

NIVEAU DE CONTAMINATION DES EAUX DE SURFACE ET SOUTERRAINE PAR L'ACTIVITE D'ORPAILLAGE DANS LE DEPARTEMENT DE BOCANDA (CENTRE-EST DE LA COTE D'IVOIRE)

Koffi Claude M'BRA

*Docteur en Géographie,
mbrak.officlaude@gmail.com*

Kopeh Jean-Louis ASSI

*Assistant, Université Jean Lorougnon Guédé de Daloa (Côte d'Ivoire)
askocope@yahoo.fr*

Anne Marilyse KOUADIO

*Maître de Conférences, École Normale Supérieure d'Abidjan-ENS (Côte d'Ivoire)
kamarilyse@yahoo.fr*

Résumé

L'orpaillage est une activité qui perturbe les systèmes écologiques du département de Bocanda singulièrement les ressources en eau. L'objectif de cette étude est d'évaluer le niveau de contamination des eaux souterraines et de surface et de leurs sédiments par les activités d'orpaillage à travers l'étude de la physico-chimie. Ainsi, pour répondre à cet objectif, l'analyse physicochimique des échantillons d'eau et de sédiment ont été réalisées en laboratoire. L'analyse chimique montre la présence des éléments de traces métalliques dans les eaux et les sédiments, mais les concentrations des métaux lourds dans les sédiments sont plus fortes que celles des eaux. L'Analyse en Composante Principale (ACP) révèle une minéralisation naturelle et anthropique des eaux proches des sites d'orpaillage par des métaux lourds. La minéralisation anthropique est surtout liée au lavage et traitement du minerai et au rejet des déchets aurifères, des huiles de moteurs et des vidanges dans les eaux. L'acidité du pH dans les eaux augmente la mobilisation des substances toxiques telles que les métaux lourds dans les eaux.

Mots clés : *Bocanda-Côte d'Ivoire, orpaillage, systèmes écologiques, qualité des eaux, ACP*

Abstract

Gold panning is an activity that disrupts the ecological systems of the department of Bocanda singularly the water resources. The objective of this study is to assess the level of contamination of groundwater and surface water and their sediments by gold panning activities through the study of physico-chemistry. Thus, to meet this objective, the physicochemical analysis of water and sediment samples was carried out in the laboratory. Chemical analysis shows the presence of metallic trace elements in water and sediment, but the concentrations of heavy metals in sediments are higher than those in waters. The Principal Component

Analysis (PCA) reveals a natural and anthropogenic mineralization of the waters near the gold panning sites by heavy metals. Anthropogenic mineralization is mainly related to the washing and processing of ore and the release of gold waste, engine oils and oil changes into water. The acidity of the pH in the waters increases the mobilization of toxic substances such as heavy metals in the waters.

Keywords: Bocanda-Côte d'Ivoire, gold panning, ecological systems, water quality, ACP

Introduction

L'activité d'orpaillage, appelée communément l'exploitation artisanale de l'or de type légal et illégal, constitue une réalité incontournable en Côte d'Ivoire dans ces dernières décennies. Commencée timidement au début de la seconde moitié du 18^{ème} siècle (J. Gaston cité par Gôh.D, 2016, p 19), l'exploitation aurifère a connu un essor dans les zones rurales depuis la période des crises sociopolitiques de 2002 à 2011 (M. Alan et al, 2017, p.10). Cette activité influence les systèmes écologiques dont les ressources en eau. Celles-ci qui ont été toujours considérées dans l'antiquité comme une source renouvelable et inépuisable (Mabonzo, 2020 p.2) sont aujourd'hui victimes de l'épuisement dû aux activités anthropiques notamment l'orpaillage. Plusieurs localités de la Côte d'Ivoire subissent la dégradation de leurs ressources en eau parmi lesquelles se situe le département de Bocanda. Ancienne zone de production du café-cacao des années 1950-1970, il a bénéficié grâce à sa proximité de la boucle de cacao (Dimbokro) de quelques équipements et l'ouverture des axes routiers. Mais, suite au déclin de ces produits agricoles à partir des années 1980, les populations de Bocanda se sont appauvries. Ainsi, dans la quête d'une activité de substitution, les populations de Bocanda se tournent vers l'activité d'orpaillage depuis 2015. L'orpaillage est une opportunité pour des populations de Bocanda dont la majorité vit en dessous du seuil de la pauvreté avec un per capita de 43 428 FCFA (M. Y. Gninrin et al, 2017, p.2). Il accroît l'autonomie financière des personnes qui s'adonnent à cette activité et fourni les revenus aux populations vivant à proximité des lieux d'extraction. Cependant, les attentes de ces populations à la recherche de vie garantie avec l'orpaillage ne sont pas comblées. La prolifération des sites d'orpaillages et les réalités qu'elles présentent suscitent des inquiétudes notamment au niveau de la qualité des eaux de surfaces et souterraine à proximité des sites d'orpaillage qui sont difficilement utilisables pour

l'alimentation en eau potable. La présente étude vise donc à évaluer le niveau de contamination des eaux de surface et souterraines par les activités d'orpaillage à travers un examen physico-chimique de leur teneur dans une perspective de contribution à la préservation des ressources en eau et à la protection de l'écosystème aquatique et la vie des populations locales.

