

Évaluation du niveau de pollution des déchets des sites miniers de Kombo-Laka, Plateau de l'Adamaoua, Cameroun

Sabine DANALA DANGA^{1*}, Léopold EKENGLE NGA¹, Bienvenu Achille IBRAHIM², Denis TIKI³,
Lionelle Estelle MAMDEM² et Dieudonné Lucien BITOM²

¹ Université de Ngaoundéré, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire Sol et Environnement (SEN),
BP 454, Ngaoundéré, Cameroun

² Université de Dschang, Département des Sciences du sol, BP 222, Dschang, Cameroun

³ Institut de Recherche Agricole pour le Développement, Laboratoire des sols, BP 65 Ngaoundéré, Cameroun

⁴ Université de Yaoundé I, Département des Sciences de la Terre, BP 812, Yaoundé, Cameroun

(Reçu le 04 Novembre 2023 ; Accepté le 30 Janvier 2024)

* Correspondance, courriel : sdanaladanga@gmail.com

Résumé

Cette étude a pour but d'évaluer le niveau de contamination des déchets miniers par les éléments traces métalliques (ETM), et de voir l'effet du temps et de l'activité d'exploitation minière sur la contamination. Ainsi, Six (6) échantillons ont été prélevés dans trois sites exploités entre autres Fel, Wantia et Mama Wassandé, et sur un site témoin. Le pH, la conductivité électrique la matière organique (MO) et les ETM ont été analysés. La MO par la méthode Walkley and black et les concentrations en ETM par spectrométrie de masse avec plasma à couplage inductif (ICP-MS) pour évaluer le niveau de pollution. L'intensité de la pollution a été évaluée par le calcul du facteur d'enrichissement (EF) et l'indice de géoaccumulation (*I_{geo}*). Les résultats montrent que les déchets sont caractérisés par un pH acide (4,25 à 5,53) et une MO peu élevée (0,95 à 2,05). La caractérisation géochimique révèle 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. Ainsi, il ressort que l'environnement est très contaminé en ETM, plus spécifiquement avec des valeurs plus élevées dans le site de Mama Wassandé qui est le plus récent et en activité par rapport à ceux de Wantia et de Fel, suggérant le risque de contamination dès que commence le processus d'extraction. Ces résultats vont enrichir la base de données sur la composition des déchets miniers en vue de minimiser les risques de contamination de l'environnement par ces déchets.

Mots-clés : *déchets miniers, contamination, éléments traces métalliques, Adamaoua.*

Abstract

Assessment of the waste pollution level at the Kombo-Laka mining sites, Adamaoua Plateau, Cameroon

The aim of this study is to assess the level of contamination of mining waste by trace metals (TMs), and to evaluate the possible effect of time and mining activity on contamination levels. Six waste samples were taken from three sites, including Fel, Wantia and Mama Wassandé, and one from a control site. The pH, electrical conductivity, organic matter (OM) and TMs were analyzed. Organic matter was analyzed by the Walkley and Black method, and TM

concentrations by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) to assess pollution levels. Pollution intensity was assessed by calculating the enrichment factor (EF) and the geoaccumulation index (I_{geo}). The results show that waste is characterized by an acid pH (4.25 to 5.53) and low OM content (0.95 to 2.05). Geochemical characterization revealed high concentrations of 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) and Pb (26.24 mg/kg), likely to contaminate the soil and water around the mine. This shows that the environment is highly contaminated with TMEs, more specifically with higher values at the Mama Wassandé site, which is the most recent and in operation, compared with the Wantia and Fel sites, suggesting the risk of contamination as soon as the extraction process starts. These results will enhance the database on the composition of mining waste, with a view to minimizing the risk of environmental contamination by this waste.

Keywords : *mining waste, contamination, trace metals, Adamawa.*

1. Introduction

L'exploitation minière est devenue une activité économique majeure dans plusieurs pays africains et constitue une source de revenus pour un nombre important des populations tout en suscitant de nombreux espoirs de développement [1]. En général, elle constitue une importante source de revenus avec des effets monétaires, tels que les salaires distribués et les versements de redevances, impôts et taxes au trésor public [2]. Le Cameroun fait partie des sous-sols les plus riches d'Afrique sub-saharienne ; l'exploitation de ses ressources minières constitue par ailleurs, d'importants leviers de l'économie et du développement sur lesquelles il compte pour se hisser au rang des pays dits émergents à l'horizon 2035 [3]. Toutefois cette exploitation génère d'énormes quantités de rejets susceptibles de contenir des éléments traces métalliques (ETM) dont la particularité est d'être indestructibles et toxiques parfois même à des teneurs très faibles [4]. Ainsi après exploitation, plusieurs sites présentent de potentielles contaminations par diverses substances chimiques généralement nocives, notamment les ETM [1]. En effet, quand l'activité minière commence, un changement s'opère notamment dans les eaux au contact avec ces travaux miniers ; certains éléments qui sont présents dans les réseaux cristallins des minéraux et qui sont généralement difficilement libérés sont mis en solution et dispersés dans l'environnement [5]. Ces contaminants métalliques migrent du site minier (déchets) vers les différents compartiments de l'environnement, notamment via plusieurs mécanismes physico-chimiques de transfert tels que le transport en solution après altération chimique, le transport en suspension par l'eau et par l'air et le transport par différentes activités anthropiques [6]. Les métaux lourds peuvent être nocifs pour tous les écosystèmes à cause de leurs stabilités et de leurs persistances dans la nature [7]. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des êtres humains et des animaux Ils atteignent les organismes vivants par inhalation, par pénétration au travers de la peau et par voie trophique[8]. La localité de Kombo-Laka dans le plateau de l'Adamaoua (Cameroun) est une zone aurifère par excellence dont les ressources font l'objet d'une exploitation depuis la période coloniale, vers les années 1952 [9], et a longtemps été assurée par les artisans miniers et parallèlement depuis 2014 par des compagnies minières étrangères jusqu'aujourd'hui. Elle représente une source de subsistance et de gain permettant d'améliorer leur niveau de vie de façon conjoncturelle. Cependant en dépit de son indiscutable apport économique, le dénominateur commun de tous les sites miniers reste le même, à savoir les transformations environnementales qu'elle engendre, du fait de son caractère artisanal et non contrôlé ; car elle utilise des technologies mal adaptées tandis que l'aspect environnemental est relégué au second plan des priorités. Dans cette zone, plusieurs sites sont en cours d'exploitation, et c'est surtout l'or alluvionnaire, généralement localisée au bord des cours d'eau qui est exploité. Les déchets issus de cette exploitation exposent aussi bien l'homme que l'environnement à des menaces qui sont imperceptibles à l'œil nu et se manifestent dans la plupart des cas sur le long terme. La présente étude va contribuer à l'évaluation du niveau de contamination des déchets par les métaux lourds et de comprendre l'impact du temps et de l'activité minière sur cette contamination en vue de minimiser les risques de contamination.

