

Etude de la Bioaccumulation des composants minéraux dans les sols remblayés par les scories et boues des fonderies de recyclage de la mitraille, ferraille à Kinshasa (RDC)

[Study of the Bioaccumulation of mineral components in soils backfilled with slag and sludge from scrap metal, scrap recycling foundries in Kinshasa (DRC)]

Joseph M. Kakundika¹, Dieudonné E. Musibono¹, Virima Mudogo², and Ndongala Lufimpadio³

¹Département de l'environnement, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, RD Congo

²Département de Chimie, Faculté des Sciences, Université de Kinshasa, RD Congo

³Département de Chimie-physique, Faculté des Sciences, Université Pédagogique Nationale, RD Congo

Copyright © 2021 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Because of their multi-element chemical composition and especially because of the presence of trace metal elements (TME) at relatively high levels, sludge and slag from foundries are classified as hazardous waste. For this reason, they must undergo all the rigorous management imposed on such types of waste. However, those in charge of the Kinshasa scrap foundries remain deaf to this.

Indeed, these scraps from the scrap metal foundries of Kinshasa are spread in plots, streets and avenues of the city of Kinshasa to be used as backfill without prior treatment to the detriment of a suffering population subject to serious environmental problems (potholes, erosion heads, floods, etc.).

After chemical analysis of these wastes, it turns out that they contain Na₂O, CaO, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, La₂O₃, Eu₂O₃, Yb₂O₃, OsO₄, Br, SiO₂, K₂O, TiO₂, V₂O₅, ZnO, Ti₂O₃, Au, Sc₂O₃, SrO, ZrO₂, Nb₂O₅, RuO₂, BaO, Re₂O₇, Al₂O₃, MgO, Rb₂O, HgO [1], while the chemical analysis of the soils backfilled by these slags and sludges of the foundries reveals that they contain all these components except Na₂O, Br, Ti₂O₃, Nb₂O₅, BaO and Rb₂O. Also, some typical components such as As₂O₃, As₂O₄, PbO and P₂O₅ which were not measured in the slag and sludge of the smelters were measured in the soils backfilled by the said slag and sludge.

Furthermore, the comparison of the chemical composition of the soils backfilled by SBFs with that of the soils not affected by the backfill shows that P₂O₅, Al₂O₃, MgO, OsO₄, La₂O₃, Yb₂O₃ and SO₃, components of the backfilled soils, were not measured in the non-filled soils (blank sample).

From a semi-quantitative point of view, it has just been demonstrated that almost all components of the soils backfilled with slag and sludge from smelters have relatively higher concentrations than their counterparts in the unfilled soils, with the exception of SiO₂, V₂O₅ and Sc₂O₃.

KEYWORDS: Bioavailable, bioaccumulated, slag, sludge, smelters, fills, components.

RESUME: A cause de leurs compositions chimiques multiéléments et surtout à cause de la présence des éléments en traces métalliques (ETM) à des teneurs relativement élevées, les boues et scories des fonderies sont classées dans la catégorie de déchets dangereux. Pour ce, elles doivent subir toute la rigueur de gestion imposée à pareils types de déchets. Pourtant, les tenants des fonderies de la mitraille de Kinshasa demeurent sourds quant à ce.

En effet, ces rebuts des fonderies de la mitraille kinoise sont épanchés dans des parcelles, rues et avenues de la ville de Kinshasa pour servir comme remblais sans traitement préalable au détriment d'une population en souffrance soumise à des sérieux problèmes environnementaux (nids-de-poule, têtes d'érosion, inondations, etc.).

Après analyse chimique de ces rebuts, il s'avère qu'ils contiennent le Na_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Yb_2O_3 , OsO_4 , Br , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , Ti_2O_3 , Au , Sc_2O_3 , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , Al_2O_3 , MgO , Rb_2O , HgO [1], tandis que l'analyse chimique des sols remblayés par ces scories et boues des fonderies révèle qu'ils renferment tous ces composants exceptés le Na_2O , Br , Ti_2O_3 , Nb_2O_5 , BaO et Rb_2O . Aussi, certains composants typiques tels que AsO_3 , As_2O_4 , PbO et P_2O_5 qui n'ont pas été dosés dans les scories et boues des fonderies l'ont été dans les sols remblayés par lesdites scories et boues.

Par ailleurs, la comparaison de la composition chimique des sols remblayés par les SBF à celle des sols non touchés par les remblais atteste que P_2O_5 , Al_2O_3 , MgO , OsO_4 , La_2O_3 , Yb_2O_3 et SO_3 , composants des sols remblayés n'ont pas été dosés dans les sols non remblayés (échantillon blanc).

Sur le plan semi quantitatif, il vient d'être démontré que la quasi majorité de composants des sols remblayés par les scories et boues des fonderies ont des concentrations relativement élevées que leurs homologues des sols non remblayés, à l'exception des SiO_2 , V_2O_5 et Sc_2O_3 .

MOTS-CLEFS: Biodisponibles, bioaccumulés, scories, boues, fonderies, remblais, composants.

1 INTRODUCTION

Nous avons démontré dans une étude précédente [1] que les scories et boues des fonderies qui recyclent la mitraille sont essentiellement composées de Na_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Yb_2O_3 , OsO_4 , Br , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , Ti_2O_3 , Au , Sc_2O_3 , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , Al_2O_3 , MgO , Rb_2O , HgO .

Dans une autre étude [2], nous avons décrit la gestion non orthodoxe de ces rebuts des fonderies et avons projeté non seulement d'examiner leurs compositions chimiques mais également de vérifier les possibilités de contamination des écosystèmes (sols) sur lesquels elles sont déposées. C'est ce qui constitue l'objet de cet article.

