



Original Paper

<http://ajol.info/index.php/ijbcs>

<http://indexmedicus.afro.who.int>

Distribution et enrichissement des éléments traces métalliques dans les sédiments du fleuve Niger, Niger

Hassane SOULEY ADAMOU^{1,2}, Bassirou ALHOU^{2*}, Michèle TACKX¹,
Jean Luc PROBST¹ et Frédéric AZEMAR¹

¹Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse INP, Université Toulouse 3 – Paul Sabatier (UPS), Toulouse, France.

²Université Abdou Moumouni de Niamey, Département des Sciences de la Vie et de la Terre, Ecole Normale Supérieure, BP 10963 Niamey, Niger.

*Auteur correspondant ; E-mail: alhoubass@yahoo.fr; Tel: (00227) 96961422; Fax: (00227) 20733072.

Received: 25-05-2022

Accepted: 25-10-2022

Published: 31-12-2022

RESUME

La présente étude s'est déroulée le long du fleuve Niger qui traverse le pays sur 550 km. Il traverse la ville de Niamey et sert de récepteur de ses eaux usées. Pour caractériser la signature géochimique des éléments traces des sédiments et déterminer les impacts potentiels de l'agglomération et des activités anthropiques sur le fleuve, des sédiments ont été échantillonnés et analysés. Huit sites ont été échantillonnés d'amont en aval pendant les basses eaux pour évaluer les variations spatiales de la signature géochimique. Les résultats obtenus ont permis de caractériser chaque échantillon par son schéma de distribution géochimique d'éléments traces (ET). La concentration moyenne en ET dans les fractions les plus fines (< 63 µm) est classée de la teneur la plus élevée à la plus faible : Cd > Cr > As > Ni > Pb > Co > Zn. Le degré de contamination des sédiments est évalué en calculant les facteurs d'enrichissement (FE) et l'indice géo-accumulation (I_{geo}). Globalement, 70% des ET ont un FE inférieur à 2 (Cr, Ni, Co, Pb, Zn, Pb, Cu). Cependant, 30% des échantillons sont plus contaminés avec 2 < FE < 10 (Cd, As, Sn, Th et U) d'un point d'échantillonnage à un autre. Les valeurs des facteurs FE et I_{geo} obtenues par station indique une faible à forte pollution du fleuve.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Fleuve Niger, éléments traces, sédiments, indice géo-accumulation, Niamey.

Distribution and enrichment of trace metal elements in the sediments of the Niger River, Niger

ABSTRACT

This study was carried out on the River Niger which flows along 550 km of the country. The river passes through the city of Niamey and serves as a receptor of all wastewater of this city. To characterize the geochemical signature in terms of trace elements of the sediments and to determine the potential impacts of the agglomeration and the anthropic activities of the city on the River, sediments were sampled and analyzed. Eight sites were sampled from upstream to downstream during the low-water period to evaluate the spatial variations of the geochemical signature. The results obtained allowed the characterization of each sediment sample by its geochemical trace element (TE) distribution pattern. The average concentration of TE in the finest fractions (<

63 µm) is ranked from highest to lowest: Cd > Cr > As > Ni > Pb > Co > Zn. The degree of contamination in the sediments is evaluated by calculating sediment quality parameters such as enrichment factors (EF) and geoaccumulation index (Igeo). Generally, 70% of the ET have an EF below 2 (Cr, Ni, Co, Pb, Zn, Pb, Cu). However, 30% of the samples are more contaminated $2 < EF < 10$ (Cd, As, Sn, Th and U) from one sampling point to another. The enrichment factor (EF) and geo-accumulation index (GAI) values for each station indicate low to high pollution of the river.

© 2022 International Formulae Group. All rights reserved.

Keywords : Niger River, trace elements, sediments, geo-accumulation index, Niamey.

INTRODUCTION

Les rivières reçoivent d'importantes quantités de matière de leur bassin versant (Gomez et al. 2007 ; Mortatti et Probst, 2010). En ce qui concerne les formes particulières, une partie considérable de ces apports est concentrée dans les sédiments (Behra et Probst, 2015). En effet, ces sédiments sont des intégrateurs de la signature géochimique des différents sols et roches et des activités dans le bassin fluvial, comme l'ont constaté Cabral et al. (2016) et Cabral et al. (2017). Les sédiments fluviaux constituent aussi de bons marqueurs des différentes sources de pollution provenant des activités domestiques, agricoles ou industrielles développées dans le bassin versant (Gonçalves et al., 2013 ; Singh et al., 2002 ; Wildi et al., 2004 ; N'Guessan et al., 2009 ; Benabdelkader et al., 2018 ; Sow et al., 2018 ; Avumadi et al., 2019). Les sédiments représentent également une source de contamination du système aquatique (Mortatti et Probst, 2010). Ainsi, l'un des meilleurs moyens d'évaluation de la contamination potentielle des rivières et des écosystèmes aquatiques passe d'abord par l'analyse des sédiments fluviaux déposés dans le lit principal, comme montré dans différentes régions du monde (Casas et al., 2003 ; Gaiero et al., 2004). De ce fait, la connaissance de la composition chimique des sédiments est utile pour mieux comprendre la qualité des eaux de la rivière et, dans un contexte plus large, celle des eaux qui drainent le bassin versant. Surtout, la fraction fine des sédiments du lit présente une composition chimique et minéralogique très proche des matières en suspension (MES) transportées par la rivière (Gaiero et al., 2003). L'analyse des sédiments est donc une méthode intégrative pour évaluer les charges en

suspension de la rivière et c'est une stratégie pertinente pour obtenir un diagnostic de la "santé" du système fluvial.

Les éléments traces sont les constituants naturels des sédiments des cours d'eau, dont les concentrations dépendent de plusieurs facteurs tels que la lithologie, la géomorphologie, le climat et aussi les caractéristiques hydrologiques. Ces éléments transitent dans la colonne d'eau avant de s'accumuler dans les sédiments où ils sont introduits dans les réactions biogéochimiques susceptibles de modifier plus ou moins fortement leurs biodisponibilités pour l'ensemble du réseau trophique.

Les eaux du Niger contiennent des nutriments (particulièrement des phosphates) provenant des déchets anthropiques, notamment des rejets domestiques, de l'utilisation non rationnelle des engrais, qui sont à leur tour lessivés dans le fleuve le long du bassin versant (Alhou, 2007). Outre ces apports, le fleuve Niger est confronté à une contamination permanente en éléments traces provenant d'effluents industriels à Niamey, situées sur la rive droite (Alhou et al., 2014 ; Amadou et al., 2011). La dispersion de ces éléments traces au sein des écosystèmes aquatiques n'épargne aucune communauté : le plancton, les micro-invertébrés, les invertébrés aquatiques, les poissons, et les mammifères aquatiques (N'guessan et al., 2017). Ces organismes aquatiques, sont particulièrement sensibles aux effets des polluant.

Malheureusement, pour les sédiments du fleuve Niger, peu d'informations sont disponibles pour ces processus et les paramètres de contrôle. Cette étude fait l'inventaire des concentrations des éléments traces sur un tronçon du fleuve Niger. Elle a

pour objectifs de (1) décrire la composition en éléments traces des sédiments fluviaux du Niger, (2) déterminer le niveau de contamination en métaux traces des sédiments du fleuve Niger et enfin (3) déterminer l'impact de l'agglomération de Niamey sur la qualité des eaux du Niger.

MATERIEL ET METHODES

Zone d'étude

Le fleuve Niger prend sa source dans la crête guinéenne du Fouta Djallon, une région de hauts plateaux d'une altitude moyenne d'environ 800 mètres. De ce Niger supérieur, il s'écoule vers l'intérieur des terres au Nord-est du Mali, dans le delta intérieur inondé pendant la saison des pluies. En aval, il fait une boucle à travers le Mali et s'écoule vers le Sud-est au Niger et au Nigeria, où il est rejoint par la rivière Bénoué. Le Niger atteint l'océan Atlantique dans un grand delta au Nigeria. C'est le 3^{ème} plus long fleuve d'Afrique après le Nil et le Congo et le 9^{ème} au monde avec 4 200 km. La superficie du bassin du Niger est de 2,1 millions de km², dont 1,5 millions de km² sont des bassins versants actifs, et 0,6 million de km² sont maintenant des déserts secs (Olivry, 2002).

