

Caractérisation du niveau de contamination des eaux de surface par l'orpaillage illicite: Cas de la rivière Mé (sud-est de la Côte d'Ivoire)

[Characterization of the level of contamination of surface water by illegal gold mining: Case of the Mé river (south-east of Ivory Coast)]

Anowa Evrade Larissa EBA¹, Kan Jean KOUAME^{1,2}, Chy Charlène KOUASSI¹, René BALLIET¹, and Serge Kouacou DEH¹

¹Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomatériaux (LSSEG), Côte d'Ivoire

²Université Félix Houphouët Boigny, Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection (CURAT), Côte d'Ivoire

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In a context of strong dependence of Ivorian populations on surface water resources, the Mé River occupies a strategic position, particularly for the supply of drinking water to the city of Abidjan. However, this resource is facing a growing threat due to the intensification of artisanal gold mining activities within its watershed. This study therefore aims to assess the impact of these activities on the water quality of the Mé River, with a view toward the sustainable management of this resource.

The methodological approach first involved a physicochemical analysis of the water resource in relation to the World Health Organization (WHO, 2017) guideline values, followed by a qualitative assessment using contamination and pollution indices based on trace metal elements (TMEs).

The results show an alkaline pH (10.2), low mineralization (113.13 µS/cm), and a very high average turbidity (13,115.78 NTU). The analyses also revealed high concentrations of cadmium (Cd; mean: 36.81 µg/L), copper (Cu; mean: 166.72 µg/L), mercury (Hg; mean: 46.31 µg/L), and lead (Pb; mean: 72.5 µg/L), indicating contamination of anthropogenic origin, directly linked to artisanal gold mining activities.

The contamination index shows a decreasing ranking of TMEs as follows: ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As). Furthermore, the heavy metal pollution index (HPI) reveals that all analyzed water samples (100%) have an HPI value greater than 100, indicating a high pollution risk and rendering the water unsuitable for use.

KEYWORDS: gold panning, ETM, Mé river watershed, pollution index, contamination index.

RESUME: Dans un contexte de forte dépendance des populations ivoiriennes aux ressources en eau de surface, la rivière Mé occupe une place stratégique, notamment pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan. Toutefois, cette ressource fait face à une menace croissante due à l'intensification de l'orpaillage dans son bassin versant. Cette étude vise donc à évaluer l'impact de ces activités sur la qualité de l'eau de la rivière Mé, dans une perspective de gestion durable de cette ressource. L'approche méthodologique a consisté d'abord à une analyse physico-chimique de la ressource en rapport avec les valeurs guides de l'OMS (2017) et ensuite une étude qualitative à l'aide des indices de contaminations et de pollution par les éléments traces métalliques (ETM). Les résultats présentent un pH basique (10,2), une faible minéralisation (113,13 µS/cm) et une turbidité moyenne très élevée (13 115,78 NTU). Les analyses révèlent également de fortes concentrations en cadmium (Cd), (Moy: 36.81 µg/L), cuivre (Moy Cu: 166,72 µg/L), Mercure (Moy Hg: 46.31 µg/L) et en plomb (Moy Pb: 72,5 µg/L), indiquant une contamination d'origine anthropique, directement liée aux activités d'orpaillage. L'indice de contamination, indique un classement décroissant selon les ETM suivants: ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As). Par ailleurs,

l'indice de pollution par les ETM (HPI) révèle que toutes les eaux analysées, soit 100 % ont un HPI supérieur à 100, ce qui signifie un risque élevé de pollution et donc jugées impropres à l'usage.

MOTS-CLEFS: orpaillage, ETM, bassin versant rivière Mé, indice de pollution, indice de contamination.

1 INTRODUCTION

Les ressources en eau douce constituent un patrimoine essentiel pour le bien-être des populations, la préservation des écosystèmes et le développement économique. Cependant, le problème de l'accès à l'eau devient crucial car la qualité de cette denrée essentielle à tous les besoins de la vie est de nos jours mise en péril, en raison de la diversité et de la toxicité des émissions polluantes, de la croissance démographique accélérée et des activités humaines [1]. Selon [2], la qualité de ces ressources est menacée par diverses activités anthropiques, notamment l'exploitation minière illégale, qui s'intensifie dans de nombreuses régions du monde.

En Afrique de l'Ouest, le secteur de l'exploitation aurifère a connu un développement intense au cours des trois dernières décennies, propulsé par la hausse des prix de l'or [3]. Cela a entraîné la prolifération et l'intensification de l'orpaillage anarchique [4]. Aujourd'hui, l'orpaillage contribue à la dégradation de l'environnement dans toute l'Afrique et plus particulièrement en Côte d'Ivoire [5]. Durant les dix dernières années, de multiples recherches ont été conduites en Côte d'Ivoire dans l'objectif de décrire et d'apprécier le degré de pollution des ressources en eau (de surface et souterraines) ainsi que des sédiments dans les milieux miniers (industriels et artisanaux). En effet, les travaux de [6], [4] ont révélé une contamination des eaux de surface et des sédiments en As, Mn, Ni et Zn dans la zone d'orpaillage de Kokumbo et ceux de [5] dans le département de Dimbokro, une contamination en As, Mn, Ni et Pb. Dans la zone minière de Zouan-Hounien, [7] ont également montré une forte contamination des eaux souterraines en Hg, (2233,48 (puits) et 427,94 (forage) et Pb, (3,10 (Puits), 4,08 (forage)). La rivière Mé, située dans le sud-est de la Côte d'Ivoire, illustre bien cette problématique. Or, le gouvernement ivoirien a choisi cette rivière comme source alternative pour le renforcement de la capacité d'alimentation en eau potable du District d'Abidjan. Alors que, cette rivière traverse une zone très favorable à l'agriculture dans laquelle les techniques culturales exigent l'usage excessif des produits phytosanitaires ([8], [9]). A cela s'ajoute l'exploitation clandestine de l'or qui est devenue une source potentielle de pollution de cette rivière ([10]). Ce cours d'eau est donc aujourd'hui soumis à une pression croissante liée à l'orpaillage artisanal sur l'ensemble de son bassin versant, créant ainsi des problèmes environnementaux tels que, la dégradation des terres agricoles, la pollution et la destruction du lit du cours d'eau, etc... Selon [11], la rivière Mé contribue à l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan en offrant une capacité de production de 259 000 m³/jour environ.

Le défi actuel consiste à établir un équilibre entre la préservation de la qualité et de la quantité des ressources en eau et l'environnement tout en répondant aux besoins d'exploitation des ressources naturelles, notamment l'or, pour subvenir aux exigences socio-économiques des communautés. L'activité d'orpaillage requiert quotidiennement des volumes considérables d'eau, qu'elle soit de surface ou souterraine, entraînant des rejets de déchets solides, susceptibles d'altérer la qualité des eaux superficielles et souterraines. Cette étude vise donc à évaluer les impacts de l'activité d'orpaillage sur la qualité de l'eau de la rivière Mé, afin de promouvoir une gestion durable de cette ressource face à ce défi environnemental omniprésent.

2 MATERIEL ET METHODE

2.1 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Cette étude a lieu sur la Mé, un cours d'eau côtier situé dans la région de la Mé, au sud de la Côte d'Ivoire. La Mé prend sa source au nord d'Adzopé sous le nom de "Min" ou "Mè", puis coule du nord au sud en parallèle avec le cours inférieur du fleuve Comoé et de l'Agneby, avec le Mafou comme principal affluent. Elle draine un bassin versant d'une superficie de 4140 km² et une longueur de 140 km, et est comprise entre les latitudes 5°30 et 6°20 Nord et les longitudes 3°30 et 4°10 Ouest. (Fig. 1)

Les régions traversées par la Mé sont caractérisées par la présence de nombreuses collines dont l'altitude moyenne ne dépasse pas 100 mètres et sont séparées par de longues vallées à l'aspect des précipices, d'où partent plusieurs marigots et rivières ([12]). A cet effet, la Mé et ses affluents empruntent plusieurs directions d'écoulement dont celle du cours d'eau principal ([13]). (Figure 2).

