

Evaluation de la Translocation du Cadmium, du Cuivre, du Plomb et du Zinc par *Zea mays* L. cultivé Sur un Sol Ferrugineux Tropical dans l’Ouest du Burkina Faso

Issaka Senou

Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l’Ingénierie de l’Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)
Institut des Sciences de l’Environnement et du Développement Rural, Université de Dédougou (UDDG), Dédougou (Burkina Faso)

Moïse Yoni

Institut des Sciences de l’Environnement et du Développement Rural, Université de Dédougou (UDDG), Dédougou (Burkina Faso)

Hamza Ouedraogo

Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l’Ingénierie de l’Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Hassan Bismarck Nacro

Laboratoire d’Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol (LERF), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Antoine N. Some

Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l’Ingénierie de l’Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

[Doi:10.19044/esj.2023.v19n9p137](https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n9p137)

Submitted: 02 February 2023

Accepted: 21 March 2023

Published: 31 March 2023

Copyright 2023 Author(s)

Under Creative Commons BY-NC-ND

4.0 OPEN ACCESS

Cite As:

Senou I., Yoni M., Ouedraogo H., Nacro H.B. & Some A.N. (2023). *Evaluation de la Translocation du Cadmium, du Cuivre, du Plomb et du Zinc par Zea mays L. cultivé sur un Sol Ferrugineux Tropical dans l’Ouest du Burkina Faso*. European Scientific Journal, ESJ, 19 (9), 137. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n9p137>

Résumé

L’utilisation des déchets urbains comme fertilisants organiques peut être à l’origine d’une contamination du sol en éléments traces métalliques. Le

maïs, l'une des céréales les plus consommées au Burkina Faso, pourrait accumuler ces éléments toxiques et provoquer des problèmes sanitaires à l'homme à travers leur consommation. Pour évaluer le potentiel de translocation du maïs, un essai est mis en place dans le périmètre maraicher de Sakabi, dans la commune de Bobo Dioulasso. Pour ce faire, des parcelles ont été confectionnées et organisées selon un dispositif en bloc complètement randomisé avec six répétitions. Des doses croissantes de 20, 40 et 60 tonnes de déchet par hectare ont été apportées dans les différentes parcelles pour constituer les traitements. Les échantillons de sol et la biomasse végétale ont été prélevés pour déterminer les teneurs en éléments traces métalliques. Les résultats des analyses montrent que les sols sont contaminés en métaux lourds et ont contribué à la translocation de ces derniers dans les différents organes du maïs. Les facteurs de translocation sont supérieurs à 1 dans tous les organes exception faite pour les tiges donc les valeurs sont comprises entre 0,5-0,8 et 0,76-0,93 respectivement pour le cadmium et le cuivre. En outre la corrélation de Pearson a montré une forte relation entre les teneurs en métaux lourds dans les différents organes. Lorsque le cadmium dans le sol augmente de 1 mg il y a une forte probabilité qu'il augmente de 0,22 mg dans les racines, 1,33 mg dans les tiges, 0,31 mg dans les feuilles et 0,56 mg dans les grains. De même, au niveau du cuivre, il peut augmenter de 2,56 mg, 0,28 mg, 0,57 mg respectivement pour les racines, tiges et feuilles pour une augmentation de 1 mg de Cu dans le sol. Au niveau du plomb, il y a une forte probabilité que les teneurs dans les feuilles et dans les grains augmentent respectivement de 6,84 mg et 5,81 mg pour une augmentation de 1 mg de plomb dans le sol. Pour le cas du zinc, il peut augmenter de 0,61 mg, 0,17 mg, 0,15 mg respectivement pour les tiges, feuilles et grains pour une augmentation de 1 mg dans le sol.