1. Méthodologie

1.1. Présentation de l'espace d'étude

Le département de Bocanda est situé au Centre-Est de la Côte d'Ivoire précisément dans la région du N'Zi. Il est limité au nord par le département de M'Bahiakro, au sud par Dimbokro, à l'est par Daoukro et à l'ouest par le département de Didiévi. Le département de Bocanda comprend quatre (4) sous-préfectures à savoir : Bocanda, Bangassou, N'zècrèzessou et Kouadioblékro (Figure 1).

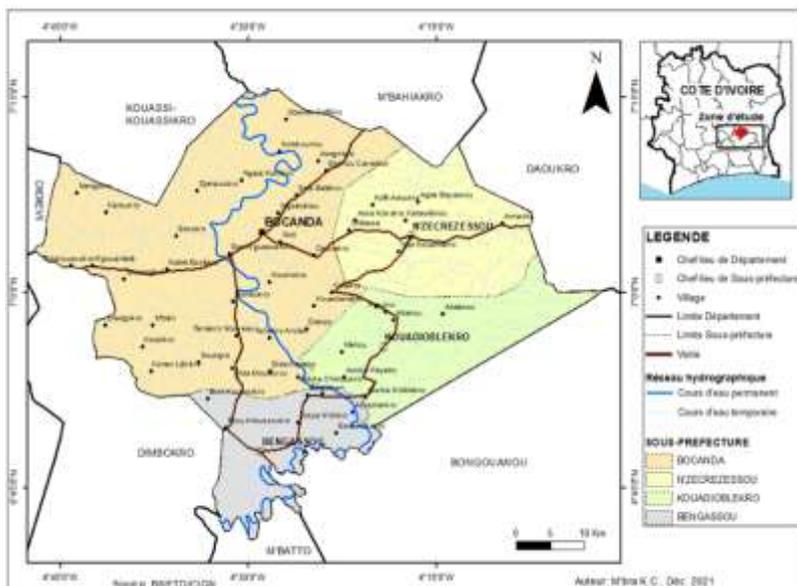


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

C'est le département le plus vaste et le plus peuplé de la région du N'Zi avec une population estimée à 129.910 habitants (INS, 2014) répartie sur 2820 km² entre 105 villages. Bocanda signifie dans l'ethnie Baoulé, une sous-composante du groupe Akan, « deux collines », ce qui exprime la prééminence toponymique de la ville de coincer entre deux collines. L'une appelée « Oka-tidjè » qui signifie en langue Baoulé colline aux cheveux de couleur blanche. Cette appellation selon les autorités coutumières s'explique par le fait que toutes les plantes et les herbes qui poussent sur cette colline sont de couleurs blanches, même pendant la saison des pluies. L'autre colline est appelée « Oka-oussou » qui signifie colline génie évidemment en langue Baoulé. Le climat est de type tropical humide. Il comprend quatre saisons : deux saisons sèches et deux saisons de pluies. La zone d'étude est formée de deux grands ensembles dont : un domaine granito gneissique, sédimentaire et surtout de schistes. Le réseau hydrographique est essentiellement constitué du N'Zi qui borde les fleuves Comoé et Bandama. On y trouve aussi des rivières. Le département de Bocanda est une zone de transition entre la forêt et la savane.

1.2. Échantillonnage de l'étude

Cette étude s'est effectuée dans 04 localités à savoir les localités de Koliakro, d'Assika-kayabo, de Bengassou et de Brou-Ahousoukro comme le montre la figure 2. Les localités de Koliakro et d'Assika-kayabo ont été retenues du fait de l'ampleur du phénomène d'orpaillage dans ces localités. Le village de Bengassou a été choisi dans cette étude dans la mesure où il abrite le seul site légal dans le département. Dans la localité de Brou-Ahousoukro où il a été prélevé l'échantillon du marigot témoin, on y trouve peu de site d'orpaillage.

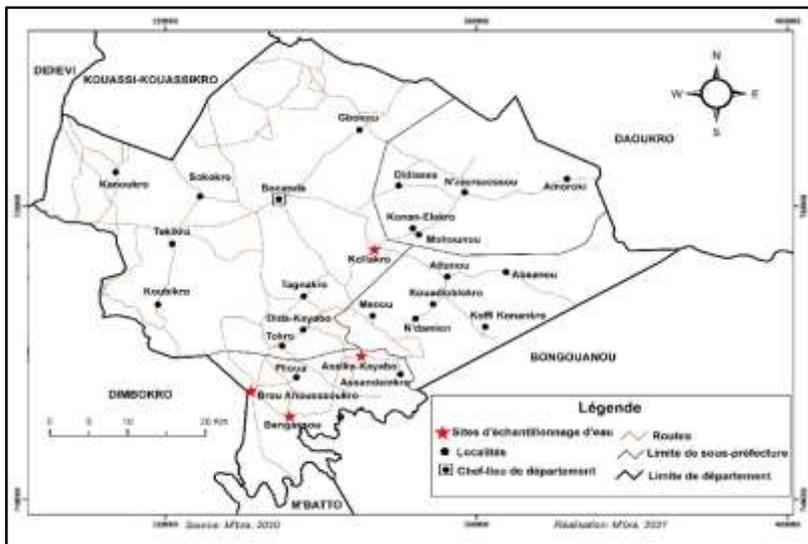


Figure 2 : Zone de prélèvement des échantillons d'eau et de sédiment dans le département de Bocanda.

