

Caractérisation des paramètres physiques et du taux de mercure des eaux dans un environnement d'orpaillage : cas de Kouaméfla dans le département d'Oumé (Centre de la Côte d'Ivoire)

Kadio H. NIAMKE¹, Kôkôh R. EFFEBI², Brou E. N'Dri³, Krazoua F. GONTONAN¹, Yei M-S. OGA¹

¹(UFR Sciences de la Terre et Ressources Minières, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire)

²(UFR Sciences et Gestion de Environnement, Université Nangui Abrougoua, Côte d'Ivoire)

³(UFR Environnement, Université Jean Lorougnon Guédé, Côte d'Ivoire)

Corresponding Author : Kadio H. Niamké

Résumé : Contexte : L'orpaillage pollue les ressources hydriques et de ce fait menace la santé des populations de Kouaméfla (Oumé) où il est en plein essor. Cette étude a pour objectif de montrer l'influence de l'orpaillage sur la qualité des eaux à travers l'expression des paramètres physiques et du mercure vis-à-vis de la potabilité et de la toxicité.

Matériels et Méthodes : La trame linéamentaire fut réalisée à partir du recensement des anomalies du drainage, couplé à un Modèle Numérique d'Altitude (MNA). Les blocs hydrogéologiques ainsi délimités ont orienté le choix des points d'échantillonnage d'une part au sein des blocs qui sont affectés par l'orpaillage, et d'autre part de prélever des échantillons témoins. Le potentiel d'Hydrogène (pH), la température, la Conductivité Electrique (CE) et les Solides Totaux Dissous (STD) ont été mesurés par un multiparamètres. Ledosage du mercure a été fait par la Spectrométrie d'Absorption Atomique par Hydrure (SAAH). Les valeurs obtenues ont été comparées aux seuils de potabilité (paramètres physiques) et de toxicité (mercure) fixés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Afin de déterminer la corrélation entre les paramètres physiques et le mercure ainsi que les origines de leurs anomalies, une Analyse en Composantes Principales Normalisées (ACPN) a été réalisée.

Résultats : Il en résulte que l'acidité des eaux ($Ph = 5,3$ et $pH = 5,95$) est due à la richesse en silice des roches (altération hydrothermale des zones aurifères). La température moyenne ($28,38^{\circ}C$) qui est supérieure au seuil OMS est normale en région tropicale. La valeur élevée de conductivité ($1080 \mu S.cm^{-1}$) et des Solides Totaux dissous ($1120 mg/L$ et $2410 mg/L$) sont dues au rejet en amont du lavage du minerai et à la présence d'un gîte primaire. Les teneurs en mercure bien que inférieures au seuil de toxicité, constituent des anomalies ($0,97 \mu g/L$). L'ACPN révèle que l'ensemble des variances qui sont exprimées sur deux plans factoriels (F1 et F2) est de 70,76%. Ces plans factoriels établissent que La CE présente une forte corrélation avec les STD et que l'enrichissement en mercure est lié soit à la dégradation mécanique des roches, soit à l'utilisation du mercure pour la confection de l'amalgame du minerai.

Conclusion : L'orpaillage a rendu les eaux de Kouaméfla acides et minéralisées. Il a provoqué l'enrichissement au mercure qui dans le cas majoritaire serait libéré dans les eaux souterraines, par la lixiviation des roches mécaniquement fragilisées.

Mots clés : Ressources hydriques, Trame linéamentaire, MNA, Potabilité, Toxicité, ACPCN, Plans factoriels

Date of Submission: 26-02-2020

Date of Acceptance: 12-03-2020

I. Introduction

L'orpaillage est une activité en plein essor en Côte d'Ivoire. L'orpaillage est générateur de revenus. Il apparaît comme étant un instrument de lutte contre la pauvreté. L'orpaillage fournit 30000 emplois directs et 500000 emplois indirects sur 1000 sites d'orpaillage recensés¹. Cependant au-delà de ces acquis, l'orpaillage est à l'origine de l'ensablement et du comblement des cours d'eau². L'exhaure des eaux gaspille d'importantes réserves d'eau souterraines sans aucune notion de préservation. La destruction de la flore et le décapage qu'il engendre met en place des aires dénudées qui favorisent l'érosion hydrique provoquant une réduction de l'infiltration d'eau qui assure la recharge des réservoirs hydriques. Les besoins énormes en eau de l'orpaillage, la destruction des ressources en eaux douces (eaux souterraines) et la contamination au mercure (métal lourd) qui est le principal agent d'attaque chimique conduisent à une réflexion sur la question de la gestion de la vulnérabilité de l'eau dans un environnement où l'orpaillage est en plein essor.