Cette étude a été menée dans le territoire du Niger, où coule le Moyen Niger. Ce territoire est bordé par le Mali au Nord, le Burkina Faso à l'Est, le Bénin et le Nigeria au Sud. Le choix du moyen Niger comme zone d'étude s'explique par la traversée de la ville de Niamey par le fleuve qui reçoit sans traitement préalable tous les eaux usées de cette ville. Huit stations, situées en amont, dans la ville de Niamey et en aval de la ville, ont été échantillonnées d'Ayorou (14.7329 N ; 0.91407 E) à Gaya (11.8773 N ; 3.42149 E) couvrant 520 km sur les 550 km du fleuve au Niger (Figure 1 et Tableau 1). Dans la zone étudiée, les sols entourant le fleuve sont principalement des sols ferrugineux faiblement ou non lessivés, et dans une moindre mesure, des sols bruns et minéraux bruts subarides. La pression agricole est élevée en amont de Niamey alors qu'elle est faible en aval (Souley et al., 2021). De plus, la ville de Niamey est connue pour avoir un impact anthropique

d'origine organique sur le cours d'eau (Alhou, 2007 ; Alhou et al., 2014).

Echantillonnage des sédiments

Des échantillons de sédiments ont été collectés au bord de la rivière à (huit) 8 stations (Figure 1). Le prélèvement des sédiments a été fait à l'aide d'un gobelet en plastique. Au niveau de chaque site, un échantillon composite (rive droite et rive gauche) a été prélevé à partir d'un échantillon élémentaire sur 5 centimètres de la couche supérieure de sédiments présentant une certaine quantité de dépôts fins et encore recouverts d'eau. Les échantillons ont ensuite été soigneusement scellés dans des sachets plastiques et bien identifiés pour éviter toute contamination externe lors de leur transport vers le laboratoire.

Les prélèvements ont été effectués pendant la période des basses eaux (Mai-2018), caractérisée par un débit faible et une forte concentration de matières en suspension. Ceci pourrait favoriser le dépôt des particules fines dans les sédiments du lit des cours d'eau, et aussi les phénomènes d'adsorption des ET en solution sur les particules, entraînant ainsi des concentrations plus importantes dans les sédiments de la rivière.

Pré-traitement des échantillons

Une fois transportés au laboratoire des sciences de la vie et de la terre (ENS-UAM), les sédiments ont été mis dans des boîtes de Pétri pour le séchage à température ambiante.

Après séchage, les sédiments ont été conditionnés dans des piluliers pour leur acheminement au Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement de Toulouse. Avant de procéder au tamisage, les sédiments ont été quartés. Le quartage a consisté à diviser l'échantillon en quatre parties égales sur un papier protecteur dont on ne retient que la moitié en réunissant les deux quarts opposés. On obtenait ainsi un échantillon représentatif du matériel initial.

Les échantillons ont été tamisés sur des tamis de 2 mm, 200 µm et 63 µm. Pour éviter toute contamination entre les différents échantillons, les tamis ont été lavés à l'acide

nitrique 2%, rincés à l'eau déminéralisée puis à l'eau Milli-Q et séchés à l'air comprimé avant et après le tamisage de chaque échantillon de sédiment. Ceci a permis de séparer les sédiments en trois fractions : sables grossiers (2 mm-200 µm), sables fins (200-63 µm), argiles et limons (< 63 µm).

Analyse chimique des sédiments

Les sédiments préparés en différentes fractions par tamisage, ont été mis dans des piluliers. L'analyse chimique a été effectuée sur la fraction fine (< 63 µm) des sédiments à laquelle les éléments traces s'associent préférentiellement (Donald Lougheed et al., 2020 ; Wognin et al., 2017).

L'extraction et le dosage des éléments majeurs et éléments traces totaux dans les sédiments ont été réalisés par spectrométrie de masse à plasma induit (ICP-MS) au centre des recherches pétrochimique et géochimique de Nancy (France) par le service d'Analyse des roches et des minéraux (SARM : <http://helium.crpq.cnrs-nancy.fr/SARM/>).

Enrichissement des éléments traces dans les sédiments de surface du fleuve Niger

La teneur totale en éléments traces des sédiments du fleuve Niger ne permet pas de discriminer entre les apports anthropiques et lithogéniques. En effet, une augmentation de la teneur en éléments traces dans les sédiments ne signifie pas nécessairement un enrichissement d'origine anthropique et dans certains cas, elle peut provenir du fond géochimique naturel élevé (Abi Ghzmem, 2008). Vouloir se limiter à la concentration totale mesurée dans un environnement peut conduire à une surestimation ou une sous-estimation des risques écologiques, car la toxicité d'un élément trace n'est pas seulement liée à sa concentration totale, mais aussi et surtout à sa disponibilité pour les organismes vivants (N'guessan, 2008), d'où le choix d'utiliser le facteur d'enrichissement (FE) comme le font de nombreux auteurs (Coulibaly et al., 2014 ; Diop et al., 2022 ; Singh et al., 2020 ; Sutherland, 2000 ; Chen et al., 2007 ; N'guessan, 2008 ; Assaker, 2016 ; Sow et al., 2018, Avumadi et al., 2019). Il est calculé en

faisant le rapport d'un élément étudié [X] avec le normalisateur [R] divisé par le même rapport obtenu dans un matériau de référence selon la formule de Coulibaly et al. (2014) et Harikumar et al. (2010).

$$FE = \frac{([X]/[R]) \text{ échantillon}}{([X]/[R]) \text{ matériel de référence}}$$

X concentration de l'élément trace étudié et *R* concentration de l'élément normalisateur

Dans cette étude, et en raison du risque dû à la variabilité naturelle des sédiments et de la taille du bassin versant, la limite du fond géochimique a été fixée à 2 comme établi par certains auteurs (Sow et al., 2018) pour la normalisation avec le Post-Archean Australian Shale (PAAS) et à 1,5 pour la normalisation par rapport au matériau de référence régional (N'Guessan et al., 2019 ; Assaker, 2016 ; Avumadi et al., 2019).

Selon Sutherland (2000), le degré d'enrichissement est défini comme suit :

FE < 2	Pas d'enrichissement
2 < FE < 5	Enrichissement modéré
5 < FE < 20	Enrichissement significatif
20 < FE < 40	Enrichissement très élevé

Dans le calcul du facteur d'enrichissement, deux étapes sont essentielles : le choix du matériau de référence et le choix de l'élément normalisateur.

Indice de géo-accumulation (I_{géo})

L'indice de géo-accumulation est proposé par Müller (1969) : In Kinimo et al. (2018) pour déterminer la contamination des sédiments par les métaux. En effet, cet indice de caractère empirique compare une concentration donnée *versus* une valeur considérée comme fond géochimique. Ainsi, le coefficient 1,5 (facteur de correction) rend compte des variations dans les niveaux du fond pouvant être causées par des effets de lithologie. L'I_{géo} est calculé selon la formule suivante :

$$I_{géo} = \log_2 [C_n/1,5 B_n]$$

Où I_{géo} : *Index de géo-accumulation* ; log₂ : *logarithme à base 2* ; n : *élément considéré* ; C : *concentration mesurée dans l'échantillon* ; B : *fond géochimique* ; 1,5 : *facteur*

d'exagération du fond géochimique, dont la fonction est de prendre en compte les fluctuations naturelles du fond géochimique.

Les valeurs d'Igéo permettent de définir sept classes de niveau de contamination.

Analyses statistiques

Les données ont été traitées avec XLSTAT 5.1 (StatSoft Europe, Hambourg,

Allemagne). Ce dernier a été utilisé pour établir les triangles ternaires. La significativité des différences de concentration entre les stations a été testée par une ANOVA non paramétrique (test de Spearman) avec le logiciel R version 3.3.0. Le test a été considéré comme significatif pour des valeurs de $P < 0,05$. La carte géographique a été réalisée à l'aide du logiciel QGIS version 3.10.

