

CONTAMINATION DES SOLS PAR DES ÉLÉMENTS TRACES MÉTALLIQUES VIA LES REMBLAIS DES SCORIES ET BOUES DES FONDERIES KINOISES DE LA MITRAILLE

Par

Joseph KAKUNDIKA MATHE

*Diplômé d'Etudes Approfondies, Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département
de l'environnement*

Dieudonné MUSIBONO EYUL-ANKI

*Professeur Ordinaire, Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département de
l'environnement*

Jérôme CIGOROGO RWAGASHA

*Diplômé d'Etudes Approfondies, Université de Kinshasa, Faculté des Sciences, Département
de l'environnement*

RÉSUMÉ

Les scories et boues des fonderies renferment des nombreuses substances chimiques dont les métaux lourds. Leur utilisation comme remblais des milieux sous stress environnemental est source de contamination de ceux-ci par libération des substances toxiques en l'occurrence les éléments traces métalliques.

Au cours de cette étude, nous nous sommes attelés à vérifier combien le contact des scories et boues des fonderies aux sols qui les reçoivent comme remblais peut avoir des sérieuses incidences sur ces derniers. Pour ce faire, nous avons comparé les concentrations relatives en éléments traces métalliques des sols remblayés par ces rebuts à ceux des sols non remblayés (échantillon blanc).

L'analyse des résultats de cette étude révèle que le contact direct des remblais des scories et boues des fonderies avec les sols y laisse des empruntes non négligeables. La moyenne des sommes des écarts normaux a été évaluée à 47 %, dans les limites des sommes des écarts compris dans l'intervalle allant de 7 % à 82 %

Par ailleurs, les écarts normaux ont été calculés dans six des sept blocs stratifiés de la zone d'étude, tandis qu'un seul bloc sur les sept a présenté un écart inverse.

Ceci a permis de confirmer l'hypothèse selon laquelle le contact direct d'un mélange scories et boues des fonderies à un milieu écosystémique quelconque y laisse une partie relative de son contenu minéralogique.

Mots-clés : *Boues des fonderies, contamination des sols, éléments traces métalliques, remblais, scories des fonderies.*

SUMMARY

Slag and sludge from foundries contain numerous chemical substances including heavy metals. Their use as backfill in areas under environmental stress is a source of contamination of the latter by the release of toxic substances, in this case metallic trace elements.

During this study, we have tried to verify how the contact of slag and sludge from foundries with the soils that receive them as fill can have serious impacts on the latter. For this, we compared the relative concentrations of trace metals in soils backfilled with these wastes to those in unfilled soils (blank sample).

The analysis of the results of this study reveals that the direct contact of the slag and sludge backfill with the soil leaves significant traces in the soil. The average of the sums of the normal deviations was evaluated at 47%, within the limits of the sums of the deviations ranging from 7% to 82%.

Furthermore, normal deviations were calculated in six of the seven stratified blocks in the study area, while only one block out of the seven showed an inverse deviation.

This confirmed the hypothesis that direct contact of a slag-smelter sludge mixture to any ecosystem environment leaves a relative portion of its mineralogical content.

Keywords: *Fill, smelter slag, smelter sludge, soil contamination, trace metals.*

1. INTRODUCTION

Les ETM sont présents naturellement dans les roches et sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique¹. La concentration naturelle de ces éléments dans les sols varie selon la nature de la roche tandis que sa localisation, son âge et sa spéciation dépendent de la nature de l'élément. Les décharges sauvages et les retombées atmosphériques sont également une source potentielle d'ETM pour les sols². Les boues et scories des fonderies qui recyclent la mitraille renferment plusieurs composés chimiques dont les éléments en trace métalliques (ETM)³.

¹ P.H. Bourrelier et al., *Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion*, édition Lavoisier, Paris, CR. Acc Sci, 1998, p. 42.

² B. Mohamed, *Effet des précipitations sur la distribution du Zn et du Pb issus de retombées atmosphériques dans le sol: Cas de la fonderie de Tiaret (ALFET)*, thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, République Algérienne Démocratique et Populaire, 2017.

³ J. Kakundika et al., "Chemical characterization of slag and sludge from foundries that recycle scrap metal in Kinshasa-DRC: Relative quality and quantity of pollutants from the substratum backfilled with these materials," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 4, 2021, pp. 637-649.

Ces résidus utilisés par des tiers comme remblais des milieux sous stress environnemental⁴ renferment des quantités importantes des métaux lourds (ETM) et sont susceptibles de libérer leur contenu vers le sol sur lequel elles sont entreposées en devenant une importante source de pollution⁵.

Cette étude a pour objectif de mettre en évidence la contamination, par contact direct des scories et boues des fonderies qui recyclent la mitraille aux sols. Pour y parvenir, nous avons réalisé les analyses chimiques de deux types de sols notamment : les sols remblayés par les scories et boues des fonderies et les sols non remblayés par ces résidus. Nous avons pris comme cible quelques ETM d'après leur définition par les pays de la CEE⁶. Les écarts de concentrations en éléments trace métalliques entre ces deux types de sols ont été comparés.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les données de cette section ont été publiées in extenso dans notre précédent article⁷ à l'exception du sous-point 2.7. et de quelques aménagements stylistiques.

2.1. Zone d'étude

La présente étude s'est déroulée à Kinshasa, République Démocratique du Congo, dans une zone circonscrite sur une surface en forme d'un hexagone déformé, comprise entre le pont N'djili (S04°23'224" et E015°21'975") → le pont Matete (S04°22'917" et E015°21'163") → la 14^{ème} rue en passant par l'Echangeur de Limete (S04°21'864" et E015°20'508") → la 14^{ème} rue sur l'avenue du Poids Lourd (S04°21'678" et E015°20'994") → le point de croisement du chemin de fer et la route du Poids-Lourd à côté de Kingabwa UZAM (S04°21'450" et E015°20'920") → le pont rail sur la rivière N'djili (S04°21'852" et E015°20'646") → l'allongement de la rivière N'djili jusqu'au point de départ (Pont N'djili) pour boucler la boucle.

⁴ J. Kakundika, "Identification, geolocation and characterization of slag and sludge discharge sites from foundries (SBM) which recycle scrap metal in Kinshasa : DRC," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 3, 2021, pp. 596-617.

