

Caractérisation chimique des scories et boues des fonderies qui recyclent la mitraille à Kinshasa-RDC: Qualité et quantité relatives des polluants du substratum remblayé par ces matériaux

[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]

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: For nearly a decade and a half, some foundries that recycle scrap metal have been established in Kinshasa, the capital of the Democratic Republic of Congo. These foundries produce annually, as do other foundries, thousands of tons of solid waste, the mismanagement of which was demonstrated in our previous article in the same press. The waste from the foundries being counted among the dangerous waste, it immediately seemed useful to us to determine their chemical composition.

After chemical analyses by X-ray fluorescence spectrophotometry (XRF) on 15 samples of slag and 15 samples of sludge from three of the said foundries, the following results were obtained (i) qualitatively, the sludge of the foundries is composed of Na₂O, CaO, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, NiO, CuO, La₂O₃, Eu₂O₃, Yb₂O₃, OsO₄, Br, SiO₂, K₂O, TiO₂, V₂O₅ and ZnO while the slag contains in addition to these last components Ti₂O₃, Sc₂O₃, SrO, ZrO₂, Nb₂O₅, RuO₂, BaO, Re₂O₇, Al₂O₃, Au, MgO, Rb₂O and HgO, (ii) On the semi-quantitative level, the chemical analyses indicate that Fe₂O₃ is the most preponderant component in the sludge with an average mass concentration evaluated at more than 85%, followed by Na₂O [6.33%], SiO₂ [5.3%], MnO [1.5%]. Eu₂O₃, Cr₂O₃ and CuO have concentrations in the order of the tenth (10⁻¹), while the majority of the remaining components have concentrations in the order of the hundredth (10⁻²), except Re₂O₇, ZrO₂, SrO and V₂O₅ whose concentrations are small in the order of the thousandth (10⁻³). On the other hand, the main component of the slag is SiO₂ concentrated at 36% of the average total weight, followed by Fe₂O₃ [23%], MnO [15.5%], Al₂O₃ [10%], Cr₂O₃ [1.5%], Na₂O [1.1%] which are the major components. TiO₂, BaO, ZnO, MgO, SrO, K₂O, V₂O₅, RuO₂ have concentrations on the order of tenths ranging from 0.8 ≥ x ≥ 0.112, ZrO₂, Eu₂O₃, Nb₂O₅, Re₂O₇ have concentrations on the order of hundredths ranging from 0,047 ≥ x ≥ 0.02 and NiO, Au, Sc₂O₃, Ti₂O₃ and Br have relative concentrations on the order of thousandths ranging from 0.00333% ≥ x ≥ 0.001%.

The comparison of the different compositions of the sludge and slag indicates that the slag from the FAMECO smelter, not only has several components related to the other two smelters, but also has higher or lower relative concentrations than the other two. Finally, the pooling or mixing of sludge and slag at the time of disposal indicates that the contribution of pollutants from the slag is far more abundant (78%) than from the sludge (22%).

KEYWORDS: Sludge, slag, foundries, scrap metal, pollutants, bedrock, fills.

RESUME: Depuis près d'une décennie et demie, des fonderies qui recyclent la mitraille/ferraille se sont installées à Kinshasa, capitale de la République Démocratique du Congo. Celles-ci produisent annuellement, à l'instar d'autres fonderies, des milliers de tonnes de déchets solides dont la mauvaise gestion a été démontrée dans notre article intitulé « Repérage, géolocalisation et caractérisation des sites de rejets des scories et boues des fonderies (SBF) qui recyclent la mitraille à Kinshasa: RDC » (sous même presse). Les déchets des fonderies étant comptés parmi les déchets dangereux, il nous a aussitôt semblé utile de déterminer leurs compositions chimiques.

Au bout d'analyses chimiques par spectrophotométrie à fluorescence X (XRF) réalisées sur 15 échantillons des scories et 15 des boues des trois desdites fonderies, il en est ressorti les résultats ci-après: (i) sur le plan qualitatif, les boues des fonderies sont 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 et ZnO tandis que les scories renferment en plus de ces derniers composants Ti_2O_3 , Sc_2O_3 , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , Al_2O_3 , Au , MgO , Rb_2O et HgO , (ii) Sur le plan semi-quantitatif, les analyses chimiques indiquent que Fe_2O_3 est le composant le plus prépondérant dans les boues avec une concentration massique moyenne évaluée à plus de 85 %, suivi des Na_2O [6,33%], SiO_2 [5,3 %], MnO [1,5 %]. Eu_2O_3 , Cr_2O_3 et CuO ont des concentrations de l'ordre du dixième (10^{-1}), tandis que la majorité de composants restants ont des concentrations de l'ordre du centième (10^{-2}), hormis Re_2O_7 , ZrO_2 , SrO et V_2O_5 dont les concentrations sont petites de l'ordre du millièmè (10^{-3}). En contrepartie, le composant principal des scories est SiO_2 concentré à 36 % du poids total moyen, suivi de Fe_2O_3 [23 %], MnO [15,5 %], Al_2O_3 [10 %], Cr_2O_3 [1,5 %], Na_2O [1,1 %] qui en sont les composants majeurs. TiO_2 , BaO , ZnO , MgO , SrO , K_2O , V_2O_5 , RuO_2 ont des concentrations de l'ordre du dixième variant entre $0,8 \geq x \geq 0,112$, ZrO_2 , Eu_2O_3 , Nb_2O_5 , Re_2O_7 ont des concentrations de l'ordre de centième variant entre $0,047 \geq x \geq 0,02$ et NiO , Au , Sc_2O_3 , Ti_2O_3 et Br ont des concentrations relatives de l'ordre de millièmè variant entre $0,00333\% \geq x \geq 0,001\%$.

La comparaison des différentes compositions des boues et scories indique que les scories de la fonderie FAMECO, non seulement comportent plusieurs composants en rapport avec les deux autres fonderies, mais aussi disposent des concentrations relatives plus ou moins élevées que ne le sont celles des deux autres. Enfin, la mise en commun ou le mélange des boues et scories lors de leurs mise en décharge indique que l'apport en polluants des scories est de loin beaucoup plus abondant (78%) que celui des boues (22%).

MOTS-CLEFS: Boues, scories, fonderies, mitraille, polluants, substratum, remblais.

1 INTRODUCTION

Lors du processus de recyclage des matériaux métalliques dans une fonderie, il se pose plusieurs questions environnementales qui rentrent principalement dans les catégories suivantes: émissions atmosphériques, production de plusieurs tonnes de déchets solides et des volumes importants des eaux usées mais aussi le bruit typique qui gêne les populations riveraines de ces installations. Des poussières et des matières particulaires sont générées à chaque stade dudit processus, et contiennent des niveaux variables d'oxydes minéraux, de métaux et d'oxydes métalliques. Les émissions de poussière proviennent des processus thermiques, chimiques/physiques et des actions mécaniques [1].

Les déchets solides des fonderies comprennent les déchets de sable, les scories qui proviennent de la désulfuration et de la fusion ou la désoxygénation, les poussières collectées à l'intérieur des systèmes de maîtrise des émissions, les déchets réfractaires et les liquesurs et boues d'épuration.

Les scories des fonderies sont des résidus de fabrication des objets métalliques après fusions des minéraux (première fusion) ou des matériaux métalliques recyclés (seconde ou énième fusion). Il existe d'autres types de scories comme par exemple les scories volcaniques, etc. Leurs compositions chimiques dépendent étroitement de la composition des matières premières utilisées (par la fonderie) mais aussi de la technologie mis au point pour ce faire [2].

