

Étude de la minéralisation des eaux de surface en éléments traces métalliques (ETM) des zones d'orpaillage de la sous-préfecture de Kokumbo, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire

Kouassi Ernest AHOUSI* et Armand Patrick YAPO

*Université Felix Houphouët Boigny Abidjan- Cocody, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG),
22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

(Reçu le 29 Juin 2020 ; Accepté le 30 Juillet 2020)

* Correspondance, courriel : akouassiernest@gmail.com

Résumé

La localité de Kokumbo est située au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. Elle connaît un essor sans précédent ces dernières années avec le développement de l'activité d'orpaillage qui met en second plan les activités agricoles. Cette situation soulève de nombreuses interrogations sur la préservation de l'environnement, des ressources naturelles et la santé des populations environnantes. Cette étude a pour objectif de déterminer le niveau de contamination en éléments traces métalliques (ETM) des eaux de surface des sites d'extraction artisanale d'or de la sous-préfecture de Kokumbo. Un total de 12 échantillons d'eau de surface a été prélevé pour cette étude. Les mesures sur le terrain ont été réalisées à l'aide d'un pH-mètre WTW pH 3110 SET2 équipé d'une sonde Sentix 41 et d'un conductimètre WTW Cond 3110 SET 1, 2CA. Les échantillons ont été analysés à l'aide du spectrophotomètre à absorption atomique (AAS) et les résultats ont subi un traitement statistique multivarié à partir de l'ACP et du CHA. Les eaux sont neutres, avec un pH moyen de 7,5. La température et la conductivité électrique moyenne des eaux sont respectivement de 29,04°C et de 281,55µS/cm. Les teneurs moyennes de Fe (7,28 mg/L), du Mn (1,62 mg/L) et du Ni (0,13 mg/L) sont supérieures aux valeurs guides de l'OMS. Les ICM de l'As (1,08), Cr (0,21), Pb (1,32) et Zn (0,06) sont inférieures à 2 tandis que celles de Fe (24,26), Mn (32,37) et Ni (6,51), présentent des valeurs de ICM les plus élevés. Les analyses statistiques (ACP et CHA) montrent une contribution de l'activité d'orpaillage à la minéralisation des eaux de surface. Cette étude montre que les eaux de surface des sites d'orpaillage de Kokumbo subissent une contamination liée au Fe, Mn et Ni. La consommation des eaux de surface sans traitement préalable expose les populations à des risques sanitaires.

Mots-clés : *orpaillage, eau de surface, ETM, environnement, contamination.*

Abstract

Study of the mineralization of surface water in metallic trace elements (MTEs) in the gold panning areas of the Kokumbo sub-prefecture, Centre-West of Côte d'Ivoire

Kokumbo is located in the centre-west of Côte d'Ivoire. It has experienced an unprecedented boom in recent years with the development of gold mining activity which puts agricultural activities in the background. This situation raises many questions about the preservation of the environment, natural resources and the health

of the surrounding populations. The goal of this study is to determine the level of contamination with metallic trace elements (TME) in the surface water of artisanal gold mining sites in the Kokumbo sub-prefecture. A total of 12 surface water samples were collected for the study. Field measurements were performed using a WTW pH 3110 SET2 pH meter with a Sentix 41 probe and a WTW Cond 3110 SET 1, 2CA conductivity meter. Samples were analyzed using the atomic absorption spectrophotometer (AAS). Chemical data were processed from multivariate statistical analysis. The results indicated that waters are neutral, with an average pH of 7.5. The average temperature and the electrical conductivity of the water are respectively 29.04 ° C and 281.55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The mean concentration Fe (7.28 mg/L), Mn (1.62 mg/L) and Ni (0.13 mg/L) are above the WHO guideline values. The ICMs of As (1.08), Cr (0.21), Pb (1.32) and Zn (0.06) are less than 2 while those of Fe (24.26), Mn (32, 37) and Ni (6.51), show the highest ICM values. Statistical analyzes (ACP and CAH) show a contribution of gold mining activity to the mineralization of surface water. This study shows that the surface water of the gold mining sites of Kokumbo is subject to contamination linked to Fe, Mn and Ni. This study shows that the surface water of the gold mining sites of Kokumbo are faced to contamination by Fe, Mn and Ni. The consumption of surface water without any treatment exposes populations to health risks.

Keywords : *Gold panning, surface water, MTEs, Environment, contamination.*

1. Introduction

L'exploitation minière reste l'une des principales industries primaires au monde [1]. Aujourd'hui, l'exploitation minière artisanale de l'or est une activité économique devenue indissociable du développement économique des pays d'Afrique de l'Ouest [2]. Selon le ministère Ivoirien des Mines et de la Géologie, l'économie de la Côte d'Ivoire qui d'antan était essentiellement basée sur le développement du secteur agricole et de sa productivité est depuis quelques décennies tourné vers l'exploitation des ressources minières telles que l'or à cause de la forte hausse de son prix atteignant plus de \$ 1600 dollars l'once (25000 FCA/gramme) [3]. Cela a entraîné la prolifération et l'intensification de l'orpaillage anarchique. La dégradation du couvert végétal, la pollution des eaux de surface et souterraines résultant des activités minières présentent de nombreux impacts négatifs, tant au niveau social, environnemental que biophysique [4]. L'utilisation de substances chimiques (mercure, cyanure, acide chlorhydrique et acide sulfurique) peut réduire la fertilité des sols et même contaminer et réduire la qualité des ressources en eau [5]. En Côte d'Ivoire, il existe plus de 1 000 sites de recherche d'or clandestins et près de 500 000 personnes sont engagées dans cette activité [3]. Pour mieux gérer cette l'expansion de l'orpaillage, le gouvernement ivoirien a adopté un programme national triennal (2014 - 2016) de rationalisation de l'exploitation minière artisanale [3] afin de nettoyer, organiser et superviser l'activité. Dans les sites aurifères, certains résidus qui restent peuvent avoir un impact sur l'environnement et constituer un risque potentiel pour les habitants des régions minières. Les activités minières sont considérées comme une source fondamentale de métaux lourds dans l'environnement [6]. La plupart des travaux importants concernant les activités d'extraction d'or ont été réalisés sur les eaux souterraines et les eaux de surface dans les régions de Hiré et de Divo pour l'évaluation environnementale de ces activités [7 - 9]. De plus, [10, 11] ont travaillé respectivement sur les impacts de l'ancienne mine SOMIAF sur les ressources en eau évalué et l'effet de l'exploitation minière artisanale sur les niveaux de pollution de certains éléments traces dans les sédiments et l'eau au Ghana. Cependant, aucune étude n'a été réalisée sur la caractérisation de la contamination métallique des eaux de surface de la sous-préfecture de Kokumbo. C'est donc dans cette perspective que cette étude a été initiée pour la protection de l'environnement et de la santé de la population. L'objectif de l'étude est de déterminer le niveau de contamination en éléments traces métalliques (ETM) des eaux de surface des sites d'extraction artisanale d'or de la sous-préfecture de Kokumbo.

2. Matériel et méthodes

2-1. Description de la zone d'étude

Située dans la région du bélier, au centre de la Côte d'Ivoire, la localité de Kokumbo appartient au département de Toumodi. Elle se localise entre les latitudes 6°19' et 6°34'N et les longitudes 5°6' et 5°20'W et est le chef-lieu d'une sous-préfecture comprenant 5 villages : Kpléssou, Konankro, Kokumbo, Akroukro et Kimoukro (**Figure 1**). Sa superficie est de 330 km² et sa population est estimée à 24650 habitants [12]. La région est située dans le climat baouléen. C'est un climat humide, commun à la zone forestière dense [13]. Il se caractérise par deux saisons des pluies séparées par deux saisons sèches. Les précipitations sont en moyenne de 1092 mm par an. La principale saison des pluies est de mars à juin et la mineure de septembre à octobre. La grande saison sèche est de novembre à février et la petite de juillet à août. La température annuelle moyenne est d'environ 27 °C.