⁵ J. Kakundika, et al., "Evaluation des métaux lourds (ETM) dans les scories et boues des fonderies de la mitraille : analyse des concentrations relatives transférables vers les écosystèmes", sous presse au journal *Agrobiologia* depuis le 26/08/2022.

⁶ Commission Européenne, Gestion des résidus et stériles des activités minières: Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, in https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/mmr_adopted_0109_VF_0.pdf, (consulté le 03/01/2021).

⁷ J. Kakundika et al., "Study of the Bioaccumulation of mineral components in soils backfilled with slag and sludge from scrap metal, scrap recycling foundries in Kinshasa (DRC)," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 4, 2021, pp. 650-665.

Elle s'étend sur une superficie de 523.272 ha et comprend les quartiers Salongo et Ndanu en entier et une partie du quartier Industriel, tous dans la commune de Limete. Il s'agit de la zone qui renferme les trois fonderies kinois qui ont pour matières premières la mitraille (déchets métalliques) et dont elles se servent constamment comme lieu de rejet de leurs rebuts (observation personnelle).

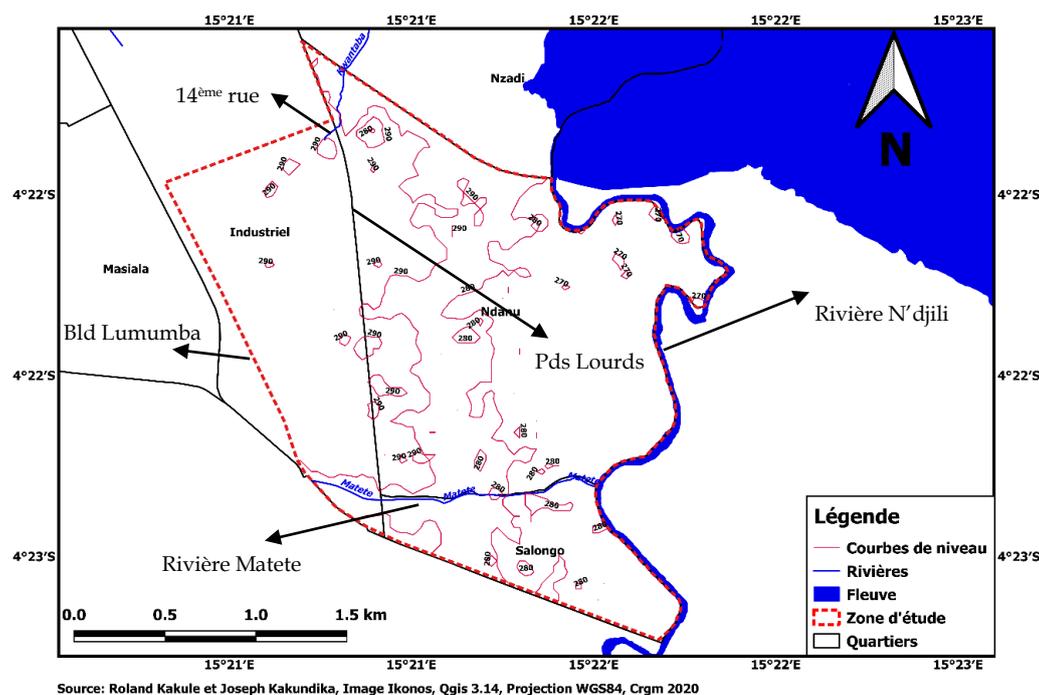


Figure 1. Cartographie de la zone d'étude

2.2. Répartition des sites d'échantillonnage

Le but principal de cette section est de saisir la répartition des polluants dans les sols au sein de notre zone d'étude. Ceci a été réalisé au moyen des valeurs statistiques (moyenne, dispersion absolue, etc.), de la manière la plus sûre possible, tout en tenant compte des questions posées et des objectifs fixés. La variabilité spatiale, et donc l'hétérogénéité des paramètres analysés de la zone d'étude joue un rôle central en la circonstance. Elle se retrouve à différents niveaux (hétérogénéité d'un échantillon, d'une placette de prélèvement, d'une zone d'études) et assure un rôle plus ou moins important suivant les cas [8].

Dans notre précédente étude, 76 sites remblayés par les boues et scories de la mitraille avaient été répertoriés. Les 76 sites sont contenus dans 7 blocs différents choisis pour faciliter les opérations de repérage, mais aussi

répondant à des caractéristiques physiques et environnementales particulières à chacun d'eux. Un seuil préférentiel de 30 sites d'échantillonnage a été fixé⁸.

La détermination de ces derniers a été effectuée par la méthode de la répartition proportionnelle, laquelle distribue une valeur dans les cellules, proportionnellement aux valeurs existantes de ces cellules telle que, s'agissant de cet exercice :

Si X = nombre total de sites répertoriés (76) ;

Et X' = nombre de sites d'échantillonnage exprimés (30) ;

z = proportion attribuée au nombre de sites par bloc (en pourcentage)

n = nombre de sites répertoriés par bloc

n' = nombre de sites d'échantillonnage calculés par bloc ;

Alors, X correspond à 100% de sites repérés, d'une part, et X' correspond, d'autre part, à 100 % de sites d'échantillonnage exprimés.

Dans la suite logique, les opérations ci-après sont effectuées :

$$z = \frac{n_i \cdot 100 \%}{X'}$$

Il reste maintenant de reporter le calcul de z dans X' par la méthode dite règle de trois simples tel que :

Si 100 % = X

Alors :

$$n' = \frac{z\% \cdot X'}{100\%} = \frac{z \cdot X'}{100}$$

On pourra aussi procéder par le calcul du quotient (Q) qui est le rapport entre le nombre des sites répertoriés et le nombre de sites d'échantillonnage désirés (celui-ci est fixé à l'avance).

$$\text{Ainsi donc : } Q = \frac{X}{X'}$$

Dans ce cas, $n_i = n \cdot Q$

Le quotient reste constant dans toutes les opérations, mais n varie d'un facteur x à y, soit du bloc 1 à 7 sauf si deux ou plusieurs blocs ont n identique.

Ce calcul devra se répéter dans tous les sept blocs. Ce qui donne les résultats rendus dans le tableau ci-après.

⁸ J. Kakundika et al., "Identification, geolocation and characterization of slag and sludge discharge sites from foundries (SBM) which recycle scrap metal in Kinshasa : DRC," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 3, pp. 2021, 596-617.