2. Matériel et méthodes d'étude

2-1. Milieu physique

La zone d'étude est située à environ 130 km de Meiganga, chef-lieu du département du Mbéré. Elle s'étend sur une superficie approximative de 90 km². Elle est localisée entre 6,22 et 6,27 degrés de latitude Nord et entre 14,35 et 14,45 degrés de longitude Est (**Figure 1**). Elle est caractérisée par un climat de type soudano-guinéen, avec deux saisons ; une saison sèche, courte de 4 à 5 mois, et une saison de pluie, longue, qui dure 7 à 8 mois. La température moyenne étant de 34°C [10]. Sur le plan géologique, elle se trouve dans le Domaine Adamaoua-Yadé et repose sur un socle granito-gneissique moins diversifié, recoupé par des formations basaltiques et phonolitiques [11].

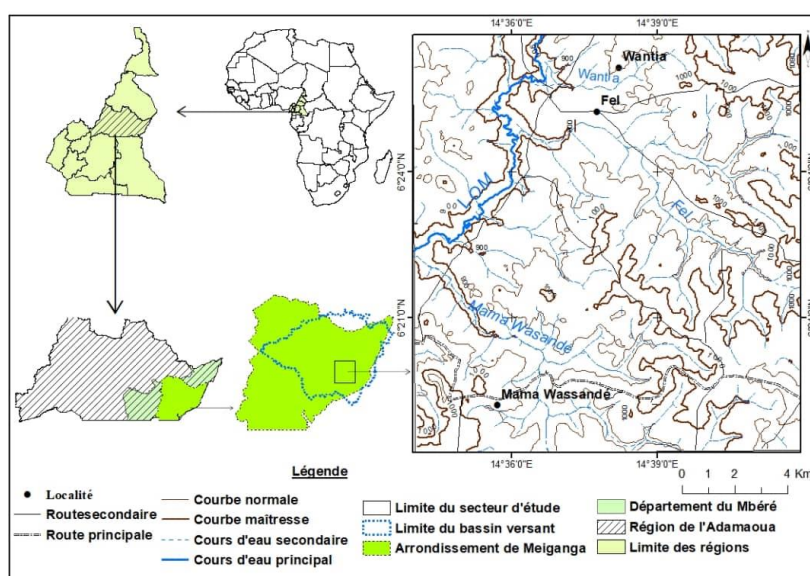


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude Source : carte topographique de Meiganga- au 1/50.000).
Source : Ministère des travaux publics et des transports, Institut national-136 bis Rue de Grenelle, Paris (VIIe) (1957)

Sur le plan pédologique, les principaux sols sont les sols ferralitiques rouge jaunâtre et cuirassés qui sont les plus dominants, présents sur les interfluves et collines, et les sols ferralitiques sablo-argileux qui se retrouvent, par endroits, principalement dans les vallées, hydromorphes, humifères, rouges et très propices à l'agriculture et au pâturage dans les bas-fonds [10].

2-2. Méthodes d'étude

Les travaux ont été menés suivant deux phases principales : sur le terrain et au laboratoire : Les travaux de terrain ont porté sur des observations in situ, lesquelles ont permis de faire le choix des sites, à décrire les déchets miniers, à effectuer des prises de vues et au prélèvement des échantillons. Les sites ont été choisis sur la base de la durée d'exploitation. Les mines de Fel et Wantia dont l'exploitation se faisant de façon artisanale depuis l'époque coloniale vers 1952 [9] jusqu'en 2016, ont une durée variant entre 70 et 80 ans. Ils sont parallèlement exploités de façon peu mécanisée par des sociétés étrangères. Quant au site de Mama Wassandé, l'exploitation y a débuté en 2017 et se pratique de façon peu mécanisée. Le prélèvement des échantillons s'est fait suivant un plan d'échantillonnage aléatoire ciblé. Pour chaque secteur, des échantillons ont été prélevés sur les haldes afin de connaître la teneur moyenne des ETM dans les rejets de lavage et ceux

de la gangue. Ainsi, sur chaque tas, des échantillons ont été prélevés au sommet, à mi et en bas de pente des haldes (**Figure 2**). Deux échantillons composites (dont un déchet de lavage et un autre de la gangue) sont réalisés à partir de 3 prélèvements élémentaires chacun.

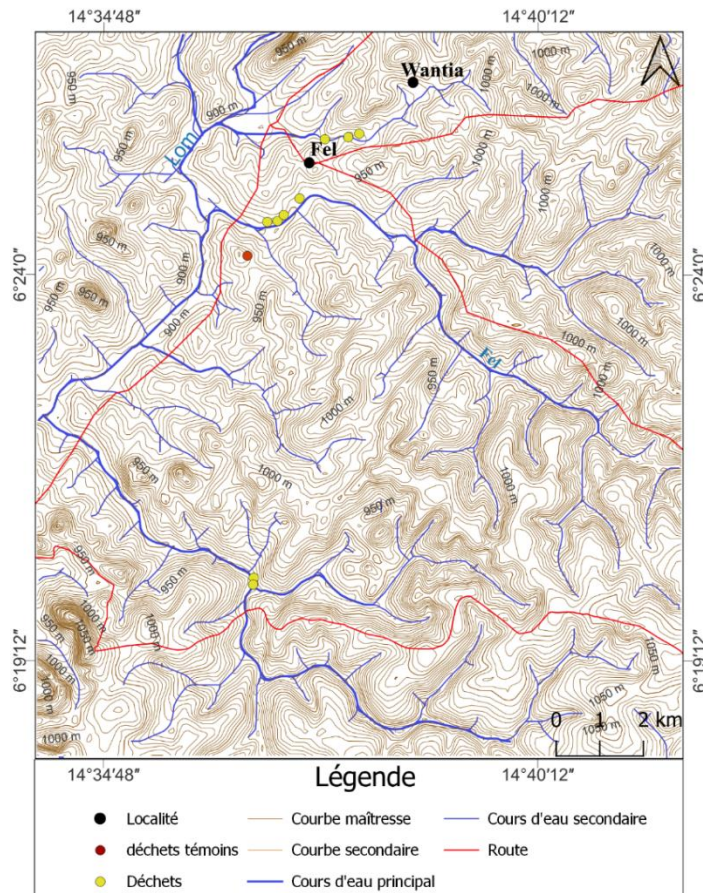


Figure 2 : Carte des points d'échantillonnage

Les travaux de laboratoire ont porté sur l'analyse des paramètres physico-chimiques et des concentrations en ETM.

- Le pH a été déterminé selon la méthode décrite par Mathieu et Pieltain [12] qui a consisté à plonger les électrodes du pH-mètre dans la suspension.
- La mesure de la conductivité a consisté à préparer 10g de sol et 50 ml d'eau déminéralisée dans un erlen de 250 mL. Après avoir agité pendant au moins 1 h, la conductivité a été mesurée à l'aide d'un conductimètre doté d'une cellule de mesure de conductivité avec correction automatique de la température.
- Le carbone organique par la méthode Walkley and Black sur la fraction < 0.2mm [13] au Soil Research Laboratory of Institute for Soil, Climate and Water de Pretoria (Afrique du Sud). Les résultats reportés en tant que carbone organique oxydable qui est dérivé en multipliant par 1,33 (1,33 est utilisé parce que 77 % du C est oxydé par le dichromate de potassium) comme le carbone organique [13].
- Les ETM ont été analysé par digestion acide à l'aide d'un mélange de HF/HNO₃ concentré. Les concentrations en ETM ont ensuite été déterminées à l'aide d'un ICP-MS (spectrométrie de masse à plasma inductif) Perkin-Elmer NexION 300D, après étalonnage de l'appareil au Spectrum Facility de l'université de Johannesburg, en Afrique du Sud.