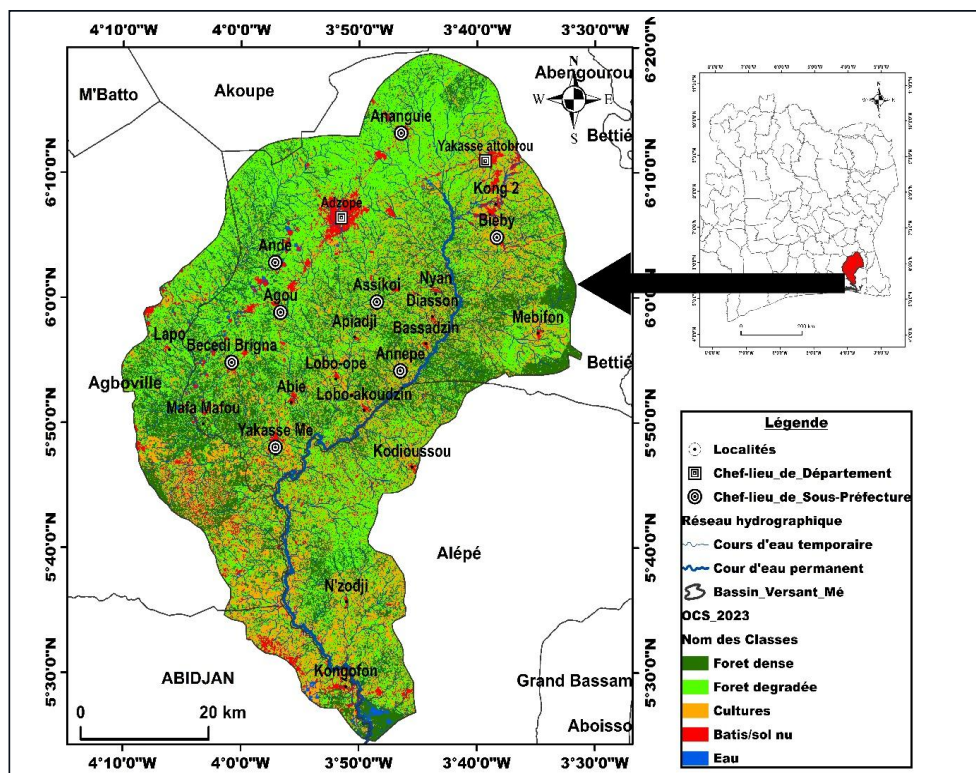


Fig. 1. Carte de la zone d'étude

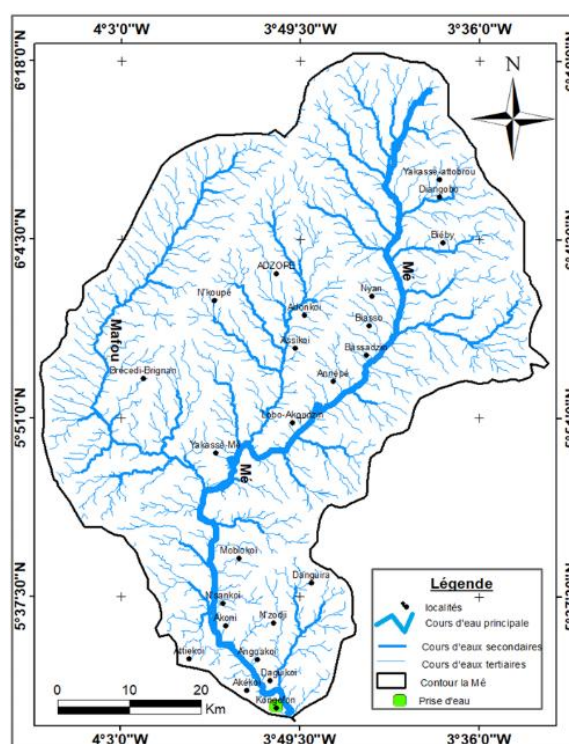


Fig. 2. Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude (SORO, 1987)

Ainsi, le bassin de la Mé est parcouru par de nombreux cours d'eau en raison de son relief et de l'abondance des pluies justifiée par une pluviométrie moyenne annuelle de 1706 mm sur la période 1996-2016 ([14])

La densité du réseau hydrographique varie en fonction de la nature du substratum constitué à la fois des Formations du Socle (Schistes et grauweekes; Granodiorites et diorites; Granitoïdes subalcalins à deux micas; Granites ferrugineux; et de formation métamorphique), et de Formations Sédimentaires, qui montrent une discontinuité marquée par la présence de la lagune Aghien qui recueille des alluvions quaternaires provenant de la Mé ([13])

Sur le plan économique, la région de la Mé repose essentiellement sur des activités agricoles à travers les cultures de rente (le cacao, l'hévéa et le palmier à huile) et les cultures Vivrières (la banane plantain, le manioc, l'igname, le maïs etc.) et secondairement de quelques unités industrielles spécialisées dans la transformation du bois. A cela s'ajoutent les activités clandestines d'orpaillage qui sont menées, en particulier autour des cours d'eau (Fig. 3). Ces pratiques, associées aux rejets non traités issus de l'agriculture, des zones urbaines et de l'industrie, sont considérées comme l'une des principales causes de la dégradation de la qualité de la rivière Mé au cours de ces dernières décennies.



Fig. 3. Activités d'orpaillage autour de la rivière Mé (kouassi-chy 2024)

La région de la Mé fait partie du régime équatorial de transition, avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches, avec une végétation de forêt dense. cette végétation a été réduite à de petits ilots, dont certains ont été classés ([13]. Toutefois, avec les activités de prospection et d'exploitation minières, on assiste à une réduction de ce couvert végétal.

2.2 MATERIEL

Le matériel utilisé est constitué de:

Matériel de terrain est constitué: d'un GPS de type GARMIN 64 SX pour la prise de coordonnées des sites de prélèvement, d'un appareil photo numérique pour les prises de vue,

Appareils de mesure *in situ* dont un multi-paramètre de type (HANNA 9829 pour *Ph* et *T*), un turbidimètre, et un conductimètre (HANNA 9835)

Outils de prélèvement des échantillons sont constitués: un sceau pour le prélèvement des eaux; des flacons stériles en PET de 0,5 litre pour collecter des échantillons d'eaux destinées au dosage des ETM; et une glacière pour la conservation des échantillons

Matériel de laboratoire est constitué: d'un spectromètre d'émission optique à plasma couplé inductif (ICP-OES) Agilent 5110, pour le dosage des éléments traces métalliques (ETM)

Les données sont constituées: de données cartographiques, et de données issues de l'analyse physico-chimiques.

2.3 APPROCHE METHODOLOGIE

La principale méthode développée pour atteindre l'objectif de cette étude est la méthode d'étude qualitative des eaux à l'aide des indices de contaminations et de pollution par les ETM.

2.3.1 POINTS DE PRELEVEMENT ET MESURE IN SITU DES PARAMETRES PHYSIQUES

Pour le prélèvement des échantillons, douze (12) points ont été identifiés sur le cours d'eau principal de la rivière Mé et certains de ses affluents, en tenant compte de la proximité des zones d'orpaillage (Fig. 4).

Elle a consisté à mesurer les paramètres dans le cours d'eau ou dans un sceau en plastique préalablement rincés. Les paramètres mesurés in situ sont la température (T°), le potentiel d'Hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), les solides totaux dissout (TDS), et la turbidité.

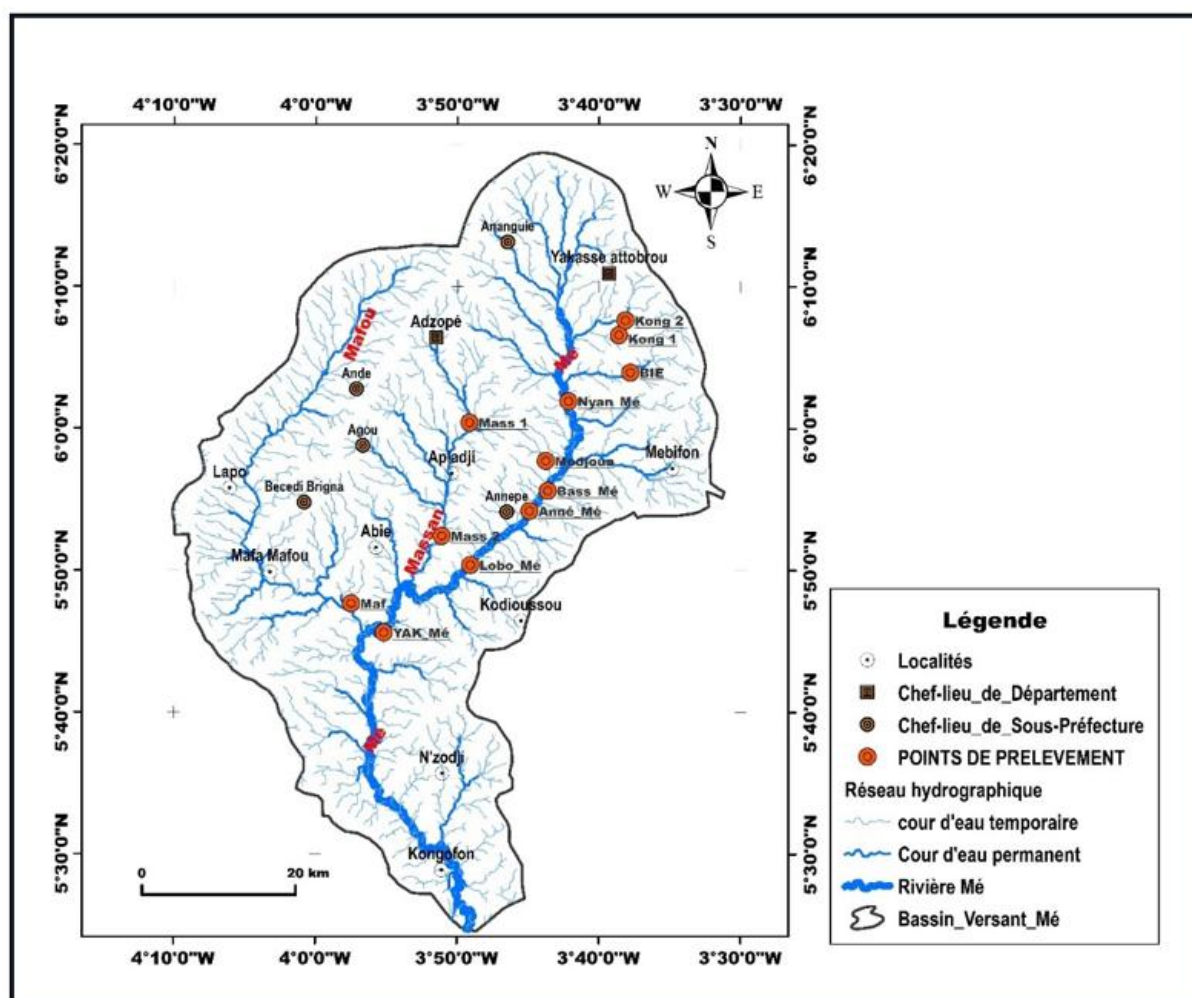


Fig. 4. Carte d'échantillonnage des eaux de surfaces du bassin versant de la Mé

2.3.2 PRELEVEMENTS ET ANALYSES DES PARAMETRES AU LABORATOIRE

Le prélèvement a été fait dans des flacons en polyéthylène (PET) préalablement rincés avec l'eau à prélever. Une fois remplis à ras pour éviter toute présence de bulles d'air, les flacons sont hermétiquement fermés, étiquetés, conservés. Tous ces échantillons ont été conservés à basse température dans des glacières contenant des packs réfrigérants et acheminés au laboratoire central de la SODECI pour les différentes analyses.

