

Contamination des sédiments par les pesticides et les métaux lourds dans le bassin du fleuve Sénégal et ses affluents, République du Mali

Hanni KONE*, Farmata Koro YARO, Oumou LY, Mamadou Mariam TRAORE, Domo DJIGUIBA et Mohamed Lamine DOUMBIA

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

(Reçu le 14 Février 2025 ; Accepté le 01 Avril 2025)

* Correspondance, courriel : hannikone21@yahoo.fr

Résumé

Les eaux du fleuve Sénégal et ses affluents subissent depuis plus d'une décennie, une agression forte résultant des effets du changement climatique et de l'augmentation de la pression des activités d'orpaillage terrestre et fluvial qui pourraient restreindre l'utilisation de ces eaux non seulement pour la potabilisation mais aussi la vie aquatique. Dans le but de mieux connaître le niveau de pollution du fleuve Sénégal et ses affluents, des échantillons d'eau et de sédiments ont été prélevés à cet effet. Les débits des cours d'eau ont été mesurés. La turbidité, les matières en suspension (MES), la conductivité (CE), le pH et les métaux lourds ont été déterminés. Les méthodes utilisées sont la spectroscopie de fluorescence X (XRF) pour déterminer les métaux lourds dans les sédiments et l'ISO 10382 pour déterminer les résidus de pesticides dans les eaux et dans les sédiments. Au regard des résultats, des fortes turbidités et de MES ont été observées sur la Falémé. La présence des résidus de pesticides a été retrouvée par endroit dans les eaux et dans les sédiments. La recherche des métaux lourds dans les sédiments a révélé leur présence. Les teneurs les plus élevées sont obtenues sur la Falémé et le fleuve Sénégal avec des valeurs respectives en mercure (Hg) : 35 ppb ; chrome (Cr) : 359 ppm ; zinc (Zn) : 74 ppm ; arsenic (As) : 71 ppm ; cobalt (Co) : 259 ppm ; cuivre (Cu) : 34 ppm ; plomb (Pb) : 35 ppm et manganèse (Mn) : 741 ppm. L'étude révèle que les cours d'eau par endroit sont agressés par les activités anthropiques (orpaillage, agriculture) d'où ils sont pollués par la présence des résidus de pesticides et des éléments traces métalliques qui dans la majorité des cas seraient libérés pour contaminer les eaux souterraines par infiltration.

Mots-clés : *impact, orpaillage, sédiments, qualité des eaux, affluents.*

Abstract

Sediment contamination by pesticides and heavy metals in the Senegal River Basin and its tributaries, Republic of Mali

The waters of the Senegal River and its tributaries have been under severe attack for more than a decade resulting from the effects of climate change and the increase in pressure from land and river gold panning activities that could restrict the use of these waters not only for drinking water but also for aquatic life. In order to better understand the level of pollution of the Senegal River and its tributaries, water and sediment

samples were taken for this purpose. River flows were measured. Turbidity, suspended solids (TSS), conductivity (EC), pH and heavy metals were determined. The methods used are X-ray fluorescence spectroscopy (XRF) to determine heavy metals in sediments and ISO 10382 to determine pesticide residues in water and sediment. In view of the results, high turbidity and suspended solids were observed on the Falémé. The presence of pesticide residues was found in places in the water and in the sediments. The search for heavy metals in the sediments revealed their presence. The highest concentrations are obtained on the Falémé and the Senegal River with respective values in mercury (Hg): 35 ppb; chromium (Cr) : 359 ppm; zinc (Zn) : 74 ppm; arsenic (As) : 71 ppm; cobalt (Co): 259 ppm ; copper (Cu) : 34 ppm; lead (Pb) : 35 ppm and manganese (Mn): 741 ppm. The study reveals that waterways in some places are attacked by anthropogenic activities (gold panning, agriculture) from which they are polluted by the presence of pesticide residues and trace metal elements which in the majority of cases would be released to contaminate groundwater by infiltration.

Keywords : *impact, gold panning, sediments, water quality, tributaries.*

1. Introduction

Le fleuve Sénégal est le deuxième plus grand fleuve d'Afrique de l'Ouest. Il est long de 1 800 km et son bassin couvre une superficie de 300 000 km². Partant du Sud, le fleuve Sénégal traverse différents types de climats (guinéen, soudanien, sahélien) avant de couler à travers les zones semi-arides est généralement découpé en trois entités : le haut bassin, la vallée et le delta. Dans le bassin du fleuve Sénégal, les prélèvements spécifiques sur la ressource en eau sont nombreux et divers [1]. Il joue un rôle très important comme source principale d'eau de surface pour la Mauritanie, le Sénégal et le Mali. Les eaux de ce fleuve sont susceptibles d'être utilisées comme eaux potables et eaux d'irrigation [2]. 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 [3]. 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 [3, 4]. Les sédiments ont fait l'objet d'études depuis plusieurs décennies en Amérique du Nord, pionnier dans l'évaluation du risque écotoxique des sédiments. A l'échelle européenne, en revanche, c'est au début des années 2000, que le sédiment a pris une place importante dans l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau [5]. Au Bénin dans les années 1960 et de 1999 à 2007, les pesticides organochlorés (DDT, lindane, dieldrine, heptachlore, endosulfan etc.) avaient été recommandés pour le contrôle des ravageurs du cotonnier. En dehors de ces périodes, l'utilisation illicite de certaines molécules de cette famille de pesticide a été signalée dans le bassin cotonnier. Les molécules d'organochlorés sont très lipophiles et très rémanentes, elles se dégradent rapidement sous l'action des rayons ultraviolets en des produits dérivés généralement plus toxiques et plus stables que les composés initiaux [6]. Depuis quelques années, au Maroc dans la région du Gharb, le développement de l'activité agricole aux alentours de la lagune de Moulay Bouselham a entraîné l'introduction de nombreuses substances chimiques (fertilisants et pesticides etc.) [7]. L'augmentation de la production agricole s'accompagne d'une croissance de l'utilisation de produits phytosanitaires avec un usage inadapté des doses et des fréquences de traitement engendrant des effets négatifs sur l'environnement et la santé humaine [8]. 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 [9]. L'intensification de la pollution des milieux aquatiques par les métaux traces peut avoir des effets néfastes sur l'homme et son environnement [10]. Dans certains écosystèmes aquatiques, ces produits chimiques peuvent être à l'origine

de la disparition de certaines espèces animales et/ou végétales et par conséquent, entrainer le dysfonctionnement de la chaîne trophique (faible biodiversité) [11]. Malgré que l'exploitation artisanale de l'or soit une activité génératrice de revenu 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 [12]. L'utilisation de substances chimiques (mercure, cyanure, acide chlorhydrique et acide sulfurique) peut réduire la fertilité des sols et même contaminer et réduire la qualité des ressources en eau [13]. Selon [14, 15], la distribution des métaux lourds liés aux sédiments dans les cours d'eau peut être affectée par la source et la forme des apports à l'origine, les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau, la nature et la granulométrie du sédiment et la teneur en matière organique. Dans le Nord-Est de la Tunisie, l'Oued El Bey, qui draine 60 % de la charge polluante hydrique de plusieurs agglomérations urbaines, est un exemple représentatif du transfert des métaux lourds résultant de l'activité industrielle et urbaine [16]. Plusieurs études ont été menées sur le bassin versant du fleuve Sénégal par l'Organisation pour le Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS) et ses partenaires. Mais le fleuve Sénégal et ses affluents reste l'un des cours d'eau les plus étudiés et son bassin versant est cité comme un bel exemple en terme d'intégration régionale (surtout en ce qui concerne la gestion transfrontalière des ressources en eau). Il demeure toujours de domaines d'investigations qui nécessitent encore des études et des recherches de plus en plus avancées pour une meilleure connaissance des ressources naturelles (Eau, forêt, environnement) etc. L'objectif de notre étude était d'évaluer la contamination des sédiments par les pesticides et les métaux lourds dans le bassin du fleuve Sénégal et ses affluents au Mali. Cependant, les recherches sur ce sujet sont très insignifiantes dans cette zone. Aujourd'hui, ces cours d'eau sont menacés par les activités agricoles et d'orpaillage. Cette étude permettra afin d'attirer d'autres chercheurs à mener des investigations approfondies sur la problématique de la pollution des cours d'eau au Mali.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