Mots-clés: Déchets urbains, métaux lourds, bioconcentration, translocation

Assessment of Cadmium, Copper, Lead and Zinc Translocation by Zea Mays L. Evaluation of Cadmium, Copper, Lead and Zinc Translocation by Zea mays L., grown on a Tropical Ferruginous Soil in Western Burkina Faso

Issaka Senou

Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)
Institut des Sciences de l'Environnement et du Développement Rural, Université de Dédougou (UDDG), Dédougou (Burkina Faso)

Moïse Yoni

Institut des Sciences de l'Environnement et du Développement Rural, Université de Dédougou (UDDG), Dédougou (Burkina Faso)

Hamza Ouedraogo

Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Hassan Bismarck Nacro

Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol (LERF), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Antoine N. Some

Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), Université NAZI Boni, Bobo-Dioulasso. Bobo-Dioulasso (Burkina Faso)

Abstract

The use of municipal waste as organic fertilizers may result in contamination of the soil with trace metals. Corn, one of the most widely consumed cereals in Burkina Faso, could accumulate these elements and cause health problems for humans. To assess the translocation potential of maize, a trial is being carried out in the Sakabi vegetable perimeter. To do this, plots were made and organized according to a completely randomized block device with six repetitions. Increasing amounts of waste 20, 40 and 60 tons per hectare were brought into the different plots to constitute the treatments. Soil samples and plant biomass were collected to determine trace metal content. The results of the analyzes show that the soils are contaminated with heavy metals and have contributed to their translocation to the different organs of the maize. The translocation factors are greater than 1 in all organs except for the

rods, so the values are between 0.5-0.8 and 0.76-0.93 respectively for cadmium and copper. In addition, the Pearson correlation showed a strong relationship between the heavy metal contents in the different organs. When cadmium in soil increases by 1 mg, there is a high probability that it will increase by 0.22 mg in roots, 1.33 mg in stems, 0.31 mg in leaves, and 0.56 mg in grains. Similarly, at the level of copper, it can increase by 2.56 mg, 0.28 mg, 0.57 mg respectively for roots, stems and leaves for an increase of 1 mg of Cu in the soil. At this level, there is a high probability that leaf and grain levels will increase by 6.84 mg and 5.81 mg, respectively, for an increase of 1 mg lead in soil. For zinc, it can increase by 0.61 mg, 0.17 mg, 0.15 mg for stems, leaves and grains respectively for an increase of 1 mg in the soil.

Keywords: Urban waste, heavy metals, bioconcentration, translocation

Introduction

Depuis des milliers d'années les céréales occupent une place très importante dans la nutrition humaine (Anihouvi *et al.*, 2016). Parmi celles-ci, le maïs occupe la place la plus importante avec une production moyenne annuelle d'environ 1 039 000 000 de tonnes en 2018 devant le blé avec 750 000 000 de tonnes et le riz avec 562 000 000 de tonnes (OCDE/FAO, 2018). En Afrique c'est une denrée de grande importance dans le régime alimentaire des populations et contribue à presque la moitié des apports en calories et en protéines (Macauley et Tabo, 2015).

Au Burkina Faso, le maïs est classé premier parmi les céréales cultivées tant au niveau des superficies de la production qu'au niveau de la consommation derrière le mil et le sorgho (INSD, 2018). Cependant situé dans la région tropicale, le Burkina Faso subit la dégradation des propriétés physico-chimiques de ses sols à cause du caractère agressif du climat de la région; ceux-ci perdent davantage leurs qualités et deviennent infertiles (Batiano, 2006). Sur de tels sols, la production du maïs est faible et ne peut couvrir les besoins alimentaires d'une population sans cesse croissante (FAO, 1999).

Ainsi dans un contexte de forte dégradation des sols et de coût élevé des engrais chimiques, le recours aux déchets organiques dans la production du maïs s'est présenté comme une alternative intéressante pour certains producteurs qui les utilisent pour la fertilisation de leurs champs (Compaoré *et al.*, 2010). Cependant, même s'il ne fait aucun doute que les déchets ont une valeur fertilisante bénéfique grâce aux apports d'azote, de phosphore, de calcium et d'oligo-éléments, ils ne sont pas sans risques sur la santé humaine et l'environnement (Ouattara, 2014).

