

Caractérisation physico-chimique et agronomiques des boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa

**Ruffin Ngadi NSANDJI^{1*}, Crispin Mulaji KYELU², Clément Mukendi MUKENDI¹,
Idrissa Assumani ZABO⁴, Jean-Fausttin Kindela Fadjay BANDA¹ et Lyna MUKWA³**

¹ *Université Pédagogique Nationale, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Kinshasa, RD Congo*

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

³ *Université Pédagogique Nationale, Faculté d'Agronomie et Clinique des Plantes, Kinshasa, RD Congo*

⁴ *Université Pédagogique Nationale, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Kinshasa, RD Congo*

(Reçu le 27 Mai 2023 ; Accepté le 24 Août 2023)

* Correspondance, courriel : ngadiruffin@gmail.com

Résumé

Cette étude a pour but d'évaluer les boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa. Pour ce faire, une caractérisation physico-chimique et agronomique a été effectuée dans les boues de trois usines de production d'eau dont Ndjili, Lukunga et Lukaya. Pour y arriver les différentes boues ont été analysées d'une part par Spectroscopie UV —visible Hach et par fluorescence des rayons-X pour les éléments majeurs et de saturation et d'autre part, par ICP-MS pour les éléments traces métalliques toxiques. La limite de détection et la reproductibilité de ces méthodes ont été confirmées. Les résultats obtenus indiquent les boues de potabilisation d'eau de Kinshasa contiennent beaucoup d'éléments mais les plus majoritaires sont : le silicium, l'aluminium, le fer, et le phosphore. A des concentrations inférieures ou égales à 1, le calcium, magnésium, azote, soufre, et le sodium. Il y a d'éléments traces métalliques et toxiques dont le Mn, Cr, Zn, Cu, Cd, Ni, As, Pb, Sr et Rb mais à des concentrations inférieures aux normes d'utilisation de maraîchage et élevées pour le rejet dans milieu naturel. Les éléments présents dans les boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa ne proviennent que de l'eau brute sauf l'aluminium, et le soufre qui proviennent en grande partie du coagulant sulfate d'alumine. Aluminium est à l'état de précipité à cause du pH des boues supérieur à 5,5. Les boues de Lukaya peuvent être utilisées directement comme fertilisant chimique et celles de Ndjili et Lukunga nécessitent un apport calcique pour remonter le pH dans les conditions favorable à des cultures maraîchères.

Mots-clés : *caractérisation, physico-chimie, agronomie, boues, potabilisation, eau.*

Abstract

Physico-chemical and agronomic characterization of water drinking sludge from Kinshasa factorie

The aim of this study was to evaluate the sludge used in the potabilization of Kinshasa's water plants. To this end, a physico-chemical and agronomic characterization was carried out on sludge from three water production plants : Ndjili, Lukunga and Lukaya. To achieve this, the various sludges were analyzed by UV-Visible Hach Spectroscopy and X-ray fluorescence for major and saturation elements, and by ICP-MS for toxic trace metals. The detection limits and reproducibility of these methods were confirmed. The results obtained indicate that Kinshasa's potabilization sludge contains many elements, but the most prevalent are: silicon, aluminum, iron and phosphorus. At concentrations less than or equal to 1, calcium, magnesium, nitrogen, sulfur and sodium. Trace metals and toxic elements include Mn, Cr, Zn, Cu, Cd, Ni, As, Pb, Sr and Rb, but at concentrations below those required for market gardening and above those required for discharge into the natural environment. The elements present in Kinshasa's potabilization sludge come only from raw water, with the exception of aluminum and sulfur, most of which come from the coagulant alumina sulfate. Aluminum is a precipitate due to the sludge's pH of over 5.5. Sludge from Lukaya can be used directly as a chemical fertilizer, while sludge from Ndjili and Lukunga requires calcium to raise the pH in conditions favorable to market gardening.

Keywords : *characterization, physico-chemistry, agronomy, sludge, potabilization, water.*

1. Introduction

La demande de la population de Kinshasa en eau potable est considérable mais la production ne couvre pas cette demande. La quantité d'eau produite à Kinshasa est de l'ordre de 700.000 m³ /jour par rapport à celle attendue (plus de 1.000.000 m³/jour). Cette production engendre les boues dans son processus. Pour potabiliser l'eau brute de surface, on procède par la clarification selon la **Figure 1** ci-dessous :

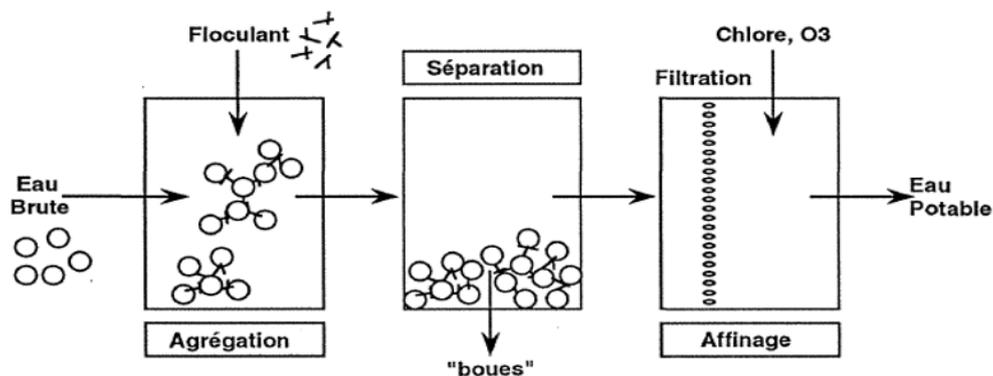


Figure 1 : *Schéma de Clarification d'eau*

Cette clarification passe par l'opération de coagulation floculation qui permet d'augmenter la taille des particules colloïdales par déstabilisation des particules en suspension puis formation des floes par adsorption et agrégation. Les particules colloïdales en solution sont chargées négativement, l'addition d'un coagulant

cationique conduit à la neutralisation de leurs charges répulsives les maintenant en suspension. Le sulfate d'alumine étant un coagulant le plus utilisé. Sa mise en solution se déroule selon *l'Équation* générale ci-dessous [1] :