Le département d'Oumé est une portion de la partie méridionale de la province métallogénique aurifère du Centre de la Côte d'Ivoire (chaîne de Fètékro). La mine industrielle la plus proche (Bonikro) est un stockwerk quartzeux³ qui à ce jour a produit 30 tonnes et générés plus de 500 emplois directs. Cet environnement filonien où l'or est libre a favorisé l'implantation et le développement de l'orpaillage. Cette activité menace la principale source en eau de boisson (aquifères fissurés et fracturés) des populations riveraines qui sont représentées par les populations de Kouaméfla et les villages de plus petites dimensions (Dougbafla, Doka). C'est dans ce contexte que fut initié le projet de l'étude qui est l'objet du présent article dont le thème est : "Caractérisation des paramètres physiques et du taux de mercure des eaux dans un environnement d'orpaillage : cas de Kouaméfla dans le département d'Oumé (Centre de la Côte d'Ivoire)".

L'objectif général de la présente étude est de montrer l'influence de l'orpaillage sur la qualité des eaux à travers l'expression des paramètres physiques et du mercure. Les objectifs spécifiques qui sont assignés à cette étude sont :

- Déterminer la potabilité et la toxicité des eaux par l'observation des paramètres physiques et des teneurs du mercure ;
- Déterminer la relation de cause à effets entre l'orpaillage et la mauvaise qualité des eaux à travers une approche statistique multicritère.

II. Matériel et méthodes

Localisation

Située dans le degré carré de Gagnoa au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, la ville d'Oumé est à environ 250 km au Nord-Ouest d'Abidjan. La zone d'étude qui couvre une superficie d'environ 2 400 km² est localisée à 35 km au Nord de la sous-préfecture d'Oumé (fig. 1).

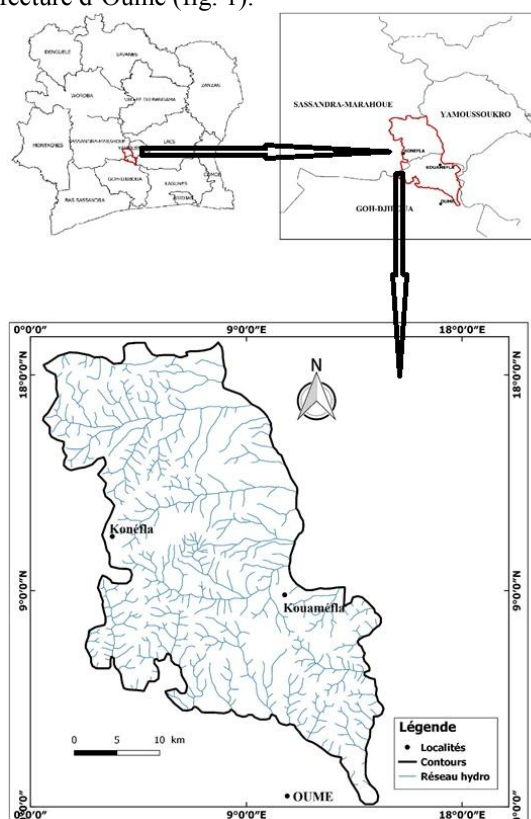


Fig. 1 - Carte de localisation

Principe

Le principe de l'étude fut de prime abord de comparer les valeurs et les teneurs des zones théoriquement affectées par l'orpaillage de celles qui ne le seraient pas. Dans un second temps, les teneurs et les valeurs anormales allaient être confrontées aux normes de potabilité de l'OMS. A cet effet, concernant les eaux de surface, les points de prélèvement furent sélectionnés en amont et en aval des sites d'orpaillage. Pour les eaux souterraines, la circulation se faisant à l'intérieur des réseaux de fractures, il a été opportun de réaliser la trame linéaire (le bâti structural). A cet effet, la production de la carte linéaire, a été faite par le couplage de la reconnaissance des linéaments hydrographiques majeurs (plus de 9 Km) à travers les anomalies de drainage (rectilinéarité et changements brusques de direction) et les particularités linéaires du relief qui sont

observées sur un Modèle Numérique d'Altitude (MNA). A partir du bâti structural, des points ont été recensés sur les blocs (surface délimitant la convergence d'au moins trois fractures) et fractures impactés par l'orpaillage et ceux qui ne le sont pas. Une analyse multicritère (ACPN) a servi à la mise en évidence des corrélations des anomalies ainsi que de leurs origines.

Construction de la trame linéamentaire

Concernant la réalisation du bâti structural, les drains du réseau hydrographique ont été digitalisés individuellement d'une source à un point de collection. Pour chaque drain, la longueur, l'ordre selon Sthraler⁴ et la direction ont constitué les composantes de la table attributaire. Sur ce réseau hydrographique, il fut procédé à un recensement des anomalies du drainage (rectilinéarité des drains, les changements de directions, les formes globales non arborescentes) qui sont les linéaments du réseau hydrographique. Ces anomalies sont les expressions de la fracturation du socle qui ont orienté l'écoulement superficiel⁵. La trame linéamentaire obtenue a été renforcée par la réalisation et l'exploitation du MNA. La construction du MNA a commencé avec la digitalisation renseignée des courbes de niveau. Pour chaque courbe, le périmètre, la surface et l'altitude ont constitué les composantes de la table attributaire. Ensuite, les courbes ont été sectionnées en segments suivant une distance équivalente. Un programme (Polyline2point) transformant les segments en points a permis l'obtention d'un fichier de données altimétriques (X, Y, Cote). Ces données altimétriques ponctuelles furent interpolées et rastérisées. Il en résulta un MNA 2D d'où ont été extraites les formes rectilignes.