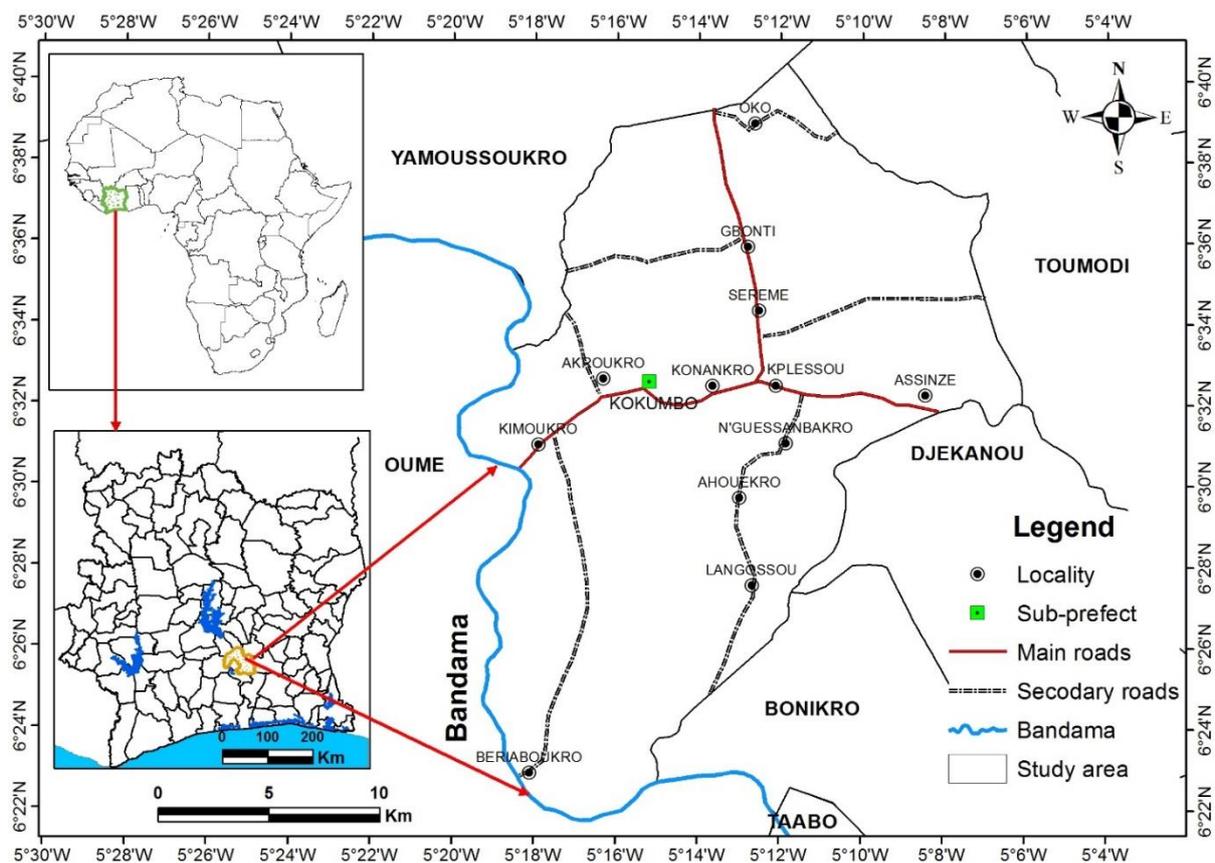


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (sous-préfecture de Kokumbo)

Le relief est plus ou moins accidenté, avec des plaines et plateaux peu prononcés et appartenant à la "chaîne Baoulé". Il est dominé à l'Est par le mont Alebouma (449 m) et à l'Ouest par le mont Kokumbo (510 m). Le fleuve Bandama arrose l'Ouest de la sous-préfecture depuis le village de Kimoukro. Plusieurs petits affluents Bandama (Bronzoué, Kpléssou et Kpoussou) existent dans la localité. Le sol de la région repose sur de vastes massifs granitiques, des roches métamorphiques et des schistes [14] et appartient au domaine Baoulé-Mossi du craton ouest-africain. Les roches rencontrées sont généralement constituées de granitoïdes, de roches vertes, de roches volcano-sédimentaires et de schistes (**Figure 2**). On rencontre deux types d'aquifères (altération et fractures) [15, 16]. La présence de schistosité, de fractures et de grosses veines de quartz favorise l'infiltration et également la recharge des eaux souterraines [17].

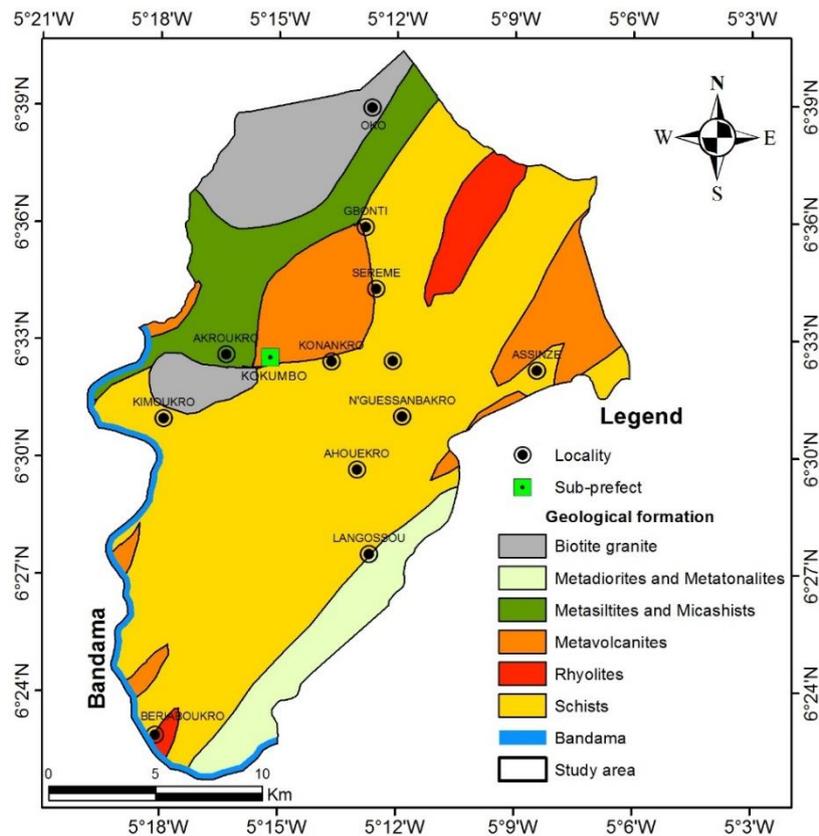


Figure 2 : Carte géologique de la zone d'étude

2-2. Matériel et méthodes d'échantillonnage

Une campagne d'échantillonnage des eaux de surface a eu lieu pendant la saison des pluies en juin 2018 sur les sites miniers de Kokumbo et les cours d'eau environnants. Au cours de cette campagne 12 échantillons d'eau de surface ont été prélevés. Un total de 7 échantillons d'eau ont été prélevés sur les sites d'extraction artisanale d'or, de cyanuration et de traitement du minerai. Trois (3) échantillons d'eau ont également été prélevés dont 2 sur la rivière bronzoûé et 1 sur la rivière Kpossou. Le fleuve Bandama a fait l'objet de 2 échantillons dont l'un est à proximité d'un site de lavage du minerai et l'autre à proximité du point de prélèvement de la station de traitement desservant la localité de Kokumbo en eau potable (**Figure 3**). Au cours des prélèvements, les paramètres physiques de l'eau ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un pH-mètre WTW pH 3110 SET2, avec Sentix 41 et d'un conductimètre WTW Cond 3110 SET 1, 2CA. Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en polypropylène de 500 mL préalablement lavés à l'acide puis à l'eau distillée, et avant prélèvement rincées deux fois avec l'eau du site à échantillonner [18]. Chaque échantillon a été stabilisé à l'aide de l'acide nitrique pur à 4 %. Les différents échantillons d'eau ont été conservés à 4 ° C puis envoyés au laboratoire. Les éléments traces métalliques (As, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn ont été dosé au laboratoire par la méthode ICP-AAS (Inductively Coupled Plasma Atomic Absorption Spectrometer).