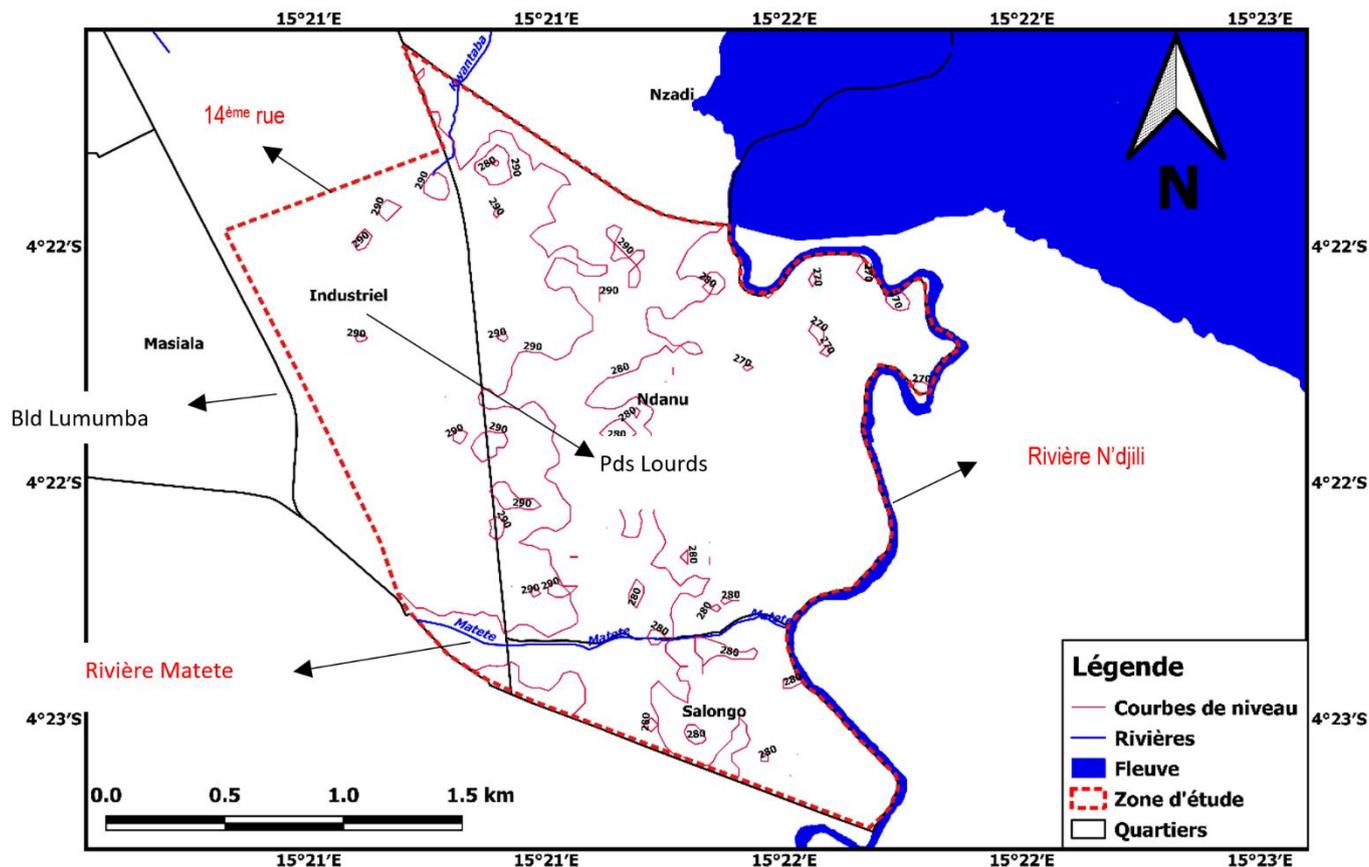
Pour sa réalisation, nous avons examiné la composition chimique des sols remblayés par les scories et boues des fonderies de la mitraille. Les résultats issus de cette analyse (composition chimique des sols remblayés) ont été comparés à ceux de la composition chimique du mélange scories-boues des fonderies de la mitraille. D'autre part, un parallélisme a été établi entre la composition chimique des sols remblayés et ceux n'ayant pas été en contact avec les scories et boues des fonderies (échantillons blancs).

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

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 ($\text{S}04^{\circ}23'224''$ et $\text{E}015^{\circ}21'975''$) → le pont Matete ($\text{S}04^{\circ}22'917''$ et $\text{E}015^{\circ}21'163''$) → la 14^{ème} rue en passant par l'Echangeur de Limete ($\text{S}04^{\circ}21'864''$ et $\text{E}015^{\circ}20'508''$) → la 14^{ème} rue sur l'avenue du Poids Lourd ($\text{S}04^{\circ}21'678''$ et $\text{E}015^{\circ}20'994''$) → le point de croisement du chemin de fer et la route du Poids-Lourd à côté de Kingabwa UZAM ($\text{S}04^{\circ}21'450''$ et $\text{E}015^{\circ}20'920''$) → le pont rail sur la rivière N'djili ($\text{S}04^{\circ}21'852''$ et $\text{E}015^{\circ}20'646''$) → l'allongement de la rivière N'djili jusqu'au point de départ (Pont N'djili) pour boucler la boucle.

Elle s'étend sur une superficie de 523272 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 kinoises qui ont pour matières premières la mitraille (déchets métalliques) et dont elles se servent constamment comme lieu de rejet de leurs rebuts (observation personnelle).



Source: Roland Kakule et Joseph Kakundika, Image Ikonos, Qgis 3.14, Projection WGS84, Crgm 2020

Fig. 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 [3].

Dans notre précédente étude, 76 sites remblayés par les boues et scories de la mitraille avaient été répertoriés [2]. 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 fixé.

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 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 de trois simples tel que:

Si 100% = X'

Alors:

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

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).

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.

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 sites 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 s'agit 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	SBia	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 épanchées 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 1^{er} site, un saut de 2 unités sera observé tandis que, à partir du 4^{ème} 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 est strictement observé. D'où les sites sélectionné pour l'échantillonnage S51, S54 et S57.

B6: $Q = 4/1 = 4$

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.

B7: $Q = 14/6 = 2R2$

Un saut de 2 unités sera observé pour les 4 premiers sites identifiés tandis que ce dernier ne sera que d'1 unité pour les deux derniers. Ceci étant, les sites sélectionnés pour ces derniers blocs 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 portant à intérêt. Un échantillon doit être le plus représentatif possible pour donner l'image du site.

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, 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 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 de tarières de type Edelman et de tarières à tige pleine [4].

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 polluants. Les résultats d'une étude réalisée sur des profils des sols au voisinage de deux fonderies de la région Nord-Pas-de-Calais [5] montrent que le plomb est essentiellement concentré dans les 30 premiers centimètres de ces profils [4].

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 en vue de faciliter la pénétration de la tarière. La préférence était donnée aux échantillons latéraux qu'à ceux directs. 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 numéroté 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 prélèvements des sols doivent être transportés au laboratoire aussi vite que possible, une fois terminé le travail de terrain. Néanmoins, la durée de conservation des échantillons de sol est limitée en raison des phénomènes de volatilisation et de biodégradation. Un échantillon doit être analysé au laboratoire avant expiration du délai de conservation. Selon [4], la période de conservation des échantillons des sols pour analyses de Hg est de 15 jours, Cr (VI) 48 heures tandis que pour d'autres métaux elle est illimitée. 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).

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 nécessaire. 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 $75\ \mu\text{m}$ 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 DES ÉCHANTILLONS

Les analyses chimiques des échantillons ont été effectuées par spectrophotométrie de fluorescence X (XRF). Le spectrophotomètre utilisé est de marque MUNIPAL 4.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats d'analyses des sols remblayés par les scories et boues des fonderies de la mitraille de Kinshasa sont rendus dans le tableau 4. Il s'agit de moyennes relatives calculées sur base du nombre variant d'échantillons différents dans chaque bloc.