2-3. Estimation de l'intensité de pollution

L'intensité de la pollution a été déterminée par le calcul du facteur d'enrichissement et de l'indice de géoaccumulation :

- **Le facteur d'enrichissement (FE)** a été proposé pour discriminer les apports anthropiques des sources naturelles, et ainsi définir l'intensité de la contamination [5]. Le calcul du FE a été défini en rapportant la teneur d'un élément contaminant de l'échantillon à la concentration d'un élément réputé relativement immobile de cet échantillon (éch), comparé avec le même rapport trouvé dans le matériau de référence et reconnus mondialement comme concentration de référence dans les zones non polluées [14]. Le fer (Fe) a été choisi comme élément immobile de référence pour réaliser ce calcul. Il est calculé à partir de la relation suivante :

$$FE = ([M]/[Fe])_{éch}/([M]/[Fe])_{RM} \tag{1}$$

FE étant le facteur d'enrichissement, [M]éch la concentration en métal M dans l'échantillon, [Fe] éch la concentration du fer dans l'échantillon, [M]RM la concentration du métal M dans les matériaux de référence (RM) et [Fe] RM la concentration du fer dans les matériaux de référence (RM). Les valeurs de FE comprises entre 0,5 et 1,5 indiquent une origine naturelle des ETM, celles supérieures à 1,5 sont attribuées à des apports anthropiques [15] (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Classification du facteur d'enrichissement [16]

Facteur d'enrichissement	Niveau d'enrichissement
< 1	Pas d'enrichissement
[1 ; 3]	Enrichissement faible
[3 ; 5]	Enrichissement modéré
[5 ; 10]	Enrichissement modéré à fort
[10 ; 25]	Fort enrichissement
[25 ; 50]	Très fort enrichissement
> 50	Enrichissement extrême

L'indice de géoaccumulation (*Igeo*) donne des informations sur le niveau d'accumulation des ETM dans les déchets. Il a été estimé par rapport aux valeurs de la croûte continentale [14] (**Tableau 3**) à partir de la relation suivante :

$$Igeo = \log_2[(C_n/1.5B_n)] \tag{2}$$

Igeo étant l'index de géoaccumulation, log2 le logarithme de base 2, n, l'élément considéré la concentration mesurée dans l'échantillon et B le fond géochimique avec valeur prise dans la littérature [14] ; 1,5 le facteur d'exagération du fond géochimique, dont la fonction sert à prendre en compte les fluctuations naturelles du fond pédogéochimique. Une échelle des valeurs avec six classes d'index de géoaccumulation est ainsi définie par en fonction de l'intensité de la pollution [17] (**Tableau 2**).

Tableau 2 : Classes définies pour l'index de géo accumulation [17]

Valeurs l' <i>Igeo</i>	Classes <i>Igeo</i>	Intensité de la pollution
<i>Igeo</i> > 5	6	Contamination extrême
4 > <i>Igeo</i> > 5	5	Forte à extrême contamination
3 > <i>Igeo</i> > 4	4	Forte contamination
2 > <i>Igeo</i> > 3	3	Contamination modérée à forte
1 > <i>Igeo</i> > 2	2	Contamination modérée
0 > <i>Igeo</i> > 1	1	Sans à légère contamination
<i>Igeo</i> < 0	0	Sans contamination

3. Résultats

3-1. Caractéristiques morphologiques des déchets

Deux catégories de déchets stockés sous forme d'haldes sont distinguées sur le site : (i) les stériles d'exploitation, représentant la masse importante de sol initial qu'il faut extraire afin d'avoir accès au gisement et (ii) les déchets résultants du lavage ou du traitement du minerai. Les haldes observés présentent généralement une forme trapézoïdale (Wantia et Mama Wassandé), et parfois une forme en dôme (Fel) (**Figure 3b'**), avec des volumes parfois impressionnants ; des millions de tonnes de rejets avec une hauteur variant entre 20 à 30 m. Ceux de Wantia ont parfois une forme légèrement aplatie (**Figure 3a**). On y rencontre quelquefois des griffes d'érosion du sommet vers la base, larges de 50cm à 1m environ. Ces haldes sont jaune brunâtre (10Y6/6) pour Mama Wassandé, très brun (7.5YR 5/8) pour Fel et rouge jaunâtre (5YR5/6) pour Wantia. Ceux de Fel et Mama ont une texture argilo-sableuse, avec quelques présences de graviers ; ceux de Wantia ont une texture argileuse ; on note la présence de fragments de quartzites et de galets de taille centimétrique à décimétrique. Les haldes de Wantia sont couvertes par une végétation herbacée éparpillée (**Figure 3a**), tandis que ceux Fel montrent une végétation herbacée peu dense (**Figure 3b**).

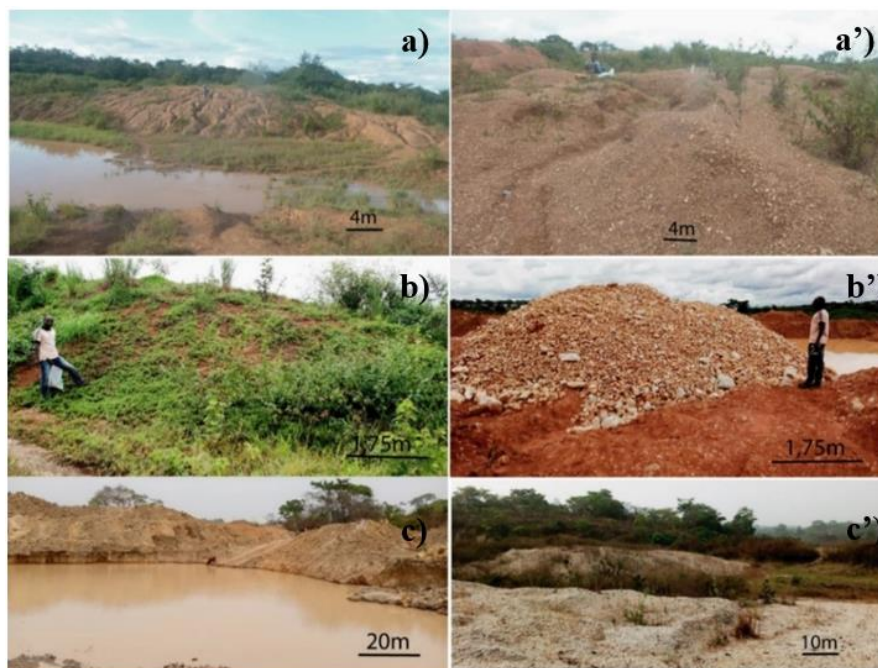


Figure 3 : Image des rejets (a) de la gangue Wantia (a') de lavage Wantia, (b) de la gangue Fel, (b') de lavage Fel, (c) de la gangue Mama, (c') de lavage Mama

Dans le cas de la mine de Mama Wassandé, la végétation est inexistante (**Figure 3(c)**). Ces rejets miniers peu consolidés et de stabilité physique faible sont très mobiles. Ils présentent ainsi un risque sérieux de contamination potentielle pour l'environnement. Les rejets de lavage quant à eux forment des tas moins volumineux dont la hauteur est comprise entre 2 et 10m. Ils sont constitués essentiellement de sable (sables grossiers à graviers de tailles variable (1 à 10 cm) dans les sites de Fel et Mama Wassandé (**Figure 3b, c'**) tandis que dans le site de Wantia (**Figure. 56 a'**), en plus des graviers on rencontre également des quartzites et de concrétions ferrugineuses. Les déchets de Fel et Wantia sont recouverts par une végétation de type herbacée tandis qu'à Mama Wassandé, la végétation est presque inexistante (**Figure 3 c'**).