Echantillonnage

Une mission de terrain (Décembre 2018) avait permis de recenser et décrire les sites d'orpaillage. Ces sites ont été grâce à leurs coordonnées (GPS) intégrés à la trame linéamentaire. La disposition des sites a orienté le choix des points de prélèvement d'eau. En effet, la procédure consiste à détecter des points qui récolteraient les pollutions dues à l'orpaillage. Dans le but de s'assurer de l'influence réelle de l'orpaillage, la procédure oblige à choisir également des points de contrôle (témoins) qui ne seraient pas sous l'influence d'une activité d'orpaillage. Le protocole d'échantillonnage préconisé par Thierrin⁶ a été suivi lors de la phase de prélèvement. L'eau distillée a été utilisée pour rincer la puisette et les bouteilles trois fois de suite. Les électrodes du multiparamètre ont été plongées dans la puisette pour mesurer la température, le pH, la conductivité électrique et les Solides Totaux Dissouts (STD). Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en plastique de 500mL. L'étiquetage des échantillons s'est fait sur place après chaque prélèvement. La Spectrométrie d'Absorption Atomique par Hydrures(SAAH) fut le procédé qui a servi à déterminer les teneurs en mercure des eaux.

Analyse individuelle et multicritères corrélatives des paramètres (ACPN)

Les valeurs et les teneurs étant acquises, la réalisation d'un nuage de points a permis d'observer les classifications naturelles. Pour des distributions naturelles de faibles amplitudes, il fut procédé à un étalement linéaire des valeurs afin de réaliser une segmentation. Notre aire de protection étant la santé des êtres vivants, les seuils (OMS) de la potabilité (paramètres physico-chimiques) et de la toxicité (mercure) des eaux ont été appliqués. Chaque paramètre a été analysé en tenant compte de ces seuils.

Les distributions au sein de chaque paramètre étant connu, l'étude multicritère a été réalisée à l'aide d'une Analyse en Composantes Principales Normalisée (ACPN). Il s'est agit de réaliser une approche synthétique en regroupant en deux groupes au maximum les critères par une étude corrélative. Si deux variables sont corrélées, elles sont engendrées par le même phénomène et varient dans le même sens⁷. L'interprétation de l'ACPN s'est appuyée sur les valeurs propres, la matrice de corrélation et le cercle de communauté. A l'issue de l'ACPN, le résultat n'est validé que si les plans factoriels étudiés donnent plus de 70 % d'informations de la variance totale exprimée⁵.

III. Résultats

Anomalies de drainage

Dans la partie Nord, les changements de direction sont réalisés par la direction E-O, tandis que dans le Sud, la direction NNO-SSE affecte l'écoulement (fig. 2A). Ces deux directions révèlent une rectilinéarité des cours d'eau dans le voisinage du Bandama (collecteur principal des affluents). Les changements brusques de direction et la rectilinéarité qui l'accompagne témoignent de l'impact du bâti structural du socle sur la mise en place des cours d'eau au niveau des principaux collecteurs. Cette situation est bien connue dans les régions de socle ou les transformations polyphasées présentent des marques importantes dans les formations rocheuses.

Particularités rectilignes du relief

Le MNA 2D (fig.2B) montre que l'environnement des lignes de crête révèle les directions NE-SO, NO-SE et E-O. Les moyennes altitudes sont globalement orientées NNO-SSE qui délimitent des vallées E-O dans le

Nord et NO-SE dans le Sud. A l'évidence, le drainage n'est pas assuré par les formes du relief. En effet, les drains majeurs ne sont ni perpendiculaires aux directions des lignes de crête ni disposées suivant des rayons.

Caractéristiques de la trame linéamentaire

Les anomalies du drainage ainsi que les formes du MNA ont mis en évidence 30 linéaments majeurs dont les jonctions ont permis la délimitation des blocs hydrogéologiques (fig. 2C). Ces blocs sont caractérisés par des formes géométriques variées qui témoignent de l'inégalité de l'intensité de la fracturation. Ces blocs caractérisent un ensemble hydrogéologique hétérogène dont chaque entité pourrait constituer une variable dans les essais de modélisation. Il ressort que la zone d'orpaillage est une zone intensément fracturée qui détermine des blocs de dimensions réduites. Ce grand nombre de blocs témoigne de la présence de nombreuses jonctions de fractures. Cet état qui pourrait en partie expliquer la minéralisation aurifère, constitue un atout dans le rôle captant (champ captant hydrologique) des roches dans cette partie de la zone d'étude.

Paramètres physiques et niveau de potabilité des eaux du site de Kouaméfla

pH

L'eau du puits de Kouaméfla (fig.3A) (pH=5,34) et de Zouédékro (pH= 5,95) sont acides, tandis que, celui de Tiékorodougou est basique (pH=8,15). L'acidité des eaux (fig. 9) sur ces sites qui correspondent à des points d'extraction du minerai serait due à la décomposition de la matière organique végétale qui produit du CO₂ dans les premières couches du sol et au socle granitique (granite à biotite). Ces roches sont riches en quartz. La silice est le minéral qui détermine l'acidité des roches magmatiques. Les eaux de Kouaméfla et de Zouédékro sont impropres à la consommation. Les eaux des 12 autres sites sont potentiellement potables.