Le dosage des paramètres a porté sur les ETM que sont: l'Arsenic (As), le Cadmium (Cd), le Cuivre (Cu), le Fer (Fe), le Mercure (Hg), le Manganèse (Mn), le Plomb (Pb) et le Zinc (Zn). Cette analyse a été faite à l'aide d'un spectromètre d'émission optique à plasma couplé inductif (ICP-OES) Agilent 5110. C'est un instrument d'analyse qui permet de déterminer la composition chimique d'un échantillon à partir de la lumière émise par les atomes excités dans un plasma, et qui passent à des niveaux d'énergie supérieurs.

Le spectromètre sépare la lumière émise en fonction des longueurs d'onde et un détecteur mesure l'intensité de la lumière pour chaque longueur d'onde, ce qui permet ainsi de déterminer la concentration de chaque élément dans l'échantillon.

2.3.3 METHODE DE CLASSIFICATION QUALITATIVE DES EAUX

Pour cette étude, deux (02) indices ont été calculés pour estimer l'intensité de la contamination. Il s'agit de l'Indice de Contamination (IC) et de l'Indice de pollution par les ETM (HPI).

L'utilisation de ces indices a pour but de transformer les données de qualité de l'eau de surface en informations compréhensibles et utilisables par le public ([15]).

Indice de Contamination (IC)

Il exprime le rapport entre la concentration de l'élément mesuré et une concentration de référence, ([16]) (Equation 1).

$$IC = \frac{Ci}{CMA} \quad (1)$$

Avec IC: Indice de contamination; Ci: Concentration du métal sur le site; CMA: Concentration Maximale Admise.

Dans cette étude, les valeurs prises comme référence sont les standards de [17], notamment la concentration maximale admise (CMA).

Après le calcul des IC, On procède à une comparaison des valeurs sur les sites en se basant sur le calcul de l'indice de contamination moyen (ICM) et l'indice de contamination polymétallique ou total (ICMT). Selon Fahssi et al. (2016), les sites sont organisés de la manière suivante:

- IC < 2: Origine naturelle, aucune contamination;
- IC > 2: Contamination (activité anthropique).

L'ICM représente la moyenne arithmétique d'un paramètre sur les sites considérés, et l'ICMT la moyenne arithmétique de l'ensemble des ETM considérés. Ainsi les sites ayant des valeurs en ICM > 5 sont confrontés à une pollution métallique.

Indice de Pollution par les ETM (HPI)

Le calcul de l'indice de pollution permet de mesurer la pollution générale des grandes étendues d'eau par les ETM (HPI). C'est une méthode suggérée par [18]. Des auteurs dont [19] et [5], l'ont utilisé. L'indice HPI considère la toxicité relative de chaque métal en attribuant un coefficient ou un poids (Wi) à chaque paramètre sélectionné. Le système de notation est une échelle subjective variant entre 0 et 1, et son choix se base sur l'importance des critères de qualité individuels de manière comparative ou peut être évalué en rendant les valeurs inversement proportionnelles à la norme suggérée (Si) pour le paramètre. Les indices HPI ont été calculés à partir de l'équation 2:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n Wi Qi}{\sum_{i=1}^n Wi} \quad (2)$$

Avec

$$Wi = \frac{K}{Si} \quad (3)$$

$$Qi = \left(\frac{Vi}{Si} \right) * 100 \quad (4)$$

On a: Qi l'indice d'un paramètre; Wi la pondération d'un paramètre; Vi la valeur contrôlée d'un paramètre dans l'eau en µg/L; K la constante de proportionnalité égale à 1; Si la valeur standard d'un paramètre (ligne directrice adoptée égale limite OMS 2017); et n le nombre de paramètres.

Selon [20], la qualité de l'eau basée sur le HPI peut être classée en trois catégories (tableau 1).

Tableau 1. Classes définies par HPI (Prasad et al., 2014)

Valeur de l'indice HPI	Qualité de l'eau
HPI < 100	Risque faible
HPI = 100	Risque de seuil
HPI > 100	Risque élevé (Impropre)

3 RESULTATS

3.1 CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA ME

3.1.1 STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES RESULTATS PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

Le tableau II présente les données statistiques (minimum, maximum, moyenne) relatives aux paramètres physico-chimiques des eaux de surface échantillonnées.

Tableau 2. Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux de la Mé et ses Affluents

Variable	Unité	Min	Max	Moy	Directives OMS (2022)
Température	°C	24.69	29.5	26.82	25
Potentiel d'hydrogène (Ph)	-	9.06	11.55	10.20	6.5-8.5
Conductivité Électrique (CE)	µS/cm	43	300	113.13	250
Turbidité	NTU	24.8	46000	4445.23	5

3.1.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES PARAMETRES PHYSIQUES DES EAUX DE SURFACE

➤ Température

Les températures des eaux varient de 25,05°C au niveau du site Mass 1 à 29.4°C au niveau de Kong 1 avec une moyenne de 26.82 °C. La plupart des valeurs sont au-dessus de la norme OMS (Fig. 5).

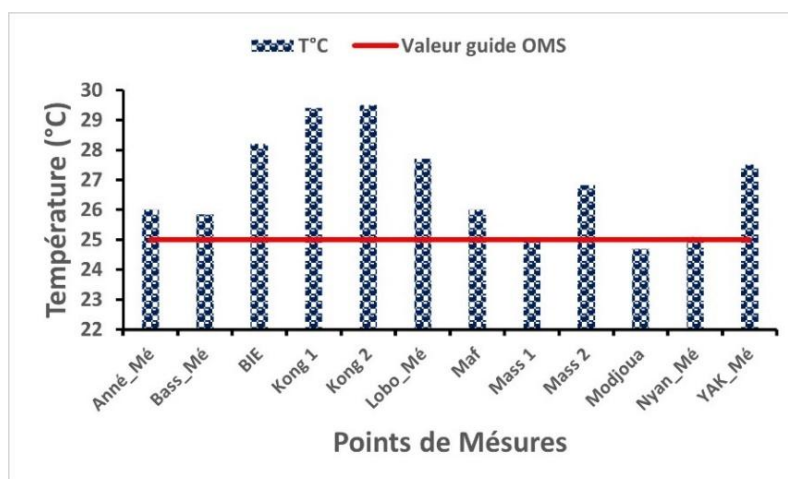


Fig. 5. Évolution spatiale de la température des eaux de surface

➤ Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH varie de 9.06 observé au niveau Mass 1 à 11.5 mesuré au niveau Anné_mé La valeur moyenne du pH est de 10.20. On observe que toutes les eaux échantillonnées ont un pH supérieur à celui de la norme OMS (Fig.6). Elles sont extrêmement basiques.

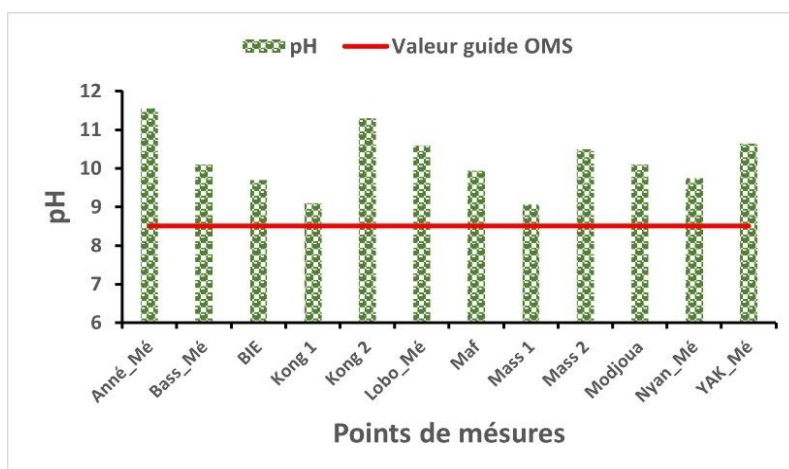


Fig. 6. Évolution spatiale du pH des eaux de surface

➤ Conductivité Électrique (CE)

La conductivité électrique mesurée varie entre 43 $\mu\text{S}/\text{cm}$ au niveau de Modjoua et 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ sur le site Mass 1. La valeur moyenne de la conductivité électrique est de 113.13 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Toutes les valeurs, hormis celle de Mass 1 (300 $\mu\text{S}/\text{cm}$), sont en dessous de la norme OMS. Les eaux sont donc faiblement minéralisées (Fig.7).