Ces déchets peuvent contenir des éléments indésirables en particulier les métaux lourds (Ilboudo, 2014 ; Senou *et al.*, 2018). Ces composants

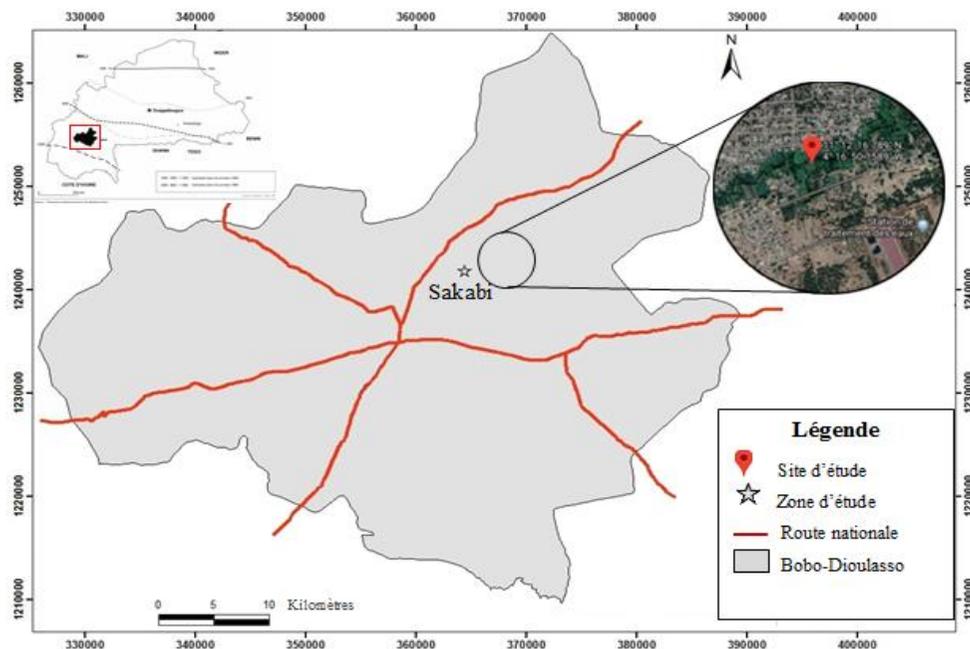
toxiques, très persistants dans le temps, pénètrent plus ou moins rapidement et directement les chaînes alimentaires, exposant l'homme à une intoxication lente (Khan *et al.*, 2014).

De nombreux auteurs ont évalué les teneurs en métaux lourds dans des végétaux cultivés tels que la citronnelle, le manioc, la laitue (Senou *et al.*, 2014; Kalonda *et al.*, 2015; Konaté, 2018). Leurs résultats ont montré une bioaccumulation d'éléments toxiques dans les tissus de ces végétaux consommés. Cependant, très peu d'études ont concerné l'évaluation du potentiel de bioaccumulation des céréales et du *Zea mays* en particulier dans la sous-région africaine. Les études récentes ont plutôt porté sur l'effet des métaux lourds sur les paramètres agro-morphologiques du maïs (Hadi *et al.*, 2010 ; Khan *et al.*, 2014). C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude sur le thème : «Évaluation de la translocation du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc par *Zea mays* L. cultivé sur un sol ferrugineux tropical dans l'Ouest du Burkina Faso». L'objectif principal est d'évaluer le potentiel de translocation du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc dans les différents organes du *Zea mays*. Les résultats obtenus serviront à influencer positivement les prises de décisions lors d'une intervention de l'État ou des ONG sur les sites utilisant directement les déchets urbains et permettre aussi de trouver des solutions adéquates vers une agriculture durable.