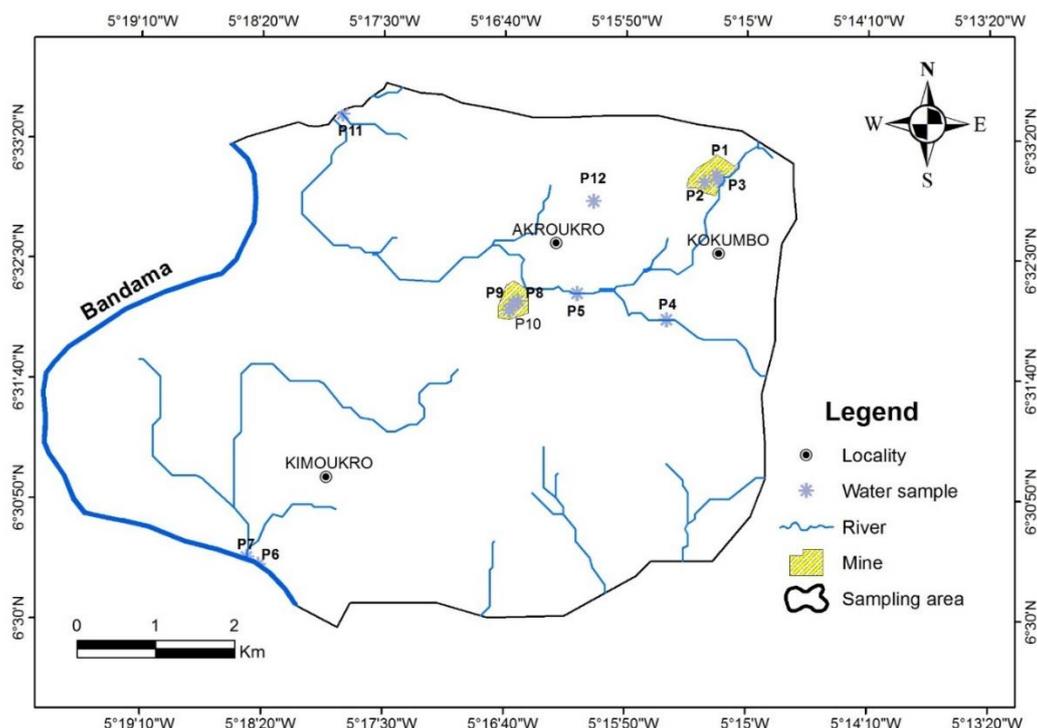


Figure 3 : Carte des points de prélèvement

2-3. Méthodes

2-3-1. Caractérisation physico-chimique et métallique des eaux de surface

La caractérisation physico-chimique et métallique des eaux se fait à partir des résultats des analyses effectués sur les 12 échantillons d'eau prélevés pour cette étude. Le principe est basé sur la comparaison des teneurs avec les normes OMS [19]. Les paramètres étudiés sont la température (T), le potentiel hydrogène (pH), la Conductivité Électrique (CE), le potentiel redox (Eh), la turbidité (Turb) et les ETM tels que l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Chrome (Cr), le Fer (Fe), le Manganèse (Mn), le Nickel (Ni), le Plomb (Pb) et le Zinc (Zn).

2-3-2. Évaluation du degré de contamination métallique des eaux de surface

Pour cette étude afin d'évaluer le degré de la contamination des eaux l'Indice de Contamination (IC) a été calculé. L'évaluation du degré de contamination métallique d'un écosystème peut être réalisée en utilisant les résultats bruts des teneurs métalliques. Il permet d'évaluer une contamination par les éléments métalliques dans un milieu donné. L'Indice de Contamination (IC) est défini comme étant le rapport de la teneur mesurée à une station donnée sur la teneur naturelle mesurée au niveau de la station de référence en utilisant la **Formule** suivante [20]. Les valeurs prises comme référence sont les valeurs standards de l'OMS notamment la concentration maximale admissible (CMA).

$$IC = \frac{C_i}{CMA} \tag{1}$$

IC est l'indice de contamination, C_i la concentration du métal sur le site et CMA la concentration maximale admise.

Les différentes stations d'observation ont été comparées entre elles à partir du calcul de l'indice de contamination moyen ICM et l'indice de contamination moyen polymétallique ou total (ICMT). Les valeurs prises comme référence sont les standards de l'OMS notamment la concentration maximale admissible (CMA).

2-3-3. Étude statistique de l'origine de la minéralisation des eaux

Cette étude vise à déterminer l'origine de la minéralisation métallique des eaux à partir des méthodes statistiques multivariées. Ces méthodes permettent de réduire le nombre de paramètres statistiques et de trouver des coefficients de corrélation entre les paramètres étudiés. Pour cela, deux (2) méthodes complémentaires d'analyse statistique multivariée ont été utilisées pour identifier les facteurs susceptibles d'expliquer à la fois l'origine des paramètres et leur corrélation. Il s'agit de l'analyse en composantes principales (ACP) et de la classification ascendante hiérarchique (CAH) qui ont été effectuées à l'aide du logiciel STATISTICA 7.0.

2-3-3-1. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'ACP a été menée pour mettre en évidence des similitudes hydrochimiques entre différents sédiments de surface afin d'extraire des variables représentatives [9, 21, 22]. Les variables utilisées pour cette étude sont les paramètres physiques (T° , pH, CE, Eh et Turb) et les ETM (As, Cd, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn).

2-3-3-2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La CAH permet de trouver des groupes homogènes d'échantillons en fonction de leurs compositions hydrochimiques. Elle permet de déterminer les liens entre les différentes variables à partir de leur regroupement en classe. Ces différentes classes sont représentées sur un arbre hiérarchique appelé dendrogramme. La distance d'agrégation choisit pour le partage est de 500. Les variables utilisées pour cette étude sont identiques à celles de l'ACP.

3. Résultats

3-1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons d'eaux de surface sont représentés dans le *Tableau 1*.

Tableau 1 : Variables statistiques et concentrations chimiques des eaux

	T ($^{\circ}$ C)	pH	Eh (mg/L)	CE (μ S/cm)	Turbidité (NTU)
Minimum	25,2	6,8	-104,3	67,8	6,07
Maximum	32,4	8,5	2	574	3472
Moyenne	29,04	7,5	-40,19	281,55	716,55
Écart-type	2,76	0,6	33,78	142,35	1085,26
Normes OMS (2011)	< 25	6,5 < pH < 8,5	-	< 250	< 5

Les eaux du site minier de Kokumbo sont légèrement acides à basiques. Le pH des eaux varie de 6,8 sur le site P4 et 8,5 sur le site P8 une valeur moyenne de 7,5 et un écart-type de 0,6. La température des eaux varie de 25,2 $^{\circ}$ C sur le site P11 à 32,4 $^{\circ}$ C sur le site P6, avec une moyenne de 29,04 $^{\circ}$ C pour un écart-type de 2,76 $^{\circ}$ C. Les eaux sont faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique qui varie de 67,8 μ S/cm sur le site P6 à 574 μ S/cm le site P10, pour une moyenne de 281,55 μ S/cm. Le potentiel redox (Eh) des eaux oscille entre -104,3 mV sur le site P8 et 2 mV sur le site P6, avec une moyenne de -40,19 mV pour un écart-type estimé à 33,78 mV. Les eaux des sites miniers présentent une forte turbidité qui est comprise entre 6,07 NTU sur le site P11 et 3472 NTU sur le site P12, avec une moyenne de 716,55 NTU et l'écart-type est de 1085,26 NTU.