Les boues et scories ont souvent des compositions chimiques complexes et contiennent une variété de contaminants qui proviennent de la croute terrestre ou des métaux des ferrailles. Elles peuvent constituer environ 25 % des déchets solides produits par une fonderie. Les composants des scories sont généralement des oxydes métalliques, des réfractaires fondus, du sable et des cendres de coke (le cas échéant) [1]. Des fondants peuvent être également ajoutés pour faciliter le retrait des scories du four. Les boues et scories peuvent être dangereuses si elles contiennent du plomb, du cadmium, du chrome ou d'autres éléments toxiques provenant de la fusion de l'acier ou des métaux non ferreux. Pour ce faire, les scories et boues des fonderies doivent faire l'objet de mesures de prévention et de maîtrise de la pollution.

C'est ce qui justifie l'objet du présent article qui se veut mettre en évidence la composition chimique des boues et scories des fonderies qui recyclent la mitraille à Kinshasa, République Démocratique du Congo.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1 MILIEU D'ÉTUDE ET SITES D'ÉCHANTILLONNAGE

Notre démarche s'est basée sur deux types d'échantillons à savoir les boues et les scories générées par les fonderies qui recyclent la mitraille. Les échantillons ont été prélevés dans trois fonderies actives qui recyclent actuellement ces matériaux à Kinshasa à savoir les fonderies WAN-SHENG (14^{ème} rue Limete), FAMECO (17^{ème} rue Limete) et BENIPROS (Quartier Ndanu, Limete).

Les échantillons des boues et scories de la fonderie BENIPROS ont été obtenu (par achat) toujours dans la matinée (entre 6 et 7 heures) devant la porte d'entrée de la société, car c'est cet endroit qui leurs sert de lieu de transit avant leurs liquidation. S'agissant des échantillons des scories de la société FAMECO, ils ont été recueillis au sein de la fonderie. Quant à la fonderie Wan Sheng, nous avons été obligé d'acheter également l'équivalent minimum d'un chariot (± 2 tonnes) toutes les fois que nous avons besoin d'un échantillon. Le sectionnement de ces différents échantillons en petits échantillons représentatifs a été réalisé par la technique de quartage.

Par souci de comparaison mais surtout pour vérifier la thèse selon laquelle les fonderies concernées ne font pas de sélection préalable des matériaux à leurs dispositions avant la mise au four et que chaque échantillon pouvait contenir de différences dans leurs compositions chimiques, cinq échantillons de scories et cinq de boues par fonderie ont été prélevés au cours d'une période de 35 jours, en raison d'un échantillon tous les sept jours. Les résultats donnés dans cet article sont des moyennes arithmétiques calculées en fonction des résultats détaillés pouvant être consultés dans la base de données à notre disposition.

2.2 PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS

Les grosses particules des scories ont été ramassées tandis qu'une pelle en acier avait servi pour prélever les échantillons des boues et les petites particules des scories. Un sac en plastique (± 30 kg) était rempli par catégorie d'échantillon. Le remplissage du sac se faisait moyennant différentes strates de sous échantillons soutirés à des différents points du tas trouvé sur place autant en profondeur que superficiellement. Le transport des échantillons était assuré par moto. Les échantillons ainsi prélevés étaient conservés dans un milieu sec et en l'absence des rayons solaires (lumière) avant leur traitement physique.

2.3 TRAITEMENT PHYSIQUE DES ÉCHANTILLONS

Les échantillons à notre portée étaient des volumes et dimensions différentes et devaient ipso facto passer par un traitement physique approprié en vue de les ramener à un état granulométrique facilement soluble. Cette transformation de l'échantillon a été réalisée d'abord au laboratoire de service de broyage du Centre de Recherche Géologique et Minéralogique de Kinshasa (CRGM) suivant le protocole ci-après: (i) les échantillons grossiers des scories sont concassés à l'aide d'un marteau en acier dur. Cette première étape permet d'obtenir des particules dimensionnées à ± 100 mm de diamètre; (ii) l'échantillon est ensuite introduit dans un concasseur à deux mâchoires l'une mobile et l'autre fixe. La fragmentation se fait pratiquement par écrasement entre les deux mâchoires dont les plaques d'usure sont en acier dur. Les particules obtenues en fin d'opération ont une dimension de ± 3 mm de diamètre; néanmoins, l'échantillon des boues déjà en petits granulats ne passe pas par les deux premières étapes mais est soumis au séchage à l'étuve à 140°C pendant au moins 10 heures; (iii) ces échantillons sont ensuite placés dans un broyeur qui le rend en poudre. La fragmentation résulte donc des chocs et des impacts des corps broyant des grains ainsi que des frottements et de l'abrasion (action d'user par frottement des solides entre eux). Cette abrasion ne devient prépondérante que lorsque les particules deviennent plus fines ou poudreuses. L'appareil utilisé pour cette fin est un broyeur de marque BIEBTEBCHN.

2.4 CONDITIONNEMENT ET TRANSPORT DES ÉCHANTILLONS AU LABORATOIRE

Les échantillons solides traités sont emplies dans des bocaux plastics ambrés puis rangés dans une glacière bien nettoyée et sèche. Cette dernière va être transportée jusqu'au laboratoire de l'OCC à Lubumbashi où ont été réalisées les analyses chimiques de tous les échantillons.

Avant les analyses chimiques, les échantillons sont séchés à l'étuve à 105°C pendant au moins 4 heures pour dissiper l'humidité résiduaire puis broyés de nouveau moyennant un vibro-broyeur géant afin de les réduire aux dimensions granulométriques d'au moins $75\ \mu\text{m}$ 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 les homogénéiser. Les échantillons issus de ce processus ont des dimensions de $\pm 75\mu\text{m}$.

N.B. La contamination entre deux échantillons qui se succèdent au broyage a été évitée par usage de la poudre en silice.

2.5 MÉTHODES D'ANALYSE DES ÉCHANTILLONS

La détermination de la composition des scories des fonderies de la mitraille a été faite par spectrométrie de fluorescence X en faisant usage du Spectrophotomètre à fluorescence X MUNICIPAL 4. Ce spectrophotomètre permet d'analyser simultanément 12 échantillons suite à ses 12 matrices incorporées réceptrices des cuvettes appropriées (godets) pour les analyses des échantillons. Les méthodes statistiques ont été mises en œuvre dans l'analyse des données expérimentales.

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 COMPOSITION CHIMIQUES DES BOUES DES FONDERIES DE LA MITRAILLE

3.1.1 COMPOSITION CHIMIQUE DES BOUES DE LA FONDERIE WAN-SHENG

Les résultats d'analyses de laboratoire montrent que les boues de la fonderie Wan-Sheng sont composées de SiO_2 , K_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Na_2O , ZnO et du Br. Il se dégage cependant que Fe_2O_3 est le composant le plus prépondérant dans lesdites boues avec une moyenne dégagée de 85,2%, suivi de loin de Na_2O avec la concentration moyenne d'au moins 7,4%, de SiO_2 dont la concentration moyenne est de 5,12%, et MnO avec une concentration de 1,1%. En définitif ces composantes à eux seules représentent une concentration maximum de près de 98,8% tandis que d'autres composants titrent 1,2% seulement du poids totale de l'échantillon reparti comme suit: Eu_2O_3 [0,52] > CaO [0,476] > Cr_2O_3 [0,2] > CuO [0,109] > Br [0,09] > K_2O [0,03] > La_2O_3 [0,02] > NiO [0,008] > ZnO [0,001].

Par ailleurs, CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO et Br ont été dosés littéralement dans tous les cinq échantillons, La_2O_3 et Eu_2O_3 ont été testés dans quatre échantillons, SiO_2 dans trois échantillons, K_2O et NiO dans deux, tandis que ZnO et Na_2O (malgré sa plus grande participation à la concentration moyenne de la boue) ont été dosés dans un seul échantillon. Ce qui atteste que ces derniers éléments sont rares dans les boues de la fonderie Wan-Sheng.