Température

L'eau du forage de Goda à la température la plus élevée (30,3°C). Les températures varient peu. Le minima est de 27,1°C tandis que, la moyenne est égale à 28,38°C. Tous les échantillons ont une température supérieure à la norme de potabilité fixée par l'OMS comprise entre 22 et 25°C (fig. 3B). Toutefois, elles sont potables car les valeurs de température élevées pourraient s'expliquer par l'influence de la chaleur ambiante (33°C diurne en moyenne) sur les eaux prélevées.

Conductivité

Les eaux des forages de Koffikro (4820 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et Zouédékro (2250 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) sont fortement minéralisées (fig. 3C). Cette situation serait due à l'activité d'orpaillage qui a lieu en amont. Les rejets miniers issus du lavage du minerai dans les cours d'eau sont à l'origine de cette minéralisation significative. Cette minéralisation des eaux est liée au contact eau-roche avec un temps de séjour plus ou moins long ou serait liée à la présence d'un gîte primaire. Ces valeurs sont largement au-dessus de la norme de potabilité fixée par l'OMS qui est comprise entre 180 et 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Solides Totaux Dissous

La plus forte concentration (fig.3D) est exprimée au niveau du puits de Koffikro (2410 mg/L). A cet effet, la moyenne de 803,33 mg/L exprime une distribution homogène. Cependant Les eaux de Koffikro (2410 mg/L) et de Zouédékro (1120 mg/L) constituent des anomalies. Les solides totaux dissous (STD) comme la conductivité électrique (C.E) décrivent les sels inorganiques présents en solution dans l'eau. Les STD sont donc équivalents à la minéralisation totale qui correspond à la somme des anions et des cations dans les eaux. Il en résulte de forts soupçons de la présence d'un gîte primaire. Les eaux de Koffikro (2410 mg/L) et de Zouédékro (1120 mg/L) sont au-dessus du seuil de potabilité.

