

**ÉVALUATION DE LA CONTAMINATION DES SOLS DES
CARRIÈRES D'EXPLOITATION DU GISEMENT DE CALCAIRES
DE TABLIGBO (SUD-EST TOGO) PAR LES MÉTAUX
LOURDS TOXIQUES**

**Aboudala SIDI ISSAH* , Minkilabe DJANGBEDJA
et Thiou K. T. TCHAMIE**

*Université de Lomé, Département de Géographie, Laboratoire de Recherches
Biogéographiques et d'Etudes Environnementales, BP 20634 Lomé, Togo*

* Correspondance, e-mail : aboudalas@gmail.com

RÉSUMÉ

L'exploitation des calcaires de Tabligbo, au sud-est du Togo a d'énormes impacts sur le milieu biophysique. Malgré son importance économique, elle dégrade les sols du milieu. Ceux-ci peuvent être alors contaminés par les éléments traces métalliques (ETM), notamment le cadmium, le plomb, le nickel et le cuivre. Une évaluation de la contamination de ces sols miniers a été donc effectuée par dosage desdits ETM dans les sols. Les résultats ont montré que les quantités de plomb évoluent de 2,225 ppm dans la zone non-exploitée à 4,253 ppm dans la carrière de Scantogo, à 4,928 ppm dans la carrière Wacem, et à 6,978 ppm dans la carrière de Cimaio. Celles du cuivre et du nickel augmentent également de la zone non-exploitée aux zones exploitées. Ce qui indique que l'exploitation a entraîné une contamination du sol en plomb, cuivre et nickel. L'analyse de la pollution par les ETM a montré que leurs teneurs dosées dans les sols sont inférieures à celles des seuils fixés par le CCME (Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement) ; ce qui révèle que les sols du secteur d'étude ne sont pas pollués par ces ETM.

Mots-clés : *Tabligbo, carrière de calcaire, éléments traces métalliques, contamination des sols.*

ABSTRACT**Assessment of soil contamination in the quarries of the Tabligbo's limestone deposit exploitation (South-East Togo) by toxic heavy metals**

The exploitation of Tabligbo's limestone in southeastern Togo has enormous impacts on the biophysical environment. Despite its economic importance, it degrades the soils of the area. These can then be contaminated by trace metal elements (TME), such as cadmium, lead, nickel and copper. An assessment of the contamination of these mining soils was therefore performed by analyzing of these metal trace elements in the soil. The results showed that lead levels change from 2,225 ppm in the non-exploited area to 4,253 ppm in the Scantogo quarry, to 4,928 ppm in the Wacem quarry, and to 6,978 ppm in the Cimao quarry. Copper and nickel are also increasing from the non-exploited area to the exploited areas. This indicates that the mining causes lead, copper and nickel contamination of the soil. Analysis of soil pollution by TME has shown that their contents in soil are lower than those set by the CCME thresholds (Canadian Council of Ministers of the Environment); which means that the soils of the study area are not polluted by these TME.

Keywords : *Tabligbo, limestone quarry, metallic trace elements, soil contamination.*

I - INTRODUCTION

Le développement mondial de l'industrialisation a entraîné une utilisation massive de minerais métallifères et une croissance importante des activités minières [1]. La performance du secteur minier est considérée comme un préalable au développement d'un pays et détermine sa position économique dans le commerce mondial [2]. Le Togo tire une grande partie de ses recettes de l'exploitation minière. L'une des plus importantes exploitations minières de ce pays est celle du gisement de calcaires au sud-est. La part du calcaire/clinker dans les exportations du Togo est passée de 2,7 % en 1998 à 40,8 % en 2006. Le clinker et le ciment représentaient, ensemble, en 2010, le premier produit d'exportation du Togo [3]. Cependant, les activités d'exploitation et de traitement de ce minerai sont à l'origine de la contamination des sols, l'air, l'eau, la faune, la flore et ont un impact négatif sur l'environnement [3, 4]. En effet, les activités minières sont fortement polluantes et leurs impacts sur l'environnement et la santé sont à l'échelle de leur importance économique [5]. Les impacts sur le milieu naturel, de ces activités, sont d'autant plus visibles, notamment la dégradation de la structure du sol et sa contamination par les éléments traces métalliques [6 - 7]. Elles peuvent ainsi entraîner une

accumulation de métaux lourds toxiques dans les sols. C'est un problème d'actualité qui préoccupe les communautés scientifiques. La plupart des éléments traces métalliques (ETM) sont dangereux pour la santé humaine à cause de leur toxicité [8]. Les ETM tels que le cadmium, le plomb, le cuivre et le nickel sont libérés dans la biosphère par les activités industrielles et minières. Ils sont à l'origine d'effets néfastes sur les fonctions physiologiques des organismes vivants. L'infiltration des eaux de pluie à travers les sols pollués peut contaminer les cultures et les nappes [9]. Les végétaux cultivés sur un sol pollué par les ETM, absorbent ces derniers et les concentrent par voie racinaire, puis la sève les distribue aux autres organes de la plante. Ainsi, les ETM peuvent se retrouver dans les produits agricoles qui sont utilisés dans l'alimentation des hommes [10, 11]. Plusieurs études ont montré, qu'au Togo, l'exploitation minière est à l'origine de la contamination par les métaux lourds du sol, de l'eau, de l'air et la flore du milieu [12 -16]. Parmi ces études, une seule a été réalisée dans un site d'exploitation des calcaires. Cette dernière a porté, uniquement, sur la contamination du cadmium et du plomb et a été réalisée avant l'ouverture de la deuxième carrière de calcaires. Compte tenu de ces acquis, la présente étude se propose d'effectuer une évaluation de la contamination des sols de l'ensemble des sites d'exploitation de calcaires au Sud-Est Togo et de prendre en compte, en dehors du cadmium et du plomb, le cuivre et le nickel. Les résultats de cette étude permettront d'avoir une meilleure appréciation de la contamination des sols par les ETM dans les sites d'exploitation de calcaires au Sud-Est du Togo. Cette étude permettra ainsi d'attirer l'attention des différents acteurs intervenant dans cette activité, afin de prévenir ou d'atténuer la pollution de l'écosystème par les ETM du secteur d'étude. Ce travail est structuré en trois parties à savoir : matériel et méthodes ; résultats ; discussion.

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Matériel

La présente étude a été effectuée au sud-est du Togo, dans la préfecture de Yoto. Le secteur d'étude est situé dans le bassin sédimentaire côtier du Togo [17]. Le gisement en exploitation est nommé Calcaires de Tabligbo et appartient au groupe de formations géologiques de Tabligbo d'âge Paléocène Supérieur. Le secteur d'étude est recouvert de sols ferrallitiques et hydromorphes. Le climat est de type guinéen marqué par quatre saisons avec une moyenne pluviométrique annuelle comprise entre 800 mm et 1200 mm [18]. Le maximum des températures moyennes se situe en février avec 29,7 °C et la température minimale la plus faible enregistrée en saison pluvieuse tourne autour de 25 °C (*Figure 1*). Le secteur d'étude est recouvert de savanes arbustives, des reliques de forêts galeries et des fourrés [19].