3-2. Caractéristiques physico-chimiques

Les résultats montrent que les déchets miniers sont acides à faiblement acides (**Tableau 3**), avec des valeurs de pH variant de 4,25 dans les déchets de lavage de Wantia (DL-W) à 5,53. Dans les déchets de la gangue de Fel (HA-F). Les plus faibles valeurs de pH correspondent aux valeurs plus élevées en Pb (**Figure 4 A, B**). Les déchets étudiés ne sont pas très riches en MO, avec un taux qui varie de 0,95 à 2,05 % (**Tableau 3**). La variation de la MO dans les déchets (**Figure 4 A**) montre que le pourcentage le plus élevé est observé dans les déchets de Mama Wassandé, et la plus faible dans ceux de la gangue de Wantia. Au niveau de ces échantillons se concentrent la plupart des ETM étudiés (Cr, Cu, Zn, As, Sb) (**Figure 4B**). La conductivité électrique est très élevée dans les haldes avec des valeurs variant de 275,5µS/cm dans les déchets de la gangue de Mama (HA-M) à 645,2µS/cm dans les déchets de lavage de Fel (**Tableau 3**).

3-3. Teneurs en éléments traces métalliques

Les teneurs en ETM Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb et Pb dans les rejets miniers sont représentées dans le **Tableau 3**. Ces déchets présentent des teneurs très élevées en ETM dépassant les valeurs dans la croûte continentale et celles du site témoin et variant en général en fonction du site de prélèvement et de l'élément trace métallique considéré. Les teneurs en ETM varient (en mg/kg) pour le Cr de 139 à 157 à Fel, de 122,66 à 147,66 à Wantia et de 122,93 à 189,70 à Mama Wassandé. Le Ni varie de 25,21 à 45,01 à Fel, de 24,42 à 25,90 à Wantia et de 26,66 à 26,95 à Mama. Les valeurs du Cu varient de 25,03 à 43,66 à Fel, de 29,17 à 29,44 à Wantia et de 18,64 à 44,64 à Mama. Les teneurs en Zn varient de 34,46 à 50,96 à Fel, de 52,65 à 55,44 à Wantia et de de 40,34 à 62,00 à Mama. L'arsenic varie de 3,51 à 5,62 à Fel, de 6,33 à 7,04 à Wantia et de 3,72 à 45,65 à Mama. Le Cd varie de 0,22 à 0,30 à Fel, de de 0,04 à 0,16 à Wantia et de de 0,09 à 0,20 à Mama. La teneur en Sb varie de 7,26 à 8,44 à Fel, de 10,76 à 12,46 à Wantia et de 7,86 à 42,32 à Mama. Le Pb varie de 17,98 à 26,14 à Fel, de 25,73 à 26,24 à Wantia et de 9,47 à 15,83 à Mama. Dans le site témoin, les teneurs sont de l'ordre de 54,90 ; 17,11 ; 16,47 ; 48,01 ; 2,28 ; 0,04 ; 5,70 et 22,57 pour le Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb et Pb mg/kg respectivement. Ces résultats révèlent que le Cr est l'élément qui présente les concentrations les plus élevées, suivie du Zn, le Ni, le Cu, Sb et le Pb. Les teneurs en As et Cd sont moins importantes que les autres éléments étudiés mais restent tout de même supérieures aux valeurs dans la croûte continentale et dans le site témoin. En général, l'ordre d'abondance des ETM étudiés dans les déchets est : Cr < Zn < Ni < Cu < Sb < Pb < As < Cd.

Tableau 3 : Teneurs en ETM (mg/kg) et des paramètres physico-chimiques dans les haldes

Sites	Ech	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Sb	Pb	Fe	pH	MO%	CE (µS/cm)
Fel	FE-DI	157,27	25,21	25,03	34,46	3,51	0,22	7,26	17,98	39655,98	5,14	1,12	645,2
	FE-Ha	139,76	45,01	43,66	50,96	5,62	0,30	8,44	26,14	60428,16	5,53	1,28	394,3
Wantia	DI-W	147,66	24,42	29,44	55,44	7,04	0,16	12,46	26,24	15596,62	4,25	1,13	640,5
	W-Ha	122,66	25,90	29,17	52,65	6,33	0,04	10,76	25,73	56861,22	5,17	0,95	569,6
Mama	M-DI	189,70	26,95	18,64	62,00	3,72	0,20	7,86	9,47	54972,84	4,47	2,05	391,3
	M-Ha	122,93	26,66	44,64	40,34	45,65	0,09	42,32	15,83	26507,26	5,36	1,75	275,5
Témoin	DT	54,90	17,11	16,47	48,01	2,28	0,04	5,70	22,57	37487,84	5,32	1,41	187,10
CC ^a		35	19	14	52	2	0,2	0,31	17	46700			

^a CC : Concentration des éléments chimiques dans la croûte en mg/ kg [14].

La **Figure 4** montre que les valeurs les plus élevées pour les éléments Ni, Cu et Cd se trouvent au niveau des haldes Ha-Fe à Fel tandis que ceux des éléments As, Sb et Pb se trouvent à Mama Wassandé. On remarque également qu'en général les rejets de Mama Wassandé présentent les plus fortes teneurs pour la plus part des ETM étudiés que ceux des autres sites. Ces valeurs sont élevées et largement supérieures par rapport aux valeurs dans la croûte continentale, excepté Zn dans le site de Fel et Pb à Mama Wassandé. Elles sont également supérieures à celles du site témoin.