Cette potabilisation de l'eau brute s'accompagne de la formation d'une certaine quantité de déchets que l'on appelle "boues de potabilisation d'eau". Le volume de ces boues atteint en moyenne 10 % du volume d'eau traité ; leur forme liquide (teneur en matières sèches généralement inférieure à 2 %) et leur nature essentiellement inorganique permettaient jusque récemment leur rejet direct dans les eaux de surface [2]. Les boues sont généralement très pauvres en matières dégradables par rapport aux boues urbaines (50 à 70 % de matières organiques) générées par les stations d'épuration des eaux usées [1]. Outre l'hydroxyde d'alumine (Al(OH)₃), les boues contiennent d'autres composés issus de la croûte terrestre dans les proportions variables en fonction de la saison et de composition géologique du terrain traversé par l'eau brute (argile, micro-organismes, matières organiques et inorganiques). La composition physico-chimique des boues varie selon l'origine des eaux, la période de l'année, le type de traitement ainsi que le conditionnement [3]. Les boues purgées du décanteur constituent 85 à 90 % de matière en suspension de l'eau floculée. Par contre, les eaux de lavage des filtres, bien qu'importantes en volume, représentent une masse très faible de matières en suspension [1]. La mauvaise gestion des déchets est la principale source des maladies dues à un environnement pollué et insalubre. De même, les boues de décantation rejetées dans le milieu naturel (mer, rivières, sol), peuvent générer de nombreuses maladies hydriques ainsi que des problèmes environnementaux [4, 5]. Cette mauvaise gestion de leurs déchets engendre la pollution et affecte les eaux brutes à l'instar des rejets de fientes de volailles [6]. Les boues de potabilisation d'eau potable de France considérées comme déchets sont réparties comme suit : 25 % vont dans les réseaux d'assainissement, 15 - 25 % dans le centre d'enfouissement, 0-10 % dans l'épandage et 50 % rejet direct dans le milieu naturel. Mais en RDC, 100 % des boues produites sont rejetées directement le milieu naturel [7]. La Regideso est également confrontée à ce problème de conservation des boues usagées. Leur recyclage s'offre comme une des solutions susceptibles d'économiser des ressources naturelles et les produits de traitement ainsi limiter les pressions sur l'environnement. Les boues ont-elles une valeur agronomique sur les sols maraîchers ? La présente étude a pour objectif :

- de caractériser les boues de potabilisation d'eau des usines de la Regideso/ Kinshasa
- Déterminer les valeurs agronomiques pour une utilisation efficiente.
- Evaluer les éléments limitant leur utilisation en maraîchage

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

2-1-1. Site d'échantillonnage des boues

Les usines de potabilisation d'eau de Kinshasa relèvent de la Direction de Production de Kinshasa/Regideso en République Démocratique du Congo. Ces usines sont pourvoyeuses des boues sous étude. Les différentes usines de potabilisation produisent des boues dans la chaîne de traitement. Chaque usine a des caractéristiques propres conformes à l'eau brute captée, aux ouvrages, aux équipements utilisés et les méthodes d'évacuation des boues.

- L'usine de Ndjili située dans la commune de Limete. Mise en service depuis 1972 et la deuxième et troisième phase a été mise en service respectivement en 1984 et 2008. Elle produit 330.000 mètre-cube d'eau par jour, d'où il rejette 33.000 mètre-cube de boues/jour, 990.000 mètre-cube / mois et 11.880.000 mètre-cube/ an. A des décanteurs cyclo-coniques.
- Usine de Lukunga située dans la commune de Ngaliema, construite en 1939, utilise l'eau de la rivière Lukunga et du fleuve Congo rarement avec une capacité de 52.000 m³/jour. Alors rejette 5.200 mètre-cube/jour, 156.000 mètre-cube/ mois et 1.872.000 mètre-cube/ an
- L'Usine de Lukaya, située dans la commune de Mont Ngafula, construite en 2006 produit 36.400 mètre-cube / jour. Rejetant au moins 3.640 mètre-cube/jour, 109.200 mètre-cube/ mois et 1.310.400 mètre-cube/ an. A des décanteurs rectangulaires.

2-1-2. Situation géographique

Les coordonnées géospatiales des différentes usines sont représentées dans le **Tableau 1** ci-après :

Tableau 1 : Coordonnées géospatiales des différentes usines de potabilisation d'eau

Sites	Code	Altitude	Latitude (S)	Longitude (E)
NDJILI	BDN	295 m	05°30'39,8"	95°16'09,5"
LUKUNGA	BDLK	264 m	04°21'52,8"	015°12'54,3"
LUKAYA	BDL	324 m	04°28'55"	015°16'14,6"

Sur base des données géographiques de terrain, la carte ci-dessous a été élaborée à partir du logiciel QGIS :

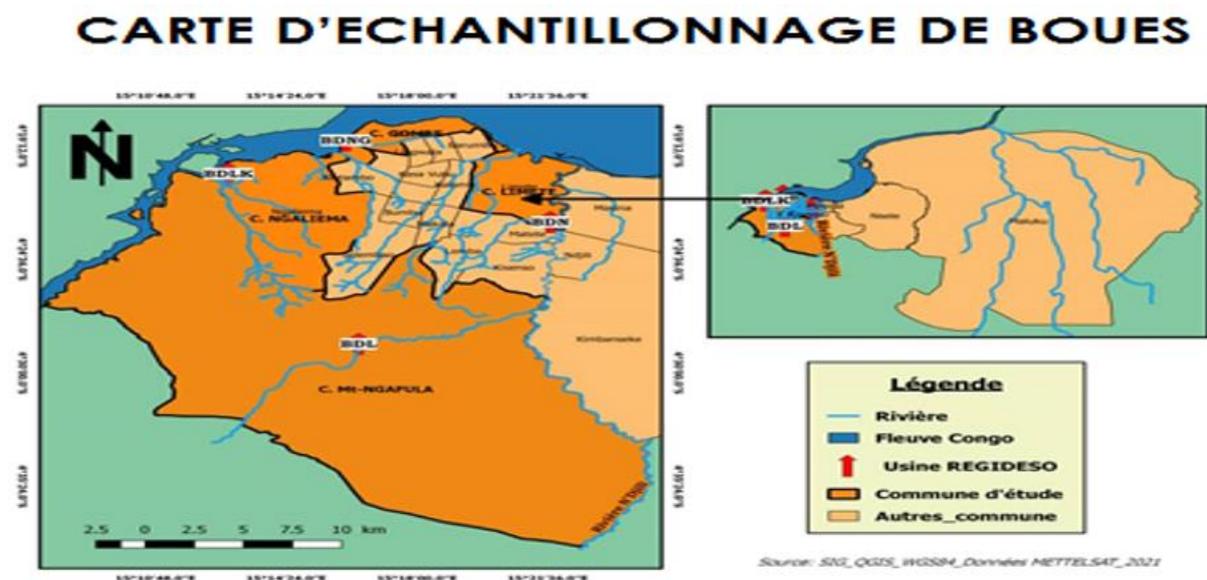


Figure 2 : Carte d'échantillonnage des boues de potabilisation d'eau

2-2. Échantillonnage

Trois échantillons des boues de potabilisation provenant de trois usines de Kinshasa ont été prélevés à l'aide des burettes après purge décanteur et mis dans des plateaux en plastiques. Un quartage a été effectué 8 jours après, pour avoir les échantillons représentatifs. Et un échantillon de sulfate d'alumine a été prélevé dans différents magasins des produits chimiques des usines de Kinshasa. Les échantillons des boues et sulfate d'alumine ont été conditionnés dans des sachets et ont été directement amenés au Laboratoire de Pédologie de la Faculté d'Agronomie de l'Université de Kinshasa pour préparation des échantillons (séchage à l'air libre, etc.), analyses des paramètres physico-chimiques et agronomiques et envoyés au Laboratoire du Centre des Recherches Energies Nucléaires de Kinshasa (CREN K) et au Laboratoire « United scientific » d'analyse des pierres précieuses et aliments de Lubumbashi.