2. 1. Échantillon d'eau

Le prélèvement d'échantillon d'eau s'est effectué sur 4 stations :
 La première station est l'eau du forage du site légal utilisée pour le lavage du minerais. Cette eau de source souterraine sert de breuvage pour les travailleurs et pour toutes les personnes visitant ce site (Planche1). Ce forage est localisé en aval de la zone de lavage. Ce qui signifie qu'il est drainé par les produits chimiques et le carburant des machines.



Planche : Forage du site légal de Bengassou (Prise de vue : M’Bra, 2021)

La seconde station est celle du fleuve N’Zi situé en aval d’un site de lavage des orpailleurs illégaux. (Photo 1). Ce site de lavage du minerai accueille les orpailleurs de différents villages où l’eau s’obtient difficilement. L’eau du fleuve aspirée par les motopompes et piégée pour le lavage du minerai retombe dans même le fleuve.



Photo 1: Le fleuve N’Zi drainé par l’eau issu des activités de l’orpaillage illégal à Assika-kayabo (Prise de vue : M’Bra, 2021)

La troisième station est un marigot situé dans la sous-préfecture de Koliakro intervenant dans l’exploitation aurifère illicite. (Photo 2). L’eau de ce marigot est perturbée par les motopompes qui l’aspirent vers les sites les plus proches.



Photo 2: Eau du marigot de Koliakro ; Prise de vue : M'Bra, 2021

La quatrième station est une eau qui ne subit pas l'effet de l'orpaillage. Elle est située dans le village de Brou-Ahoussoukro environ 5 km d'un site aurifère afin de connaître l'ampleur du phénomène et analyser le niveau de transformation des eaux intervenant dans l'orpaillage dans le département de Bocanda (Photo 3)



Photo 3: Marigot témoin à Brou-Ahoussoukro (Prise de vue : M'Bra, 2021)

Les eaux et leurs sédiments respectifs ont été prélevés au même moment. Sauf le sédiment du forage qui n'a pas été prélevé. Les échantillons d'eau destinés aux analyses ont été recueillis dans des bouteilles en plastique. Sur les bouteilles d'eau ont été numérotés E1 à E4, ce qui veut dire eau 1 à eau 4.

1.2.2. Échantillon de sédiment d'eau

Le prélèvement des échantillons de sédiment s'est déroulé sur les trois eaux de surfaces préalablement définies. C'est-à-dire le sédiment de l'eau

du fleuve N'Zi, le sédiment du marigot de Koliakro qui intervient dans le lavage du minerai et les sédiments de la rivière témoin. Les échantillons des sédiments d'eau ont été prélevés dans le fond des cours d'eau et mis dans les bouteilles de plastiques généralement plus petites que celles de prélèvement d'eau. Sur les bouteilles ont été mentionnées S1 à S3, ce qui signifie sédiment 1 à sédiment 3.

1.3. Traitement des données physico-chimiques par l'Analyse en Composante Principale (ACP)

Les analyses d'échantillons des eaux (de surface et souterraine) et les sédiments prélevés ont été réalisées au laboratoire Centre Ivoirien Antipollution (CIAPOL) pour les paramètres physico chimiques. Plusieurs méthodes ont été utilisées par l'analyse. En effet, Pour le pH des échantillons d'eau, le NFT 90-008 a été utilisé. Le ISO7888 pour la conductivité, le ISO1483 pour le mercure, la method HACH pour le cyanure et NFENISO11885 pour le Zinc, le Fer, le Plomb ; l'Arsenic, le Cadmium et le cuivre. Pour les sédiments des eaux, le pH a été analysé par ISO10390. La méthode ISO16772 pour le mercure, ISO 9013AMethod HACH 8027 pour le cyanure et Digestion Acid NFENISO11885 pour le Zinc, le Fer, le Plomb ; l'Arsenic, le Cadmium et le Cuivre. Ces méthodes ont permis de situer le niveau de teneur des eaux en métaux lourds et en cyanure.

Les paramètres physicochimiques dosés ont subi une analyse statistique. Cette approche statistique repose sur l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des variables centrées réduites. Son objectif est de repérer les groupes d'individus semblables vis-à-vis de l'ensemble des variables ; relever des différences entre individus ou groupes d'individus relativement à l'ensemble des variables ; mettre en évidence des individus dont les comportements sont atypiques vis-à-vis de l'ensemble des variables ; rechercher si l'information contenue dans le tableau brut ne pourrait pas être obtenue avec un nombre plus petit de variables, ces dernières pourraient être différentes des variables d'origine (E. Esso, 2021). L'ACP met en évidence les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation (Mabonzo, 2020). Dans cette étude, le logiciel STATISTICA qui comprend des procédures généralistes pour les statistiques, les graphiques et la gestion analytique des données a été

utilisé pour faire l'ACP, afin de connaître l'origine de la minéralisation des eaux du département de Bocanda. Ainsi, deux Analyses en Composantes Principales ont été effectuées avec le logiciel STATISTICA :

-La première Analyse en Composantes Principales a été faite sur les concentrations des paramètres physicochimiques des échantillons d'eau prélevés.

-La seconde Analyse en Composantes Principales a été effectuée pour mettre en exergue les concentrations des paramètres physicochimiques dans les sédiments des eaux de surface.