Tableau 1. Répartition des sites à échantillonnés dans les blocs

	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	Total
Total sites	11	3	19	17	8	4	14	76
Nombre de sites à échantillonner	4	1	8	7	3	1	6	30

Les résultats du tableau ci-après indiquent qu'au total 30 sites d'échantillonnage des sols ont été repérés dans les 76 sites de rejet des SBF identifiés et répartis dans 7 blocs différents. Le bloc 3 qui renferme 19 sites comprendra 8 sites d'échantillonnage, le bloc 4 avec 17 sites en comprendra 7, les blocs 7 et 1 avec respectivement 14 et 11 sites comprendront 6 et 4 sites d'échantillonnage, tandis que les blocs 5, 6 et 2 qui renferment respectivement 8, 4 et 3 comprendront 3, 1 et 1 sites d'échantillonnage.

2.3. Identification des sites de prélèvement des échantillons des sols

Après cette répartition des sites d'échantillonnage dans les différents blocs, il sied de déterminer comment, dans un même bloc à plusieurs sites, les sites d'échantillonnage seront sélectionnés. Nous avons procédé par un saut aléatoire sur base du calcul du quotient ($Q = n/n_i$).

L'hypothèse émise est que les éléments chimiques compris dans les scories et boues de la mitraille auraient subi des permutations instantanées qui les auraient entraînées dans les sols sur lesquels elles ont été épandues.

Soit le tableau ci-après répertoriant les sites par bloc.

Tableau 2. Répartition des sites d'épandage des SBF

B1	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11											
B2	S12	S13	S14																			
B3	SB1a	S15	-----	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23	S24	S25	S26	S27	S28	S29	S30	S31	S32	S33		
B4	S34	S35	S36	S37	S38	S39	S40	S41	S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50					
B5	S51	S52	S53	S54	S55	S56	S57	S58														
B6	S59	S60	S61	S62																		
B7	S63	S64	S65	S66	S67	S68	S69	S70	S71	S72	S73	S74	S75	S76								

Le tableau 2 donne la répartition des sites/bloc où sont épandues les boues et scories de la mitraille. Le bloc 3 est le plus étendue en termes de plus grand nombre de sites suivi des blocs $4 > 7 > 1 > 5 > 6 > 2$.

Ainsi, s'agissant du :

Bloc 1 : $Q = 11/4 = 2R3$

Pour identifier les sites de prélèvement, si nous considérons S1 comme point de départ, un saut de 2 unités sera observé jusqu'à totaliser les 4 sites. Ainsi, les sites ci-après sont sélectionnés : S1, S4, S7 et S10.

Bloc 2 : $Q = 3/1 = 3$

Ce dernier ne comprenant que 3 sites pour un seul échantillon, le site du milieu a été sélectionné. Ainsi, S13 est choisi pour y échantillonner.

Bloc 3 : $Q = 19/8 = 2R3$

Ainsi, partant du 1er site, un saut de 2 unités sera observé tandis que, à partir du 4ème site sélectionné moyennant cette technique, une exception est appliquée en observant un saut d'une unité. Ce qui nous amène à authentifier les sites ci-après : SBia, S18, S21, S24, S26, S28, S30 et S32.

Bloc 4 : $Q = 17/7 = 2R3$

Un saut de 2 unités est observé partant du premier site du bloc aux 5 premiers sites et de manière exceptionnelle ce saut est d'une unité seulement pour les deux derniers sites. On aura donc les sites suivants : S34, S37, S40, S43, S46, S48 et S50.

Bloc 5 : $Q = 8/3 = 2R2$

Le saut est de 2 unités et est strictement observé. D'où les sites sélectionnés pour l'échantillonnage S51, S54 et S57.

Bloc 6 : $Q = 4/1 = 4$

Un seul site nécessité parmi les quatre. Pas d'intermédiaire possible étant donné le caractère paire de ce bloc. Ce qui nous a poussé à orienter le choix sur le site plus distancé que les autres. Il s'agit ici du site S61 dont la distance est d'au moins 162 m.

Bloc 7 : $Q = 14/6 = 2R2$

Un saut de 2 unités sera observé pour les 4 premiers sites identifiés tandis que ce dernier ne sera que d'une unité pour les deux derniers. Ceci étant, les sites sélectionnés pour ce dernier bloc sont notamment S63, S66, S69, S72, S74 et S76.

En définitif, la configuration des sites d'échantillonnage se présente dans le tableau 3 ci-après :

Tableau 3. Sites d'échantillonnage des sols

B1	S1	S4	S7	S10				
B2	S13							
B3	SBia	S18	S21	S24	S26	S28	S30	S32
B4	S34	S37	S40	S43	S46	S48	S50	
B5	S51	S54	S57					
B6	S61							
B7	S63	S66	S69	S72	S74	S76		

Les échantillons seront donc prélevés aux S1, S4, S7 et S10 s'agissant du bloc 1, S13 quant au bloc 2, SBia, S18, S21, S24, S26, S28, S30 et S32 concernant le bloc 3, S34, S37, S40, S43, S46, S48 et S50 pour le compte du bloc 4, S51, S54 et S57 pour celui du bloc 5, S61 au compte du bloc 6 et enfin S63, S66, S69, S72, S74 et S76 s'agissant du bloc 7.

2.4. Prélèvement des échantillons

L'objectif de l'échantillonnage est d'obtenir des échantillons stratifiés des sols en appliquant systématiquement une méthode éprouvée. Il a comme principe « la terre extraite lors du forage doit être échantillonnée de façon à ce que le prélèvement effectué soit suffisamment représentatif de la couche de sol concernée et de telle sorte que les concentrations de polluants n'aient pas été affectées par un phénomène d'évaporation ou par une contamination due à l'emballage ou au matériel d'échantillonnage. Le but du prélèvement des échantillons du sol est de fournir un petit volume de sol à des fins d'analyse qui est représentatif du volume entier du sol dans la zone étudiée. Un échantillon doit être le plus représentatif possible pour donner l'image du site⁹.