2-3. Méthodes d'analyses

L'analyse granulométrique s'est faite par la méthode à l'hydromètre à chaîne et permet la dissociation du matériau jusqu'à l'état de particules élémentaires ce qui implique la destruction des agrégats. La matière organique contenue dans les boues est oxydée par l'eau oxygénée (H_2O_2 à 30 %) à chaud et prétraitement à l'acide chlorhydrique dilué (HCl 0,01N). La fraction sableuse a été séparée par tamisage (crible 63 ou $5\mu m$) et celle argilo-limon a été déterminée par la méthode de Köhn. Cette méthode consiste à la dispersion avec la solution de hexamétaphosphate de sodium à 5 % et les différentes fractions ont été identifiées selon $USA_{textural triangle}$ et est exprimé en % massique ci-après :

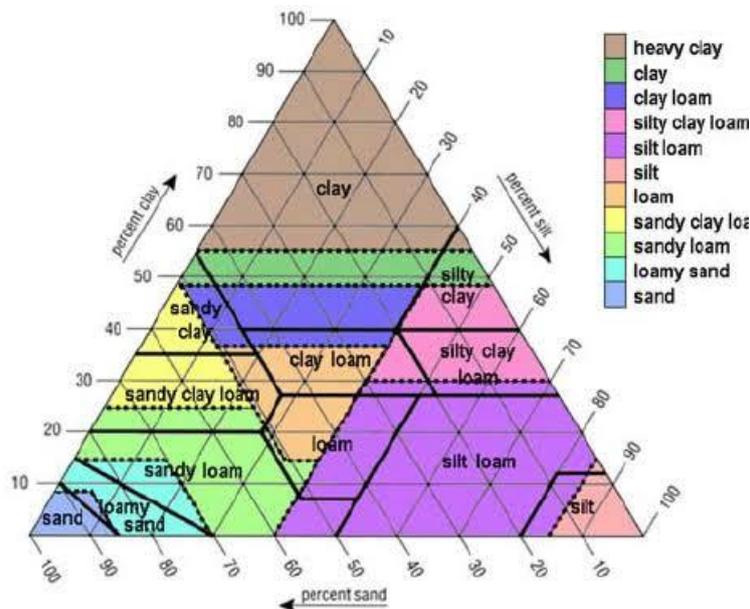


Figure 3 : Triangle texturé selon $USA_{textural triangle}$

La siccité est la masse d'un échantillon de boues sèches sur un volume total, était mesurée par la méthode de cylindre sur les échantillons non perturbés et frais contenant le poids sec constant à $105^{\circ}C$ et le volume des cylindres de prélèvement utilisé. L'humidité est déduite à partir de la siccité obtenue. Le pH a été mesuré dans une suspension sol/eau dans le rapport 1/2,5 à température ambiante à l'aide d'un pH-mètre « à électrodes pH combinées » de verre de marque Consort 532. 10 g d'un échantillon tamisé

(sol, boue et fiente) sont placés dans un erlenmeyer, mis en contact avec 50 mL d'eau distillée et placés sur une enceinte d'agitation pendant 2 heures. La mesure est alors effectuée sur le surnageant, après un temps d'équilibre d'une demi-heure (dans un bécher après lavage ou décontamination avec 10 mL du même surnageant. Les matières organiques sont calculées sur base des valeurs de carbone organique obtenu selon la méthode de Walkley et Black. (%MO = %CO x 1,724). Le carbone organique des boues est déterminé par la norme ISO 14 235. Il s'agit d'une oxydation du carbone organique des boues par le bicarbonate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) en excès, en milieu acide (H_2SO_4) à chaud. Pour cela, 150 mg d'échantillon est mélangé à 5 mL d'une solution de bicarbonate de potassium $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ et 7,5 mL d' H_2SO_4 Concentré. Après centrifugation (10 mn à 3000 —Bioblock scientifique et type sigma 2-15) et la filtration à $0,45 \mu\text{m}$. le filtrat obtenu est dosé à 580 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV visible HACH. Le dosage se fait grâce à une courbe d'étalonnage établie à partir du glucose, choisie comme référence à la composante organique. La capacité d'échange cationique représente le potentiel maximum d'une boue à fixer les cations dans les sols. C'est la somme d'ensemble des places disponibles sur les charges négatives de colloïdes de la boue pour la fixation des cations (H^+ , K^+ , Na^+ , $Ca^{+2}Mn^{2+}$, Fe^{3+} , et Al^{3+}). Elle est déterminée par la méthode au chlorure de cobalt hexamine $[Co(NH_3)_6Cl_3]$ selon la norme NF X 31-130 [8]. Le principe repose sur le fait que les ions cobalthexamine $Co(NH_3)_6^{+3}$ adsorbent à la surface d'une boue et déplacent ainsi les cations retenus par le support. La mesure de CEC a nécessité 5 g de boue, mis en suspension dans 25 mL d'une solution de $Co(NH_3)_6Cl_3$ à $0,016 \text{ mol L}^{-1}$. Agité pendant 3H au centrifuge 14mn à 3000 —Bioblock Scientif et type sigma 2-15, puis filtré à $0,45 \mu\text{m}$ les ions $Co(NH_3)_6^{+3}$ en excès, sont déterminés par colorimétrie à 470 nm, à l'aide d'un spectrophotomètre UV visible HACH. La CEC est exprimée en méq/100g de sol. Une courbe d'étalonnage établie à partir des 5 solutions étalons (0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 ; et 0,05). Le dosage du phosphore par la méthode de Bray, cela se passe par la complexation par fluorure d'ammonium qui se lie au phosphore.

Le dosage de ce dernier, se fait par spectrophotomètre avec le bleu de molybdène. Le dosage de l'azote total par méthode de Kjeldahl. La teneur en cation échangeable a été déterminée selon la norme NF X31-161 (Afnor, 2004). 5 g de boue sont soumis en suspension d'acétate d'ammonium 1 mol/L ajustée le $pH = 7$ à l'aide de l'acide acétique à mol/L o ammoniacque 1 mol/L. Le mélange est agité pendant 1H (agitateur magnétique orbital 1 KA Labor technik KS 501-digital model -150 tours/min), centrifuge 14mn à 3000 — Bioblock scientifique et type sigma 2-15, puis filtré à $0,45 \mu\text{m}$. le dosage est réalisé par spectrophotomètre UV visible HACH reposant sur la loi de Beer—Lambert dont la longueur d'onde de chaque élément associé à sa gélule (tampon). Les éléments de saturation et ceux majeurs ont été réalisés par Fluorescence —X du CREN-K un échantillon des boues et sulfate d'alumine ont été chauffés à 105°C , refroidi et broyés et tamisés avec un tamis à 2mm. 4 g de l'échantillon et associé à 1 g de CEREOX puis formés les pastilles à l'aide de pastilleuse. Les pastilles obtenues sont analysées au Spectromètre à fluorescence X et effectuées sur chaque face de pastille pour obtenir la composition chimique de chaque pastille et les différentes proportions et les résultants sont exprimés en %. Et Les échantillons d des boues et sulfate d'alumine ont été réalisés par mise en solution au Laboratoire « United Scientific » de Lubumbashi. Les échantillons ont été pesés et séchés à l'étuve à une température de 60°C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Après séchage, les échantillons ont été pesés, broyés et tamisés séparément à 2 mm. Prélever 0,5g de l'échantillon de boues et mettre solution avec le mélange de 6 mL de l'eau oxygénée (H_2O_2) et 6 mL de l'acide nitrique (HNO_3) dans un DigiPREP à une température de 95°C pendant 3 heures. Le dosage des éléments traces métalliques et toxiques a été réalisé par Spectrométrie de masse avec plasma à couplage induit (ICP-MS) de marque Varian. Les résultats obtenus sont exprimés en mg/Kg.