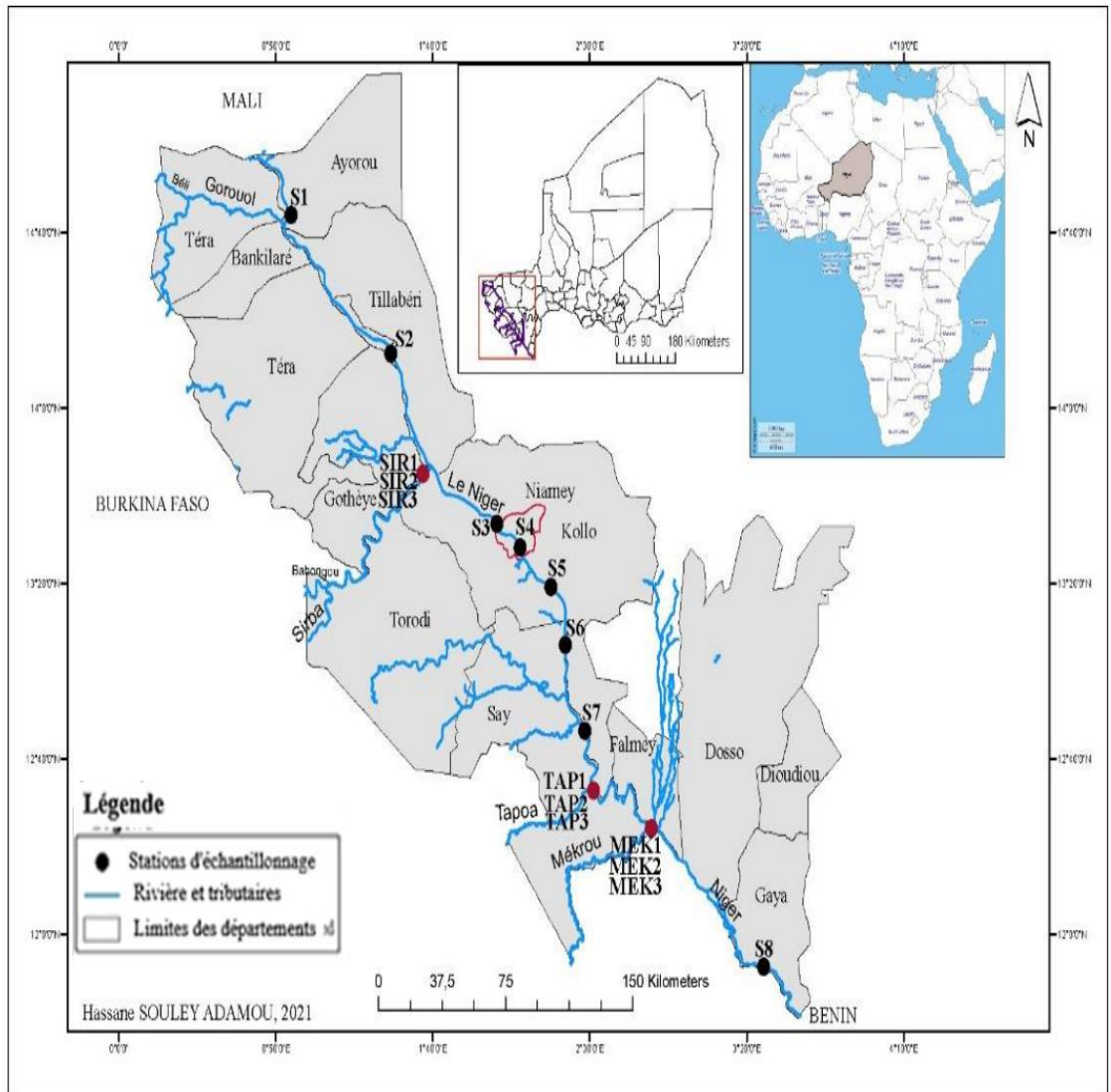


Figure 1 : Carte du Niger au sein du continent africain (carte en haut à droite), le fleuve Niger au sein du territoire du Niger (carte en haut au milieu), et les stations d'échantillonnage sur le fleuve Niger (points noirs).

Tableau 1 : Localisation géographique des stations d'échantillonnage.

Code	Localité	Latitude N	Longitude E
S1	Ayorou	14,73429	0,91407
S2	Tillabéri	14,20678	1,44459
S3	Tondibiat	13,56218	2,00867
S4	Saga	13,47027	2,13075
S5	Kollo	13,32143	2,29288
S6	Say	13,10185	2,37167
S7	Kirtachi	12,77589	2,47214
S8	Gaya	11,87730	3,42149

RESULTATS

Concentrations en Eléments Traces dans les fractions fines (< 63 µm)

Les résultats des analyses des éléments traces des sédiments aux différentes stations ont été résumés dans le Tableau 2. Dans ce tableau, les valeurs minimales, maximales, moyennes et médianes des éléments traces (ET) sont comparées aux valeurs moyennes de la croûte continentale supérieure (UCC), du Post Archean Australian Shales (PAAS) et des sédiments du ruisseau au Togo (Séd_Ruisseau). Dans les sédiments de surface du Niger, en moyenne, l'élément trace le moins concentré est In (0,05 µg. g⁻¹); les plus abondants sont le zirconium (8759,2 µg. g⁻¹), le baryum (306,93 µg. g⁻¹), le hafnium (210,22 µg. g⁻¹).

Les concentrations des ET dans les sédiments du fleuve Niger sont ordonnées de la façon suivante : Zr > Ba > Hf > Y > Cr > V > Sr > Th > Zn > Nb > Rb > Ni > Sc > Pb > Cu > Sn > U > Ga > Co > As > Ta > W > Ge > Cd > Cs > Be > Sb > Mo > Bi > In. Cet ordre diffère largement de celui du PAAS (Ba > Zr > Sr > Rb > V > Cr > Zn > Ni > Cu > Y > Co > Pb > Nb > Ga > Sc > Cs > Th > Mo > U > Cd) et de celui de l'UCC (Mo > Cd > Ba > Sr > Zr > Rb > V > Zn > Cr > Nb > Y > Ni > Pb > Ga > Cu > Co > Th > Sc.

Cs > U). La représentation graphique des ET (Figure 2a) montre que les teneurs en ET des sédiments du bassin du Niger suivent globalement la même distribution que celles du PAAS et de l'UCC avec toutefois des différences sous forme d'anomalies particulièrement marquées, positives pour certains éléments tels que le Ni, Rb, Zr, Cd, Sn, Hf, et négatives pour d'autres Cr, Cu, Ge, As, In, Cs, Bi, Y.

Variabilité spatiale des éléments traces dans les sédiments du Niger

La distribution spatiale des concentrations en ET le long de la zone étudiée est illustrée par la Figure 3 où on peut distinguer 4 types de profils :

- En cloche, avec des valeurs minimales en amont et en aval, et des valeurs maximales centrées sur la station S4. C'est le cas de 7 éléments trace sur 30 : As, Co, Cu, Ga, Ni, Rb, Sb et Be.
- Constant, avec des valeurs relativement stables le long de la section, à l'exception de quelques concentrations remarquables, notamment en S2 et S8. C'est le cas de 8 éléments sur 30 : Ba, Bi, Cs, Ge, Pb, Sr et Zn.

- Croissant de l'amont vers l'aval avec une discontinuité en S2 qui présente les valeurs maximales pour 4 éléments traces sur 30 : Cr, In, Mo et V.
- Caractérisé par des valeurs maximales en S2, des valeurs faibles en S1, S3, S4, S5 et un pic centré sur S7. C'est le cas de 11 éléments sur 30 : Cd, Hf, Nb, Sc, Sm, Ta, Th, U, W, Y et Zr.

Les stations S2 et S8 apparaissent souvent remarquables. En effet, S2 présente les concentrations maximales pour 17 éléments sur 30 et S8 pour 10 éléments.

Concentrations des ET dans les sédiments du fleuve Niger comparées avec les valeurs réglementaires

Les teneurs en éléments traces dans les échantillons des sédiments du fleuve Niger sont données dans le Tableau 3 en fonction des sites de prélèvement. Les concentrations varient d'un site à l'autre et aussi en fonction de l'élément considéré.

Cd dans les sédiments du lit du fleuve Niger

Les concentrations en Cd dans les sédiments du fleuve Niger varient de 0,20 à

4,94 $\mu\text{g. g}^{-1}$ (Tableau 3). Les sites localisés en amont et aval de Niamey S1, S2, S5 et S7 ont une teneur en Cd supérieure au seuil de 1 $\mu\text{g. g}^{-1}$ fixé par l'agence britannique de l'environnement comme valeur de référence pour les sols des zones urbaines. Les sites autour de Niamey présentent des valeurs en dessous de ce seuil.

As dans les sédiments du fleuve Niger

Les concentrations en As dans les sédiments du fleuve Niger vont de 2,86 à 6,07 $\mu\text{g. g}^{-1}$. La valeur la plus élevée en As est obtenue au niveau de la station de Saga (S4). Les sept autres sites présentent des teneurs en dessous de la moyenne mondiale des sols non contaminés en As.

Cr, Pb, Ni, Zn et Cu dans les sédiments du fleuve Niger

Les concentrations en Cr, Pb, Ni, Zn et Cu dans les sédiments du fleuve Niger sont toutes faibles et sous les valeurs seuils de références des sols non contaminés. Elles varient de 63,2 à 130 $\mu\text{g. g}^{-1}$ pour le Cr ; de 11,6 à 19,7 $\mu\text{g. g}^{-1}$ pour le Pb ; de 11,7 à 43,7 $\mu\text{g. g}^{-1}$ pour le Ni ; de 28,6 à 60 $\mu\text{g. g}^{-1}$ pour le Zn et de 10,0 à 26,0 $\mu\text{g. g}^{-1}$ pour le Cu (Tableau 3).