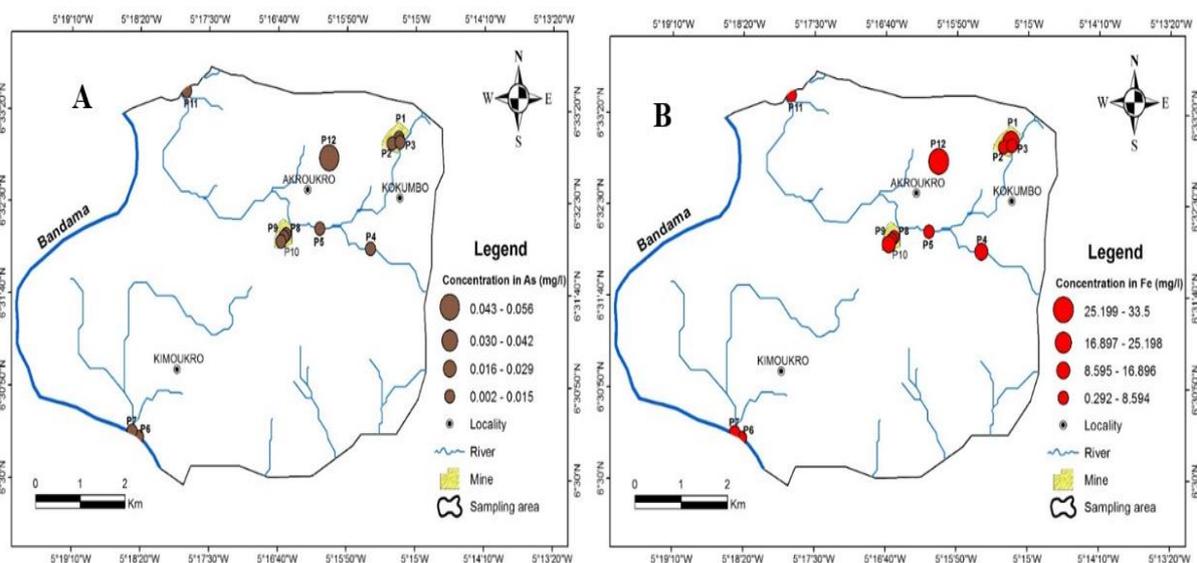
3-2. Caractéristiques des eaux en éléments traces métalliques

Le **Tableau 2** indique les variables statistiques des concentrations des ETM (As, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb et Zn) dans des échantillons d'eau prélevés dans les environnements miniers de la sous-préfecture de Kokumbo.

Tableau 2 : Variables statistiques des concentrations des ETM dans les eaux

	As (mg/L)	Cr (mg/L)	Fe (mg/L)	Mn (mg/L)	Ni (mg/L)	Pb (mg/L)	Zn (mg/L)
Minimum	0,002	0,001	0,292	0,047	0,043	0,002	0,034
Maximum	0,056	0,037	33,5	5,41	0,496	0,047	0,841
Moyenne	0,011	0,011	7,28	1,62	0,13	0,013	0,18
Écart-type	0,015	0,014	9,905	1,927	0,132	0,015	0,231
Normes OMS (2011)	0,01	0,05	0,3	0,05	0,02	0,01	3

Les concentrations en As des eaux échantillonnées varient de 0,002 mg/L au niveau du fleuve Bandama (P6 et P7) à 0,056 mg/L au niveau du site de traitement P12, avec une moyenne de 0,011 mg/L. Les fortes teneurs en As sont observées au niveau des eaux du site de traitement du minerai d'or. Les teneurs de Cr varient de 0,001 mg/L au niveau du fleuve Bandama (P6 et P7) à 0,037 mg/L au niveau du site de traitement P12, avec une valeur moyenne de 0,011 mg/L. Le fer constitue l'élément le plus abondant dans les eaux étudiées. Les concentrations de fer oscillent entre 0,292 mg/L et 33,5 mg/L, avec une valeur moyenne de 7,28 mg/L. Les eaux du site de traitement des minerais d'or présentent les plus fortes concentrations en fer. Les teneurs en Mn varient de 0,047 mg/L au niveau de la rivière Kpoussou P11 à 5,41 mg/L au niveau du site de cyanuration P10, avec une valeur moyenne de 1,62 mg/L. Les eaux présentent une concentration en Ni oscillent entre 0,043 mg/L et 0,496 mg/L, avec une moyenne de 0,13 mg/L. Les répartitions spatiales des concentrations en As, Mn, Fe et Ni dans les échantillons d'eau du site minier de Kokumbo est illustrée par la figure ci-dessous (**Figure 4**). Au niveau du Pb, les teneurs en Pb varient de 0,002 mg/L à 0,047 mg/L avec une moyenne de 0,013 mg/L. Les fortes teneurs sont observées au niveau du site de traitement P12. Le Zn à une concentration comprise entre 0,034 mg/L et 0,841 mg/L, avec une valeur moyenne de 0,18 mg/L. La plus forte teneur a été obtenue au niveau du site de cyanuration P10.



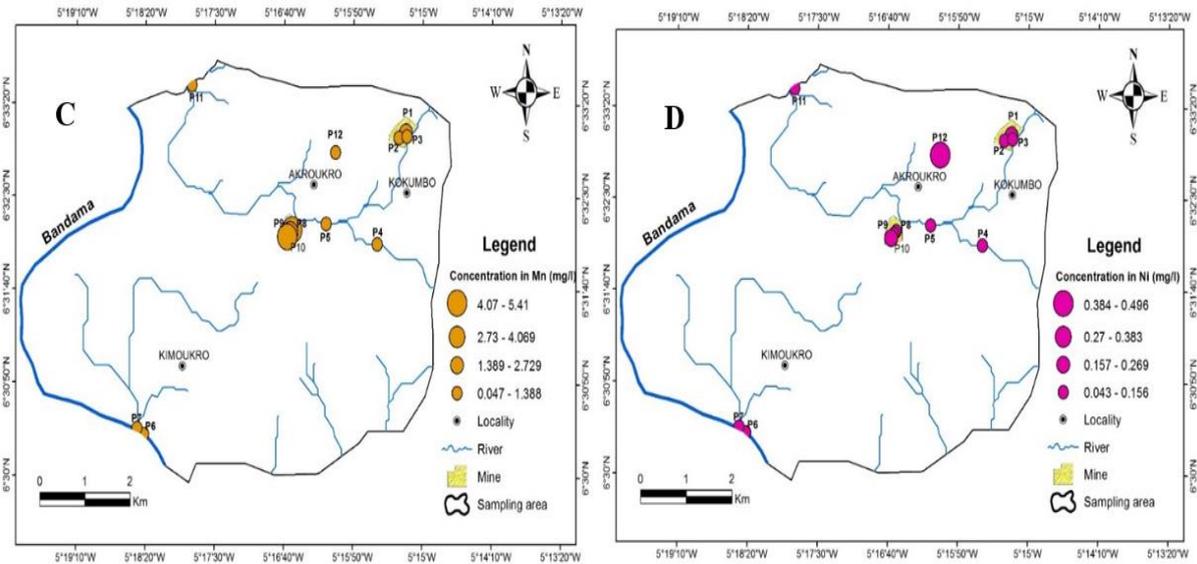


Figure 4 : Répartition spatiale des concentrations en As dans les eaux de surface (A), Concentrations en Fe dans les eaux de surface (B), concentrations en Mn dans les eaux de surface (C) et concentrations en Ni dans les eaux de surface (D)