Tableau 4. Composition chimique des sols remblayés par les boues et scories de la mitraille (%)

Compto	Bloc 1		Bloc 2		Bloc 3		Bloc 4		Bloc 5		Bloc 6		Bloc 7	
	Conc. moy	Blanc	Conc. moy	Blanc	Conc. moy	Blanc	Conc. moy	Blanc	Conc. moy	Blanc	Conc. moy	Blanc	Conc. moy	Blanc
P ₂ O ₅					1,4									
Al ₂ O ₃							2,5714							
MgO									0,66667					
SiO ₂	91,85	96,7	96,6	96,8	91,85	96,7	84,757	91,6	93,7667	92,4	95,9	96,8	91,8667	96,2
K ₂ O	1,4		0,094	0,1	0,53	0,12	0,3781	0,49			0,09	0,23	0,32167	0,042
CaO	0,53	0,12	0,36	0,37	2,29	0,429	3,0206	2,23	0,571	1,85	0,41	0,3	1,49117	0,2
TiO ₂	2,29	0,429	0,394	0,409	0,275	0,44	0,4914	0,29	0,3	0,28	0,3	0,29	0,29883	
V ₂ O ₅	0,275	0,44	0,01	0,01	0,01	0,01	0,0193	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,011	
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,015	0,013	0,03	0,047	0,0723	0,036	0,02233	0,049	0,015	0,016	0,0355	0,016
MnO	0,03	0,047	0,027	0,024	0,116		0,3187	0,23	0,07167	0,24	0,037	0,048	0,139	0,043
Fe ₂ O ₃	0,116		2,37	1,85	3,085	1,8	7,3943	4,53	3,98333	4,13	2,82	1,91	5,20333	3,17
NiO	3,085	1,8	0,0087		0,00755	0,007	0,0128				0,006	0,0072	0,01205	0,007
CuO	0,00755	0,0069	0,048	0,053	0,051	0,049	0,0753	0,055	0,04667	0,054	0,047	0,046	0,05733	0,047
ZnO	0,051	0,049	0,006	0,005	0,0635	0,006	0,3459	0,047	0,28233	0,191	0,01		0,18033	0,018
As ₂ O ₃	0,0635	0,006												
As ₂ O ₃									0,00033	0,0001	0,001		0,00017	
ZrO ₂	0,02		0,074	0,075	0,0475	0,071	0,0531	0,046	0,08153	0,042	0,0952	0,067	0,04683	
RuO ₂	0,0475	0,071			0,24	0,25	0,278	0,26		0,17	0,22	0,23	0,21	
Re ₂ O ₇	0,24	0,25	0,008	0,01	0,01		0,0064	0,01	0,00667	0,00583	0,01		0,01	
PbO	0,061				0,034		0,0527		0,03733	0,03983	0,031			
Sc ₂ O ₃	0,000012									0,0001		0,29	0,004	
OsO ₄	0,034				0,01		0,001							
Au	0,26		0,018	0,019	0,02		0,001	0,019	0,01	0,00283	0,019		0,017	
La ₂ O ₃	0,01													
SrO	0,01				0,02		0,0176	0,019					0,01517	
Eu ₂ O ₃					0,061		0,1169	0,1					0,05417	
Yb ₂ O ₃					0,000012		0,007				0,009		0,00733	
SO ₃					0,26								0,00667	

3.1 ANALYSE GLOBALE DES DONNÉES DU TABLEAU 4

Sur le plan qualitatif le tableau renseigne que les sols remblayés par les SBF sont essentiellement composés de 27 oxydes et de l'or (Au) comme nous pouvons le lire dans la première colonne du tableau 4.

Sur le plan quantitatif, le tableau indique que le SiO₂ est le composant prépondérant des sols remblayés par les boues et scories de la mitraille avec une concentration massique à deux chiffres (92,4%), Fe₂O₃ et CaO possèdent des concentrations massiques relatives à un chiffre (3,6% et 1,24%), TiO₂, NiO, K₂O, Al₂O₃, P₂O₅, RuO₂, ZnO et MnO ont des concentrations de l'ordre du dixième dans les limites de [0,62% - 0,11%], tandis que les concentrations relatives de MgO, ZrO₂, Au, V₂O₅, CuO, Re₂O₇, SO₃, Eu₂O₃, et Cr₂O₃ sont rangées dans l'ordre de centième dans les limites du plus grand au plus petit de [0,095 % et 0,03 %], SrO, AsO₃, OsO₄, Yb₂O₃ et La₂O₃ disposent de concentration rangées dans l'ordre de millième dont la plus grande est 0,009 % et la plus petite 0,001 % et enfin, As₂O₃ et Sc₂O₃ dont les concentrations sont infiniment petites dans l'ordre de dix-millième dans les limites de [0,0002857 % - 0,000114286 %].

Par ailleurs, SiO₂, Fe₂O₃, CaO, TiO₂, K₂O, ZnO, MnO, CuO, ZrO₂, PbO, V₂O₅ et Au, sont des composants dosés littéralement dans tous les sept blocs, RuO₂, PbO et NiO ont été dosés dans six blocs, SrO et Yb₂O₃ dans quatre blocs, Eu₂O₃, Sc₂O₃, OsO₄ et AsO₃ dans 3 blocs, SO₃ dans deux blocs tandis que Al₂O₃, MgO, P₂O₅, As₂O₃, La₂O₃ ont été dosés dans un seul bloc.

Aussi faudra-t-il noter qu'entre les différents blocs, les sols ne possèdent pas la même composition chimique. En effet, l'on peut observer dans le tableau ci-dessus que le bloc 7 comprend quatorze composants, les blocs 1 et 3 en disposent treize, tandis que les blocs 4, 6 et 5 en comprennent respectivement douze, onze et neuf et le bloc 2 qui vient en dernière position en a sept.

En approfondissant l'analyse du tableau 4, nous réalisons le parallélisme entre la composition moyenne générale des sols remblayés par les scories et boues des fonderies de la mitraille et les sols qui n'ont pas encore subi le dépôt de ces matériaux (échantillon blanc). Ceci nous amène à constater que seules les concentrations de SiO_2 , V_2O_5 et Sc_2O_3 accusent des différences négatives. Il s'agit là des composants dont les concentrations sont relativement élevées dans les échantillons blancs qu'elles ne le sont dans les échantillons des sols remblayés. Les sols de Kinshasa sont majoritairement composés de la silice (SiO_2); V_2O_5 et Sc_2O_3 peuvent être le résultat des retombés atmosphériques. De même, P_2O_5 , Al_2O_3 , MgO , OsO_4 , La_2O_3 , Yb_2O_3 et SO_3 n'ont pas été dosés dans les sols non touchés par les remblais. En fin, sur le plan quantitatif, le reste de composants dosés aussi bien dans les sols remblayés que ceux non remblayés ont des concentrations relativement élevées dans les premiers que dans les seconds comme nous pouvons le lire dans la figure 1.