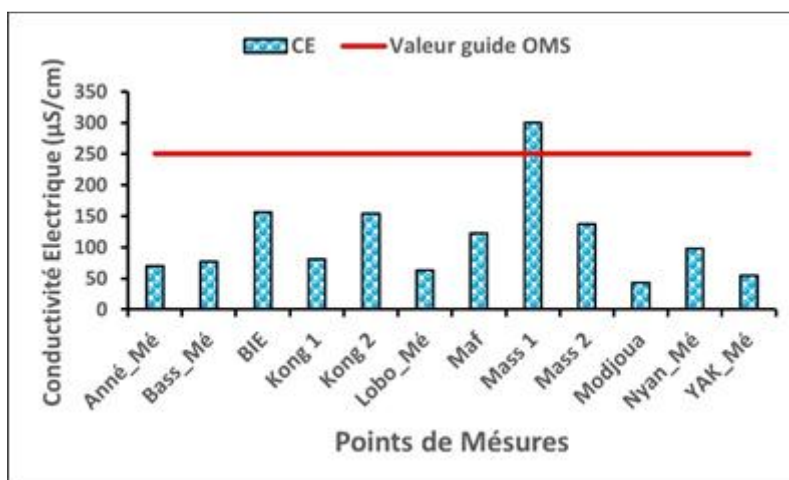


Fig. 7. Évolution spatiale de la conductivité électrique des eaux de la Mé

➤ Turbidité

Les valeurs de turbidité mesurées sont très élevées. Elles sont toutes au-delà de la norme OMS (Fig.8). Cependant, la plus faible valeur (24.8 NTU) est observée au niveau de Mass 1, et la plus forte (46000 NTU) sur le site Kong 2 qui est une zone d'orpaillage très intense.

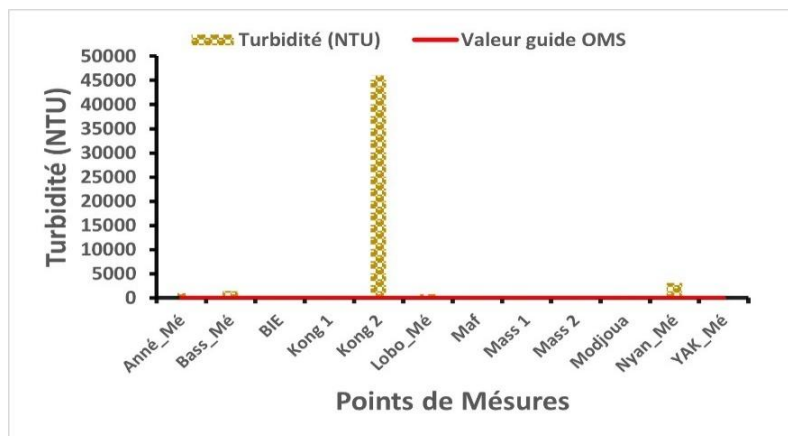


Fig. 8. Évolution spatiale de la turbidité des eaux de surface

3.1.3 CARACTERISTIQUES METALLIQUES DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIERE ME

3.1.3.1 STATISTIQUE DES ETM DANS LES EAUX DE SURFACE

Le tableau suivant présente les statistiques élémentaires des ETM des eaux de surface du bassin de la Mé

Tableau 3. Statistiques élémentaires des ETM des eaux de surface

Variables	Min	Max	Moy	Directives OMS (2022)
Arsenic (As)	2	32.8	12.17	<10
Cadmium (Cd)	0	100.7	36.81	<3
Cuivre (Cu)	10	280	166.67	<100
Fer (Fe)	15	450	204.58	<300
Mercure (Hg)	7.5	115	46.31	<6
Manganèse (Mn)	24	99	72.5	<50
Plomb (Pb)	15.6	216	94.75	<10
Zinc (Zn)	100	450	221.67	<3000

3.1.3.2 REPRESENTATION GRAPHIQUE DES CONCENTRATIONS DES ETM DANS LES EAUX

➤ Arsenic

Les teneurs en arsenic dans les eaux de surface varient de 2 à 32,8 µg/L avec une moyenne de 12.17 µg/L. Les teneurs les plus fortes qui dépassent largement la valeur guide de l'OMS (10 µg/L) se rencontrent sur les sites Bass_mé (32.8 µg/L), Kong1 (28.8 µg/L) et Mass 2 (21.6 µg/L), et les très faibles se rencontrent à Yakassé-Mé, Bie et Lobo-Mé (Fig. 9). Les fortes concentrations sont réparties sur les schistes, et grauwackes.

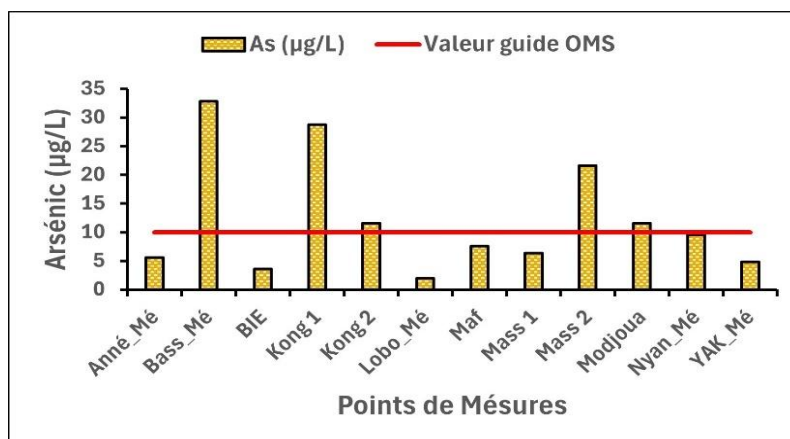


Fig. 9. Variation des concentrations en As des eaux de surface

➤ Cadmium

Les concentrations de cadmium sont comprises entre 0 et 100.7 µg/L avec une moyenne de 36.31 µg/L. La fig. 10 montre que les concentrations sont au-dessus de la norme OMS qui est de 0 µg/L. Les plus fortes valeurs se retrouvent au niveau des sites Modjoua (100.7 µg/L), Anné_mé (72.2 µg/L), et Maf (53.2 µg/L), les valeurs faibles (0.1 - 53.2 µg/L) sur les sites de Kong 1, Kong 2, BIE, Bass_mé. Les sites de Masse 2 et Lobo-Mé ont une concentration de 0 µg/L en cadmium.

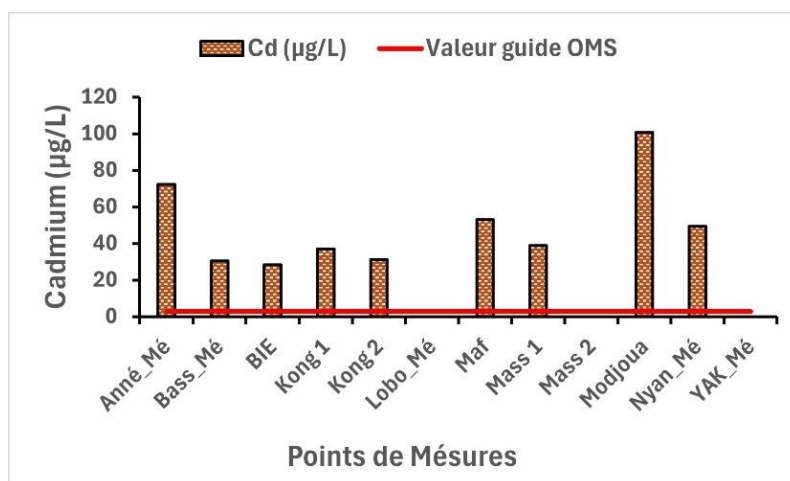


Fig. 10. Variation des concentrations en Cd dans les eaux de surface

➤ Cuivre

Les teneurs en cuivre varient de 10 µg/L à 280 µg/L avec une moyenne de 166.67 µg/L. La plupart des concentrations observées sur les différents sites sont au-dessus de la norme OMS qui est de 100 µg/L (fig. 11). Les faibles concentrations, comprises entre 10 - 50 µg/l, sont observées à Kong 1 et BIE. Les concentrations modérées, oscillant entre 51 - 150 µg/l, se situent sur les sites Nyan, Modjoua, Bass et Mass 2. Enfin, les fortes concentrations, (151- 280 µg/l), se retrouvent Anné-Mé, Kong2, Lobo-Mé, Maf Massi1 et Yakassé-Mé (fig.11).

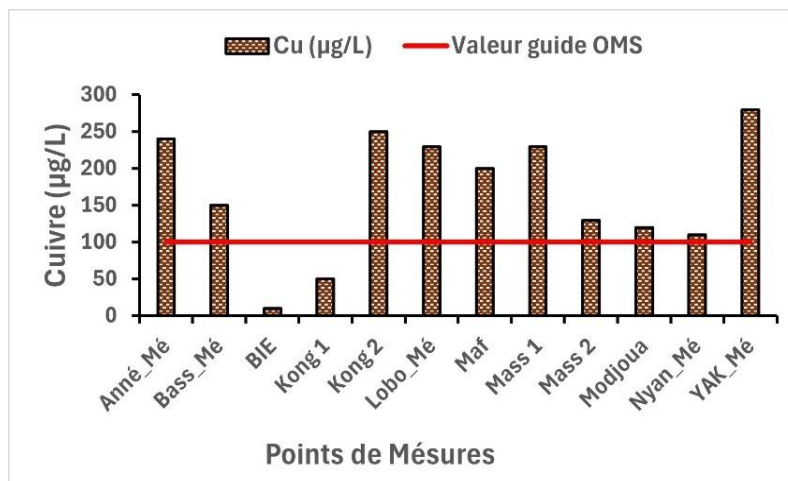


Fig. 11. Variation des concentrations en Cu dans les eaux de surface

➤ Fer

Les concentrations du Fer oscillent entre 15 µg/L et 450 µg/L avec une valeur moyenne de 204.58 µg/L inférieure à la valeur guide de l'OM (300 µg/L). Les sites Mass 1 (450 µg/L) et Yak_mé (360 µg/L) et Nyan_mé (340 µg/L) ont les concentrations les plus élevées (Fig.12).