De la comparaison de la variabilité des concentrations des différents composants des boues de la fonderie WAN-SHENG, le constat est que sur tous les points de vue, les résultats d'analyses diffèrent les uns les autres. Associé au fait que les contenus des boues ne se répètent pas dans tous les échantillons, le constat à dégager est que les inputs de cette fonderie ne sont pas toujours les mêmes et n'ont pas toujours les mêmes compositions chimiques.

3.1.2 COMPOSITION CHIMIQUE DES BOUES DE LA FONDERIE FAMECO

L'examen des données de laboratoire relatives à l'analyse des boues de la fonderie FAMECO indique que la composition relative de ces dernières comprend un ensemble de vingt et un (21) oxydes notamment Na_2O , CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Yb_2O_3 , OsO_4 , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , SrO , ZrO_2 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 ainsi que Br.

Néanmoins, il y a lieu de noter qu'à eux seuls, Fe_2O_3 [80%], SiO_2 [10,5%], Na_2O [5,5%] et MnO [2,63%] renferment 98% de la concentration globale des boues issues de cette fonderie tandis que les autres composants ne comprennent que 2% de leurs concentrations moyennes répartie de la manière suivante: CaO [0,48%] > Eu_2O_3 [0,326%] > Cr_2O_3 [0,284%] > CuO [0,165%] > TiO_2 [0,14%] > Br [0,066%] > ZnO [0,05%] > RuO_2 [0,046%] > Yb_2O_3 [0,034%] \equiv K_2O [0,034%] > NiO [0,0336%] > OsO_4 [0,022%] > La_2O_3 [0,014%] > V_2O_5 [0,01%] \equiv SrO [0,01%] \equiv ZrO_2 [0,01%] > Re_2O_7 [0,004%].

Aussi, six oxydes seulement ont été dosés dans tous les cinq échantillons prélevés pour le compte de cette fonderie: il s'agit de CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO et CuO ; les La_2O_3 et Yb_2O_3 ont été dosés quatre fois tandis que Eu_2O_3 et Br l'ont été trois fois, OsO_4 deux fois et le reste qui constituent la majorité des composantes des boues de la fonderie FAMECO ont été testés dans un seul échantillon. Il y a lieu de noter que de cette dernière catégorie de classement (fréquence = 1), Na_2O a été dosé uniquement dans l'échantillon 1 tandis que SiO_2 , K_2O , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , SrO , ZrO_2 , RuO_2 , BaO et Re_2O_7 ont été dosés uniquement dans l'échantillon numéro 3 (BFAM 3) imprimant à ce dernier les caractéristiques typiques des scories tel que nous aurons à le démontrer un peu plus tard. Ce qui envisage que cet échantillon aurait été contaminé par les scories.

Une analyse approfondie des résultats relatifs à la composition des boues de cette fonderie montre que les concentrations de CaO sont restées stables autour de la moyenne avec un écart type relativement faible mais bien comparés à la médiane qui

est de 0,16. Il en est de même de ceux de Cr_2O_3 dont seulement les résultats de l'échantillon 3 ont écarté la moyenne. Quant à MnO , les résultats sont loin de se regrouper autour de la moyenne vue l'écart type vraisemblablement élevé de plus du double de celle-ci; c'est idem pour le Fe_2O_3 dont deux échantillons s'écartent fortement des autres à des écarts considérablement significatifs de 9/11 pour l'un et 1/3 pour l'autre. Pour les restes, c'est pareils.

Il est donc clair que la composition des boues de la fonderie FAMECO n'a pas été la même dans les cinq échantillons prélevés et que les concentrations des éléments qui se sont répétés n'ont pas été les mêmes au cours de cinq analyses.

3.1.3 COMPOSITION CHIMIQUE DES BOUES DE LA FONDERIE BENIPROS

Un coup d'œil analytique sur les résultats d'analyse chimique des boues de la fonderie BENIPROS indique que celles-ci renferment douze oxydes notamment CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Na_2O , Yb_2O_3 , SiO_2 , NiO et OsO_4 y compris le brome (Br). Néanmoins, à eux seuls, Fe_2O_3 et Na_2O demeurent les deux composants dominants avec respectivement 91% et 6,4%, soit un total de 97,4% de la concentration massique totale moyenne des boues issues de cette fonderie tandis que les autres composants se partagent à des proportions différentes les 2,6% du poids total de la boue comme suivant: MnO [0,76%] > Eu_2O_3 [0,732%] > Cr_2O_3 [0,258%] > SiO_2 [0,202%] > CaO [0,16%] > CuO [0,123%] > Br [0,0794%] > Yb_2O_3 [0,024%] > OsO_4 [0,014%] > NiO [0,04%].

Par ailleurs, la majorité de composants (7/12) notamment CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO , Eu_2O_3 et Br ont été dosés dans tous les cinq échantillons de boues prélevés, La_2O_3 a été détecté dans quatre échantillons, Yb_2O_3 dans trois, NiO dans deux et Na_2O (malgré sa concentration fortement représentée), SiO_2 et OsO_4 ont été dosés dans un seul échantillon.

La comparaison des concentrations de composants qui se sont répétés prouve que les composants identifiés dans les boues échantillonnées au sein de cette fonderie présentent des concentrations nettement regroupées autour de leurs moyennes respectives avec des écarts type inférieurs aux moyennes.

3.1.4 CORRÉLATION ENTRE LA COMPOSITION DES BOUES DES FONDERIES DE LA MITRAILLE

Nous portons dans le tableau 1. les données préalables pour matérialiser la corrélation existante entre les compositions chimiques des boues de différentes fonderies examinées.

Tableau 1. Lien entre concentrations massiques (en %) des boues des fonderies de la mitraille

| | Na_2O | CaO | Cr_2O_3 | MnO | Fe_2O_3 | NiO | CuO | La_2O_3 | Eu_2O_3 | Yb_2O_3 | OsO_4 |
|------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--------------|-------------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------|
| WAN SH | 7,4 | 0,5 | 0,2 | 1,05 | 85,2 | 0,01 | 0,11 | 0,02 | 0,52 | | |
| FAMECO | 5,2 | 0,5 | 0,3 | 2,62 | 80 | 0,034 | 0,17 | 0,014 | 0,33 | 0,034 | 0,022 |
| BENIPROS | 6,4 | 0,16 | 0,26 | 0,8 | 91,1 | 0,004 | 0,123 | 0,02 | 0,72 | 0,024 | 0,014 |
| Moyenne | 6,3333 | 0,387 | 0,253 | 1,49 | 85,43 | 0,016 | 0,134 | 0,018 | 0,523 | 0,0193 | 0,012 |
| Ecart type | 1,1015 | 0,196 | 0,05 | 0,987 | 5,554 | 0,0159 | 0,032 | 0,003 | 0,195 | 0,0071 | 0,006 |
| Max | 7,4 | 0,5 | 0,3 | 2,62 | 91,1 | 0,034 | 0,17 | 0,02 | 0,72 | 0,034 | 0,022 |
| Min | 5,2 | 0,16 | 0,2 | 0,8 | 80 | 0,004 | 0,11 | 0,014 | 0,33 | 0,024 | 0,014 |

Suite

| | Br | SiO_2 | K_2O | TiO_2 | V_2O_5 | ZnO | SrO | ZrO_2 | RuO_2 | BaO | Re_2O_7 |
|------------|-------|----------------|----------------------|----------------|------------------------|-------|-------|----------------|----------------|------|-------------------------|
| WAN SH | 0,09 | 5,12 | 0,03 | | | 0,001 | | | | | |
| FAMECO | 0,066 | 10,5 | 0,034 | 0,134 | 0,01 | 0,05 | 0,008 | 0,01 | 0,05 | 0,09 | 0,004 |
| BENIPROS | 0,08 | 0,202 | | | | | | | | | |
| Moyenne | 0,079 | 5,274 | 0,02133 | 0,045 | 0,003 | 0,017 | 0,003 | 0 | 0,02 | 0,03 | 0,001 |
| Ecart type | 0,012 | 5,151 | 0,00283 | | | 0,035 | | | | | |
| Max | 0,09 | 10,5 | 0,034 | 0,134 | 0,01 | 0,05 | 0,008 | 0,01 | 0,05 | 0,09 | 0,004 |
| Min | 0,066 | 0,202 | 0,03 | 0,134 | 0,01 | 0,001 | 0,008 | 0,01 | 0,05 | 0,09 | 0,004 |

3.1.4.1 DU POINT DE VUE QUALITATIF

Ce tableau retrace la composition chimique globale des boues des fonderies kinoises de la mitraille. Il présente une composition riche contenant vingt et un (21) oxydes plus le brome. Quelques relations mathématiques peuvent être déduites dudit tableau pour élucider les liens qui existe entre les boues des fonderies en étude telles que:

- $WAN-SHENG \cap FAMECO \cap BENIPROS = \{Na_2O, CaO, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, NiO, La_2O_3, CuO, Eu_2O_3, SiO_2, Br\}$.