Tous les sites répertoriés n'ont pas les mêmes caractéristiques physiques, ni moins les mêmes volumes de remblais (boues et scories). D'où le recours à un échantillonnage stratifié, c'est-à-dire l'échantillon sera constitué d'une composition de plusieurs sous échantillons soutirés à plusieurs endroits sur un site donné. Il y a plusieurs façons d'atteindre ce but, pour ce cas présent, l'unité a été la couverture de la distance minimum (petite distance mesurée) des sites identifiés. Celui-ci étant de 8 mètres [4], un échantillon sera composé des plusieurs carottes de terres prélevés tous les 8 mètres le long d'un même site. Le poids de l'échantillon sera donc fonction de la distance que couvre chaque site d'échantillonnage. Un échantillon spécial (blanc) sera prélevé dans chaque bloc. Il s'agit de 7 échantillons extraits dans des milieux supposés non encore

⁹ T. Sterckeman, et al., *Trace elements in soils developed in sedimentary materials from Northern France*. Geoderma, 2006, 136(3-4): 912-929.

touchés par le rejet des boues et scories (ES0). Ce qui porte le nombre d'échantillons des sols à 37.

Les échantillons de sol sont des échantillons remués obtenus au moyen des tarières de type Edelman et des tarières à tige pleine¹⁰.

Pour ce faire, en vue d'étudier avec sérénité les propriétés physico-chimiques des sols de notre zone d'étude et de limiter les effets liés à la mobilité et la distribution des éléments minéraux, nous avons prélevé les échantillons de sol de la couche superficielle. Le choix d'une épaisseur constante de prélèvement de la couche 0-60 cm a été appliqué car il permet la comparaison de stocks de polluants¹¹.

L'extraction des sols a été faite au moyen d'une tarière rotative munie d'un piston de 60 cm de longueur. Les points échantillonnés étaient préalablement fouillés au moyen d'une pelle manuelle pour se débarrasser des sols mélangés aux remblais, tandis qu'en cas de solidité avérée de la couche superficielle, il était fait usage d'une pioche pour permettre la pénétration facile de la tarière. La préférence était accordée aux échantillons latéraux qu'à ceux verticaux. Les échantillons des sols extraits étaient ainsi placés dans des sacs en plastique («market»), tandis que leur transport était assuré par moto. Les sacs étaient codés ou numérotés en indiquant le numéro du bloc d'appartenance suivi du suffixe «E» et le code du site échantillonné (par exemple : B1ES1 = échantillon des sols du site 1 au bloc 1). Sur terrain, les échantillons étaient conservés (à environ 2-4°C) dans des récipients isothermes (glacières). En principe, les échantillons des sols doivent être transportés au laboratoire aussi vite que possible, une fois terminé le travail de terrain vu que la durée de conservation de ceux-ci est limitée en raison des phénomènes de volatilisation et de biodégradation. Un échantillon doit être analysé au laboratoire avant expiration du délai de conservation. La période de conservation des échantillons des sols pour analyses de mercure est de 15 jours, du chrome (VI) de 48 heures tandis que pour d'autres métaux elle est illimitée¹². Nos échantillons ont été extraits au mois de septembre et analysés au mois de novembre soit une période de conservation d'au moins 60 jours. Ce qui pourrait, à en croire l'observation ci-après, avoir des incidences sur les concentrations de Hg et du Cr (VI).

¹⁰ <http://www.fao.org/3/x2570f/X2570F04.htm> (consulté le 21 septembre 2022)

¹¹ P. Chassin et al., Les éléments traces métalliques et la qualité des sols, Impact à moyen et à long terme : Etude et Gestion des Sols, tome 3, 1996, pp 297-306.

¹² <http://www.fao.org/3/x2570f/X2570F04.htm> (consulté le 23 septembre 2022)

2.5. Traitement des échantillons

Les échantillons des sols étalés sur une bâche propre étaient soumis au séchage à l'air libre dans un hangar à fenêtre ouvertes en l'absence des rayons solaires pendant 24 heures. Ils étaient ensuite émottés, mélangés puis tamisés moyennant un tamis des mailles de 2 mm de diamètre. Les granulats supérieurs à 2 mm étaient pilés au mortier en bois puis tamisés à nouveau. Cette opération a été répétée jusqu'au moment où la totalité de l'échantillon passe à travers le tamis. La poudre obtenue était mélangée puis soumise au quartage pour obtenir un sous-échantillon de petite quantité mais représentatif (± 500 g).

Afin d'éviter la contamination entre échantillons, à la fin de chaque processus (traitement d'un échantillon), les matériels ayant servi (mortier, pilon et tamis) étaient soigneusement nettoyés moyennant un pinceau, puis essuyé avec un mouchoir hygiénique.

Après essai de dissolution des échantillons au laboratoire, il s'est avéré que les premiers traitements accordés aux échantillons étaient insuffisants pour permettre leur digestion complète. Ainsi un traitement supplémentaire était appliqué. Ce dernier s'était effectué dans le laboratoire de physicochimie de l'OCC/Lubumbashi selon le procédé ci-après :

Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 105°C pendant au moins 4 heures pour dissiper l'humidité résiduaire. Ceux-ci sont ensuite passés au broyage dans un vibro-broyeur géant afin de les réduire aux dimensions granulométriques d'au moins 75 μm passible à la dilution en suivant le protocole ci-après : nettoyer les godets avec de la silice, souffler les godets avec de l'air comprimé et essuyer l'intérieur, numéroter les godets (code laboratoire), placer les échantillons dans les godets et allumer le vibro-broyeur, retirer les échantillons du vibro-broyeur et homogénéiser. Les échantillons issus de ce processus ont une granulométrie de $\pm 75\mu\text{m}$.

2.6. Méthodes d'analyse chimique des échantillons

Les analyses chimiques des échantillons ont été effectuées par spectrophotométrie d'émission atomique avec couplage inductif (ICP-OES) pour la majorité de composants) tandis que le mercure a été dosé par spectrophotométrie d'absorption atomique avec formation des vapeurs (SAA-FV).

2.7. Méthode d'analyse des données

Les données ont été analysées moyennant le logiciel Excel 2010. Le calcul des écarts a permis de mettre en évidence les différences existentielles entre les concentrations en éléments trace métalliques dans les sols remblayés par les scories et boues des fonderies et celles des sols qui n'ont pas été remblayés par ces matériaux.

Les écarts ont été calculés suivant les formules ci-après :

$$(i) \text{ Ecart} = \frac{[\text{Sol remblayé}] - [\text{Echantillon blanc}]}{[\text{Sol remblayé}]} \times 100 \text{ (Ecart normal)}$$

$$(ii) \text{ Ecart} = \frac{[\text{Echantillon blanc}] - [\text{Sol remblayé}]}{[\text{Echantillon blanc}]} \times 100 \text{ (Ecart inverse)}$$

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats rendus dans le tableau précédent sont des moyennes relatives calculées sur base du nombre variant d'échantillons dans chaque bloc (voir tableau 1).