II-2. Méthodes

II-2-1. Collecte des données

La collecte des données a consisté à un échantillonnage de sol et à l'analyse des échantillons au laboratoire. Les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une tarière manuelle dans les vingt premiers centimètres du sol. Les zones exploitées du secteur d'étude ont été subdivisées en trois zones conformément à l'âge du remblai de la carrière. Ces zones sont :

- zone Cimao : il s'agit de la zone exploitée par la société Cimao qui a effectué son exploitation entre 1979 et 1984 et dont l'âge des remblais est compris entre 33 et 38 ans (zone très ancienne) ;

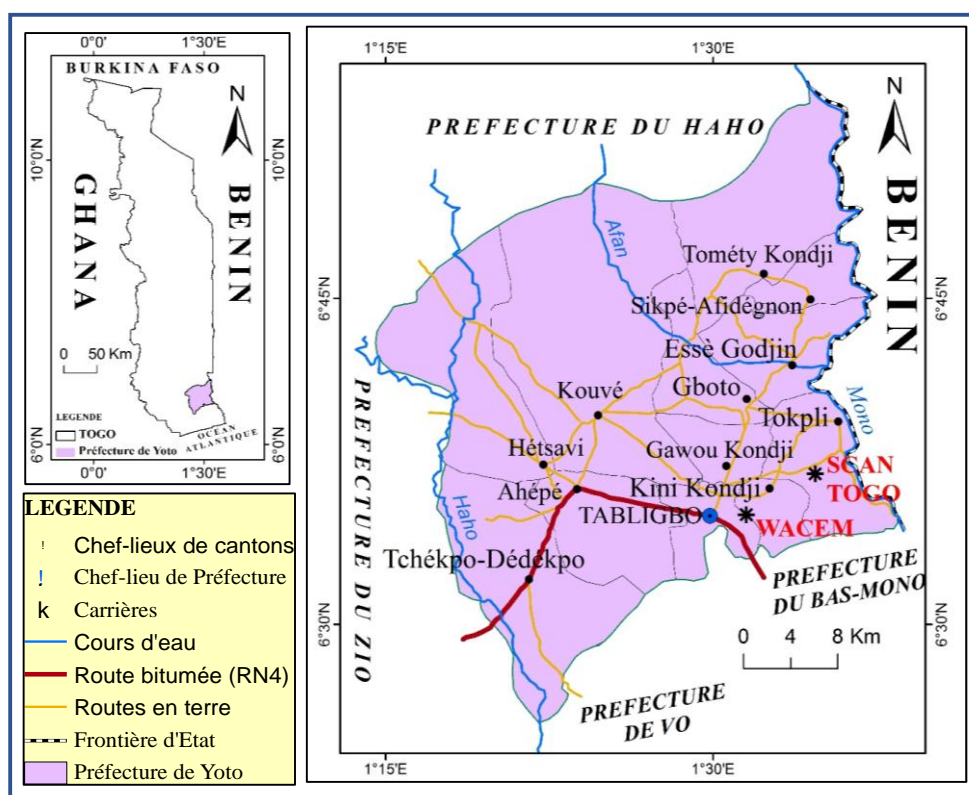


Figure 1 : Localisation du secteur d'étude

Source : Fond topographique, IGN-Paris & DCNC-Lomé, 1991, au 1/200000

- zone Wacem : il s'agit de la zone exploitée par la société Wacem qui a commencé ses activités depuis 1997. L'échantillonnage a été effectué dans une zone dont l'âge des remblais est compris entre 5 et 20 ans (zone ancienne) ;

- zone Scantogo : il s'agit de la zone exploitée par la société Scantogo qui a démarré ses activités depuis 2014, dont l'âge est inférieur à 5 ans (zone jeune) ;

Dans le souci de comparer l'écosystème des carrières à celui d'avant l'exploitation, une zone d'écosystème de référence, hors de la carrière, été aussi définis : il s'agit de la zone non-exploitée.

II-2-1-1. Échantillonnage de sols

Dans chaque zone il a été prélevé 10 échantillons (donc un total de 40 échantillons). L'échantillonnage a été effectué dans les 20 premiers centimètres du sol. Chaque échantillon prélevé a un poids de 1 kg suffisant pour effectuer les analyses nécessaires [20]. Il est à noter que chaque échantillon constitue un échantillon composite qui a été réalisé à partir d'un plateau (**Figure 2**) de forme rectangulaire de 5 m de long et de 2 m de large, soit une surface de 10 m² ; ce qui correspond à un taux de 0,1 % d'hectare (ha).

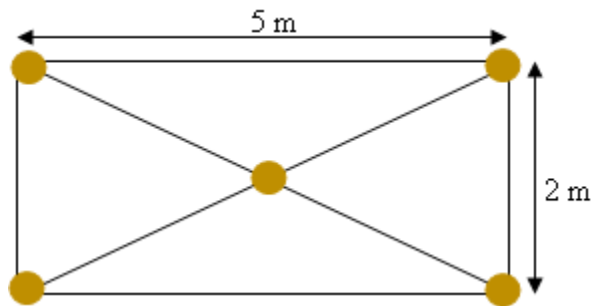


Figure 2 : Schéma d'un plateau d'échantillonnage effectué

II-2-1-2. Analyse des échantillons au laboratoire

L'analyse au laboratoire a été effectuée suivant plusieurs étapes (**Figure 3**). Les échantillons de sol ont subi une préparation qui a consisté à la dessiccation, au broyage puis au tamisage afin d'obtenir une fraction fine facile à minéraliser. La fraction fine a subi ensuite une minéralisation par voie humide (par attaque acide). Les échantillons ont été ainsi solubilisés afin d'éviter la perte de certains éléments volatiles. Le minéralisât obtenu a été enfiolé et filtré. Un filtrat a été obtenu sur lequel un dosage a été effectué au spectrophotomètre d'absorption atomique. Ce dernier a été réalisé à l'aide de solutions étalons fabriquées à cet effet.

II-2-2. Traitement des données

Le traitement des données a été effectué essentiellement à l'aide du programme Excel 2016 et de son extension (ou complément) XLSTAT. Il a servi à calculer les moyennes, les minimas et les maximas, et à réaliser les courbes et les histogrammes. XLSTAT a permis de réaliser les tests d'hypothèses et d'effectuer les corrélations de *Pearson*. Ces dernières ont été réalisées pour identifier la relation entre l'âge d'un remblai (donc sa durée d'exposition aux activités minières) et les teneurs des ETM. Les cartes ont été faites à l'aide du logiciel QGIS 2.18.