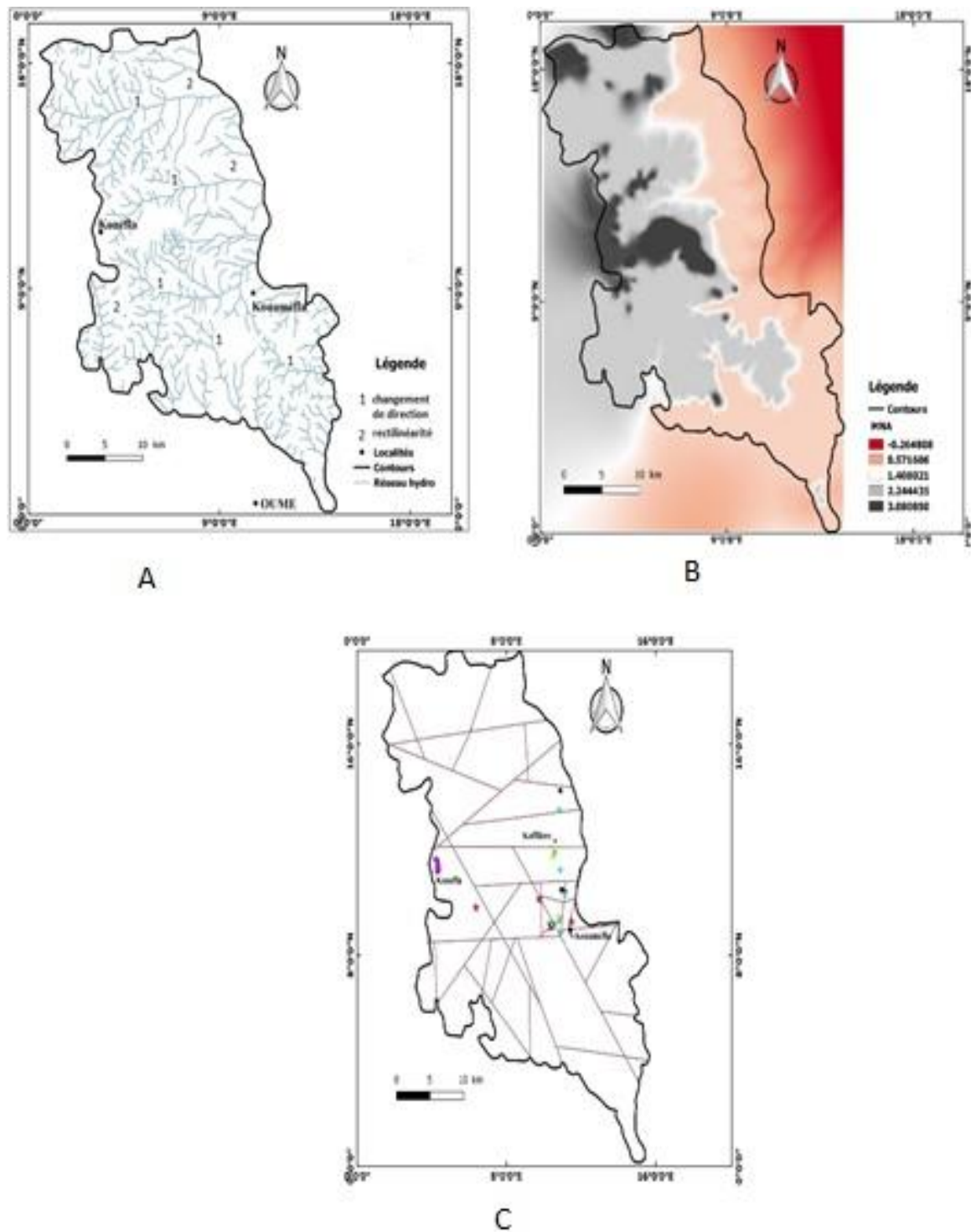


Fig. 2 : Trame linéamentaire du site de Kouaméfla (A : anomalie de drainage ; B : MNA ; C : Blocs hydrogéologiques)

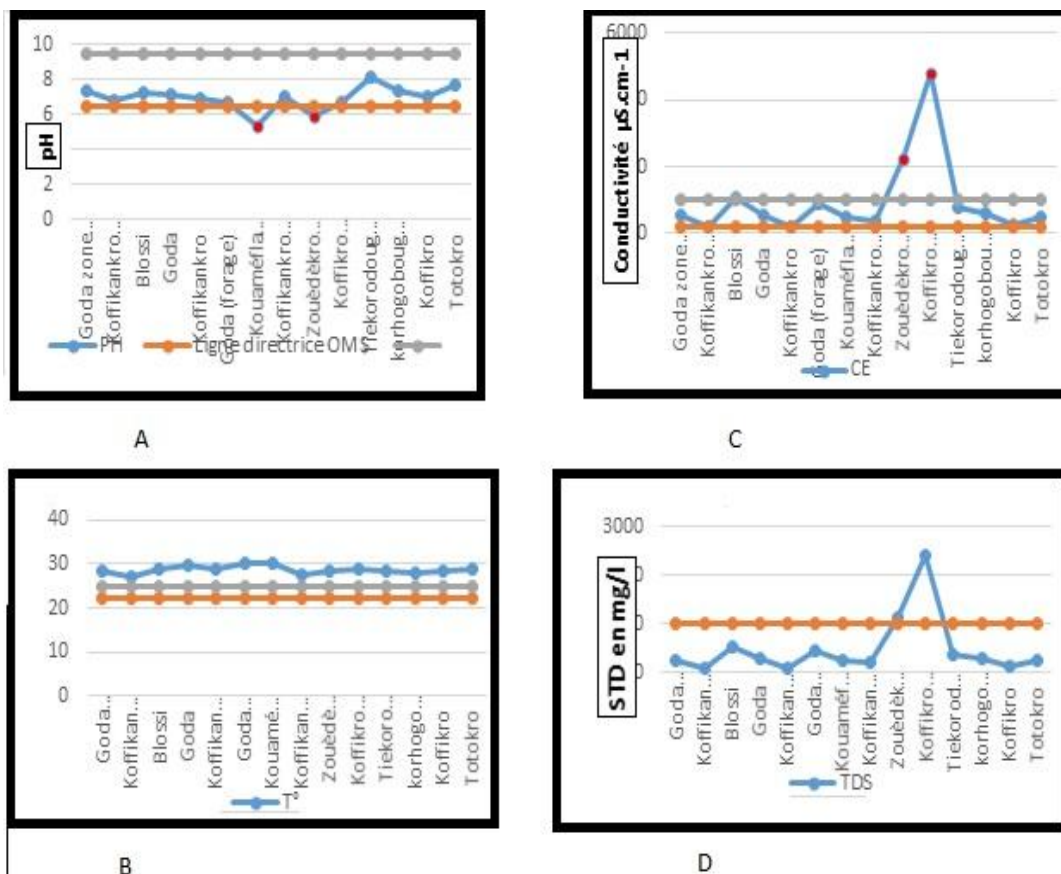


Fig.3 : Potabilité des eaux de Kouaméfla selon le pH, la T°, la conductivité et des STD

