

Origines du fer dans les eaux souterraines de la région de Katiola

[Origins of iron in groundwater in Katiola area]

Franck Maxime Gnamba¹, Bernard Adiaffi², Yeï Marie Solange Oga², Kpan Oulaï Gauthier², and Tanina Soro²

¹Département de Géosciences, UFR des Sciences Biologiques,
Université Peleforo Gon Coulibaly,
BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire

²Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), UFR des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières (STRM),
Université Félix Houphouët-Boigny,
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The most of groundwater in Katiola area present high relatively proportions of iron. Previous works indicate that over 67% of collected water have iron proportions above the WHO guideline value which is 0.3 mg L⁻¹. If iron and manganese do not pose serious health risks, their presence may indicate that groundwater is of poor quality and may be indicative of an existence of other problems that could cause adverse health effects. Therefore, this study aims to determine the origin of iron in groundwater of the area study and give answers to high iron contents. To achieve this goal, we applied multivariate analysis (CNPA and CAH) on the results of physico chemical analysis and overlay maps of iron distribution with geological map. The results of the ACPN indicate that; solubility of iron and manganese increases in anoxic conditions. The overlay map of iron concentration distribution of with geological map shows that, high iron levels are found in greater proportion in the biotite's granites; suggesting their origin related to the geology of the area study.

KEYWORDS: groundwaters, physico-chemical analysis, iron proportions, Katiola, Ivory Coast.

RESUME: La majorité des eaux souterraines de la région de Katiola ont des teneurs relativement élevées en fer. Les travaux antérieurs montrent que plus de 67% des eaux prélevées ont des concentrations en fer supérieures à la valeur guide OMS qui est de 0,3 mg.L⁻¹. Si le fer et le manganèse ne posent pas de risques sérieux pour la santé, leur présence peut indiquer que l'eau souterraine est de mauvaise qualité et peut être révélateur de l'existence d'autres problèmes susceptibles d'avoir des effets nocifs sur la santé. La présente étude a donc pour objectif de déterminer l'origine du fer afin d'apporter des éléments de réponse aux concentrations élevées dans les eaux souterraines de la région d'étude. Pour atteindre cet objectif, nous appliquons les analyses multivariées (ACPN et CAH) sur les résultats d'analyses physico-chimiques et superposons la carte de répartition des teneurs en fer avec la carte géologique. Les résultats de l'ACPN indiquent que la solubilité du fer et du manganèse augmente dans des conditions anoxiques et que l'oxydoréduction serait le mécanisme de mise en solution des ions. La superposition des cartes (répartition des teneurs en fer et géologie) montre que les fortes teneurs en fer s'observent en grande proportion dans les granites à biotite ce qui leur suggère une origine, liée à la géologie de la région d'étude.

MOTS-CLEFS: eaux souterraines, analyse physico-chimique, teneurs en fer, Katiola, Côte d'Ivoire.

1 INTRODUCTION

Le fer et le manganèse, abondants à l'état naturel dans tout type de roches se retrouvent à l'état dissous dans bon nombre d'eaux souterraines [1]. Dans les eaux bien aérées, leurs concentrations sont rarement importantes. En revanche, dans les eaux peu aérées (en particulier dans les eaux souterraines), on peut en observer de fortes teneurs quand les conditions de solubilisation sont réunies. Les sources les plus fréquentes de fer et de manganèse dans l'eau souterraine sont naturelles. Il s'agit par exemple de l'altération météorique des minéraux et des roches qui en contiennent (les amphiboles, les micas ferromagnésiennes, les sulfures de fer, les magnétites, les oxydes, les carbonates etc.). Toutefois, Les effluents industriels, les eaux d'exhaure acide, les eaux usées ainsi que les lixiviats provenant des sites d'enfouissement des déchets peuvent également contribuer à la présence de fer et de manganèse dans les nappes phréatiques. Dans la région de Katiola située au Centre-Nord de la Côte d'Ivoire, les analyses chimiques sur des échantillons d'eau souterraines révèlent des concentrations anormalement élevées en fer dans la majorité des forages d'eau [2]. En effet, 67% des eaux souterraines ont des teneurs en fer au dessus de la recommandation OMS de 0.3 mg.L^{-1} pour une eau de consommation [3]. Le fer et le manganèse sont indispensables en petites quantités, à tous les organismes vivants. Cependant, à des concentrations supérieures aux recommandations pour l'eau potable, le fer et le manganèse peuvent modifier le goût, l'odeur ou la couleur de l'eau. L'eau possédant des concentrations élevées de fer et manganèse peut entraîner la formation de taches sur les raccords de plomberie ou sur le linge. Le fer peut également s'accumuler et bloquer les tuyaux ou les raccords de plomberie et entraîner la présence de flocons de rouille dans l'eau. Il peut favoriser la croissance de bactéries indésirables qui forment une couche visqueuse à l'intérieur des tuyaux. En outre, Des taux plus élevés de fer, pourraient augmenter les risques de maladies cardiovasculaires et de cancers [4]. Le fer, en trop grande quantité, est également impliqué dans plusieurs maladies neurodégénératives comme Alzheimer et la Chorée de Huntington [5]. Les eaux de forage présentant de fortes teneurs en fer dans la zone d'étude sont parfois abandonnées par les populations à cause du mauvais goût ou de la forte coloration au profit des eaux de source (Photo 1). Une étude pour comprendre l'origine de ces fortes concentrations en fer dans les eaux est donc nécessaire. C'est dans cette perspective que la présente étude a été initiée. Elle a pour objectif de déterminer l'origine du fer dans les eaux souterraines de la région de Katiola.