Matériel et méthodes

Site d'étude

L'étude est menée à Bobo-Dioulasso (11°10'43" nord ; 4°18'25" ouest), ville située à l'ouest du Burkina Faso dans la région des Hauts Bassins. L'essai est mis en place dans une unité d'exploitation du périmètre maraicher de Sakabi (.11°12'16,789" nord et 4°16'50,1589" ouest. Le choix de ce site s'est justifié par l'utilisation importante des déchets urbains comme source principale de fertilisant par les producteurs. Le site est à proximité de la station de traitement des eaux usées de Bobo-Dioulasso.



Carte 1. Carte de la commune de Bobo-Dioulasso (BNDT, 2014 et google hearth)

Dispositif d'identification des déchets

Le dispositif expérimental qui a été mis en place était un bloc complètement randomisé (BCR) dont l'unique facteur étudié était la quantité de déchets. L'essai comportait quatre traitements qui sont : T0 : sans apport de déchet ; T1 : 20 t/ha soit 20 kg de déchet/parcelle ; T2 : 40 t/ha soit 40 kg de déchet/parcelle et T3 : 60 t/ha soit 60 kg de déchet/parcelle. Ces doses de déchets ont été choisies en se référant aux résultats sur les quantités de déchets évaluées sur quatre sites (Kodéni, Kuinima, Dogona et Colsama) par Sanou (2018). Notre dispositif comportait au total 24 parcelles élémentaires disposées en six blocs ou répétitions. Les dimensions de chaque parcelle élémentaire était de 4 m × 2,5 m soit 10 m². Chaque parcelle était composée de 35 poquets disposés en 5 lignes.

Conduite de la culture

La préparation du sol s'est faite par un labour. Le labour a été fait manuellement à 15 cm de profondeur. Avant d'incorporer les déchets au sol, ces derniers ont d'abord été débarrassés des matières inutiles (sachets plastiques, morceaux de métaux, cailloux, etc.) et mélangés pour les rendre homogènes. Selon le dispositif expérimental, des doses de 0, 20, 40 et 60 kg de déchet ont été apportées par parcelle pour constituer respectivement les traitements T0, T1, T2 et T3. Les déchets ont été bien mélangés à la terre de manière à rendre le lit de semis homogène.

Le semis a également été fait manuellement le 2 février. Avant le semis une pré-irrigation a été effectuée. Les écartements entre les lignes de semis étaient de 80 cm et 30 cm entre les poquets. Chaque poquet a reçu un grain. Les grains ont été semés à une profondeur de 3 à 5 cm.

L'entretien de la culture a consisté à un sarclage qui a été fait manuellement à la houe. Des apports de fumures minérales à savoir, le NPK (14-23-14) et l'urée 46 % ont été effectués en se référant aux doses de 200 kg de NPK/ha et de 150 kg d'urée/ha selon les recommandations de Sanou (2007). Ainsi 4,8 kg de NPK ont été utilisés pour l'ensemble des parcelles soit 200 g par parcelle élémentaire à raison de 5,71 g par poquet. Le NPK a été apporté au 15^{ième} jour après semis (JAS). Quant à l'urée, 3,6 kg ont été apportés pour l'ensemble des parcelles, appliqués au 25^{ième} et 35^{ième} JAS. Au 25^{ième} JAS, 2,4 kg ont été apportés pour l'ensemble des parcelles soit 100 g par parcelle à raison de 2,86 g par poquet. Au 35^{ième} JAS, 1,2 kg ont été apportés soit 50 g par parcelle à raison de 1,43 g d'urée par poquet. L'alimentation en eau se faisait manuellement à l'aide d'arrosoirs tous les trois jours et au besoin.