2. Résultats

2.1. Niveau de pollution des eaux et de sédiments d'eau étudiés dans le département de Bocanda

2.1.1. L'orpaillage, un facteur dégradant de la qualité des eaux

Les résultats de l'examen des paramètres physico chimiques ont été comparés aux normes de potabilité mises en place par l'OMS en 2006. Les résultats de l'analyse laboratoire des échantillons d'eau sont consignés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Comparaison entre les paramètres physico-chimiques des eaux et les normes de l'OMS

Paramètres	Unités	Résultats				Normes OMS 2006
		Eau de forage	Eau du N'Zi	Marigot	Marigot témoin	
Ph à 20°C	-	6,44	6,22	6,50	6,71	[6,5 et 9,5]
Conductivité		139,9	1342	298	512	
Arsenic (As)	µg/L	11,8	15,2	4,55	2,15	10
Cadmium (Cd)	µg/L	0,49	0,34	0,45	0,17	50
Cuivre (Cu)	µg/L	2950	1540	660	550	2000
Fer (Fe)	µg/L	5700	1930	220	60	300
Plomb (Pb)	µg/L	4,74	2,62	4,31	2,63	10

Zinc (Zn)	µg/L	1880	1960	1980	1870	3000
Mercure (Hg)	µg/L	0,07	0,09	0,06	0,04	10
Cyanure (CN)	µg/L	1	2	2	0	70

Source : CIAPOL, 2021

Le tableau 1 indique que les résultats des paramètres physico chimiques des eaux étudiées sont variés. Le potentiel hydrogène pH varie entre 6,22 µg/L et 6,71 µg/L avec une moyenne de 6,59 µg/L. La conductivité électrique varie entre 139,9 µS.cm et 1342µS.cm. Le fleuve N’Zi concentre la forte conductivité électrique soit 1342µS.cm et la plus faible concentration dans le forage avec 139,9 µS.cm. Les valeurs de l’arsenic varient entre 2,15 µg/L et 15,2 µg/L et dont le fleuve N’Zi a la plus forte concentration et le marigot témoin la plus faible concentration. Les concentrations du cadmium varient entre 0,17 µg/L et 0,49 µg/L La plus forte concentration s’observe dans le forage et le marigot témoin enregistre la plus faible concentration. Le cuivre présente une concentration qui varie entre 550 et 2950. La forte concentration est représentée dans le forage et la plus faible dans le marigot témoin. Les valeurs du Plomb sont comprises entre 2,62 µg/L et 4,74 µg/L. La valeur la plus faible représentée par le N’Zi avec 262 µg/L et la plus forte dans le forage avec 4,74 µg/L. La concentration du Zinc est comprise entre 1870 µg/L et 1980 µg/L. La valeur la plus faible est représentée dans l’eau témoin et la valeur plus forte dans le forage. Le Zinc des eaux varie entre 1870 µg/L et 1980 µg/L. La concentration du mercure est comprise entre 0,04 µg/L et 0,09 µg/L. Le marigot témoin enregistre la plus faible concentration en mercure tandis que le fleuve N’Zi la plus forte concentration. Le cyanure occupe les plus faibles concentrations dans les eaux. Les plus fortes concentrations sont enregistrées dans le fleuve N’Zi. Le marigot témoin n’enregistre pas de valeur en cyanure.

Il ressort de ce tableau, la présence des paramètres physico chimiques étudiés dans les eaux de surface et souterraine dans le département de Bocanda. Cependant, conformément à la norme de l’OMS en matière de potabilité des eaux, le tableau révèle que certaines eaux présentent des paramètres supérieurs à ceux de l’eau non polluée et d’autres des paramètres inférieurs à ceux de l’eau polluée. La pollution des eaux dans l’ensemble ne suscite pas de très grande préoccupation en termes de

pollution selon les normes de l’OMS. Cela s’explique par le fait que l’activité d’orpaillage est récente dans la zone. La concentration d’éléments physicochimiques dans les eaux de lavage des minerais ou qui sont présentes à proximité des aires de lavage à savoir le forage, l’eau du fleuve N’Zi ainsi que l’eau du marigot enregistrent les valeurs les plus grandes que celles de l’eau du marigot témoin. Ce qui justifie la provenance anthropique des polluants dans les eaux. Ces éléments chimiques sont liés à l’orpaillage.

2.1.2. La pollution des sédiments d’eau par l’activité aurifère

L’état de la pollution des sédiments par les métaux lourds a été donné en comparant les résultats obtenus aux concentrations des métaux lourds dans les sédiments non pollués à ceux de GESAMP (Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Pollution). Les résultats d’analyse laboratoire des sédiments sont consignés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Comparaison entre les paramètres physico-chimiques des sédiments et des normes du GESAMP

Paramètres	Unités	Résultats			Normes GESAMP
		Fleuve du N’Zi	Marigot	Marigot témoin	
pH à 20°C	-	6,20	6,25	6,54	ND
Arsenic (As)	mg/kg	6,38	11,87	2,44	ND
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,24	0,52	0,36	0,1
Cuivre (Cu)	mg/kg	753,30	1154,22	461,79	33
Fer (Fe)	mg/kg	872,03	1626,86	210,96	41000
Plomb (Pb)	mg/kg	0,93	0,77	0,21	19
Zinc (Zn)	mg/kg	233,50	440,29	292,35	95
Mercure (Hg)	mg/kg	0,001	0,001	0,00	0,05 et 0,3
Cyanure (CN)	mg/kg	0,005	0,007	0,004	ND