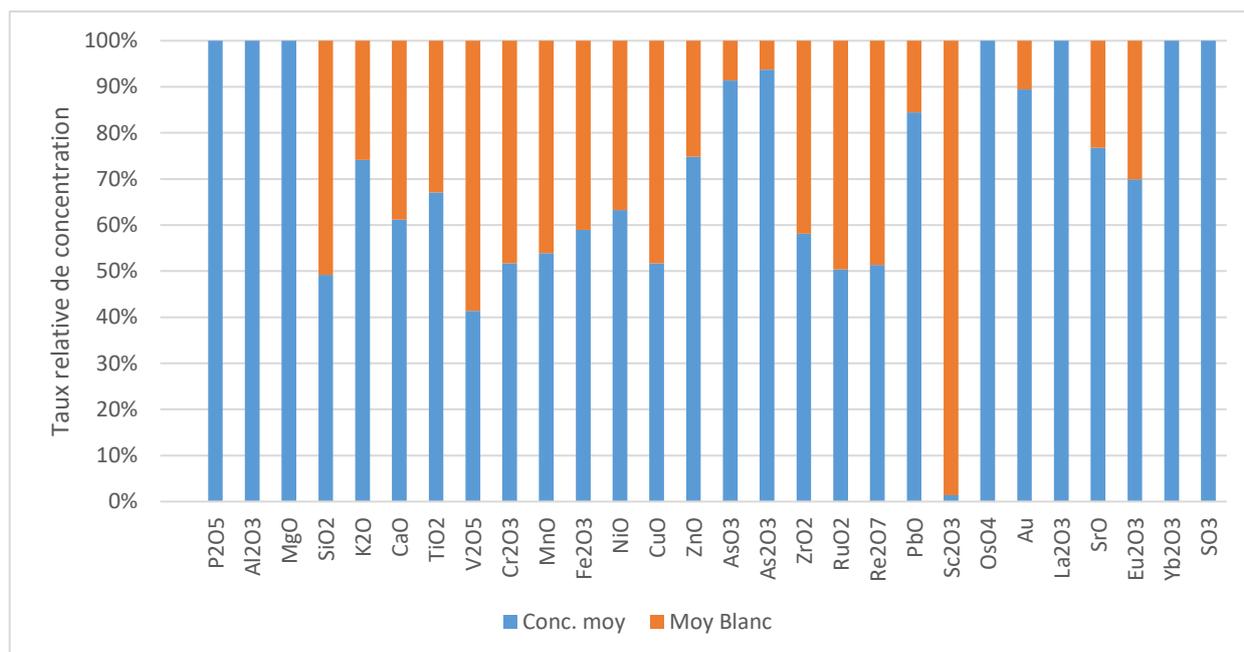


Fig. 2. Rapport entre concentration des sols remblayés par les boues et scories et sols non remblayés

Cette figure montre clairement la contribution de chacune de deux parties lors de la mise ensemble des leurs composants respectifs. Il se dégage clairement que l'apport des sols remblayés par les scories et boues des fonderies de la mitraille (Conc. moy) est de loin supérieur à celui des sols qui n'ont pas eu un contact direct avec les scories et boues des fonderies (Moy Blanc). Ce qui met en évidence la contamination par des éléments minéraux des sols remblayés par le mélange scories-boues des fonderies de la mitraille.

COMMENTAIRE 1

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 contenait [6].

La forme des métaux dans les sols dépend de manière dynamique de leur composition minéralogique, des conditions de salinité, de pH, d'oxydo-réduction, de la granulométrie du sol, de sa teneur en eau, de la présence de ligands en solution et de micro-organismes. Tous ces facteurs influencent la solubilisation des métaux ou au contraire, leur précipitation ou leur adsorption [7] et [8].

Les sols de notre zone d'étude s'individualisent par les teneurs très élevées en SiO_2 dont la moyenne est de 92%. Il existe 3 isotopes stables de silice, possédant les numéros atomiques 28, 29 et 30 et 5 isotopes radioactifs de numéros atomiques 25, 26, 27, 31 et 32 [9]. 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 cationiques [10].

Lors d'une étude de la composition chimique des remblais des scories de la friche industrielle de Mortagne du Nord, [11] constate que le sol restait majoritairement composé d'oxyde de silicium. D'après [9], après l'oxygène, le silicium est l'élément le plus répandu sur Terre (26,7 %). Mais, dans l'Univers également, la présence du silicium est en moyenne plus fréquente que celle des autres éléments. Les métaux dont la décompte y est plus significative ont des teneurs relativement faibles et variant d'un bloc à un autre.

L'oxyde de fer est le métal le plus abondant dans les sols remblayés par les scories et boues des fonderies avec une concentration massique relative d'au moins 4%. En suivant la classification des roches d'après leurs compositions en fer, nous sommes en face d'une roche sédimentaire avec comme sous composantes les grès, schistes, calcaires et marne dont les concentrations massiques en Fe_2O_3 varient de 0,5 à 8 % [12].

L'oxyde de calcium est le troisième composant du sol de notre zone d'étude en termes de concentration massique dont la teneur est évaluée à plus ou moins 1,24% de la masse totale du sol. L'oxyde de calcium n'est pas en soi un composant typique des sols; il provient de la réaction entre les carbonates brûlés à forte température suivant la réaction ci-après [13]:



Nous estimons que nos échantillons ayant été soumis au séchage strict au four à 140° C, le carbonate y contenu est passé à la forme de la chaux vive (CaO).

Les carbonates du sol sont généralement sous forme de calcite (carbonate de calcium) et de dolomite (carbonate double de calcium et magnésium). Ils sont également présents dans les roches en tant que débris de roches calcaires. S'ils sont normalement stables, ils peuvent être dissous sous certains climats, la calcite précipite alors dans l'espace entre les pores. Ils sont issus de l'altération et/ou de la précipitation des roches carbonatées. Lors de l'analyse chimique, on distingue les teneurs en calcaire total de celles en calcaire actif (partie qui peut se solubiliser rapidement en bicarbonate). A l'échelle du territoire, on trouve les sols carbonatés au-dessus des roches calcaires [13].

Dans la nature, la majorité des éléments sont des éléments traces car on ne dénombre que 12 éléments majeurs représentant plus de 99 % de la composition chimique générale de la lithosphère à savoir: l'oxygène (46,6%), la silice (27,7%), l'aluminium (8,1%), le fer (5%), le calcium (3,63%), le sodium (2,8%), le potassium (2,5%), le magnésium (2%), le titane (0,44%), l'hydrogène (0,14%), le phosphore (0,11%) et le manganèse (0,1%) [13]. Ce qui signifie que, sauf en cas de pollution très importante, les métaux toxiques sont aussi présents à faible ou très faible concentration dans le sol.