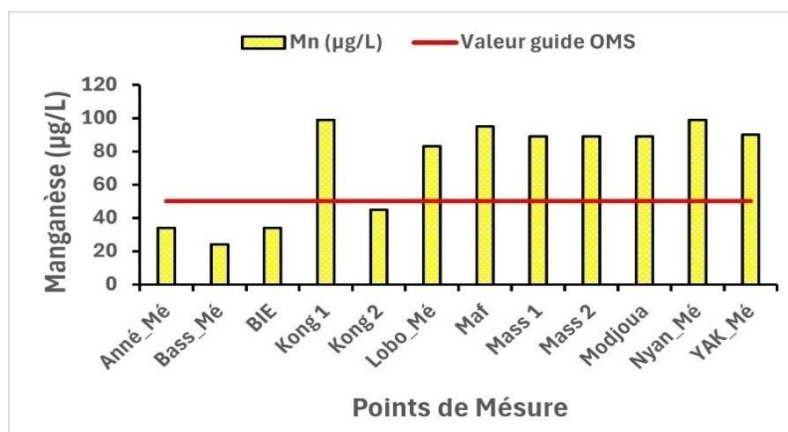


Fig. 12. Variation des concentrations en Fe dans les eaux de surface

➤ Mercure

Les teneurs en mercure varient de 7.5 µg/L à 115 µg/L (Kong 2) pour une moyenne de 46.31 µg/L, largement au-dessus de la norme OMS. La figure 16 montre la variation du mercure dans les eaux de surface dont les concentrations les plus élevées s'observent à Masse 2, Bass-Mé et Kong2 (Fig.13).

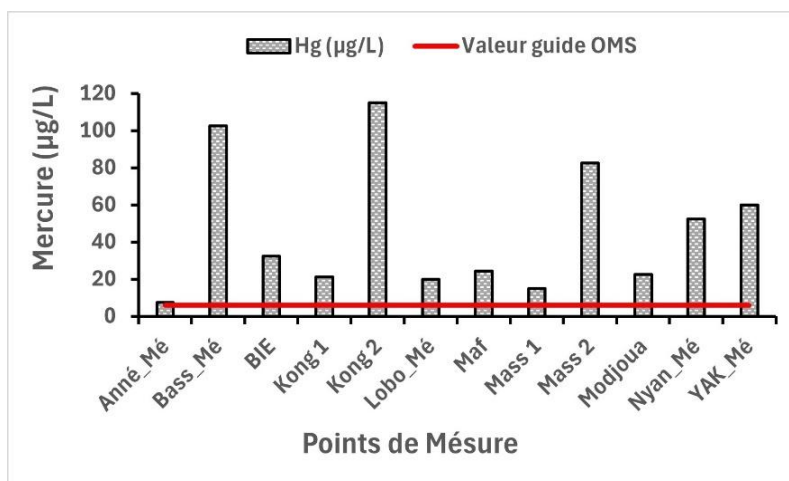


Fig. 13. Variation des concentrations en Hg dans les eaux de surface

➤ Manganèse

Les teneurs en manganèse sont comprises entre 24 µg/L et 99 µg/L avec une moyenne de 72.5 µg/L au-dessus de la norme OMS (50 µg/L). Les sites de fortes teneurs sont: Kong 1 et Nyan_mé (99 µg/L), Maf (95 µg/L), Yak_mé (90 µg/L) et (89 µg/L) sur les sites Modjoua, Mass 2 et Mass 1 (Fig.14).

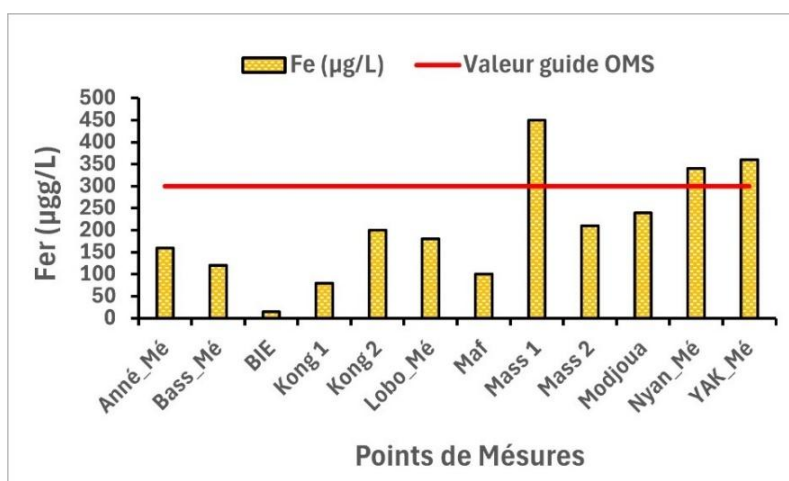


Fig. 14. Variation des concentrations en Mn dans les eaux de surface

➤ Plomb

Les teneurs en plomb sont comprises entre 15.6 µg/L et 216 µg/L avec une moyenne de 94.75 µg/L largement au-dessus de la norme OMS (Fig.15). Les plus grandes valeurs se retrouvent sur les sites Mass 2 (216 µg/L); Kong1 (204 µg/L), Modjoua (132 µg/L) et BIE (121.2 µg/L).

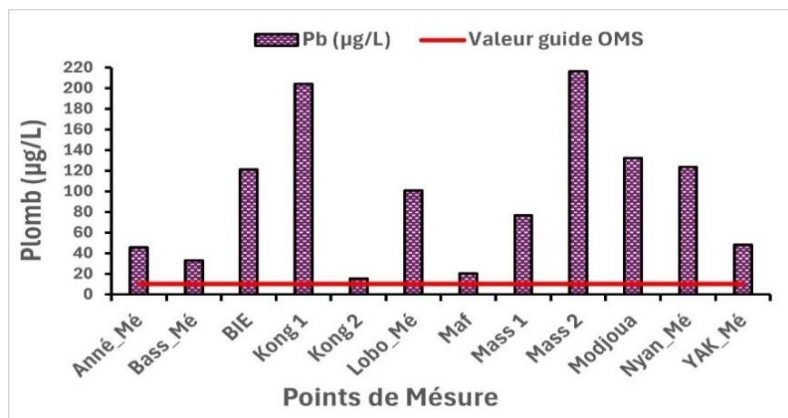


Fig. 15. Variation des concentrations en Pb dans les eaux de surface

➤ Zinc

Les teneurs en zinc varient de 100 µg/L à 450 µg/L avec une moyenne de 221.67 µg/L. Les valeurs les plus élevées s'observent sur les sites Yak_mé (450 µg/L), Maf (350 µg/L) et Mass 2 (320 µg/L). Cependant, toutes ces valeurs sont largement en dessous de la norme OMS (Figure 16).

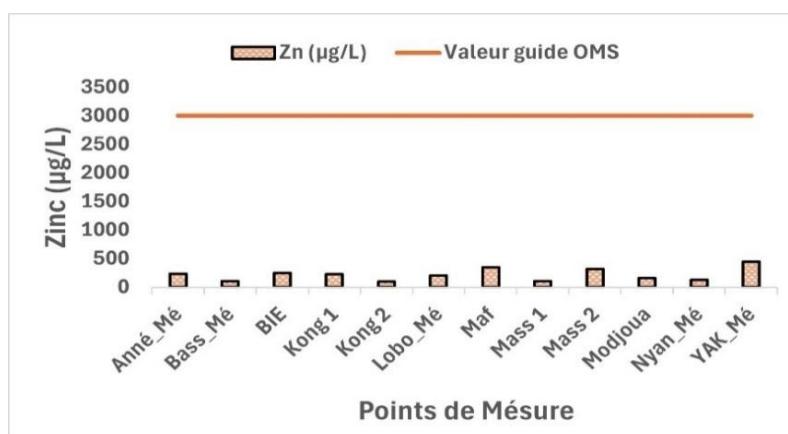


Fig. 16. Variation des concentrations en Zn dans les eaux de surface

Les concentrations de zinc, comprises entre (100 et 450 µg/l), se répartissent en trois niveaux. Les valeurs les plus faibles, entre (100 et 160 µg/l), se trouvent en périphérie du bassin notamment à Kong 2; Modjoua; Nyan_mé; Bass_mé et Mass 1. Les concentrations modérées, allant de (161 à 250 µg/l), sont situées autour du cours d'eau principal sur les sites de Kong 1; BIE; Anné_mé; et Lobo_mé. Enfin, les niveaux les plus élevés, de (251 à 450 µg/l), se localisent sur le cours d'eau principale et ses affluents précisément sur les sites de Mass 2; Maf et Yak_mé.