2-4. Méthodes statistiques

- Le test de Dixon a été effectué pour éliminer les valeurs aberrantes dans la série statistique
- Le test de deux moyennes expérimentales a été effectué pour évaluer s'il y a la présence des erreurs systématiques entre deux mesures ou deux méthodes.
- Le test de deux variances (test de Fischer-SNEDECOR) a été effectué pour évaluer la précision des mesures entre deux méthodes.
- L'étude de la régression et la corrélation a été effectuée en passant par l'équation de la droite. Le contrôle de l'équation de la droite a été effectué pour évaluer la régression et déterminer l'intensité du lien entre deux paramètres (Corrélation). Ce test a permis de déterminer la mobilité d'ions présents dans les boues en les corrélant à la capacité d'échange cationique.
- T de Student a permis de comparer les paramètres des différentes boues.

3. Résultats

3-1. Paramètre physiques des boues

3-1-1. La siccité et l'humidité des boues de potabilisation d'eau

Les propriétés physiques des boues dont la siccité, l'humidité et la consistance sont consignées dans le **Tableau 2** ci-dessous :

Tableau 2 : Propriétés physiques des boues

Echantillon	Siccité	Humidité	Consistance
BDL	21 %	79 %	Boues pâteuses
BDND	7 %	93 %	Boues liquides
BDLUK	9 %	91 %	Boues liquides

Ce **Tableau** montre que les boues de Lukaya ont une consistance pâteuse par rapport à leur siccité variant entre 10 à 25 % et celles de Ndjili et Lukunga ont une consistance liquide car leur siccité varie entre 0 à 10 %.

3-1-2. Texture des boues

Les résultats de la texture des boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa sont inscrits dans le **Tableau 3** ci-dessous :

Tableau 3 : Granulométrie des boues

	Sable	Limon	Argile	Observation
BDL	50,95	30,75	18,30	Sablo-argileux
BDND	79,84	14,6	5,56	Sablo-limoneux
BDLUK	69,69	22,3	8,3	Sable-limoneux

Comme l'indique le **Tableau 3**, les boues de potabilisation d'eau de Lukaya ont une texture sablo-argileux tandis que celles de Ndjili et Lukunga sont sablo-limoneux.

3-2. Paramètres physico-chimiques

Le **Tableau 4** présente les résultats des paramètres physico-chimiques des boues de potabilisation d'eau dont le pH, le carbone organique, les matières organiques et la capacité d'échange cationique.

Tableau 4 : Paramètres physico-chimiques des boues

	pH		CO		MO		CEC	
	Mesure	CV %						
BDL	7,00 ± 0,0	0,00	3,08 ± 0,00	0,00	5,31 ± 0,00	0,00	4,26 ± 0,19	0,19
BDND	6,05 ± 0,03	0,54	3,07 ± 0,10	3,17	5,23 ± 0,40	7,67	3,56 ± 0,16	4,37
BDLUK	6,08 ± 0,06	1,07	3,30 ± 0,19	5,90	5,68 ± 0,34	5,91	4,63 ± 0,35	7,57

Les valeurs aberrantes ont été écartées du pH, C.O et M.O respectivement 6,97 ; 3,05 et 5,26 dans les boues de Lukaya. Les précisions dans tous les cas sont significatives car leurs coefficients de variance est inférieur à 10. Il ressort de ces résultats que le pH de boues de Lukaya est plus élevé que les autres boues, tandis que celui de boues de Ndjili est faible. Mais les boues ont un pH favorable à l'amendement de sol maraîcher. Les différentes teneurs moyennes en C.O obtenues pour les boues varient de 3,07 % pour celles Ndjili à 3,3 % pour l'usine de Lukunga. Les valeurs moyennes de matières organiques dans les boues de potabilisation d'eau varient de 5,23 % pour celles de Ndjili à 5,68 % pour l'usine de Lukunga. Les valeurs de carbone organique dans les différentes boues de potabilisation d'eau sont très élevées par rapport à 2,4 % (fertilité élevée). Ceci indique que les boues de potabilisation d'eau peuvent améliorer la rétention en eau du sol et affinent les particules en formant des agrégats solides. La Capacité d'échange cationique des boues varie entre 3,56 mg/100g (Ndjili) et 4,63 mg/100g (Lukunga). Ceci indique une forte mobilité d'ions dans les boues.

3-3. Des cations échangeables

Le **Tableau 5** indique les bases échangeables dans les boues de potabilisation d'eau.

Tableau 5 : Cations échangeables dans les boues

	Na ⁺		Mg ²⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Fe ³⁺		Al ³⁺		Mn ²⁺	
	Mesure %	CV %	Mesure %	CV%	Mesure %	CV%	Mesure %	CV%	Mesure %	CV%	Mesure %	CV%	Mesure mg/kg	CV%
BDL	0,8 ± 1,7	210	0,23 ± 0,0	6,8	0,5 ± 0,06	12	0,8 ± 0,03	4,5	9,8 ± 2,0	21	18,55 ± 0,0	5,8	251 ± 25	10
BDND	0,78±0,02	2,48	0,52±0,01	1,75	0,69±0,01	0,94	0,16±0,04	25,53	4,99±0,08	1,58	22,3±0,19	0,87	262,7±32,3	12,3
BDLUK	0,48±0,06	12,33	0,20±0,01	5,35	0,11±0,00	3,24	0,26±0,02	8,16	10,87±1,14	10,51	23,16±1,43	6,19	433,3±18,0	4,16

Aucune valeur n'est approuvée aberrante pour l'usine de Lukaya et Lukunga mais la valeur de 3,84 dans la série de Fe dans les boues de Ndjili est suspectée aberrante. Les précisions de mesure des ions Na⁺, Fe³⁺, K⁺ et Mn²⁺ ne sont pas significatives pour les boues de Lukaya, les ions Ca²⁺ et Mn²⁺ ne sont pas significatives pour l'usine de Ndjili et ceux de Na⁺, Fe³⁺ ne les sont pas pour l'usine de Lukunga car leurs coefficients de variance à < 10. Les valeurs moyennes des ions échangeables dans toutes les boues de potabilisation d'eau de différentes usines de Kinshasa démontrent que toutes les boues ont des teneurs plus élevées de potassium que la normale (0,16 %) et ne peuvent pas être rejetées sans être traitées au préalable. Les boues de l'usine de Lukaya ont une teneur élevée en calcium (0,76 %) par rapport aux boues de potabilisation des autres usines. Les teneurs moyennes en Mg dans les boues varient entre 0,20 % (Lukunga) à 0,52 % (Ndjili). Les boues peuvent contribuer avec le magnésium à la croissance des plantes. Les teneurs moyennes de fer des boues de potabilisation d'eau varient entre 4,99 % (Ndjili) à 10,87 % (Lukunga). Mais celles de Lukaya ont une teneur moyenne en Fe de 9,8 %. La grande contribution des boues de potabilisation d'eau à la croissance des plantes, c'est la présence de fer. Les boues de potabilisation de Ndjili ont une teneur élevée de sodium (0,795 %) par rapport aux autres boues d'autres usines suite à la pression de la mer.