Source : CLAPOL, 2021

Le tableau 2 montre la présence des paramètres physicochimiques analysés dans les sédiments des eaux. Le pH des sédiments des eaux étudiées est compris entre 6,20 et 6,25. Le sédiment de l'eau témoin présente la plus forte concentration et le sédiment du fleuve N'Zi à la faible concentration en pH. Les valeurs de l'Arsenic dans les sédiments sont comprises entre 2,44 mg/kg et 11,87 mg/kg. Le sédiment du marigot témoin à la plus faible concentration et le sédiment de l'eau de marigot de lavage à la plus grande valeur. Les valeurs du Cadmium sont comprises entre 0,24 mg/kg et 0,52 mg/kg. La plus grande valeur se trouve dans les sédiments du marigot utilisé pour le lavage et la plus faible concentration dans l'eau du N'Zi. La concentration du Cuivre dans les sédiments est comprise entre 471,79 mg/kg et 1154,22 mg/kg. La plus grande valeur se trouve dans les sédiments du marigot de lavage et la plus petite valeur dans le marigot témoin. Les valeurs du Fer est comprises entre 210,96 mg/kg et 1626,86 mg/kg. La plus grande concentration du Fer dans le N'Zi et la plus faible dans le marigot témoin. Le Plomb est présent dans les sédiments avec 0,21 mg/kg. La concentration la plus faible est visible dans le marigot témoin et la concentration la plus forte dans le fleuve N'Zi soit 0,93 mg/kg. Le Zinc concentre les valeurs comprises entre 233,50 mg/kg et 292,35 mg/kg. La concentration la plus forte s'observe dans l'eau du marigot de lavage et la plus faible concentration dans le fleuve N'Zi. Le Mercure est quasiment absent dans les sédiments. Il est légèrement présent dans le fleuve N'Zi 0,001 et dans le marigot de traitement de minerai 0,001. Le marigot témoin ne présente aucune valeur mercurielle. La valeur du cyanure est comprise 0,004 mg/kg et 0,007 mg/kg.

Les concentrations en gras sont celles dont la valeur est supérieure à la norme des sédiments d'eaux intérieures élaborée par le GESAMP en 1982, mise à jour par Salomons et Förstner en 1984 citée par (Traoré et al, D Y. Koffi). En effet, le tableau montre que dans le département de Bocanda la pollution des sédiments d'eau ne suscite pas de très grande préoccupation en termes de pollution selon les normes du GESAMP. Bien que les sédiments concentrent des polluants, c'est dans trois d'entre eux en l'occurrence le Zinc, le cuivre et le cadmium qui concentrent des valeurs supérieures à celles des sédiments non pollués. Comme les échantillons d'eau, l'analyse des échantillons de sédiment d'eau montre que le marigot témoin a des teneurs les plus faibles en métaux lourds

contrairement aux autres échantillons d'eau. Ce qui explique l'enrichissement anthropique des polluants notamment des métaux lourds par les eaux situées à proximité des sites d'orpaillage.

2.2. Analyse en Composantes Principales des eaux

2.2.1. Analyse de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation qui présente les corrélations entre les variables deux à deux, est donnée par le tableau 3 ci-dessous. L'analyse de ce tableau montre qu'il existe de très fortes corrélations entre pH et Hg (-1,00) et As (-0,93). Il y a également de très bonnes corrélations entre As et Hg (0,95), CN et Zn (0,92). Cd est également bien corrélé avec Pb (0,87). À un degré moindre, de bonnes liaisons sont observées entre pH et CN (-0,79), CE et Pb (0,79), Hg et CN (0,75). Par ailleurs, de moyennes corrélations sont notées entre pH et CE (-0,61), As et Fe (0,65), Cd et CN (0,63), Cu (0,62) et Fe (0,61).

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables dans les eaux

	pH	CE	As	Cd	Pb	Hg	CN	Zn	Cu	Fe
pH	1,00									
CE	-0,61	1,00								
As	-0,93	0,51	1,0							
Cd	0,48	0,38	0,4	1,0						
Pb	0,00	0,79	0,0	0,8	1,0					
Hg	-1,00	0,58	0,9	0,5	0,0	1,0				
C	-0,79	0,36	0,5	0,6	0,2	0,7	1,0			
N	0,79		2	3	3	5	0			
Zn	0,56	0,40	0,2	0,3	0,0	0,5	0,9	1,0		
			1	7	4	0	2	0		

Cu	-	-	0,7	0,6	0,5	0,5	0,0	-	1,0	
	0,46	0,20	1	2	2	2	7	0,3	0	
								2		
Fe	-	-	0,6	0,6	0,5	0,4	0,0	-	1,0	1,0
	0,39	0,28	5	1	6	5	2	0,3	0	0
								7		

2.2.1.1. Valeurs propres

Les valeurs propres et les différents pourcentages exprimés par les deux premiers facteurs sont consignés dans le tableau 4. L'analyse de ce tableau montre que les facteurs 1 et 2 expriment respectivement 49,91% et 31,79% de la variance totale. L'ensemble de ces deux facteurs expriment 81,70% de la variance totale. Ce taux contient donc le maximum d'informations qui devrait permettre à expliquer le mécanisme à l'origine des différents paramètres dans les eaux.

Toutefois, les différents vecteurs propres de corrélation entre les variables sont donnés par le tableau 4.

