

Impact de l'orpaillage sur la qualité des eaux de la Falémé à Kéniéba, Mali

**Hanni KONE^{1*}, Farmata Koro YARO¹, Mamadou Mariam TRAORE¹, Abdoul Salam DIARRA²
et Sidy BA³**

¹ *Laboratoire National des Eaux (LNE), BPE 4161, Sotuba Mali Univers, Bamako, Mali*

² *Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, (CNRST), Cité Universitaire de Kabala II,
BP 3052, Bamako, Mali*

³ *Ecole Nationale d'Ingénieurs, Abderhamane Baba TOURE, Laboratoire de Génie Chimique et Environnement,
410, AV Vollenhoven, BP 242, Bamako, Mali*

(Reçu le 07 Septembre 2024 ; Accepté le 13 Octobre 2024)

* Correspondance, courriel : hannikone21@yahoo.fr

Résumé

L'exploitation artisanale de l'or est une activité lucrative dans laquelle de nombreux acteurs intervenant à des niveaux divers et avec des rôles précis, trouvent leur compte au plan financier en dépit des conséquences que cette activité pourrait engendrer sur notre environnement immédiat. L'objectif de cette étude était d'évaluer la qualité des eaux de la Falémé qui se situent dans la zone d'influence des activités d'orpaillage à Kéniéba. Entre mars et octobre 2021, nous avons réalisé une étude descriptive portant sur l'évaluation de la qualité des eaux de Falémé. En deux campagnes, neuf (09) échantillons d'eau ont été prélevés entre les communes de Kéniéba, Sitakily et Dialafara. Le pH, la conductivité électrique (CE), la température, l'oxygène dissout, les matières en suspension (MES), la couleur, la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la demande Biologique en Oxygène (DBO), le chrome VI, le cyanure, l'arsenic et les éléments traces métalliques (ETM) tels que le Cuivre, Manganèse, Fer total, le Plomb, le Nickel, le Zinc ont été analysés. La méthode par la spectrophotométrie à flamme (240FS AA) a été utilisée pour déterminer les ETM. Au regard des résultats, les températures mesurées n'étaient pas conformes aux normes à 67 % pour la 1^{ère} campagne et à 56 % pour la 2^{ème} campagne. Des non conformités en plomb ont été observés à 56 %. Les concentrations en fer total lors des deux campagnes étaient non conformes respectivement à 78 % et à 89 %. L'étude révèle que les activités d'orpaillage ont rendu les eaux de la Falémé chargée en MES et colorées. L'orpaillage a provoqué l'enrichissement en ETM qui dans la majorité des cas seraient libérés dans les eaux souterraines par infiltration.

Mots-clés : *impact, qualité des eaux, Falémé, aurifère, Kéniéba.*

Abstract

Impact of gold panning on the quality of the waters of the Falémé in Kéniéba, Mali

Artisanal gold mining is a lucrative activity in which many actors at various levels and with specific roles, find their financial benefits despite the consequences that this activity could have on our immediate environment. The objective of this study was to assess the quality of the waters of the Falémé which are located in the area of influence of gold panning activities in Kéniéba. Between March and October 2021, we

carried out a descriptive study on the assessment of the quality of the water in Falémé. In two campaigns, nine (09) water samples were taken between the communes of Kéniéba, Sitakily and Dialafara. pH, electrical conductivity (EC), temperature, dissolved oxygen, suspended solids (TSS), color, Chemical Oxygen Demand (COD), Biological Oxygen Demand (BOD), chromium VI, cyanide, arsenic and trace metal elements (MTE) such as Copper, Manganese, Total Iron, Lead, Nickel, Zinc were analyzed. The flame spectrophotometry method (240FS AA) was used to determine the ETMs. In view of the results, the temperatures measured did not comply with the standards at 67 % for the 1st campaign and 56 % for the 2nd campaign. Non-conformities in lead were observed at 56 %. Total iron concentrations during the two campaigns were 78 % and 89 % non-compliant respectively. The study reveals that gold panning activities have made the waters of the Falémé loaded with suspended solids and coloured. Gold panning has caused the enrichment of OTEC which, in the majority of cases, would be released into the groundwater by infiltration.

Keywords : *impact, water quality, Falémé, mining, gold, Kéniéba.*

1. Introduction

L'exploitation artisanale de l'or appelée orpaillage est une ancienne pratique encore observée de nos jours. En tant que métal présentant une grande valeur sur le plan économique, l'or a longtemps été considéré comme l'un des plus précieux métaux [1]. Elle reste l'une des principales industries primaires au monde. En Afrique de l'Ouest, cette activité est devenue indissociable du développement économique des pays [1, 2]. Au Mali, depuis 1990, l'extraction de l'or est devenue une activité économique majeure du pays, et constitue la deuxième source de revenus d'exportation après le coton. Cette rapide croissance a suscité de nombreux espoirs de développement, espoirs encore renforcés par le boom du cours de l'or sur les marchés mondiaux depuis quelques années [3]. Malgré que l'exploitation artisanale de l'or soit une activité génératrice de revenue pour les communautés, elle comporte des nombreuses conséquences. La dégradation du couvert végétal, la pollution des eaux de surface et souterraines résultants des activités minières présentent de nombreux impacts négatifs, tant au niveau social, environnemental que biologique [4]. L'utilisation de substances chimiques (mercure, cyanure, acide chlorhydrique et acide sulfurique) peut réduire la fertilité des sols, même contaminer et réduire la qualité des ressources en eau [5]. Au Maroc oriental, les mines ont largement contribué à la production nationale de plomb. Cependant, les activités minières ont conduit à une modification profonde du paysage de la région et à sa contamination par les sous-produits des traitements des déchets rejetés [6]. La pollution des sols et de l'eau en particulier, a toujours eu un impact sur la sécurité alimentaire, ce qui représente une menace importante pour la santé humaine [7]. L'intensification de la pollution des milieux aquatiques par les métaux traces peut avoir des effets néfastes sur l'homme et son environnement [8]. Dans certains écosystèmes aquatiques, ces produits chimiques peuvent être à l'origine de la disparition de certaines espèces animales ou végétales et par conséquent entraîner le dysfonctionnement de la chaîne trophique (faible biodiversité, etc.) [9]. La pollution liée à un rejet des eaux usées dans ces zones côtières constitue une menace pour la santé publique, les espèces sauvages ainsi que pour les sources de revenus comme la pêche et le tourisme [10]. Le rejet d'eaux usées non traitées ou partiellement traitées dans l'environnement entraîne la pollution des eaux de surface, du sol et des eaux souterraines. Une fois rejetées dans les plans d'eau, les eaux usées sont diluées et transportées en aval ou s'infiltrent dans les aquifères où elles peuvent affecter la qualité (et donc la disponibilité) des approvisionnements en eau douce. L'océan est souvent la destination finale des eaux usées rejetées dans les fleuves et les lacs [11]. La Falémé qui apporte à elle seule 25 % de l'eau du fleuve Sénégal risque d'être rayée de la carte hydrologique si des mesures ne sont pas prises pour la sauver. Agressée de toutes parts par un orpaillage anarchique à l'aide d'engins de dragage et de produits chimiques

aux effets dévastateurs, la rivière qui sert aussi de frontière naturelle entre le Sénégal et le Mali est au bord de la catastrophe écologique [12]. Les valeurs de la turbidité et les teneurs en MES dans les sous bassins touchés par l'activité d'orpaillage en Guyane sont respectivement 70 à 80 NTU et à 35 mg.L⁻¹ dans le Petit-Inini fortement orpaillé [13]. Plusieurs études ont été menées sur le cours d'eau de la Falémé avec beaucoup de données des projets de développement. Toutefois, les études sur la qualité des eaux de Falémé sont peu nombreuses. C'est pourquoi, nous avons réalisé cette étude afin d'attirer une nouvelle fois l'attention des décideurs politiques, la société civile, les ONG locales ou internationales, les collectivités locales, les populations riveraines à prendre des mesures idoines pour sauvegarder le cours de la Falémé. L'objectif de notre étude était d'évaluer la qualité des eaux de la Falémé dans la zone aurifère de Kéniéba.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Description de la zone d'étude