2-1-1. Description de la zone d'étude

Le découpage en zones homogènes du bassin du fleuve Sénégal a été effectué sur la base de principales conditions hydrologiques et hydriques qui peuvent être liées aux aménagements hydrauliques et qui entraînent des modifications dans la situation environnementale. La plus grande partie du haut bassin est située au Mali. Cette partie occupe la presque totalité de la région de Kayes (Kayes, Bafoulabé, Diéma, Kéniéba, Kita, Yélimané soit 6 cercles sur 7) et une partie de la région de Koulikoro (Koulikoro, Kati, Banamba, Kolokani soit 4 cercles sur 7). Sa superficie est estimée à 155 000 km² soit plus de 10 % du territoire national. La partie malienne du bassin est couverte par trois zones agro-climatiques : la zone sahélienne au nord, où l'activité dominante est l'élevage, la zone soudanienne au centre, zone de cultures céréalières et la zone pré-guinéenne au sud, avec comme activités dominantes l'agriculture et l'orpaillage. Le climat est de type soudanien et très contrasté avec une saison sèche de 5 mois et une saison pluviale de 7 mois (mi-mai à mi-octobre). La pluviométrie annuelle passe de 800 mm au nord à 1 200 mm au sud. L'évaporation annuelle est de 1 800 mm. La température moyenne est de 28°C. Une zone sub-humide au sud et une zone sub-aride au nord. Le suivi de cette partie du bassin se justifie par la nécessité de mieux connaître les conditions hydrauliques à travers le réseau hygrométrique et les crues à travers le réseau des stations hydrologiques. Le substratum géologique du bassin du fleuve Sénégal est principalement constitué

de roches sédimentaires du primaire avec des roches intrusives du secondaire ayant donné naissance par endroit à des schistes. Les principales formations rencontrées sont les roches sédimentaires, les dolorites, les formations granitiques et les roches métamorphiques. Très accidenté et tourmenté dans la partie sud du Bafing, le relief s'adoucit légèrement à l'approche des plateaux et des plaines de Diakaba, Bakouroufata, Maïna. Un réseau hydrographique dense, formé de multiples cours d'eau torrentiels, alimente le Bafing. La savane souvent arborée, recouvre les plateaux et s'accroche aux pentes accentuées de petites vallées étroites, et encaissées. La succession de plateaux dominés par des massifs rocheux, de vallées étroites et de petites plaines rend certains sites pittoresques. Avec un bassin fluvial de près de 337 000 km² et une longueur de 1800 km, le Sénégal est le deuxième grand fleuve de l'Afrique de l'ouest. Son bassin versant s'étend d'amont en aval sur le territoire de la Guinée (11 %), du Mali (53 %), du Sénégal (10 %) et de la Mauritanie 26 %. Le fleuve Sénégal déverse par an une moyenne de 22 milliards de mètres cubes avec un débit moyen de 7 milliards de mètres cubes et un maximum de 41 milliards de mètres cubes. Il est formé de la réunion à Bafoulabé (Mali) du Bafing et du Bakoye. En aval de Bafoulabé, les principaux affluents sont la Kolombiné, le Karakoro, et la Falémé [17]. Les points de prélèvement ont été localisés au niveau de chaque site et les coordonnées sont dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Liste des sites de prélèvement des échantillons et leur localisation

Sites/Villages	Coordonnées		Cours d'eau
	Latitude Nord	Longitude Ouest	
Diangola	12,8638889	-9,4772222	Bakoye
Oualia	13,8277778	-10,5875	
Daka-saidou	11,948333	-10,860556	Bafing
Mahina	13,8638889	-11,0633333	
Moussala	12,6669444	-11,4111111	Falémé
Fadougou	12,6255556	-11,3888889	
Mahinamine	13,127222	-11,585278	
Djidjan-barrage	13,2172222	-11,4947222	
Gourbassi	13,5894444	-11,6919444	
Ambidédi	14,6013889	-11,8069444	Sénégal
Félou Aval	14,4938889	-11,5855556	
Galougo	13,9988889	-11,1119444	

La présente étude a été réalisée dans les cercles de Kita, Kéniéba, Bafoulabé, et Kayes.