Tableau 2 : Teneurs en ET dans les sédiments du Niger (moyennes de 8 stations) et valeurs du PAAS, de l'UCC et Séd_Ruisseau (sédiment local de référence, Avumadi, 2019).

ET	Sédiments du BV du Niger (< 63 μm). n = 8				PAAS	UCC	Séd_Ruisseau
	Min ($\mu\text{g. g}^{-1}$)	Max ($\mu\text{g. g}^{-1}$)	Med ($\mu\text{g. g}^{-1}$)	Moy ($\mu\text{g. g}^{-1}$)			
As	2,86	6,07	4,75	4,74	-	1,5	1,6
Ba	171,41	469,55	302,2	306,93	650	550	793,8
Be	0,74	1,99	0,95	1,1	-	3,6	
Bi	0,12	0,25	0,17	0,17	-	0,13	
Cd	0,2	4,94	0,93	1,51	-	0,98	0,1
Co	5,51	19,75	10,38	11,01	23	17	21
Cr	63,15	130,5	89,47	93,71	110	83	75,3
Cs	0,43	3	1,3	1,44	15	4,6	2,5
Cu	10,01	26,04	15,73	16,05	50	25	35,8
Ga	8,92	20,63	11,65	12,46	17	17	17,1

Ge	1,28	2,93	1,62	1,76	-	1,6	
Hf	23,76	671,72	129,54	210,22	-	5,8	
In	0,04	0,07	0,05	0,05	-	0,5	
Mo	0,55	0,81	0,74	0,72	-	1,5	0,9
Nb	22,44	88,62	31,6	42,15	19	12	17,2
Ni	11,68	43,71	21,62	22,94	55	44	34,4
Pb	11,6	19,72	17,74	16,79	20	17	21,3
Rb	15,51	62,92	35,01	36,94	160	112	86,6
Sb	0,43	1,03	0,94	0,83	-	0,2	
Sc	10,95	34,1	15,65	17,21	16	13,6	14,4
Sn	2,31	65,83	8,38	15,73	-	5,5	2,2
Sr	61,87	92,04	79,06	78,87	200	350	184,4
Ta	1,87	12,85	2,71	4,53	-	1	
Th	13,53	116,32	28,62	40,82	14,6	10,7	16,6
U	4,18	39,78	9,43	14,1	3,1	2,8	3,5
V	51,98	121,95	79,8	82,61	150	107	87,2
W	1,51	6,69	2,48	3,15	-	2	
Y	36,94	275,25	71,24	104,19	27	22	44,4
Zn	28,58	60	39,83	42,46	85	71	59
Zr	955,28	28659,66	5358,05	8759,16	210	190	650,6

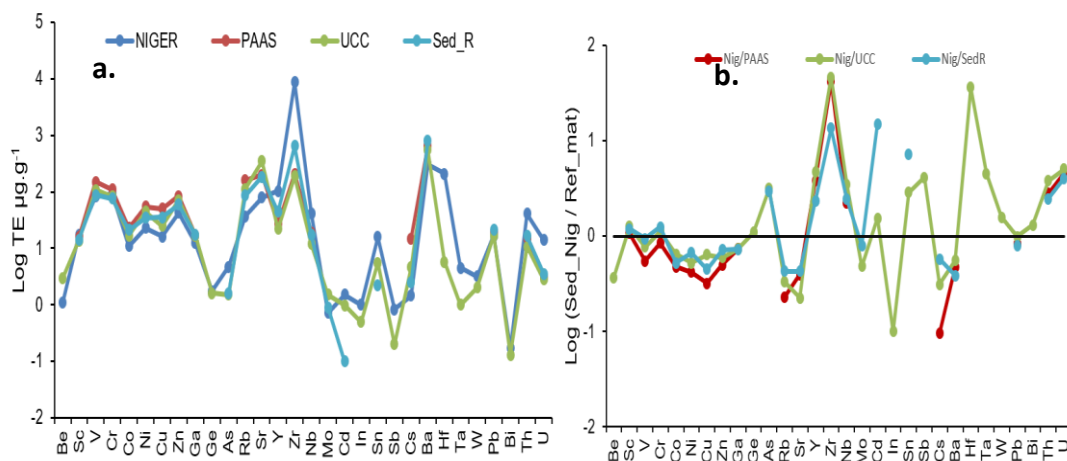


Figure 2 : Distribution des concentrations moyennes des éléments traces (ET) dans les sédiments du Niger en comparaison avec les teneurs dans le PAAS, l'UCC et le sédiment du Ruisseau au Togo (Sed_R) a) concentration avant standardisation b) Standardisation des concentrations (Niger / référence).

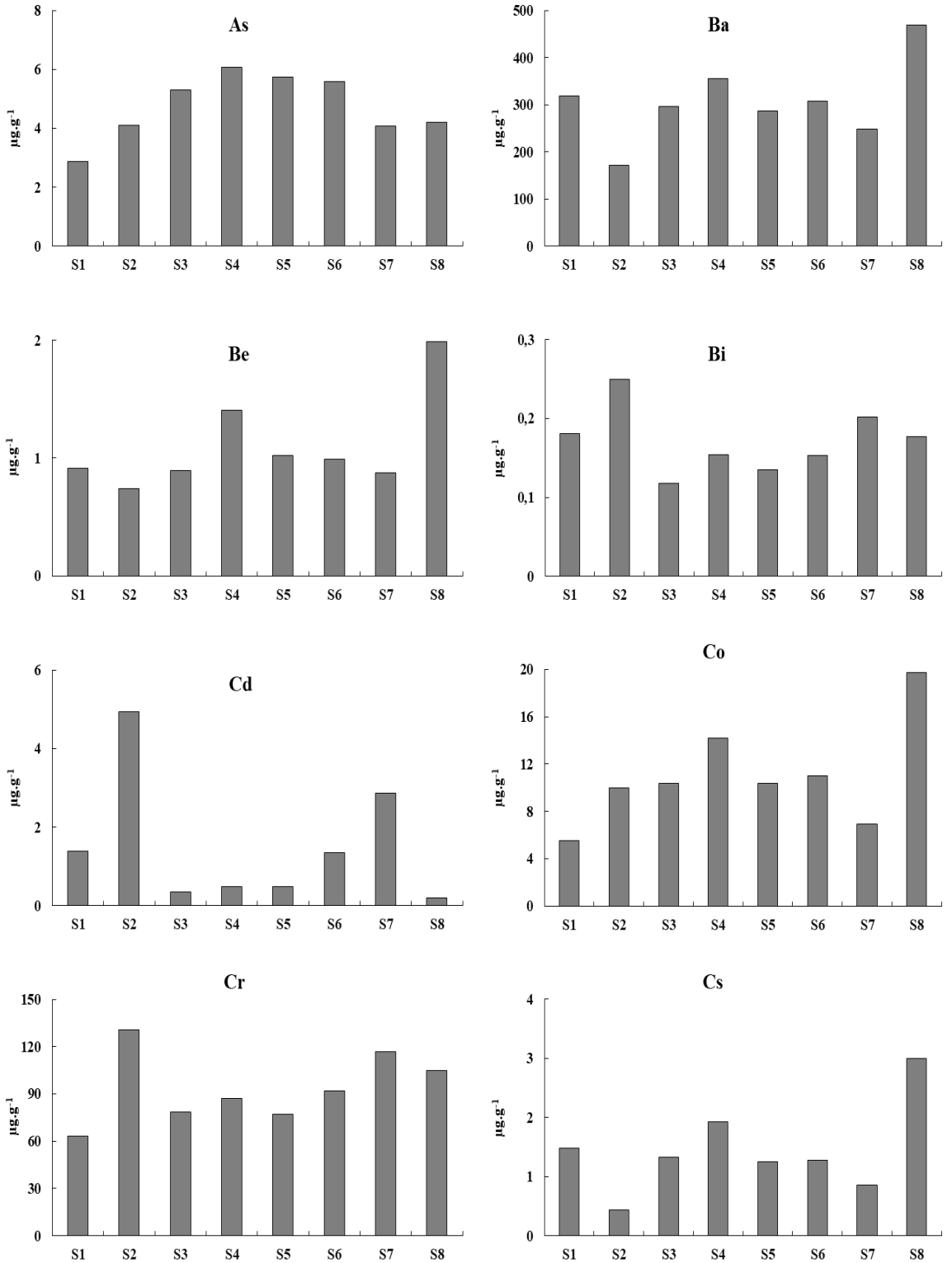


Figure 3 : Distribution des concentrations en ET au niveau des huit stations le long du Niger.

Tableau 3 : Teneurs en éléments traces (ET : Cd, As, Cr, Pb, Ni, Zn, Cu) dans les sédiments du fleuve Niger ($\mu\text{g. g}^{-1}$), comparés aux valeurs seuils internationales.