Tableau 1: Répartition de l'inertie des variables entre les axes F1 et F2 dans les eaux

	F1	F2
Valeurs propres	4,991	3,179
% de variance exprimée	49,914	31,791
% de variance exprimée cumulée	49,914	81,705

2.2.1.2. Projection des variables dans le plan factoriel F1 – F2

Dans le plan factoriel F1 – F2 (Figure 3), F1 est déterminé dans sa partie positive par pH. Il est déterminé dans sa partie négative par les variables : As, Hg, Cd, CN et à un degré moindre Cu. Le facteur 1 représente une minéralisation anthropique des eaux Le facteur 2 (F2), est mis en relief par les variables CE et à un degré moindre Pb et Fe. Le facteur 1 représente une minéralisation naturelle des eaux. (Figure 3)

2.3. Analyse en Composantes Principales des sédiments

Dans les eaux, le Fe corrélé à Cu et Pl et le Zn lié à CE expriment une minéralisation anthropique. Ces métaux lourds en l'occurrence Pl et le Fe sont les éléments naturels de référence dans milieu, mais les huiles de moteur, les carburants et les déchets ménagers sur les sites augmentent la valeur de ces métaux dans l'eau. Par contre le Cd corrélé au Hg, CN, As expriment une minéralisation naturelle.

2.3.1. Analyse de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation des sédiments des eaux présente les corrélations entre les variables deux à deux comme celle de l'eau. Cela se perçoit dans le tableau 5. L'analyse de ce tableau révèle qu'il existe une très forte corrélation entre Pb et Hg (0,98), Ces deux éléments sont encore corrélés ; Pb (-1,00) et Hg (-0,99), De très fortes corrélations existent entre CN et Cu (1,00), entre CN et As (1,00), entre As et Cu (1,00), As et Fe (1,00), Cu et Fe (1,00) ; Cu (1,00). Une très bonne corrélation s'observe entre Fe (0,99), Cd et Zn (0,99). De fortes corrélations s'entrevoient entre Fe et Hg (0,85). Une corrélation existe également entre Hg et Cu (0,82). De bonnes liaisons se font entre Ph et Fe (-0,77), As et Cu (-0,73). Une corrélation se fait entre Zn et Cu (0,76). Zn est également Corrélé avec Fe (0,72). Des liens non négligeables se perçoivent entre Fe et Pb (0,71), Cu et Pb (0,68). As est corrélé à Pb (0,67) et à Cd (0,65), CN et Pb (0,60), Cd est corrélé à As (0,65) et à Cu (0,64).

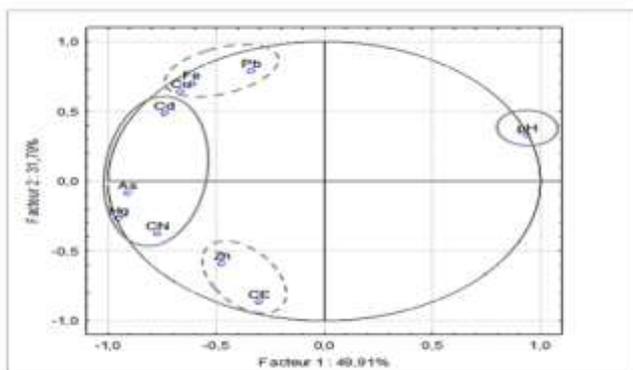


Tableau 5 : Matrice de corrélation entre les variables dans les sédiments d'eau

	pH	As	Cd	Pb	Hg	CN	Zn	Cu	Fe
Ph	1,00								
As	-	1,00							
	0,73								
Cd	0,05	0,65	1,00						
Pb	-	0,67	-	1,00					
	1,00		0,13						
Hg	-	0,82	0,08	0,98	1,00				
	0,99								
CN	-	1,00	0,72	0,60	0,76	1,00			
	0,66								
Zn	-	0,76	0,99	0,03	0,24	0,82	1,00		
	0,11								
Cu	-	1,00	0,64	0,68	0,82	1,00	0,76	1,0	
	0,73							0	
Fe	-	1,00	0,60	0,71	0,85	0,99	0,72	1,0	1,0
	0,77							0	0

2.3.2. Valeurs

Tableau 2: Facteurs de corrélation entre les variables et les facteurs 1 et 2

Valeurs propres	6,67	2,33
% de variance exprimée	74,16	25,84
% de variance exprimée cumulée	74,16	100,00

Les valeurs propres et les différents pourcentages exprimés par les deux premiers facteurs sont consignés dans le tableau 5. L'analyse de ce tableau montre que les facteurs 1 et 2 expriment respectivement 74,16% et 25,84% de la variance totale. Ces facteurs cumulent une variance totale de 100% et se joignent au tableau 6 pour expliquer l'origine des paramètres dans les sédiments (Figure 4).