3-3. Évaluation du degré de contamination métallique des eaux

Les résultats montrent que des IC varient selon les métaux étudiés d'un site à l'autre. L'arsenic présente un $IC > 2$ qui est observé au niveau du site P12. Pour le fer et le manganèse les $IC > 2$ sont observés à tous les sites à l'exception de P6 et P7 pour le fer et P11 au niveau du manganèse. Le nickel présente un $IC > 2$ sur tous les sites tandis que le chrome et le zinc ont les $IC < 2$. Le plomb a un $IC > 2$ pour les sites P1, P10 et P12. Les $IC > 2$ indiquent l'influence des activités d'orpaillage et la dégradation de la qualité des eaux sur les sites observés (**Tableau 3**). Les $ICM < 2$ (faibles) sont observés au niveau de l'As (1,08), Cr (0,21), Pb (1,32) et Zn (0,06) tandis que ceux du Fe (24,26), Mn (32,37) et Ni (6,51), présentent des valeurs élevées de $ICM > 2$. Le calcul des ICM permet d'établir la classification suivante : $ICM (Mn) > ICM (Fe) > ICM (Ni) > ICM (Pb) > ICM (As) > ICM (Cr) > ICM (Zn)$. Les indices de contamination métallique (ICM) calculés pour les eaux de la zone d'étude sont présentés dans le tableau 3. Pour ces différents indices de contamination, on peut évaluer une appréciation des tendances de la pollution polymétallique. On détermine alors l' $ICMT$ qui représente la moyenne arithmétique de la station considérée (**Figure 5**). Le calcul de l' $ICMT$ montre que les sites P1 ($ICMT = 17,57$), P8 ($ICMT = 16,80$), P9 ($ICMT = 11,01$), P10 ($ICMT = 23,29$) et P12 ($ICMT = 23,26$) qui présentent les fortes valeurs d' $ICMT$ sont confrontés à une pollution d'origine métallique.

Tableau 3 : ICM et ICMT des ETM dans les eaux de surface

	As	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	ICMT
P1	1,26	0,56	61,33	44,20	12,00	3,61	0,06	17,57
P2	0,89	0,16	13,97	15,40	4,38	0,76	0,02	5,08
P3	0,67	0,18	8,87	8,72	3,03	0,93	0,03	3,20
P4	0,60	0,02	29,27	21,00	2,92	0,38	0,01	7,74
P5	0,35	0,03	2,51	4,50	3,01	0,46	0,05	1,56
P6	0,19	0,01	0,97	2,82	2,35	0,28	0,01	0,95
P7	0,21	0,04	1,28	2,44	3,07	0,40	0,02	1,07
P8	0,88	0,06	10,67	100,40	4,77	0,73	0,13	16,80
P9	0,58	0,04	6,70	64,40	4,69	0,62	0,02	11,01
P10	1,43	0,71	38,67	108,20	11,00	2,76	0,28	23,29
P11	0,38	0,01	5,17	0,95	2,15	0,22	0,02	1,27
P12	5,56	0,74	111,67	15,36	24,80	4,66	0,05	23,26
ICM	1,08	0,21	24,26	32,37	6,51	1,32	0,06	

ICM = indice de contamination moyen ICMT = indice de contamination moyen polymétallique ou total

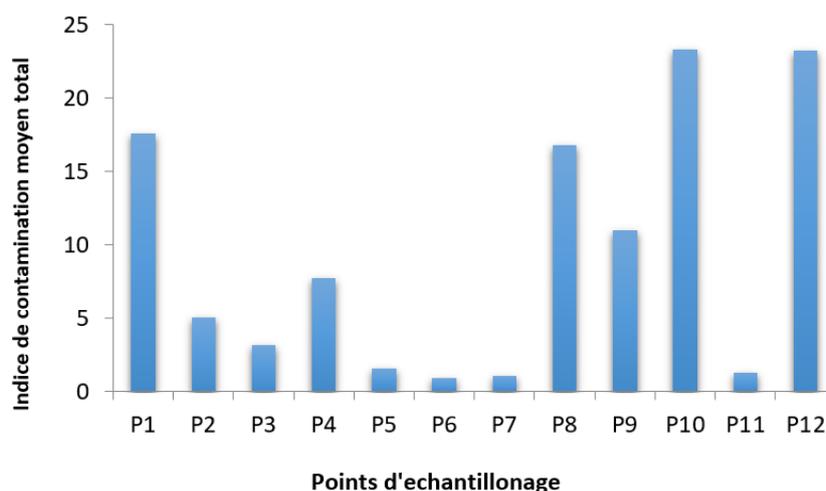


Figure 5 : Variation spatiale de l'indice de contamination polymétallique moyen (ICMT)

3-4. Identification de l'origine de la contamination des eaux

3-4-1. Analyse en Composantes Principales (ACP) des eaux

Le Tableau 4 présente les valeurs propres, les pourcentages des variances exprimées par chaque facteur et les variances cumulées. Il montre trois (3) principaux facteurs, avec des variances exprimées de 49,34 % pour le facteur 1 ; 22,09 % pour le facteur 2 et 20,26 % pour le facteur F3. Les facteurs F1 et F2, expriment une variance estimée à 71,43 % permettant de représenter de manière significative et expliquer les interactions et les différents phénomènes.

Tableau 4 : Tableau des valeurs propres et pourcentage des variances

	F1	F2	F3
Valeur propre	5,92	2,65	2,43
% variance exprimée	49,34	22,09	20,26
Cumul valeur propre	5,92	8,57	11,00
Cumul % variance exprimée	49,34	71,43	91,68

L'analyse de la matrice de corrélation nous permet de mettre en évidence des relations entre les différentes variables (**Tableau 5**). Il existe d'une part une forte corrélation entre la Turb et les variables As (0,906), Cr (0,936), Fe (0,939), Ni (0,958) et Pb (0,966). D'autre part Cr (0,753), Fe (0,923), Ni (0,955) et Pb (0,842) sont corrélés avec As. Une corrélation bonne existe entre Cr et Fe (0,855), Ni (0,887), Pb (0,960), entre Fe et Ni (0,964), Pb (0,942) Mn et Zn (0,809) Ni et Pb (0,956).

Tableau 5 : Matrice de corrélation

	T	pH	CE	Eh	Turb	As	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
T	1											
pH	0,359	1										
CE	-0,593	-0,320	1									
Eh	-0,378	-0,99	0,333	1								
Turb	0,347	0,042	0,019	-0,053	1							
As	0,259	0,188	-0,120	-0,194	0,906	1						
Cr	0,227	0,053	0,246	-0,064	0,936	0,753	1					
Fe	0,254	-0,013	-0,015	-0,001	0,939	0,923	0,855	1				
Mn	-0,240	0,329	0,646	-0,326	0,120	0,052	0,351	0,116	1			
Ni	0,281	0,155	-0,030	-0,166	0,958	0,955	0,887	0,964	0,191	1		
Pb	0,313	0,037	0,073	-0,051	0,966	0,842	0,960	0,942	0,253	0,956	1	
Zn	-0,229	0,366	0,621	-0,361	0,305	0,149	0,569	0,203	0,809	0,295	0,383	1

3-4-1-1. Espace des variables du plan factoriel F1-F2

La figure 6 présente la répartition des unités statistiques dans le plan factoriel F1- F2. Dans ce plan, le facteur F1 (49,34 %), le plus important est déterminé dans la partie négative par les variables, Cr, Fe, Ni, As, Turb et Pb (**Figure 6**). Le regroupement de ces éléments dans la partie négative indique que ces variables sont liées et sont à l'origine d'un même phénomène qui est la minéralisation rapide des eaux. Le facteur F1 exprime donc la minéralisation naturelle des eaux. Le facteur F2 (22,09 %) est déterminé dans sa partie positive par les variables CE, Mn et Zn traduisant la présence d'une activité humaine. Le facteur F2 exprime donc la minéralisation d'origine anthropique liée à l'activité d'orpillage.