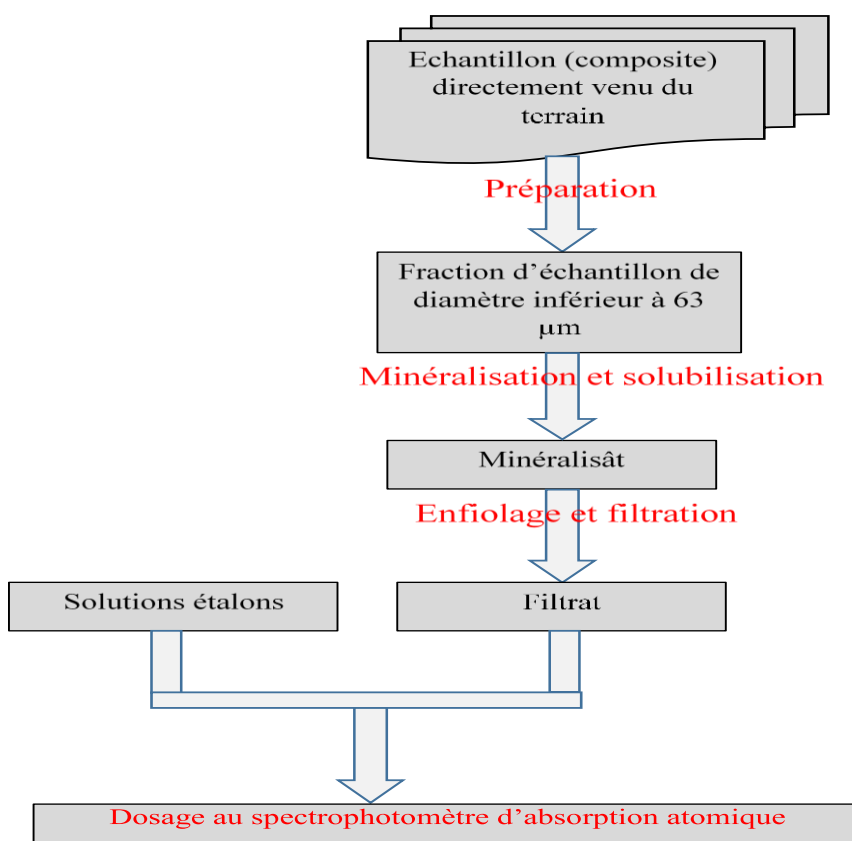


Figure 3 : Étapes d'analyses au laboratoire

La contamination d'un sol est l'augmentation de la teneur d'un ETM, suite à une activité anthropique par rapport à l'état initial de ce sol. Lorsque cette contamination dépasse un niveau élevé donné (seuil de pollution), on parle de pollution d'un sol (**Figure 4**). Dans le but de vérifier la pollution, par les ETM, des sols, le calcul des facteurs de pollution, de chaque élément (ETM) a été

nécessaire. Le facteur de pollution d'un ETM, est en effet, le rapport sa concentration, dans un échantillon, sur la valeur seuil de la norme ou référence [21]. Il y a pollution d'un sol, en un élément, lorsque son facteur de pollution pour cet élément, est supérieur ou égal à 1. La valeur de la norme (ou référence) est la concentration moyenne du même ETM dans un échantillon de référence considéré comme non pollué. Selon le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement [22], les seuils de pollution des EMT, relatifs à cette étude, sont : 70 ppm pour le plomb, 63 ppm pour le cuivre, 45 ppm pour le nickel et 1,4 ppm pour le cadmium. Le test z de *Student* a été utilisé pour comparer les moyennes des différents paramètres du sol initial à celles des zones exploitées afin d'évaluer la contamination du sol. Le test t de *Student* a été utilisé (car la variance des valeurs seuils de la norme n'étant pas connues dans ce cas) pour comparer les moyennes des taux des différentes zones aux valeurs seuils fixées par le CCME [17].

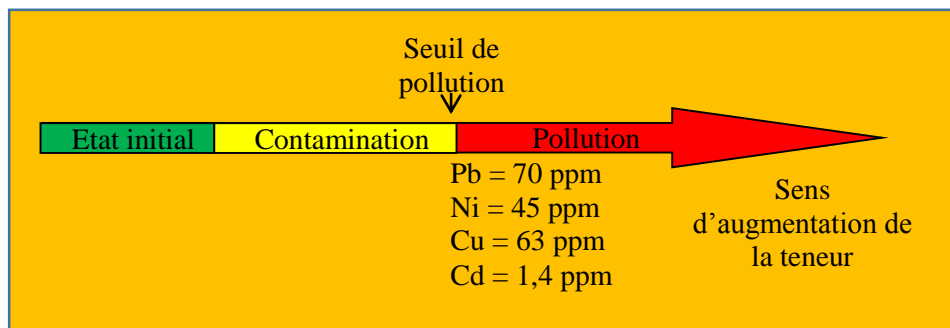


Figure 4 : Schéma expliquant la contamination et la pollution d'un sol par les ETM

III - RÉSULTATS

III-1. Évaluation de la contamination par les ETM des sols

III-1-1. Contamination du sol, par les ETM, dans la zone Cimao

Les résultats montrent des différences significatives (au niveau de signification de 5 %) entre les teneurs du plomb, du cuivre et du nickel, du sol de la zone Cimao et celles du sol initial. Les risques d'erreur, pour les variations des teneurs de plomb et de nickel, sont inférieurs à 0,01 %. Le même risque pour les variations des teneurs du cuivre est de 0,07 %. Cela révèle que l'exploitation minière a entraîné un impact sur les teneurs en plomb, cuivre et nickel du sol (*Figure 5*).

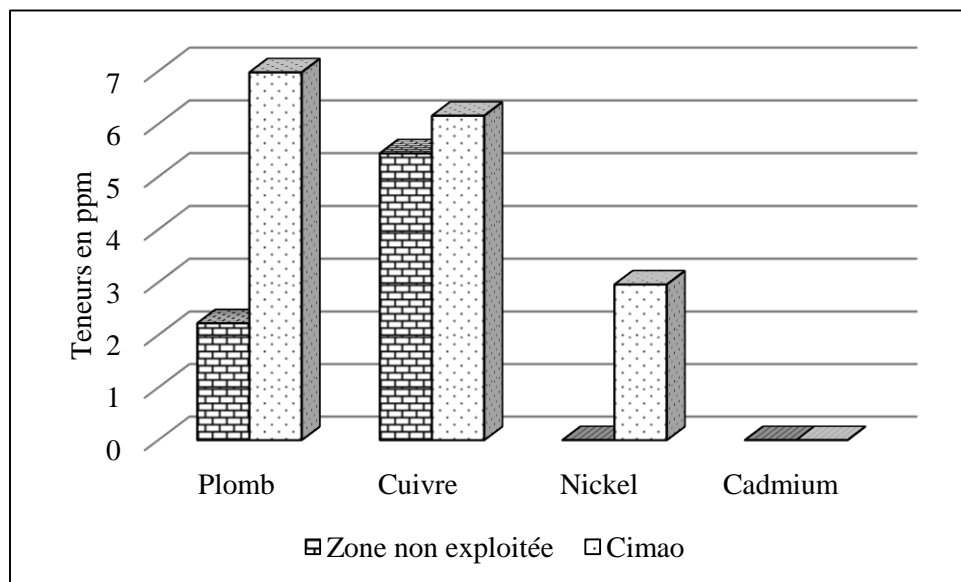


Figure 5 : Teneurs moyennes du plomb, du cuivre, du nickel et du cadmium des sols des zones, non-exploitée et Cimao