La **Figure 1** ci-après représente la carte des sites de prélèvement

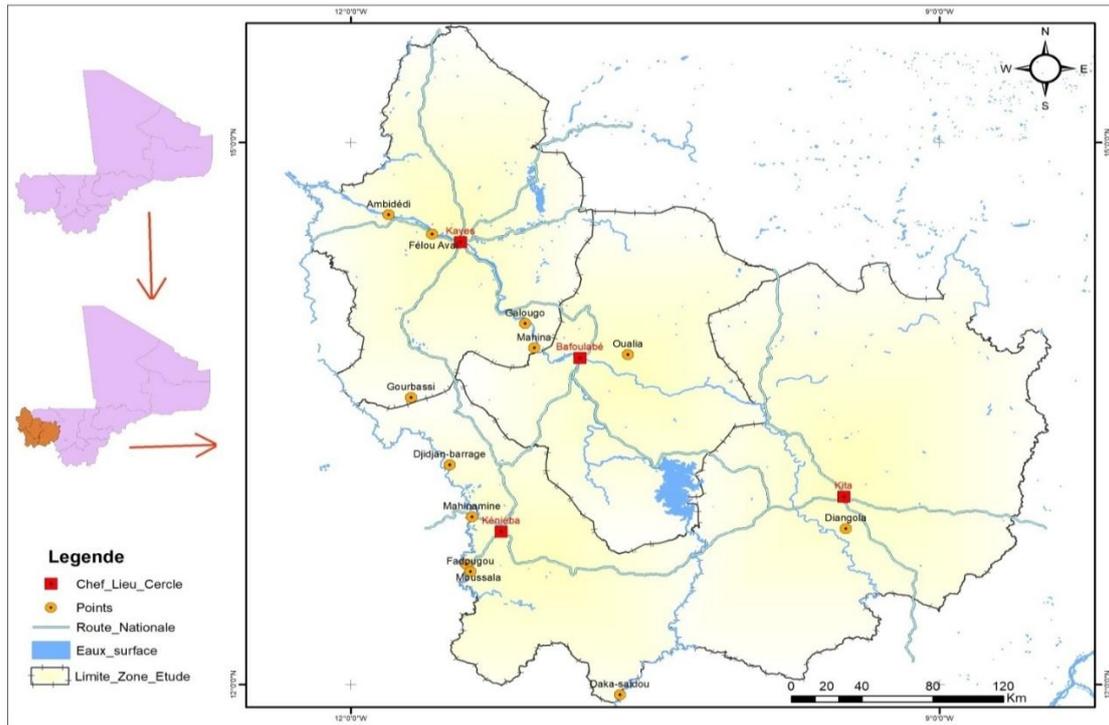


Figure 1 : Localisation des points de prélèvement

2-1-2. Matériel

Les matériels utilisés sont le multi paramètre HQ 40 d (WTW) pour mesurer le pH, conductivité. Le récepteur (GPS VISTA H, Etrex, Garmi) pour la géolocalisation des sites de prélèvement). Un courantomètre acoustiques à effet doppler (ADCP) a été utilisé pour les mesures de débit et la spectroscopie de fluorescence X (XRF) a été utilisée pour déterminer la composition minérale des sédiments. Des flacons de prélèvement (1 litre) et des glacières pour la prise et stockage des échantillons de sédiments. L'étuve utilisée pour sécher les échantillons de sédiments. Le DR 2800, HACH utilisé pour mesurer les Matières en Suspension (MES). Le conductimètre de marque WTW LF 197-S a été utilisée la mesure de la conductivité (CE). Le turbidimètre de marque Photometer 7100-Palintest utilisé pour la mesure de turbidité. Le pH-mètre de marque WTW IKA MIDI MR a été utilisé pour la mesure du pH. Le Chromatographe en Phase Gazeuse (CPG) a été utilisé pour déterminer les résidus de pesticides dans l'eau. Les Solvants et réactifs pour extraction sont acétone, hexane, dichlorométhane, florisol, sulfate de sodium (Na₂SO₄), chlorure de sodium (NaCl) saturé, diéthyl ether. Le **Tableau 2** représente les seuils admissibles des pesticides dans les eaux et dans les sédiments.

Tableau 2 : Limites de quantification des pesticides recherchés

Paramètres à analyser	LOQ (mg/kg)	NQE de 1 ^{er} palier écologique (mg/kg)
Aldrine	0,005	0,08
Dieldrine	0,005	0,00667
Endrine	0,007	0,0624
Endosulfane A	0,006	0,006
Heptachlor	0,005	0,00274
Lindane	0,005	0,00138
Malathion	0,008	0,00067
Endosulfane B	0,004	-
op'DDT	0,006	-
pp'DDT	0,004	-
Deltaméthrine	0,004	-
Parathion éthyle	0,007	-

LOQ : Limite de Quantification, NQE : Normes de qualité environnementale.

2-2. Méthodes

Cette étude nous a conduits d'abord sur le terrain où des mesures in situ ont réalisées à savoir le pH, la conductivité (CE) et les mesures du débit ont été déterminées par la méthode de courantomètre acoustique à effet doppler (ADCP). L'ADCP consiste à faire le jaugeage des cours d'eau et il est posé sur l'eau afin de procéder aux différentes mesures (débit, vitesse, section etc.). Des échantillons de sédiments et d'eau ont été prélevés au niveau de chaque site. La norme ISO 10382 a été utilisée pour déterminer les pesticides dans les sédiments et la méthode de spectroscopie de fluorescence X (XRF) a été utilisée pour déterminer les Eléments Traces Métalliques (ETM). Il s'agit du mercure (Hg), de chrome (Cr), de manganèse (Mn), de nickel (Ni), de zinc (Zn), de l'arsenic (As), du cuivre (Cu), de cadmium (Cd) et du plomb (Pb). Au laboratoire, les échantillons de sédiments ont été séchés dans une étuve à 105°C pendant 24 heures et ont été mesuré avec la spectroscopie de fluorescence X (XRF). Les MES par la méthode de spectrophotométrie de marque 890 (HACH). La campagne d'échantillonnage a été réalisée du 05 au 20 mars 2021. Au total, douze (12) sites ont fait l'objet de prélèvement des échantillons de l'eau, de sédiments et de mesure de débits.

3. Résultats

Le **Tableau 3** représente les résultats des pesticides des échantillons des eaux prélevés et analysés au laboratoire.

Tableau 3 : Résultats des pesticides dans les eaux

Substances recherchées	E1	E12	E2	E11	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
	Bakoye		Bafing		Falémé					Fleuve Sénégal		
Aldrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	2,38	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
deltamethrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Dieldrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1,66	1,68	< LOQ	< LOQ	< LOQ				
Endrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Endosulfane A	< LOQ	< LOQ	< LOQ	2,26	0,81	< LOQ	2,41	0,86	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1,24
Endosulfane B	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Heptachor	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Lidane	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
op'DDT	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	3,38	2,81	1,27	1,38	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Parathion éthyle	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
pp'DDT	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ

E: signifie échantillon

Au regard des résultats, des teneurs de résidus de pesticides été retrouvées dans les cours d'eau. Les valeurs obtenues étaient : aldrine : 2,38 mg/kg pour E4; dieldrine : 1,68 mg/kg pour E3; endosulfan A : 0,81 mg/kg pour E3; 2,41 mg/kg pour E5 ; 0,86 mg/kg pour E6 et op'DDT variait entre 3,38 mg/kg pour E3 ; 2,81 mg/kg pour E4 et 1,27 mg/kg pour E5. Ces valeurs ont été obtenues dans les échantillons prélevés sur la Falémé. Des teneurs de dieldrine et endosulfan A étaient respectivement 1,66 mg/kg pour E11 et 1,24 mg/kg pour E10. Ces valeurs sont supérieures aux normes (NQE). Ceci peut être du l'utilisation des produits phytosanitaires et par ruissellement des eaux de pluie, ils peuvent se retrouver dans les cours d'eau.

Le **Tableau 4** représente les résultats des pesticides des échantillons de sédiments prélevés et analysés au laboratoire.

Tableau 4 : Résultats des pesticides dans les sédiments

Substances recherchées	Points de Prélèvement des sédiments											
	E1	E12	E2	E11	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
	Bakoye		Bafing		Falémé				Fleuve Sénégal			
Aldrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1,82	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
deltamethrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Dieldrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1,54	2,06	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Endrine	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Endosulfan A	< LOQ	< LOQ	< LOQ	1,06	1,24	1,08	2,04	0,49	< LOQ	< LOQ	< LOQ	0,68
Endosulfan B	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Heptachor	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	0,51
Lidane	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
Malathion	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
op'DDT	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	2,46	3,39	1,25	1,44	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
parathion éthyle	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ
pp'DDT	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ	< LOQ

A la lecture des résultats, des teneurs de résidus de pesticides ont été retrouvées dans les sédiments. Les valeurs obtenues étaient : aldrine : 1,82 mg/kg pour E4 ; dieldrine : 1,54 mg/kg pour E11 et 2,06 mg/kg pour E3 ; endosulfan A : 1,06 mg/kg pour E11 ; 1,24 mg/kg pour E3 ; 1,08 mg/kg pour E4 ; 2,04 mg/kg pour E5 ; 0,49 mg/kg pour E6 ; 0,68 mg/kg pour E10 ; heptachor : 0,51 mg/kg pour E10. Des teneurs en op'DDT étaient 2,46 mg/kg pour E3 ; 3,39 mg/kg pour E4 ; 1,25 mg/kg pour E5 et 1,44 mg/kg pour E6. Ces valeurs ont été obtenues dans les échantillons prélevés respectivement sur le Bafing, la Falémé et le fleuve Sénégal. Cela peut être s'expliquer par la présence des résidus de pesticides dans ces cours d'eau. Au fil du temps, par l'accumulation, les sédiments ont été contaminés par de ces substances chimiques. Le **Tableau 5** représente les résultats des teneurs des Eléments Traces Métalliques (ETM) dans les sédiments prélevés et analysés au laboratoire.