Tableau 4. Concentration des ETM dans les sols remblayés par les scories et boues des fonderies de la mitraille (mg/kg)

Bloc	Echantillon	Concentration des ETM dans les sols (mg/kg)													Somme
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Sb	Se	Sn	Te	Th	Al	
B1	Sol Remblayé	60,86	1,681	29,38	86,22	0,0016	21,27	2557	16,03	155,3	8,269	22,32	4,71	6475	9437,6
	Ech. Blanc	0,039	0,001	19,37	152,5	0,0021	41,08	0,008	27,57	0,532	5,268	17,93	0	1477	1741,3
	Ecart	99,94	99,94	34,07	43,46	23,81	48,22	100	41,86	99,66	36,29	19,67	100	77,19	81,5493
B2	Sol Remblayé	0,04	0,005	18,03	33,97	0,0001	2,47	85,14	0	0,039	513,2	19,2	12,01	10420	11104
	Ech. Blanc	3,329	0,758	26,97	35,62	0,0003	15,78	58,31	0	2,9	0	31,78	3,6	10150	10329
	Ecart	98,8	99,34	33,15	4,632	66,667	84,35	31,51	0	98,66	100	39,58	70,02	2,591	6,97947
B3	Sol Remblayé	55,07	9,585	74,19	390,9	0,0026	31,04	330,2	20,85	81,24	2,879	30,57	14,74	9226	10267
	Ech. Blanc	51,41	1,752	41,78	41,15	0	19,56	96,23	0	243,9	0	14,95	7,943	10050	10569
	Ecart	6,643	81,72	43,69	89,47	100	36,99	70,85	100	66,69	100	51,1	46,11	8,199	2,85741
B4	Sol Remblayé	38,98	3,249	96,23	123,2	0,0067	33,6	219,8	10,57	60,2	0,414	19,06	17,13	13522	14144
	Ech. Blanc	33,73	3,035	45,25	49,34	0,0353	22	209,3	9,004	38,56	0	13,09	8,447	6276	6707,8
	Ecart	13,46	6,587	52,98	59,95	81,02	34,52	4,781	14,84	35,95	100	31,32	50,69	53,59	52,5749
B5	Sol Remblayé	35,5	1,898	35	40,09	0,0255	30,58	151,4	1,195	88,07	7,779	47,75	7,693	7437	7883,7
	Ech. Blanc	81,11	12,37	61,94	91,08	0,0002	28,18	264,5	33,11	17,32	6,326	17,89	11,33	4019	4644,2
	Ecart	56,23	84,66	43,49	55,98	99,216	7,848	74,67	96,39	80,33	18,68	62,53	32,1	45,96	41,0911
B6	Sol Remblayé	0	15,68	633,7	52,87	0,0043	32,47	96	15,9	7,17	9,174	44,56	0,608	9612	10520
	Ech. Blanc	76,86	2,872	19,25	43,83	0,001	25,54	91,36	0	157,5	1,631	37,14	12,83	7625	8093,8
	Ecart	100	81,68	96,96	17,1	76,744	21,34	4,833	100	95,45	82,22	16,65	95,26	20,67	23,0627
B7	Sol Remblayé	44,36	6,517	148,6	66,73	0,0122	28,73	172,1	11,63	61,47	4,221	29,91	9,673	8082	8665,6
	Ech. Blanc	93,53	0	16,83	51,75	0,005	27,94	106,1	0	274	29,08	17,42	7,155	1654	2277,8
	Ecart	52,57	100	88,67	22,45	59,016	2,743	38,34	100	77,57	85,485	41,76	26,03	79,53	73,7145

Ecart inverse
 Ecart normal

L'analyse des résultats ci-dessus indique des divergences dans le partage des écarts entre les échantillons en ETM des groupes de sols de natures différentes et même des groupes des sols de même nature. En effet, l'on peut constater que, s'agissant :

- de l'arsenic (As), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (99,9 %), bloc 3 (6,64 %) et bloc 4 (13,46 %) tandis que les écarts inverses ont été évalués au bloc 2 (98,8 %), bloc 5 (56,23 %), bloc 6 (100 %) et bloc 7 (52,6 %). L'interprétation de ces données témoigne que l'arsenic est beaucoup plus concentré dans les sols qui n'ont pas connus les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille ;
- du cadmium (Cd), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (99,9 %), bloc 3 (81,72 %), bloc 4 (6,6 %), bloc 6 (81,7 %) et bloc 7 (100 %), tandis que les écarts inverses ont été notés au bloc 2 (99,34 %) et bloc 5 (84,6 %). L'interprétation de ces données témoigne que le cadmium est beaucoup plus concentré dans les sols qui ont connus les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille ;
- du chrome (Cr), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (34,7 %), bloc 3 (43,7 %), bloc 4 (53,0 %), bloc 6 (97,0 %) et bloc 7 (89,0 %), tandis que les écarts inverses ont été calculés au bloc 2 (33,1 %) et bloc 5 (43,5 %). Ce qui témoigne que le chrome a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;
- du cuivre (Cu), les écarts normaux ont été calculés au bloc 3 (89,5 %), bloc 4 (60,0 %), bloc 6 (17,1 %) et bloc 7 (22,5 %), tandis que les écarts inverses ont été calculés au bloc 1 (43,5 %), bloc 2 (4,6 %) et bloc 5 (56,0 %). Ce qui témoigne que le cuivre a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;
- du mercure (Hg), les blocs 1, 2 et 4 présentent des écarts inverses respectivement de 23,3 %, 66,7 % et 81,0 %, tandis que les blocs 3-5-6 et 7 donnent des écarts normaux respectivement de 100 % - 99,2 % - 76,7 % et 59%. Ce qui dénote que le mercure a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais de scories et boues de la mitraille que dans ceux n'ayant pas été remblayés.
- du nickel (Ni), les écarts normaux ont été calculés au bloc 3 (37,0 %), bloc 4 (37,0 %), bloc 5 (7,8 %), bloc 6 (21,3 %) et bloc 7 (2,7 %), tandis que les écarts inverses ont été calculés au bloc 1 (48,2 %) et bloc 2 (84,3 %). Ce qui témoigne que le nickel a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;
- du plomb (Pb), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (100,0 %), bloc 2 (31,5 %), bloc 3 (70,9 %), bloc 4 (4,8 %), bloc 6 (21,3 %) et bloc 7 (2,7 %), tandis

que seulement le bloc 4 a présenté l'écart inverse équivalent à 81,0 %. Ce qui témoigne que le plomb a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;