3-4. Autres éléments utiles pour la fertilisation

Le **Tableau 6** ci-dessous indique les résultats d'autres éléments utiles pour la fertilisation du sol.

Tableau 6 : Autres éléments utiles pour la fertilisation

	N		Si		S		P	
	Mesure	CV%	Mesure	CV%	Mesure	CV%	Mesure	CV %
BDL	0,25±0,05	21,05	30,07 ± 0,49	2,46	0,44±0,00	0,00	0,23±0,013	0,006
BDND	0,11 ± 0,05	48,67	59,84 ± 0,08	0,13	0,20 ± 0,00	0,00	0,29±0,007	0,004
BDLUK	0,25 ± 0,05	21,05	20,07 ± 0,49	2,46	0,44 ± 0,00	0,00	0,35±0,053	0,00

Aucune valeur n'est approuvée aberrante pour l'usine de Lukaya et la valeur de 0,196 dans la série de S est suspectée aberrante dans les usines de Ndjili et Lukunga. La précision de mesure de N n'est pas significative pour toutes les boues des usines. La teneur en soufre est très élevée dans les boues de potabilisation d'eau de Lukaya et Lukunga (0,44 %) par rapport à celles de Ndjili. Cette teneur faible est dû à la formation de l'acide soluble dans l'eau et qui ne peut pas être retenu dans les boues. Les boues de potabilisation de l'eau de l'usine de Ndjili ont une teneur très élevée en Si (59,84 %) par rapport aux boues d'autres usines. Le Si a une concentration très élevée par rapport aux autres éléments. S'agissant des éléments participants à la croissance des plantes, le fer a une concentration élevée par rapport aux autres et le soufre et magnésium sont faibles

dans les boues de potabilisation d'eau. En comparant les résultats de cette étude l'on observe qu'à partir du graphique ci-après, que la composition des boues de potabilisation diffère d'une usine à l'autre et ne provient de sulfate d'alumine que l'aluminium et le soufre. D'autres éléments proviennent de l'eau brute.

La **Figure 4** ci-après indiquent la composition des boues :

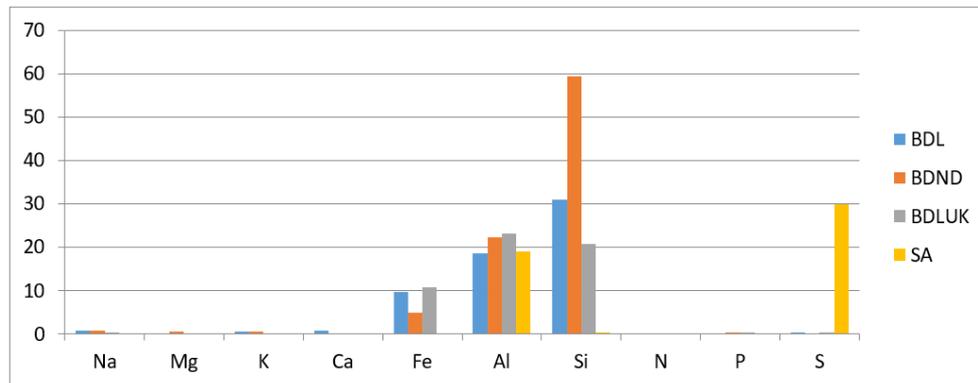


Figure 4 : La composition des boues

BDL : Boue de Lukaya, BDND : Boue de Ndjili, et BDLUK : Boue de Lukunga

3-5. Des éléments traces métalliques dans les boues de potabilisation

Le **Tableau 7a** et le **Tableau 7b** affichent les valeurs moyennes des quelques éléments traces métalliques toxiques et disponibles dans les boues analysées. Du point de vue générale, Ces valeurs sont de loin inférieures aux normes édictées pour l'agriculture et mais très élevées aux normes prévues pour le rejet dans les milieux naturels.

Tableau 7a : Eléments traces métalliques dans les boues

	Cr		Ni		Cu		Zn		As	
	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%	Mesure	CV%
BDL	68,8 ± 13,6	19,8	50,4 ± 1,8	3,5	167 ± 40	24	73,4 ± 9,1	12,4	4,9 ± 1,8	35,7
BDND	37,6 ± 2,9	7,77	25,37 ± 0,65	2,56	19,77 ± 5,12	25,93	75,6 ± 8,18	10,81	3,4 ± 0,0	0,0
BDLUK	101,3 ± 3,7	3,6	26,4 ± 2,1	8,11	25,2 ± 2,1	8,5	184,5 ± 9,5	5,2	0,63 ± 0,32	51,23
Normes de rejet	0,1-0,5		0,5		0,5					
Normes agriculture	1000									

Tableau 7b : Eléments traces métalliques dans les boues

	Rb		Sr		Cd		Hg		Pb	
	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%	Mesure mg/kg	CV%
BDL	25,35 ± 3,25	12,84	10,4 ± 1,2	11,23	1,23 ± 0,45	36,83	1,0 ± 0,0	0,00	28,35 ± 1,85	6,52
BDND	32,53 ± 0,84	2,60	10,1 ± 1,0	9,64	3,05 ± 0,68	22,34	1,0 ± 0,0	0,00	56,53 ± 2,47	4,36
BDLUK	7,0 ± 0,6	8,3	10,9 ± 0,0	0,00	2,30 ± 0,39	16,93	1,0 ± 0,0	0,00	60,10 ± 3,31	5,51
Normes de rejet									0,5	
Normes agriculture					20		10		800	

Aucune valeur n'est approuvée aberrante pour l'usine de Lukaya, la valeur 4,9 dans la série de As pour le Ndjili et la valeur 10,4 dans la série de Sr sont suspectées aberrantes. Les précisions de mesure de Ni, Hg et Pb sont significatives pour les usines de Lukaya et Ndjili et celles d'As et Cd sont significatives pour l'usine de Lukunga car leur CV est inférieur à 10.

3-6. Analyses statistiques

3-6-1. Différence entre boues de Lukaya et de Ndjili

3-6-1-1. Paramètres physico-chimiques :

Le pH et la capacité d'échange cationique sont différentes, donc leur différence est significative, car $T_{obs} > t_r$, donc le pH des boues de Lukaya est différent de celles de Ndjili. *Pas de différence significative sur le CO et MO, car $T_{obs} < T_t$*

3-6-1-2. Les ions échangeables

Les ions échangeables : Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} , K^+ de deux boues de Ndjili et Lukaya sont différents, donc leur différence est significative *car $T_{obs} > T_t$* . L'ion Na^+ dans les boues sont identiques car $T_{obs} < T_t$.

3-6-1-3. Autres éléments liés à la fertilité du sol

- Il y a une différence significative pour N, Si, S, P de deux boues.

3-6-1-4. Eléments traces métalliques

- il y a différence significative Cr, Ni, Cu, Rb, Cd, Pb
- il n'y a pas de différence pour le Mn, Zn, As, Sr, Hg

3-6-2. Différence entre boues de Lukaya et de Lukunga

3-6-2-1. Paramètres physico-chimiques

- il y a une différence significative pour le pH et CEC ;
- pas de différence significative pour le CO et le MO

3-6-2-2. Eléments de fertilité des sols

- Il y a une différence significative des ions : Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , K^+ , Si, P, S de deux boues de Lukaya et Lukunga car Tobs > Tt
- Pas de différence significative pour le Fe^{3+} , N⁻ et Na^+

3-6-2-3. Eléments traces métalliques

- Différence significative pour Mn, Cr, Ni, Cu, Zn, Rb, Cd, Pb ;
- Pas de différence significative pour l'As et Hg.