Le cercle de Kéniéba est situé dans la partie sud-ouest de la région de Kayes. Il est limité au nord par les cercles de Bafoulabé et Kayes, au sud par la République de la Guinée, à l'ouest par le Sénégal et à l'est par le cercle de Kita. Le cercle est à environ 618 km de frontière avec les Républiques de la Guinée et du Sénégal. Il compte 206 villages administratifs répartis entre douze communes : Bayé, Dombia, Kassama (Zone de montagne), Dabia, Dialafara, Faléa, Faraba, Kéniéba, Kourokoto, Guénégoré, Sagalo et Sitakily (zone basse). Il couvre une superficie d'environ 16400 km² pour une population de 197 050 habitants (RGPH, résultat définitif novembre 2011) soit une densité moyenne d'environ 12 habitants/km². La population est composée de 51 % de femmes et de 49 % d'hommes. Le Chef-lieu de cercle, Kéniéba, est situé à 415 km de Bamako à partir de la RN24 [14]. Cette étude a été réalisée dans les communes de Kéniéba, Sitakily et Dialafara. Ces communes ont été choisies car c'est des zones qui pratiquent énormément l'orpaillage pour parvenir à leur besoin. Les eaux de surface sont utilisées pour le lessivage des minerais et d'année en année, la croissance démographique double à cause de la présence de l'or dans ces zones. A ceux-ci, il faut ajouter l'utilisation des dragues sur le lit majeur des cours d'eau notamment la Falémé pour la recherche de l'or. Les sites de prélèvement se trouvent sur la carte des eaux de surface ci-après (*Figure 1*):

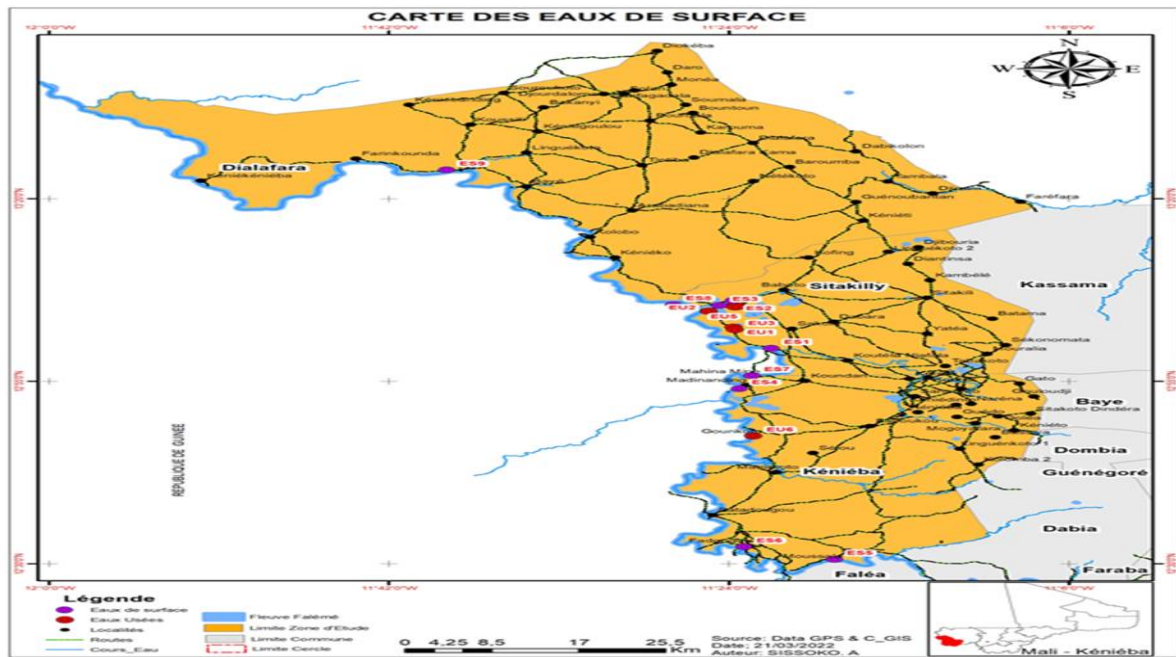


Figure 1 : Carte des sites de prélèvement

Les points de prélèvement ont été localisés au niveau de chaque site et les coordonnées sont dans le (Tableau 1).

Tableau 1 : Points de localisation des échantillons prélevés

N°	Codes Echantillons	Sites /Villages	Coordonnées		Type d'eau
			Latitude Nord	Longitude Ouest	
1	ES1	Falémé	12,9916667	-11,36251111	Cours d'eau (Falémé)
2	ES2	Gara	13,10131667	-11,39606667	
3	ES3		13,0896	-11,40811667	
4	ES4	Torodinloto	12,8997	-11,39098333	
5	ES5	Moussala	12,51001667	-11,30666667	
6	ES6	Fadougou	12,53886667	-11,38666667	
7	ES7	Mahinamine	12,9293	-11,37978333	
8	ES8	Djidjan Barrage	12,09136667	-11,4489	
9	ES9	Gourbassi	12,3989	-11,6489	

ES : Eau de Surface.

2-1-2. Matériel

Les matériels utilisés sont le multi paramètres HQ 40 d (WTW) pour mesurer le pH, la conductivité, la température et l'oxygène dissout. Le récepteur (GPS VISTA H, Etrex, Garmin) a été utilisé pour géo localiser les sites de prélèvement. Un DBO-mètre (WTW TS 606/2 - i) a été utilisé pour déterminer la Demande Biologique en Oxygène (DBO). Un instrument de mesure DCO HANNA et le spectrophotomètre DR 2800 ont été utilisés pour mesurer la Demande Chimique en oxygène (DCO). Des flacons de prélèvement (1 litre) et des glacières pour la prise et stockage des échantillons d'eau ont été utilisés. L'arsenator (Palintest) pour la détermination de l'arsenic (As), le Colorimeter 890 (HACH) a été utilisé pour la détermination des cyanures et des Chrome VI. Le DR 2800 de marque HACH a été utilisé pour les mesures de la couleur et les Matières en Suspension (MES). La grille d'évaluation de la qualité des eaux de surface HTE N°147-Sep/Déc. 2010 (Normes) a été utilisée pour apprécier la qualité des eaux de la Falémé.

