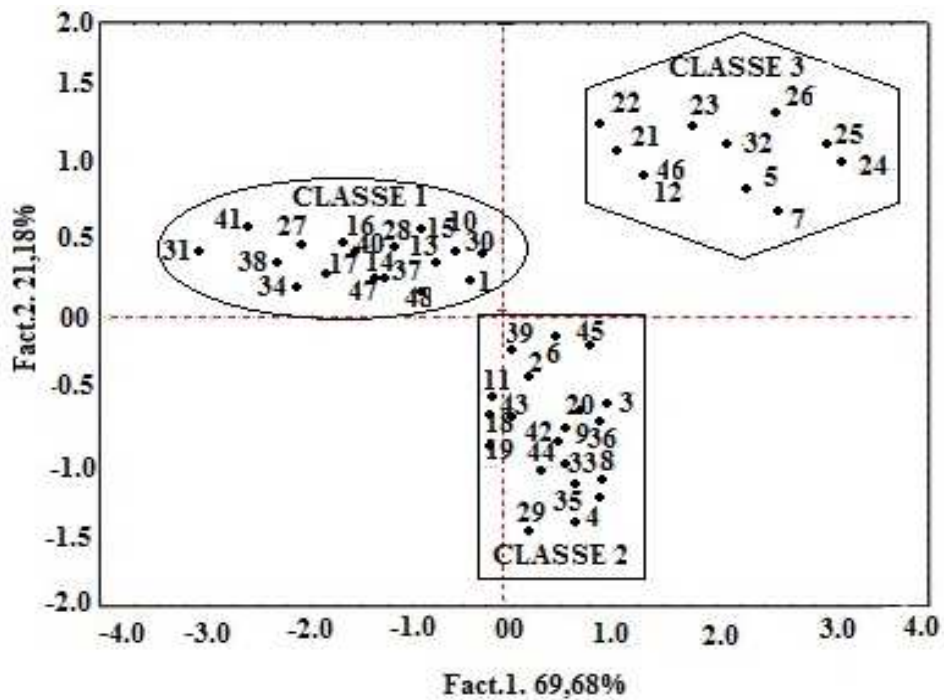


Figure 7: Analyse dans l'espace des unités statistiques (plan factoriel F1 – F2).

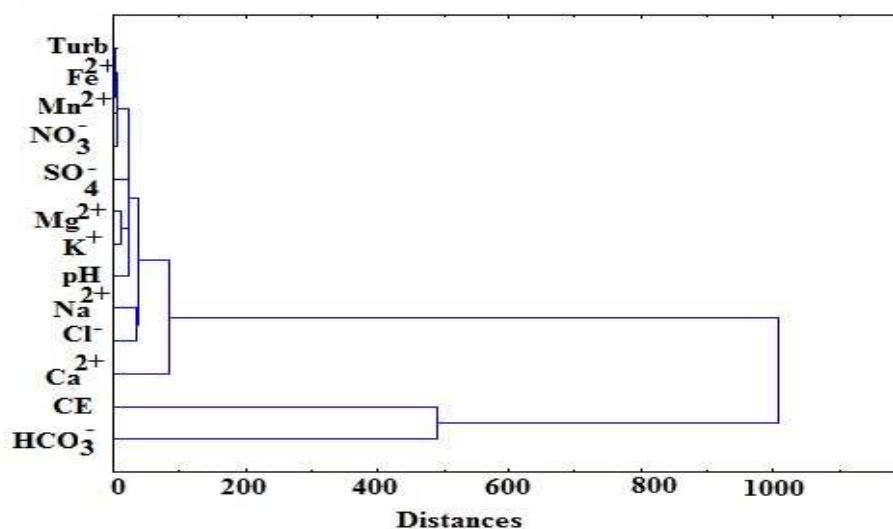


Figure 8: Dendrogramme de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la zone Guiglo-Duékoué.