3-6-3. Différence entre boues de Ndjili et Lukunga

3-6-3-1. Paramètres physico-chimiques

- Différence significative pour CEC, CO et MO
- Pas de différence significative pour le pH

3-6-3-2. Eléments de fertilité du sol

- Il y a une différence significative pour : Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+} , K^+ , Si, P, Fe^{3+} , N et Na^+
- Pas de différence significative pour le S

3-6-3-3. Eléments traces métalliques

- Il y a une différence significative pour : Mn, Cr, Cu, Zn, As, Rb, Cd, Pb
- Pas de différence significative pour : Hg, Sr, Ni

4. Discussion

L'analyse des résultats de cette étude démontre que le pH des boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa varie entre 6,0 (boues de Ndjili et de Lukunga) à 7,00 (boues de Lukaya). Ce pH est propice pour une culture maraîchère (6-7). Celles de Lukunga et Ndjili montrent l'acidité résiduelle de la boue, provoquée par l'étape de coagulation-floculation de l'eau au sulfate d'alumine (sel d'acide fort). Ce pH pourra entraîner la précipitation des métaux lourds et leur adsorption possible sur les matières en suspension ou la boue. Ce pH

peut être relevé suite à l'ajout de la chaux. Le pH des boues de potabilisation d'eau de Lukaya est en moyenne à 7 indiquant la neutralité de celles-ci. Ce pH présente des caractéristiques importantes pour l'agriculture. Il est inférieur par rapport à celui des boues résiduaires des stations d'épuration variant entre 12,2 (boues résiduaires fraîches) et 7,8 (Boues résiduaires sèches) et celles de Marseille (10,1) [9, 10]. Le carbone organique dans des boues varie entre 3,07 (Boues de Ndjili) à 4,63 % (boues de Lukunga) donnant des matières organiques correspondantes allant de 5,23 (boues de Ndjili) à 5,68 (boues de Lukunga). Les matières organiques étant élevées, les boues présentent des faibles teneurs en potassium et calcium. Les valeurs de carbone organique des boues sont supérieures à 2,4 %, indiquant sa forte fertilité. Donc les boues peuvent être utilisées pour équilibrer le sol maraicher et aider comme amendement chimique. La quantité moyennement faible des matières organiques pourrait conduire à classer ces boues de potabilisation plus tôt minérale qu'organique [11]. La Capacité d'échange cationique des boues est la quantité des cations que celle-ci peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné. Elle varie entre 3,56 mg/ 100 g (Ndjili) et 4,63 mg/ 100g (Lukunga). Les valeurs obtenues de CEC indiquent des valeurs faibles par rapport aux boues d'épuration d'Alger [12].

4-1. Des éléments présents

Le potassium dans les boues de potabilisation d'eau de Kinshasa varie entre 0,11 % (Lukunga) à 0,69 % (Ndjili). Les résultats obtenus sont supérieurs à ceux des boues résiduaires d'Alger (0,066-0,090). Les boues sont pauvres en potasse, car elle très soluble dans l'eau et est peu retenu dans les boues lors de la décantation [9 - 13]. S'agissant des rejets dans les cours d'eau, toutes les boues ont des teneurs plus élevées que la normale (0,16 %) et ne peuvent pas être rejetées sans être traitées au préalable. Les boues de potabilisation de l'usine de Lukaya ont une teneur élevée de calcium (0,8 %) par rapport aux boues de potabilisation des autres usines et celles faibles sont les boues de Ndjili (0,16 %) et Les boues usines sont très faibles en calcium par rapport aux fientes de volailles (4,885 %). Les résultats de cette étude sont inférieurs par rapport aux boues de stations d'épurations municipales d'Alger (9,12%), et celles de la ville de Marseille (5,23 %), [10, 14, 15]. Le calcium des boues de potabilisation étant faible par rapport aux normes de rejets dans les cours d'eau, ils ne posent aucun problème quand à ce Les boues de potabilisation d'eau de Lukunga (0,2 %) ont une teneur faible en magnésium que les autres boues et celles de Ndjili sont très concentrées (0,52 %). Les boues peuvent contribuer avec le magnésium à la croissance des plantes. Les teneurs en magnésium des boues sont inférieures par rapport aux boues de stations d'épuration d'Alger (1,28 %) [15]. Les boues de potabilisation d'eau ont une teneur en fer variant entre 4,99 % (Ndjili) à 10,87 % (Lukunga). Celles de Lukaya ont aussi une teneur élevée en Fe (9,78 %). La grande contribution des boues de potabilisation à la croissance des plantes, c'est la présence de fer. La présence des complexes organométalliques comme Fe^{3+} , $Fe(OH)_2^+$ et $Fe(OH)^{+2}$ des ions sulfates ou nitrates ont permis au fer de passer de la forme Fe^{3+} à celle Fe^{2+} et sa disponibilité pour les plantes. Cette forme réduite devient plus dominante dès lors que le pH du sol est plus inférieur à 12 or le pH des boues de potabilisation de sous étude varie entre 6,0 et 7,0, permettant de passer de la forme oxydée vers celle réduite de fer [16, 17]. Ainsi le fer participe dans la composition de la synthèse de la chlorophylle et des protéines des plantes et à la composition des enzymes et certains pigments nécessaire aux plantes [14]. Il y a faible compétitivité donnant alors au fer une réactivité élevée parce que les autres éléments utiles et non utiles par les plantes sont minimes (faible concentration Mn^{2+} , Cu^{2+} , K^+ et autres). Cette réactivité élevée de fer s'accompagne d'une déficience en éléments nutritifs comme phosphore, potassium, calcium, magnésium et manganèse. La présence de de N-ammoniacale et des nitrates dans les boues de potabilisation d'eau favorise l'absorption du fer et contribue aussi à réduire le taux de nitrates et sulfates dans les plantes [18, 19]. La population mondiale (60 - 80 %)