Photo. 1. Approvisionnement à partir d'une source à Pehekaha (Katiola, source [2])

2 CADRE D'ÉTUDE ET CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La région de Katiola est située à 434 km d'Abidjan au Centre-Nord de la Côte d'Ivoire. Elle est comprise entre les longitudes $4^{\circ}75'$ et $5^{\circ}75'$ Ouest et les latitudes $7^{\circ}95'$ et $9^{\circ}45'$ Nord (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Elle s'étend sur une superficie de 9452 km^2 soit environ 3% de la superficie totale du territoire, avec une population estimée à 165652 habitants [6]. Le contexte climatique de la région dérive de l'interface entre climat soudanien et guinéen. La région est drainée par

deux principaux fleuves et leurs affluents qui constituent des limites naturelles du département, le Bandama à l'Ouest et le N'zi à l'Est.

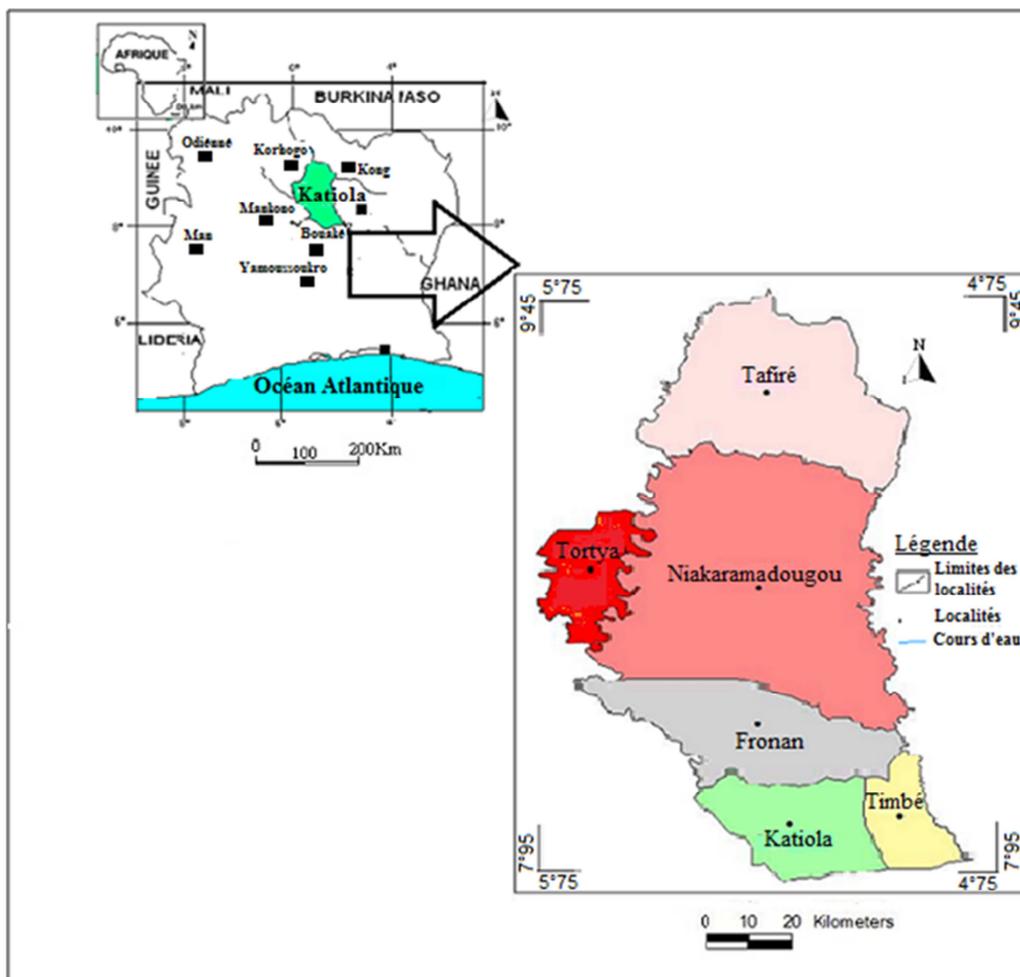


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

Au plan géologique, la région se situe dans le domaine Baoulé-Mossi et est constituée d'une diversité de formation birimienes dont les principales sont : des granitoïdes calco-alcalins et alumino-potassiques (granites à deux micas), des métavulcanites, des roches vertes, et des métasédiments [7]. Les formations cristallines se composent essentiellement de migmatites et granites indifférenciés, de gneiss ainsi que de granites syntardi-tectoniques recoupant des séquences volcano-sédimentaires dans la majeure partie du département de Katiola (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Du point de vue hydrogéologique, ces différentes formations, à l'état sain, présentent une porosité et une perméabilité très faibles. Cependant, les phénomènes tectoniques et physico-chimiques qui affectent ces roches induisent une porosité et une perméabilité dites secondaires, permettant à ces formations de devenir des aquifères souvent de grande productivité. On note la présence de trois types d'aquifères ; les aquifères d'altérites, les aquifères de fissures, et les aquifères de fractures.