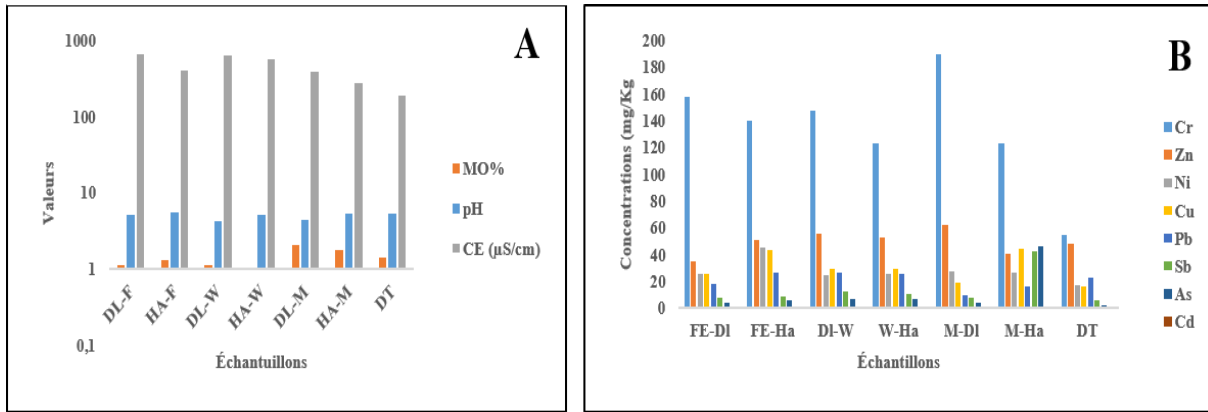


Figure 4 : Variation dans les haldes (A) des paramètres physico-chimiques et (B) des ETM

• **Corrélations entre les ETM et les paramètres physico-chimiques**

Des corrélations ont été calculées entre les ETM et les paramètres physico-chimiques dans les déchets miniers et présentés par la **Figure 5**. L'examen de cette figure met en évidence une parfaite corrélation entre As et Sb (1). Ces éléments sont également corrélés positivement avec la MO (As/MO 0,44), (Sb/MO 0,46).

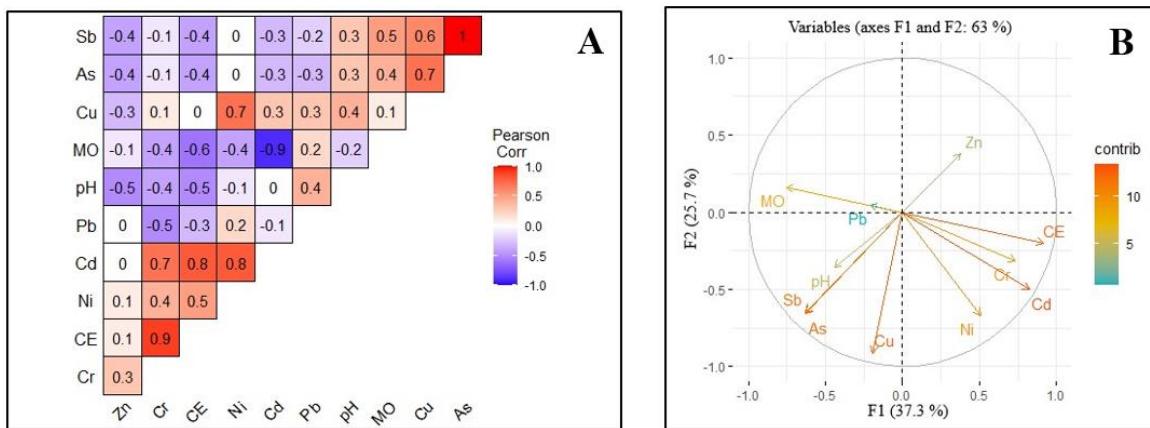


Figure 5 : (A) Corrélogramme et (B) cercle de corrélation entre les ETM et les paramètres physico-chimiques dans les déchets

Des corrélations positives sont également observées entre les éléments Cr, Cd, Zn et Ni. Ils sont également corrélés avec la CE. Il en est de même pour les éléments Cu, Sb et As (**Figure 5**); ces derniers sont également corrélés positivement avec le pH et la MO dans les déchets.

3-4. Estimation de l'intensité de la pollution

3-4-1. Facteur d'enrichissement

Les résultats des calculs du facteur d'enrichissement (FE) indiqués dans les diagrammes de la **Figure 6** montrent un enrichissement important en métaux lourds dans les déchets miniers étudiés. L'arsenic et le Sb montrent un très fort enrichissement à extrême (40, 21 et 240,51). Le Cr montre un fort enrichissement (12,63); le Cu un enrichissement modéré à fort (6,30) et les éléments Ni, Zn, Cd et Pb montrent un enrichissement modéré (**Tableau 4**). On observe en général un enrichissement dans l'ordre suivante : Sb > As > Cr > Cu > Cd > Pb > Ni > Zn.

Tableau 4 : Facteur d'enrichissement des haldes étudiés

Echantillons	EFCr	EFNi	EFCu	EFZn	EFAs	EFCd	EFSb	EFpb
FE-DI	5.29	1.56	2.11	0.78	2.07	2.59	27.58	1.25
W-DI	12.63	3.85	6.30	3.19	10.54	4.79	120.35	4.62
M-DI	4.60	1.20	1.13	1.01	1.58	1.70	21.54	0.47
FE-Ha	3.09	1.83	2.41	0.76	2.17	2.32	21.04	1.19
W-Ha	2.88	1.12	1.71	0.83	2.60	0.33	28.51	1.24
M-Ha	6.19	2.47	5.62	1.37	40.21	1.59	240.51	1.64
DT	1,95	1,12	1,47	1,15	1,42	0,50	22,91	1,65

L'examen de la **Figure 6** permet de révéler qu'en général que les déchets de lavage de Wantia (W-DL) présentent des valeurs de facteur d'enrichissement plus élevées pour la plupart des ETM étudiés excepté Sb par rapport aux autres échantillons.

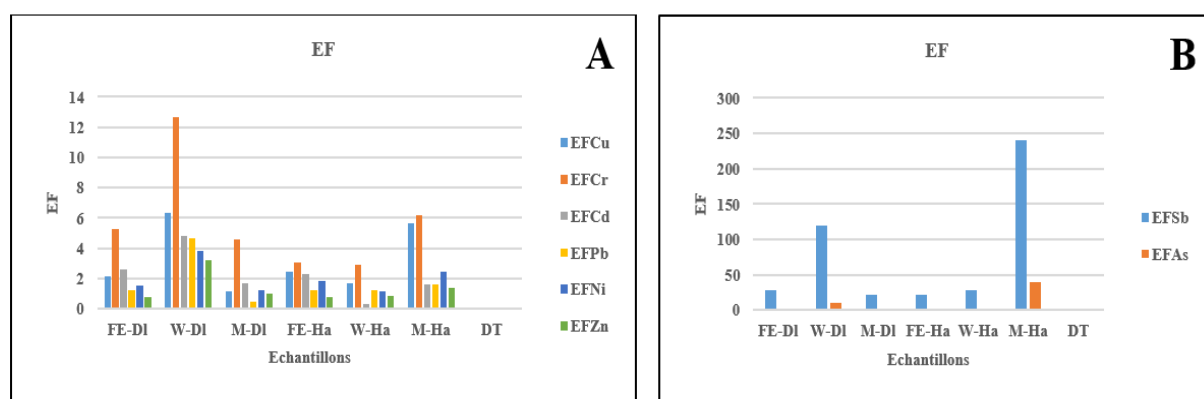


Figure 6 : Variation du facteur d'enrichissement dans les déchets

3-4-2. Indice de géoaccumulation

Les valeurs de l'indice de géoaccumulation calculées pour tous les éléments sont présentées dans le **Tableau 5** et illustré par la **Figure 7**. Les valeurs ont montré que les déchets étudiés sont extrêmement contaminés en Sb (3,96-6,51), fortement contaminés en As (0,23-3,93), modérément contaminés en Cr (1,22-1,85) et Cu (0,25-1,09) ; excepté l'échantillon M-DI qui est non contaminé en Cu. Ils sont faiblement contaminés en Cd, Pb et Ni et non contaminés en Zn.