D'emblée, en considérant les différentes péripiétés ci-haut examinées, en estimant que l'oxygène et l'hydrogène seraient chassés des échantillons lors du processus de leur traitement physique et/ou chimique, que le sodium n'a pas été détecté (pour motif que «dans le sol cet élément ne se trouve que dans l'état lié principalement sous forme de sels et qu'il est très facilement lessivé vers les couches profondes du sol par l'eau de pluie mais aussi que l'ion sodium se fixe moins bien à l'argile que l'ion potassium» [14], la concentration totale de neuf autres composants "majeurs" restants (Si, Al, Fe, Ca, K, Mg, Ti, Mn et P) contenues dans les sols remblayés est parallèlement évaluée en somme à 99,37%. Ce qui corrobore les résultats de [13] et atteste en conséquence que le plus grand nombre des composants de sols de notre zone d'étude ont des concentrations extrêmement petites (<<< 1) et sont donc classés dans la catégorie des éléments mineurs.

L'exploitation minière est l'une des plus importantes sources de métaux lourds dans l'environnement et en principe, un sol contient en moyenne 25 % d'air, 25 % d'eau, 45 % de composés minéraux et 5 % de composés organiques [15] et [16].

Quel lien y-a-il entre cette composition typique des sols et celle des scories et boues de la mitraille ?

3.2 CORRÉLATION ENTRE COMPOSITIONS CHIMIQUES DES BOUES ET SCORIES DE LA MITRAILLE ET DES SOLS

Cette section permet de répondre à la question ci-haut posée. Elle permet en effet, de vérifier si les composantes des boues et scories se retrouvent dans les sols et d'en évaluer leurs teneurs.

Vu les caractéristiques particulières de chaque bloc, nous faisons une comparaison composants des SBF/composants des sols bloc par bloc. Nous reprenons dans le tableau 5 les différentes compositions chimiques des SBF de la mitraille en essayant de les relier à celles des sols dans tous les blocs.

Tableau 5. Lien entre composition chimique des SBF et Sols/bloc

Composts SBF	Bloc 1	Bloc 2	Bloc 3	Bloc 4	Bloc 5	Bloc 6	Bloc 7
Na ₂ O							
CaO	*	*	*	*	*	*	*
Cr ₂ O ₃	*	*	*	*	*	*	*
MnO	*	*	*	*	*	*	*
Fe ₂ O ₃	*	*	*	*	*	*	*
NiO	*	*	*	*		*	*
CuO	*	*	*	*	*	*	*
La ₂ O ₃	*						
Eu ₂ O ₃			*	*			*
Yb ₂ O ₃			*	*		*	*
OsO ₄	*		*	*			
Br							
SiO ₂	*	*	*	*	*	*	*
K ₂ O	*	*	*	*	*	*	*
TiO ₂	*	*	*	*	*	*	*
V ₂ O ₅	*	*	*	*	*	*	*
ZnO	*	*	*	*	*	*	*
Ti ₂ O ₃							
Au	*	*	*	*	*	*	*
Sc ₂ O ₃	*					*	*
SrO	*		*	*			*
ZrO ₂	*	*	*	*	*	*	*
Nb ₂ O ₅							
RuO ₂	*	*	*	*		*	*
BaO							
Re ₂ O ₇	*	*	*	*	*	*	*
Al ₂ O ₃				*			
MgO					*		
Rb ₂ O							
HgO	*	*	*	*	*	*	*
	As ₂ O ₃				As ₂ O ₃	As ₂ O ₃	As ₂ O ₄
	PbO		PbO	PbO	PbO	PbO	PbO
		P ₂ O ₅					

De ce tableau nous dégagons les différents liens mathématiques ci-après:

1°. Les éléments ayant un lien commun entre les scories et boues de la mitraille et les sols:

- Bloc 1: SBF ∩ SB1 = {SiO₂, CaO, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, La₂O₃, OsO₄, K₂O, TiO₂, V₂O₅, ZnO, Sc₂O₃, SrO, ZrO₂, RuO₂, Re₂O₇, Au}: en première vue la présomption est que ces oxydes auraient été transmis aux sols par les SBF suite à leur contact.
- Bloc 2: SBF ∩ SB2 = {SiO₂, CaO, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, K₂O, TiO₂, V₂O₅, ZnO, ZrO₂, RuO₂, Re₂O₇, Au}: l'extension de cet ensemble détermine les composants dosés dans les SBF et le sol du bloc 2.
- Bloc 3: SBF ∩ SB3 = {SiO₂, CaO, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, OsO₄, K₂O, TiO₂, V₂O₅, ZnO, Eu₂O₃, Yb₂O₃, SrO, ZrO₂, RuO₂, Re₂O₇, Au}: la définition en extension de cet ensemble signifie simplement les éléments dosés aussi bien dans les sols du bloc 3 que dans les SBF.

- Bloc 4: $SBF \cap SB4 = \{Al_2O_3, SiO_2, CaO, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, NiO, CuO, OsO_4, K_2O, TiO_2, V_2O_5, ZnO, Eu_2O_3, Yb_2O_3, SrO, ZrO_2, RuO_2, Re_2O_7, Au\}$: cet ensemble est constitué des éléments qui entrent dans la composition des SBF et le sol du bloc 4. Il s'agit des oxydes dosés dans les scories et dans le sol dudit bloc.
- Bloc 5: $SBF \cap SB5 = \{MgO, SiO_2, CaO, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, CuO, K_2O, TiO_2, V_2O_5, ZnO, ZrO_2, Re_2O_7, Au\}$
- Bloc 6: $SBF \cap SB6 = \{SiO_2, K_2O, CaO, Sc_2O_3, TiO_2, V_2O_5, Cr_2O_3, MnO, CuO, Fe_2O_3, NiO, ZrO_2, RuO_2, ZnO, Yb_2O_3, Re_2O_7, Au\}$
- Bloc 7: $SBF \cap SB7 = \{SiO_2, K_2O, CaO, TiO_2, V_2O_5, Cr_2O_3, MnO, CuO, Fe_2O_3, NiO, ZnO, SrO, ZrO_2, Yb_2O_3, RuO_2, Eu_2O_3, Re_2O_7, Sc_2O_3, Au\}$

2°. Les composants des scories et boues de la mitraille non trouvés dans les sols:

- Bloc 1: $SBF \setminus SB1 = \{Na_2O, Eu_2O_3, Yb_2O_3, Br, Ti_2O_3, Nb_2O_5, BaO, Al_2O_3, MgO, Rb_2O, HgO\}$: il s'agit des oxydes contenus dans le mélange Scories-Boues mais non dosés dans le sol du bloc 1.
- Bloc 2: $SBF \setminus SB2 = \{Na_2O, Eu_2O_3, Yb_2O_3, Br, Ti_2O_3, Nb_2O_5, BaO, Al_2O_3, MgO, Rb_2O, HgO, La_2O_3, OsO_4, Sc_2O_3, SrO\}$: sont les éléments qui ont été dosés dans les SBF et qui ne l'ont pas été dans le sol du bloc 2.
- Bloc 3: $SBF \setminus SB3 = \{Na_2O, Nb_2O_5, BaO, Al_2O_3, HgO, La_2O_3, Ti_2O_3, Br, Sc_2O_3, MgO, Rb_2O\}$: est l'ensemble des composants des SBF qui n'ont pas pu être repérés dans les sols du bloc 3.
- Bloc 4: $SBF \setminus SB4 = \{Na_2O, Nb_2O_5, BaO, La_2O_3, Ti_2O_3, Br, Sc_2O_3, MgO, Rb_2O, HgO\}$;
- Bloc 5: $SBF \setminus SB5 = \{Na_2O, Nb_2O_5, NiO, Eu_2O_3, La_2O_3, Yb_2O_3, OsO_4, Br, HgO, Ti_2O_3, SrO, Sc_2O_3, Nb_2O_5, RuO_2, BaO, Al_2O_3\}$;
- Bloc 6: $SBF \setminus SB6 = \{Na_2O, La_2O_3, Eu_2O_3, Br, OsO_4, Ti_2O_3, SrO, ZrO, Nb_2O_5, BaO, Al_2O_3, MgO, Rb_2O, HgO\}$
- Bloc 7: $SBF \setminus SB7 = \{Na_2O, La_2O_3, OsO_4, BaO, Ti_2O_3, Nb_2O_3, Br, Al_2O_3, MgO, Rb_2O, HgO\}$

3°. Les composants dosés dans les sols et non contenus dans les scories et boues de la mitraille

- Bloc 1: $SB1 \setminus SBF = \{As_2O_3, PbO\}$: c'est l'ensemble composé par deux composants dosés dans le sol du bloc 1 qui n'ont pas été dosés dans les SBF de la mitraille.
- Bloc 2: $SB2 \setminus SBF = \{ \}$: est un ensemble vide, ce qui signifie que tous les composants de sol du bloc 2 sont des composants des SBF, en d'autres termes, la composition des sols remblayés du bloc 2 est incluse dans celle de remblais.
- Bloc 3: $SB3 \setminus SBF = \{P_2O_5, SO_3, PbO\}$: ensemble de composants dosés dans le sol du bloc 3 mais ne se retrouvant pas dans la composition typique des SBF.
- Bloc 4: $SB4 \setminus SBF = \{SO_3, PbO\}$: ensemble de composants dosés dans le sol du bloc 4 mais ne se retrouvant pas dans la composition typique des SBF.
- Bloc 5: $SB5 \setminus SBF = \{As_2O_3, PbO\}$: ensemble de composants dosés dans le sol du bloc 5 mais ne se retrouvant pas dans la composition typique des SBF.
- Bloc 6: $SB6 \setminus SBF = \{As_2O_3, PbO\}$: ensemble de composants dosés dans le sol du bloc 6 mais ne se retrouvant pas dans la composition typique des SBF.
- Bloc 7: $SB7 \setminus SBF = \{As_2O_3, SO_3, PbO\}$: ensemble de composants dosés dans le sol du bloc 7 mais ne se retrouvant pas dans la composition typique des SBF.

De la synthèse de ces différentes propriétés mathématiques, l'on peut retenir en définitif que l'analyse par XRF révèle les facteurs caractéristiques ci-après:

1°. De la composition chimique des scories et boues de la mitraille de Kinshasa [1]

- (i) non métaux: Br et Si;
- (ii) métaux simples: Na, Ca, Ti, Sr, Sc, Ba, Al, Rb et K;
- (iii) métaux lourds: Yb, Os, Cr (III), Mn, Fe, Ni, Cu, La, Eu, V, Zn, Zr, Nb, Ru, Re, Au et Hg.

2°. Les composants biodisponibles dans les scories et boues des fonderies et bioaccumulés dans les sols remblayés:

- (i) non métaux: Si;
- (ii) métaux simples: Ca, K, Ti, Sr et Al;
- (iii) métaux lourds: Cr, Mn, Fe, Cu, La, Eu, Yb, Os, V, Zn, Au, Sc, Zr, Ru, Re, Hg et Mg.

3°. Les éléments biodisponibles dans les scories et boues de la mitraille non dosés dans les sols remblayés:

- (i) non métaux: Br
- (ii) métaux simples: Na et Ti (III),
- (iii) métaux lourds: Rb, Eu et Yb

4°. Les éléments chimiques dosés dans les sols mais n'étant pas dosés subséquemment dans les scories et boues de la mitraille:

- (i) non métaux: As, P et S;
- (ii) métaux simples: aucun,
- (iii) métaux lourds: Pb

Comment comprendre ces différents comportements des éléments tel que décrit ci-haut ? Nous pensons qu'une étude de la cinétique environnementale de chaque ETM serait nécessaire pour ce faire.

COMMENTAIRE 2

Selon Geerj et al. (2004) lu dans [17], une bonne interprétation du diagramme d'illustration des concepts de biodisponibilité et bioaccessibilité peut permettre de mieux élucider le mécanisme de la cinétique environnementale des ETM.

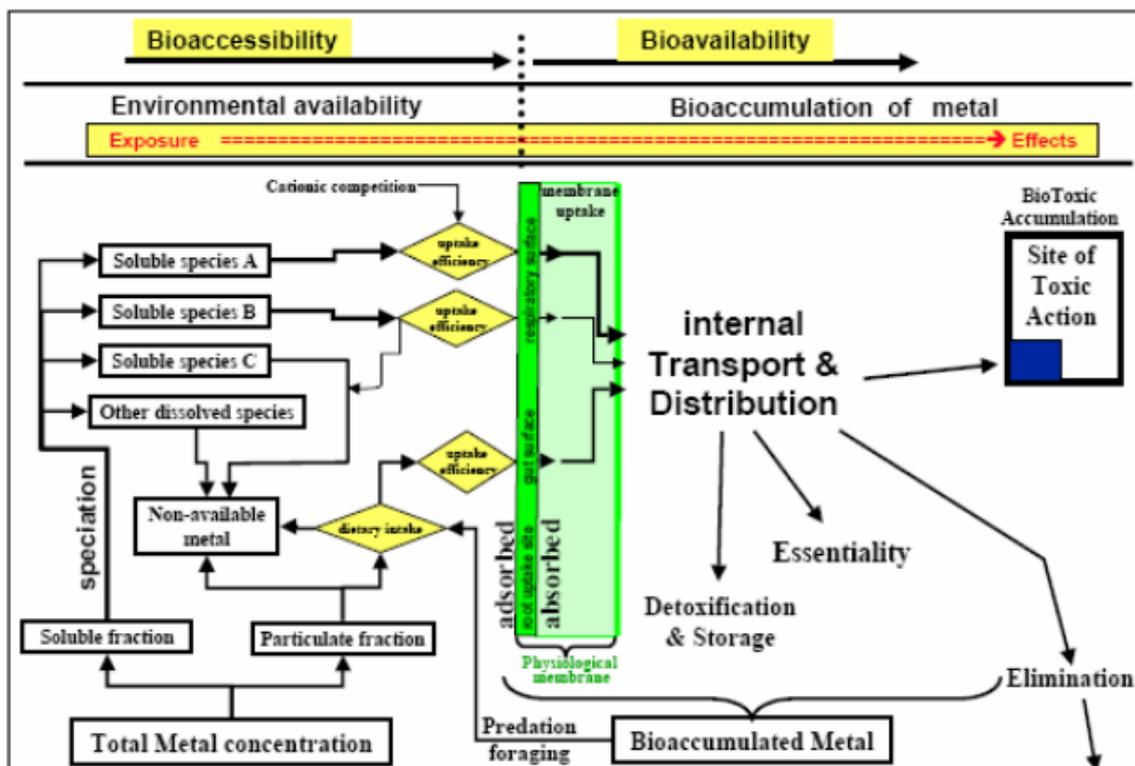


Fig. 3. Diagramme illustrant les concepts de biodisponibilité (bioavailability) et bioaccessibilité (bioaccessibility) [17]