Tableau 5 : Résultats des ETM dans les sédiments

Eléments Recherchés	Unités	Points d'échantillonnage des sédiments												NQE de 1 ^{er} palier écologique mg/kg
		E1	E12	E2	E11	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10	
		Bakoye		Bafing		Falémé				Fleuve Sénégal				
Cd	ppm	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,5
Cr	ppm	254	124	284	205	359	302	244	278	307	23	81	183	90
Cu	ppm	1	12	1	1	34	33	1	22	13	1	1	1	197
Hg	ppb	9	14	9	22	35	17	21	19	11	9	4	17	0,486
Ni	ppm	27	1	1	1	27	27	1	1	1	1	1	1	75
Pb	ppm	12	5	1	3	35	14	1	4	12	1	1	8	91,3
Zn	ppm	39	30	13	24	74	92	49	35	43	1	8	37	315
Mn	ppm	161	360	248	277	681	532	238	457	581	1	236	741	1100
As	ppm	4	3	1	4	26	32	62	71	27	1	1	4	17
Co	ppm	1	1	1	1	259	1	1	1	1	1	1	1	-

Source : Laboratoire National des Eaux (LNE), NQE : Normes de qualité environnementale
 Conversion : ppm en mg/kg et ppb en ppm / 1 ppm = 1 mg/kg ; 1000 ppb = 1 ppm = 1 mg/kg.

La valeur moyenne des ETM contenus dans les sédiments prélevés se présente comme suit : cadmium (Cd) : 1 ppm ; chrome (Cr) : 220 ppm ; cuivre (Cu) : 10 ppm ; mercure (Hg) : 16 ppb ; nickel (Ni) : 8 ppm ; plomb (Pb) : 8 ppm ; zinc (Zn) : 37 ppm ; manganèse (Mn) : 376 ppm ; arsenic (As) : 20 ppm ; cobalt (Co) : 23 ppm. La plus forte valeur moyenne est de 376 ppm pour le manganèse (Mn) et la plus faible valeur moyenne est de 1 ppm pour le cadmium (Cd). Des concentrations élevées ont été enregistrées sur la Falémé : chrome (Cr) avec 359 ppm ; cobalt (Co) avec 259 ppm ; cuivre (Cu) avec 34 ppm ; plomb (Pb) avec 35 ppm pour l'échantillon E3 ; zinc (Zn) avec 92 ppm pour l'échantillon E4 ; arsenic (As) avec 71 ppm pour l'échantillon E6. Des concentrations élevées ont été enregistrées sur le fleuve Sénégal : manganèse (Mn) avec 741 ppm pour l'échantillon E10. En se basant sur la seule teneur moyenne du mercure dans les sédiments des différents cours d'eau le Bakoye avec 11,5 ppb ; le Bafing avec 15,5 ppb ; la Falémé avec 20,6 ppb et le fleuve Sénégal avec 10 ppb. Ces valeurs sont largement supérieures à la norme (NQE). L'analyse des résultats des ETM révèle que les sédiments prélevés sont contaminés par endroit. Cette contamination est due par la présence des activités d'orpaillage. Le **Tableau 6** représente les résultats de mesures de débits des cours d'eau jaugés sur terrain.

Tableau 6 : Débits au niveau des cours d'eau

Sites	Cours d'eau	Hauteur d'eau en cm	Q jaugé en m ³ /s	Q étalonné en m ³ /s	Ecart en m ³ /s	Moyenne de Q jaugé en m ³ /s des cours d'eau
Diangola	Bakoye	104	0,765	-	-	0,755
Oualia		38	0,746	0	0,746	
Daka-saidou	Bafing	35	6,86	14,20	7,34	126,93
Mahina		121	247	-	-	
Moussala	Falémé	1,50	1,54	2,09	0,55	1,317
Fadougou		151	1,37	76,54	75,17	
Mahinamine		20	1,20	-	-	
Djidjan-barrage		-	-	-	-	
Gourbassi		29	1,16	1,18	0,02	
Ambidédi	Sénégal	151	248	267,67	19,65	269,34
Félou Aval		180	275	-	-	
Galougo		200	285	300	15	

Source : Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH), Q : Débit en m³/s.

Les débits du fleuve Sénégal, Falémé et Bakoye étaient respectivement 269,34 m³/s, 1,317 m³/s, 0,755 m³/s sont très réguliers, par contre celui du Bafing variait de Daka-Saidou à Mahina à 6,86 à 247 m³/s. Le **Tableau 7** représente les résultats du pH, de la conductivité électrique (CE), de la turbidité, des matières en suspension (MES) et du transport des sédiments des échantillons de sédiments prélevés et analysés.

Tableau 7 : Transport des sédiments dans les cours d'eau

Paramètres	Points d'échantillonnage											
	E1	E12	E2	E11	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
	Bakoye		Bafing		Falémé				Fleuve Sénégal			
pH	7,3	7,8	8,13	8,59	7,13	7,51	7,36	7,81	7,68	7,73	7,83	7,58
Conductivité μ s/cm	130,3	156,4	99,3	51,4	98,7	112,8	112,2	450	83,7	38,7	30,7	52,1
Turbidité NTU	3	8	6	3	4186	1845	1681	790	2703	11	11	5
MES mg/L ou g/m ³	2	13	3	1	3600	1400	1350	600	1800	3	4	2
Débit du fleuve m ³ /s	0,765	0,746	6,86	247	1,54	1,54	1,34	1,20	-	1,16	248	278
Transport des sédiments g/s	1,5	9,7	20,6	247,0	5544,0	2156,0	1809,0	720,0	-	3,5	992,0	556,0
Moyenne des sédiments transportés (g/s)	5,6		133,8		2557,25				517,17			

Les sédiments transportés par les différents cours d'eau sont des indicateurs de pression exercée sur les différents lits des cours d'eau. Ils sont aussi des indices de pollution des cours d'eau lorsque la matière en suspension est très élevée. Le classement des cours d'eau pollués proposé est alors : Falémé > fleuve Sénégal > Bafing > Bakoye. Pendant notre étude, les sédiments transportés (ST) par les différents cours d'eau étaient calculés à partir du produit de la matière en suspension MES et les débits Q des cours d'eaux mesurés d'où les sédiments transportés ont été calculés à l'aide de l'expression suivante :

$$ST(g/s) = Q(m^3/s) \times MES(g/m^3) \tag{1}$$

ST (g/s) : sédiments transportés en gramme par seconde, Q : débit en m³/s, MES : Matières en Suspension (g/m³).