- de l'antimoine (Sb), les écarts normaux ont été calculés au bloc 3 (100,0 %), bloc 4 (14,8 %), bloc 6 (100 %), bloc 7 (100 %), tandis que les écarts inverses ont été calculés au bloc 1 (41,9 %) et bloc 5 (96,4 %) et le bloc 2 ne présente aucun écart. Ce qui témoigne que l'antimoine a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;
- du sélénium (Se), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (99,7 %), bloc 4 (36,0 %), bloc 5 (80,3 %), tandis que les écarts inverses ont été calculés au bloc 2 (98,7 %), bloc 3 (66,7 %), bloc 6 (95,4 %) et bloc 7 (77,6 %). Ce qui témoigne que le sélénium a été plus dosé dans les sols n'ayant pas connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols remblayés par ces rebuts des fonderies ;
- de l'étain (Sn), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (36,3 %), bloc 2 (100 %), bloc 3 (100 %), bloc 4 (100 %), bloc 5 (18,7 %), bloc 6 (82,2 %), tandis que l'écart inverse a été calculé uniquement au bloc 7 (85,5 %). Ce qui témoigne que l'antimoine a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés par elles ;
- du tellure (Te), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (19,7 %), bloc 3 (51,1 %), bloc 4 (31,3 %), bloc 5 (62,5 %), bloc 6 (16,7 %) et bloc 7 (41,8 %), tandis que l'écart inverse a été calculé uniquement au bloc 2 (39,6 %). Ce qui témoigne que le tellure a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;
- du thorium (Th), les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (100 %), bloc 2 (46,1 %), bloc 3 (46,1 %), bloc 4 (50,7 %) et bloc 7 (26,0 %), tandis que les écarts inverses ont été calculés au bloc 5 (32,1 %) et bloc 6 (95,3 %). Ce qui témoigne que le thorium a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés ;
- de l'aluminium, les écarts normaux ont été calculés au bloc 1 (77,2 %), bloc 2 (2,6 %), bloc 4 (53,6 %), bloc 5 (46,0 %), bloc 6 (20,7 %) et bloc 7 (79,5 %), tandis que l'écart inverse a été calculé uniquement au bloc 3 (8,2 %). Ce qui témoigne que l'aluminium a été plus dosé dans les sols ayant connu les remblais des scories et boues des fonderies de la mitraille que dans les sols non remblayés.

L'analyse des écarts des sommes de concentrations relatives en éléments traces métalliques dans chaque bloc indique l'existence d'un seul écart inverse de près de 3,0 % calculé au bloc 3, tandis que la majorité de blocs présente des écarts normaux assez considérables équivalents à : - bloc 1 = 81,5 % - bloc 2 = 7,0% - bloc 4 = 52,6 % - bloc 5 = 41,1 % - bloc 6 = 23,1 % - bloc 7 = 73,7 %

De bout à bout l'analyse des résultats de cette étude prouve que le contact des remblais des scories et boues des fonderies avec les sols y laisse des emprunts non négligeables qui sont des éléments minéraux les constituant. La moyenne des sommes des écarts normaux étant de 47 %, les écarts normaux des sommes minima et maxima se situant dans l'intervalle de $7 \% \geq X \leq 82 \%$, mais également une faible somme d'écarts inverses de 3 % calculé uniquement au bloc 3 atteste cela. Ce qui enfonce l'allégation de la contamination des sols par le contact direct avec les scories et boues des fonderies. La présence des quantités relatives des ETM dosés dans les sols n'ayant pas été remblayés ne sont pas à négliger.

En effet, plusieurs éléments traces métalliques se trouvent naturellement dans les sols. Seules des analyses appropriées des sols peuvent aider de révéler leur présence et mesurer leurs concentrations. Lorsque les éléments traces métalliques se trouvent en quantité trop importante dans un espace écosystémique, ils peuvent devenir dangereux ; dans le sol, ils représentent une double menace¹³. En effet, les sols sont susceptibles de transférer une certaine fraction de leurs constituants (naturels ou anthropiques) soit vers les plantes (phytodisponibilité), soit vers les eaux superficielles ou profondes (mobilité), soit par absorption directe de terre (géophagie) ou de poussières¹⁴.

L'origine de métaux lourds dans l'environnement peut être de deux sources : naturelle (fond géochimique et anomalies géochimiques) et anthropique¹⁵. En général, pour savoir l'origine naturelle des ETM dans un sol quelconque, il faut disposer d'un référentiel local bien fouillé et assez costaud. Pour ce faire, il faut fournir des mesures assez nombreuses faites sur les horizons de surface de sols concernés, correspondant donc à des teneurs habituelles (TH). Ce qui permettra de stratifier ces données selon de petits territoires, ou bien par familles pédogéologiques¹⁶.

¹³ <https://www.envirougeance.com/fr/blogue/impact-sols-contamines-metaux-lourd> (consulté le 21 septembre 2022)

¹⁴ C57-Baize-12-05-09. in [dd archives-ouvertes.fr](http://dd.archives-ouvertes.fr). (Consulté le 21 septembre 2022).

¹⁵ V. Laperche et all., *Guide méthodologique de l'arsenic, appliqué à la gestion des sites et sols pollués*. BRGM/RP-52066-FR, 2003, 90 p.

¹⁶ D. Baize, *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*, Références et stratégies d'interprétation, INRA Éditions, Paris, 1997, 410 p.