Concentrations du mercure et niveau de toxicité des eaux du site de Kouaméfla

La présence de mercure a été détectée dans tous les prélèvements (fig.4). En effet, des composés du mercure existent dans la plupart des roches et des sédiments que l'on rencontre dans les gisements aurifères. La teneur varie de 0,33 µg/L à 2,13 µg/L. La moyenne est de 0,87 µg/L. Ces valeurs montrent une distribution homogène. Toutefois, la teneur de Blossi (2,13 µg/L) est une teneur anormale. Les eaux de surface qui traversent les zones d'orpaillage ou qui se situent non loin de celles-ci présentent des valeurs élevées en mercure (Goda : 0,97µg/L et 1,3 µg/L et Kofikankro : 1,15 µg/L). Les fortes teneurs en mercure des eaux de surface sont la résultante de l'apport des eaux de ruissellement. En effet, ces eaux lessivent les rejets miniers et drainent leurs composantes. Ces eaux sont également enrichies en mercure par le déversement volontaire des rejets du lavage du minerai. Les forages n'étant pas dans le même bloc hydrogéologique que les zones d'orpaillage, la présence de mercure à une teneur élevée serait due à la présence d'un gîte primaire. Les villages étant une zone aurifère les eaux d'infiltration issues des rejets miniers, les huiles de moteurs libèrent les métaux qui contaminent la nappe. L'oxydation des minéraux sulfureux des roches par l'intrusion de l'oxygène libèrent les métaux tels que le mercure qui devient une composante des eaux souterraines. Il est important de rappeler que la continuité des travaux d'orpaillage favorisera une augmentation de la teneur en mercure.

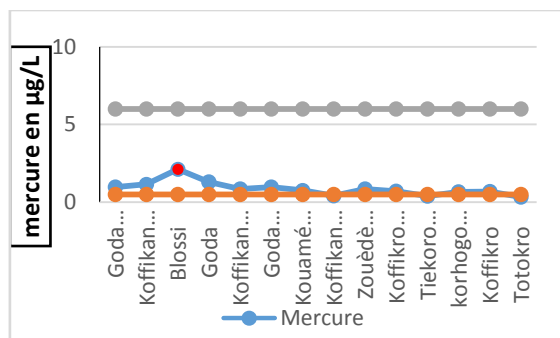


Fig.4 : Teneurs en mercure des sites

Corrélations entre le mercure et les paramètres physiques de l'eau (résultat de l'ACPN)

Le tableau 1 est un récapitulatif de l'ACPN après l'analyse des valeurs propres et des variances exprimées. L'ensemble des variances exprimées par les deux facteurs est de **70,76%**. L'essentiel des informations relatives à la matrice de données est contenu dans le plan factoriel F1 et F2 (respectivement 42,45% et 28,3% de la variance exprimée).

Tableau n°1- Valeurs propres et pourcentage des variances exprimées

	F1	F2
Valeur propre	2,12	1,41
% Total de Variance	42,45	28,3
Cumul Valeur Propre	2,12	3,54
% Cumul	42,45	70,76

Le tableau 2 est le récapitulatif de la matrice de corrélation. La conductivité électrique présente une forte corrélation avec les STD. Le mercure est faiblement corrélé avec la CE et les STD. La corrélation est moyenne entre le mercure et le couple T°/pH.

Tableau n°2 - Matrice de corrélation

Variables	T°	pH	CE	STD	Hg
T°	1,00				
pH	-0,44	1,00			
CE	0,05	-0,21	1,00		
STD	0,05	-0,21	1,00	1,00	
Hg	0,14	-0,11	-0,1	-0,01	1,00

La projection sur les plans factoriels (fig.5) a donné les résultats ci-après énumérés. Le plan F1 représente 42,45% de la variance exprimée. Il regroupe sur son axe positif la CE et les STD. La conductivité électrique traduit une minéralisation globale de l'eau. La forte corrélation de CE et STD montre qu'ils proviennent tous du même phénomène et évolue dans le même sens. Le facteur F1 est donc un axe de minéralisation naturelle. Le facteur F2 représente 28,3% de la variance exprimée, et regroupe sur son axe négatif le Hg et la T°. Le facteur F2 traduit une minéralisation anthropique.

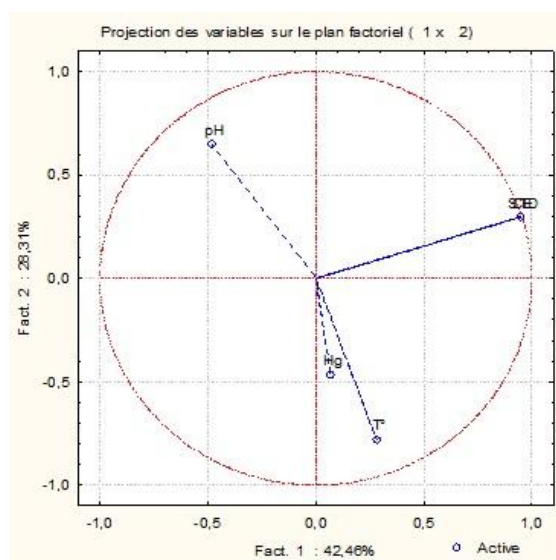


Fig. 5 : Analyse des variables dans le plan factoriel F1-F2

L'analyse des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F2 met en évidence trois regroupements des eaux (Fig.6). La classe I prend en compte les eaux fortement minéralisées. Il s'agit des eaux prélevées à Koffikro (4820µS.cm-1) et à Zouèdèkro (2250µS.cm-1). La classe 2 contient les eaux riches en mercure. Ce sont les eaux prélevées à Blossi (2,13µg/l), Goda (forage : 0,97µg/l ; eau de surface : 1,3µg/l), Kouaméfla (puits : 0,76µg/l). La classe 3 regroupe les eaux faiblement et normalement minéralisées. Certaines des valeurs sont élevées en mercure. Ce sont les cours d'eau prélevées dans les zones d'orpillage de Koffikankro (1,15µg/l) et de Goda (0,97µg/l).