La **Figure 2** représente la graphique des débits mesurés et le transport des sédiments

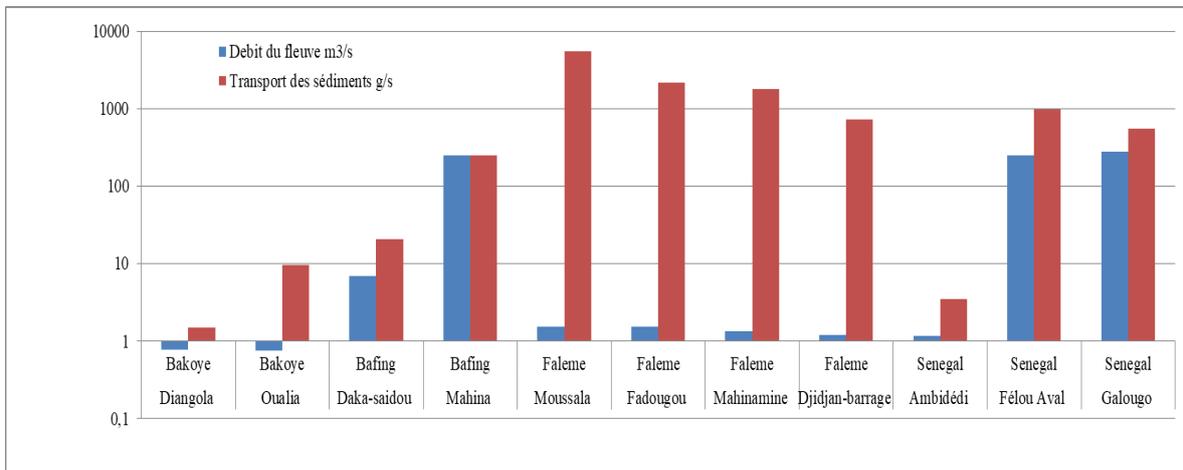


Figure 2 : Evolution du transport des sédiments en fonction du débit des cours d'eau

Les **Figures 3 à 8** ci-dessous ont été prises lors des deux campagnes de terrain [18]. Ces Figures sont des images d'illustration pour pointer du doigt les actions de l'homme sur le cours d'eau.



Figure 3 : Site de Djidjan-barrage



Figure 4 : Site de Fadougou



Figure 5 : Site de Fadougou



Figure 6 : Pollution de la Falémé par les dragues



Figure 7 : Drague artisanal sur la Falémé



Figure 8 : Drague artisanal sur la Falémé

Les **Figures 3 à 5** montrent l'impact de l'orpaillage sur les cours d'eau et les **Figures 6 à 8** montrent les activités de l'orpaillage sur les cours d'eau [18].

4. Discussion

4-1. Teneurs des pesticides

Les résultats tableau 4 ont montré que la présence de l'aldrine avec 1,82 mg/kg, du dieldrine avec 1,54 mg/kg à 2,06 mg/kg, de l'endosulfan A de 2,04 mg/kg à 1,06 mg/kg, de l'heptachlor avec 0,51 mg/kg et de l'op'DDT allant de 3,39 mg/kg à 1,25 mg/kg dans les cours d'eau. Les plus grandes valeurs ont été trouvées dans les cours d'eau de la Falémé, du Bafing et du Sénégal. Ces valeurs sont largement supérieures aux normes (NQE). Les autres valeurs de résidus de pesticides étudiés sont inférieures à la limite de quantification (LOQ). Ces résultats concordent avec les résultats des travaux réalisés au Togo où les teneurs en α -endosulfan des sédiments étudiés sont 40,99 et 125,19 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ nettement supérieures aux teneurs en β -endosulfan 3,41 et 39,12 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en liaison avec le rapport isométrique du produit commercial

(70/30 ou 80/20). Le niveau résiduel de l'aldrine ($0,07 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) dans l'eau du fleuve Mono excède la valeur de la limite maximale de résidus (LMR) de l'Union Européenne ($0,03 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) [19]. Au Bénin, les résultats des travaux sur le dosage des pesticides (**Tableau 2**) ont relevé une contamination assez régulière mais faible des organophosphorés dans les sédiments prélevés dans les trois communes ($0,1155$; $0,1165$ et $0,1225$ ppm en moyenne pour les pyréthriinoïdes respectivement à Gogounou, Kandi et Banikoara). Il en est de même pour des insecticides où leur teneur est faible et invariable dans les sédiments des trois régions ($0,0010$ ppm). C'est le cas aussi des organophosphorés dont les concentrations moyennes sont respectivement $0,079$; $0,080$ et $0,094$ ppm pour les trois communes [20]. Au Niger, les résultats des travaux ont montré qu'en saison sèche, les teneurs en résidus de pesticides ont varié pour l'Aldrine entre $0,048$ et $0,18$ mg/kg à Tabalak. Elles étaient sensiblement de $0,088$ mg/kg à Guidimouni. En saison pluvieuse, l'Aldrine, la DDT et le Dicolof ont été détectés au niveau de toutes les parties de ces plans d'eaux. Parmi les pesticides présents dans les plans d'eau, le lindane présente le plus grand nombre de dépassement (375 à $2083,33$ fois supérieures à la norme à Tabalak et 125 à $416,66$ fois à Guidimouni) [21]. Dans le Sud Est de la Côte d'Ivoire, les résultats des travaux réalisés ont décelés que les triazines et métabolites, les urées substituées, les carbamates et les convulsivants ont été détectés en quantité très importante dans les eaux lagunaires. Les moyennes respectives de triazines et métabolites, urées substituées, carbamates et convulsivants sont de $36,53 \mu\text{g}/\text{L}$, $121,61 \mu\text{g}/\text{L}$, $1,09 \mu\text{g}/\text{L}$ et $15 \mu\text{g}/\text{L}$ dans la lagune Aghien et dans la lagune Potou, elles sont de $95,75 \mu\text{g}/\text{L}$, $283,67 \mu\text{g}/\text{L}$, $11,5 \mu\text{g}/\text{L}$ et $172,80 \mu\text{g}/\text{L}$. Les triazines et les urées substituées détectés sont tous des herbicides. L'aldicarbe (carbamate) et la crimidine (convulsivant) sont respectivement des insecticides et des rodenticides. La moyenne de l'ensemble des substances détectées est de $72,43 \mu\text{g}/\text{L}$ dans les eaux de la lagune Aghien et de $163,43 \mu\text{g}/\text{L}$ dans celles de Potou. Ces moyennes sont largement supérieures à la valeur guide de l'Organisation Mondiale de la Santé [22]. Au Ghana, les études réalisées ont décelés des résidus de pesticides organochlorés mesurés dans les sols et les sources d'eau potable des zones de culture du cacao. La présence de quatre résidus de pesticides organochlorés étaient dans les échantillons de sol analysés à savoir le lindane ($0,005$ à $0,05$ mg/kg), le bêta-HCH ($< 0,01$ à $0,05$ mg/kg), la dieldrine ($0,005$ à $0,02$ mg/kg) et le p,p'-DDT ($0,005$ à $0,04$ mg/kg), la dieldrine étant la plus fréquente. De même, les résidus de pesticides organochlorés détectés dans les échantillons d'eau étaient le lindane ($0,01$ à $0,03 \mu\text{g}/\text{L}$), l'alpha-endosulfan ($0,01$ à $0,03 \mu\text{g}/\text{L}$), l'endosulfan-sulfate ($0,01$ à $0,04 \mu\text{g}/\text{L}$), la dieldrine ($0,01$ à $0,03 \mu\text{g}/\text{L}$) et le p,p'-DDT ($0,01$ à $0,04 \mu\text{g}/\text{L}$), l'heptachlore étant le plus fréquent [23].