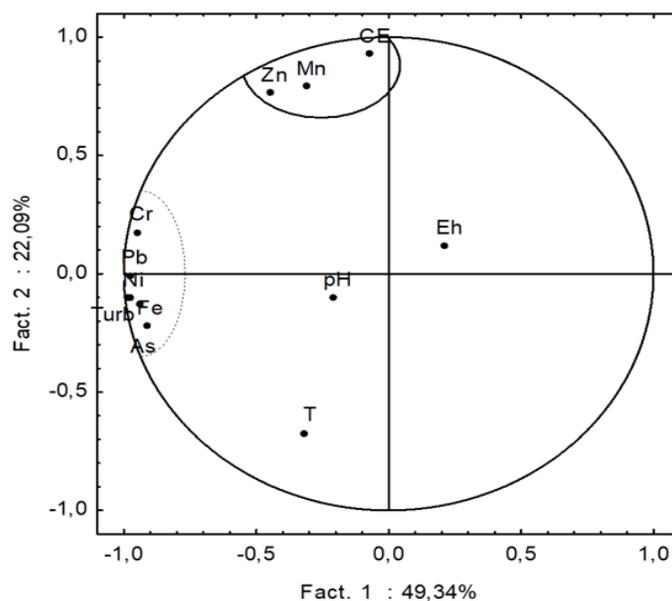


Figure 6 : Espace des variables du plan factoriel F1-F2

3-4-1-2. Espace des unités statistiques du le plan factoriel F1-F2

La figure 7 présente la répartition des unités statistiques dans le plan factoriel F1- F2. Cette répartition permet de distinguer trois classes. La classe 1 concerne toutes les eaux fortement minéralisées des sites étudiés. La classe 2 regroupe les eaux moyennement minéralisées et à forte teneur en métaux. Elle regroupe les eaux des sites d'extraction (P2 et P3), de la rivière Bronzoué (P4 et P5), de cyanuration (P8 et P9) et de la rivière Kpoussou (P11). La classe 3 comprend les eaux très riches en métaux. Elle regroupe les eaux des sites d'extraction (P1), de cyanuration (P10) et de traitement (P12).

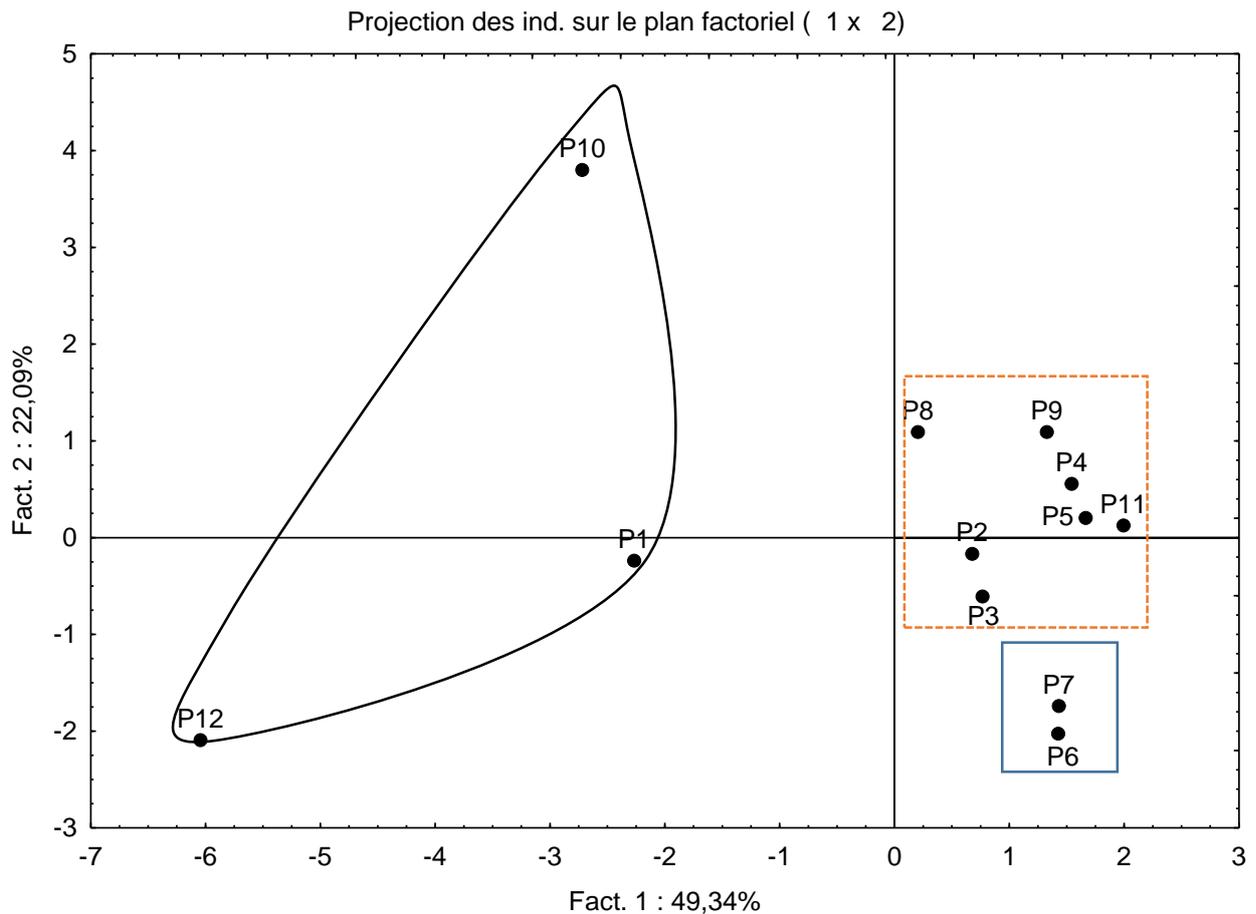


Figure 7 : Espace des individus sur le plan factoriel F1-F2

3-4-2. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) des eaux

La classification ascendante hiérarchique met en évidence deux grands regroupements des différentes variables (Figure 8A). Le premier regroupement contient les variables T, pH, As, Cr, Pb, Ni, Zn, Mn, Fe et Eh. Ces variables rendent compte d'une minéralisation d'origine naturelle des eaux. Le deuxième regroupement contient les paramètres tels que CE et Turb. Ces variables mettent en évidence une minéralisation d'origine anthropique. L'analyse du dendrogramme obtenue par la CAH en fonction de la distance d'agrégation montre que les eaux étudiées se classent en trois groupes (Figure 8B). Il s'agit des eaux riches en métaux (P1, P10 et P12) ; les eaux moyennement riches en métaux (P2, P3, P4, P5, P8, P9 et P11, P12) ; les eaux pauvres en métaux (P6 et P7).