3.2 ÉTUDE QUALITATIVE DES EAUX DE LA MÉ

3.2.1 INDICE DE CONTAMINATION (IC)

Le tableau ci-dessous présente les résultats récapitulatifs des indices de contamination dans les eaux de la Mé. Ces résultats montrent que les IC varient selon les ETM étudiés d'un site à l'autre (Tableau IV). Ainsi:

- Fe, Mn et Zn ont des IC < 2 sur tous les sites;
- Cu à des IC < 2 sur presque tous les sites;
- As, Cd, Hg et Pb présentent des IC > 2 sur presque tous sites de prélèvements;

Tableau 4. IC, ICM et ICMT des ETM dans les eaux de surface

Sites	As	Cd	Cu	Fe	Hg	Mn	Pb	Zn	ICM _t
Anné_mé	0.56	24.07	2.4	0.53	1.25	0.68	4.56	0.08	4.27
Bass_mé	3.28	10.13	1.5	0.40	17.08	0.48	3.3	0.04	4.53
BIE	0.36	9.50	0.1	0.50	5.42	0.68	12.12	0.08	3.6
Kong 1	2.88	12.35	0.5	2.27	3.54	1.98	20.4	0.08	5.25
Kong 2	1.16	10.45	2.5	0.67	19.17	0.9	1.56	0.03	4.56
Lobo_mé	0.2	0	2.3	0.60	3.33	1.66	10.08	0.07	2.28
Maf	0.76	17.73	2	0.33	4.08	1.9	2.04	0.12	3.62
Mass 1	0.64	12.98	2.3	1.5	2.5	1.78	7.68	0.04	3.68
Mass 2	2.16	0	1.3	0.70	13.75	1.78	21.6	0.11	5.18
Modjoua	1.16	33.57	1.2	0.80	3.75	1.78	13.2	0.05	6.94
Nyan_mé	0.96	16.47	1.1	1.13	8.75	1.98	12.36	0.04	5.35
Yak_mé	0.48	0	2.8	1.20	10	1.8	4.8	0.15	2.65
ICM	1.22	12.67	1.67	0.72	7.72	1.45	9.48	0.07	

IC_M = indice de contamination moyen; ICM_T = indice de contamination moyen polymétallique ou total.

- Les IC > 2 indiquent l'influence des activités d'orpaillage et la dégradation de la qualité des eaux de surface sur les sites (Figure 17).
- Les ICM < 2 (faibles) sont observés au niveau de Zn (0,07), Fe (0,72), As (1,22), Mn (1,45) et Cu (1,67) tandis que ceux du Hg (7,72), Pb (9,48), et Cd (12,67) présentent des valeurs élevées de ICM > 2. L'analyse des indices de contamination moyens (ICM) permet d'établir la classification suivante: **ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As) > ICM (Fe) > ICM (Zn).**

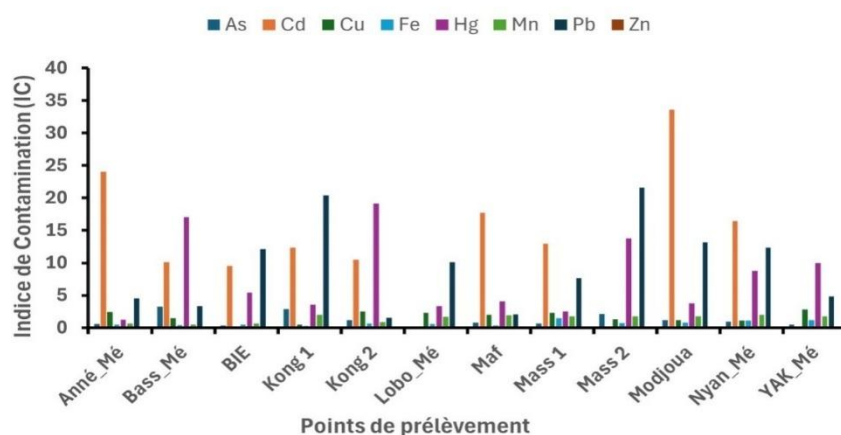


Fig. 17. Évolution de l'IC dans les eaux de la Mé

3.2.2 HPI DES EAUX DE LA ME

Les valeurs de l'indice de pollution (HPI) par les ETM des eaux sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Comme observé dans le tableau V, sur les douze (12) échantillons analysés, les valeurs de HPI obtenues sont comprises entre 223,78 et 1812,84, donc supérieures à 100, valeur au-dessus de laquelle les eaux sont considérées comme contaminées par les ETM. Toutes les eaux échantillonnées sur l'ensemble du bassin versant, soit 100 % présentent donc un risque élevé de pollution et impropre à la consommation.

Tableau 5. Indices de pollution par les ETM des eaux de surface du bassin versant de la Mé

Points de prélèvements	Valeurs de HPI	Qualité de l'eau
Anné_mé	1197	Risque élevé (impropre)
Bass_mé	941.70	Risque élevé (impropre)
BIE	726.79	Risque élevé (impropre)
Kong 1	966.29	Risque élevé (impropre)
Kong 2	953.43	Risque élevé (impropre)
Lobo_mé	223.78	Risque élevé (impropre)
Maf	944.68	Risque élevé (impropre)
Mass 1	768.75	Risque élevé (impropre)
Mass 2	643.16	Risque élevé (impropre)
Modjoua	1812.84	Risque élevé (impropre)
Nyan_mé	1135.39	Risque élevé (impropre)
Yak_mé	308.89	Risque élevé (impropre)

4 DISCUSSION

4.1 PARAMETRESPHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

L'analyse des paramètres physico-chimiques révèle une température des eaux qui varie de 24,7°C à 29,5°C, avec une moyenne de 27°C. Ces eaux sont légèrement plus chaudes comparativement à la valeur limite de l'OMS 2017 (< 25°C). Cependant, ces valeurs restent acceptables car inférieures à la température moyenne des eaux de consommation en zone tropicale humide (30°C) ([21]). Les travaux réalisés dans les zones minières par [19] et [22] à Divo; [5] à Dimbokro etc. ont donné également les mêmes résultats, avec des valeurs de Température comprises entre 25 et 30 °C. Contrairement à [4] à Kokoubo, qui ont trouvé des valeurs plus élevées (comprises entre 25,2° et 32,4°). En effet, entre 10 et 30 °C, la température n'a qu'un effet négligeable sur la mobilité des métaux ([23]). Cependant, dans une zone dans laquelle se développe l'activité minière, une température moyenne des eaux inférieure à 30°C pourrait influencer le drainage minier acide (DMA) qui est considéré comme l'une des menaces les plus graves à long terme pour les ressources en eau et la vie aquatique ([24]). Le pH des eaux varie de 9.1 à 11.55, avec une moyenne de 10,2. Cela indique que les eaux analysées sont fondamentalement agressives et peuvent présenter des risques d'incrustation. Ces valeurs sont supérieures à celles trouvées par [25] et [26] dans les eaux de Hiré qui est une zone d'activité minière. En effet, dans une zone d'extraction d'or, le pH figure parmi les éléments naturels cruciaux régissant la mobilité des éléments traces métalliques (ETM) à la frontière eau-sédiment et joue un rôle significatif dans l'adsorption des métaux ([4]). D'après [27], une diminution du pH provoque une hausse significative de la solubilité des éléments traces métalliques (ETM) et de leur mobilité, tandis qu'un pH alcalin restreint le transfert des métaux de l'état solide à l'état aqueux ([28]). La conductivité électrique quant à elle, fluctue entre 43 µS/cm et 300 µS/cm, avec une moyenne de 113.13 µS/cm. Cela montre que les eaux sont en grande partie faiblement minéralisées. Pour ce qui concerne la turbidité, les valeurs obtenues sont très élevées, avec une moyenne de 13115.78 NTU. Ces eaux reçoivent des effluents de traitement de minerais du fait du développement de l'orpaillage qui se déroule près des cours d'eau environnants. Cette pression sur les cours d'eau dans les zones d'orpaillage a été mise en exergue par plusieurs auteurs dont [29] à Hiré, [30] à Zouan-Hounien, [4] à Kokumbo, [5] à Dimbokro, [31] en République du Congo etc... De plus, les déchets liquides issus de l'orpaillage ont une teneur élevée en matières en suspension qui provoquent la turbidité de l'eau ([32]). La turbidité des eaux de surface du bassin versant de la Mé est liée aux activités anthropiques que sont l'agriculture et l'orpaillage. Hormis la conductivité électrique, toutes les moyennes des paramètres déterminées sont supérieures aux différentes normes [17].

4.2 ELEMENTS TRACES METALLIQUES DANS LES EAUX

Les teneurs moyennes des éléments traces métalliques (ETM) que sont le Fe (204.58 µg/L), le Zn (221.67 µg/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. Cependant, les concentrations en Fe supérieure à la limite ont été détectées sur les sites Mass1 (450 µg/L), Nyan_mé (340 µg/L), Yak_mé (360 µg/L). Selon [4] qui au contraire ont trouvé une quantité moyenne supérieure aux normes OMS dans les eaux de Kokumbo (7,28 mg/L), ces concentrations pourraient être liées à l'impact des mines artisanales dans la zone, et constituent un important souci

environnemental. Pour les autres ETM, le manganèse (72.2 µg/L), le cadmium (36.81 µg/L), le Cuivre (166.67 µg/L), l'arsenic (12.17 µg/L), le mercure (46.31 µg/L) et le Plomb (94.5 µg/L), les teneurs moyennes sont largement supérieures aux normes admises par l'OMS. Ces concentrations pourraient être liées aux différentes mines artisanales présentes dans la zone. En effet les effluents chargés de métaux et la lixiviation des résidus solides provenant de ces activités sont déversés directement dans l'environnement. Concernant le Manganèse, un excès 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 ([33]).