Stations	Cd	As	Cr	Pb	Ni	Zn	Cu
S1	1,39	2,86	63,2	18,7	11,7	28,6	10,0
S2	4,94	4,09	130	17,6	18,3	44,7	12,6
S3	0,36	5,31	78,7	11,6	22,2	33,4	16,2
S4	0,49	6,07	87,2	19,7	30,7	60,0	22,0
S5	0,49	5,75	77,1	15,2	22,3	40,9	16,1
S6	1,36	5,59	91,8	15,6	21,1	38,2	15,4
S7	2,86	4,07	117	18,1	13,7	38,8	10,1
S8	0,20	4,20	105	17,9	43,7	55,1	26,0
Valeurs Seuils	1⁽¹⁾	6⁽²⁾	150⁽³⁾	100⁽⁴⁾	50⁽⁵⁾	300⁽⁶⁾	100⁽⁷⁾

 Concentration ne respectant pas la norme réglementaire

¹ Valeur de référence pour le Cd de l'Agence britannique pour les sols des zones urbaines

² Moyenne mondiale des sols non contaminés en As

³ Valeur limite en Cr

⁴ Valeur critique en Pb indiquée par l'OMS

⁵ Valeur limite en Ni

⁶ Valeur critique en Zn indiquée par l'OMS

⁷ Niveau tolérable de concentration de Cu dans les sols (NFU 4405)

Source : Tankari Dan-Badjo et al. (2013).

DISCUSSION

Facteur d'enrichissement

Le facteur d'enrichissement (FE) est un outil puissant pour l'évaluation de la contamination des ET (Oumar et al., 2014). Les éléments d'origine naturelle ont une valeur FE proche de l'unité, tandis que les éléments d'origine anthropique ont des valeurs FE de plusieurs ordres de grandeur. Il est généralement admis que $FE < 2$ reflète la variabilité naturelle du fond géochimique régional et la composition minéralogique des roches de fond (Sutherland, 2000 ; Hernandez et al., 2003).

Pour la majorité des paramètres suivis dans cette étude (As, Cd, Cr, Cs, Mo, Nb, pb, Sn, Th, U, Y, Zr, V), FE est supérieure à 2 et présente des valeurs variables selon les paramètres ; ce qui reflète une origine anthropique (Figure 4).

Mais, l'utilisation de la composition géochimique d'un sédiment vierge local comme référence dans le calcul de FE permet de diminuer le seuil de FE pour le fond

géochimique naturel à 1,5 (Soto-Jiménez et Páez-Osuna, 2001 ; Roussiez et al., 2005).

Les valeurs de FE calculées à partir des concentrations moyennes d'éléments traces sont extrêmement contaminées en Cd (pour les stations S1, S2, S6 et S7), en Zr (pour S1, S2, S4, S5, S6 et S7) et en Sn, U et Y pour S2. Il est donc possible que les principales sources naturelles des concentrations élevées de Cd observées dans la présente étude résultent de l'altération géologique (Liu et al., 2013 ; Liu et al., 2015). Certaines études ont révélé des concentrations élevées de Cd dans les sols naturels en Chine (0,2-20,1 $\mu\text{g/g}$ et 4,28-8,72 $\mu\text{g/g}$) et en Corée (0,42-42 $\mu\text{g/g}$) (Liu et al., 2013 ; Liu et al., 2015 ; Yang et al., 2022).

Les indices FE ont également été utilisés pour examiner les sources de contamination. Zhang et Liu (2002) ont suggéré que les sources de contamination sont plus susceptibles d'être d'origine anthropique lorsque les valeurs FE dépassent 1,5. Ce qui laisser présager un impact des activités

anthropiques sur l'ensemble de la zone étudiée (Oumar *et al.*, 2014).

En l'absence de données de fond, les concentrations géochimiques de fond dans l'UCC sont généralement utilisées pour estimer les indices FE. Cependant, les références de l'UCC peuvent ne pas correspondre aux données de fond locales (Liu *et al.*, 2013).

Indice de géo-accumulation (I_{géo}) à différentes stations dans les sédiments du fleuve Niger

Une échelle à sept classes d'indice de géo-accumulation (Shi *et al.*, 2018) allant de non pollué à très pollué (Tableau 4) a servi de base pour l'analyse des résultats obtenus. Les valeurs d'I_{géo} calculées selon cette échelle sont présentées dans le Tableau 5. Selon l'I_{géo}, les ET s'ordonnent dans les sédiments du fleuve Niger suivant l'ordre Cd > Cr > As > Ni > Pb > Co > Zn >. Le Cd est le plus important et son indice va jusqu'à une contamination extrême. Les résultats indiquent que la gamme de pollution par le Cd du fleuve Niger est très forte, surtout sur les stations S1, S2, S6 et S7. Ceci est confirmé par les FE très élevés calculés à ces stations pour Cd. Toutes les stations sont non ou légèrement contaminées par As, Zn, Ni, Cr, Pb et Co. Ces éléments présentent donc un faible potentiel de risque écologique le long du tronçon du Niger étudié.

La qualité des sédiments des milieux aquatiques est un indicateur important de la pollution. Car les concentrations en métaux traces sont relativement élevées dans les sédiments et reflètent de faibles changements dans le temps et l'espace par rapport aux eaux de surface (Wognin *et al.*, 2017 ; Ouattara *et al.*, 2021). Les valeurs d'indice de géo-accumulation calculées au niveau de toutes les stations montrent que celles-ci sont contaminées. En effet, toutes les stations de prélèvement, en dehors de la station S8, présentent une contamination forte à modérée en Cd tandis que la station S4 est modérément contaminée en As et les stations S2, S7 et S8 en Cr. Malgré la forte mobilité du Zinc (Coulibaly *et al.*, 2009), ce dernier ne présente aucune contamination pour l'ensemble des stations d'étude. C'est un paramètre qui migre plus

facilement et susceptible de se retrouver dans la colonne d'eau suite à un lessivage et un relargage efficace.

Les analyses chimiques ne permettent pas une évaluation réaliste du risque éco toxicologique des sédiments *in situ* et ne permettent pas de prédire les effets des polluants sur le biote (Arslan *et al.*, 2010 ; Prygiel *et al.*, 2000). En outre, en raison de limitations techniques et financières, il est difficilement concevable de déterminer tous les polluants possibles présents dans les sédiments et de mesurer leurs concentrations (Vivien *et al.* 2014). Par conséquent, les méthodes biologiques devraient être appliquées aux évaluations de la qualité des sédiments en plus des analyses chimiques traditionnelles afin de réaliser une évaluation du risque éco toxicologique fiable (Nurzat *et al.*, 2022 ; Dagnino *et al.*, 2008 ; Prygiel *et al.*, 2000).

Ainsi, l'augmentation de la teneur en matière organique dans les sédiments peut contribuer à l'augmentation de la densité et de la biomasse des espèces benthiques (Ansari *et al.*, 2014 ; Huguet *et Orvain*, 2022).

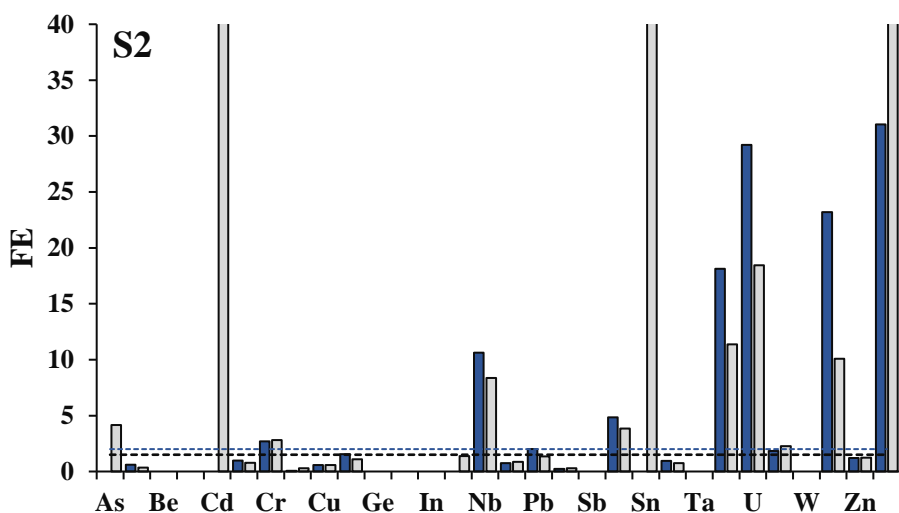
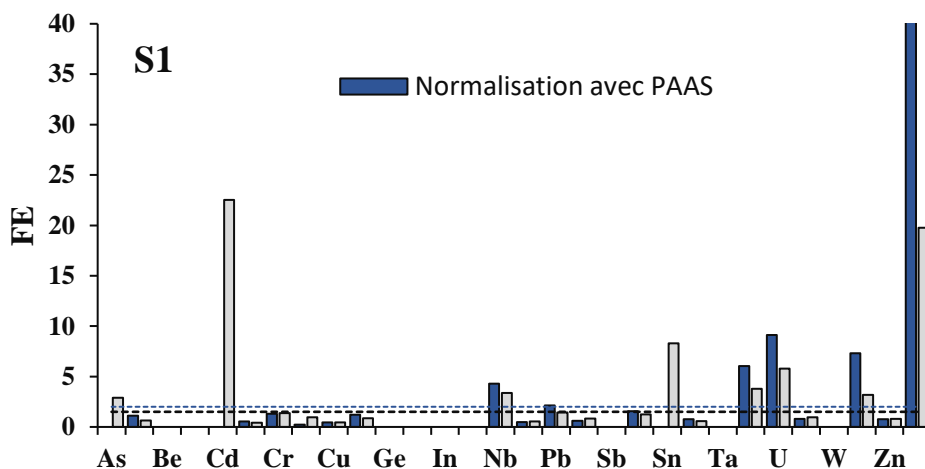
Cette étude a pour objectif d'évaluer les teneurs et la distribution en éléments traces (ET) dans les sédiments des rives du Niger, dans le but d'évaluer la qualité des eaux du fleuve.