2.3.3. Projection des variables dans le plan factoriel F1 – F2

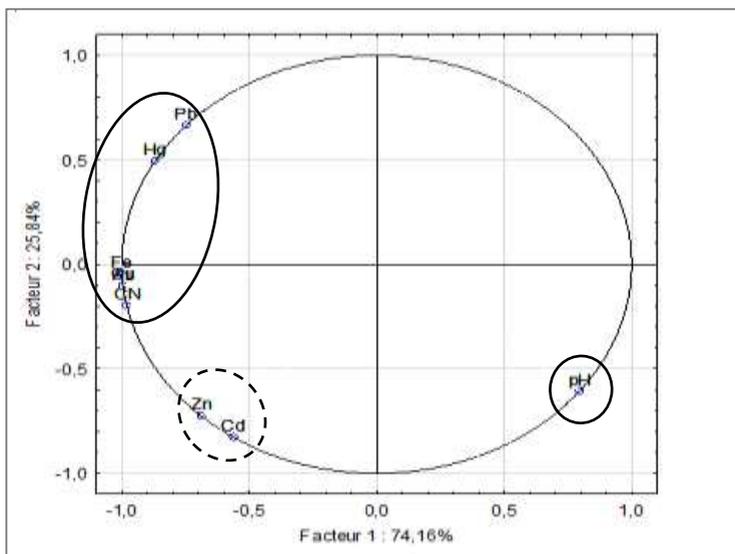


Figure 4 : Cercle de communauté du plan factoriel F1 – F2 pour les sédiments d'eau

Dans les sédiments des eaux, le Pb corrélé à Hg, Fe, As, CN expriment une minéralisation naturelle. Ce qui signifie que les métaux lourds dans les sédiments sont en grandes majorité d'origine naturelle. Cela s'explique par le fait que l'activité commencée en 2015 est encore récente dans cette zone. Par contre le Zn corrélé à Cd exprime une origine anthropique dans le sédiment des eaux étudiées.

Discussion

Les analyses des eaux et des sédiments des eaux de surface et souterraine proches des sites d'orpaillage dans le département de Bocanda ont révélé la présence effective des polluants chimiques dans ces milieux. Les eaux deviennent de plus en plus impropres à la consommation pour les populations riveraines. En effet, le pH des eaux et des sédiments d'eaux

analysées sont des pH faibles (eaux acides). L'acidité du pH augmente notamment le risque de présence des métaux sous une forme ionique plus toxique (Dutrieux et al, 2005, p.1). Certes, toutes les eaux de surfaces analysées ont un pH acide, mais l'eau prélevée du fleuve N'Zi a un pH acide très faible par rapport aux autres eaux. Cela indique la forte acidification suscitée par l'orpaillage sur les eaux de surface. Ces résultats sont en conformité avec ceux obtenus par Butaré et Kéita en 2008 au cours de leurs travaux sur l'évaluation environnementale de l'orpaillage en Afrique de l'ouest. Cette situation justifie la forte conductivité détectée dans ce fleuve qui est le réservoir des polluants anthropiques. Le pH du marigot témoin (6,71) supérieur au pH des autres eaux et respectant les normes de potabilité des eaux selon les normes de l'OMS justifie l'effet des activités sur la pollution des eaux. Le pH du forage est acide avec une teneur de 6,44. L'étude de (Di Benedetto 1997.8p) ont aussi montré que l'effet immédiat de l'acidité de l'eau est d'augmenter la mobilisation de plusieurs métaux lourds, tels que le fer, le zinc, le plomb, le cadmium, qui accentuent la toxicité des eaux. L'analyse des sédiments prélevés dans les eaux a relevé également la présence des métaux lourds tels qu'Hg, Cu, Fe, Pl, AS, Cd, Zn et CN. Les concentrations moyennes du Cu, Fe, Pl, As, dans les sédiments d'eau dans le département de Bocanda sont inférieures à celles des sédiments de la sous-préfecture de Hiré présentées par (D.Y. Koffi, 2014, p.47). À l'inverse, les teneurs en Hg, Zn et CN dans les sédiments des eaux de notre espace d'études sont supérieures à celles obtenues à Hiré. Les résultats de l'Analyse en Composante Principale montre que les eaux étudiées dans le département de Bocanda sont soumises à la fois à une minéralisation naturelle et à une minéralisation anthropique. L'ACP a mis en évidence une forte présence de métaux lourds et d'éléments trace métalliques. En effet, dans les eaux, Fe corrélé à Pb montre que les deux métaux ont une origine anthropique. Par contre Cd, As, Hg et CN explique l'origine naturelle des métaux. La présence des polluants dans notre espace d'étude s'explique également par les carburants des motopompes utilisées pour piéger l'eau et aussi par les hydrocarbures des camions, des tricycles, des machines de production de l'or déversés dans les eaux. Calamari et Naeve 1994 cités par (A. Traoré et al, 2014, p 84) confirment ces résultats dans leurs études. Ils montrent que les carburants contiennent du Ni, du Hg, du Cu, du Fe, du Mn, du Pb, et du Cd.

Dans les sédiments des eaux, le PI corrélé à Hg, Fe, As, CN expriment une minéralisation naturelle. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus par (A.Traoré et al 2014) sur la lagune Agheïn. Il montre que le Fe qui a une origine terrigène du fait de la nature des formations géologiques de la région, corrélé avec Pb et leur proximité dans le cercle de communauté avec Hg montrent que ces trois métaux ont une origine naturelle. Par contre, elle montre qu'Al, Cd et Zn, inversement corrélés à Fe, Pb et Hg dans le cercle de communauté sont d'origine superficielle. L'ACP montre à travers la matrice de corrélation deux à deux que la concentration des polluants notamment les métaux lourds dans les sédiments est plus forte que la concentration des métaux dans les eaux. L'ACP sur les échantillons d'eaux et sédiments fait par (D.Y. Koffi, 2014) à Hiré dans le sud-ouest de la Côte d'Ivoire confirme ces résultats. Elle révèle que seulement 5 des 47 éléments étudiés présentent une concentration plus élevée dans l'eau que dans les sédiments. La concentration des polluants dans les sédiments d'eaux est source de contamination des êtres vivants notamment ceux d'espèce aquatique. Le mercure Hg par exemple lorsqu'il intègre les milieux aquatiques, les bactéries le transforment en méthylmercure (MeHg). Le méthylmercure contamine les chaînes alimentaires aquatiques et atteint des concentrations particulièrement importantes dans la chair des poissons carnivores. L'exposition humaine est due à la consommation des poissons contaminés par le MeHg présent dans la chaîne aquatique (C. Grasmick et al 1998, p.170, M. Richard et al, 2014, p 18).