Prélèvement des échantillons

Les prélèvements des échantillons de sols ont été effectués sur les 24 parcelles à 15 cm de profondeur à la tarière. Ces prélèvements ont été effectués avant semis et à la récolte. Un échantillon composite de 0,5 kg de sol a été constitué par parcelle élémentaire à partir de trois (03) sous-échantillons prélevés en trois points, suivant la diagonale de la parcelle utile. Les échantillons prélevés sont mis dans des sachets et acheminés au laboratoire pour la détermination des teneurs en métaux lourds des sols.

Les prélèvements des échantillons végétaux ont été effectués à la maturité physiologique des grains à 85 JAS. Pour ce faire, trois plantes entières ont été déracinées individuellement par parcelle.

Après le prélèvement, les différentes parties végétales considérées à savoir les racines, les tiges, les feuilles et les grains ont été séparées les unes des autres, lavées à l'eau distillée et séchées à l'ombre puis pesées à l'aide d'une balance de marque Sartorius de précision 0,001 g avec une portée maximale de 420 g. Au total 96 échantillons ont été constitués pour les quatre différents types d'organes à raison de 24 échantillons pour chaque type.

Méthodes d'analyse au laboratoire

L'analyse a été faite au laboratoire de géochimie du BUMIGEB et a consisté à la détermination des teneurs en métaux lourds (Cd, Cu, Pb et Zn) des substrats et des végétaux à travers le spectromètre à absorption atomique à flamme (Perkin Helmer Analyst 100). L'opération a été réalisée selon le protocole de l'attaque à l'eau régale défini par la norme française NF X 31-

415 et la norme ISO II 466 respectivement pour les analyses des échantillons de substrats et de végétaux.

Analyses statistiques des données

Les données ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA). Le traitement des données a été réalisé grâce au logiciel XLSTAT. La séparation des moyennes a été effectuée par le test de Student-Newman-Keuls au seuil de 5 %.

Deux indicateurs ont été calculés à savoir :

Le facteur de bioconcentration (BCF) : Il permet d'évaluer le potentiel d'accumulation du maïs en le classant dans une des catégories de plantes selon la valeur du BCF (Ghosh et Singh, 2005).

$$\text{BCF} = \frac{\text{Concentration moyenne d'un métal lourd dans la plante (mg/kg)}}{\text{Concentration moyenne de ce métal lourd dans le sol à la récolte (mg/kg)}}$$

Le facteur de translocation (TF) : Il permet d'évaluer la capacité de translocation d'un métal lourd des racines vers les parties aériennes (Mattina *et al.*, 2003).

$$\text{TF} = \frac{\text{Concentration moyenne d'un métal lourd dans la partie aérienne (mg/kg)}}{\text{Concentration moyenne de ce métal lourd dans les racines (mg/kg)}}$$

Résultats

Quantité de métaux lourds par organes

La quantité des métaux lourds dans les organes est illustrée par les figures 1, 2, 3 et 4. Le cadmium est accumulé par les racines, les tiges et les feuilles seulement au niveau du traitement T3. Les tiges ont accumulé la plus grande quantité du métal soit 0,92 mg/organe suivies des feuilles 0,028 mg/organe et des racines 0,015 mg/organe.

Le Cu est accumulé par tous les organes, les plus fortes quantités sont obtenues au niveau des grains avec des quantités variant entre 1,61 et 2,14 mg/organe respectivement pour les traitements T2 et T0, les plus faibles au niveau des racines avec des quantités comprises entre 0,09 et 0,51 mg/organe respectivement pour les traitements T3 et T1

Le Pb est accumulé uniquement par les tiges et les feuilles au niveau du traitement T0 avec des quantités respectives de 2,38 et 2,95 mg/organe. Au niveau du traitement T1 l'accumulation s'est faite principalement dans les feuilles soit 3,65 mg/organe et dans les grains soit 0,2 mg/organe. Au niveau du traitement T2, seuls les grains ont accumulés du Pb avec une quantité de 2,23 mg/organe. Quant au traitement T3 l'accumulation s'est faite dans les racines et les grains avec des quantités respectives de 1,03 et 6,14 mg/organe.