2-2. Méthodes

Dans le cadre de cette étude, les travaux menés étaient en deux phases principales : sur le terrain et au laboratoire. Sur le terrain, des mesures in situ ont été réalisées notamment le pH, la conductivité (CE), la température, l'oxygène dissout. Au laboratoire, des paramètres physico chimiques, la DCO, la DBO₅, les cyanures, les MES, la couleur et les éléments traces métalliques. Plusieurs méthodes ont été utilisées au laboratoire entre autre la spectrophotométrie à flamme (240FS AA) pour déterminer le Cuivre, Manganèse, Fer total, Plomb, Nickel, Zinc et l'arsenic. La méthode de spectrophotométrie 890 (HACH) a été appliquée pour analyser les cyanures, le chrome VI, la couleur et les MES. Les méthodes par le WTW TS 606/2 - i a été utilisée pour les mesures de la Demande Biologique en Oxygène (DBO). La méthode pour l'instrument de mesure DCO HANNA et la spectrophotométrie DR 2800 ont été utilisée pour déterminer la Demande Chimique en oxygène (DCO). Deux campagnes d'échantillonnage ont été réalisées du 05 au 20 mars 2021 et du 28/09/2021 au 12/10/2021. Des échantillons d'eau ont été prélevés avec un total de neuf (09) dans les différents sites choisis et par campagne. Le (**Tableau 2**) représente la méthode de calcul pour les taux de conformité et de non-conformité des résultats.

Tableau 2 : Calcul des taux de conformité ou de non-conformité

Nombre de paramètres conformes	Nombre de paramètres non conformes	Total échantillons d'eau prélevés	Taux (%)
X	Y	Z	(X) ou (Y) / (Z) X 100

Source : (Hanni KONE, 2021); ETM : Eléments Traces Métalliques; MES : Matières en Suspension; DCO : Demande Chimique en Oxygène; DBO5 : Demande Biologique en Oxygène pendant 5 jours; mg/L : milligramme par Litre; UCV : Unité de Couleur Vraie.

3. Résultats

3-1. Résultats des paramètres in situ

Cette partie est consacrée aux résultats des mesures effectuées sur le terrain. Il s'agit des mesures de la CE, du pH, de l'oxygène dissout et de la température lors des deux campagnes. Le (**Tableau 3**) représente les échantillons d'eau prélevés et consacré aux résultats des mesures in situ obtenus lors des deux campagnes de terrain.

Tableau 3 : Résultats des paramètres in-situ

Codes Echantillons	1ère campagne du 05 au 20 mars 2021				2ème campagne du 28/09/2021 au 12/10/2021			
	CE (µS/cm)	pH	Oxygène dissout (mg/L)	Température (°C)	CE (µS/cm)	pH	Oxygène dissout (mg/L)	Température (°C)
ES1	236	6,45	6,63	33,8	54	7,21	7,34	33,8
ES2	619	8,87	6,87	33,1	111	6,91	7,02	33,0
ES3	600	8,96	6,81	32,6	136	7,21	7,80	30,4
ES4	101	7,24	6,92	33,5	47	7,23	8,02	27,1
ES5	98,7	7,13	5,43	33,6	44	7,01	7,52	26,0
ES6	112,8	7,51	6,08	29,9	53,9	6,93	6,90	29,6
ES7	112,2	7,36	6,88	26,9	61,9	6,92	5,40	29,9
ES8	450	7,81	6,18	29,9	57	7,08	6,92	30,3
ES9	83,7	7,68	6,15	30,5	60	7,33	7,07	30,2
Norme	≤ 750	6,5 - 9,2	5-7	25-30	≤ 750	6,5 - 8,5	5-7	25-30

Source : Laboratoire National des Eaux, 2021 ; CE : Conductivité Electrique, pH : potentiel d'Hydrogène, ES : Eau de Surface, °C : degrés Celsius, µS/cm : micro siemens par centimètre.

Les résultats du (**Tableau 3**) montrent que les conductivités électriques (CE) oscillaient entre 83,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la 1^{ère} campagne, 44 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 136 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la 2^{ème} campagne. Les valeurs les plus élevées étaient trouvées à ES8 avec 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la 1^{ère} campagne et à ES3 avec 136 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la seconde campagne. Ces eaux étaient moyennement minéralisées. Le pH détermine l'acidité ou la basicité de l'eau et ses caractéristiques sont liées à la nature géologique ainsi qu'à la charge du milieu auquel il est soumis. Les valeurs moyennes en pH trouvées étaient de 7,66 pour la 1^{ère} campagne et 7,09 pour la 2^{ème} campagne qui caractérise un pH légèrement alcalin. Les valeurs moyennes trouvées en oxygène dissout pour la 1^{ère} campagne et la 2^{ème} campagne étaient respectivement 6,44 mg/L et 7,11 mg/L. Cela explique une oxygénation acceptable du cours d'eau. La valeur moyenne en température était de 31,53°C pour la 1^{ère} campagne et de 30,03°C pour la 2^{ème} campagne. Ces valeurs sont légèrement supérieures à la norme. Les (**Figure 2 et 3**) montrent l'évolution de l'oxygène dissout et de la température.

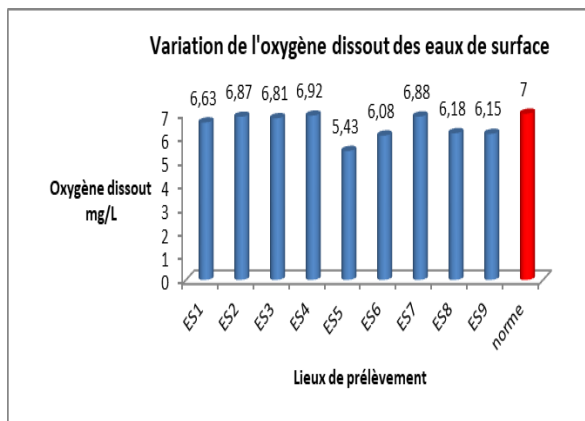


Figure 2 : Évolution de l'oxygène dissout du 5 au 20/03/2021

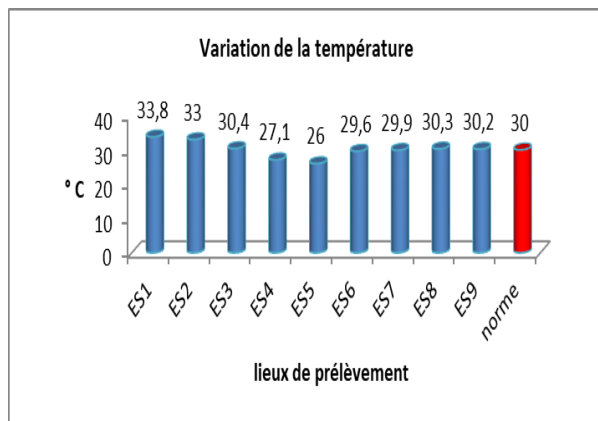


Figure 3 : Évolution de la température du 28/09 au 12/10/2021

3-2. Résultats des paramètres déterminés au laboratoire

Cette partie est consacrée aux résultats des analyses effectuées au laboratoire. Il s'agit des mesures de MES, de la couleur, de la DCO et de la DBO₅, des éléments traces métalliques (ETM), cyanures et le chrome VI. Le (**Tableau 4**) représente les échantillons prélevés lors des deux campagnes et contient des résultats de MES, de la couleur, de la DCO et de la DBO₅.

Tableau 4 : Résultats de MES, de la couleur, de la DCO et de la DBO₅

Codes Echantillons	1 ^{ère} campagne du 05 au 20 mars 2021				2 ^{ème} campagne du 28/09/2021 au 12/10/2021			
	MES (mg/L)	Couleur (UCV)	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)	MES (mg/L)	Couleur (UCV)	DCO (mg/L)	DBO ₅ (mg/L)
ES1	-	10660	54	28	-	2080	29	11
ES2	-	188	79	38	-	2898	10	6
ES3	-	188	48	30	-	2030	9	4
ES4	-	3400	26	17	-	2160	6	3
ES5	3600	29400	36	11	1437	6350	34	17
ES6	1400	13300	50	18	1183	7175	47	23
ES7	1350	12100	0	0	1043	6145	52	26
ES8	600	6950	0	0	1204	4228	41	19
ES9	1800	22600	0	0	896	4471	40	20
Norme	≤ 30	50-100	35-40	5-10	≤ 30	50-100	35-40	5-10

Source : Laboratoire National des Eaux, 2021.