Conclusion

L'étude montre la présence des métaux lourds dans les eaux et dans leurs sédiments. Elle démontre un enrichissement naturel et anthropique des eaux et de leurs sédiments par ces éléments traces métalliques. Les concentrations des valeurs des paramètres physicochimiques les plus fortes sont observées plus dans les eaux proches des sites d'orpaillages que l'eau témoin de Brou-Ahoussoukro situé loin des sites aurifères. Ce qui signifie que l'enrichissement anthropique est lié à la prolifération des sites d'orpaillage dans ce milieu. La mobilisation des métaux lourds dans les eaux par l'orpaillage entraîne la dégradation de la qualité de celles-ci. Face à cette situation, la connaissance de la qualité des ressources en eau

dans les zones aurifères reste une priorité. Ainsi, cette étude est une contribution à la gestion qualitative et quantitative des ressources en eau en général et en particulier celles situées à proximité des sites d'extraction aurifères. Elle permet la préservation de la qualité des eaux et la vie des espèces aquatiques et les populations.

Références bibliographiques

Alan Martin., et Helbig de Balzac Hélène (2017), *L'eldorado ouest-africain : cartographier le commerce illicite de l'or en Côte d'Ivoire, au Mali et au Burkina Faso*, rapport annuel du partenariat Afrique-Canada, janvier 2017, Ottawa on k2p 0g5 canada « www.pacweb.org », 28p.

Benedetto Di (1997), *Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation*.

Dossier sam 1997 - les métaux lourds. Axe "génie des procédés" - centre spin, école nationale supérieure des mines de saint-étienne 49p.

Butaré Innocent, Kéita Seydou (2008), *Aspects environnementaux liés au développement du secteur minier en Afrique de l'ouest*. Centre de recherches pour le développement international (crdi). Dakar, Sénégal. 13p.

Calamari et Naeve (1994), *Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain*. Document technique du cpca, n°25, rome, fao 129.

Dutrieux Sandrine, Onclinx Françoise, Squibin Marianne, Thirion André (2005), *Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : cadre général, les données de l'ibge : l'eau à Bruxelles*, 16 p.

Esso Lasme Jean-charles Emmanuel (2021), *L'essentiel de la statistique pour la recherche*. isbn : 978-2-37326-264-3. 160p.

Fao (1994), *Revue de la pollution dans l'environnement aquatique africain*. Les documents techniques du cpca n°25. 130p

Gaston Joseph (1913), *Exploitation indigène de l'or en Côte d'Ivoire*. In : bulletins et mémoires de la société d'anthropologie de paris, vi° série. Tome 4 fascicules 3-4, pp 372-375.

Goh Denis (2016), *L'exploitation artisanale de l'or en Côte d'Ivoire : la persistance d'une activité illégale*,
url:<http://dx.doi.org/10.19044/esj.2016.v12n3p18>. En ligne consulté le 11/08/2020_19 p.

Grasmick Claude, Sylviane Cordier, Nadine Frery, Alain Boudou, Régine Maury-Brachet (1998), *La pollution mercurielle liée à l'orpaillage en*

Guyane : contamination des systèmes aquatiques et impact sanitaire chez les amérindiens du Haut-Maroni, pp 167-179.

Group of experts on the scientific aspects of marine pollution (gesamp) (1982), *The health of the oceans*. rep. stud., gesamp, (15): et unep reg.seas rep. stud., (16), 108p.

Koffi Yao Donald (2014), *Impact de l'exploitation minière artisanale de l'or sur les eaux de surface à Hiré (Côte d'Ivoire)*, mémoire de master en géosciences et environnement, publié, université Nangui Abrogoua, 60 p.

Matini Jean Marc, Moutou Kongo-Mantono (2009), *Évaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au sud-ouest de Brazzaville, Congo*. Afrique science, 05 (1) pp 82-98.

Médard Ngouala Mabonzo (2020), *Caractérisation des eaux souterraines du Mayombe au sud-ouest de la République du Congo par les méthodes géochimiques et statistiques*, rev. ivoir. sci. technol., 35 (2020) 446 - 461 446 ISSN 1813-3290.

Médard Ngouala Mabonzo (2020), *Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines de la zone de contact du bassin sédimentaire côtier et du socle du précambrien inférieur au sud-ouest de la république du Congo*, volume 10 / numéro 21 été 2020 ISSN : 2247 - 2290 p. 60-85.

Traore Abou Gbombélé Soro, Kouassi Ernest Ahoussi, Barthélémy Siaka Bamba, Nagnin Soro et Jean Biemi (2014), *Niveau de contamination en métaux lourds des sédiments d'une lagune tropicale : la lagune aghien (sud-est de la Côte d'Ivoire)*, Afrique science 10(3) 73 - 88 73 ISSN 1813-548x, <http://www.afriquescience.info>, en ligne, consulté le 16/05/2019. 16p.