Voici donc notre version d'interprétation de la figure 2: «les écosystèmes environnementaux sont exposés aux éléments toxiques qui sont permanemment disponibles (environnemental availability). Au contact de ces derniers, les effets se produissent progressivement suite à la bioaccumulation des éléments métalliques dans le milieu (bioaccumulation of metal). Tel en est le principe général; et maintenant voici le déroulement du processus global.

La concentration totale des éléments métalliques inoculés dans un milieu donné s'y trouve en fraction soluble et fraction particulaire. La décomposition de la fraction particulaire produit d'une part du métal non utilisable et d'autre part une substance admissible (dietary intake) dont une portion passe dans la phase précédente (Non available métal) et l'autre à haute

capacité d'agrégation. Pendant ce temps, la fraction soluble pénètre dans le milieu (spéciation) et y subissent de degrés de transformation relatifs en fonction des propriétés physicochimiques de chaque élément. Certains sont classés dans la catégorie des espèces solubles de la catégorie A, d'autres B, tandis que certains sont classés dans la catégorie d'autres composés dissouts. Tous les éléments appartenant à la catégorie A disposent d'une haute capacité d'agrégation tandis qu'une petite partie de composants de la catégorie B s'associe aux éléments de la catégorie C et d'autres espèces dissoutes pour donner le métal non disponible (bioindisponibilité).

Après cette étape, tous les composés à haute capacité d'agrégation passent dans la phase solide (sol). Les éléments absorbés sont alors captés dans une membrane d'agrégation. Un transport interne des éléments agrégés est assuré suivi de leur distribution en quatre portions distinctes: une passe dans le site dit «site à action toxique» après une bioaccumulation de substances toxiques, une partie est éliminée suite à plusieurs phénomènes (ruissellement, évaporation, accumulation dans des organismes végétaux, etc.), tandis que deux fractions notamment une dite fondamentale et une composée de substances toxiques accumulées forment la partie métallique bioaccumulée dans un milieu donné (sol pour ce qui nous concerne).

Les éléments métalliques bioaccumulés dans un milieu donné peuvent revenir dans l'environnement par prédation et compétition pour passer à nouveau dans le système de transformation tel que décrit ci-haut» fin d'interprétation.

D'après [18], [19] et [20], la sorption et la désorption (dont les mobile principal se fait soit par l'adsorption, la précipitation et la fixation des éléments) sont des principaux facteurs qui contrôlent le comportement des métaux dans le sol leurs phyto-disponibilités et même leurs toxicités potentielles. Par ailleurs, [10] et [21] ont prouvé que la présence des matières organiques, argiles, oxydes de fer, oxyde de manganèse, carbonates, phosphates et sulfures dans le sol favorise la sorption des ETM. Elle est influencée par l'acidité/basicité (pH) du milieu récepteur, la température et le temps de contact.

La durée de contact entre le métal et le sorbant (ici sol) détermine forcément le taux des éléments sorbés [22]. Généralement, la longue durée du temps de contact favorise la sorption et renforce la liaison entre le métal et les surfaces. Ce processus ne doit cependant subir une quelconque perturbation (précipitation) comme expliqué précédemment. [23] constatent que la longue durée de contact avec la solution extractive favorise la désorption du métal et, par conséquent, augmente la quantité de métal désorbée dans une nouvelle matrice.

Dans les sols, les ETM peuvent exister sous forme soluble, échangeable ou combiné avec les constituants du sol. C'est à partir de ce cadre assez clair que nous pouvons comprendre que les éléments tels que Na, La, Br, Ti, Nb, Ba, Al, Mg et Rb, bien que présents dans les SBF ne se retrouvent pas ou se retrouvent très faiblement (une seule fréquence) dans le milieu les ayant accueilli (sorbant), tandis que nombreux sont les éléments qui ont rencontrés une adhésion positive mais à des teneurs relatives.

Pour les premiers, il n'est pas question de dire qu'il n'y a pas eu contact, mais que suite à certains de phénomènes ci-haut énumérés (précipitation, percolation, etc.), ils auraient été éliminés de la couche superficielle des sols pour permuter dans les zones plus profondes ou dans d'autres milieux. Quant à la seconde, malgré l'adhésion constatée, son rapport paraît déséquilibré.

Les ETM sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique [24]. La concentration naturelle de ces éléments dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation, son âge et la nature de l'élément. Les retombées atmosphériques sont également une source potentielle d'ETM pour les sols [25].

Un sol est considéré pollué lorsque la dégradation de sa qualité par l'apport anthropique d'éléments toxiques peut porter atteinte à la santé humaine ou/et à l'environnement. La présence d'un polluant dans le sol n'est pas en soi un danger ni moins une pollution d'office, le risque apparaît dès que ce polluant peut être mobilisé et agit sur l'environnement (faune, flore) ou sur l'homme [26].

4 CONCLUSION

En dehors de toute intervention de l'homme, les sols ont une concentration naturelle en métaux provenant de l'altération de la roche-mère faisant automatiquement partie de la composition de ces sols (Sirven, 2006). Dans notre article précédent (sous même presse), nous avons démontré que les scories et boues de la mitraille/ferraille renfermaient les composants minéraux notamment Na_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Yb_2O_3 , OsO_4 , Br , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , Ti_2O_3 , Au , Sc_2O_3 , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , Al_2O_3 , MgO , Rb_2O , HgO . Au cours de ce dernier, il vient d'être prouvé que la quasi majorité de composants des scories et boues de la mitraille sont contenus dans les sols remblayés par lesdites scories et boues sauf Na_2O , Br , Ti_2O_3 , Nb_2O_5 , BaO et Rb_2O . Après analyse critique il est constaté que ces derniers composants ont une grande mobilité dans les sols, raison pour laquelle il serait possible qu'ils ne puissent pas être repérés dans le volume superficiel