Les résultats du (**Tableau 4**) montrent que les valeurs moyennes en couleur lors des deux campagnes étaient respectivement 10976 UCV et 4171 UCV. Cette forte couleur est due à l'utilisation des dragues sur le lit majeur des cours d'eau. La valeur moyenne en MES était de 1750 mg/L pour la 1^{ère} campagne et était de 1153 mg/L pour la 2^{ème} campagne. Ces valeurs sont supérieures aux normes. Cela signifie que le transport des sédiments dans les cours d'eau était très important. Les valeurs moyennes en DCO et en DBO₅ étaient respectivement 33 mg/L et 16 mg/L pour la 1^{ère} campagne, 29 mg/L et 14 mg/L pour la 2^{ème} campagne. Des valeurs élevées en DCO à SE1 avec 54 mg/L, à SE2 avec 79 mg/L, à SE3 avec 48 mg/L et à SE6 avec 50 mg/L et en DBO₅ à SE1 avec 28 mg/L, à SE2 avec 38 mg/L, à SE3 avec 30 mg/L, à SE4 avec 17 mg/L, à SE5 avec 11 mg/L et à SE6 avec 18 mg/L. Cela signifie que les matières organiques n'ont pas été totalement dégradées dans ce cours d'eau. Le (**Tableau 5**) représente les échantillons prélevés lors de la 1^{ère} campagne et contient des résultats des ETM, des cyanures et du chrome VI.

Tableau 5 : Résultats des ETM et des cyanures du 05 au 20 mars 2021

Codes Echantillons	Cuivre mg/L	Manganèse mg/L	Fer total mg/L	Plomb mg/L	Nickel mg/L	Zinc mg/L	Cyanure mg/L	Arsenic mg/L	Chrome VI mg/L
ES1	0,067	0,002	7,416	0,000	0,000	0,000	0,000	0,094	0,000
ES2	0,000	0,000	0,226	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,005
ES3	0,044	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,032	0,006
ES4	0,045	0,000	13,616	0,000	0,000	0,000	0,000	0,036	0,000
ES5	0,091	0,161	7,560	0,073	0,000	0,000	0,000	0,026	0,000
ES6	0,000	0,000	3,325	0,417	0,181	0,000	0,000	0,005	0,060
ES7	0,103	0,050	2,335	0,217	0,020	0,000	0,000	0,007	0,000
ES8	0,035	0,000	1,939	0,320	0,227	0,000	0,000	0,000	0,000
ES9	0,373	0,000	6,065	0,077	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Norme	0,02-0,05	0,1-0,5	0,5-1	0,01-0,05	0,02-0,05	≤ 0,5	≤ 0,05	0,01-0,05	≤ 0,05

Source : Laboratoire National des Eaux, 2021

Au regard des résultats obtenus dans le (**Tableau 5**), les teneurs en cuivre variaient entre 0,000 et 0,373 mg/L. Les valeurs supérieures en cuivre ont été trouvées à ES1, ES5, ES7 et ES9 respectivement 0,067 mg/L, 0,091 mg/L, 0,103 mg/L et 0,373 mg/L. Les teneurs en manganèse, en zinc et en cyanure sont inférieures à la norme. La valeur moyenne en fer total était 4,738 mg/L. Cette valeur est supérieure à la norme. Les teneurs oscillaient entre 0,000 mg/L et 0,417 mg/L pour le plomb et 0,000 mg/L et 0,227 mg/L pour le nickel. Les valeurs élevées en plomb ont été décelées à SE5 avec 0,073 mg/L, à SE6 avec 0,417 mg/L, à SE7 avec 0,227 mg/L, à SE8 avec 0,320 mg/L et à SE9 avec 0,077 mg/L. Des teneurs élevées ont été trouvées à SE6 avec 0,181 mg/L et à SE8 avec 0,227 mg/L pour le nickel, à ES1 avec 0,094 mg/L pour l'arsenic et à SE6 avec 0,060 mg/L pour le chrome VI. Le (**Tableau 6**) représente les échantillons prélevés lors de la 2^{ème} campagne et contient des résultats des ETM, cyanures, arsenic et chrome VI.

Tableau 6 : Résultats des ETM et cyanure (28/09/202 au 12/10/2021)

Codes Echantillons	Cuivre mg/L	Manganèse mg/L	Fer total mg/L	Plomb mg/L	Nickel mg/L	Zinc mg/L	Cyanure mg/L	Arsenic mg/L	Chrome VI mg/L
ES1	0,000	0,061	8,954	0,000	0,000	0,0000	0,044	0,000	0,000
ES2	0,000	0,000	13,457	0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,040
ES3	0,000	0,000	2,704	0,000	0,000	0,0000	0,007	0,000	0,000
ES4	0,000	0,026	1,064	0,038	0,000	0,0000	0,000	0,000	0,000
ES5	0,000	0,251	1,498	0,115	0,018	0,0000	0,051	0,041	0,160
ES6	0,000	0,227	0,285	0,141	0,043	0,0000	0,067	0,046	0,060
ES7	0,005	0,155	1,540	0,094	0,003	0,0000	0,013	0,047	0,020
ES8	0,000	0,165	2,041	0,134	0,031	0,0009	0,047	0,045	0,020
ES9	0,000	0,178	1,987	0,163	0,033	0,0072	0,078	0,045	0,060
Norme	0,02-0,05	0,1-0,5	0,5-1	0,01-0,05	0,02-0,05	≤ 0,5	≤ 0,05	0,01-0,05	≤ 0,05

Source : Laboratoire National des Eaux, 2021

Les résultats obtenus dans le (**Tableau 6**) montrent que les teneurs en cuivre, en manganèse, en nickel, en zinc et en arsenic étaient inférieures aux normes. La valeur moyenne en fer total était 3,726 mg/L. Cette valeur est supérieure à la norme. Les teneurs en plomb, en cyanure et en chrome VI oscillaient entre 0,000 mg/L et 0,163 mg/L pour le plomb, 0,000 mg/L et 0,078 mg/L pour le cyanure et 0,000 mg/L et 0,060 mg/L pour le chrome VI. Les valeurs élevées en plomb ont été trouvées à SE5 avec 0,115 mg/L, à SE6 avec 0,141 mg/L, à SE7 avec 0,094 mg/L, à SE8 avec 0,134 mg/L et à SE9 avec 0,163 mg/L. Des teneurs élevées ont été trouvées à SE6 avec 0,067 mg/L et à SE9 avec 0,078 mg/L pour le cyanure et à SE5 avec 0,160 mg/L, à SE6 avec 0,060 mg/L et à SE9 avec 0,060 mg/L pour le chrome VI. Les (**Figures 4 et 5**) représentent respectivement l'évolution des teneurs en fer total et en cyanures.