La plus grande partie du Zn absorbé est accumulée dans les feuilles avec des quantités comprises entre 1,5 et 2,26 mg/organe respectivement pour les traitements T1 et T0. La plus faible quantité est accumulée dans les racines avec des valeurs comprises entre 0,6 et 1,36 mg/organe respectivement pour les traitements T1 et T0.

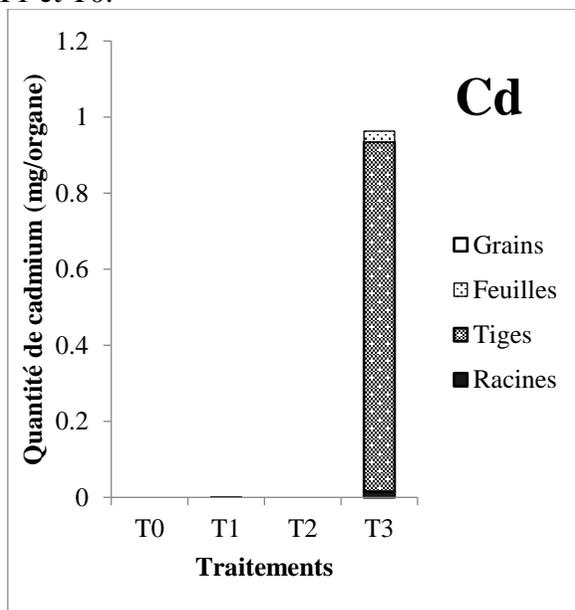


Figure 1. Quantité de Cd dans les différents organes du maïs (mg/organe)

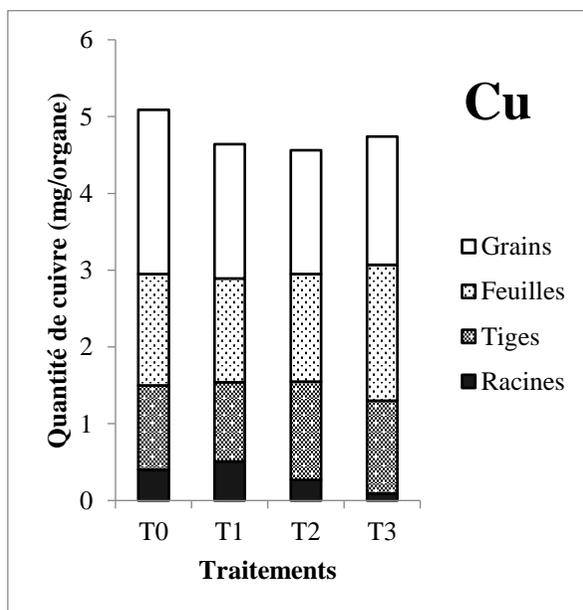


Figure 2. Quantité de Cu dans les différents organes du maïs (mg/organe)

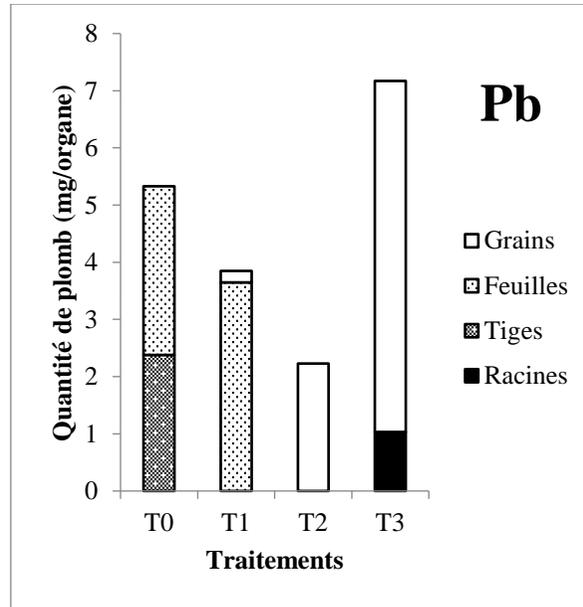


Figure 3. Quantité de Pb dans les différents organes du maïs (mg/organe)