serait carencée en fer dont 30 % serait anémique, d'où augmenter le taux de fer dans les végétaux comestibles serait nécessaire, d'où l'usage de boues comme fertilisant apporterait du fer [20]. Les boues de potabilisation d'eau de l'usine de Lukunga ont une teneur élevée de phosphore (0,38 %) par rapport aux autres boues de potabilisation d'eau des autres usines. Les boues de l'usine de Ndjili ont une teneur élevée en aluminium par rapport aux autres boues (22,3 %) des autres usines, suite à l'utilisation de sulfate d'alumine en grande quantité proportionnelle à la quantité d'eau brute à clarifier, lors de l'étape de coagulation-floculation avec formation des floccs qui précipitent sous formes des boues. celles de Lukaya ont une quantité moyennement faible. Les boues sont riches en alumine car les boues sont l'émanation de sulfate d'alumine. La concentration d'aluminium dans les boues est supérieure par rapport aux normes de rejet des quelques polluants dans l'eau [21]. La teneur en aluminium retrouvée dans les échantillons des boues de potabilisation d'eau est très élevée et elle est proportionnelle à la quantité de sulfate d'alumine (17 - 19 %) introduit lors de l'étape de coagulation-floculation. Elle excède celles des échantillons de boues collectés d'une station d'eau potable de la Florida [22]. La solubilité de l'aluminium augmente aussi à des pH très acides en raison de la formation de $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)^{2+}$, et $Al(H_2O)_6^{3+}$ souvent abrégé Al^{3+} ou appelé la forme libre d'alumine à $pH < 5,5$. Suivant le diagramme de prédominance des espèces d'aluminium et l'effet du pH, les boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa ont un pH variant entre 6 et 7. La forme dominante de l'aluminium est de $Al(OH)_3$ est à 80 % et celle de $Al(OH)_2^+$ est à 20 % [23]. Par rapport à la distribution des espèces d'aluminium, pH (6-7) et matière organique, l'aluminium de ces boues est organique [24]. La teneur en soufre est très élevée dans les boues fraîches de potabilisation d'eau de Lukaya (0,6315 %) par rapport aux autres boues, au sol maraîcher périurbain et aux fientes. Cette teneur faible est dû à la formation de l'acide soluble dans l'eau et qui ne peut pas être retenu dans les boues. Les teneurs en soufre dans les boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa sont inférieures à celles des boues municipales de Marseille, 1,42 % [10]. Mais les boues contribuent aussi avec le soufre. Les boues de potabilisation de Ndjili ont une teneur élevée de sodium (0,795 %) par rapport aux autres boues d'autres usines suite à la pression de la mer. Le sol maraîcher et les fientes sont faibles en sodium. Mais en général, les boues sont très faibles en sodium. Les boues de potabilisation de l'eau de l'usine de Ndjili ont une teneur très élevée en silicium (59,84 %) par rapport aux boues d'autres usines. La texture du sol et des boues ont démontré que le sable a un pourcentage plus élevé que les limons et l'argile. Donc le sol est sablonneux où la rétention d'eau est faible pour les boues de Ndjili et Lukunga.

4-2. Rapport massique C/N

Le rapport C/N des boues permet d'apprécier qualitativement la capacité de minéralisation de l'azote organique contenue dans les boues et permet de classer les boues selon différentes catégories de fertilisants organiques selon le code de bonne pratique agricole [25]. Ce rapport massique C/N est un paramètre important car il donne une indication sur la valeur fertilisante une fois épandues. Ce rapport pour les boues de potabilisation d'eau est 11,8 pour celles de Lukaya, valeur comprise dans l'intervalle de 9-12,8 normes d'interprétation des analyses de sols et celles de Lukunga et Ndjili ont des rapports massiques plus élevés que la normale [26]. Ceci indique que dans les boues de Lukaya, la vitesse de minéralisation est très élevée. Le passage de l'azote organique à celle minérale soit ammoniacale soit nitrique est possible car étant fonction de ce rapport. Alors celles de Ndjili et Lukunga ont une faible minéralisation car le rapport C/N est élevé. Car plus ce rapport est élevé, la minéralisation est faible, le cas contraire est élevée [27].

	CO	N	C/N
BDL	3,07	0,26	11,8
BDND	3,07	0,11	27,9
BDLUK	3,3	0,24	13,25

4-3. Les éléments traces métalliques

Les boues de potabilisation d'eau contiennent des éléments traces métalliques sans pour autant dépasser les normes préconisées dans le cas de valorisation des boues ; leurs concentrations sont largement inférieures par rapport aux normes retenues, concentrations admises dans les sols où l'épandage peut s'effectuer [28]. Mais ces concentrations sont supérieures par rapport aux rejets dans les cours d'eau spécifiquement le Cr (0,1 mg/Kg), Pb (0,5 mg/kg), Cu (0,5 mg/kg), Zn (2 mg/kg), Ni (0,5 mg/kg), Mn (5 mg/kg), [21]. Les éléments traces métalliques présents proviennent essentiellement de l'eau brute contaminée par les rejets d'effluents d'élevage, des engrais et des pesticides chimiques utilisés le long du bassin versant. Ces résultats corroborent à ceux de boues résiduaires et municipales [10, 29, 30]. La capacité de fixation des cations /engrais dans la zone racinaire est inférieure pour les ions monovalents et croit dans l'ordre suivant : « $Na^+ < NH^+ < K^+ < H^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Al^{3+} < Mn^{2+} < Cd^{2+} < Fe^{2+} < Cu^{2+} < Zn^{2+} \dots$ les éléments indésirables ont une grande capacité de se fixer aux racines que les éléments majeurs utiles. Mais les résultats obtenus ont la capacité de fixer les éléments majeurs utiles que les éléments traces métalliques indésirables car ayant des valeurs inférieures par rapport aux normes [31].

5. Conclusion

Les résultats de cette étude ont démontré que la siccité des boues varie de 7 à 9 % conférant aux boues de potabilisation d'eau de Ndjili et Lukunga une consistance liquide, et 21 % conférant aux boues de potabilisation de Lukaya une consistance pâteuse. La texture des boues de Lukaya est sablo-argileuse et sablo-limon pour Ndjili et Lukunga. Le pH des boues varie 6-7 favorable à exploitation maraîchère. Les matières organiques et la présence de l'argile dans les boues de Lukaya favorise la rétention en eau dans le sol. Les boues de potabilisation d'eau contiennent les éléments traces majeurs utiles pour la croissance des plantes. Les plus abondants sont : le fer [9,8 % pour Lukaya; 10,87 % pour Lukunga et 4,99 % pour Ndjili], l'aluminium [18,55 % pour Lukaya; 22,3 % pour Ndjili et 23,16 % pour Lukunga], le calcium [0,8 % pour Lukaya; 0,26 % pour Lukunga et 0,16 % pour Ndjili], le potassium [0,5 % pour Lukaya; 0,69 % pour Ndjili et 0,11 % pour Lukunga]; le magnésium [0,23 % pour Lukaya; 0,52 % pour Ndjili et 0,20 % pour Lukunga]. Il ya aussi présence de d'autres éléments qui favorise la fertilisation dont : le phosphore [2,23 % pour Lukaya; 0,29 % pour Ndjili et 0,35% pour Lukunga], l'azote [0,25 % pour Lukaya et Lukunga; 0,11 % pour Ndjili] et le soufre [0,44 % pour Lukaya et Lukunga; 0,20 % pour Ndjili]. Les éléments traces métalliques et toxiques sont présents dans les boues de potabilisation d'eau des usines de Kinshasa, à des proportions inférieures aux normes d'utilisation de maraîchage et mais supérieures à celles de rejets dans les décharges et les cours d'eau.les concentrations de ETM varient de la manière suivante: Le Cr [37,6 à 101,3 mg/Kg]; Ni [25,3 à 50,4 mg/kg]; Cu [25,2 à 16,7], Zn [73,4 à 184,5 mg/kg]; As [0,63 à 4,9 mg/kg]; Cd [1,23 à 3,05 mg/kg]; Hg [1,0 mgKg] et Pb [28,35 à 60,1 mg/Kg]. Les boues de Lukaya peuvent être utilisées directement comme fertilisant chimique au vu de son pH de 7 et à sa consistance pâteuse favorisant la rétention en eau et la protection d'éléments nutritifs pour la croissance de plantes. Les boues de Lukunga et ce de Ndjili nécessitent

un apport calcique pour remonter le pH dans les conditions favorable à des cultures maraîchères.