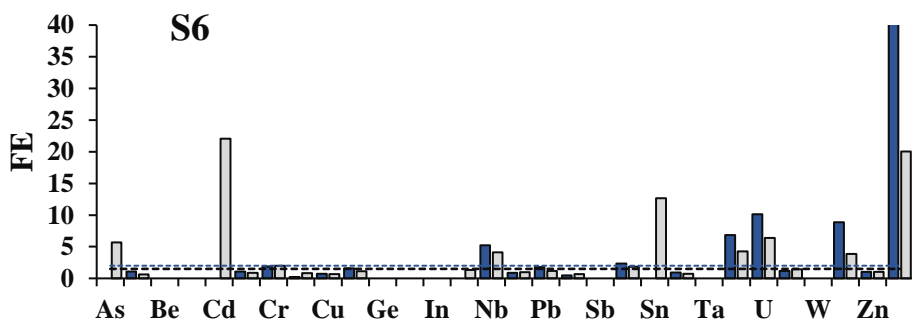
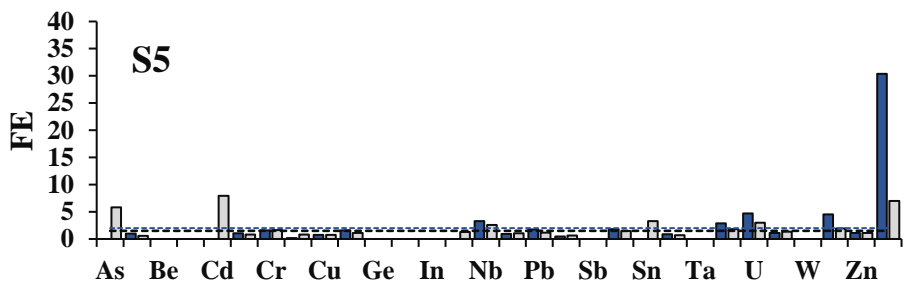
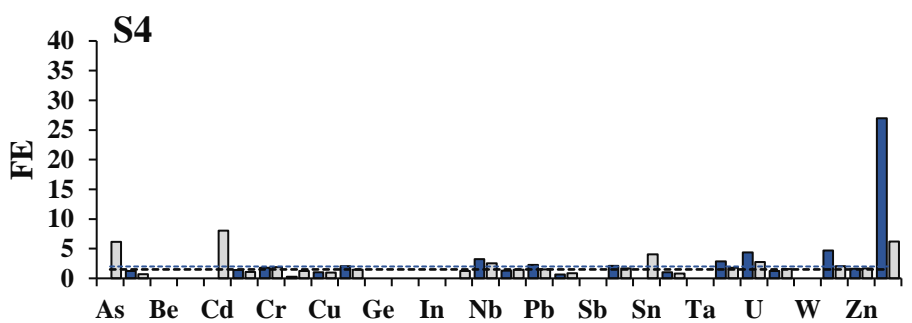
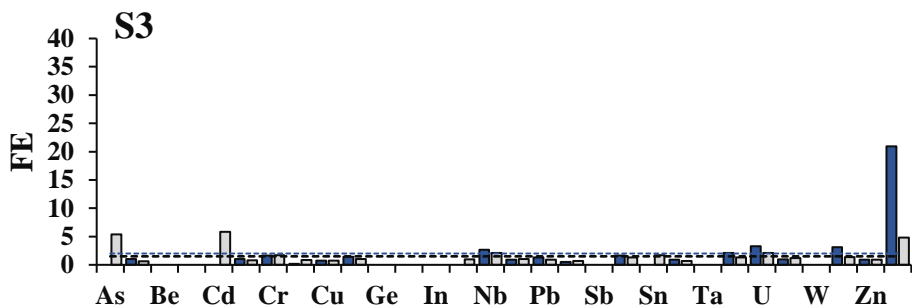
La stratégie d'échantillonnage, à la fois spatiale et temporelle, mise en place dans cette étude pour évaluer la variabilité de la composition chimique des sédiments au sein du bassin versant pendant la campagne 2018 en amont et en aval de la ville de Niamey, a permis d'avoir des résultats très pertinents.

La signature géochimique (éléments traces) des sédiments fluviaux est relativement homogène au sein du bassin versant et fortement contrôlée par le substrat géologique (granites et schistes) et la couverture de sol latéritique. On a observé par contre des différences notables entre les sites amont et aval du Niger qui seraient probablement dues aux apports liés aux activités anthropiques. Il apparaît alors clairement qu'il n'y a aucun impact d'une quelconque activité minière artisanale sur la qualité des sédiments fluviaux. La composition chimique des sédiments du lit

du Niger est caractéristique d'un bassin versant drainant des sols latéritiques avec des concentrations en Zr, Hf, U et Th plus élevées que la signature PAAS ou UCC et par conséquent, des facteurs d'enrichissement élevés, en raison du fond géochimique régional. Les modèles de distribution des ET dans les sédiments du lit sont également contrôlés par les sols latéritiques avec un enrichissement en terres rares lourdes et une concentration plus faible en terres rares moyennes des anomalies positives en Cérium

(Ce) et Europium (Eu) qui sont des caractéristiques des sédiments fluviaux produits par l'érosion physique des sols latéritiques. Aucun impact anthropique de l'agglomération de Niamey n'a pu être mesuré sur la composition chimique des sédiments du Niger, sauf pour l'As et le Cd. Ces derniers proviennent probablement des décharges industrielles, des engrais du sol et des eaux usées. Ensuite, il n'y a pas d'enrichissement en ET entre l'amont et l'aval de la ville.





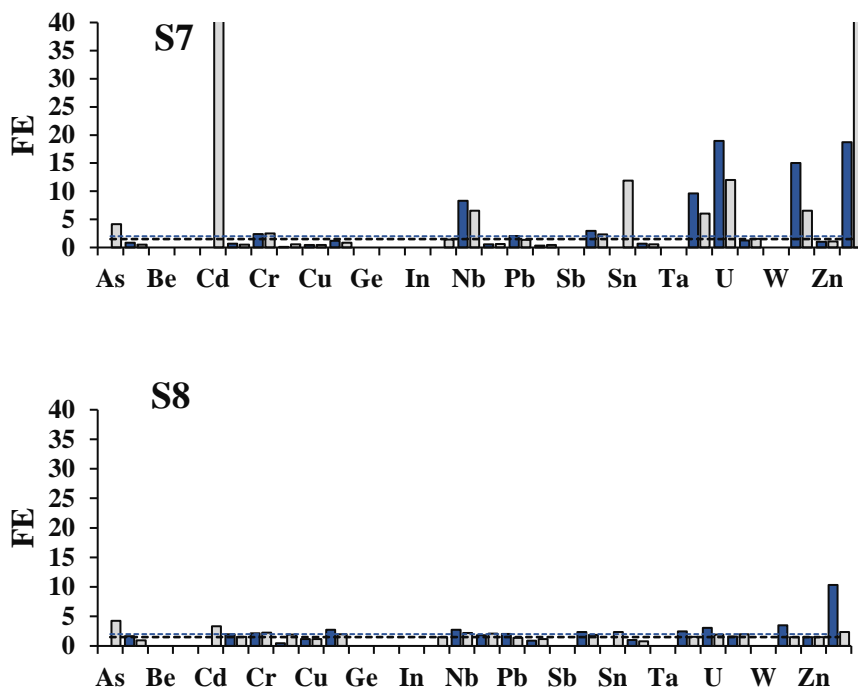


Figure 4 : Facteurs d'enrichissements des ET dans les différentes stations du Niger, normalisés avec le PASS et le sédiment du Ruisseau de Madjé au Togo (pris ici comme sédiment régional).