Pour le mercure, le site Kong 2 a enregistré la plus forte teneur (115 µg/L). C'est un effluent liquide provenant d'un site de lavage de minerai. Dans la zone d'orpaillage de Zouan-Hounien, des teneurs élevées en mercure ont été observées par [30]. Aussi, Dans la zone d'orpaillage de Kokumbo, des teneurs élevées en arsenic (56 µg/L) ont été également observées par [4]. En Côte d'Ivoire, les travaux réalisés dans les environnements miniers de Divo et Kokumbo ont montré de fortes teneurs en Fe et Mn ([34]), [35]; [19] et [22]). Ailleurs, Les travaux de [36] et [37] ont respectivement mis en évidence une contamination en Fer, Aluminium, Manganèse et Arsenic dans les rejets d'eau de la mine du Haut Beht dans la partie centrale du Maroc et un enrichissement des eaux en Cadmium, Argent et cyanure dû à l'exploitation de l'or à Monterrey en Colombie.

Par ailleurs, le pH joue un rôle important dans l'adsorption des métaux. Dans les eaux de surface du bassin, la moyenne du pH est de 10.2. En effet, une baisse de pH entraîne une augmentation de la solubilité et une mobilité des métaux lourds ([28]). De plus, un pH alcalin limite le passage des ETM de la phase solide à la phase aqueuse.

Dans la zone d'étude, selon les métaux dosés les IC varient d'un site à l'autre. En outre, Les valeurs des ICM inférieurs à 2 (faibles) sont observées au niveau de Zn (0,07), Fe (0,72), As (1.22), Mn (1.45) et Cu (1,67) tandis que celles supérieurs à 2 sont observées aux niveaux du Hg (7.72), Pb (9.48), et Cd (12.27). En effet, les IC > 2 indiquent l'influence des activités d'orpaillage et la dégradation de la qualité des eaux de surface sur les sites.

Aussi, [4] soulignent que, les valeurs élevées de ces indices traduisent une augmentation de la mobilité des éléments métalliques et de la mise en suspension des métaux en milieu aquatique. La détermination de l'Indice de pollution (HPI), révèle que les douze (12) échantillons analysés ont des valeurs supérieures à 100, valeur au-dessus de laquelle les eaux sont considérées comme contaminées par les ETM. Donc, sur l'ensemble du bassin versant, selon HPI, 100 % des eaux présentent un risque élevé de pollution et sont impropre à la consommation.

5 CONCLUSION

Les résultats de l'analyse physico-chimique des eaux de la Mé révèlent un pH basique (10,2) et une conductivité électrique moyenne de 113,13 µS/cm, traduisant une charge minérale modérée. En outre, ces eaux présentent une forte turbidité, avec une valeur moyenne de 13 115,78 NTU, et une température moyenne de 26.82°C. L'analyse des éléments traces métalliques (ETM) dans ces eaux mettent en évidence une contamination par l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le manganèse (Mn) et le plomb (Pb). Ces contaminations, essentiellement localisées dans la zone d'orpaillage, sont directement imputables à l'intensification de cette activité. L'estimation de l'intensité de la contamination, réalisée à partir des indices de contamination, indique un classement décroissant selon l'ordre suivant: ICM (Cd) > ICM (Pb) > ICM (Hg) > ICM (Cu) > ICM (Mn) > ICM (As). Par ailleurs, l'indice de pollution par les ETM (HPI) révèle que toutes les eaux analysées, soit 100 % ont un HPI supérieur à 100, ce qui signifie un risque élevé. Elles sont donc jugées impropres à l'usage.

REFERENCES

- [1] Guiraud F. (1995): Actualisation de guide d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau de surface. Rapport BRGM R38853, 59 p.
- [2] KOUADIO, A., TOURÉ, S. ET KONAN, D. (2020). Analyse des impacts environnementaux de l'orpaillage en Afrique de l'Ouest. *Revue des Dynamiques Environnementales*, 18 (4), 67-80.
- [3] N'GOM N. M., MBAYE M., BARATOUX D., BARATOUX L., AHOUSI K.E., KOUAME K.J., FAYE. G., and SOW E.H. (2022). Recent expansion of artisanal gold mining along the Bandama River (Côte d'Ivoire). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol 112, 16 p.
- [4] AHOUSI K.E et YAPO A.P. (2021). 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, pp 36-50.

- [5] YAPO A.P. (2024). Impact des activités d'orpaillage sur les environnements hydrologiques et la recharge des aquifères: cas du département de Dimbokro (centre est de la côte d'ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 277p.
- [6] AHOUSSE K.E., YAPO A.P., KOFFI Y.B. and KOUASSI A.M. (2020). Surface Water Sediments Characterization Using Metallic Trace Elements (ETM): Case of the Artisanal Gold Mining Sites of Kokumbo (Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, Vol.11, N°9, pp. 649-663.
- [7] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2021). Assessment of Health Risks Related to Contamination of Groundwater by Trace Metal Elements (Hg, Pb, Cd, As and Fe) in the Department of Zouan-Hounien (West Côte d'Ivoire). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol 9, pp 189-210.
- [8] TRAORE A., AHOUSSE K. E., AKA N., SORO.N. (2015): Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la côte d'ivoire). *Int j. Pure App.Biosci.* 3 (4), P.P.312-322.
- [9] AHOUSSE K.E., SEKA.A.M., TRAORE.A, (2019): Caractérisation d'un environnement hydrologique influencé par l'usage des pesticides en agriculture en côte d'ivoire: Cas du bassin versant de la Mé. *Journal of Applied Biosciences*, Vol: 161, pp. 16652-16662.
- [10] AFFESSI A.S. ET AFFESSI A., (2019): Migration incontrôlée, pratique de résilience et fragilisation des rapports sociaux dans l'exploitation clandestine de l'or à Nyan (Côte d'ivoire) *international journal of innovation and AppliedStudies*, Vol. 28, N° 1, pp. 191-202.
- [11] ONEP, 2023: Renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan: Le Ministre de l'Hydraulique, de l'Assainissement et de la salubrité s'imprègne de l'état d'avancement des travaux (Revue de presse en ligne onep.ci du 9 juin 2023).
- [12] Avenard J.M. (1971): Aspect de la géomorphologie. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM. Paris, n 50, pp 7-71.
- [13] Soro N. (1987): Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique du Sud-Est de la Côte d'Ivoire, bassin versant de la Mé. Thèse de Doctorat 3ème cycle, Université Scientifique, Technique et Médicale de Grenoble, 243 p.
- [14] DEH Serge Kouakou¹, EBA Anowa Evrard Larissa², KOUADIO Boyossoro Helene³, KOMA Achou Donald Hyacinthe², AHOUSSE Kouassi Ernest¹, KOUAME Kan Jean² and JOURDA Jean Patrice³ (2023) *Int. J. Adv. Res. (ijar)* 11 (07), 10-29 Article DOI: 10.21474/IJAR01/17202.
- [15] Mohamed E. Goher, Ali M. Hassan, Ibrahim A. Abdel-Moniem, Ayman H. Fahmy, Seliem M. El-sayed, (2014). Evaluation of surface water quality and heavy metal indices of Ismailia Canal. Nile River, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, Volume 40, Issue 3, 2014, Pages 225-233.
- [16] Rousseau A.N., Maihot A., Massicotte A.S., Duchemin M., Dupont J. and Villeneuve J.P. (1997) GIBSI: A Watershed-Based Software System for the Integrated Management of Surface Water Quality. *Journal of Soil and Water Conservation*, 25, 284-301.
- [17] OMS. (2017). Guidelines to Drinking-water Quality (fourth edition). (NLM classification: WA 675), 564p.
- [18] Mohan, S.V., Nithila, P., Reddy, S.J. (1966). Estimation of heavy metal in drinking water and development of heavy metal pollution index *J. Environ. Sci. Health A*, 31, pp. 283-289.
- [19] YAO K.S.A. (2022). Apport de l'hydrochimie et de la géochimie environnementale dans l'évaluation des ressources en eau des environnements miniers du département de Divo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 293 p.
- [20] PRASAD B, KUMARI P, BANO S, KUMARI S, 2014. Ground water quality evaluation near mining area and development of heavy metal pollution index. *Appl Water Sci.* 4: 11–17.
- [21] OMS, «Guidelines for Drinking water Quality», 4th edition, (2011) 51.
- [22] KOUADIO L.M. (2023). Contribution à l'évaluation des niveaux de contamination des eaux et des sols des sites d'orpaillage clandestin et élimination des métaux (Hg, Pb, Cd) et de l'arsenic des eaux polluées, à l'aide des argiles de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 232p.
- [23] 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.
- [24] Stanislaw Dudka, et Domy C. Adriano (1997) -Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review. *Journal Environment Qual* 26.590-602.
- [25] S. LOKO, K. E. AHOUSSE, Y. B. KOFFI, N. F. KAKOU, A. M. KOUASSI and J. BIEMI, (2013) «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.