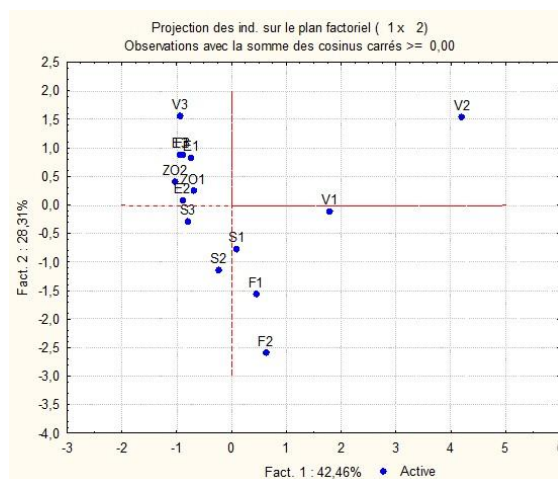


Fig.6 - Espaces des unités statistiques dans le plan factoriel F1-F

IV. Discussion

Les regroupements des petits blocs hydrogéologiques observés dans la trame linéamentaire, traduisent un grand nombre de jonctions qui en général constituent des sites favorables à l'accumulation des eaux souterraines. Leur présence est importante dans la définition de la stratégie de prospection hydrogéologique⁸. La présence d'un gîte aurifère primaire qui est l'objet de l'exploitation par les orpailleurs est à l'origine de la destruction de ce potentiel en eau potable.

Concernant les paramètres physiques de l'eau, il ressort que les températures des eaux sont supérieures aux seuils de potabilité de l'OMS (25°C). Ces résultats sont proches de ceux rapportés par Adiaffi⁹ dans la zone de socle d'Aboisso (26,6°C). Les valeurs de températures sont acceptables parce que selon Rodier¹⁰, la température moyenne des eaux est de 30°C dans la zone tropicale humide. Dans l'ensemble, le pH des eaux de la zone d'étude est légèrement acide (6,95) mais respecte les normes OMS (6,5-9,5). Ces résultats confortent le constat qui stipule que l'acidité constitue l'un des traits caractéristiques des eaux de Côte d'Ivoire¹¹. Les eaux souterraines sont minéralisées (400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 4820 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). C'est en général le cas dans les environnements miniers tel que Hiré¹². Les eaux de la zone d'étude ont une moyenne en solides totaux dissouts (STD) qui est de 486,43 mg/L avec 248,75mg/L pour les eaux de surface et 803,33mg/L pour les eaux souterraines. Ces résultats sont conformes à ceux de Matini¹³ dans les eaux souterraines au Sud-Ouest de Brazzaville au Congo.

Les eaux de la localité ont une teneur en mercure qui varie de 0,33 à 2,13 $\mu\text{g/L}$. Les fortes teneurs sont anormales bien qu'étant en dessous du seuil de toxicité OMS (6 $\mu\text{g/L}$). En général, les teneurs en mercure varient d'une province métallogénique à une autre¹⁴.

L'ACP révèle que l'ensemble des variances exprimées par les deux facteurs est de 70,76%. Ce résultat est fiable d'autant plus que, l'ACP d'une étude donnée n'est valable que lorsque les plans factoriels (la variance totale exprimée) étudiés donnent plus de 70 % d'informations⁵. La conductivité électrique présente une forte corrélation avec les STD. La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur les concentrations des STD¹⁵. Les eaux fortement minéralisées, les eaux riches en mercure et les eaux faiblement et normalement minéralisées constituent la segmentation des plans factoriels F1 et F2. Cette forme de distribution est bien connue dans les zones d'orpaillage. Sur ces sites, l'enrichissement en mercure est lié soit à la dégradation mécanique puis chimique des roches, soit à l'utilisation du mercure pour la confection de l'amalgame¹⁶.

V. Conclusion

Au terme de l'étude au sein de l'environnement minier de Kouaméfla, il est mis en évidence les faits marquants ci-après désignés. Les accidents géologiques E-O, NO-SE et NE-SO assurent l'écoulement des principaux collecteurs vers des zones intensément fracturés qui correspondent aux sites où est pratiqué l'orpaillage. Cette observation est perceptible dans le paysage par les changements brusques de direction et la rectilinéarité des drains qui en découle. Le bassin hydrogéologique est constitué de blocs ayant des formes et de dimensions variées. Les champs captants correspondraient aux sites constitués par de nombreux blocs consécutifs de superficies réduites. L'activité anthropique dégrade les ressources en eau en rejetant dans le système hydrogéologique désormais exposé aux pollutions superficielles, les refus et les effluents du lavage du minerai. Cette dégradation se traduit par une acidification des eaux (pH=6,95). Les eaux désormais acides sont également minéralisées (STD= 803,33mg/L ; CE= 400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à 4820 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Les teneurs en mercure sont anormales (0,33 à 2,13 $\mu\text{g/L}$). Toutefois, les seuils de toxicité ne sont pas atteints. L'application de l'ACP dans