Nous recommandons :

- Aux maraîchers, l'utilisation des boues de potabilisation d'eau comme fertilisant de sol maraîcher
- Aux usines de la Regideso de traiter les boues avant leur rejet dans le milieu récepteur
- A l'état congolais, d'utiliser les données obtenues pour édicter les lois y afférentes.

Nous suggérons

- Réaliser une étude pour son application dans les sols maraîchers en y ajoutant la chaux
- Réaliser une étude sur utilisation des boues en cimenterie

Références

- [1] - M. DAHOU, M. EL MOUSSATOUITI, M. KHACHANI, M. ASSAFI, L. AIT HSAIN, S. MOSTAHSINE et K. BOUQALLABA, Caractérisation de boues d'unité de production d'eau potable, Article, ATEC Web conferences 2, 01017, by EDP Sciences, (2012)
- [2] - B. S. LARTIGES, Déstabilisation d'une suspension de silice colloïdale par le sel d'aluminium, Relation entre phénomène de surface, la structure et la granulométrie des floes, Thèse de doctorat, Géochimie, INPL, Lorraine, (1994) 143 p.
- [3] - WETHER et al, *Sewage sludge combustion*, Progress in Energy and combustion Science, 25 (1999) 55 - 116
- [4] - OMS : <http://www.wht.int>
- [5] - AMIR, Contribution à la valorisation des boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost, Thèse de doctorat, Université CADI AYYAD, Marrakech, (2008) 341 p.
- [6] - R. NGADI, A. IDRISSE et J. PONGI, Impact de rejet fiente de la ferme MINOCONGO sur la variation saisonnière des paramètres physicochimiques des eaux brutes de la rivière LUKAYA, UPN, Kinshasa, article, revue du CRIDUPN n° 61C Octobre —Décembre 2014 de l'UPN, Revue Scientifique de l'UPN, (2004)
- [7] - N. JEANMAIRE, Le devenir des boues d'eau potable, Office Internal de l'eau, Environnement et technique N°24, 27931 (2005) 23 - 26
- [8] - AFNOR, Evaluation de la qualité des sols, AFNOR Editions, Paris, Vol. 1, (2004) 461 p.
- [9] - S. IGOUD, Valorisation des boues résiduaires issues des stations d'épuration urbaines par leur épandage dans les plantations forestiers, Rev.Energ. production et valorisation biomasse, Alger, (2001) 69 - 74 p.
- [10] - PERRISNARD et AMBROSI, Caractérisation minéralogique, chimique et spécification des métaux lourds dans les stations d'épuration de la ville de Marseille, Article, Sciences et techniques 4 ème édition, (1996) 31 - 34
- [11] - A. FUENTES, M. LLORÉNS, J. SÁEZ, I. AGUILAR, Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges, *Journal of Hazardous Materials*, A108 (2004) 161 - 169

- [12] - S. BOUNIT, M. EL MERAY, A. CHEHBOUNI, Behavior of metallic elements (cu, cd, pb and zn) in three sewage sludge of marrakech city-morocco. Analytical study and treatment. *Phys. Chem. News*, 17 (2004) 113 - 125
- [13] - MESE, Caractérisation des boues épandues dans le département de la Loire, Fiche technique n°5, réalisations Mars, Agricultures et Territoires, (2013) 8 p.
- [14] - V. PERRON et M. HERBERT, Caractérisation des boues d'épuration municipales, paramètres agronomiques, Vecteur environnement, Article technique, Canada, Québec, (2007) 42 - 52 p.
- [15] - CH. MAOZHE, Faisabilité technique et environnemental de l'utilisation des matériaux de construction cimentais de centre d'incinération des boues de stations d'épuration, Thèse de doctorat, Université de Lyon, France, (2012) 271 p.
- [16] - K. MENGEL, E. A. KIRKY, Iron, In principles of plant nutrition intern, Potash Inst, (1978) 425 - 439
- [17] - W. L. Lindsay, A. P. SCHWAB, The chemistry of iron in soils and its availability to plants. *J. of Plant Nutr.*, 5 (4-7) (1982) 821 - 840
- [18] - A. TANAKA, R. LOE, S. A. NAVASERO, Some mechanisms involed in the development of iron toxicity symptoms in the rice plant. *Soil sci. and Plant Nutr.*, 12, 4 (1966) 32 - 38
- [19] - G. BENKISER, J. C. G. OTTOW, WATANABE I., S. SANTIAGO, The mechanism of excessive iron -ptake (iron toxicity) of wetland rice, *J. of plant Nutr.*, 7 (1 - 5) (1984) 177 - 1885
- [20] - J. F. BRIAT, Le fer du sol aux plantes, Article, communication scientifique, Biochimie et physiologie moléculaires des plantes, (2005) 9 p.
- [21] - F. RAMADE, Ecologie appliquée, Ediscience international, 5ème edition, (1995) 79 p.
- [22] - G. TIMOTHY, Townsend., Characterization of Drinking Water Sludges for Beneficial Reuse and Disposal, report, Florida center for solid and hazardous waste management, (2001)
- [23] - A. E. YILMAZ, R. BONCUKCUOGLU, M. KOCAKERIM, A quantitative comparison between electrocoagulation and chemical coagulation for boron removal from boron containing solution, *J. Hazard. Mater*, 149 (2) (2007) 475 - 481
- [24] - C. T. DRISCOLL, M. D. LEHTINEN, T. J. SULLIVAN, Modelling the acid—base chemistry of organic solutes in Adirondack, New-York, lakes, *Water Resour. Res*, 30 (2) (1994) 297 - 306
- [25] - L. GRIMAUD, La valeur ajoutée des boues d'épuration, valorisation des boues d'épuration en agriculture, eau et environnement, Amiens, (1996) 44 p.
- [26] - A. D. ASSA, normes d'interprétation des analyses des sols. UFR STRM, Laboratoire National de Pédologie, Université de Cocody, Abidjan, (1998) 6 p.
- [27] - E. FLOCH, Devenir des composés pharmaceutiques après épandage des matières fertilisantes résiduares (boues d'effluents d'élevage) : Impact du procédé de traitement de la mafor et du type de sol, Thèse de doctorat, Chimie, Environnement, Géosciences et Agrosiences (CEGA), Université de Liège, (2020) 222 p.
- [28] - LACEE, Analyse des boues, AFEE, Tome I, 135p. et Tome II, (1985) 127 p.
- [29] - O. BORRAZ, L'utilisation des boues d'épuration en agriculture : les ressorts d'une controverse, Centre de sociologie des organisations, Courrier de l'environnement de l'INRA, Octobre (2000) 25 - 32 p.
- [30] - M. ROBERT, P. CAMBIER et C. JUSTE, Conditions d'utilisation des boues de stations d'épuration en agriculture, *Cahiers agronomiques*, 3 (1994) 285 - 294
- [31] - L. DOMBRET, Interpréter l'analyse de terre pour une culture maraîchère, Conseils techniques de saison en maraîchage, Bio Wallonie, Belgique CEC, (2021) 43 - 47