Tableau 5 : Indice de géoaccumulation des ETM dans les déchets miniers étudiés

Sample Id	IgeoCr	IgeoNi	IgeoCu	IgeoZn	IgeoAs	IgeoCd	IgeoSb	IgeoPb
FE-DI	1.58	-0.18	0.25	-1.18	0.23	0.55	3.96	-0.50
FE-Ha	1.41	0.66	1.06	-0.61	0.91	1	4.18	0.04
W-DI	1.49	-0.22	0.49	-0.49	1.23	0.09	4.74	0.04
W-Ha	1.22	-0.14	0.47	-0.57	1.08	-1.91	4.53	0.01
M-DI	1.85	-0.08	-0.17	-0.33	0.31	0.42	4.08	-1.43
M-Ha	1.23	-0.10	1.09	-0.95	3.93	-0.74	6.51	-0.69
DT	0,06	-0,74	-0,35	-0,70	-0,40	-1,91	5,70	-0,18

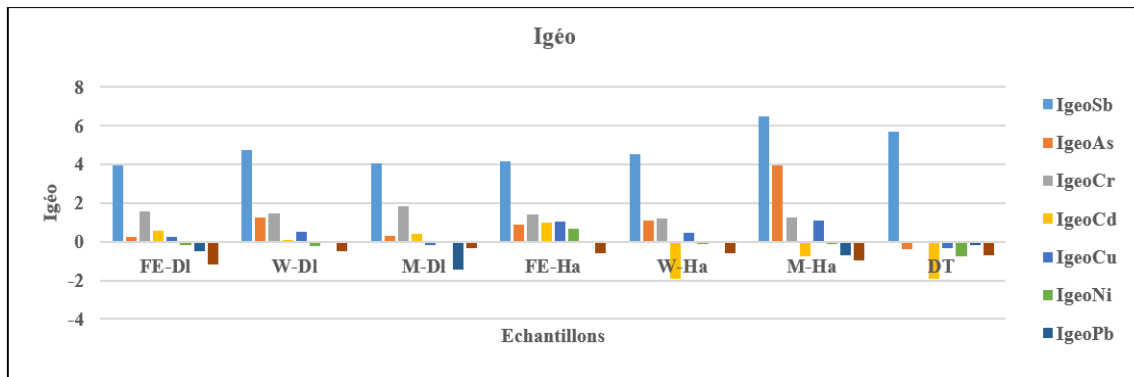


Figure 7 : Variation de l'indice de géoaccumulation dans les déchets

4. Discussion

4-1. Caractéristiques morphologiques et physicochimiques

Les déchets de Fel et Mama Wassandé ont une texture argilo-sableuse, avec la présence de quelques graviers ; ceux de Wantia ont une texture argileuse. La texture argileuse aurait favorisé l'adsorption des ETM dans les déchets. Ceci se confirme par les plus fortes teneurs en Pb observées dans ces déchets (**Tableau 3**). En effet, le Pb est peu mobile et est principalement associé aux argiles, aux oxydes, aux hydroxydes de fer et à la matière organique [18]. Les déchets miniers non consolidés sont disposés en tas, avec une faible végétation. Ils ont une faible stabilité physique et sont exposés à des phénomènes d'érosion intenses en période de pluie. Ils constituent ainsi une source de contamination métallique pour les eaux et les sols aux alentours des sites miniers [19]. Le caractère acide du pH (4,3 à 5,5) serait attribué au contexte géologique qui dans la région d'étude est plus représenté par le socle granito-gneissique et par la nature des sols dominés par les sols ferrallitiques et ferrugineux. En effet, La ferrallitisation, qui débute par une hydrolyse neutre, puis une acidification, et qui, de plus, est à l'origine de la formation et de l'évolution des sols ferrallitiques, explique leur forte acidité [20]. En outre, l'oxydation des minéraux sulfureux tels que la pyrite en présence de l'eau est à l'origine de l'acidification du milieu [21]. Il a été montré qu'en général, le pH joue un rôle majeur dans la solubilité et la biodisponibilité des métaux, et que le pH acide favorise la mobilité des métaux dans le sol et qu'il modifie facilement leur comportement [22]. Le pH acide des déchets aurait donc favorisé la mobilité des métaux. La teneur en MO est en général faible dans les déchets miniers étudiés. Ces faibles teneurs constituent des facteurs limitant majeurs pour l'établissement et le développement des plantes dans ces zones [24, 25]. En effet, des faibles teneurs en MO sont couramment observées dans les résidus miniers [25, 26] et résultent du fait que ces derniers proviennent d'une succession d'étapes de traitement du minerai [20, 25]. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les déchets de Mama Wassandé (**Tableau 3**). Au niveau de ce site se concentrent la plupart des ETM étudiés (Cr, Cu, Zn, As, Sb). La MO peu élevée (0,95 à 2,05 %) aurait favorisé l'adsorption des ETM dans les déchets (**Tableau 3**). La parfaite corrélation entre As et Sb, les fortes corrélations positives entre ces éléments et Cu (**Figure 5**) et leur corrélation positive avec la MO justifient cette hypothèse. Ces ETM auraient une forte similitude probable dans l'origine ou dans les processus géochimiques qui contrôlent leur comportement dans les déchets [26]. Leur corrélation positive avec la MO (**Figure 5**) traduirait le fait que cette dernière aurait contrôlé leur comportement dans les déchets. En effet, grâce à ses propriétés colloïdales, la matière organique joue un rôle très important dans la rétention des métaux lourds [22]. Les teneurs peu élevées en MO seraient favorables à la rétention des ETM dans les déchets. La conductivité électrique très élevée (275,5 à 645,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (**Tableau 3**) traduirait une forte minéralisation, et serait due au fait que ces déchets soient typiquement enrichis en sulfates et en ions majeurs, et par les fortes charges positives des métaux lourds dans ces sites [27].