III-1-2. Contamination des sols par les ETM dans la zone WACEM

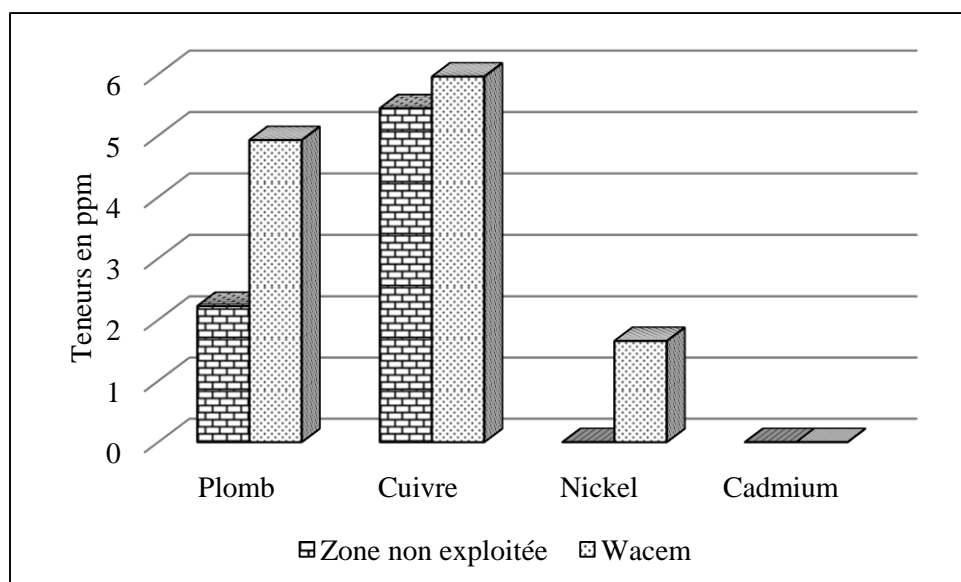


Figure 6 : Teneurs moyennes du plomb, du cuivre, du nickel et du cadmium des sols des zones, non-exploitée et Wacem

Les différences entre les teneurs du plomb, du cuivre et du nickel du sol de la zone Wacem et celles du sol initial, sont toutes significatives à un degré de confiance de 95 %. Les risques d'erreur, pour les variations des teneurs de plomb et de nickel, sont inférieurs à 0,01 %. Par contre, le risque d'erreur, pour les variations des teneurs du cuivre est de 0,99 %. Ainsi, l'exploitation du gisement de calcaires a entraîné un impact sur les teneurs en plomb, cuivre et nickel, du sol dans la zone Wacem (**Figure 6**). Les variations de ces trois éléments sont significativement positives, ce qui indique qu'il y a eu une contamination du sol dans cette zone. Les teneurs en cadmium sont, par contre, toutes inférieures au seuil de détection de l'appareil.

III-1-3. Contamination des sols par les ETM dans la zone Scantogo

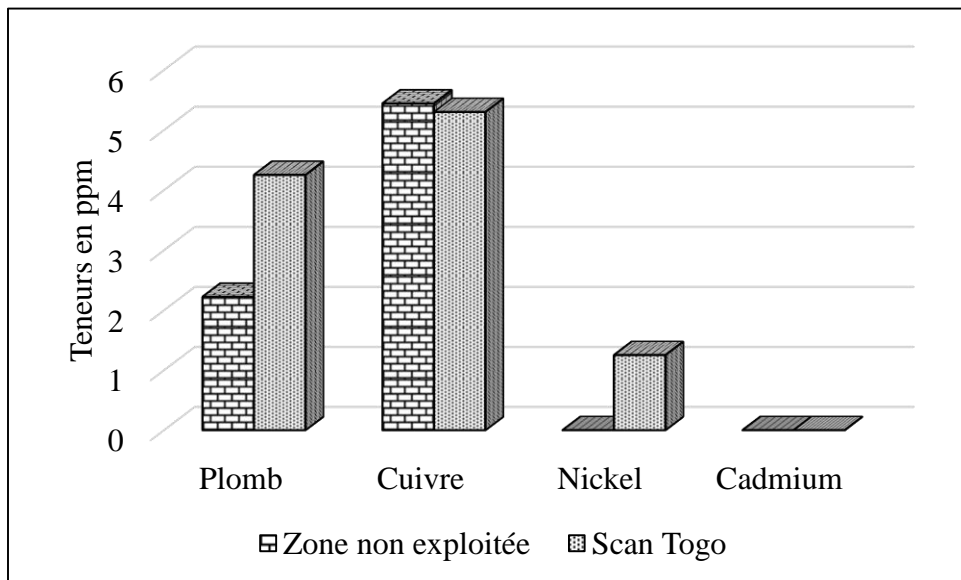


Figure 7 : Teneurs moyennes du plomb, du cuivre, du nickel et du cadmium des sols des zones, non-exploitées et Scantogo

Les résultats indiquent des différences significatives, au seuil de signification de 5 %, entre les teneurs du plomb et du nickel du sol de la zone Scantogo et celles du sol initial. Par contre, cette différence n'est pas significative, pour les teneurs en cuivre. Les risques d'erreur, pour les variations des teneurs de plomb et du nickel, sont inférieurs à 0,01 %. Ce risque, pour les variations des teneurs du cuivre, est de 26,80 %. Ce résultat met en lumière l'impact de l'exploitation du gisement de calcaires, dans la zone Scantogo, sur les teneurs en plomb, cuivre et nickel du sol (**Figure 7**). Les variations du cuivre et du nickel sont significativement positives. Cela révèle que cette exploitation a entraîné une contamination du sol du secteur d'étude par le plomb et le nickel. Les teneurs

en cadmium des sols sont toutes inférieures au seuil de détection de l'appareil. Les résultats mettent ainsi en lumière qu'il n'y a pas eu contamination du sol par le cuivre et le cadmium dans la zone Scantogo

III-1-4. Bilan de la contamination des sols par les ETM dans le secteur d'étude

Les résultats de la présente étude montrent que les sols des différentes zones du secteur d'étude contiennent des teneurs en cadmium non détectables au seuil de détection de l'appareil (0,0005 ppm). La **Figure 8** montre la répartition spatiale des teneurs en plomb des différentes zones du secteur d'étude. Elle révèle que l'exploitation a entraîné une contamination du sol initial en plomb. Cette contamination est fonction de l'âge des remblais, donc de la durée d'exposition aux différents travaux miniers (**Figure 9A**).