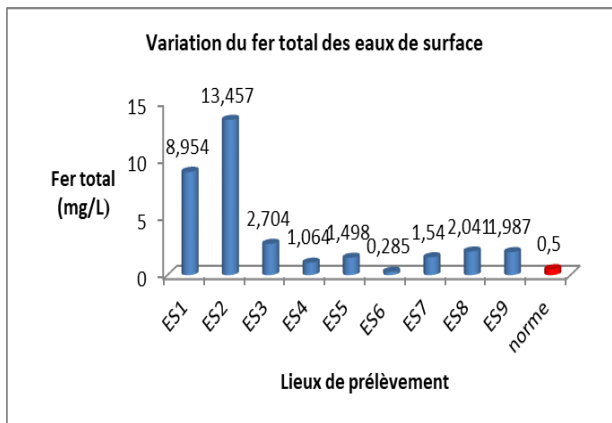


Figure 4 : Évolution du fer total du 28/09 au 12/10/2021

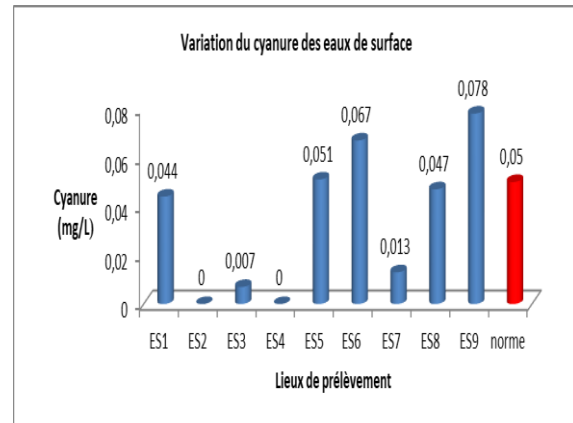


Figure 5 : Évolution des cyanures du 28/09 au 12/10/2021

Les (**Photos 1, 2, 3, 4, 5 et 6**) ci-dessous ont été prises lors des deux campagnes de terrain.



Photo 1 : *Site de Djidjan-barrage, (Hanni KONE, 2021)*



Photo 2 : *Site de Fadougou (Hanni KONE, 2021)*



Photo 3 : *Site de Fadougou (Hanni KONE, 2021)*



Photo 4 : *Pollution de la Falémé par les dragues*



Photo 5 : *Drague artisanal sur la Falémé*



Photo 6 : *Drague artisanal sur la Falémé*

Les (**Photos 1, 2 et 3**) montrent l'impact de l'orpaillage sur les cours d'eau et les (**Photos 4, 5 et 6**) montrent les activités de l'orpaillage sur les cours d'eau.

4. Discussion

De plus en plus, l'utilisation des produits chimiques comme le mercure, le cyanure contribuent à la dégradation de la qualité des eaux de surface notamment la Falémé. En outre, les dragues sont sur les lits majeurs des cours d'eau dans le but d'extraire de l'or. Ces pratiques néfastes réduisent considérablement l'auto épuration des cours d'eau d'où l'inexistence de la vie aquatique.

4-1. Mesures des températures

Notre étude a démontré que les températures mesurées sur les cours de la Falémé pendant les deux campagnes oscillaient entre 26,9°C à 33,8°C et 26,0°C à 33,8°C. Les moyennes de température étaient de 31,53°C et 30,03°C (**Tableau 3**). Cela peut favoriser la croissance des microorganismes, l'apparition des mauvaises odeurs, la couleur, les problèmes de corrosion et peut affecter la solubilité des gaz et des sels dans l'eau. Ces résultats concordent avec les résultats des travaux réalisés au Cameroun où la température des eaux des lacs de Bini et de Dang qui variaient respectivement de 23,1°C à 24,4°C et de 26,0°C à 29,5°C. Cette variation de température au sein des deux lacs illustre bien la variation de temps en saison pluvieuse dans la zone d'étude et caractérise aussi le niveau de pollution de ces lacs. En effet, le lac de Dang connaît une eutrophisation poussée par rapport au lac Bini [15]. En Côte d'Ivoire, au département de Divo au Centre-Ouest, à Afema dans le Sud-Est et à Marcorry, les résultats des travaux réalisés ont relevé que les températures des eaux variaient respectivement entre 24,1°C à la station MR, rivière située sur la route de la mine d'Agbaou à 2 km de la mine sur le bassin de boubo et 30,3 °C à la station HR7, eau de surface utilisée pour les activités d'orpaillage sur le bassin de bandama avec un écart type de 1,21°C et une moyenne de 26,7°C. Les valeurs les plus fréquentes sont situées entre 25 et 27 °C. Cet intervalle représente plus de 81 % [16], de 25,7 à 27,30 °C avec une moyenne de 26,71°C [17], en moyenne des eaux de surface à 29,15 ± 0,15°C [18]. En République Démocratique de Congo, les résultats des travaux ont montré que la température de l'eau enregistrée pendant les deux saisons d'étude dans les cinq stations étudiées dans la rivière Musolo est située entre 25,9 et 29,7°C. La valeur de la température la plus élevée était 167 observée à la station V en saison sèche (29,1°C) et à la station III en saison des pluies (29,7°C). La faible valeur de température était observée à la station II en saison des pluies (25,9°C) [19].

4-2. Le pH

Les résultats de nos travaux ont montré (**Tableau 3**), les valeurs moyennes en pH trouvées étaient de 7,66 pour la 1^{ère} campagne et 7,09 pour la 2^{ème} campagne. Ces valeurs sont conformes aux normes. Les résultats de la présente étude confirment avec les travaux antérieurs réalisés dans des zones minières et ayant révélés des mesures aussi conformes dans les eaux usées. C'est le cas du périurbain de Casablanca, au Maroc où les valeurs moyennes du pH montrent des fluctuations au niveau des stations étudiées allant de 6,47 à 7,61 alors que les valeurs extrêmes varient entre 3,2 mesurée en amont (SBR) et 8,45 enregistrée en aval (SHJ). Les valeurs moyennes restent généralement comprises entre 6,5 et 8,4, considérées comme valeurs limites des NMEDI [20]. Au niveau de littoral Ouest Algérien, les résultats des travaux ont montré qu'aux points de prélèvement, les moyennes des valeurs mesurées s'établissent à 8,2 pour les rejets urbains d'Oran (extrêmes : 6,1 en octobre 2009 et 9,9 en juin 2009) [21]. Au Sénégal, les résultats des travaux ont révélé que les valeurs de pH dans les cinq sites sont basiques variant de 9,02 à 9,66 avec une moyenne de 9,2 ± 0,27 [22].

4-3. La conductivité électrique (CE)

Les résultats de nos travaux ont montré (*Tableau 3*), que les valeurs les plus élevées trouvées à ES8 avec 450 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la 1^{ère} campagne et à ES3 avec 136 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la seconde campagne. Des travaux antérieurs réalisés dans les zones et ayant signalés également des valeurs importantes. Notamment, les résultats des travaux réalisés en République Démocratique du Congo ont montré qu'en saison sèche, les valeurs moyennes de la conductivité électrique les plus élevées sont observées à PR est de 453 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et les plus basses sont observées à LUF soit 308 $\mu\text{S}/\text{cm}$ [25]. En Côte d'Ivoire, les résultats des travaux ont montré que la conductivité électrique varie de 67,8 à 574 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 281,55 $\mu\text{S}/\text{cm}$. 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 [2].