4-2. Teneurs en ETM dans les déchets

Les analyses des déchets miniers ont révélé des teneurs élevées en ETM dans l'ensemble des sites étudiés et résultent des méthodes artisanales d'extraction utilisées et du manque de traitement de ces déchets après l'exploitation. Ces valeurs sont supérieures aux valeurs moyennes dans la croûte continentale [14], et aux teneurs dans les sols témoin, non contaminés (*Tableau 3*). Les teneurs élevées sont en effet une conséquence directe des processus d'extraction et de concentration des minerais [24]. Ces déchets constituent par conséquent une source importante de contamination par les métaux lourds des sols et des eaux aux alentours des sites miniers [19]. Les résultats de cette étude corroborent des travaux antérieurs réalisés dans des zones minières et ayant rapportés des concentrations aussi importantes dans des rejets miniers. C'est le cas notamment des travaux de recherche existants dans la région de l'Est du Cameroun sur les rejets miniers de Bétaré-Oya montrant des teneurs élevées en Ni, Cr, Cu, As, Pb, Cd et Zn, atteignant respectivement 1157,8 ; 263,2, 669,6 ; 76 ; 191,9 ; 6,8 et 127,4 mg/kg [28]. Des teneurs de l'ordre de 58 mg/kg pour le Cu, 111 mg/kg pour le Zn, 43 mg/kg pour As, 2 mg/kg pour le Cd et 11 mg/kg pour Sb ont également été rapportés dans d'autres districts miniers à Bétaré Oya [29]. En Tunisie, des travaux antérieurs ont signalé des valeurs élevées atteignant 4.6 % pour le Pb, 4.9 % pour le Zn, 1353 mg/kg pour le Cd et 462 mg.kg⁻¹ pour As dans des rejets miniers au Nord [30], et dans d'autres districts miniers avec des valeurs maximum respectivement environ à 8000 ppm, 3000 ppm, 5300 ppm, 5, 7 % et 285 ppm pour le Ni, le Cr, et le Cd [31]. Des études au Maroc ont également signalé des concentrations élevées en Cu, As, Zn et Pb dans des déchets miniers de Kettara [24] et dans les déchets miniers de Zeïda et Mibladen, avec des teneurs moyennes largement supérieures aux valeurs moyennes dans la croûte continentale atteignant Cd (7,2 mg/kg), Cu (118,7), Cr (304,3), Pb (10520), Zn (9074), As (192,2) [19]. Dans le cadre de cette étude, les rejets de Mama Wassandé (Site récent et en cours) présente en général les plus fortes teneurs pour la plus part des ETM étudiés que ceux des autres sites (*Figure 6*) suggérant le risque de contamination dès que commence le processus d'extraction. Les teneurs en ETM dans les déchets miniers pour tous les sites sont supérieurs à ceux du site témoin. Ceci suggère que l'orpaillage est une source de contamination des déchets. Les valeurs du facteur d'enrichissement et de l'indice de géoaccumulation supérieurs à 1,5 et 1 respectivement corroborent cette hypothèse. L'activité humaine, donc l'activité minière dans le cas présent, aurait contribué à l'augmentation des concentrations en ETM. L'abondance en As pourrait tout d'abord s'expliquer par le contexte de minéralisation aurifère de la zone d'étude. En effet, La présence d'As est souvent associée à celle de l'or, si bien qu'il est fréquemment utilisé comme traceur géochimique lors de l'exploration des gisements aurifères [32]. C'est aussi un sous-produit indésirable de l'activité minière résultant de l'oxydation de l'arsénopyrite [9]. Des travaux antérieurs ont signalé également que l'As est souvent associé aux activités minières (exemple de la mine d'or de Salsignes, Aude) [33]. Les teneurs élevées en Zn peuvent s'expliquer non seulement par le fait que les minerais de Zn comme la blende (ZnS) sont intimement associés aux minerais d'or [1]. la sphalérite a été complètement altérée par l'action de l'oxydation et du drainage acide riche en fer ferrique et en protons [34]. Les teneurs élevées en Pb seraient dues au fait que les minerais d'or sont souvent associés aux minerais sulfureux parmi lesquels on peut citer la galène (PbS), principal minerai du Pb [1]. Elles proviendraient également de l'essence utilisée pour des motopompes et autres engins de transport et d'exploitation utilisés sur le site.

5. Conclusion

Cette étude a montré que les éléments traces métalliques étudiés sont fortement concentrés dans les déchets miniers des sites étudiés avec des teneurs maximales se présentant comme suit : 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). La variation de ces ETM dans les différents sites montre que les déchets de Mama Wassandé qui est un site récent et en activité présente les teneurs les plus élevées par rapport aux autres sites du fait de leur richesse en matière organique. Le pH acide des déchets (4,47 et 5,36) et la MO peu élevée

(2,05 et 1,75) ont une influence sur la forme chimique des ETM et auraient favorisé le mécanisme d'adsorption. La comparaison de ces teneurs aux valeurs de la croûte continentale et du site témoin, révèlent ainsi une contamination de ces sites, et une augmentation des concentrations suite l'activité minière du fait des teneurs plus élevées par rapport au site témoin ; D'où des valeurs de facteur d'enrichissement et de géoaccumulation supérieur à 1,5 et 1 respectivement, suggérant l'impact de l'exploitation aurifère sur la contamination des déchets par ces ETM. Ces déchets constituent ainsi une source de contamination métallique de l'environnement et de la chaîne alimentaire du fait de leur stabilité physique faible et du manque de couvert végétal sous l'effet des pluies qui s'abattent dans la région ; d'où la nécessité de la mise en place d'une action de réhabilitation du site, éventuellement par la valorisation des déchets miniers et/ou des mesures atténuantes afin de minimiser la diffusion des contaminants vers les écosystèmes avoisinants.

Remerciements

Nous adressons nos remerciements à l'O'WSD (Organization for Women in Science for developing world) et SIDA (Swedish International development Cooperation Agency) qui ont financé cette étude.

Références

- [1] - O. Z. IBRAHIM, A. T. DAN-BADJO, Y. GUERO, F. M. M. IDI, C. FEID, T. STERCKEMAN, G. ECHEVARRIA, "Distribution spatiale des éléments traces métalliques dans les sols de la zone aurifère de Komabangou au Niger" *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 13, N°1, Art. N° 1, (May 2019), doi: 10.4314/ijbcs.v13i1.43
- [2] - M. A. BOUCHARD, "Projet d'appuis aux sources de croissance -Banque Mondiale- : Evaluation Environnementale Stratégique de la composante mine" : République du Mali. Bamako, (2004)
- [3] - Y. FRIEDRICH-EBERT-STIFTUNG, "État des lieux sur le travail décent dans le secteur minier au Cameroun : cas des travailleurs miniers des régions de l'Adamaoua et de l'Est du Cameroun", (2015)
- [4] - T. KANIKI, "Caractérisation Environnementale des Rejets Minero-Metallurgiques du Copperbelt Congolais", Thèse de doctorat de l'Université de Liège, (2008) 282 p.
- [5] - A. M. M. SALVARREDY, "Contamination en métaux lourds des eaux de surfaces et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approche géochimique, minéralogique et hydrochimique", Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, (2008) 489 p.
- [6] - G. B. A. MANEL, "Contamination métallique issue des déchets de l'ancien site minier de Jebel Ressas : modélisation des mécanismes de transfert et conception de cartes d'alea post-mine dans un contexte carbonaté et sous un climat semi-aride. Evaluation du risque pour la santé humaine". Thèse de doctorat, Hydrology. Université Paul Sabatier - Toulouse III, (2012)
- [7] - J-B. SIRVIN, "Détection des métaux lourds dans les sols par spectroscopie D'émission Sur Plasma Induit Par Laser (LIBS)", thèse de Doctorat de l'Univ de Bordeaux 1, (2006) 252 p.
- [8] - Q. R. WANG, Y. S. LIU, X. M. CUI, Y. T. DONG, P. CHRISTI, "Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China". *J. Environ. Sci. Health Part A Toxic/Hazard. Subst. Environ. Eng.*, 38 (2003) 823 - 838
- [9] - G. P NTEP, J. DUPRY, O. MATIP, F. A FOMBUTU, E. KALNGUI, MINMEE, "Notice explicative de la carte des Ressources Minérales du Cameroun", (2001) 375 p.
- [10] - PNDP, "PCD de la Commune de Meiganga. MINEPAT", (2013) 242 p.