- [26] K. S. A. YAO et K. E. AHOUSI (2020), «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.
- [27] 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).
- [28] Matias Miguel Salvarredy Aranguren (2008). Thèse sur la contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approche géochimique, minéralogique et hydrochimique. Doctorat de l'université de Toulouse 372 p.
- [29] OUATTARA O et KAMBIRE B. (2020). Exploitation minière artisanale et dégradation de l'environnement dans la sous-préfecture de Hiré (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Collection Environnement et Biodiversité*, N° 4, Abidjan, Editions Resol-Tropiques, 122 p.
- [30] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2020).Évaluation du niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, Vol 150, pp. 15457 – 15468.
- [31] WATHA-NDOUDY N., DIPAKAMA C.M., J.D. NZILA., NGUELET-MOUKAHA I., et KIMPOUNI V. (2022).Impact de l'orpaillage sur les écosystèmes forestiers du secteur de Souanké, République du Congo. *European Scientific Journal*, ESJ, Vol.18, N°36, pp 169-198.
- [32] N'DIAYE A.D, THIAM O, KOUKAN M., NAMR K.I. (2013).Turbidité et matière en suspension dans l'eau: application à l'évaluation des métaux contenus dans l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal. *Larhyss J*. Vol. 14, pp 93- 105.
- [33] 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.
- [34] HUE BI. F. F., KAMBIRE B., ET ALLA D. (2020). Mutations environnementales liées à l'orpaillage à Ity (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Annales de l'Université de Moundou, Série AFLASH*.Vol.7, N°2, pp 133-151.
- [35] AMA-CAUPHYS B.A, OUATTARA J-M. P, SANGARE D. and COULIBALY L. (2021). Impacts of Artisanal Gold Mining on Surface Water Quality and Sediment in Agbaou, Hire, Kokumbo and Angovia, Central-West Ivory Coast. *Res. J. Chem. Env. Sci*, Vol.9, N°3, pp 12-24.
- [36] M. EL FAHEM, A. BENZAOUAK, H. ZOUITEN, A. SERGHINI and M. FEKHAOU, «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.
- [37] 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.
- [38] AFFESSI A.S. ET AFFESSI A., (2019): Migration incontrôlée, pratique de résilience et fragilisation des rapports sociaux dans l'exploitation clandestine de l'or à Nyan (Côte d'Ivoire) *international journal of innovation and AppliedStudies*, Vol. 28, N° 1, pp. 191-202.
- [39] AHOUSI K.E., SEKA.A.M., TRAORE.A, (2019): Caractérisation d'un environnement hydrologique influencé par l'usage des pesticides en agriculture en côte d'Ivoire: Cas du bassin versant de la Mé. *Journal of Applied Biosciences*, Vol: 161, pp. 16652-16662.
- [40] AHOUSI K.E et YAPO A.P. (2021). 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, pp 36-50.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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», *EuropeanScientific Journal*, 16 (12) (2020) 293 – 315.
- [44] M. EL FAHEM, A. BENZAOUAK, H. ZOUITEN, A. SERGHINI and M. FEKHAOU, «Hydrogeochemicalassessment of mine water dischargesfromminingactivity. Case of the Haut Beht mine (central Morocco)», *AIMS Environmental Science*, 8 (1) (2021) 60 - 85. DOI: 10.3934/environsci.2021005.
- [45] 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.

- [46] G. S. PLUMLEE and T. L. ZIEGLER, «The medicalgeochemistry of dust, soils and otherearthmaterials». In: B.S. Lollar (Ed.), *EnvironmentalGeochemistry. Treatise on Geochemistry*. Elsevier-Pergamon, Oxford, (2003) 264 - 310.
- [47] AHOUSSE K.E., YAPO A.P., KOFFI Y.B. and KOUASSI A.M. (2020). Surface Water Sediments Characterization Using Metallic Trace Elements (ETM): Case of the Artisanal Gold Mining Sites of Kokumbo (Côte d'Ivoire). *Journal of Environmental Protection*, Vol.11, N°9, pp. 649-663.
- [48] AMA-CAUPHYS B.A, OUATTARA J-M. P, SANGARE D. and COULIBALY L. (2021).Impacts of Artisanal Gold Mining on Surface Water Quality and Sediment in Agbaou, Hire, Kokumbo and Angovia, Central-West Ivory Coast.*Res. J. Chem. Env. Sci*, Vol.9, N°3, pp 12-24.
- [49] Avenard J.M. (1971): Aspect de la géomorphologie. Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire. Mémoire ORSTOM. Paris, n 50, pp 7-71.
- [50] 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.
- [51] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2020).Évaluation du niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, Vol 150, pp. 15457 – 15468.
- [52] DJADE P.J.O., TRAORE A., KOFFI K.J.T., KEUMEAN K.N., SORO G., et SORO N. (2021).Assessment of Health Risks Related to Contamination of Groundwater by Trace Metal Elements (Hg, Pb, Cd, As and Fe) in the Department of Zouan-Hounien (West Côte d'Ivoire). *Journal of Geoscience and Environment Protection*, Vol 9, pp 189-210.
- [53] Stanislaw Dudka, et Domy C. Adriano (1997) -Environmental Impacts of Metal Ore Mining and Processing: A Review.of *Journal Environnement Qual* 26.590-602.
- [54] Sampah Georges Eblin, Affoué Berthe Yao, Kouao Armand Anoh, and Kouakou Séraphin Konan (2022): Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux de la retenue de la Lobo (Centre-ouest de la Côte d'Ivoire) *International Journal of Innovation and Applied Studies* ISSN 2028-9324 Vol. 31 No. 3 Dec. 2020, pp. 529-541.
- [55] FAHSSI A., YAHYA H.S.A, TOUZANI R. and CHAFI A. (2016). Évaluation spatiotemporelle de la contamination métallique des ressources hydriques superficielles de la basse Moulouya (Nord-est du Maroc). *J. Mater. Environ. Sci*, Vol 7, N°7, pp 2404 – 2423.
- [56] GUIRAUT F. (1995): Actualisation de guide d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau de surface. Rapport BRGM R38853, 59 p.
- [57] Mohamed E. Goher, Ali M. Hassan, Ibrahim A. Abdel-Moniem, Ayman H. Fahmy, Seliem M. El-sayed, (2014).Evaluation of surface water quality and heavymetal indices of Ismailia Canal. Nile River, Egypt. *Egyptian Journal of AquaticResearch*, Volume 40, Issue 3, 2014, Pages 225-233.
- [58] HASNA M. (2014). Les intoxications par les métaux lourds. *Toxicologie*, pp. 1-4.
- [59] HUE BI. F. F., KAMBIRE B., ET ALLA D. (2020). Mutations environnementales liées à l'orpaillage à Ity (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Annales de l'Université de Moundou, Série AFLASH*.Vol.7, N°2, pp 133-151.
- [60] 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).
- [61] 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.
- [62] KOUADIO L.M. (2023). Contribution à l'évaluation des niveaux de contamination des eaux et des sols des sites d'orpaillage clandestin et élimination des métaux (Hg, Pb, Cd) et de l'arsenic des eaux polluées, à l'aide des argiles de Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody Abidjan, Côte d'Ivoire, 232p.
- [63] KOUADIO, A., TOURÉ, S. ET KONAN, D. (2020). Analyse des impacts environnementaux de l'orpaillage en Afrique de l'Ouest. *Revue des Dynamiques Environnementales*, 18 (4), 67-80.
- [64] N'DIAYE A.D, THIAM O, KOUKAN M., NAMR K.I. (2013).Turbidité et matière en suspension dans l'eau: application à l'évaluation des métaux contenus dans l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal. *Larhyss J*. Vol. 14, pp 93- 105.
- [65] N'GOM N. M., MBAYE M., BARATOUX D., BARATOUX L., AHOUSSE K.E., KOUAME K.J., FAYE.G., and SOW E.H. (2022). Recent expansion of artisanal gold mining along the Bandama River (Côte d'Ivoire).*International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol 112, 16 p.
- [66] OMS, «Guidelines for Drinking water Quality», *4th edition*, (2011) 51.
- [67] OMS. (2017). Guidelines to Drinking-water Quality (fourth edition). (NLM classification: WA 675), 564p.

- [68] ONEP, 2023: Renforcement de l'alimentation en eau potable de la ville d'Abidjan: Le Ministre de l'Hydraulique, de l'Assainissement et de la salubrité s'imprègne de l'état d'avancement des travaux (Revue de presse en ligne onep.ci du 9 juin 2023).
- [69] OUATTARA O et KAMBIRE B. (2020). Exploitation minière artisanale et dégradation de l'environnement dans la sous-préfecture de Hiré (Ouest de la Côte d'Ivoire). Collection Environnement et Biodiversité, N° 4, Abidjan, Editions Resol-Tropiques, 122 p.
- [70] PRASAD B, KUMARI P, BANO S, KUMARI S, 2014. Ground water quality evaluation near mining area and development of heavy metal pollution index. *Appl Water Sci.* 4: 11–17.
- [71] Rousseau-Merck M.F, Zahraoui A., Touchot N, Tavitian A et Berger R. (1991) Chromosome assignment of four RAS-related RAB genes. *Hum Genet* 86 (4): 350-4.
- [72] Matias Miguel Salvarredy Aranguren (2008). Thèse sur la contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approche géochimique, minéralogique et hydrochimique. Doctorat de l'université de Toulouse 372 p.
- [73] TRAORE A., AHOUSSE K. E., AKA N., SORO N. (2015): Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-Est de la côte d'Ivoire). *Int j. Pure App. Biosci.* 3 (4), P.P.312-322.
- [74] YAO K.S.A. (2022). Apport de l'hydrochimie et de la géochimie environnementale dans l'évaluation des ressources en eau des environnements miniers du département de Divo (Sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 293 p.
- [75] YAPO A.P. (2018). Activités d'orpaillage en Côte d'Ivoire et pollution des ressources en eau par les Éléments Traces Métalliques (ETM): cas de la Sous-préfecture de Kokumbo. Mémoire de Master, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 87 p.
- [76] YAPO A.P. (2024). Impact des activités d'orpaillage sur les environnements hydrologiques et la recharge des aquifères: cas du département de Dimbokro (centre est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 277p.
- [77] *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 45 (2025) 88 - 105 100 Kassi Alexis KOUAMÉ et al.
- [78] <https://pfoafrica.com/projets/usine-deau-potable-de-la-me/> visité le 09 Aout 2025.