Cet ensemble composé de dix oxydes plus un composé élémentaire indique ce qu'ont en commun les boues des trois fonderies examinées.

- $WAN-SHENG \setminus FAMECO \setminus BENIPROS = \{ \}$

Ce qui veut dire subsidiairement qu'aucun composant n'a été détecté uniquement dans les boues de la fonderie WAN-SHENG ou, en d'autres termes que tous les composants dosés dans les boues de la fonderie WAN-SHENG ont été détectés (appartiennent) aussi, soit dans les boues de deux autres fonderies ou de l'une d'entre elles;

- $FAMECO \setminus WAN-SHENG \setminus BENIPROS = \{TiO_2, V_2O_5, SrO, ZrO, RuO_2, BaO, Re_2O_7\}$

Cette relation montre que les boues de la fonderie FAMECO renferment en elles seules sept (7) oxydes de plus que les autres fonderies. Il s'agit des oxydes majoritairement trouvés dans un seul échantillon des boues de cette fonderie (voir supra).

- $BENIPROS \setminus FAMECO \setminus WAN-SHENG = \{ \}$ signifiant également qu'aucun composant n'appartient uniquement à la fonderie BENIPRO;
- $FAMECO \cap BENIPROS \setminus WAN-SHENG = \{Yb_2O_3, OsO_4\}$

Signifie que ces deux oxydes ont été dosés en même temps dans les boues des fonderies BENIPROS et FAMECO.

- $FAMECO \cap WAN-SHENG \setminus BENIPROS = \{K_2O, ZnO\}$

Signifie que ces deux oxydes ont été dosés concomitamment dans les boues des fonderies WAN SHENG et FAMECO.

3.1.4.2 DU POINT DE VUE SEMI QUANTITATIF

Le tableau 1 indique que Fe_2O_3 est le composant le plus prépondérant dans les boues des fonderies de la mitraille de Kinshasa avec une concentration massique moyenne évaluée à plus de 85 %. Celui-ci est suivi des Na_2O [6,33%], SiO_2 [5,3 %], MnO [1,5 %]. Les composés Eu_2O_3 , Cr_2O_3 et CuO ont des concentrations de l'ordre du dixième (10^{-1}), tandis que la majorité de composants restants ont des concentrations de l'ordre du centième (10^{-2}), hormis Re_2O_7 , ZrO_2 , SrO , V_2O_5 dont les concentrations sont petites de l'ordre du millièème (10^{-3}).

En termes des concentrations relatives maximales (composantes à plus grande concentration), la fonderie WAN-SHENG en compte quatre composantes notamment Na_2O , CaO , La_2O_3 et Br , la fonderie BENIPROS en compte deux à savoir Fe_2O_3 et Eu_2O_3 tandis que la fonderie FAMECO en compte six qui sont CaO (partagé avec Wan-sheng), Cr_2O_3 , MnO , NiO , CuO , SiO_2 .

En conférant au classement ci-dessus les composants appartenant uniquement à une seule fonderie, il se dégage que nombreux sont les composants des boues de la fonderie FAMECO qui contiennent des concentrations élevées que ne le sont celles de deux autres.

La sélection de la matière première mais aussi les volumes achetés seraient sans nul doute à la base de cette situation. En effet, d'après l'observation et le sondage, la Société FAMECO rassemble toute sorte de pièces métalliques (déchets de véhicules, ménagers, de bâtiments, électronique, avions, train, bateau, etc.) et ce en grande quantité, tandis que plusieurs voitures sont dépiécées sur le site de vente. Ce qui fait que l'opération de prétraitement s'avère souvent rudimentaire et génère d'importantes quantités de déchets bruts (boues) avant le démarrage du processus de fusion. Aussi, cette fonderie est celle qui a une forte production et donc que la quantité de déchets produits étant relative, ceux de cette fonderie renferment bel et bien des concentrations beaucoup plus élevées que les autres dont la rigueur sur le choix est la règle d'or mais aussi dont les quantités des matériaux achetés sont relativement petites.

3.2 COMPOSITION CHIMIQUES DES SCORIES

3.2.1 COMPOSITION CHIMIQUES DES SCORIES DE LA FONDERIE WAN-SHENG

L'analyse des scories de la fonderie WAN-SHENG prouve qu'elles renferment vingt oxydes, en l'occurrence SiO_2 , K_2O , CaO , Sc_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO , CuO , ZnO , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , Al_2O_3 , Ti_2O_3 ainsi que de l'or (Au). Il convient de noter que SiO_2 est le composant majeur identifié dans les scories de la fonderie WAN-SHENG avec une concentration massique relative moyenne de 43% suivi des Fe_2O_3 dont la concentration est de 24,4%, MnO (15,4%), CaO (8%) et Cr_2O_3 dosé à 1,5% de la concentration totale de l'échantillon des scories. En somme, ces oxydes dits majeurs occupent une concentration massique totale d'au moins 92%; ce qui signifie en conséquence que les autres composants (mineurs) se partagent une concentration de 8% de la manière suivante: TiO_2 [0,8] > BaO [0,446] > ZnO [0,206] > RuO_2 [0,162] > K_2O [0,122] > SrO [0,092] > V_2O_5 [0,085] > CaO [0,069] > Nb_2O_5 [0,043] > ZrO_2 [0,037] > Re_2O_7 [0,024] > Au [0,012] > NiO [0,0098] > Sc_2O_3 [0,006] > Ti_2O_3 [0,004].

En termes de fréquence de répétition, la majorité des composants ont été dosés dans les cinq échantillons examinés dont CaO , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO , SiO_2 , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , SrO , Re_2O_7 , tandis que K_2O , ZrO_2 , Nb_2O_5 , RuO_2 , BaO , Al_2O_3 ont été détectés dans quatre échantillons, NiO et Sc_2O_3 l'ont été dans deux échantillons, Ti_2O_3 et Au sont rares car ayant été testé dans un seul échantillon.

L'étude de la variabilité des concentrations en fonction des différents prélèvements montre l'existence d'importantes variations au sein des composants identiques et ceci, presque dans toutes les mesures avec des écarts types supérieurs ou égal à 50%.

3.2.2 COMPOSITION CHIMIQUES DES SCORIES DE LA FONDERIE FAMECO

En analysant minutieusement les résultats relatifs à la composition chimique des scories de la fonderie FAMECO, il se dégage que celles-ci sont chimiquement composées de vingt-trois oxydes en l'occurrence MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CaO , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO , ZnO , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , BaO , NiO , Rb_2O_3 , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Sc_2O_3 , RuO_2 , Re_2O_7 ainsi que du brome (Br).