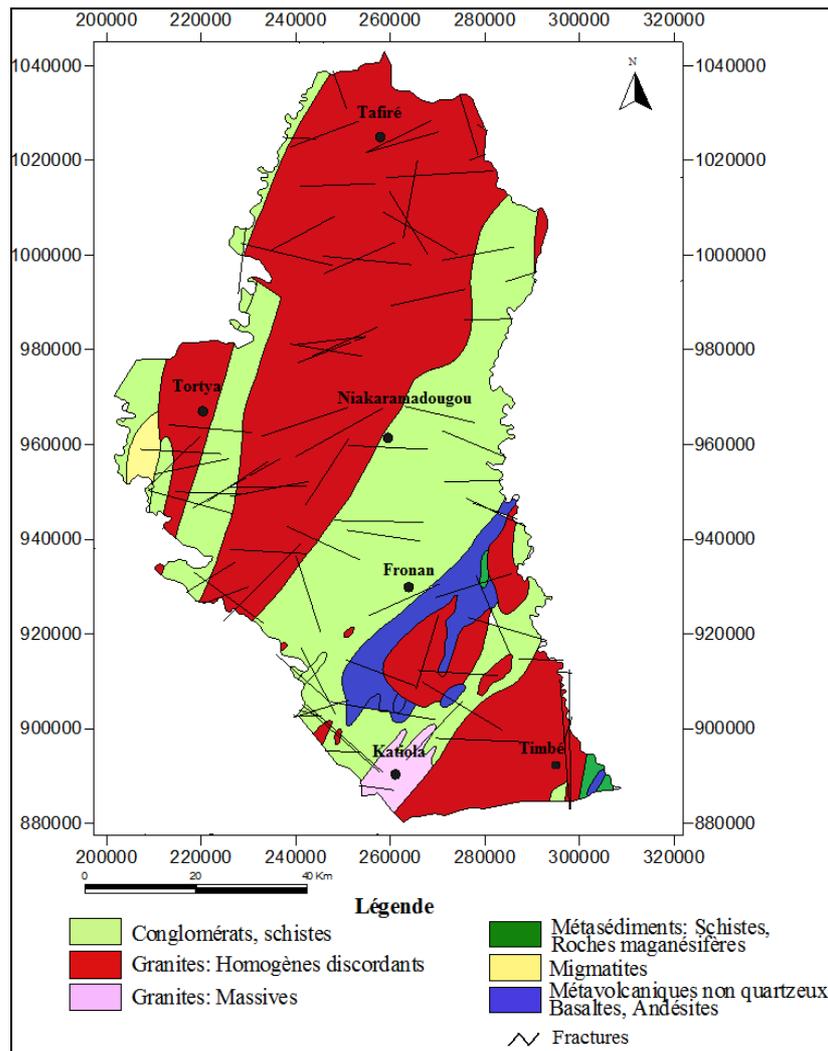


Fig. 2. Carte géologique de la région de Katiola

3 MÉTHODOLOGIE

3.1 DONNEES

Pour les besoins de cette étude, 82 points d'eau (forages) repartis sur l'ensemble de la région ont été inventoriés. Ces eaux ont été sélectionnées pour constituer le réseau d'échantillonnage. Ces données sont issues d'un Programme "d'urgence de réhabilitation post crise de forages" des régions nord de la Côte d'Ivoire, notamment de la région de Katiola. Il s'agit du projet dénommé "FED 9 ACP IVC 003 IVC/030/000" financé par l'Union Européenne et dont le maître d'œuvre est l'ex CREPA-CI. La campagne de prélèvement des échantillons d'eau a eu lieu dans la période du 09/02/2005 au 06/04/2006. La caractérisation physico-chimique a porté sur des mesures *in situ*, (température, pH, salinité, conductivité électrique) et le dosage au laboratoire des composants majeurs et des éléments traces métalliques (chlorure Cl^- , sulfate SO_4^{2-} , hydrogencarbonates HCO_3^- , nitrate NO_3^- , calcium Ca^{2+} , magnésium Mg^{2+} , sodium Na^+ , potassium K^+ , fer Fe^{2+} , manganèse Mg^{2+} , etc.).

3.2 MÉTHODES

L'utilisation combinée de l'Analyse en Composante Principale (ACP) et de la classification Ascendante Hiérarchique (CAH), est un puissant outil pour analyser des paramètres physico-chimiques des eaux et établir des modèles géochimiques [8]. L'analyse des données a porté sur 17 paramètres ou variables : T°C , CE, pH, OD, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , HCO_3^- , NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Mn^{2+} et Fe_{tot} , PCO_2 . L'ACPN n'est valable que lorsque les plans factoriels étudiés donnent plus de 70 %

d'informations. La corrélation entre deux éléments est bonne si elle est proche de 1. On considère ainsi les coefficients de corrélation supérieur à 0,7 comme significatifs, tandis que ceux qui sont compris entre 0,5 et 0,7 moins significatifs [9]. Dans le cas de la CAH, la distance euclidienne a été employée comme une mesure de similarité/dissimilarité, tandis que la méthode d'agrégation de Ward a été employée pour lier les faisceaux. Une combinaison de la distance euclidienne comme mesure de similitude et de la méthode de Ward comme méthode d'agrégation a été observée comme la meilleure combinaison débouchant sur des résultats optimaux dans la CAH ([10], [11]).