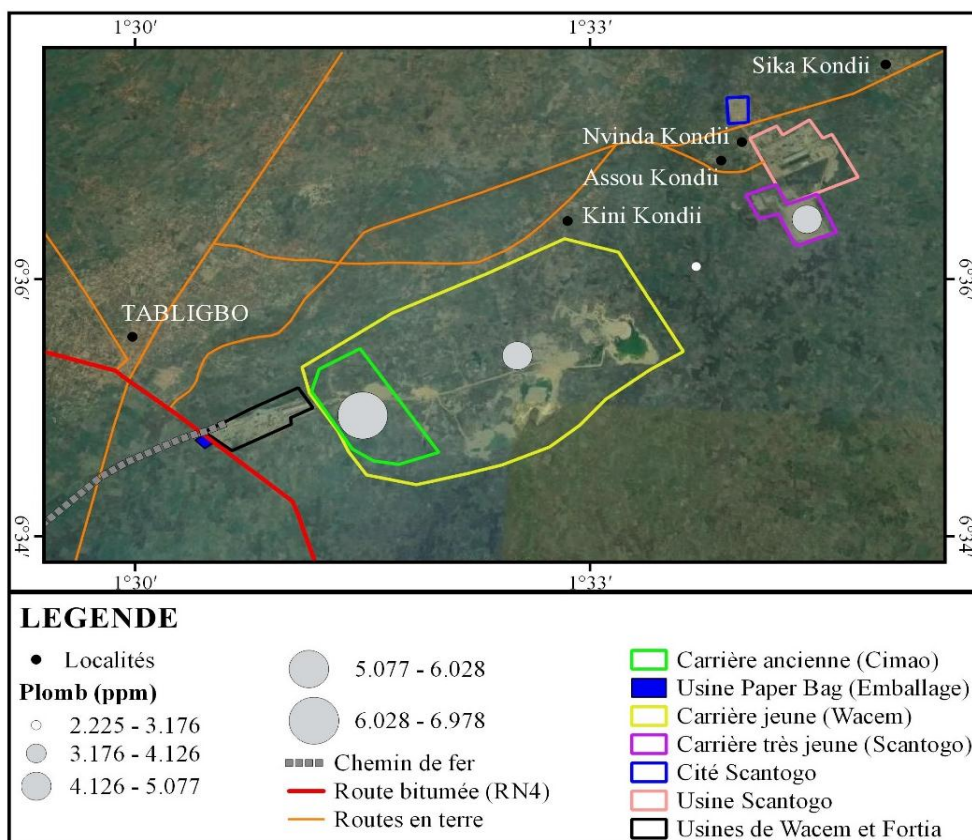


Figure 8 : Répartition des teneurs moyennes en plomb dans le secteur d'étude
Source : Fond de carte de Google Earth, 2017

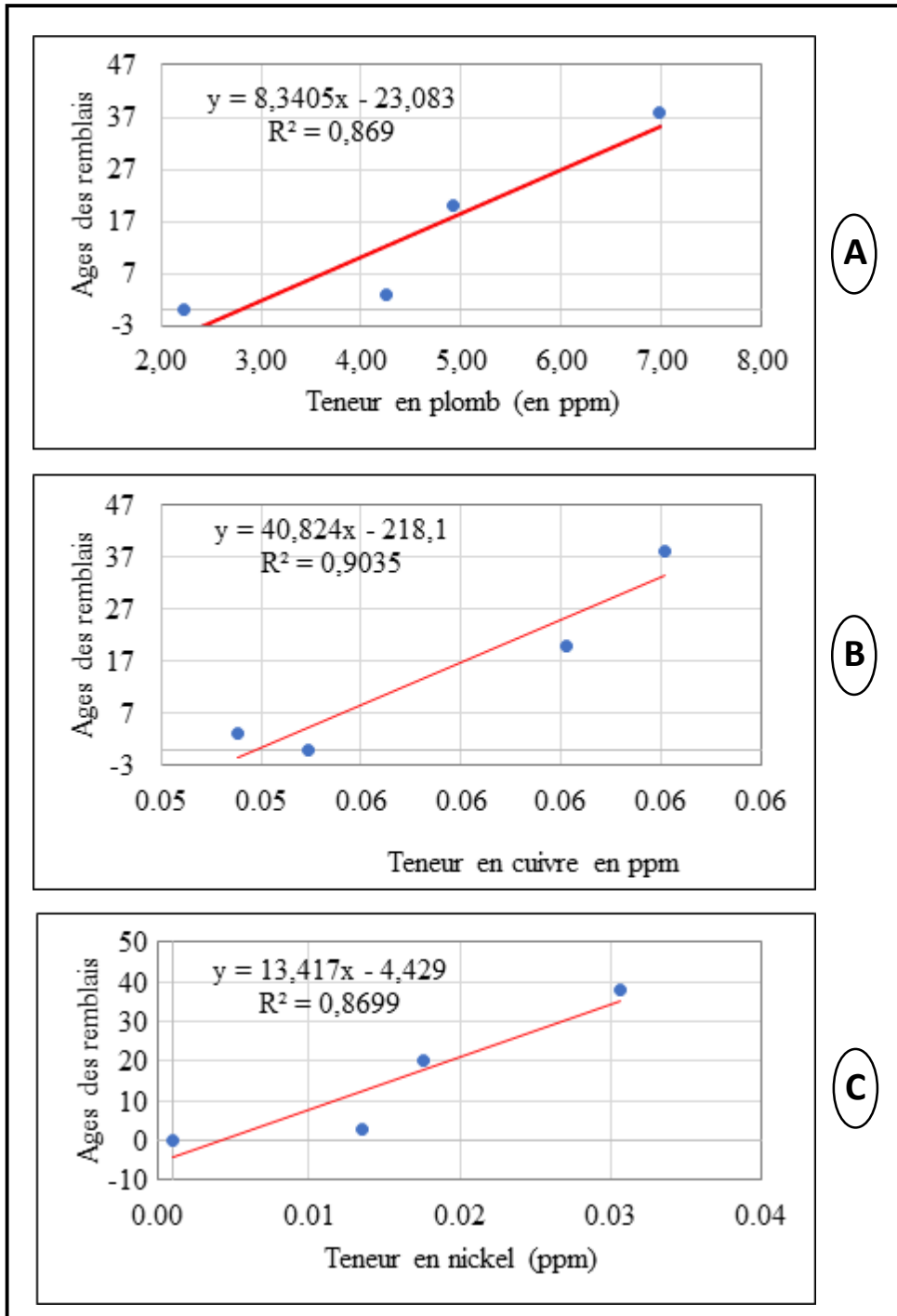


Figure 9 : Corrélations entre les âges des remblais et les teneurs moyennes de plomb (A), de cuivre (B) et de nickel (C)

La répartition des teneurs en cuivre des sols des différentes zones du secteur d'étude est indiquée par la **Figure 10**. Elle montre que la zone Cimao est la plus contaminée par le cuivre. Cela renseigne que la durée d'exposition des remblais est un facteur qui explique cette contamination accrue (**Figure 9B**). La **Figure 11** montre la répartition des teneurs des sols des différentes zones en nickel. Elle montre que la zone de référence contient une teneur inférieure à celle de détection de l'appareil. Ce résultat confirme, comme dans le cas des teneurs en plomb et en cuivre, que ces teneurs sont fonction de l'âge des remblais (**Figure 9C**).