DISCUSSION

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques (ACPN et CHA), a permis d'identifier deux principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone Guiglo-Duékoué. Le mécanisme à la base de la minéralisation en éléments métalliques des eaux est le phénomène d'oxydo-réduction. Ce phénomène est mis en évidence par le fer et le manganèse. Les teneurs les plus fortes en fer et en manganèse sont réparties sur les formations géologiques cristallines riches en biotite (granite à biotite) (Soro, 2010). Toute chose qui semble confirmer le fait qu'une des sources du fer dans les eaux soit issue de l'hydrolyse des silicates ferromagnésiens. Par conséquent, L'oxydo-réduction et le lessivage des silicates ferromagnésiens seraient donc les sources probables du fer et du manganèse dans les eaux de la zone Guiglo-Duékoué. Le deuxième mécanisme est la minéralisation naturelle. Selon Soro (2010), la minéralisation naturelle reste le processus majeur qui gouverne la chimie des eaux souterraines. Les éléments qui définissent ce facteur

proviennent d'une longue durée de mise en solution suite au contact eau-roche. Ces variables sont issues de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux silicatés (Savané et al., 2001). Ces éléments qui présentent des variations continues sur de longues périodes caractérisent la minéralisation de l'eau dans son encaissant, que ce soit dans la zone noyée ou pendant la traversée de la zone non saturée. Le mécanisme est mis en évidence par l'altération du réservoir dans le temps et la précipitation des ions issus de la dissolution des silicates et celle des carbonates secondaires (dolomite, calcite etc.). Cette interprétation corrobore avec celle de Rabemanana (2002), qui rapporte que la minéralisation entre eau-roche est acquise par l'hydrolyse des silicates sous la condition de milieu ouvert. Pour ce faire, la minéralisation des nappes d'eau souterraine dépend donc des formations géologiques de la région. En nous référant à la matrice de corrélation, nous pouvons dire que les paramètres chimiques influençant la minéralisation des eaux de la zone Guiglo-Duékoué sont le bicarbonate, le potassium, le sodium, le calcium, le

magnésium et le chlorure. Le bicarbonate est bien corrélé avec la conductivité électrique ($r = 0,87$). Cette affinité traduit l'influence qu'à ce dernier sur la minéralisation totale dans les eaux souterraines. De ce fait, le bicarbonate se positionne comme le meilleur indicateur des concentrations dissoutes en solution. Cette conclusion est confirmée par les résultats des travaux de Kouassi et al. (2010) dans la région du N'zi-Comoé et celui de Soro (2010) dans la région des lacs. Les eaux souterraines profondes auraient une minéralisation plus stable dans le temps et plus importante que les eaux peu profondes (Soro, 2010). Ces résultats sont en accord avec ceux de plusieurs auteurs ayant travaillé en Côte d'Ivoire et qui ont tous abouti à la même conclusion (Ahoussi, 2008 ; Soro, 2010 ; Kouassi et al., 2010).

Conclusion

L'étude hydrogéochimique a été entreprise dans un système aquifère fissuré à cheval sur le domaine Archéen et le domaine SASCA. Ce travail qui a consisté à rechercher l'origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus de la zone Guiglo-Duekoué à partir de la combinaison de méthodes statistiques multivariées (ACPN et CHA) a permis d'apporter des réponses à notre problématique. L'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) a montré que l'étude de la minéralisation des eaux souterraines étudiées dépend de 3 facteurs principaux. Les variances exprimées sont respectivement de 69,69%, 21,17% et 9,14% pour F_1 , F_2 et F_3 . Le cumul de la variance exprimée est de 100% pour les trois facteurs. Les deux premiers facteurs représentent (F_1 - F_2) 90,85%, et ont été suffisants pour l'étude. Le facteur 1 est traduit par l'essentiel des ions majeurs, la minéralisation totale et la conductivité électrique. Le facteur 2 est représenté par le fer (Fe^{2+}), le manganèse (Mn^{2+}) et la turbidité (Turb). La représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques a mis en évidence trois (3) classes qui représentent respectivement 35%, 42% et 22% des points