Tableau 4 : Classes définies par l'index de géo-accumulation.

Classes $I_{géo}$	Valeur de l'index ($I_{géo}$)	Intensité de la pollution
0	$(-\infty, 0)$	Sans contamination
1	$(0,1]$	Sans à légère contamination
2	$(1,2]$	Contamination modérée
3	$(2,3]$	Contamination modérée à forte
4	$(3,4]$	Forte contamination
5	$(4,5]$	Forte à extrême contamination
6	$(5,+\infty)$	Contamination extrême

Source : Shi et al. (2018).

Tableau 5 : Indice de géo-accumulation (I_{geo}) à différentes stations dans le fleuve Niger.

Stations	Cd	As	Cr	Pb	Ni	Zn	Co
S1	3,21	-0,07	0,27	-0,45	-1,26	-1,45	-1,66
S2	5,04	0,45	1,31	-0,54	-0,61	-0,80	-0,80
S3	1,25	0,82	0,58	-1,14	-0,33	-1,22	-0,75
S4	1,72	1,02	0,73	-0,37	0,14	-0,38	-0,29
S5	1,71	0,94	0,55	-0,75	-0,33	-0,93	-0,75
S6	3,18	0,90	0,81	-0,71	-0,40	-1,03	-0,66
S7	4,26	0,44	1,15	-0,50	-1,03	-1,01	-1,33
S8	0,44	0,48	1,00	-0,51	0,65	-0,50	0,18

S = Station, Cd = Cadmium, As = Arsenic, Cr = Chrome, Pb = Plomb, Ni = Nickel, Zn = Zinc, Co = Cobalt

En gras : forte contamination, **en grisé gras** : contamination modérée, **en italique** : légère contamination, en caractère normal et valeurs négatives : pas de contamination.

Cette accumulation en As et Cd peut être due aux activités locales telles que l'usage des herbicides et des engrais et aux activités domestiques. En effet, les engrais et les herbicides sont utilisés couramment dans cette zone pour traiter les cultures des légumes le long du fleuve. Un suivi d'échantillonnage en fonction du régime hydrologique du fleuve permettra de mieux confirmer ces résultats.

CONFLITS D'INTERETS

Les auteurs de ce manuscrit déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêt de quelque nature que ce soit, ni entre les auteurs eux-mêmes, ni entre les auteurs et des tierces personnes.

CONTRIBUTIONS DES AUTEURS

HSA : conception de la recherche, échantillonnage sur le terrain et analyse des échantillons, rédaction de l'article ; BA : conception de la recherche et rédaction de l'article ; MT, JLP et FA : conception de la recherche, analyse des échantillons et rédaction de l'article.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Environnement de Toulouse et le Département des Sciences de la Vie et de la Terre de l'ENS de l'Université Abdou Moumouni de Niamey pour avoir fourni le cadre et le support

technique qui ont facilité ce travail. Nous remercions également les techniciens de ces deux laboratoires pour leur aide dans l'analyse des échantillons. Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé dans la collecte des données de terrain et sans oublier nos piroguiers sur les différents sites.

REFERENCES

- Abi Ghanem C. 2008. Speciation of three Trace Elements Mercury, Lead, Cadmium in Sediments of the Lebanese Coastal Zones. Thèse de Doctorat. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, Paris (France), p. 312.
- Alhou B, Issiaka Y, Awais A, Micha JC. 2014. Premier inventaire des macro-invertébrés du fleuve Niger à Niamey comme bioindicateurs de la pollution urbaine et industrielle. *Hydroécol. Appl.*, **18**: 139–63. DOI : <https://doi.org/10.1051/hydro/2014002>.
- Alhou B. 2007. Impact des rejets de la ville de Niamey (Niger) sur la qualité des eaux du fleuve Niger. Thèse de Doctorat unique, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur (Belgique), p. 299.
- Amadou H, Laouali M, Manzola A. 2011. Évaluation des rejets d'eaux usées de la ville de Niamey dans le fleuve Niger. *Afrique Science*, **7**: 43–55. <http://www.afriquescience.info>.

- Ansari ZA, Ingole BS, Parulekar AH. 2014. Organic enrichment and benthic fauna—Some ecological consideration. *Indian J. Mar. Sci.*, **43**(4): 554-560.
- Arslan N, Koç, B, Çiçek, A. 2010. Metal contents in water, sediment, and Oligochaeta-Chironomidae of Lake Uluabat, a Ramsar site of Turkey. *Sci. World J.*, **10**: 1269–1281. DOI 10.1100/tsw.2010.117.
- Assaker A. 2016. Hydrologie et biogéochimie du bassin versant du fleuve Ibrahim : un observatoire du fonctionnement de la zone critique au Liban. PhD thesis. Université de Toulouse-INP, p. 255.
- Avumadi AMD, Gnandi K, Probst JL. 2019. Trace element distribution and enrichment in the stream sediments of the Lake Togo watersheds (South of Togo). *Adv. Ecol. Environ. Res.*, **4**: 87–114.
- Oumar B, Ekengele NL, Balla OAD. 2014. Évaluation du niveau de pollution par les métaux lourds des lacs Bini et Dang, Région de l'Adamaoua, Cameroun. *Afr. Sci.*, **10**(2): 184 – 198. <http://www.afriquescience.info>.
- Behra P, Probst JL. 2015. Sources et cheminements des polluants. CNRS Editions, Paris, FR, p. 208-209.
- Benabdelkader A, Talebb A, Probst JL, Belaidi N, Probst A. 2018. Anthropogenic contribution and influencing factors on metal features in fluvial sediments from a semi-arid Mediterranean river basin (Tafna River, Algeria): a multi-indices approach. *Sci. Total Environ.*, **626**: 899–914.
- Cabral Pinto MMS, Dinis PA, Silva MMVG, Ferreira da Silva EA, Rocha F. 2017. Transfer processes of potentially toxic elements (PTE) from rocks to soils and the origin of PTE in soils: A case study on the island of Santiago (Cape Verde). *J. Geochem. Explor.*, **183**: 140-151.
- Cabral Pinto MMS, Dinis PA, Silva MMVG, Ferreira da Silva EA. 2016. Sediment generation on a volcanic island with arid tropical climate: a perspective based on geochemical maps of top soils and stream sediments from Santiago Island, Cape Verde. *Appl. Geochem.*, **75**: 114-124. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2016.10.019>
- Chen CW, Kao CM, Chen CF, Dong CD. 2007. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere* **66**: 14 – 31. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2006.09.030
- Coulibaly AS, Mamadou T, Eric D, Monde S, Kouame A, Blanc G. 2014. Impacts des rejets accidentels sur la qualité environnementale des sédiments de la rade portuaire d'Abidjan (lagune Ebrié ; Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **8**(6): 2842-2848. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i6.40>.
- Coulibaly AS, Monde S, Wognin AV, Aka K. 2009. Analyse des Eléments Traces Métalliques (ETM) dans les baies estuariennes d'Abidjan en Côte d'Ivoire. *Afr. Sci.*, **5**(3): 77-96. <http://www.afriquescience.info/document.php?id=1661>
- Dagnino A, Sforzini S, Dondero F, Fenoglio S, Bona E, Jensen J, Viarengo AA. 2008. “Weight-of-Evidence” Approach for the Integration of Environmental “Triad” Data to Assess Ecological Risk and Biological Vulnerability. *Integr. Environ. Assess. Manag.*, **4**: 314–326.
- Diop C, Dewaele D, Toure A, Cabral M, Cazier F, Fall M, Ouddane B, Diouf A. 2012. Étude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments côtiers au niveau des points d'évacuation des eaux usées à Dakar (Sénégal). *Rev. Sci. Eau.*, **25**(3): 277–285. DOI: <https://doi.org/10.7202/1013107ar>.
- Donald Loughheed H, Beth McClenaghan M, Layton-Matthews D, Leybourne M. 2020. Exploration Potential of Fine-Fraction Heavy Mineral Concentrates from Till Using Automated Mineralogy: A Case Study from the Izok Lake Cu–Zn–Pb–Ag VMS Deposit, Nunavut, Canada. *Minéral.*, **10**(310): 1-33. DOI:10.3390/min10040310