Néanmoins, après analyse statistique des données dudit tableau, il se dégage deux anomalies à considérer notamment: (i) la composition typique de l'échantillon numéro 3 présentant des anomalies caractérisées par un taux très élevé de Fe_2O_3 [98%] et renferment des oxydes (NiO , Rb_2O_3 , La_2O_3 et Eu_2O_3) qui n'ont pas été identifiés dans les quatre autres échantillons; (ii) ces derniers oxydes avec Sc_2O_3 , RuO_2 et Br ont des concentration massiques infiniment petites au point que leurs moyennes ne contribue presque pas à l'ensemble du poids total de la scorie. En conséquence, les résultats de l'échantillon 3 ne sont pas pris en compte lors des calculs des valeurs statistiques tandis que les composants ci-haut cités ne le seront pas non plus.

Dans ce cas, les scories de la fonderie FAMECO présentent une composition chimique typique qui se range de la manière ci-après: SiO_2 [39%] > Fe_2O_3 [27,4%] > MnO [12%] > Al_2O_3 [10%] > CaO [6,4%] > Cr_2O_3 [2,1%] > TiO_2 [1,1%] > $\text{MgO} \equiv \text{BaO}$ [0,7%] > ZnO [0,6%] > SrO [0,22%] > K_2O [0,2%] > Nb_2O_5 [0,099%] > V_2O_5 [0,096%] > CuO [0,08%] > ZrO_2 [0,056%].

La majorité de ces éléments a été trouvé dans tous les cinq échantillons hormis MgO qui a été dosé dans un seul échantillon, Al_2O_3 et Nb_2O_5 qui l'ont été dans quatre échantillons.

Par ailleurs, la comparaison des concentrations entre composantes de même nature au cours de différents prélèvements indique qu'il existe des grandes variations des résultats justifiées par des écart types élevés de certains composants de plus ou moins 50% de leurs moyennes respectives.

3.2.3 COMPOSITION CHIMIQUES DES SCORIES DE LA FONDERIE BENIPROS

L'examen des données relatives à l'analyse des scories de la fonderie BENIPROS révèle qu'elles renferment essentiellement vingt et un oxydes notamment: Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CaO , Sc_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO , ZnO , SrO , ZrO_2 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , HgO , Nb_2O_5 , Ti_2O_3 et Na_2O .

Par ailleurs, sept composantes se partagent une concentration moyenne maximale de 97,84%: il s'agit, en ordre de grandeur de concentration de SiO_2 [34,4%], MnO [21,3%], Al_2O_3 [16,2%], Fe_2O_3 [16%], CaO [5,4%], Na_2O [3,2%] et Cr_2O_3 [1,34%]; ce qui revient à dire en conséquence que les restes de composantes, treize au total se partagent de manière disproportionnelle, 2,16% de la concentration massique totale de l'échantillon tel que: TiO_2 [0,984%] > BaO [0,568%] > Nb_2O_5 [0,142%] > RuO_2

[0,120%] > ZnO [0,114%] > SrO [0,0796%] > CuO [0,0664%] > ZrO [0,0601%] > V₂O₅ [0,055%] > Re₂O₇ [0,0024%] > HgO [0,009%] > Sc₂O₃ [0,0076%] > Ti₂O₃ [0,002%].

Le tableau des fréquences indique que la plupart des composantes ont été dosées dans les cinq échantillons notamment Al₂O₃, SiO₂, CaO, TiO₂, V₂O₅, Cr₂O₃, Fe₂O₃, CuO, ZnO, ZrO et BaO. Les composants K₂O, Sc₂O₃ et RuO₂ ont été dosés dans trois échantillons, tandis que Nb₂O₅ a été testé dans deux et HgO, Ti₂O₃ et Na₂O dans un seul échantillon.

Du point de vue de la variabilité des concentrations des composantes dans les échantillons des différents prélèvements, il se dégage que les concentrations des composantes semblables dans des échantillons différents se regroupent bien autour de leurs moyennes respectives avec des écarts types vraisemblablement inférieurs à leurs moyennes respectives. Cependant, cet aspect de chose n'est pas à prendre comme tel, étant donné que beaucoup de composantes se présentent avec des concentrations à l'échelle de trace.

Que faut-il retenir en définitif de la composition chimique globale des scories de ces trois fonderies de la mitraille ? Quels sont les liens qui existent entre leurs différentes compositions ? Le paragraphe suivant va permettre de répondre à ces questions.

3.2.4 CORRÉLATION ENTRE CONTENUS DES SCORIES DES TROIS FONDERIES DE LA MITRAILLE

Le tableau 2 ci-après rassemble les données utiles pour démontrer les différentes corrélations existantes entre les compositions chimiques relatives des scories de trois fonderies en examen.

Tableau 2. Comparaison des concentrations massiques relatives des scories de trois fonderies

| | MgO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | K ₂ O | CaO | TiO ₂ | V ₂ O ₅ | Cr ₂ O ₃ | MnO | Fe ₂ O ₃ | CuO | ZnO | SrO | ZrO ₂ |
|---------|-----|--------------------------------|------------------|------------------|-------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------|-------|------------------|
| WAN S | | 5,92 | 42,6 | 0,12 | 8,14 | 0,8 | 0,09 | 1,473 | 15,4 | 24,44 | 0,07 | 0,21 | 0,2 | 0,04 |
| FAM | 0,6 | 7,9 | 30,1 | 0,2 | 5,2 | 0,74 | 0,08 | 1,72 | 9,65 | 27,43 | 0,1 | 0,44 | 0,2 | 0,04 |
| BNPR | | 16,2 | 34,4 | 0,13 | 5,4 | 0,98 | 0,25 | 1,34 | 21,3 | 15,93 | 0,07 | 0,11 | 0,1 | 0,06 |
| Moyen | 0,2 | 10,01 | 35,7 | 0,15 | 6,247 | 0,84 | 0,14 | 1,511 | 15,45 | 22,6 | 0,08 | 0,253 | 0,167 | 0,047 |
| Ecartyp | | 5,454 | 6,351 | 0,044 | 1,643 | 0,1249 | 0,0954 | 0,193 | 5,825 | 5,9667 | 0,017 | 0,169 | 0,058 | 0,012 |
| Max | 0,6 | 16,2 | 42,6 | 0,2 | 8,14 | 0,98 | 0,25 | 1,72 | 21,3 | 27,43 | 0,1 | 0,44 | 0,2 | 0,06 |
| Min | 0,6 | 5,92 | 30,1 | 0,12 | 5,2 | 0,74 | 0,08 | 1,34 | 9,65 | 15,93 | 0,07 | 0,11 | 0,1 | 0,04 |

Suite

| | Nb ₂ O ₅ | BaO | NiO | Rb ₂ O | La ₂ O ₃ | Eu ₂ O ₃ | Sc ₂ O ₃ | RuO ₂ | Re ₂ O ₇ | Br | Au | Ti ₂ O ₃ | HgO | Na ₂ O |
|---------|--------------------------------|-----|-------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-------|---------|--------------------------------|-------|-------------------|
| WAN S | 0,043 | 0,4 | 0,01 | | | | 0,006 | 0,162 | 0,024 | | 0,01 | 0,004 | | |
| FAM | 0,027 | 0,5 | 0,01 | 0,0002 | 0,0002 | 0,128 | 0,0002 | 0,052 | 0,006 | 0,004 | | | | |
| BNPR | 0,016 | 0,6 | | | | | 0,008 | 0,122 | 0,03 | | | 0,004 | 0,01 | 3,2 |
| Moyen | 0,0287 | 0,5 | 0,007 | 0,00007 | 0,00007 | 0,0427 | 0,00473 | 0,112 | 0,02 | 0,001 | 0,00333 | 0,003 | 0,003 | 1,067 |
| Ecartyp | 0,0136 | 0,1 | | | | | 0,00405 | 0,0557 | 0,0125 | | | | | |
| Max | 0,043 | 0,6 | 0,01 | 0,0002 | 0,0002 | 0,128 | 0,008 | 0,162 | 0,03 | 0,004 | 0,01 | 0,004 | 0,01 | 3,2 |
| Min | 0,016 | 0,4 | 0,01 | 0,0002 | 0,0002 | 0,128 | 0,0002 | 0,052 | 0,006 | 0,004 | 0,01 | 0,004 | 0,01 | 3,2 |