d'eau. La première classe regroupe les échantillons d'eaux ayant les plus fortes conductivités électriques dont l'acquisition ionique est sous le contrôle de la minéralisation-temps de séjour. La deuxième classe renferme les eaux moyennement minéralisées. Elles sont surtout caractérisées par des valeurs de turbidité les plus faibles voire nulles des teneurs en fer et en manganèse. La troisième classe caractérise des forages dont les eaux présentent une forte minéralisation mais qui différencient des autres forages par leurs teneurs en fer et en manganèse élevées. Les résultats de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) mettent en évidence deux (2) grandes classes statistiques distinctes. La première classe est déterminée par la conductivité, le pH et les éléments majeurs. La deuxième classe statistique comprend la turbidité, le manganèse (Mn^{2+}) et le fer (Fe^{2+}). Les différents résultats ont permis d'identifier deux principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone Guiglo-Duekoué. Il s'agit du phénomène de minéralisation couplé au temps de séjour, qui met en évidence l'hydrolyse des silicates après l'infiltration des eaux enrichies en CO_2 et du phénomène d'oxydo-réduction lié à la présence des teneurs en ions Fe^{2+} et Mn^{2+} .

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la Société Africaine de Forage (AFRIFOR) pour leur avoir fourni les données d'analyses physico-chimiques utilisées dans cette étude.

REFERENCES

Ahoussi KE. 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, p.270.
- Ahoussi KE, Soro N, Kouassi AM, Soro G, Koffi YB, Zadé SP. 2010. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4**(5): 1753-1765.
- Brou YT. 2005. Climat, mutations socio-économiques et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université des sciences et technologies de Lille, France, p.226.
- Kouamé KF. 2011. Gestion intégrée des ressources en eau en Afrique tropicale humide. Cas du bassin versant du N'zo à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des systèmes d'informations géographiques et de la modélisation hydrologique. Thèse de Doctorat d'État, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, p.250.
- Kouassi AM, Yao KA, Ahoussi KE, Seki CL, Yao NA, Kouassi KI. 2010. Apports des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux 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): 1816-1838.
- Lalbat F. 2006. Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France). Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, p.234.
- 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 de Lille, France, p.243.
- Lasm T. 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montages de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de l'Université de Poitiers, p.274.
- Lasm T, Yao KT, Oga MS, Kouame KF, Jourda P, Kouadio KE, Baka D. 2008. Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale area (Southern Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, **20**(3): 526-543.
- Lasm T, ASM, Lasme O, Oga MS, Youanta M, Baka D, Kouamé KF, Yao KT. 2011. Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5**(2): 642-662.
- Oga MS. 1998. Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire : Approches hydrochimiques et isotopiques. Thèse de Doctorat, Université de Paris XI, Orsay, France, p. 241.
- Oga MS, Lasm T, Yao KT, Soro N, Saley MB, Kouassi D, Gnamba F. 2009. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: cas de la région de Tiassalé en Cote D'ivoire. *European Journal of Scientific Research*, **31**(1): 72-87.
- Rabemanana V. 2002. Origine et caractérisation de la salinité des eaux dans les aquifères de socle. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, France, p.182.
- Savané I, Soro N. 2001. Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire: recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné. *Africa Géoscience Review*, **8**(4): 379-390.
- Soro N. 2002. Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et

- hydrogéologique. Thèse de Doctorat ès sciences naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, p.272.
- Soro G. 2010. Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux 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 Tiebissou. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 257p.
- Touaïbia B, Inegliz S, Ould AA. 2006. Couplage d'une analyse en composantes principales et d'une approche géostatistique pour l'élaboration de cartes pluviométriques du Centre de l'Algérie du Nord. *Revue des Sciences de l'Eau*, **19** (3): 213-219.
- Yao KA, Kouassi AM, Koffi YB, Biemi J. 2010. Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Hydrology*, **18** (26): 1-15.
- Yidana SM, Ophori D, Banoeng-Yakubo B. 2007. Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. *Environ. Geol.*, **54**(9): 1751-1762.
- Zourhi L, Carlier E. 2002. Caractérisation hydrochimique d'une nappe côtière, Maroc. *Journal of Environment Hydrology*, **9**(4) : 1-7.