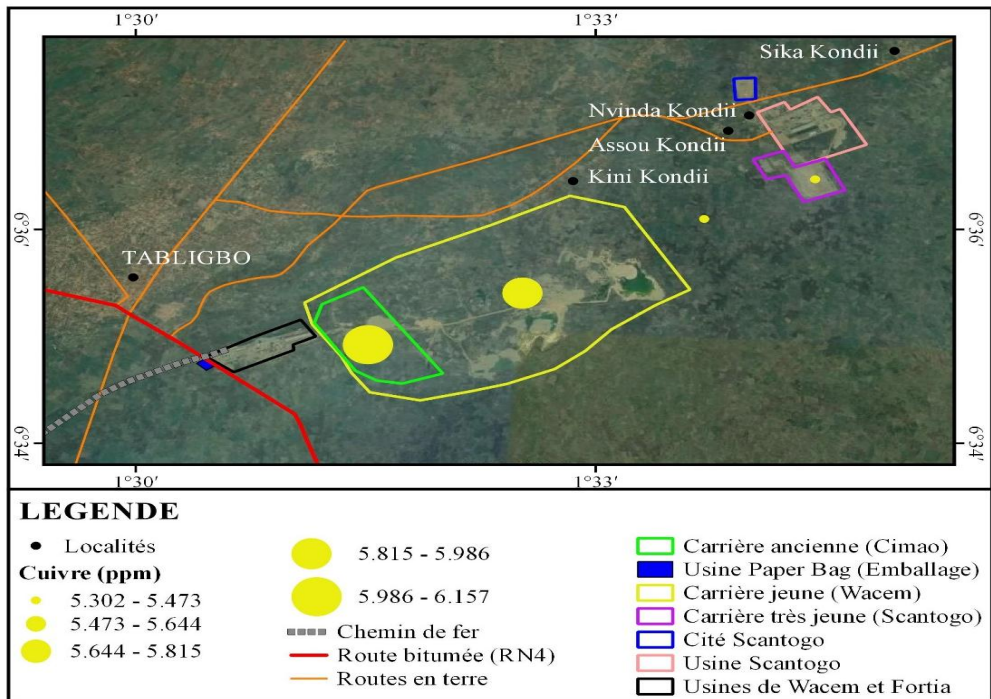


Figure 10 : Répartition des teneurs moyennes en cuivre dans le secteur d'étude
Source : Fond de carte de Google Earth, 2017

III-2. Évaluation de la pollution des sols du secteur d'étude

Il existe plusieurs normes ou références qui fixent la quantité moyenne d'un élément trace métallique (ETM) dans un sol au-delà de laquelle celui-ci est pollué. Il a été considéré, dans le cadre de cette étude, les valeurs seuils fixées par le CCME. Le cadmium étant en quantité inférieure au seuil de détection de l'appareil, le secteur d'étude ne présente pas de risque de pollution en cet ETM. Les **Tableaux 1, 2 et 3** montrent que les quantités moyennes de plomb, du cuivre et du nickel sont loin des seuils de pollution de ces ETM, selon le CCME.

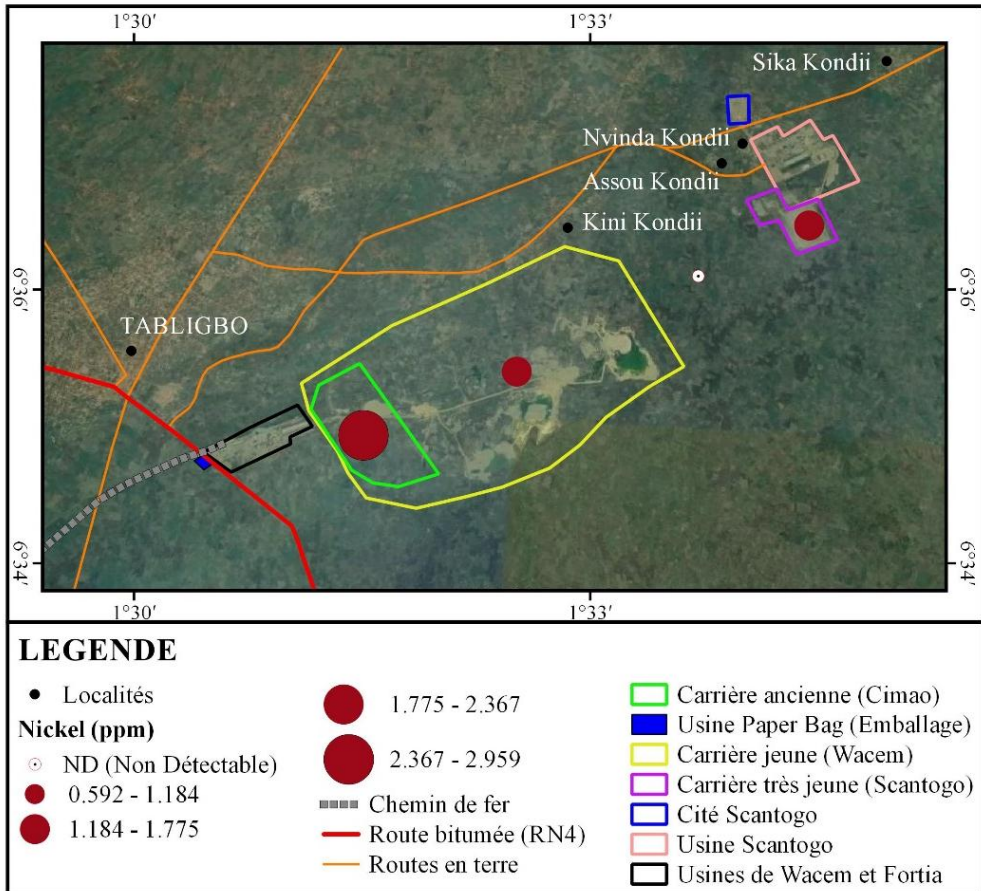


Figure 11 : Répartition des teneurs moyennes en nickel dans le secteur d'étude
 Source : Fond de carte de Google Earth, 2017

Tableau 1 : Teneurs moyennes et facteurs de pollution en plomb

Eléments traces métalliques	Cimao	Wacem	Scantogo	ZNE
Plomb	6,979	4,928	4,253	2,225
Facteur de pollution	0,100	0,070	0,061	0,032
Différence avec la valeur de la norme CCME	Significative	Significative	Significative	Significative
p-Value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

ZNE = Zone Non-Exploitée

Tableau 2 : Teneurs moyennes et facteurs de pollution en cuivre

Éléments traces métalliques	Cimao	Wacem	Scantogo	ZNE
Cuivre	6,157	5,961	5,302	5,444
Facteur de pollution	0,098	0,095	0,084	0,086
Différence avec la valeur de la norme CCME	Significative	Significative	Significative	Significative
p-Value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