3.2.4.1 DU POINT DE VUE QUALITATIF

L'analyse mathématique de ce tableau programmatique indique que:

- WAN-SHENG \cap FAMECO \cap BENIPROS = {MgO, Al₂O₃, SiO₂, K₂O, CaO, TiO₂, V₂O₅, Cr₂O₃, MnO, Fe₂O₃, CuO, ZnO, SrO, ZrO₂, Nb₂O₅, BaO, NiO, Rb₂O, La₂O₃, Eu₂O₃, Sc₂O₃, RuO₂, Re₂O₇, Br, Au, Ti₂O₃, HgO, Na₂O}

Cet ensemble de vingt-six oxydes et de deux composants élémentaires représente la composition typique des scories produites par les fonderies qui recyclent la mitraille.

- WAN-SHENG \cap FAMECO \cap BENIPROS = {CaO, Cr₂O₃, MnO, CuO, Fe₂O₃, SiO₂, K₂O, TiO₂, V₂O₅, ZrO, ZnO, Sc₂O₃, RuO₂, Nb₂O₅, BaO, Re₂O₇, Al₂O₃}.

Ce qui veut dire que les trois fonderies ont en commun beaucoup de composants surtout celles à abondances plus ou moins élevée et qui ont été dosés dans presque tous les échantillons. Il s'agit des composants qui ont été dosés littéralement dans les scories des toutes les trois fonderies en examen.

- $FAMECO \setminus WAN-SHENG \cup BENIPROS = \{MgO, La_2O_3, Rb_2O_3, Eu_2O_3, Br\}$

Ce qui signifie que les scories de la fonderie FAMECO paraissent robustes avec quatre composantes de plus que la fonderie WAN-SHENG et trois la fonderie BENIPROS;

- $WAN-SHENG \setminus FAMECO \cup BENIPROS = \{Au\}$

Comme pour dire que l'or a été détecté uniquement dans les scories de la fonderie WAN-SHENG;

- $WAN-SHENG \cup BENIPROS \setminus FAMECO = \{Ti_2O_3\}$

Ce singleton a été dosé dans les scories de deux fonderies WAN-SHENG et BENIPROS;

- $BENIPROS \setminus WAN-SHENG \cup FAMECO = \{Na_2O, HgO\}$ indiquant que l'oxyde de sodium et l'oxyde de mercure ont été repérés dans les scories de la fonderie BENIPROS; et enfin

- $FAMECO \cap BENIPROS \setminus WAN-SHENG = \{NiO\}$

Signifiant que ce singleton a été dosé dans les scories des fonderies FAMECO et BENIPROS.

3.2.4.2 DU POINT DE VUE SEMI-QUANTITATIF

Le constant fait du tableau 2 est que les compositions chimiques des scories de trois fonderies se neutralisent autour de la moyenne 6 car, la fonderie BENIPROS comprend sept composants dont les valeurs moyennes sont plus élevées, la fonderie FAMECO en comprend six et en dernière position la fonderie WAN-SHENG qui en compte cinq. En termes de composants majeurs c'est-à-dire ceux qui ont la concentration massique supérieure ou égale à l'unité, la fonderie WAN-SHENG en compte deux à savoir SiO_2 et CaO , la fonderie FAMECO en compte trois notamment Al_2O_3 , Cr_2O_3 et Fe_2O_3 tandis que la fonderie BENIPROS en compte deux qui sont MnO et TiO_2 .

Sur le plan toxicologique on peut constater que la fonderie WAN-SHENG a la suprématie de trois ETM à savoir le strontium (Sr), le niobium (Nb) et le ruthénium (Ru); la fonderie FAMECO en compte cinq qui sont l'aluminium (Al qui n'est pas forcément sur la liste des ETM mais sélectionné pour sa dangerosité comme nous aurons à le démontrer plus tard), le chrome (Cr), le fer (Fe), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) tandis que la fonderie BENIPROS en renferme six (6) notamment le titane (Ti), le vanadium (V), le manganèse (Mn), le zirconium (Zr) le scandium (Sc) et le rhénium (Re).

Comme pour le cas des boues des fonderies, la composition chimique globale des scories reflète la composition des matières premières, celle des ajouts et l'efficacité du processus de décantation de la fraction métallique elle-même [3, 4 et 5]. De la même sorte [6] constate que la rigueur adoptée lors du choix des matières premières pour la production de la fonte permet l'obtention d'un surnageant stable chimiquement.

D'après notre observation et comme nous l'avons souligné précédemment, la société FAMECO achète des quantités importantes de mitrilles et partant, la rigueur de la qualité n'est pas sa préoccupation primaire comparée à la société BENIPROS qui opère des choix judicieux de toutes les cargaisons à leur portée. S'agissant de la société WAN-SHENG, elle ne fait pas non plus de choix laborieux de la qualité de la mitraille à acheter, néanmoins, des quantités achetées sont tellement faibles que le degré d'appréciation pourrait en être influencé.

3.3 CONTENUE GLOBAL DES BOUES ET SCORIES DES FONDERIES DE LA MITRAILLE/CORRÉLATION ENTRE COMPOSITION CHIMIQUE DES SCORIES ET BOUES DES FONDERIES DE LA MITRAILLE

Les boues et scories sont mélangées lors de leurs mises en décharge. Ainsi est-il nécessaire de déterminer les caractéristiques communes de ces matériaux au moment de leur mélange.

3.3.1 DU POINT DE VUE QUALITATIF

Nous portons dans les diagrammes ci-après les données qui indiquent le lien qu'il y a entre la composition chimique relative des boues et des scories de la mitraille.

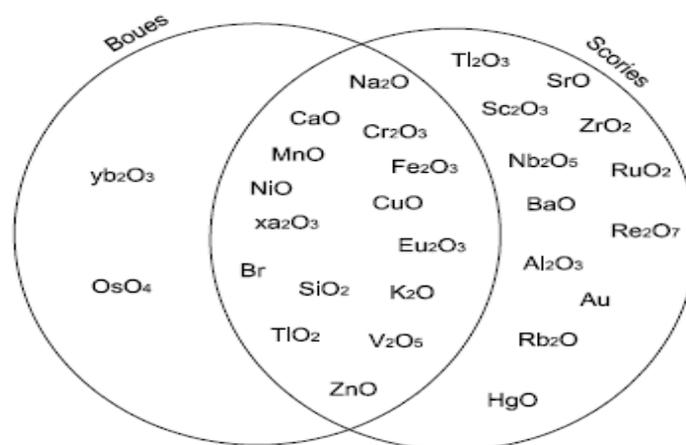


Fig. 1. Diagrammes de corrélation entre composition chimique des boues et scories

De la lecture des diagrammes ci-dessus se dégage les liens mathématiques ci-après:

$Boues \cap Scories = \{Na_2O, CaO, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, NiO, CuO, La_2O_3, Br, SiO_2, K_2O, TiO_2, V_2O_5, ZnO \text{ et } Eu_2O_3\}$.

Ce sous-ensemble constitué de quinze oxydes désigne les composants qui ont été détectés aussi bien dans les scories que dans les boues des fonderies de la mitraille kinoise.

$Boues \setminus Scories = \{Yb_2O_3, OsO_4\}$

Cet ensemble signifie que les deux composantes ci-après ont été dosées uniquement dans les boues.