4-2. Teneurs des ETM

Les résultats tableau 5 ont montré que les valeurs moyennes en chrome (Cr), en mercure (Hg) et en arsenic (As) : étaient respectivement 220 ppm, 16 ppb et 20 ppm. Ces valeurs sont supérieures aux normes (NQE). Les autres concentrations moyennes étaient en cadmium (Cd) : 1 ppm ; cuivre (Cu) : 10 ppm ; nickel (Ni) : 8 ppm ; plomb (Pb) : 8 ppm ; zinc (Zn) : 37 ppm ; manganèse (Mn) : 376 ppm et cobalt (Co) : 23 ppm. Ces valeurs sont inférieures aux normes (NQE). Ces résultats confirment les résultats des travaux réalisés en Amérique du Sud, en Bolivie où la valeur guide de Zn pour la qualité environnementale des sédiments est largement dépassée (jusqu'à 65 fois par M10) pour plusieurs des échantillons analysés (J8, M2, M6, M8, M9, M10, G3, G8), et même pour certains sédiments du fond géochimique (V1). Il en est de même pour le manganèse, l'arsenic et l'étain, pour lesquels même les sédiments des fonds géochimiques (P1, P2, V1) dépassent les valeurs guides respectives. Les concentrations de cuivre, de cadmium et de plomb ne dépassent pas leurs valeurs guides respectives que dans le secteur affecté par l'activité minière [24]. En Haut et Moyen Atlas au Maroc, les résultats des travaux réalisés ont relevé que le Manganèse (Mn) montre une valeur maximale de $196,26$ mg/kg, Le Zinc (Zn) enregistre des valeurs qui s'échelonnent entre $5,32$ mg/kg et $19,86$ mg/kg et

répond à la moyenne d'UCC fixé à 52 mg/kg, en précisant que les sources de zinc (Zn) sont multiples, parmi celles-ci on peut citer les activités industrielles, les rejets domestiques et même les activités. Le chrome (Cr) présente des valeurs qui varient entre 2,34 mg/kg et 16,03 mg/kg et reste inférieur à la moyenne de l'UCC (35 mg/kg). La présence du chrome dans les sédiments pourrait être d'origine naturelle, à travers l'altération des sols, ou d'origine anthropique via les rejets de l'industrie chimique et des tanneries artisanales domestiques [25]. En Algérie, les résultats des travaux réalisés ont montré que le cuivre, le plomb et le zinc, la distribution des valeurs est dissymétrique et a une tendance générale à être plus allongée vers les valeurs élevées. Etant donné que 75 % de valeurs sont inférieures à 50,36 µg/g pour Cu, à 77,78 µg/g pour Pb et à 200,36 µg/g pour Zn, les moyennes sont considérées comme très influencées par les valeurs atypiques (suspectes et extrêmes) [26]. Au Cameroun, l'étude sur l'évaluation du niveau de pollution des déchets des sites miniers de Kombo-Laka, Plateau de l'Adamaoua, Cameroun 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 [27]. Dans la Région de l'Adamaoua, au Cameroun, les résultats des travaux réalisés ont montré les concentrations des différents métaux lourds (mg/kg) dans les sédiments du lac Bini qui varient pour : le Cr : 65,59-183,37 (moyenne 120,06) ; le Cu : 7,83-99,19 (45,46) ; le Cd : 3,51-7,02 (5,12) ; le Pb : 13,77-151,52 (65,43) le Fe : 31269,54-150093,81 (87033,56) ; le Zn : 0,00-138,89 (43,52) ; le Ni : 2,04-9,16 (4,62). Pour le lac de Dang, les concentrations des métaux (mg/kg) dans les sédiments varient comme suit : le Cr : 78,59-255,40 (174,95) ; le Cu : 2,61-67,87 (22,75) ; le Pb : 27,55-206,61 (95,43) ; le Fe : 37523,45-156347,72 (86214,60) ; le Cd : 5,27-11,41 (8,37) et le Zn : 11,11-255,56 (88,10) et le Ni : 0,00-21,37 (8,51) [28]. En Côte d'Ivoire, les résultats des travaux ont montré que l'évolution des teneurs en cobalt se fait entre 15,47 (échantillon 38) et 84,99 µg/g (échantillon 45), avec une moyenne de 55,2 µg/g. Les teneurs maximales du nickel (215,63 µg/g), du cuivre (210,33 µg/g), du zinc (605,54 µg/g) et du plomb (225,70 µg/g) ont été enregistrées au centre de la baie du Banco (échantillon 29). Les valeurs minimales des teneurs ont été obtenues au Sud-Ouest de l'île Boulay (échantillon 38) pour le nickel (13,42 µg/g), au Nord-Est de l'île Boulay (échantillon 27) pour le cuivre (29,50 µg/g), à l'Est de l'île Vitré pour le zinc (68,21 µg/g) et dans la baie d'Adiapodoumé (échantillon 36) pour le plomb (53,24 µg/g). La teneur moyenne est de 55,64 µg/g pour le nickel, 54,02 µg/g pour le cuivre, 132,33 µg/g pour le zinc et de 118,88 µg/g pour le plomb. Avec une moyenne de 0,75 µg/g, les teneurs en cadmium des sédiments lagunaires varient de 0,12 (échantillon 35) à 1,92 µg/g (échantillon 3) [29]. En République de Guinée, les résultats des travaux réalisés ont relevé que les concentrations les plus élevées sont celles Zinc (0,230 µg/g), le Cobalt (0,665 µg/g), le Nickel (0,616 µg/g), Plomb (0,712 µg/g) au niveau des stations de l'embouchure. Les stations K15 et K16 montrent les taux les plus élevés en éléments métalliques, notamment dans le cas du Cobalt, du Nickel, du Plomb et du Zinc en comparaison avec les stations K14 et K19, localisées plus loin de l'île Bokhinènè suit l'ordre suivant : Pb > Co > Ni > Zn. La distribution quantitative des teneurs en métaux dans les sédiments de l'estuaire est dans l'ordre Pb > Co > Ni > Zn > Cd > Hg [30].

4-3. pH

Les résultats tableau 7 ont montré que les valeurs du pH trouvées étaient de 8,59 et 7,13. Le pH de ces cours d'eau est alcalin. En Algérie, les résultats des travaux réalisés ont relevé que le pH des sédiments des différentes stations laisse apparaître une légère variation spatio-temporelle (*Figure 2*). Il oscille entre 7,56 et 8,73 avec une moyenne de 8,27. Les sédiments du barrage ont un pH voisin de la neutralité à caractère alcalin. L'alcalinité est sensiblement plus élevée pour les sédiments des stations Bge4 et Bge5 ayant probablement une teneur en carbonates plus importante ou à la présence considérable de débris de coquilles de gastéropodes [31]. Au Sud de l'Algérie, les résultats des travaux réalisés ont montré le pH des sédiments mesuré à cinq reprises pour les 14 stations oscille entre 7 et 8,72 avec une moyenne de 8. Dans

le Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, les résultats des travaux réalisés ont montré que la plupart des eaux sont relativement neutres avec des valeurs de pH qui varient entre 6,53 à la station DVR et 7,93 à la station AR1 (tous deux situés sur le sous bassin versant de Gô) avec une moyenne de 7,26. Les stations à pH situés entre 7,1 et 7,9 représentent plus de 74 %, ainsi les valeurs du pH des eaux sont assez homogènes [32]. Ces résultats confirment avec les résultats de la présente étude.