ZNE = Zone Non-Exploitée

Tableau 3 : Teneurs moyennes et facteurs de pollution en nickel

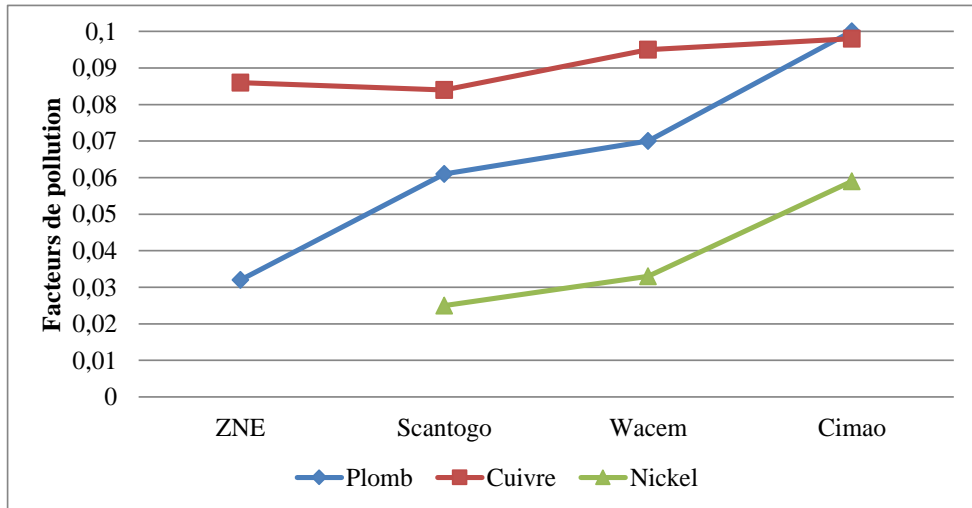
Éléments traces métalliques	Cimao	Wacem	Scantogo	ZNE
Nickel	2,959	1,655	1,253	ND
Facteur de pollution	0,06576	0,03677	0,02784	NC
Différence avec la valeur de la norme CCME	Significative	Significative	Significative	Nd
p-Value	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	NC

ZNE = Zone Non-Exploitée ; ND : Non Détectable ; Nd : Non déterminée ; NC : Non Calculée

Tous les facteurs de pollution des différents ETM sont inférieurs à 1 (**Figure 12**). Ce qui révèle que les sols de la zone d'étude ne sont donc pas pollués par les ETM dosés lors de ces travaux de recherche. Les différences significatives enregistrées confirment que les sols sont contaminés par le plomb, le cuivre et le nickel.

IV - DISCUSSION

La présente étude s'est appuyée sur l'analyse des échantillons de sols des zones exploitées et de la zone de référence (témoin). Elle a permis d'évaluer la contamination et la pollution des sols du secteur d'étude. Cette démarche a été également suivie par les Auteurs des références [13, 23 - 25] respectivement dans la zone d'exploitation des calcaires de Wacem au Togo, dans la zone de traitement de phosphate au Togo, dans la zone des centres miniers d'Aouli, de Mibladen et de Zaida au Maroc et au voisinage de la mine de Tighza au Maroc.



ZNE = Zone Non-Exploitée

Figure 12 : Évolution des facteurs de pollution des sols en éléments traces métalliques

Cette étude montre que les teneurs des sols en plomb évoluent de 2,225 ppm dans la zone non-exploitée à 4,253 ppm dans la zone Scantogo, à 4,928 ppm dans la zone Wacem et à 6,978 ppm dans la zone Cimao. Les teneurs des sols en cuivre évoluent de 5,444 ppm dans la zone non-exploitée à 5,302 ppm, 5,961 ppm et 6,157 ppm respectivement dans les zones Scan Togo, Wacem et Cimao. Quant aux teneurs des sols en nickel, elles évoluent d'une valeur inférieure au seuil de détection de l'appareil dans la zone non-exploitée à 1,253 ppm, 1,654 ppm et 2,959 ppm respectivement dans les zones Scantogo, Wacem et Cimao. Les teneurs des sols en cadmium sont, par contre, partout, inférieures au seuil de détection de l'appareil. Ces résultats indiquent une augmentation des teneurs des ETM de la zone non-exploitée (zone initiale ou témoin) aux zones exploitées (Cimao, Wacem et Scantogo). Ils montrent que l'exploitation minière a entraîné la contamination des sols, par les ETM, dans le secteur d'étude. Les Auteurs des références [13, 26, 27] sont parvenus à des résultats similaires. Les résultats des travaux de [13] révèlent une contamination des sols par le cadmium et le plomb dans la zone d'exploitation des calcaires par la société Wacem au Togo, ceux de [26] indiquent également une contamination des sols par les mêmes éléments évoqués en plus du zinc, du cuivre, du nickel et du chrome. Les travaux de [27] révèlent plutôt une contamination des sols par le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium. Il ressort de l'analyse des résultats, que les sols du secteur d'exploitation du gisement de calcaires de Tabligbo, ne sont pas pollués par les éléments traces métalliques dosés, notamment le cadmium, le plomb, le cuivre et le nickel, selon les valeurs fixées par le CCME. Ce résultat est contraire à celui de [23] qui a montré que

les sols du secteur de traitement des phosphates au sud du Togo sont, globalement, pollués par le cadmium et le nickel ; les zones riveraines étant contaminées par le cadmium, le cuivre, le nickel et le plomb. Il faut préciser que cet auteur a utilisé la même norme (CCME) que celle utilisée dans la présente étude, cependant l'étude s'est faite sur les sites d'extraction de phosphate au Togo. D'autres auteurs [26, 27] ont également trouvé des valeurs importantes de la plupart des ETM dosés dans leurs travaux. Ces auteurs n'ont pas utilisés la norme CCME. Il faut préciser que la nature du minerais extrait et les traitements de ce dernier, associés à l'exploitation, expliquent les différences entre les teneurs obtenues dans cette étude et celles des travaux de [23, 26, 27].

V - CONCLUSION

La présente étude permet d'évaluer la contamination des sols des carrières d'exploitation du gisement de calcaires de Tabligbo (Sud-Est Togo). Les résultats révèlent une contamination du secteur d'étude par le plomb, le cuivre et le nickel. Les teneurs de ces ETM sont plus élevées dans les remblais anciens que ceux récents. Ainsi la durée d'exposition aux activités minières des remblais est un facteur important de la contamination des sols dans le secteur d'étude. Les teneurs du cadmium, quant à elles, sont, dans toutes les zones, inférieures au seuil de détection de l'appareil. Les résultats montrent que les sols du secteur d'étude ne sont pas pollués par le cadmium, le plomb, le cuivre et le nickel, en référence aux seuils fixés par le CCME. Toutefois, ces sols peuvent connaître une pollution future si les dispositions ne sont pas prises pour éviter une augmentation des teneurs des ETM dans les sols des zones exploitées. Ces résultats doivent interpeller les différents acteurs de cette activité minière, sur la probable pollution future du secteur d'étude, exposant la population à des risques de maladies.