Le fondement mathématique de la méthode tel que proposé par [12] est basée sur le calcul de la distance euclidienne entre les individus ou observations dans un espace à n -dimensions. Premièrement, les données doivent être normalisées par le calcul de leurs moyennes à l'aide la formule (31) :

$$K_{ij} = \frac{(X_{ij}-X)}{S_{ic}} \quad \text{Éq. 1}$$

où K_{ij} est la valeur normale de X_{ij} pour la $i^{\text{ème}}$ variable du $j^{\text{ème}}$ individu, X est la moyenne de la $i^{\text{ème}}$ variable et S_{ic} l'écart type.

La procédure adoptée donne un poids égal à chaque variable. Ainsi, la mesure de similarité est tout simplement la distance définie dans un espace euclidien [12].

La distance entre deux individus (j, k) est donnée par la relation suivante :

$$d_{ij} = \left[\sum_{i=1}^N (K_{ij} - K_{ik}) \right] \quad \text{Éq. 2}$$

Où K_{ik} représente la $K_{i\text{ème}}$ variable mesurée sur l'objet i , et K_{jk} la $K_{i\text{ème}}$ variable mesurée sur l'objet j . Le résultat 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.

4 RÉSULTATS

4.1 ANALYSE EN COMPOSANTE PRINCIPALE NORMEE (ACPN)

Les résultats de l'ACPN ont été exploités par analyse de la matrice de corrélation et projection des variables dans les plans factoriels F1-F2 et F1-F3.

4.1.1 ANALYSE DE LA MATRICE DE CORRELATION

Tableau 1. Matrice de corrélation entre paramètres dans les eaux souterraines

	T°C	pH	CE	OD	HCO ₃	Cl	NO ₃	SO ₄	Ca	Mg	K	Na	Fe	Mn	NH ₄	PO ₄ ³	pCO ₂
T°C	1,00																
pH	0,23	1,00															
CE	-0,13	-0,05	1,00														
OD	-0,25	-0,04	-0,01	1,00													
HCO ₃	-0,18	-0,07	0,95	0,03	1,00												
Cl	-0,21	-0,01	0,86	0,04	0,91	1,00											
NO ₃	-0,06	-0,05	0,89	-0,04	0,84	0,77	1,00										
SO ₄	-0,04	-0,06	0,89	-0,02	0,83	0,74	0,87	1,00									
Ca	-0,07	-0,04	0,95	-0,01	0,95	0,86	0,86	0,86	1,00								
Mg	-0,21	-0,14	0,81	0,14	0,84	0,90	0,70	0,72	0,79	1,00							
K	-0,22	-0,05	0,80	0,06	0,83	0,77	0,80	0,68	0,84	0,71	1,00						
Na	-0,04	0,03	0,85	0,01	0,90	0,86	0,81	0,77	0,89	0,73	0,81	1,00					
Fe	0,37	0,10	-0,08	-0,78	-0,14	-0,15	0,02	0,00	-0,06	-0,14	-0,13	-0,10	1,00				
Mn	0,30	-0,12	0,03	-0,68	-0,02	-0,12	0,04	0,07	0,06	-0,04	-0,08	-0,06	0,72	1,00			
NH ₄	-0,19	-0,02	0,51	-0,04	0,49	0,36	0,60	0,49	0,41	0,22	0,47	0,44	-0,03	-0,11	1,00		
PO ₄ ³	0,07	-0,15	0,69	0,11	0,72	0,70	0,68	0,56	0,73	0,57	0,58	0,71	-0,13	-0,02	0,36	1,00	
pCO ₂	-0,19	-0,67	0,58	-0,04	0,61	0,49	0,53	0,49	0,61	0,56	0,54	0,51	0,06	0,13	0,18	0,49	1,00

L'examen de la matrice de corrélation fait clairement ressortir que le fer et le manganèse ont des corrélations négatives significatives avec l'oxygène dissout, respectivement (-0,78) et (-0,68). Cette corrélation suggère une évolution inversement proportionnelle du fer et du manganèse avec l'oxygène dissout et indique que dans les eaux privées d'oxygène, les concentrations de Fe et Mn augmentent de manière significative. La matrice révèle également une bonne corrélation (0,72) entre ces deux éléments traces métalliques, ce qui leur suggère une origine commune dans les eaux de la région. Tout ceci devrait être confirmé par l'analyse de la projection dans l'espace des variables.

4.1.2 ANALYSE DANS L'ESPACE DES VARIABLES

▪ **Plan factoriel F1-F2**

L'espace des variables dans ce plan indique que le facteur 1 est bien corrélé dans sa partie négative avec les paramètres tels que, HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- , Na^+ , NO_3^- et dans une moindre mesure avec SO_4^{2-} , K^+ , et Mg^{2+} (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Tous ces éléments n'apparaissent dans l'eau qu'après un long temps de contact des eaux avec l'encaissant. Le facteur 1 représente principalement le processus de minéralisation des eaux souterraine par hydrolyse des silicates sous l'action des eaux chargées en CO_2 . Il exprime donc le temps de séjour des eaux dans l'aquifère. L'axe factoriel 2 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) est principalement représenté par la relation entre le fer (Fe) et le manganèse (Mn) en opposition avec l'oxygène dissout. La relative opposition entre l'oxygène dissout et le couple (Fe ; Mn) sur cet axe illustre bien le sens opposé de leurs variations dans l'eau et indique que la solubilité du fer et du manganèse augmente dans les conditions anoxiques. Le facteur 2 peut être considéré comme un mécanisme d'oxydo-réduction à proximité ou dans la zone de confinement de la nappe.