4-4. Turbidité

Au regard des résultats obtenus tableau 7, les cours d'eau de la Falémé sont excessivement turbides de 4186 NTU à 790 NTU par rapport aux autres cours d'eau (le Bakoye, le Bafing et le Sénégal) dont les valeurs sont respectivement 3 NTU à 8 NTU, 6 NTU à 3 NTU et 11 NTU à 5 NTU. En Guyane, les travaux d'étude réalisés ont montré que les valeurs de la turbidité enregistrées dépassent régulièrement 100 NTU en saison sèche, suggérant une implication directe de l'orpaillage dans ces valeurs. La rive surinamaïse apparaît d'ailleurs tout particulièrement impactée [33]. Selon l'étude menée au Sud-Est de la Côte d'Ivoire par [34] a relevé que les résultats du suivi de l'évolution de la turbidité journalière dans les rivières Mé et Agnéby sur la période d'étude dans la Mé est très élevée. Ces valeurs oscillent quotidiennement entre 53,94 NTU obtenue en octobre 2019 et 1845 NTU, relevée en avril 2020 en début de crue avec une moyenne de 392 NTU. Ces résultats corroborent avec les résultats de la présente étude.

4-5. Matières en Suspension (MES)

Les résultats tableau 7 ont montré que les MES étaient entre 3600 mg/L et 1 mg/L. Les plus valeurs ont été obtenues sur le cours d'eau de la Falémé. Cela peut être traduit par l'influence des activités anthropiques. Les résultats de cette étude corroborent avec des travaux antérieurs réalisés dans les cours d'eau et ayant rapportés des mesures aussi importantes. C'est le cas notamment des travaux de recherche réalisés dans l'Ouest du Cameroun où la valeur la plus élevée (30 mg/L) a été observée à la station TB3 et la plus basse (1 mg/L) à la station TB1 [35]. Des études menées ont révélé à l'Est Algérien que les concentrations en matières en suspension (MES) variaient entre 10 à 130 mg/L [36].

4-6. Conductivité électrique (CE)

Les résultats de la CE tableau 7 variaient entre 450 $\mu\text{s/cm}$ et 30,7 $\mu\text{s/cm}$. Les eaux sont faiblement à moyennement minéralisées. Excepté les valeurs de Djidian Barrage avec 450 $\mu\text{s/cm}$, les autres valeurs sont inférieures aux seuils. Des études similaires ont été menées au Haut et Moyen Atlas, Maroc où la conductivité électrique oscillait entre 260 et 770 $\mu\text{s/cm}$ et ces valeurs ont tendance à s'élever dans la partie aval de l'Oued El Abid malgré qu'elles restent largement inférieures à la norme marocaine fixée à 2700 $\mu\text{s/cm}$ [37]. A Divo dans le Centre Ouest de la Côte d'Ivoire où les valeurs de la conductivité électrique variaient de 183,2 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (station DVR qui est le site de prélèvement de la SODECI de Divo sur le bassin de boubo) à 1909 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (station HR5, rivière située à 70 m d'un site minier à Hiré sur le bassin de Bandama), avec une moyenne de 608,74 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ [32]. Ces résultats antérieurs cités corroborent avec les résultats de la présente étude.

5. Conclusion

L'étude a permis de mettre en évidence la contamination des sédiments par les pesticides et les métaux lourds par endroit, induite par les activités agricoles et d'orpaillage. Cependant, les débits mesurés sur le fleuve Sénégal, la Falémé et le Bakoye respectivement sont très réguliers par contre celui du Bafing varie de Daka-Saidou à Mahina. Des fortes masses de sédiments transportés ont été observées respectivement sur la Falémé, le fleuve Sénégal, le Bafing et le Bakoye. Des fortes turbidités, de couleur et de MES ont été mesurées sur la Falémé. Des teneurs dépassant les normes (NQE) de endosulfan A ont été décelées à Mahina, Moussala, Fadougou, Mahinamine Djidjan-barrage et Galougo. Des teneurs de dieldrine dépassant les normes (NQE) ont été trouvées à Mahina et Moussala. Des teneurs élevées de op'DDT ont été trouvées à Moussala, Fadougou, Mahinamine et à Djidjan-barrage. L'aldrine a été observé à Fadougou avec une valeur supérieure aux normes (NQE). A Galougo, la présence de l'heptachor a été trouvée avec une valeur supérieure aux normes (NQE). Des valeurs supérieures aux normes (NQE) de chrome (Cr) et de mercure (Hg) ont été décelées dans la quasi-totalité des cours d'eau. Au regard des résultats de nos travaux, les activités agricoles et d'orpaillage sont les causes principales de la dégradation de la qualité des eaux et des sédiments. La problématique de la pollution des cours d'eau interpelle tous les acteurs notamment les autorités politiques, les services techniques de l'Etat, les collectivités, les institutions de recherche, les ONGs, la société civile et la population locale à s'unir pour proposer des solutions durables face à cette pollution. Le défi consiste à faire respecter les textes environnementaux en vigueur au Mali afin de sauver et de protéger les ressources naturelles (eau, forêt.).

Références

- [1] - FAYE CHEIKH, Dynamique des usages domestiques et mutations dans le bassin du fleuve Sénégal. *Techniques Sciences Méthodes*, (2015) 47 - 62. 10.1051/tsm/201511047
- [2] - E. MOHAMEDOU, A. LEBKIRI, E. RIFI, M. LEBKIRI, M. FADLI, M. PONTIE & M. FAGEL, Typologie physico-chimique et métallique des eaux du fleuve Sénégal au niveau de la ville de Rosso (Mauritanie). *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 4 (3) (2008)
- [3] - A. KEELING & J. SANDLOS, Environmental justice goes underground? Historical notes from Canada's northern mining frontier. *Environmental Justice*, 2 (3) (2009) 117 - 125
- [4] - K. E. AHOUSSE & A. P. 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*, 19 (4) (2021) 36 - 50
- [5] - R. FLÜCK, N. CHEVRE & S. CAMPICHE, Surveillance de la qualité des sédiments en Suisse : état actuel des méthodes disponibles et mise en place de recommandations. Centre Suisse d'écotoxicologie appliquée, (2012)
- [6] - T. P. AGBOHESSI, I. I. TOKO & P. KESTEMONT, État des lieux de la contamination des écosystèmes aquatiques par les pesticides organochlorés dans le Bassin cotonnier béninois. *Cahiers agricoles*, 21 (1) (2012) 46 - 56
- [7] - B. BOUCHAIB, F. MOHAMED, I. LARBI & L. PIERRE, Résidus de pesticides organochlorés chez les bivalves et les poissons de la lagune de Moulay Bouselham (Maroc). *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 3 (1) (2007)
- [8] - K. R. OROU, Z. O. ONETIE & D. YEO, Etude des facteurs influençant la contamination des ressources en eau en milieu agricole dans le département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 44 (2) (2024) 354 - 362