RÉFÉRENCES

- [1] - A. SMOUNI, M. ATER, F. AUGUY, L. LAPLAZE, M. EL MZIBRI, F. BERHADA, A. FILALI-MALTOUF et P. DOUMAS, Evaluation de la contamination par les éléments-traces métalliques dans une zone minière du Maroc oriental, *Cah Agric*, Vol. 19, N° 4, juillet-août (2010) 273-279
- [2] - L. DIALLO, industrie minière : enjeux et perspectives de développement durable en Afrique Subsaharienne : cas de la République de Guinée, Thèse de doctorat, Université Hassan 1er, Maroc, (2013) 448p.
- [3] - MERF, Rapport national du Togo pour la dix-huitième session de la commission de développement durable des nations unies (CDD-18), *Direction de la planification*, Togo, (2010) 44p.

- [4] - M. DJANGBEDJA, Dynamiques végétales et stratégies de restauration dans les carrières abandonnées de phosphates et de calcaire au Sud du Togo. Thèse de doctorat, Université de Lomé, Togo, (2011) 189p.
- [5] - M. C. JUNG, Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea. *Appl. Geochem*; N°16 (2001) 1369-1375
- [6] - A. A. ADUAYI-AKUE, Evaluation de la pollution des sols et des produits agricoles par les métaux lourds: cas des populations vivants autour de l'usine de Kpémé. Mem. DEA, FDS. Univ. Lomé, Togo, (2012) 79p.
- [7] - M. L. EL HACHIMI, M. EL HANBALI, M. FEKHAOUI, A. BOUABDLI, L. EL FOUNTI & N. SAÏDI, Impact d'un site minier abandonné sur l'environnement : cas de la mine de Zeïda (Haute Moulouya, Maroc), Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, N°27, (2015) 93-100
- [8] - A. VIALA, Eléments de toxicologie. 2^{ème} édition Tec & Doc. Lavoisier, Paris, France, (2005) 245 – 251
- [9] - 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, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, (1999) 191p.
- [10] - C. BLIEFERT, R. PERRAUD, Chimie de l'Environnement. Air ; eau, sols, déchets, De Univ. Boeck, Issy-les-Moulineaux, (2001) 369-388
- [11] - ACADEMIE DES SCIENCES, Contamination des sols par les éléments en trace : les risques et leur gestion, *Rapport N° 42. Tec & Doc, Lavoisier, France, (1998) 438p.*
- [12] - K. GNANDI, H. J. TOBSCHALL, The pollution of marine sediments by trace elements in the coastal region of Togo caused by dumping of cadmium-rich phosphorite tailing into the sea. *Environmental Geology*, vol. 1, N° 438 (1999) 13-24
- [13] - A. TEBIE, Contribution au suivi environnemental du site du projet d'exploitation du calcaire au sud-est du Togo, Mem. DEA, FDS. Université Lomé, Togo, (2012) 61p.
- [14] - A. A. ADUAYI-AKUE et K. GNANDI, Evaluation de la pollution par les métaux lourds des sols et de la variété locale du maïs *Zea mays* dans la zone de traitement des phosphates de Kpémé (Sud du Togo). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 5, N°48 (2014) 2347-2355
- [15] - M. MÉLILA, W. POUTOULI, K. S. AMOUZOU, G. TCHANGBÉDJI, M. THAOU et A. DOH, Evaluation de l'impact du rejet des déchets phosphatés dans la mer sur la biodiversité marine dans trois localités côtières au Togo à partir des biomarqueurs du stress oxydatif chez *Sphyraena barracuda* (HECKEL, 1843), *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, Vol. 6, N° 2 (2012) 820-831
- [16] - G. TANOUAYI, K. GNANDI K, H. AHOUDI, K. OURO-SAMA, La contamination métallique des eaux de surface et des eaux souterraines de la zone minière d'exploitation des phosphates de Hahotoé-Kpogamé

- (Sud-Togo) : cas du cadmium, plomb, cuivre et nickel. *Larhyss Journal*, N° 421 (2015) 35-50
- [17] - P. AFFATON, J. SOUGY & R. TROMPETTE, The Tectono-stratigraphic relationship between the upper Precambrian and Lower Palaeozoic Volta basin and the Pan-African Dahomeyides orogenics belt (West Africa). *Am. J. Sci.*, 280, (1980) 227-248
- [18] - T. C. Addra, A. K. Fahem, A. K. & T. De Jong, Atlas du développement régional du Togo PNUD/DTCD/DGPD/DNCN, Lomé, Editogo/CAR-SEUC, (1994) 207p.
- [19] - K. KOKOU, Les mosaïques forestières au sud du Togo : biodiversité, dynamique et activités humaines, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, (1998) 140p.
- [20] - AFNOR, Qualité du sol. Détermination de la distribution granulométrique des particules de sol : NF X31-107. Propriétés physiques des sols, (2003) 20p.
- [21] - CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT, Recommandations canadiennes pour la qualité des sols, Environnement et santé humaine. Tableaux sommaires, mis à jour en septembre 2007. Dans Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement, 1999, Winnipeg, le Conseil (2007) 15p.
- [22] - CONSEIL CANADIEN DES MINISTRES DE L'ENVIRONNEMENT, Canadian Environmental Quality Guidelines, [En ligne] Available at: https://www.ccme.ca/en/resources/canadian_environmental_quality_guidelines/, (2017) [Accès le 07 06 2018]
- [23] - A. A. ADUAYI-AKUE, Evaluation de la pollution par les métaux lourds de l'air, des sols et du maïs (*Zea mays* L.) dans la zone de traitement des phosphates au Togo : effets sur la santé humaine, Thèse de doctorat, Université de Lomé, Togo, (2015) 163p.
- [24] - M. MAKHOUKH, M. SBAA, A. BERRAHOU & M. VANCLOOSTER, Contribution à l'étude de l'impact d'un site minier abandonné dans la haute Moulouya sur la qualité de l'Oued Moulouya, Maroc, *Afrique Science*, Vol. 7, N° 3, (2011) 33-48
- [25] - F. EL HASSANI, A. BOUSHABA, N. RAÏS, Etude de la contamination par les métaux lourds des eaux et des sédiments au voisinage de la mine de Tighza (Maroc Central Oriental), *European Scientific Journal*, Vol. 12, N° 6, (2016) 158-167
- [26] - A. SEBEI, F. CHAABANI et M. K. OUERFELLI, Impacts des rejets miniers sur le sol et les plantes de la région de Boujaber (NO.Tunisie) Fractionnement chimique des métaux lourds dans les sols, *Geo-Eco-Trop*, N° 29, (2005) 37-50
- [27] - M. L. EL HACHIMI, M. FEKHAOUI, A. EL ABIDI et A. RHOJATT, Contamination des sols par les métaux lourds à partir de mines abandonnées : le cas des mines Aouli-Mibladen-Zeïda au Maroc, *Cah Agric*, Vol. 23, N° 8, (2014) 213-219