$Scories \setminus Boues = \{Ti_2O_3, SrO, Sc_2O_3, ZrO, Nb_2O_5, RuO_2, BaO, Re_2O_7, Al_2O_3, Au, Rb_2O, HgO\}$

La composition des scories est beaucoup plus dense que celle des boues avec plusieurs oxydes qui différencient les deux types de matières.

$Scorie \cup Boues = \{MgO, Al_2O, SiO_2, K_2O, CaO, TiO_2, V_2O_5, Cr_2O_3, MnO, Fe_2O_3, CuO, ZnO, SrO, ZrO_2, Nb_2O_5, BaO, NiO, Rb_2O, La_2O_3, Eu_2O_3, Br, Sc_2O_3, RuO_2, Re_2O_7, Au, Ti_2O_3, HgO, Na_2O, Yb_2O_3, OsO_4, V_2O_5, ZnO\}$.

L'union forme un ensemble de composants complexe, comprenant donc les oxydes et éléments chimiques constituant l'apport probable en éléments chimiques des scories et boues des fonderies dans l'écosystème sur lesquels ou autour desquels elles seraient épandues (remblais).

Cet ensemble composite de trente et une particules témoigne de la variété de minéraux et/ou métaux lourds contenus dans la mitraille. En effet, cette composition des scories (entendu des boues) diffère d'une fonderie à une autre et d'un procédé d'extraction à un autre comme nous pouvons le constater à partir des comparaisons desquelles découlent les relations mathématiques ci-après:

Soient A = les vitrifiât des cendres d'incinération du Québec [6]; B = les vitrifiât de Boues de Montréal [6]; C = les vitrifiât de Floride [6]; D = les laitiers d'aciéries de convertisseur d'oxygène de Rio Tinto [6]; E = les scories de la filière zinc/METALEUROP Nord [5]; F = les scories de la filière plomb/METALEUROP Nord [5]; G1 = les scories du type 1 du site de Świętochłowice [7]; G2 = les scories du type 2 du site de Świętochłowice [7]; G3 = les scories du type 3 du site de Świętochłowice [7]; et H = les scories des fonderies de la mitraille de Kinshasa (notre expérience).

En comparant la composition chimique de A, B, C, D, F, G1, G2 et G3 à celle de H, il se dégage ces différentes écritures mathématiques: $\{P_2O_5, SO_3\} \in A \cap B \cap C \cap D \cap E$, $\{Co_3O_4\} \in A \cap C$, $\{As_2O_3\} \in E \cap F$, $\{MoO_3\} \in B \cap C$, $\{SnO_2\} \in A \cap B \cap C \cap F$, $\{PbO\}$, $\{BaO\} \in E \cap F$ et $\{Na_2O\} \in G1 \cap G2 \cap G3 \notin H$

Ceci peut se traduire caractériellement comme les composants chimiques ayant été détectés dans les scories d'autres types mais qui ne l'ont pas été dans les scories des fonderies de la mitraille de Kinshasa.

Par ailleurs, certains composants typiques ont été bel et bien dosés dans les scories des fonderies de la mitraille de Kinshasa sans l'être forcément dans les autres types de scories. On peut le lire à partir du langage mathématiques ci-après: $\{MgO\} \notin B$

n C, {Cr₂O₃} € G1 n G2 n G3, {NiO} € D n E n F n G1 n G2 n G3, CuO et ZnO € D n G1 n G2 n G3 et SrO n ZrO₂ n Nb₂O₅ € E n F n G1 n G2 n G3] € H

3.3.2 DU POINT DE VUE SEMI-QUANTITATIF

Tableau 3. Lien entre concentration massique des boues et scories

| Composants | Boues | Scories | Moyenne | Composants | Boues | Scories | Moyenne |
|--------------------------------|---------|---------|---------|--------------------------------|---------|---------|----------|
| Na ₂ O | 6,3 | 1,0667 | 3,683 | V ₂ O ₅ | 0,004 | 0,0723 | 0,038 |
| CaO | 0,37067 | 6,23 | 3,3 | ZnO | 0,00033 | 0,253 | 0,127 |
| Cr ₂ O ₃ | 0,2443 | 1,511 | 0,878 | Ti ₂ O ₃ | | 0,0082 | 0,004 |
| MnO | 1,47747 | 15,445 | 8,461 | Sc ₂ O ₃ | | 0,0047 | 0,002 |
| Fe ₂ O ₃ | 85,3707 | 27,313 | 56,34 | SrO | | 0,1167 | 0,058 |
| NiO | 0,01513 | 0,01 | 0,013 | ZrO ₂ | | 0,046 | 0,023 |
| CuO | 0,1324 | 0,08 | 0,106 | Nb ₂ O ₅ | | 0,0327 | 0,016 |
| La ₂ O ₃ | 0,01667 | 0,0001 | 0,008 | RuO ₂ | | 0,1113 | 0,056 |
| Eu ₂ O ₃ | 0,56467 | 0,0427 | 0,304 | BaO | | 0,497 | 0,249 |
| Yb ₂ O ₃ | 0,141 | | 0,071 | Re ₂ O ₇ | | 0,015 | 0,008 |
| OsO ₄ | 0,016 | | 0,008 | Al ₂ O ₃ | | 10,007 | 5,003 |
| Br | 0,08433 | 0,0013 | 0,043 | Au | | 0,0055 | 0,003 |
| SiO ₂ | 5,27333 | 35,98 | 20,63 | MgO | | 0,2 | 0,1 |
| K ₂ O | 0,01 | 0,135 | 0,073 | Rb ₂ O | | 0,0001 | 5,00E-05 |
| TiO ₂ | 0,067 | 0,884 | 0,476 | HgO | | 0,003 | 0,002 |

Nous lisons dans le tableau ci-dessus que les scories ont une composition chimique beaucoup plus dense que les boues. De même, des composants communs, les scories en disposent huit qui sont plus concentrés que les boues qui n'en disposent que sept.

Aussi faut-il souligner que Fe₂O₃ est l'élément le plus abondant dans les boues des fonderies de la mitraille avec une concentration massique de plus de 85%, suivi de Na₂O (6,3%), SiO₂ (5,3%) et MnO (1,5%); alors que dans le cas des scories, c'est le SiO₂ qui est le leader en concentration massique avec une estimation moyenne de 36%, suivi de Fe₂O₃ (27%), MnO (15%), Al₂O₃ (10%), CaO (6,23%), Cr₂O₃ (1,5%) et Na₂O dont la concentration est de 1,1%.

En travaillant sur les laitiers de hauts fourneaux tunisiens, Bouslama et Jelidi [8] trouvent qu'ils sont principalement composés de SiO₂ (36,7%), CaO (32,8%), Al₂O₃ (6,4%), Mn ou MnO (2%), SO₂ (1,1%), Fe ou Fe₂O₃ (0,7%) et P₂O₅ (0,001%). La somme des concentrations de composants majeurs desdits laitiers équivaut à 96,1 %, tandis que la somme de composants similaires dans les scories des fonderies kinoises de la mitraille (notre expérience) vaut 95,2 %. Le soufre (S) et le phosphore (P) n'ont pas été identifiés dans ces dernières. Par ailleurs, les concentrations de SiO₂ sont similaires dans les deux cas, tandis que des écarts de concentration sont observés pour certains composants dans les rapports suivants: [CaO] = 5½, [Al₂O₃] = 1½, [MgO] = 32/1, [MnO] = 1/8, [Fe (Fe₂O₃)] = 1/39.