Le terme contamination, qualifie un apport issu de l'extérieur du site qui a pour conséquence une élévation de la teneur originelle des sols¹⁷. La contamination des écosystèmes peut être de deux natures : (i) une contamination diffuse d'origine lointaine qui résulte des apports atmosphériques susceptibles d'affecter tous les secteurs du zonage concernée ou même des milieux lointains. Elle est due aux retombées des poussières ou d'aérosols transportés à longue distance. Sa caractéristique est d'origine non ou mal identifiable des contaminants transportés (rejets fins industriels, poussières volcaniques, éoliennes)¹⁸. C'est de la sorte que l'on peut apprécier les concentrations assez importantes des ETM dosées dans les sols qui n'ont pas reçu des remblais et dont les écarts ont rivalisés avec les doses mesurées dans les sols remblayés. Les sols remblayés auraient reçu sans nulle doute une certaine dose des polluants atmosphériques justifiée par les différences des écarts entre ces deux types de substrats ; et (ii) une contamination ponctuelle résultant de la désintégration et la fragmentation des dépôts des particules solides ou éjection des liquides d'origine connue qui contamine des superficies bien spécifiées mais dont les polluants peuvent se reprendre verticalement et/ou horizontalement. Ce qui justifie les écarts de concentration en ETM plus ou moins élevés dans les échantillons des sols remblayés par les scories et boues des fonderies qui auraient subi les deux types de contamination.

Afin d'appréhender comment les concentrations relatives des éléments traces sont différentes d'un bloc à un autre, ou d'un même élément chimique dans des blocs différents, il y a lieu de comprendre certains phénomènes favorisés de l'adhésion des polluants dans un solide notamment :

(i) le type de substrat : les métaux se répartissent dans les sols sous des formes variées. On les trouve sous forme échangeable dans les argiles et la matière organique qui leur permet d'être absorbés par les plantes, sous forme de complexes ou associés à des molécules organiques. Ils peuvent être inclus dans des phases cristallines ou directement adsorbés sur des particules d'oxydes ou d'hydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse et peuvent enfin, être retenus dans les restes d'un organisme vivant qui les contenait¹⁹. Les sols de notre zone d'étude s'individualisent par des teneurs très élevées en SiO₂

¹⁷ P.H. Bourrellet et al., Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion, édition Lavoisier, Paris, CR. Acc Sci, 1998, p 42.

¹⁸ É. Gérard, Caractérisation du cadmium phytodisponible des sols par méthodes isotopiques. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, Français. ffNNT : 2000INPL092Nff. fftel-01749934f, 2000.

¹⁹ A.T. De Matos et al., Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. Environ. Poll., 111, 2001, pp. 429-435.

dont la moyenne est de 92 %²⁰. En général, les sols sablonneux contiennent peu de phyllosilicates et sont acides. Ils possèdent donc une faible capacité d'échange cationique (CEC) et par conséquent, une faible capacité de rétention des métaux lourds cationiques²¹;

(ii) les mécanismes physico-chimiques responsables de la rétention des métaux lourds dans les solides tels que le pH et le Eh, etc. La forme des métaux dans les sols dépend de manière dynamique de leur composition minéralogique, des conditions de salinité, de pH, du potentiel redox, de la granulométrie du sol, de sa teneur en eau, de la présence des ligands en solution et des micro-organismes^{22,23} et ²⁴. Tous ces facteurs influencent la solubilisation des métaux ou au contraire, leur précipitation ou leur adsorption²⁵ et ²⁶.

(iii) les principales interactions qui se produisent entre un atome ou une molécule et un solide à l'interface solide/liquide telle que repris dans la figure ci-après :

²⁰ J. Kakundika et al., "Chemical characterization of slag and sludge from foundries that recycle scrap metal in Kinshasa-DRC: Relative quality and quantity of pollutants from the substratum backfilled with these materials," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 4, 2021, pp. 637-649.

²¹ A. Kabata-Pendias, *Trace elements in soils and plants*, Third Edition, NY: CRC, Raton, Florida, 2001, p 155-178.

²² T. Deschamps et al., in <https://doi.org/10.4000/vertigo.2171>.

²³ J. Lions, *Étude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt: expérimentations, études in situ et modélisation*, Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. France, 2004, 248p.

²⁴ C. Blanchard, *Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués*, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, France, 2000, 301p.

²⁵ V. Laperche, et al., *Guide méthodologique du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués*, BRGM/RP-52881-FR, Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 2003-POLA06, 2004.

²⁶ Pansu M. et Gautheyrou J., *L'analyse du sol Minéralogique, organique et minérale*, édition Springer, 2003, 998 p.

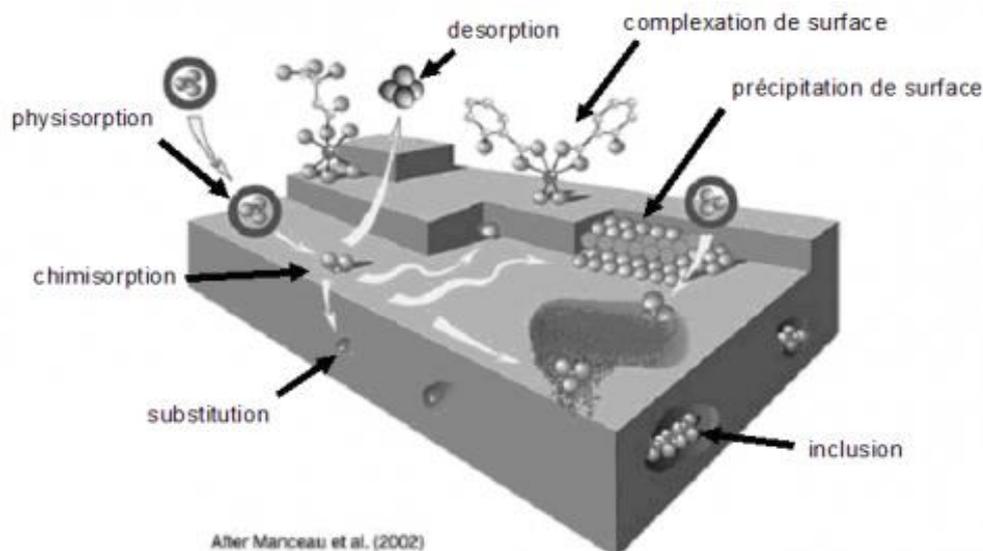


Figure 2. Principales interactions entre un atome ou une molécule et un solide à l'interface solide/liquide²⁷

Cette figure illustre les principales interactions entre un atome (ou une molécule) et un solide avec l'eau comme facilitatrice réactionnelle. Notre zone d'étude est très humide (l'une des causes du recours massif aux rebuts des fonderies) et favorise donc pareilles réactions, sans ignorer les tombées des pluies torrentielles caractéristiques propres du climat du milieu d'étude.

²⁷ A. Manceau, et al., "Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. In Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science". Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America, 49, 2002, 341-428.