le cas de l'approche multivariée, fut un succès car les variances exprimées (70,76%) sont supérieures à 70%. Il ressort de l'ACPN que la zone d'étude est constituée par trois catégories d'eau. Il s'agit des eaux fortement minéralisées, les eaux riches en mercure et les eaux faiblement et normalement minéralisées. La contamination au mercure des eaux est liée à l'orpaillage. Cette contamination est réalisée par les rejets du lavage du minerai d'une part, et la fragmentation des roches contenant les métaux lourds lors de l'extraction du minerai. La contamination au mercure des ressources en eau étant avérée, la lutte contre l'intoxication des populations devrait prendre en compte le sens de la circulation des eaux souterraines qui est bien différent de l'écoulement superficiel. A ce sujet, l'approche isotopique est sûrement un outil de choix. En dépit de la contamination des eaux, l'impact le plus important de l'orpaillage est la destruction des ressources en eau souterraines qui constitue plus 97,5% des 2,5% des ressources mondiales en eau potable.

Références Bibliographiques

- [1]. Affessi A, Koffi G, Sangaré M. Impacts sociaux et environnementaux de l'orpaillage sur les populations de la région du Bounkani (cote d'ivoire). *European Scientific Journal*. 2016; 12(9): 9-10
- [2]. Diallo P, Baudouin Y, et Raymond M. Modélisation de la dynamique des systèmes socio-écologiques en vue de l'élaboration d'un cadre de référence pour la durabilité environnementale et territoriale : Application au massif du FoutaDjalou (Guinée). *Revue européenne de géographie (Systems, Modelling, Geostatistics)*, 2016; 185: 12-14
- [3]. Coulibaly I, Kouamelan A N, Djro S C et Coulibaly Y. Pérographie des Volcanites et plutonites de la partie Sud du sillon volcano-sédimentaire de Toumodi-Fetekro (Côte D'ivoire). *European Scientific Journal* 2017 ; 13 (10) : 199-221
- [4]. Strahler N. Quantitative geomorphology, *Encyclopedia of Geomorphology*. R. W FAIRBRIDGE _ Reinhold Book Corp. New York. 1967;(3) : 225-248
- [5]. Biémi J. Contribution à l'étude géologique, hydrologique et par télédétection des bassins versants subsaharien du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aire. Thèse de doctorat d'Etat ès Sciences Naturelles, Université Nationale de Côte d'Ivoire. 1992
- [6]. Thierrin J, Steffen P, Cornaz S, Vuataz F, Loaser P. Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Édité par l'Office de l'Environnement des Forêts et du Paysage et la Société Hydrogéologique de Suisse, 2001 ; 91-93
- [7]. Baka D. Géométrie, hydrodynamisme et modélisation des réservoirs fracturés du socle protérozoïque de la région d'Oumé (Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire), Thèse unique de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny (Côte d'Ivoire). 2012.
- [8]. Youanta TM. Contribution de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques à la prospection hydrogéologique du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan. 2008
- [9]. Adiaffi B. Apport de la géochimie isotopique, de l'hydrochimie et de la télédétection à la connaissance des aquifères de la zone de contact "socle-bassin sédimentaire" du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, Thèse de l'Université Paris-Sud, Orsay, France. 2008
- [10]. Rodier J. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, et eau de mer. 7ème édition, Dunod Technique. 1984
- [11]. Lasm T, Lasmé O, Oga M S, Youanta M, Baka D, Kouamé K F et Yao T. 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*. 2011; (5) : 642-662.
- [12]. Yapi Y, Dongui B, Troukourey A, Barima Y, ESSIS Y et Atheba P. Evaluation de la pollution métallique des eaux souterraines et de surface dans un environnement minier aurifère à Hiré (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 2014; (8) : 1281-1289
- [13]. Matini L, Moutoui J M et Kongo-Mantono M. Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville (Congo). *Afrique Science*. 2009; ((05) : 82-98
- [14]. Yao K B. Caractéristiques hydrochimiques des eaux naturelles aux alentours des anciennes mines : cas de la mine d'Afféma. Mémoire de Master, Université Félix Houphouët-Boigny. 2016
- [15]. Haddad H et Ghoualem H. Caractérisation physico-chimique des eaux du bassin hydrographique côtier algérois. *Larhyss Journal*, 2014 ; (18): 155-167
- [16]. Boudou A, Dominique Y, Cordier S et Frey N. Les chercheurs d'or et la pollution par le mercure en Guyane française : conséquences environnementales et sanitaires. *Environnement, Risques & Santé*, 2006; (5) : 151-170

Kadio H. Niamké, *etal.* " Caractérisation des paramètres physiques et du taux de mercure des eaux dans un environnement d'orpaillage : cas de Kouaméfla dans le département d'Oumé (Centre de la Côte d'Ivoire)" *IOSR Journal of Applied Geology and Geophysics (IOSR-JAGG)*, 8(1), (2020): pp. 48-56.