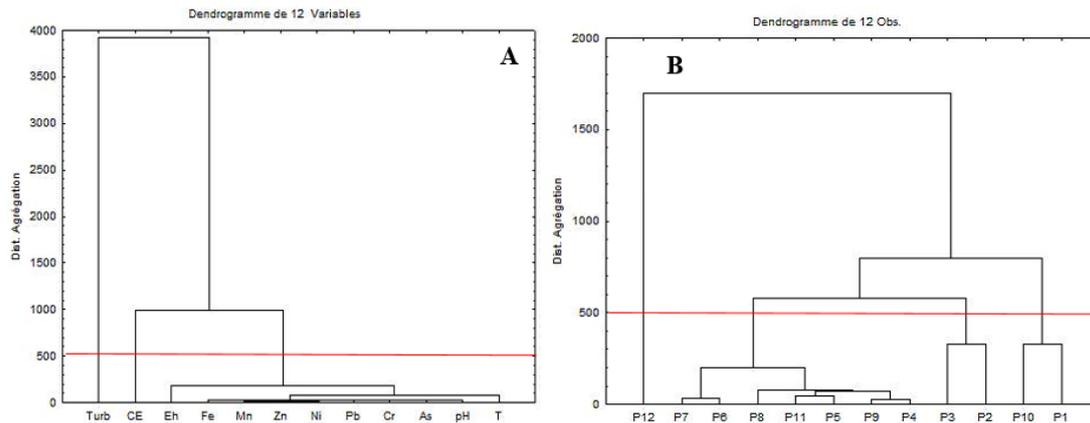


Figure 8 : A. Dendrogramme des variables. B. sites de prélèvements

4. Discussion

4-1. Caractéristiques physico-chimiques des eaux

La température des eaux de surface des sites miniers de Kokumbo varie de $25,2^{\circ}\text{C}$ à $32,4^{\circ}\text{C}$, avec une valeur moyenne de $29,04^{\circ}\text{C}$. Ces résultats montrent que ces eaux sont légèrement plus chaudes que celles environnements miniers du département de Divo et de la région de Afema où des températures moyennes respectives de 27°C et $26,7^{\circ}\text{C}$ ont été trouvées par [9, 23]. En effet, entre 10 et 30°C , la température n'a qu'un effet négligeable sur la mobilité des métaux [24]. Le pH des eaux varie de $6,78$ à $8,46$, avec une valeur moyenne de $7,48$ montrant que le pH des eaux est neutre. En effet, cette moyenne du pH montre que les eaux étudiées ne sont pas agressives. De plus dans une zone d'orpaillage le pH est l'un des facteurs naturels les plus importants contrôlant la mobilité des ETM à l'interface eau-sédiment et joue un rôle important dans l'adsorption des métaux. Une baisse de pH entraîne une augmentation drastique de la solubilité des ETM et de leur mobilité [25], un pH alcalin limite le passage des métaux de la phase solide à la phase aqueuse. Ces valeurs sont en concordance avec celles trouvées par [7- 9] dans les eaux de Hiré qui est une zone d'activité minière. La conductivité électrique varie de $67,8$ à $574 \mu\text{S/cm}$, avec une moyenne de $281,55 \mu\text{S/cm}$. Cela montre que les eaux sont moyennement minéralisées et ne contiennent pas assez de sels minéraux dissous. En effet, la minéralisation correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau. Ces conductivités électriques sont identiques à celles trouvées par [7] pour les eaux des sites miniers de Hiré. Les eaux de surface échantillonnées sont plutôt troubles, avec une moyenne de $716,55 \text{ NTU}$. Néanmoins les eaux des rivières bronzoué, kpossou, kplessou et du fleuve Bandama ont une turbidité faible comparativement aux eaux des sites d'orpaillage (extraction, traitement et cyanuration). Cette variation de la turbidité des eaux de surface de Kokumbo est liée aux activités d'orpaillage. [26] affirment que cette variation de la turbidité des eaux de surface pourrait être liée aux caractéristiques de la zone d'étude mais également à la pression anthropique autour des rivières.

4-2. Caractéristiques métalliques des eaux

En outre les teneurs moyennes des ETM, As ($0,011 \text{ mg/L}$), Cr ($0,011 \text{ mg/L}$), Pb ($0,013 \text{ mg/L}$) et Zn ($0,18 \text{ mg/L}$) sont inférieures au maximum acceptable dans les eaux de surface. Ces faibles niveaux peuvent s'expliquer par le fait que l'extraction de l'or n'induit pas une production élevée de ces ETM qui pourraient contaminer les eaux de surface. Ainsi, [7] ont montré que les eaux de surface de l'environnement minier aurifère de Hiré ne sont pas contaminées par ces métaux. Sur le site de traitement de minerai P12), la teneur est élevée de l'As ($0,056 \text{ mg/L}$) est due à la présence de l'arsenic dans le minerai d'or et dans les déchets miniers. Selon [27, 28]

les sources anthropiques de pollution des eaux par l'arsenic proviennent principalement de l'exploitation minière (or, cuivre, plomb, cobalt), de la combustion de combustibles fossiles et de l'incinération des déchets. Les teneurs moyennes de Fe (7,28 mg/L), Mn (1,62 mg/L) et Ni (0,13 mg/L) sont largement supérieures aux normes admises. Ces concentrations pourraient être liées à l'impact des différentes mines artisanales sur les ressources en eau. En effet, les fortes teneurs de Fe et Mn enregistrées sur la quasi-totalité des sites de prélèvement constituent un important souci environnemental. L'exploitation artisanale de l'or entraîne la mise en solution des éléments métalliques dans les eaux de surface. Les effluents riches en fer et en manganèse issus de ces activités sont déversés directement dans l'environnement. Le pH moyen et le potentiel redox moyen des eaux sont respectivement de 7,5 et de -40,19 mV. Selon [29] une baisse de pH entraîne une augmentation de la solubilité et une mobilité des métaux lourds et un potentiel redox réducteur augmentent la solubilisation ainsi que la disponibilité des ETM. Les études réalisées par [30] ont montré une contamination en Fer, Aluminium, Manganèse et Arsenic des rejets d'eau de la mine du Haut Beht dans la partie central du Maroc. En Colombie, les travaux de [31] ont mis en évidence l'impact de l'exploitation de l'or sur la qualité des eaux à Monterrey à travers un enrichissement des eaux en Cd, Hg et and cyanure. L'excès de Mn dans l'eau peut causer la cirrhose du foie chez l'homme. Toutefois l'inhalation est beaucoup plus dangereuse parce qu'elle génère des pneumonies, et si l'exposition est chronique il peut causer des problèmes neurologiques [32]. Dans la zone d'étude, les IC varient selon les métaux étudiés d'un site à l'autre. Les ICM de l'As, Cr, Pb et Zn sont inférieurs à 2, contrairement au Fe, Mn et au Ni qui présentent des ICM supérieurs à 2. Les valeurs élevées de ces indices traduisent une augmentation de la mobilité des éléments métalliques à partir du relargage, de la mobilisation et de la mise en suspension des métaux en milieu aquatique. L'ICMT montre que les sites d'orpaillage P1, P8, P9, P10 et P12 présentent une importante concentration en métaux.

4-3. Minéralisation des eaux

Les deux méthodes utilisées que sont l'Analyse en Composante Principale (ACP) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ont permis de montrer que la minéralisation des eaux de la zone d'étude présente deux pôles d'acquisition de la minéralisation que sont la minéralisation naturelle et anthropique (orpaillage). Selon l'ACP l'As, le Fe, le Pb et le Ni ont une origine naturelle dans les eaux. Cette minéralisation est liée à la géochimie des formations géologiques présentes dans la localité. Ces différentes roches sont régulièrement lessivées et transportées par les nombreux cours d'eau présents dans la zone de Kokumbo. L'arsenic présent dans les eaux est essentiellement d'origine géologique et donc naturel. De plus, les formations géologiques rencontrées dans la région sont essentiellement des formations magmatiques (schistes et granodiorites). En effet, l'origine géologique de la formation rocheuse riche en arsenic est une raison prédominante de contamination par l'arsenic des sols et de l'eau [33]. Quant à la minéralisation anthropique traduite par une forte CE et un enrichissement des eaux en Mn et Zn, est due aux apports superficiels liés à l'activité d'orpaillage. La forte minéralisation des eaux en milieu minier a été également mise en évidence en Côte d'Ivoire par les travaux de [8] dans les eaux de Hiré et de Yao, (2018) [23] dans les eaux de la mine de l'Afema.

5. Conclusion

L'étude a permis de déterminer le niveau de contamination des eaux de surface à proximité des sites d'extraction aurifère artisanale de Kokumbo en éléments traces métalliques et de l'origine de la contamination des eaux. Les eaux des sites miniers présentent un pH neutre et sont faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique moyenne de 281,55 μ S/cm. Elles sont fortement chargées, avec une turbidité moyenne de 716,55 NTU. La température moyenne des eaux est de 29,04°C. Les teneurs moyennes de Fe, Mn et du Ni sont largement supérieures à la norme fixée par l'OMS. Le calcul de l'indice de contamination (IC) montre une forte contamination en Fe, Mn et Ni sur les sites d'orpaillage P1, P8, P9, P10 et P12. L'étude

statistique a permis de mettre en évidence l'origine de la minéralisation en éléments métalliques des eaux. L'ACP a identifié une minéralisation d'origine naturelle pour le Fe et une influence des activités d'orpaillage dans l'enrichissement des eaux en Mn. La CAH a montré que la minéralisation des eaux de la zone d'étude est régie d'une part par un phénomène de minéralisation naturelle et d'autre part une contamination métallique consécutive aux apports superficiels liés aux activités anthropiques. Cette étude contribue à la connaissance des effets causés à l'environnement et des risques sanitaires liés à l'exploitation minière artisanale menée dans la localité de Kokumbo.