CONCLUSION

Les éléments traces métalliques sont présents dans les sols de façon naturelle et artificielle. A proximité d'exploitations minières ou d'usines métallurgiques, il est fréquent d'observer dans ces sols des teneurs assez élevées des éléments en trace métallique.

Au cours de cette étude, nous nous sommes appliqués à examiner la contamination ponctuelle des sols par les scories et boues des fonderies qui recyclent la mitraille. Les échantillons remués ont été prélevés dans 30 sites sur lesquels ces déchets ont été épandus tandis qu'un échantillon des sols sans remblais des scories et boues des fonderies était prélevé dans chacun de sept blocs composant la zone d'étude. Les considérations ont été fondées sur l'analyse comparative entre les concentrations relatives des éléments traces métalliques contenus dans les sols remblayés par les scories et boues des fonderies, d'une part, et les sols non remblayés par ces déchets, d'autre part.

Au bout d'analyses, il en est ressorti que les écarts de concentration en éléments traces métalliques sont plus élevés dans les sols aux remblais des scories et boues des fonderies que dans les sols indemnes de ces remblais, affirmant par conséquent l'hypothèse de la contamination des sols par les scories et boues des fonderies.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Baize D., *Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France)*, Références et stratégies d'interprétation, INRA Éditions, Paris, 1997, 410 p.
2. Benahmed Mohamed, *Effet des précipitations sur la distribution du Zn et du Pb issus de retombées atmosphériques dans le sol: Cas de la fonderie de Tiaret (ALFET)*, thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes, République Algérienne Démocratique et Populaire, 2017.
3. Blanchard, C., *Caractérisation de la mobilisation potentielle des polluants inorganiques dans les sols pollués*, Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon. France, 2000, 301p.
4. Bourrelrier, P.H. and Berthelin, J., *Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion*, édition Lavoisier, Paris, CR. Acc Sci., 1998.
5. Chassin P., Baize D., Cambier P., Sterckeman T., *Les éléments traces métalliques et la qualité des sols*, Impact à moyen et à long terme : Etude et Gestion des Sols, 1996, 3. 297-306.
6. Commission Européenne, « Gestion des résidus et stériles des activités minières », Document de référence sur les meilleures techniques disponibles, 2009, in https://aida.ineris.fr/sites/default/files/directive_ied/mmr_adopted_0109_VF_0.pdf, consulté le 03/01/2021.
7. De Matos A.T., Fontes M.P.F., da Costa L.M., Martinez M.A., "Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils". *Environ. Poll.*, 2001, 111, 429-435.
8. Deschamps Thomas, Mostafa Benzaazoua, Bruno Bussière, Tikou Beleme Mamert Mbonimpa, in <https://doi.org/10.4000/vertigo.2171>.
9. Émilie Gérard, *Caractérisation du cadmium phytodisponible des sols par méthodes isotopiques*. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Lorraine, Français, 2000, ffNNT : 2000INPL092Nff. fftel-01749934f.
10. <http://www.fao.org/3/x2570f/X2570F04.htm>.
11. <http://www.fao.org/3/x2570f/X2570F04.htm>.
12. <https://www.envirourgence.com/fr/blogue/impact-sols-contamines-metaux-lourd>
13. Kabata-Pendias, A., *Trace elements in soils and plants*, Third Edition, NY: CRC, Raton, Florida, 2001.
14. Kakundika Joseph M., Dieudonné E. Musibono, Virima Mudogo, and Ndongala Lufimpadio, 2021, "Chemical characterization of slag and sludge from foundries that recycle scrap metal in Kinshasa-DRC: Relative quality and quantity of pollutants from the substratum backfilled with these materials," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 4, 2021, pp. 637-649.

15. Kakundika Joseph M., Dieudonné E. Musibono, Virima Mudogo, and Ndongala Lufimpadio, "Identification, geolocation and characterization of slag and sludge discharge sites from foundries (SBM) which recycle scrap metal in Kinshasa : DRC," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 3, 2021, pp. 596-617.
16. Kakundika Joseph M., Dieudonné E. Musibono, Virima Mudogo, and Ndongala Lufimpadio, « Evaluation des métaux lourds (ETM) dans les scories et boues des fonderies de la mitraille : analyse des concentrations relatives transférables vers les écosystèmes », sous presse au journal *Agrobiologia* depuis le 26/08/2022.
17. Kakundika Joseph M., Dieudonné E. Musibono, Virima Mudogo, and Ndongala Lufimpadio, "Study of the Bioaccumulation of mineral components in soils backfilled with slag and sludge from scrap metal, scrap recycling foundries in Kinshasa (DRC)," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 33, no. 4, 2021, pp. 650-665.
18. Laperche V., Bodénan F., Dictor M.C. et Baranger Ph., « Guide méthodologique de l'arsenic, appliqué à la gestion des sites et sols pollués », BRGM/RP-52066-FR, 2003, 90 p., 5 fig., 10 tabl., 3 ann.
19. Laperche V., Dictor M. C., Clozel-Leloup B. and Baranger Ph., « Guide méthodologique du plomb, appliqué à la gestion des sites et sols pollués », BRGM/RP-52881-FR, Étude réalisée dans le cadre des actions de Service public du BRGM 2003-POLA06, 2004.
20. Lions, J., *Étude hydrogéochimique de la mobilité de polluants inorganiques dans des sédiments de curage mis en dépôt: expérimentations, études in situ et modélisation*, Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure des Mines de Paris. France, 2004, 248p.
21. Manceau, A., Marcus, M.A., Tamura, N., "Quantitative speciation of heavy metals in soils and sediments by synchrotron X-ray techniques. In Applications of Synchrotron Radiation in Low-Temperature Geochemistry and Environmental Science". Reviews in Mineralogy and Geochemistry, Mineralogical Society of America, 49, 2002, 341-428.
22. Pansu M. et Gautheyrou J., *L'analyse du sol Minéralogique, organique et minérale*, édition Springer, 2003, 998 p.
23. Sterckeman, T., Douay F., Baize D., Fourrier H., Proix N., et al. « Trace elements in soils developed in sedimentary materials from Northern France". *Geoderma*; 136(3-4): 2006, 912-929.
24. Tremel-Schaub Anne et Isabelle Feix, « Contamination des sols : transfert des sols vers les plantes », EDP Sciences/ADEME, ISBN : 2-86883-793-X, 2005, 422p.