4-4. Teneurs de MES, DCO et DBO₅

Au regard des résultats obtenus (*Tableau 4*), ces valeurs sont supérieures aux normes. Cela explique l'utilisation des dragues sur le lit majeur des cours de la Falémé dans le but de recherche de l'or. Ces pratiques constituent une forte menace pour la vie aquatique. Les résultats de cette étude corroborent avec des travaux antérieurs réalisés dans des zones minières et ayant rapportés des mesures aussi importantes dans des rejets miniers. C'est le cas notamment des travaux de recherche existants dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire qui ont révélé que les concentrations en MES dans la rivière Mé sont très variables et élevées durant toute la période de l'étude. Elles se situent entre un minimum de 20 mg/L, obtenu en juillet et octobre et un maximum de 1000 mg/L obtenu en avril 2020 avec une moyenne sur la période d'étude de 171,1 mg/L [23]. Les analyses ont révélé des teneurs élevées en DCO et en DBO₅ dans la majorité des sites étudiés. Ces résultats obtenus confirment les travaux antérieurs réalisés en Algérie où les valeurs de la DCO de l'eau brute sont variables. Elles oscillent entre 365 mgO₂/L et 1094,4 mgO₂/L avec une moyenne de 672,02±215,20 mgO₂/L. Concernant l'effluent traité, les valeurs enregistrées varient entre 19,2 mgO₂/L et 105,4 mgO₂/L. Ces valeurs sont conformes aux normes algériennes de rejet (120 mgO₂/L), ainsi que celles de l'OMS (< 90 mgO₂/L) tandis que la valeur moyenne en DBO₅ de la charge polluante reçue par la station varie entre 70 mgO₂/L et 750 mgO₂/L. Les effluents traités s'appauvrissent et montrent des teneurs en DBO₅ qui oscillent entre 1 mgO₂/L et 14 mgO₂/L avec une moyenne de 5,89±3,91 mgO₂/L. Les valeurs de la DBO₅ sont inférieures aux normes algériennes de rejet (40 mgO₂/L) et à celles de l'OMS (<30 mgO₂/L) [24]. En République Démocratique de Congo, les résultats des travaux en DBO₅ ont prouvé qu'en saison sèche, la valeur maximale observée à la station PR est de 48,59 mgO₂/L et la valeur minimale à LF et PR est de 32 mgO₂/L avec une moyenne (40,30 mgO₂/L). En saison des pluies, la valeur maximale située à LF est de 44,1 mgO₂/L et la minimale à LUF est de 30,74 mgO₂/L avec une moyenne de 37,42 mgO₂/L [25]. A Mekrou dans le Nord-Ouest du Bénin, les résultats des travaux ont montré que les valeurs de la DBO enregistrées à la fin de la saison pluvieuse sont supérieures à celles enregistrées pendant la saison pluvieuse. La plus forte valeur est observée au niveau du site 3 à la fin de la saison pluvieuse. La plus faible valeur est observée au niveau du site 1 pendant la saison pluvieuse. Les valeurs de la DBO des eaux de la rivière Mékrou sont dans l'intervalle 1 à 5 mg/L avec une moyenne de 3,725 mg/L en saison des pluies et de 8 à 26 mg/L avec une moyenne de 12,25 mg/L à la fin de la saison des pluies. Les valeurs de la DCO enregistrées pendant la saison sèche sont supérieures à celles enregistrées pendant la saison pluvieuse et à la fin de la saison pluvieuse. La plus forte valeur est observée au niveau du site 1 pendant la saison sèche. La plus faible valeur est observée au niveau du site 1 pendant la saison pluvieuse. Les valeurs de DCO des eaux de la rivière varient de 1,1314 à 78,83 mg/L, avec une moyenne de 22,26 mg/L en saison des pluies et de 264 à 732 mg/L avec une moyenne de 396 mg/L en saison sèche [26]. Les résultats de l'étude ont révélé des teneurs relativement élevées en DCO et DBO₅ qui seraient en relation principalement aux rejets domestiques liquides non contrôlés [27].

4-5. Teneurs en ETM

Les résultats des analyses des eaux de la Falémé ont révélé des teneurs élevées en ETM par endroit des sites étudiés notamment le fer total, le plomb, le cuivre, le nickel, le chrome VI et l'arsenic (*Tableau 5 et 6*). Ces valeurs sont supérieures aux normes. Les opérations d'extraction et de broyage minier, constituent des sources évidentes de contamination de l'environnement [28]. Les plus fortes concentrations en ETM obtenues sont détectées dans la zone minière suggérant que l'orpaillage est une source de pollution des sols [29]. En effet, l'arsenic peut se trouver dans l'environnement à plusieurs états d'oxydation mais dans les eaux naturelles, on le trouve principalement sous forme inorganique, sous forme d'oxydations d'arsénite trivalent [As (III)] ou d'arséniate pentavalent [As (V)]. Les formes de l'arsenic organiques peuvent être produites par l'activité biologique, principalement dans les eaux de surface, mais elles ont rarement d'une importance quantitative. Des formes organiques peuvent toutefois se produire lorsque les eaux sont considérablement affectées par la pollution industrielle [30]. Les résultats de la présente étude corroborent avec des travaux antérieurs réalisés dans des zones aurifères et ayant mentionnés des teneurs aussi non négligeables en ETM dans les eaux de surface ou dans les rejets miniers. Il s'agit notamment l'étude réalisée en Colombie, les résultats des travaux ont montré que la concentration autorisée de cyanures dans le premier et le deuxième échantillonnage, avec une concentration de 1,02 et 1,32 mg/L, respectivement, était excessive à la station d'échantillonnage du village de Tigui. Ainsi, dans le bassin versant de la station de la rivière Boque, la concentration de cyanure prescrite a été dépassée lors du deuxième échantillonnage avec une concentration de 1,57 mg/L [31]. Au Maroc, les résultats des travaux ont montré que les échantillons récoltés aux abords de la fonderie d'Oued El Heimer et en particulier au niveau des scories, présentent des concentrations plus élevées en As, Cd, Pb et Zn que dans les deux régions minières décrites.

Les teneurs en Cu et Ni sont également importantes [6]. Au Maroc, les travaux réalisés ont montré que les valeurs d'arsenic enregistrées à l'ensemble des stations de prélèvement des rejets d'eau de mine ne dépassent pas les valeurs limites des rejets industriels dans les eaux de surface ou souterraines fixées à 50 µg/l, sauf dans la station Ex 2 qui avait une concentration supérieure à la norme pendant le C1. Au cours du C1, ils montrent une variabilité significative de l'aval à l'amont de la mine, qui varie entre 83 µg/l et 2,5 µg/l aux stations Ex 2 et Ex 1 respectivement [32]. Au Cameroun, sur des sites miniers de Kombo-Laka, Plateau de l'Adamaoua, des travaux ont révélé des concentrations importantes en Cr (189,70 mg/kg), Ni (45,01 mg/kg), Cu (44,64 mg/kg), Zn (62,00 mg/kg), As (45,65 mg/kg), Cd (0,30 mg/kg), Sb (42,32 mg/kg) et Pb (26,24 mg/kg), susceptibles de contaminer les sols et les eaux aux alentours de la mine [33]. A Bétaré-Oya, dans l'Est du Cameroun, les travaux de recherche existants ont montré que les sols de Bétaré-Oya et les sédiments des cours d'eau sont contaminés par des métaux et des métalloïdes qui dépassent les valeurs GB établies pour le sol (Co \approx 17,73 mg/kg, Cd \approx 0,36 mg/kg, Cu \approx 146,81 mg/kg et As \approx 48,82 mg/kg) et les valeurs GB pour les sédiments fluviaux (Co \approx 30,90 mg/kg, Cd \approx 0,24 mg/kg, Cu \approx 173 mg/kg, As \approx 51,59 mg/kg, Cr \approx 137 mg/kg, Pb \approx 7,56 mg/kg et Zn \approx 39,48 mg/kg) [34]. Dans la sous-préfecture de Kokumbo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire qui a montré que les concentrations de fer oscillent entre 0,292 mg/L et 33,5 mg/L, avec une valeur moyenne de 7,28 mg/L [2]. A Tillabéri, au Niger, les travaux antérieurs révélant que dans les eaux usées issues du traitement de l'or par cyanuration, les concentrations en ETM sont significativement plus élevées. Les teneurs moyennes sont de 1,32 ; 0,32 ; 0,15 ; 24,29 ; 83,22 et 108,47 mg/L respectivement pour Cd, Co, Mo, As, Hg et Mn. Des concentrations plus importantes allant jusqu'à 7859 mg/L ont été aussi déterminées dans les eaux de traitement par cyanuration. Les teneurs les plus fortes sont observées pour le Zn (7859 mg/L), suivi par ordre décroissant de l'Al (1458 mg/L), du Fe (697 mg/L) et du Cu (552 mg/L) [35]. A Komabangou, au Niger, les travaux antérieurs montrent que les valeurs de concentration en éléments traces dans les sols sont très disparates et varient de 0,541 à