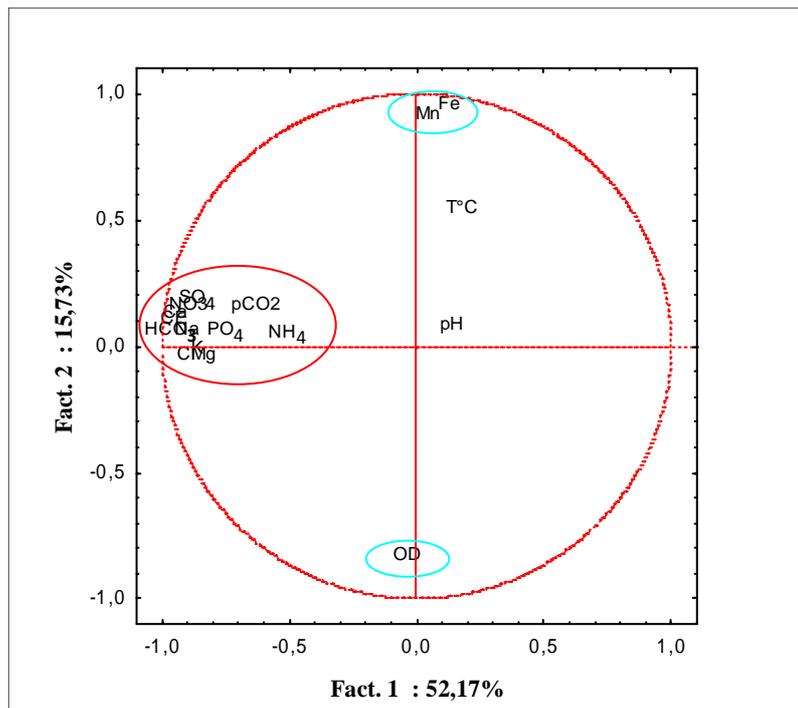


Fig. 3. Analyse dans l'espace des variables dans le plan F1-F2

▪ **Plan factoriel F1-F2**

Dans la structure du plan F1-F3 (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), le facteur 1 est toujours corrélé avec les mêmes éléments que dans le plan F1-F2. Le facteur 3 est déterminé par l'opposition relative entre la pCO_2 et le pH et est un indicateur des apports superficiels. La position des paramètres tels que, Fe et Mn à l'origine des axes indique que l'information contenue au niveau de ces éléments n'est pas accessible aux deux facteurs. Ce qui veut dire qu'ils sont issus d'un même mécanisme de contrôle, mais différents de ceux exprimés par les facteurs 1 et 3.

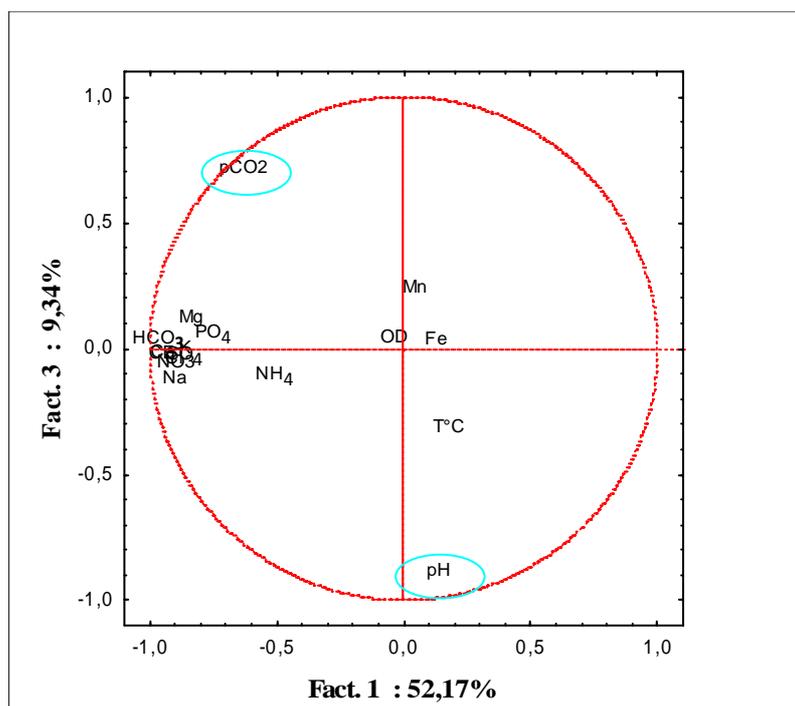


Fig. 4. Analyse dans l'espace des variables dans le plan F1-F3

4.2 CLASSIFICATION ASCENDANTE HIÉRARCHIQUE (CAH)

Le résultat de la classification ascendante hiérarchique sur les variables est présenté à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Sur la base des distances et de leur position sur le dendrogramme, des classes et des sous-classes distinctes de variables se dégagent sur la figure. La sous-classe définie par les éléments tels que Fe, Mn, Na et K indique qu'ils sont associés dans les eaux avec une origine commune. L'abondance du fer et du manganèse dans les eaux serait liée à la présence dans la matrice rocheuse de l'aquifère de minéraux ferromagnésiens riche en sodium et en potassium. Ceci devrait être confirmé ou infirmé par l'étude de la superposition de la carte géologique avec la carte de répartition des fortes teneurs dans les eaux.