- [9] - 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.
- [10] - A. A. OUATTARA, N. SANGARE, K. M. YAO, A. TROKOUREY & 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*, 15 (5) (2021) 2199 - 2208
- [11] - K. N. KEUMEAN, S. B. BAMBA, G. SORO, N. SORO, B. S. MÉTONGO & 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*, 61 (2013) 4530 - 4539
- [12] - D. GOH, L'exploitation artisanale de l'or en Côte d'Ivoire : La Persistance d'une activité illégale, *European Scientific Journal*, 12 (3) (2016) 18 - 36
- [13] - E. WANDAN, G. B. KOFFI, K. B. KOUADIO & 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*, 3 (5) (2015) 265
- [14] - S. B. BRADLEY & J. J. COX, Heavy metals in the Hamps and Manifold valleys, North Staffordshire, UK: distribution in floodplain soils. *Science of the total environment*, 50 (1986) 103 - 128
- [15] - G. G. GEESEY, L. BORSTAD & P. M. CHAPMAN, Influence of flow-related events on concentration and phase distribution of metals in the lower Fraser River and a small tributary stream in British Columbia, Canada. *Water Research*, 18 (2) (1984) 233 - 238
- [16] - S. KHADHAR, A. MLAYAH, A. CHEKIRBEN, A. CHAREF, M. METHAMMAM, S. NOUHA & Z. KHEMAIS, Vecteur de la pollution métallique du bassin versant de l'Oued El Bey vers le Golfe de Tunis (Tunisie). *Hydrological sciences journal*, 58 (8) (2013) 1803 - 1812
- [17] - SANOGHO, Nampaa Nangoun (2018). « Rapport National Final d'Analyse Diagnostique Environnementale Transfrontalière du Bassin du fleuve Sénégal-Mali », African Water Information System: Dakar, Sénégal, <https://cda-omvs.org/wp-content/uploads/attachments/13248.pdf>
- [18] - H. KONE, F. K. YARO, M. M. TRAORE, A. S. DIARRA & BA. SIDY, Impact de l'orpaillage sur la qualité des eaux de la Falémé à Kéniéba, Mali. *Afrique SCIENCE*, 25 (4) (2024) 102 - 117
- [19] - G. MAWUSSI, « Bilan environnemental de l'utilisation de pesticides organochlorés dans les cultures de coton, café et cacao au Togo et recherche d'alternatives par l'évaluation du pouvoir insecticide d'extraits de plantes locales contre le scolyte du café (*Hypothenemus hampei* Ferrari) », PhD Thesis, Institut National Polytechnique Toulouse, (2028)
- [20] - S. ADAM, P. A. EDORH, H. TOTIN, L. KOUMOLOU, E. AMOUSSOU, K. AKLIKOKOU & M. BOKO, Pesticides et métaux lourds dans l'eau de boisson, les sols et les sédiments de la ceinture cotonnière de Gogounou, Kandi et Banikoara (Bénin). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4 (4) (2010)
- [21] - A. Y. TAWAYE, B. ALHOU & A. E. S. ADAMOU, Niveau de contamination aux pesticides et risques écotoxicologiques dans deux écosystèmes aquatiques au Niger : Lac Guidimouni et mare de Tabalak. *Afrique SCIENCE*, 18 (2) (2021) 1 - 13
- [22] - E. A. ABOU T, A. NATCHIA & T. ADAMA, Niveau de contamination par les pesticides des eaux des lagunes Aghien et Potou (Sud-est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, 3 (4) (2015) 312 - 322
- [23] - B. Y. FOSU-MENSAH, E. D. OKOFFO, G. DARKO et C. GORDON, « Assessment of organochlorine pesticide residues in soils and drinking water sources from cocoa farms in Ghana », *SpringerPlus*, Vol. 5, N°1 (déc. 2016) 869 p., doi: 10.1186/s40064-016-2352-9

- [24] - M. M. SALVARREDY ARANGUREN, Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique (Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier), (2008). <https://theses.hal.science/tel-00277431/>
- [25] - M. EL MORHIT, M. FEKHAOUI, A. EL ABIDI, A. YAHYAOUI & A. HAMDANI, Impact des activités humaines sur la dégradation de la qualité des sédiments de l'estuaire de Loukkos (Maroc). *Environnement, Ingénierie & Développement.*, (2012), <https://eid.episciences.org/7855>
- [26] - L. SAHLI, M. E. H. EL OKKI, F. Z. AFRI-MEHENNAOUI & S. MEHENNAOUI, Utilisation d'indices pour l'évaluation de la qualité des sédiments : cas du bassin Boumerzoug (Algérie). *European Scientific Journal*, 10 (35) (2014)
- [27] - S. D. DANGA, L. E. NGA, B. A. IBRAHIM, D. TIKI, L. E. MAMDEM & D. L. BITOM, Évaluation du niveau de pollution des déchets des sites miniers de Kombo-Laka, Plateau de l'Adamaoua, Cameroun. *Afrique SCIENCE*, 24 (2) (2024) 1 - 14
- [28] - B. OUMAR, N. L. EKENGLE & 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: Revue Internationale Des Sciences Et Technologie*, 10 (2) (2014). <https://www.ajol.info/index.php/afsci/article/view/109662>
- [29] - I. B. T. JEAN-GAEL, A. NATCHIA, K. A. MARIE-LAURE, C. A. SOUGO & M. SYLVAIN, Enrichissement des sédiments de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire) en éléments traces métalliques (ETM) : influence sur la qualité des sédiments et les organismes benthiques. *Journal of Applied Biosciences*, 142 (2019) 14448 - 14463
- [30] - G. ONIVOGUI, S. BALDE, K. BANGOURA & M. K. BARRY, Évaluation des risques de pollution en métaux lourds (Hg, Cd, Pb, Co, Ni, Zn) des eaux et des sédiments de l'estuaire du fleuve Konkouré (Rep. de Guinée). *Afrique Science : Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 9 (3) (2013) 36 - 44
- [31] - H. DJEDDI, S. KHERIEF NACEREDDINE, D. KEDDARI & F. Z. AFRI-MEHENNAOUI, Teneurs des éléments traces métalliques Cu, Zn et Pb des sédiments du barrage Béni Haroun (Nord-Est de l'Algérie). *European Scientific Journal*, 15 (15) (2018) 269
- [32] - Y. K. S. ARISTIDE & K. E. AHOUSI, Caractérisation physico-chimique des eaux de surface dans un environnement minier du centre-Ouest de la Côte d'Ivoire : Cas du Département de Divo. *European Scientific Journal*, 16 (2020) 12
- [33] - G. MELUN & M. LE BIHAN, Histoire et impacts environnementaux de l'orpaillage en Guyane-Clefs de compréhension des tensions actuelles, (2020). <https://hal.science/hal-04400862/>
- [34] - A. K. A. NATCHIA, T. ABOU, D. N. PAUL & 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, (2023) 19103 - 19122
- [35] - N. T. NORBERT, P. B. A. FAI, M. MBIDA & K. N. D. BRICE, « Bioévaluation De La Qualité Des Eaux Du Cours D'eau Menoua En Zone Périurbaine De Dschang, Ouest Cameroun », (2017) <https://www.academia.edu/download/98544189/9447>
- [36] - F. Z. AFRI-MEHENNAOUI & S. MEHENNAOUI, Qualité écologique des cours d'eau dans l'est algérien : cas de l'oued Rhumel dans le Constantinois. *Deuxième Congrès Méditerranéen Ressources en eau dans le Bassin Méditerranéen WATMED 2, Marrakech, Maroc*, (2005) 14 - 17
- [37] - L. A. KARROUM, Evaluation de la qualité des eaux de surface et des sédiments : Hydrogéochimie, processus de minéralisation et éléments traces métalliques. Cas des bassins versants : Oued El Abid, Oued Ahançal et Oued Srou (Haut et Moyen Atlas, Maroc), (2021). <https://toubkal.imist.ma/handle/123456789/25638>