555,585 mg/kg pour l'As ; 0,037 à 1,434 mg/kg pour le Cd ; 1,240 à 27,146 pour le Co ; 18,699 à 257,798 mg/kg pour le Cr ; 3,859 à 175,535 pour le Cu ; 5,402 à 126,984 mg/kg pour le Ni ; et 2,711 à 6576,699 mg/kg et 7,558 à 468,960 mg/kg respectivement pour le Pb et le Zn. La concentration moyenne la plus élevée est obtenue pour le Pb, suivie par ordre décroissant de celles du Zn, As, Cr, Cu, Ni, Co et Cd [29]. Dans le Sud-Est du Niger, les études antérieures ont montré que des concentrations en arsenic des eaux sont comprises entre 0,018 µg/L et 202,72 µg/L avec une moyenne de 10,29 µg/L en indiquant que quatre présentent des teneurs dépassant les limites des normes nigérienne, de OMS et françaises avec des concentrations de 202,72 µg/L et 189,74 µg/L respectivement pour les sites d'orpaillage de Mbanga et Boulounjonga et 15,76 µg/L et 15,52 µg/L pour les villages de Tchetchirey et Arotondo situés à proximité du site d'orpaillage de Komabangou [36]. Par conséquent, les eaux de surface contenant des teneurs élevées en arsenic peuvent contaminer les eaux souterraines (puits ou forages) à proximité des sites d'orpaillage. Les résultats de tous ces travaux confirment que les activités d'orpaillages peuvent avoir des impacts environnementaux.

5. Conclusion

L'étude a permis de mettre en évidence une pollution des eaux de la Falémé, induite par les activités d'exploitation de l'or et localisée aux sites d'orpaillage. La présence des paramètres physico chimiques révèle la détérioration de la qualité des eaux entre les différents sites. Cette détérioration est due aux actions anthropiques. Cependant, les eaux de la Falémé étaient moyennement chargées et la capacité d'auto épuration était acceptable sur l'ensemble des sites. Cette étude révèle également que les eaux étaient totalement colorées avec des fortes présences des matières en suspension. Des non-conformités en DCO et en DBO₅ étaient respectivement à 78 % et à 89 %. Des teneurs en cuivre, en plomb, en arsenic, en nickel, en manganèse, en chrome VI, en fer total et en cyanure étaient aperçues dans les eaux de la Falémé à Fadougou, Moussala, et Gourbassi. Le cours d'eau de la Falémé sérieusement menacé par les activités anthropiques notamment l'utilisation des dragues sur le lit majeur de la Falémé et l'utilisation des produits chimiques comme le cyanure etc. Ces résultats d'analyse pourront constituer néanmoins un repère pour des travaux ultérieurs. Toutes les parties prenantes (décideurs politiques, les ONG, la société civile, les collectivités locales etc.) sont interpellés à faire prendre des mesures appropriées afin de sauver la Falémé.

Remerciements

Nous adressons nos vifs remerciements à la Direction Générale du Laboratoire National des du Laboratoire National des Eaux qui a financé cette étude.

Références

- [1] - A. KEELING and J. SANDLOS, « Environmental Justice Goes Underground? Historical Notes from Canada's Northern Mining Frontier », *Environmental Justice*, Vol. 2, N° 3 (sept. 2009) 117 - 125 p.
- [2] - KOUASSI ERNEST AHOUSI et ARMAND PATRICK YAPO, « 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 », *Afrique Science*, Vol. 19, N° 4 (2021) 36 - 50 p.
- [3] - FIDH (FEDERATION INTERNATIONALE DES LIGUES DES DROITS DE L'HOMME), « Troisième producteur d'or d'Afrique, le Mali ne récolte que des Poussières », N° 477 (sept. 2007) 6 p.
- [4] - G. DENIS, « L'exploitation artisanale de l'or en Côte d'Ivoire : la persistance d'une activité illégale », *European scientific journal*, Vol. 12, N° 3 (2016)
- [5] - E. WANDAN, G. B. KOFFI, K. B. KOUADIO et Z. 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*, Vol. 3, N° 5 (2015) 265 p.
- [6] - ABDELAZIZ SMOUNI, MOHAMMED ATER, FLORENCE AUGUY, LAURENT LAPLAZE, MOHAMMED EL MZIBRI, FATIHA BERHADA, ABDELKARIM FILALI-MALTOUF et PATRICK DOUMAS, « Évaluation de la contamination par les éléments-traces métalliques dans une zone minière du Maroc oriental », *Cahiers Agricultures*, Vol. 19, N° 4 (2010) 273 - 279 p.
- [7] - YONGLONG LU, SHUAI SONG, RUOSHI WANG, ZHAOYANG LIU, JING MENG, ANDREW J. SWEETMAN, ALAN JENKINS, ROBERT. FERRIERE, HONG LIC, WEI LUO and TIEYU WANG, « Impacts of soil and water pollution on food safety and health risks in China », *Environment international*, Vol. 77, (2015) 5 - 15 p.
- [8] - A. A. OUATTARA, N. SANGARE, K. M. YAO, A. TROKOUREY et T. DIACO, « Evaluation de la contamination des éléments traces métalliques dans les sédiments de la rivière N'zi, Côte d'Ivoire : Assessment of trace metals contamination in sediments of N'zi River, Côte d'Ivoire », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 15, N° 5 (2021) 2199 - 2208 p.
- [9] - K. N. KEUMEAN, S. B. BAMBA, G. SORO, N. SORO, B. S. METONGO et J. BIEMI, « Concentration en métaux lourds des sédiments de l'estuaire du fleuve Comoé à Grand-Bassam (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). », *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 61, (2013) 4530 - 4539 p.
- [10] - I. DIAGNE, S. DRAME, M. NDIAYE, B. NDIAYE et A. DIOP, « Caractérisation physico-chimique et contamination métallique des eaux usées déversées au niveau de la baie de Hann (Dakar/Sénégal) », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 11, N° 1 (2017) 462 - 472 p.
- [11] - UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME, « The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater - The Untapped Resource. », UNESCO 2017, (2017) 41 p.
- [12] - CENTER FOR COLLABORATIVE INVESTIGATIVE JOURNALISM, « Principal affluent du fleuve Sénégal, la Falémé agonise ». <https://ccij.io/article/senegal-river/>
- [13] - (IRD) INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT, « Préfecture de la région Guyane », (2001) 16 p.
- [14] - A. B. TRAORÉ, « Impact socioéconomique de l'orpaillage dans le cercle de Kéniéba au Mali », *International Journal of Accounting, Finance, Auditing, Management and Economics*, Vol. 3, N° 1 - 2 (2022) 251 - 268 p.
- [15] - B. OUMAR, N. L. EKENGLE et O. A. D. BALLA, « Évaluation du niveau de pollution par les métaux lourds des lacs Bini et Dang, Région de l'Adamaoua, Cameroun », *Afrique Science*, Vol. 10, N° 2 (2014)
- [16] - Y. K. S. ARISTIDE 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*, Vol. 16, (2020) 12 p.
- [17] - K. A. F. YAO, « Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive », PhD Thesis, *Université Montpellier ; Université Félix Houphouët-Boigny (Abidjan, Côte d'Ivoire)*, (2018)