- [11] - A. A. GANWA, S. WOLFGANG, F. C. WOLFGANG, S. KONGNYUY, "Geochemistry of magmatic rocks and time constraints on deformational phases and shear zone slip in the Meiganga area, central Cameroon". *International Geology Review*, 5 3, (2011) 759 - 784
- [12] - C. MATHIEU et F. PIELTAIN, "Analyse chimique des sols méthodes choisies". Editions Tec et Doc/Lavoisier, Paris, (2003) 408 p.
- [13] - G. ESTEFAN R. SOMMER, J. RYAN, "Methods of soil, plant, and water analysis : A manual for the West Asia and North Africa region". (Third Ed.), ICARDA : Beirut, Lebanon, (2013)
- [14] - R. L. RUDNICK and S. GAO, '3.01 - "Composition of the Continental Crust", in *Treatise on Geochemistry*, H. D. Holland and K. K. Turekian, Eds., Oxford : Pergamon, (2003) 1 - 64 p. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/03016-4
- [15] - C. ZHANG, Z. G. YU, G. M. ZENG, M. JIANG, Z. Z. YANG, F. CUI, M. Y. ZHU, L. Q. SHEN, L. HU., "Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability", *Environ Int*, Vol. 73, (Dec. 2014) 270 - 281 p., doi: 10.1016/j.envint.2014.08.010
- [16] - D. ACEVEDO-FIGUEROA, B. D. JIMÉNEZ and C. J. RODRÍGUEZ-SIERRA, "Trace Metals in Sediments of Two Estuarine Lagoons from Puerto Rico". *Environmental Pollution*, 141 (2006) 336 - 342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2005.08.037>
- [17] - G. MÜLLER, "Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River". *Geojournal*, 2 (1969) 109 - 118
- [18] - I. RASKIN and B. D. ENSLEY, "Phytoremediation of toxic metals; using plants to clean up the environment". John Wiley and Sons, New York, (2000)
- [19] - M. L. EL HACHIMI, A. BOUABDI and M. FEKHAOU, "Les rejets miniers de traitement : caractérisation, capacité polluante et impacts environnementaux, mine Zeïda, mine Mibladen, Haute Moulouya (Maroc)", *Environnement, Ingénierie & Développement*, Vol. , N°63 (mars 2013) 26 - 30 p., doi: 10.4267/dechets-sciences-techniques.2567
- [20] - B. KOULIBALY, O. TRAORE, D. DAKUO, R. LALSAGA, F. LOMPO and P. N. ZOMBRE, "Acidification des sols ferrugineux et ferrallitiques dans les systèmes de production cotonnière au Burkina Faso", *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 8, N°6, Art. N°6 (2014), doi: 10.4314/ijbcs.v8i6.44
- [21] - M. LAKRIM *et al.*, "Etude d'impact des déchets miniers de la mine de Nador sur l'environnement (nord-est du Maroc). Impact study of mining waste of the Nador mine on the environment (North-Eastern of Morocco)". *LJEE*, Vol. 10, N°18 (Dec. 2011) 78 - 94 p.
- [22] - I. MARTINELLI, "Infiltration des eaux de ruissellement pluvial et transfert de polluants associés dans le sol urbain. Vers une approche globale et pluridisciplinaire." Thèse de Doctorat, spécialité Conception en bâtiment et techniques urbaines, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, (1999) 207 p.
- [23] - L. MIDHAT, N. OUZZANI, A. HEJJAJ, A. OUHAMMOU and L. MANDI, "Accumulation of heavy metals in metallophytes from three mining sites (Southern Centre Morocco) and evaluation of their phytoremediation potential", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, Vol. 169, (Mar. 2019) 150 - 160 p., doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.11.009
- [24] - L. BENIDIRE, S. PEREIRA, L. SOUAD, P. CASTRO and A. BOULARBAH, "Physical, Chemical, and Microbiological Characterization of Kettara Mine Tailings, Morocco", *Soil Systems*, Vol. 6, (Feb. 2022) 23 p., doi : 10.3390/soilsystems6010023
- [25] - A. R. GOMES A. ANTÃO, A. G. P. SANTOS, T. J. LACERDA, B. M. MIRELLI, A. S. ISLA, S. ALVARENGA, C. H. SANTOS, E. C. RIGOBELLO, 'Rehabilitation of a Riparian Site Contaminated by Tailings from the Fundão Dam, Brazil, Using Different Remediation Strategies', *Environ Toxicol Chem*, Vol. 40, N°8 (Aug. 2021) 2359 - 2373 p., doi: 10.1002/etc.5075

- [26] - E. N. LEOPOLD, D. D. SABINE, Z. Z. PHILEMON and M. C. JUNG, "Physical and Metals Impact of Traditional Gold Mining on Soils in Kombo-Laka Area (Meiganga, Cameroon)". *International Journal of Geosciences*, 7, 1102 - 1121 (2016) 48 - 74 p.
- [27] - P. MOSZKOWICZ, "Caractérisation de la mobilisation de polluants inorganiques présents dans la solution des sols pollués". LAEPSI (INSA de Lyon), (2002)
- [28] - D. E. P EDJENGTE, H. RACHID, L. E. NGA, L. D. O; BITOM., A. Z. E. BESSA, S. OUBAHA, A. KHALIL, "Geochemistry and geostatistics for the assessment of trace elements contamination in soil and stream sediments in abandoned artisanal small-scale gold mining (Bétaré Oya, Cameroon)", (Feb. 2023), doi: 10.1016/j.apgeochem.2023.105592
- [29] - V. MANGA, G. NEBA and E. SUH, "Environmental Geochemistry of Mine Tailings Soils in the Artisanal Gold Mining District of Betare -Oya, Cameroon", *Environment and Pollution*, Vol. 6, N°1, Art. N°1, (Mar. 2017), doi: 10.5539/ep.v6n1p52
- [30] - S. BOUSSEN, "Evolution des haldes plombozincifères dans le nord de la Tunisie : l'exemple d'un contexte carbonaté". Thèse de Doctorat de l'Université de Tunis et de l'Université de Limoges, (2010) 229 p.
- [31] - S. GANNOUNI, N. REBAI, A. BELGHITH and S. ABDELJAOUED, "Estimation des teneurs en métaux lourds dans les rejets miniers de Jalta et Bougrine (Tunisie) par approche spectroscopique dans le visible et proche infrarouge et étude statistique", *Teledetection*, Vol. 10, N°1 (Sep. 2011) 43 - 60 p.
- [32] - S. COUSSY, "Stabilisation de rejets miniers pollués à l'arsenic à l'aide de sous-produits cimentaires : étude de l'influence de la cristallogénèse sur le risque de mobilisation des polluants, phd, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, [Rouyn-Noranda], (2011)
- [33] - T. BUR, "Impact anthropique sur les éléments traces métalliques dans les sols agricoles de midi-pyrénées. Implications en termes de limites et de charges critiques." Thèse de Doctorat de l'Université de Toulouse, (2008) 374 p.
- [34] - S. R. JENNINGS, D. J. DOLLHOPF, W. P. INSKEEP, "Acid production from sulfide minerals using hydrogen peroxide weathering". *Appl. Geochem*, 15 (2000) 247 - 255