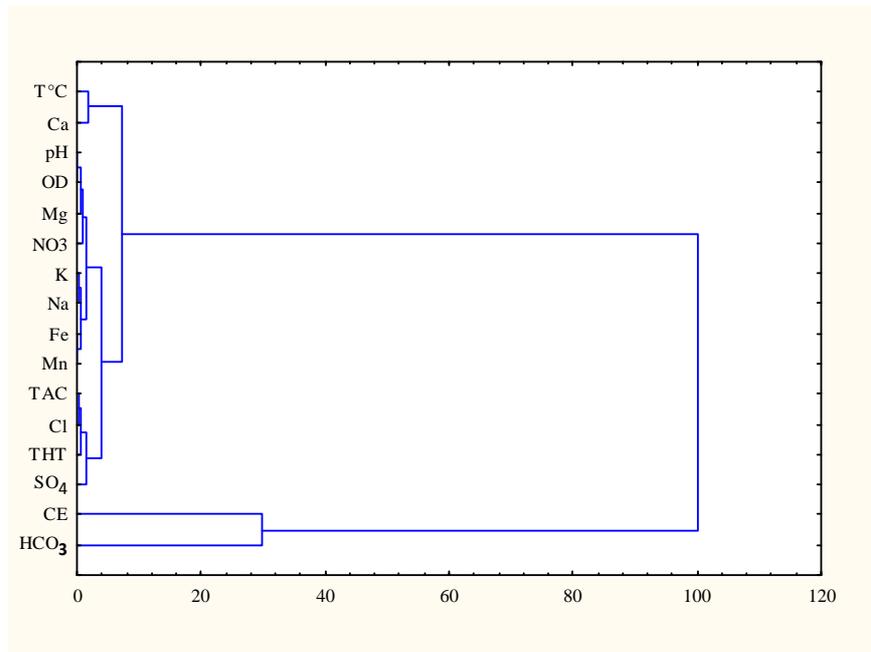


Fig. 5. Dendrogramme des variables dans les eaux souterraines de Katiola

4.3 CARTE DE REPARTITION DES FORTES TENEURS COUPLEES AVEC LA GEOLOGIE

La carte de répartition des teneurs en fer couplée avec les formations géologiques représentée à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** permet de comprendre l'origine des fortes concentrations. En effet, l'examen de la carte montre que les fortes teneurs en fer (représentées par les points verts sur la carte) s'observent en grande proportion dans les granites à biotite. La biotite caractéristique de ces roches est très riche en fer. On observe également des valeurs élevées dans les schistes du birimien (qui correspondent dans la région à des schistes métamorphisées riches en biotite et en grenat) avec des teneurs très élevées en fer. Ce résultat indique que la distribution des fortes concentrations en fer dans les eaux souterraines est également liée à la nature pétrographique des roches de la région.