Références

- [1] - J. SANDLOS and A. KEELING, "Environmental Justice Goes Underground? Historical Notes from Canada's Northern Mining Frontier", *Environmental Justice*, 2 (3) (2009) 117 - 125
- [2] - K. J. NDELA, "Les activités minières et la fiscalité : Cas de la République Démocratique du Congo", Thèse de doctorat en Droit, Administration et Secteur Public. Université Paris I Panthéon - Sorbonne, (2008) 500 p.
- [3] - MINISTERE DE L'INDUSTRIE ET DES MINES, Programme national de rationalisation de l'orpaillage en Côte d'Ivoire (PNRO), (2013) 3 p.
- [4] - D. GOH, "L'exploitation artisanale de l'or en Côte d'Ivoire: La persistance d'une activité illégale", *European Scientific Journal*, 12 (3) (2016) 018 - 036
- [5] - E. WANDAN, G. KOFFI, K. KOUADIO and D. GOMBA, "Environmental evaluation of small-scale gold mining in the Bounkani region in the upper east area of Côte d'Ivoire", *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3 (5) (2015) 265 -274
- [6] - I. RAZO, L. CARRIZALES, J. CASTRO, F. DÍAZ-BARRIGA and M. MONROY, "Arsenic and heavy metal pollution of soil, water and sediments in a semi-arid climate mining area in Mexico", *Water Air Soil Pollution*, 152 (2004) 129 - 152
- [7] - S. LOKO, K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, N. F. KAKOU, A. M. KOUASSI and J. BIEMI, "Microbiological and physico-chemical quality of groundwater from artisanal sites of mining exploitation in the South-West of Côte d'Ivoire : case of the area of Hiré", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4 (9) (2013) 567 - 574
- [8] - Y. H. A. YAPI, B. K. DONGUI, A. TROKOUREY, Y. S. S. BARIMA, Y. ESSIS et P. ATHEBA, "Évaluation 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*, 8 (3) (2014) 1281 - 1289
- [9] - K. S. A. YAO et K. E. AHOUSI, "Caractérisation physico-chimique des eaux de surface dans un environnement minier du centre-ouest de la Côte d'Ivoire: Cas du département de Divo", *European Scientific Journal*, 16 (12) (2020) 293 - 315
- [10] - K. A. F. YAO, D. SALZE, M. LOPEZ-FERBER, T. LASM and O. BELCOURT, "Impact of an Abandoned Mine on Surrounding Soils, Surface Water and Stream Sediment: Case of SOMIAF Gold Mine, Côte d'Ivoire", *International Journal of Environmental Science and Development*, 8 (2017) 323 - 343
- [11] - K. AGYARKO, E. DARTEY, A. R. KUFFOUR and A. P. SARKODIE, "Assessment of Trace Elements Levels in Sediment and Water in Some Artisanal and Small-Scale Mining (ASM) Localities in Ghana", *Current World Environment*, 9 (2014) 7 - 16
- [12] - INSTITUT NATIONALE DE LA STATISTIQUE, "Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) : Données socio démographiques et économiques, Région du Bélier", (2014) 031 - 060
- [13] - J. P. CHAUVEAU, "Les cadres socio-historiques de la production dans la région de Kokumbo (pays Baoulé, Côte d'Ivoire)", *Cahier ORSTOM sciences humaines, Bondy (France)*, 7 (1979) 143 p.
- [14] - A. PERRAUD, J. M. AVENARD, E. EL DIN, G. GIRARD, J. SIRCOULON, P. TOUCHEBEUF, J.-L. GUILLAUMET et E. ADJANOHOUN, "Les sols. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire", *Mémoires ORSTOM*, 50 (1971) 263 - 327

- [15] - Y. A. N'GO, D. L. GONE, I. SAVANE et M. M. GOBLE, "Potentialités en eaux souterraines des aquifères de la région d'Agboville (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique", *Afrique science*, 1 (2005) 127 - 144
- [16] - K. A. YAO, A. M. KOUASSI, Y. B. KOFFI et J. BIEMI, "Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire)", *Journal of environmental hydrology*, 18 (2010) 455 - 470
- [17] - D. B. YAO, "Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fêtêkro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest africain". Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, (1998) 190 p.
- [18] - J. RODIER, "L'analyse de l'eau", 8^{ème} édition, paris, (1996) 1394 p.
- [19] - OMS, "Guidelines for Drinking-water Quality". *Recommendations, Fourth Edition*, (2011) 518 p.
- [20] - A. R. ROUSSEAU, A. NAVARO et P. VERMANDE, "Tribune de l'eau", (1991) 017 - 025
- [21] - B. NASRI, A. BENATIALLAH, S. KALLOUM et M. BENHAMZA, "Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la région de kenadsa et Galbelaouda (sud - ouest de l'Algérie)", *Algerian Journal of Environmental Science and Technology*, 4 (2018) 082 - 093
- [22] - M. T. GUILLEN, J. DELGADO, S. ALBANESE, J. M. JOSE MIGUEL NIETO, A. LIMA and B. DE VIVO, "Heavy metals fractionation and multivariate statistical technical to evaluate the environmental risk in soils of Huelva Township (SW Iberian Peninsula)", *Journal of Geochemical Exploration*, 119 (2012) 032 - 043
- [23] - K. A. F. YAO, "Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive : cas de la mine d'or d'Afema (Sud-est de la Côte d'Ivoire)". Thèse de doctorat, Université de Montpellier, France, (2018) 210 p.
- [24] - B. SERPEAUD, R. AL-SHUKRY, M. CASTEIGNEAU et G. MATEJKA, "Adsorption des métaux (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d'un cours d'eau, rôle du pH, de la température et de la composition des sédiments", *Revue des Sciences de l'Eau*, 7 (1994) 343 - 365
- [25] - I. THORNTON, "Risk assessment related to metals: the role of the geochemist", Report of the International Workshop on Risk Assessment of Metals and their Inorganic Compounds, *International Council on Metals and the Environment*, Angers, France, (1996)
- [26] - O. KAMBIRE, A. A. ADINGRA, S. G. EBLIN, N. AKA, A. C. KAKOU et R. KOFFI-NEVRY, "Caractéristiques des eaux d'une lagune Estuarienne de la Côte : la lagune Aby", *Larhyss Journal*, 20 (2014) 095 - 110
- [27] - S. WANG and C. MULLIGAN, "Effect of natural organic matter on arsenic release from soils and sediments into groundwater", *Environmental Geochemistry and Health*, 28 (2006) 197 - 214
- [28] - S. WANG and C. Mulligan, "Effect of natural organic matter on arsenic mobilization from mine tailings", *Journal of Hazardous Materials*, 168 (2009) 721 - 726
- [29] - M. SALVARREDY, "Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers : Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique". Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, (2008) 379 p.
- [30] - M. EL FAHEM, A. BENZAOUAK, H. ZOUITEN, A. SERGHINI and M. FEKHAOUI, "Hydrogeochemical assessment of mine water discharges from mining activity. Case of the Haut Beht mine (central Morocco)", *AIMS Environmental Science*, 8 (1) (2021) 60 - 85. DOI: 10.3934/environsci.2021005
- [31] - A. MARTIN, J. ARIAS, J. LOPEZ, L. SANTOS, C. VENEGAS, M. DUARTE, A. ORTIZ-ARDILA, N. DE PARRA, C. CAMPOS and C. CELIS ZAMBRANO, "Evaluation of the Effect of Gold Mining on the Water Quality in Monterrey, Bolívar (Colombia)", *Water*, 12 (2020) 2523
- [32] - G. S. PLUMLEE and T. L. ZIEGLER, "The medical geochemistry of dust, soils and other earth materials". In: B.S. Lollar (Ed.), *Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, (2003) 264 - 310
- [33] - P. L. SMEDLEY and D. G. KINNIBURGH, "A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters", *Applied Geochemistry*, 17 (2002) 517 - 568