des sols (60 cm). En conséquence, il y a une similarité parfaite entre les contenus des scories et boues de la mitraille et celui des sols remblayés par elles. Cette similarité n'est pas le fait d'un simple hasard géologique mais plutôt un phénomène physicochimique clairement établi. En termes clairs, le contact des scories et boues de la mitraille avec un contenant est une source de transmission des éléments minéraux dans leur hôte, tandis que le sol (comme hôte) facilite la bioaccumulation de ces éléments minéraux. La comparaison de la composition chimique des sols remblayés par les scories et boues des fonderies l'a suffisamment prouvée car il vient d'être démontré que la concentration de SiO₂ demeure plus élevée dans les sols non remblayés par les SBF tandis que la majorité de composants sont relativement moins concentrée dans ces derniers qu'ils ne le sont dans les sols enduits de remblais. De même, beaucoup d'autres composants (P₂O₅, Al₂O₃, MgO, OsO₄, La₂O₃, Yb₂O₃ et SO₃) ont été dosés dans les sols remblayés par les scories et non dans ceux sur lesquels ces remblais ne sont encore entreposés. Ce qui nous permet de conclure en définitif que les scories et boues de fonderies de la mitraille contaminent dangereusement les écosystèmes sur lesquels elles sont déposés, autrement dit, les éléments chimiques contenus dans les scories et boues des fonderies (bioaccessibility) sont transférés dans les milieux physiques qui les accueillent (bioavailability).

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent aux autorités de l'Office Congolais de Contrôle (OCC) de Lubumbashi et plus particulièrement au personnel du Laboratoire Central de Physicochimie de cette entreprise, spécialement à Madame Ndaya, Messieurs Bertin Kitwa et Mpiana respectivement chef de Division, chef de bureau et Chef de service dudit département pour leur assistance avérée lors des travaux de laboratoire. J'adresse aussi mes remerciements à la famille Emman Nzondero pour son accueil favorable dans la ville de Lubumbashi et aux prêtres de l'ordre de Saint Augustin pour le cadre idéal de travail mis à ma disposition.

REFERENCE

- [1] Kakundika et al., Caractérisation chimique des boues et scories des fonderies qui recyclent la mitraille à Kinshasa-RDC: qualité et quantité relative des polluants du substratum remblayé par ces matériaux, sous presse.
- [2] Kakundika et al, Repérage et géolocalisation des sites de rejets des scories et boues des fonderies de la mitraille de Kinshasa, sous presse.
- [3] Anne Tremel-Schaub et Isabelle Feix, 2005. Contamination des sols: transfert des sols vers les plantes, EDP Sciences/ADEME, ISBN: 2-86883-793-X, 422p.
- [4] <http://www.fao.org/3/x2570f/x2570f04.htm>.
- [5] Chassin P., Baize D., Cambier P., Sterckeman T. 1996. Les éléments traces métalliques et la qualité des sols, Impact à moyen et à long terme: Etude et Gestion des Sols, 3. 297-306.
- [6] De Matos, A.T., Fontes, M.P.F., da Costa, L.M., Martinez, M.A., 2001. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. Environ. Poll., 111, 429-435.
- [7] Laperche V., Dictor M. C., Clozel-Leloup B. and Baranger Ph., 2004. 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.
- [8] Pansu M. et Gautheyrou J., 2003. L'analyse du sol, Minéralogique, organique et minérale, édition Springer, 998 p.
- [9] Nicolaus Remer, 2006, la silice: l'élément oublié en agriculture, in https://soin-de-la-terre.org/content/uploads/La_silice_ consulté le 9 janvier 2021.
- [10] Kabata-Pendias, A., 2001. Trace elements in soils and plants, Third Edition, NY: CRC, Raton, Florida, p 155-178.
- [11] Médard Thiry¹, Sabine Huet-Taillanter et Jean-Michel Schmitt, 2002. La friche industrielle de Mortagne-du-Nord (59) – I – Prospection du site, composition des scories, hydrochimie, hydrologie et estimation des flux, Bull. Soc. Géol. France, t. 173, no 4, pp. 369-381.
- [12] J.M. Marcoen, J. Naud, J.C. Brohée, I. Crélot, E. Delcarte et R. Agneesens, 2000. Le fond géopédochimique des sols: potentialité de l'analyse chimique élémentaire globale par spectrométrie de fluorescence X (XRF), Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, 2-3 Novembre 2000.
- [13] Sirven J.B., 2006. Détection de métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS), Physique Atomique [physics.atom-ph], Thèse de doctorat, Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, France, pp 250.
- [14] <http://www.ks-minerals and agriculture.com>
- [15] Lee CG, Chon HT, Jung MC, 2001. Heavy metal contamination in the vicinity of the Daduk Au–Ag–Pb–Zn mine in Korea, Applied Geochemistry 16: 1377-86.

- [16] Bliefert C. and Perraud R., 2001. Chimie de l'environnement, Air, eau, sols, déchets, Edition De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 1re édition, 408p.
- [17] Axelle Gravellier 2007. Biodisponibilité des métaux lourds dans les sols et impact de sa prise en compte dans les évaluations de risque sanitaire, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur du génie sanitaire, Ecole de la Santé Publique, Renne/France.
- [18] Sparks, D.L.1999. Kinetics of sorption/ release reactions at the soil mineral/water interface, in D.L. Sparks, (ed.), Soil physical chemistry (2nd ed.), CRC Press, Boca Raton, pp. 135-191.
- [19] Vega, F.A., Covelo, E.F. et Andrade, M.L, 2006. Competitive sorption and desorption of heavy metals in mine soils: Influence of mine soil characteristics, Journal of Colloid and Interface Science, 298: 582-592.
- [20] Swift, R.S. et McLaren, R.G., 1991. Micronutrient adsorption by soils and soil colloids, in Bolt, G.H. De Boodt, M.F., Hayes, M.B.H., McBride, M.B. (eds.) Interactions at the Soil Colloids-Soil Solution Interface, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.
- [21] Karam, A., Cote C. et Parent, L.E, 2003. Retention of copper in Cu-enriched organic soils, pp. 137-150, in L.-E. Parent et P. Innicki (eds.), Organic soils and peat materials for sustainable agriculture. CRC Press LLC, Boca Raton.
- [22] Bruemmer, G.W., Gerth, J., et Tiller, K.G. 1988. Reaction kinetics of the adsorption and desorption of Ni, Zn and Cd by goethite: Adsorption and diffusion of metal. Journal of Soil Science, 39: 37-52.
- [23] Filius, A., Streck, T. et Richter, J. 1998. Cadmium sorption and desorption in limed topsoils as influenced by pH: Isotherms and simulated leaching. Journal of Environmental Quality, 27: 12-18.
- [24] Bourrelier, P.H. and Berthelin, J., 1998. Contamination des sols par les éléments traces: les risques et leur gestion. CR. Acc Sci, 42. Ed. Lavoisier, Paris.
- [25] Benahmed Mohamed, 2017. 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.
- [26] Dubey, B.L. et Dwividi P., 1988. Projective value of somatic Inkb lot series II in casestammering, Journal of personality and clinical studies, 8, p. 173-176.