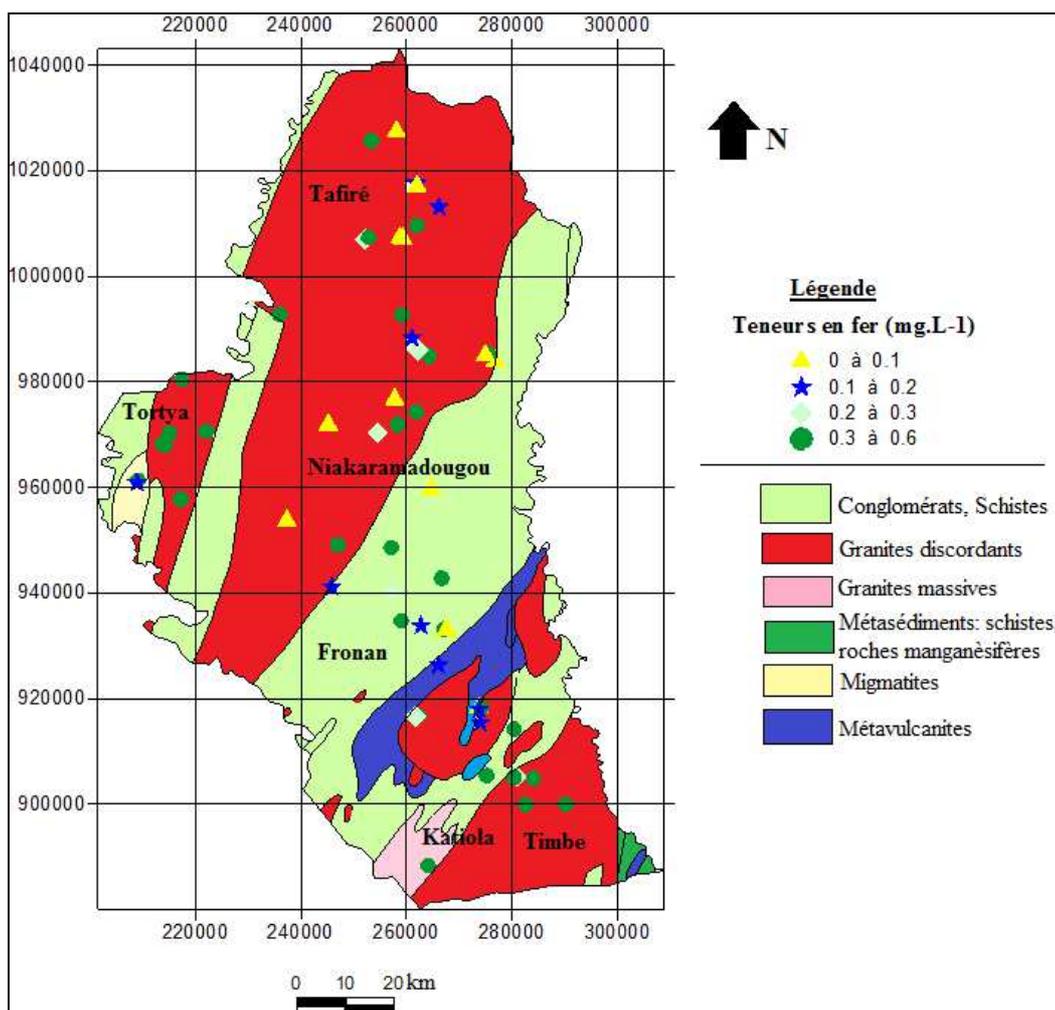


Fig. 6. Carte couplée de la répartition spatiale des teneurs en fer avec la géologie

5 DISCUSSION

L'Analyse en Composante Principale Normée (ACPN) a permis en première approche d'identifier l'oxydo-réduction dans la zone de confinement de la nappe comme mécanisme majeur favorisant la mise en solution des ions Fe^{2+} et Mn^{2+} . En effet selon [13], la bonne corrélation entre Fe et Mn confirme la thèse d'une réduction de $Fe(OH)_3$ et $Mn(OH)_3$ comme source des deux éléments. En outre [14] évoquent une co-précipitation de Mn^{2+} avec $Fe(OH)_3$ pour expliquer l'absence de Mn en milieu oxydant. Les états du fer et du manganèse à faible valence Fe [II], Mn [II] sont donc stables dans un environnement réducteur. Ils sont plus solubles que les formes hydroxydes Fe [III] et Mn [III-IV] qui se dissolvent et deviennent mobiles sous forme réduite [15]. La diminution du potentiel d'oxydo-réduction est liée à une réduction de O_2 et est accompagnée par une réduction de $Mn(III)OH$ en Mn^{2+} , de $Fe(III)OH$ en Fe^{2+} ainsi que d'une réduction de NO_3^- et NO_2^- en NH_4^+ ou N_2 [13]. La présence des ions NH_4^+ dans les eaux moins oxygénées de la région confirme cette hypothèse. La zone captive de la nappe, proche de la limite de confinement où se produit la chute du potentiel d'oxydo-réduction est appelée "redox barrier" [16]. Il est possible d'établir une séquence type de réactions se succédant dans l'aquifère dans le sens de l'écoulement, en fonction du temps de résidence, à condition qu'il existe une microfaune capable de les catalyser [17]. La superposition de la carte de répartition des teneurs en fer avec la géologie montre que les fortes concentrations se rencontrent dans les granitoïdes calco-alcalins (granite à biotite) et les schistes du birrimien (schistes métamorphosées riches en biotite et en grenat). La biotite et le grenat caractéristiques de ces roches dans la région d'étude sont très riches en fer [7]. L'altération météorique de ce minéral peut donc être à l'origine de l'abondance du fer dans les eaux souterraines de la région. La présence dans la région des granitoïdes calco-alcalins et des granitoïdes aluminopotassiques (granites à deux micas) est probablement une source non négligeable d'abondance du fer dans les eaux de la région. En effet, Les sources les plus fréquentes de fer et de manganèse dans l'eau souterraine sont naturelles. Il s'agit par exemple de l'altération météorique des minéraux et des roches qui en contiennent (les amphiboles, les micas ferromagnésiennes, les sulfures de fer, les magnétites, les oxydes, les

carbonates etc.) [18]. Les fortes concentrations en fer ne sont spécifique à la zone d'étude, des travaux au Burkina Faso [19] et en Côte d'Ivoire, dans la région des Savanes [20] et au Sud à Tiassalé [21] ont relevé de fortes concentrations en fer dans les eaux souterraines. Le fer est un oligoélément indispensable à l'état de trace pour le corps humain, mais une surcharge de l'organisme humain en fer peut entraîner une hémochromatose primitive (mauvaise régulation de l'absorption du fer par l'intestin) et même une cancérisation hépatique (risque de cancer du foie). Ces troubles interviennent généralement lorsque les concentrations en fer sont supérieures à 10 mg.L⁻¹ [22]. L'oxydation chimique et biologique, le traitement associé à une décarbonatation sont des techniques envisageables pour l'élimination du fer dans les eaux souterraines de la région [18].

6 CONCLUSION

Cette étude a permis de comprendre et de déterminer l'origine et l'abondance du fer dans les eaux souterraines de la région de Katiola. L'analyse en composante principale normée a permis de mettre en évidence la forte corrélation entre le fer et le manganèse, ce qui leur confère une origine commune dans les eaux de la région. L'analyse des plans factoriels indique que la solubilité de ces deux éléments augmente dans les conditions anoxiques. Le mécanisme dominant de mise en solution du fer et du manganèse dans les eaux serait l'oxydo-réduction dans la zone de confinement de la nappe. La classification ascendante hiérarchique et la carte de répartition des teneurs en fer couplée à la géologie montrent que l'abondance du fer dans les eaux est également liée à la nature pétrographique des formations géologiques. En effet, La présence dans la région de granitoïdes calco-alcalins (granite à biotite) et de granitoïdes alumino-potassiques (granites a deux micas) très riches en fer est probablement une source d'abondance du fer dans les eaux souterraines de la région.