- Gaiero DM, Depetris PJ, Probst JL, Bidart SM, Leleyter L. 2004. The signature of river- and wind-borne materials exported from Patagonia to the southern latitudes: a view from REEs and implications for paleoclimatic interpretations. *Earth Planet Sci. Lett.*, **219**:357–376. DOI: 10.1016/S0012-821X(03)00686-1.
- Gaiero DM, Probst JL, Depetris PJ, Bidart SM, Leleyter L. 2003. Iron and other transition metals in Patagonian riverborne and windborne materials: geochemical control and transport to the southern South Atlantic Ocean. *Geochem. Cosmochim. Acta.*, **67**:3603–3623. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(03\)00211-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(03)00211-4)
- Gomez AA, Valenzuela JLG, Aguayo SS, Meza DF, Ramirez JH, Ochoa GO. 2007. Chemical partitioning of sediment contamination by heavy metals in the San Pedro River, Sonora, Mexico. *Chem. Speciat. Bioavail.*, **19** : 25–35.
- Gonçalves C, Figueira RCL, Sartoretto JR, Alexandre Barbosa Salaroli AB, Ribeiro AP, Paulo Alves de Lima Ferreira PAL, Michaelovitch de Mahiques M. 2013. Reconstruction of historical trends in potentially toxic elements from sediment cores collected in bertioaga channel, southeastern Brazil. *Braz. j. oceanogr.*, **61**(2):149-160.
- Harikumar P.S., Prajitha K. and Silpa S., 2010. Assessment of Heavy Metal Contamination in the Sediments of a River Draining into a Ramsar Site in the Indian Subcontinent. *J. Adv. Lab. Res. Biol.*, **1**(2): 120-1209.
- Hernandez L, Probst A, Probst JL, Ulrich E. 2003. Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination. *Sci. Total Environ.*, **312** : 195–219. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00223-7
- Huguet A, Orvain F. 2022. Projet PHARESEE : Productivité microphytobenthique des Habitats intertidaux en lien avec la dynamique sédimentaire, biogéochimique et les ingénieurs d'écosystème de la faune benthique : implication pour des enjeux de modélisation et de REhabilitation des vasières de la SEine Estuarienne. Rapport de recherche du programme Seine-Aval 6, p. 161, DOI: 10.13140/RG.2.2.15139.32804
- Kinimo KC, Yao, KM, Marcotte S, Kouassi NLB, Trokourey A. 2018. Distribution trends and ecological risks of arsenic and trace metals in wetland sediments around gold mining activities in central-southern and southeastern Côte d'Ivoire. *J. of Geoch. Explor.*, **190**: 265-280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.03.013>.
- Liu Y, Xiao T, Baveye PC, Zhu J, Ning Z, Li H. 2015. Potential health risk in areas with high naturally-occurring cadmium background in southwestern China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **112** : 122–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.10.022>
- Liu Y, Xiao T, Ning Z, Li H, Tang J, Zhou G. 2013. High cadmium concentration in soil in the Three Gorges region: geogenic source and potential bioavailability. *Appl. Geochem.*, **37**: 149–156. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.022>
- Mortatti J, Probst JL. 2010. Characteristics of heavy metals and their evaluation in suspended sediments from Piracicaba river basin (São Paulo, Brazil). *Revista Brasileira de Geociências*, **40**: 375–379.
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal* **2**:108–118. In Kinimo et al., 2018. Distribution trends and ecological risks of arsenic and trace metals in wetland sediments around gold mining activities in central-southern and southeastern Côte d'Ivoire. *J. Geochem. Explor.*, **190** : 265–280. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.03.013>.
- N'guessan YM, Wognin VA, Kouadio KG, Probst A, Probst JL. 2017. Paramètres influençant la distribution des éléments traces métalliques dans les affluents du

- fleuve Garonne (France). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **11**(3): 1361-1372. <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i3.35>
- N'guessan YM, Probst JL, Bur T, Probst A. 2009. Trace elements in streambed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): where do they come from? *Sci. Total Environ.*, **407**: 2939–2952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.047>
- Totubaeva N, Tokpaeva Z, Kojobaev K, Usubalieva A, Terekhova V. 2022. Ecological Assessment of Technogenically Disturbed Soils of the Mountain Ecosystems of Kyrgyz Republic based on the TRIAD Method. *Pol. J. Environ. Stud.*, **31**(3) : 2256-2272. DOI : [10.15244/pjoes/143509](https://doi.org/10.15244/pjoes/143509).
- Olivry JC. 2002. Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger. *Autorité du Bassin du Niger / Banque Mondiale*.
- Ouatara AA, Sangare N, N'goran KPA, Yao KM, Trokourey A, Diaco T. 2021. Evaluation de la contamination des éléments traces métalliques dans les sédiments de la rivière N'zi, Côte d'Ivoire. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **15** : 2199-2208. DOI: <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v15i5.38>
- Prygiel J, Rosso-Darmet A, Lafont M, Lesniak C, Durbec A, Ouddane B. 2000. Use of oligochaete communities for assessment of ecotoxicological risk in fine sediment of rivers and canals of the Artois-Picardie water basin (france). *Hydrobiologia*, **410**: 25-37.
- Roussiez V, Ludwig W, Probst JL, Monaco A, 2005. Background levels of heavy metals in surficial sediments of the Gulf of Lions (NW Mediterranean): an approach based on 133Cs normalization and lead isotope measurements. *Environ Pollut.*, **138**: 167–77. DOI: [10.1016/j.envpol.2005.02.004](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.02.004).
- Shi Yannan, Zhang Chaojie, Yu Jiongqi, Tang Mingli, 2018. Application Research on Stabilizing Treatment of Dredged Sediment, E3S Web of Conferences **38**(02008). DOI : <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183802008>
- Singh M, German Müller G, Singh IB. 2002. Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanisation of the Ganga plain, India. *Water Air Soil Pollut.*, **141** : 35–54. DOI : <https://doi.org/10.1023/A:1021339917643>
- Singh JK, Kumar P, Kumar R. 2020. Ecological risk assessment of heavy metal contamination in mangrove forest sediment of Gulf of Khambhat region, West Coast of India. *SN Appl. Sci.*, **2**(2027). DOI : <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03890-w>.
- Soto-Jimenez MF, Paez-Osuna F. 2001. Distribution and normalization of heavy metal concentrations in mangrove and lagoonal sediments from Mazatlan Harbor (SE Gulf of California). *Estuar. Coast Shelf Sci.*, **53**: 259–74. DOI: [10.1006/ecss.2000.0814](https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0814)
- Souley Adamou H, Alhou B, Tackx M Azémar F. 2021. Rotifers in the Niger River, Niger: diversity and abundance in relation to environmental parameters. *Afr. J. Aquat. Sci.*, **46**(4) : 473. DOI: [10.2989/16085914.2021.1892577](https://doi.org/10.2989/16085914.2021.1892577).
- Sow MA, Payre-Suc V, Julien F, Camara M, Baque D, Probst A, Sidibe Probst JL. 2018. Geochemical composition of fluvial sediments in the Milo River basin (Guinea) : is there any impact of artisanal mining and of a big African city, Kankan. *J. Afr. Earth Sci.*, **145**:102–114. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.05.009>
- Sutherland RA. 2000. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environ Geol.*, **39**: 330–341. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/s002540050473](https://doi.org/10.1007/s002540050473)
- Tankari dan-badjo A, Guéro Y, Dan Lamso N, Tidjani AD, Ambouta KJM, Feidt C, Sterckeman T, Echevarria G. 2013. Evaluation de la contamination des sols

- par les éléments traces métalliques dans les zones urbaines et péri-urbaines de la ville de Niamey (Niger). *Revue des Bioressources*, **2**: 82–95.
- Wildi W, Dominik J, Loizeau, JL, Thomas RL, Favarger PY, Haller L, Perroud A, Peytremann C. 2004. River, reservoir and lake sediment contamination by heavy metals downstream from urban areas of Switzerland. *Res. Manag.*, **9** : 75–87. DOI : <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2004.00236.x>
- Wognin AV, N'guessan YM, Assalé FJP, Aka AM, Coulibaly AS, Monde S, Aka K. 2017. Les éléments traces métalliques dans la lagune Ebrié: distribution saisonnière, niveau de contamination et qualité environnementale des sédiments. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **11**(2): 911-923.
- DOI:
<https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i2.30>
- Yang L, Ren Q, Ge S, Jiao Z, Zhan W, Hou R, Ruan X, Pan Y, Wang Y. 2022. Metal(loid)s Spatial Distribution, Accumulation, and Potential Health Risk Assessment in Soil-Wheat Systems near a Pb/Zn Smelter in Henan Province, Central China. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, **19**: 2527-2539. DOI : <https://doi.org/10.3390/ijerph19052527>
- Zhang J, Liu CL. 2002. Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China: weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **54**: 1051–1070. DOI : <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0879>