Ce qui revient à dire que, comparées aux laitiers de hauts-fourneaux tunisiens, les scories des fonderies kinoises de la mitraille sont beaucoup plus riches en fer et manganèse. Pourtant le fer est le métal principal dans la composition des aciers qui sont les produits finis de ces fonderies. Qu'est-ce qui fait que les usines (fonderies) ne parviennent pas à capter la totalité de ce métal pour une production maximale et/ou qualitative de leurs produits ? Nous relevons quatre hypothèses probabilistes:

- D'emblée, ce fait serait attribuable à l'usage des technologies dépassées ou du niveau de performance faible des procédés de fusion. Dans son étude sur le comportement des scories de différentes fusions, zuljadi trouve des différences considérables entre les compositions chimiques des laitiers sidérurgiques issus de haut fourneau, de four à arc électrique et du convertisseur ld [9]. Il en est de même de richardson et al. Qui constatent des différences dans le comportement chimique des scories de forge issues de la méthode bergamasque (fin de fusion) et la méthode bergamasque (fin d'affinage) ainsi que celles de puddlage gras [10]. La composition des scories issues de l'extraction du cuivre donne des concentrations différentes selon qu'elles ont été produites à partir de haut fourneau, four à fusion flash, four à arc électrique, four à réverbère ou convertisseur peirce-smith [11, 12 et 13], il en est de même des compositions des scories issues de l'extraction du nickel [14];

- La sélection de la matière utile pour la fusion comme nous l'avons déjà démontré un peu plus loin: d'après ettlér, la composition chimique des scories peut varier de façon sensible suite à la nature et à la composition chimique du minerai (scories de première fusion) ou de métaux recyclés (scories de énième fusion) [4].
- La nature et la proportion d'ajouts utilisés pour constituer la charge, la température dans le fourneau et la vitesse de refroidissement de la coulée sont d'autres facteurs qui jouent sur la composition caractéristiques des scories [4];
- Enfin, l'inexistence de la réglementation dans le rejet des substances dangereuses dans la nature profite aux producteurs des déchets qui ne fournissent aucun effort pour se conformer et suivent la règle du moindre effort ou simplement du moins perdant.

Les scories étant classées dans la catégorie des déchets dangereux, de nombreux chercheurs se sont intéressés d'étudier leurs compositions comme nous venons de le démontrer dans les paragraphes précédentes, cependant, nombreuses de ces études concernent les scories de première fusion tandis que nous n'avons pas pu identifier celles qui se sont intéressées aux scories de seconde ou énième fusion.

4 CONCLUSION

Les boues et les scories sont d'importants déchets solides issus du processus de production métallurgique. Dans le cas de recyclage des matériaux, leur composition chimique n'est pas toujours la même dans toutes les cargaisons et productions; ce qui veut dire que les matières premières utilisées dans le processus de leur production sont toujours de compositions différentes. Il en est de même des boues des dites fonderies qui n'ont pas présenté les caractéristiques identiques. Ces compositions chimiques diffèrent aussi d'une fonderie à une autre. Ceci a été doublement attribué à la qualité des matériaux utilisés et à celle de la technologie (four).

Cet article a servi de cadre pour examiner la composition chimique des boues et scories des fonderies qui recyclent la mitraille à Kinshasa. De manière globale, les analyses de laboratoire au moyen de la spectrométrie à fluorescence X indiquent que les boues sont composées essentiellement 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 , Ti , V_2O_5 , ZnO , SrO , ZrO_2 , RuO_2 , BaO , Re_2O_7 , tandis que les scories renferment MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , K_2O , CaO , TiO_2 , V_2O_5 , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , CuO , ZnO , SrO , ZrO_2 , Nb_2O_5 , BaO , NiO , Rb_2O , La_2O_3 , Eu_2O_3 , Sc_2O_3 , RuO_2 , Re_2O_7 , Br , Au , Ti_2O_3 , Hg , Na_2O .

Les composés majeurs dans les boues des fonderies de la mitraille sont notamment le Fe_2O_3 qui renferme la plus grande concentration avec une participation de plus de 85 % de concentration massique, suivi de Na_2O [6,3 %], SiO_2 [5,3 %] et MnO [1,5 %] soit un total de concentration massique relative moyenne de 98,5 %, tandis que s'agissant des scories, SiO_2 [36 %] est le composant majeur suivi des Fe_2O_3 [27 %], MnO [15,5 %], Al_2O_3 [10 %], CaO [6,2 %], Cr_2O_3 [1,5 %] et Na_2O [1,1 %] faisant une concentration massique moyenne équivalente de 97,2 % du poids relative de la scorie.

Par ailleurs, lors de leurs mis en commun (mélange pour la décharge), il ressort que la participation des boues en terme de concentration massique est de 28 %, tandis que les scories contribuent en plus grande partie à 72 % des substances chimiques totales pouvant être inoculées dans le milieu ou autour du milieu où elles sont déposées.

Il s'agit vraisemblablement des composés plus ou moins dangereux qui peuvent mettre en mal le milieu accueillant ces rebuts. Ce qui prouve le caractère dangereux des boues et scories des fonderies en général et des fonderies de la mitraille en particulier.

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.

REFERENCES

- [1] International Finance Corporation (2007), Directives environnementales, sanitaires et sécuritaires pour les fonderies, dans <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>.
- [2] Mahé-Le Carlier et al., 1999, typologie et caractérisation des scories de réduction de la métallurgie du fer, *ArchéoSciences*, revue d'Archéométrie.
- [3] Mahé-Le Carlier C., 1997. Caractérisation pétrographique et chimique d'analogues de déchets vitrifiés actuels: les scories de la métallurgie ancienne, Etude de l'altération naturelle et expérimentale, Thèse de doctorat, Université de Lille, 337 p.
- [4] Ettler V., Zdenek J., Touray J-C., Jelinek E., 2000. Zinc partitioning between glass and silicate phases in historical and modern lead-zinc metallurgical slags from the Pribram district, Czech Republic, *Geomaterials*, 245-250.
- [5] Deneele D., 2002. Caractérisation, Simulations expérimentales et thermodynamiques de l'altération de déchets vitreux, Thèse de doctorat, Université de Lille I, 168 p.
- [6] MURAZ L., 2015. Valorisation des scories cristallines dans le béton de ciment, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Canada.
- [7] Zainoun Katarzyna, 2005. Caractérisation pétrographique, chimique et minéralogique de scories pyrométallurgiques (Haute Silésie, Pologne): étude de la mobilisation du zinc et du plomb lors de l'altération supergène, Thèse de doctorant, Ecole doctorale Science, Université de Limoges.
- [8] Bouslama, S. et Jelidi, A., 2003. Hydraulic concrete development using Tunisian blast furnace slag. *Materials and Structures/Matériaux et Constructions*, volume 36, numéro 255, p. 59-67. .
- [9] BRGM, 1993. Échantillonnage de sols pour caractérisation d'une pollution: guide méthodologique, rapport, inédit.
- [10] Zulfiadi Zulhan, 2013. « Iron and steelmaking slags: are they hazardous waste? », Institut technologique de Bandung, novembre 2013, in Wikipedia.
- [11] Richardson F.D. et Jeffes J.H.E., 1989. « Sydney Thomas invention and its later impact », *MASCA research papers in science and achaeology*, vol. 6.
- [12] Snyder M. K. et Shobe F. D., 1980. Source Category Survey: Secondary Copper Smelting and Refining Industry, EPA, p. 26.
- [13] Marc E. Schlesinger, Matthew J. King, A. K. Biswas et William G. I. Davenport, 2002. *Extractive Metallurgy of Copper*, Pergamon, 4ème éd. (ISBN 0-08-044029-0), p. 61.
- [14] Marc E. Schlesinger, Matthew J. King, Kathryn C. Sole et William G. I. Davenport, 2011. *Extractive Metallurgy of Copper*, Elsevier, 5e éd. (ISBN 978-0-08-096789-9), p. 76-77.
- [15] Frank K. Krundwell, Michael S. Moats, Venkoba Ramachandran, Timothy G. Robinson et William G. Davenport, 2011. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum, Group Metals*, Elsevier, 610 p.