RÉFÉRENCES

- [1] BRGM, Le traitement du fer et du manganèse dans les eaux thermales, Note technique DNEMT N°14, 18 p, 1999.
- [2] Gnamba, F.M., Hydrodynamisme et hydrochimie des aquifères de fissure du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (Centre Nord de la Côte d'Ivoire), Thèse Université Felix Houphouët Boigny de Cocody, 200 p, 2014.
- [3] OMS, Guidelines for drinking water quality, vol.1, Recommendations (4nd edn.), Geneva, WHO, 1993, 130 p, 2011.
- [4] E. K. Lund, S. G. Wharf, S. J. Fairweather-Tait, and I. T. Johnson, Oral ferrous sulfate supplements increase the free radical-generating capacity of feces from healthy volunteers, *American Journal of Clinical Nutrition* vol. 69, no. 2, pp. 250-255, 1999.
- [5] G. Bartzokis, T. A. Tishler, MRI evaluation of basal ganglia ferritin iron and neurotoxicity in Alzheimer's and Huntington's disease, *Cellular and Molecular Biology (Noisy-le-grand) Jun*, vol. 46, no. 4, pp. 821-823, 2000.
- [6] INS, Recensement général de la population et de l'Habitat (RGPH) 1998, Données socio-demographiques et économiques, Région des Savanes, 2001.
- [7] Doumbia, S., Géochimie, géochronologie et géologie structurale des formations birimiennes de la région de Katiola-Marabadiassa (Centre Nord de La Côte-d'Ivoire). Evolution magmatique et contexte géodynamique du Paléoprotérozoïque, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, France, 202 p, 1997.
- [8] S. M. Yidana, D. Ophori, and B. Banoeng-Yakubo, A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data—The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, doi:10.1016/j.jenvman.2006.11.023, 8p, 2007.
- [9] S. Adams, R. Titus, K. Pietersen, G. Tredoux, and C. Harris, Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo South Africa. *Journal of Hydrology*, Vol. 241, No. 1-2, pp. 91-103, 2001.
- [10] C. Güler, G. Thyne, J.E. McCray, and A. K. Turner, Evaluation and graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data, *Hydrogeology*, vol. 10, pp. 455-474, 2002.
- [11] V. Cloutier, R. Lefebvre, R. Therrien, and M. M. Savard, Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system, *Journal of Hydrology*, vol. 353, pp. 294–313, 2008.
- [12] M. T. Hussein, Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques, *Hydrogeology Journal*, Vol. 12, pp. 144-158, 2004.
- [13] W. Klopman, L. Dever, et W. M. Edmunds, Zone d'oxydo-réduction dans l'aquifère de la craie des bassins de Paris et de l'Allemagne du Nord, *Hydrological Sciences-Journal des Sciences hydrologiques*, vol. 41, no. 3, pp. 311-326, 1996.
- [14] W. M. Edmunds, R. L. F. Kay, and MC R. A. Cartney,. Origin of saline groundwaters in the Carnmenellis granite (Cornwall, England), Natural processes and réaction during hot dry rock reservoir circulation, *Chemical geology*, Vol. 49, pp. 287-301, 1985.
- [15] A. Mariotti, La dénitrification dans les eaux souterraines principes et méthodes de son identification : une revue, *Journal of Hydrology*, pp. 1-23, 1986.

- [16] W. M. Edmunds, Trace element variation across an oxidation-réduction barrier in a limestone aquifer. In: Proc.Symp. Hydrogeochemistry and Biogeochemistry (Tokyo, 1970) ed. E. Ingerson,. Clarke Co., Washington DC, USA, pp. 115-147, 1973.
- [17] Stumm, W., and Morgan, J. J., Aquatic Chemistry. Wiley, New York, USA; 1981.
- [18] GLS, L'élimination du fer et du manganèse dans l'eau destinée à la consommation humaine, Memotec no. 16, Révision A, 2p, 2006.
- [19] A. M. Abdoukari, et G. Bubie, Caractérisation physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). Int. J. Biol. Chem. Sci, vol. 9, no. 1, pp. 517-533, 2015.
- [20] Soro G., 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 Université de Cocody. Abidjan (Côte d'Ivoire), 250 p, 2010.
- [21] M. S. Oga, T. Lasm, T. K. Yao, N. Soro, M. B. Saley, D. Kouassi, et F. Gnamba, Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: Cas de la Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire, European Journal of Scientific Research, vol 31, no. 1, pp.72-87, 2009.
- [22] G.D. Lanciné, A. J. Touchard, K. Bamory, K. Fernand, K. Kouadio, et S. Issiaka, Elimination du fer et du manganèse par aération-filtration des eaux de forage en zone rurale dans les pays en développement, cas de la région de Tassialé (Sud de la cote d'ivoire), European Journal of Scientific Research, 19(3) : pp. 558-567, 2008.
- [23] www.dynavive.eu/DocuPDF/EliminationFerManganese.pdf (5 juin 2016)