- [18] - K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, S. LOKO, A. M. KOUASSI, G. SORO et J. BIEMI, « Caractérisation des éléments traces métalliques (Mn, Ni, Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Hg, As) dans les eaux superficielles de la commune de Marcory, Abidjan Côte d'Ivoire : cas du village d'Abia Koumassi », *Geo-Eco-Trop*, Vol. 36, (2012) 159 - 174 p.
- [19] - C. M. KILINGWA, S. K. MUTANDA, N. B. MUAMBA, L. K. NZADIMWENA, W. L. SWANA et V. P. KIAMFU, « Evaluation de la Qualité Écologique de la Rivière Musolo à Kinkole Basée sur les Macroinvertébrés Benthiques (Kinshasa, RD Congo) », (2020)
- [20] - MOHAMED CHLAIDA, SAFAA FOUAD, KAOUTAR HAJJAMI et NOZHA COHEN, « Qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de l'Oued Hassar : impacts des eaux usées de la localité de Mediouna (Périurbain de Casablanca, Maroc) », *Afrique Science*, Vol. 10, N°1 (2014)
- [21] - SADIA REMILI et AHMED KERFOUF, « Évaluation de la qualité physico-chimique et du niveau de contamination métallique (Cd, Pb, Zn) des rejets d'eaux usées d'Oran et de Mostaganem (littoral Ouest algérien) », *Physio-Géo. Géographie physique et environnement*, Vol. 7, (2013) 165 - 182 p.
- [22] - CHEIKH DIOP, DOROTHEE DEWAELE, AMINATA TOURE, MATHILDE CABRAL, FABRICE CAZIER, MAMADOU FALL, BAGHDAD OUDDANE et AMADOU DIOUF, « Étude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments côtiers au niveau des points d'évacuation des eaux usées à Dakar (Sénégal) », *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 25, N° 3 (2012) 277 - 285 p.
- [23] - A. K. A. NATCHIA, T. ABOU, D. N. PAUL et G. Y. D. ALBERT, « Suivi de la turbidité et des matières en suspension dans les rivières côtières en milieu tropical : cas de la Mé et de l'Agneby (sud-est de la Côte d'Ivoire) », *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 183, 19103 - 19122 p.
- [24] - F. HAMAIDI-CHERGUI, A. F. ZOUBIRI, M. S. HAMAIDI, A. DEBIB et H. KAIS, « Evaluation de l'efficacité de la station d'épuration de Médéa (Algérie) », (2016)
- [25] - L. AKATUMBILA, M. MABIALA, A. LUBINI et K. PWEMA, « Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau : cas de la rivière urbaine Gombe de Kinshasa/République Démocratique du Congo », (2016)
- [26] - P. G. AMLAN, W. K. CHOUTI, C. A. DEDJIHO, K. R. FANGNON et N. E. CHITOU, « Évaluation de la pollution chimique des eaux par les éléments traces métalliques (ETM) : cas de la rivière Mekrou (nord-ouest Bénin) », *Journal of Applied Biosciences*, Vol. 192, 20331 - 20346 p.
- [27] - J. NAOURA, L. BENAABIDATE et K. F. BENBRAHIM, « Evaluation de la qualité des eaux du fleuve Inaouène, Maroc septentrional [Assessment of water quality of the Inaouene River, Northern Morocco] », *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 10, N° 1 (2015) 60 - 66 p.
- [28] - M. L. EL HACHIMI, A. BOUABDLI et M. FEKHAOUI, « Les rejets miniers de traitement : caractérisation, capacité polluante et impacts environnementaux, mine Zeïda, mine Mibladen, Haute Moulouya (Maroc) », *Environnement, Ingénierie & Développement*, (2013)
- [29] - ABDOURAHAMANE TANKARI DAN-BADJO, OUSSEINI ZAKARIA IBRAHIM, YADJI GUERO, FARIDA MAISSORO MALAM IDI, CYRIL FEIDT, THIBAUT STERCKEMAN et GUILLAUME ECHEVARRIA, « Distribution spatiale des éléments traces métalliques dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 13, N° 1 (2019) 557 - 573 p.
- [30] - P. L. SMEDLEY and D. G. KINNIBURGH, « A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters », *Applied geochemistry*, Vol. 17, N° 5 (2002) 517 - 568 p.
- [31] - MARTIN ALISON, ARIAS JULIANA, LOPEZ JENNIFER, SANTOS LORENA, VENEGAS CAMILO, DUARTE MARCELA, ORTIZ-ARDILA ANDRES, DE PARRA NUBIA, CAMPOS CLAUDIA, and ZAMBRANO CRISPIN CELIS, « Evaluation of the effect of gold mining on the water quality in Monterrey, Bolívar (Colombia) », *Water*, Vol. 12, N° 9 (2020) 2523 p.

- [32] - 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*, Vol. 8, N° 1 (2021) 60 - 85 p.
- [33] - SABINE DANALA DANGA, LEOPOLD EKENGELE NGA, BIENVENU ACHILLE IBRAHIM, DENIS TIKI, LIONELLE ESTELLE MAMDEM et DIEUDONNE LUCIEN BITOM, « Évaluation du niveau de pollution des déchets des sites miniers de Kombo-Laka, Plateau de l'Adamaoua, Cameroun », *Afrique SCIENCE*, Vol. 24, N° 2 (2024) 1 - 14 p.
- [34] - EDJENGTE DOUMO ELVINE PATERNIE, RACHID HAKKOU, LÉOPOLD EKENGELE NGA, LUCIEN DIEUDONNÉ BITOM OYONO, ARMEL ZACHARIE EKO A BESSA, SAID OUBAHA and ABDESSAMAD KHALIL, « Geochemistry and geostatistics for the assessment of trace elements contamination in soil and stream sediments in abandoned artisanal small-scale gold mining (Bétaré-Oya, Cameroon) », *Applied Geochemistry*, Vol. 150, (2023) 105592 p.
- [35] - ABDOURAHAMANE TANKARI DAN-BADJO, DIDIER ADAMOU TIDJANI, TAHAR IDDER, YADJI GUERO, NOMAOU DAN LAMSO, ALI MATSALLABI, JEAN MARIE KARIMOU AMBOUTA, CYRIL FEIDT, THIBAUT STERCKEMAN et GUILLAUME ECHEVARRIA, « Diagnostic de la contamination des eaux par les éléments traces métalliques dans la zone aurifère de Komabangou—Tillabéri, Niger », *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 8, N° 6 (2014) 2849 - 2857 p.
- [36] - O. E. F. M. ILLATOU, « Impacts de l'orpaillage et de l'agriculture sur la qualité des eaux du Liptako nigérien : identification des hot spots des pollutions métalliques et organiques, transferts de connaissances entre recherche et terrain », PhD Thesis, IMT-MINES ALES-IMT-Mines Alès Ecole Mines-Télécom ; Université Abdou Moumouni, (2021)