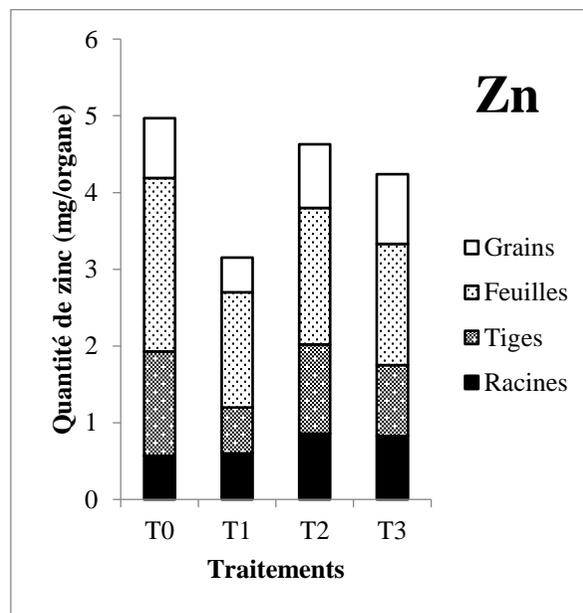


Figure 4. Quantité de Zn dans les différents organes du maïs (mg/organe)

T0 : sans apport de déchet (Témoin) ;
T1 : apport de 20 kg de déchet ;
T2 : apport de 40 kg de déchet ;
T3 : apport de 60 kg de déchet.

Facteurs de translocation des métaux lourds

Les résultats des calculs des facteurs de translocation du Cd, du Cu, du Pb et du Zn sont résumés dans le tableau 1.

Ces résultats ont révélé que seul le traitement T3 a enregistré un transfert du Cd vers les tiges avec un facteur de translocation (TF) de 3,4. Au niveau des feuilles, les TF ont varié entre 0 et 1,29, avec le minimum enregistré au niveau des traitements T0 et T2, et le maximum au niveau du traitement T3. Les transferts du Cd sont nuls au niveau des grains. Les résultats statistiques de l'ANOVA au seuil de 5% ont montré un impact significatif des traitements de sol sur les TF du Cd dans les tiges et les feuilles. Au niveau des grains l'apport de déchets n'a eu aucun effet sur les transferts du Cd

Les TF du Cu calculés au niveau des tiges étaient compris entre 0,52 et 2,34 respectivement pour les traitements T1 et T3. Au niveau des feuilles ils ont varié entre 1,08 et 1,38 respectivement pour les traitements T1 et T3. Quant aux grains les valeurs ont varié entre 1,39 et 4,76, avec la plus faible valeur enregistrée dans le traitement T1 et la plus forte dans le traitement T3. L'analyse de variance au seuil de 5% a montré un effet significatif des doses de déchets sur les TF du Cu dans les tiges, les feuilles et les grains.

Les transferts du Pb vers les tiges ont été nuls dans tous les traitements excepté le traitement T0 qui a enregistré un TF de 1,1. Au niveau des feuilles les TF ont varié entre 0 et 1,3 avec le minimum enregistré au niveau des traitements T2 et T3, et le maximum au niveau du traitement T0. Au niveau des grains, les TF ont fluctué entre 0 et 2,24 respectivement pour les traitements T0 et T3. À l'instar du Cu, les TF du Pb ont varié significativement ($p < 5\%$) entre les traitements quel que soit l'organe.

Les TF du Zn calculés au niveau des tiges ont été compris entre 0,19 et 0,48 respectivement pour les traitements T1 et T0. Au niveau des feuilles ils ont oscillé entre 0,61 dans le traitement T2 et 0,95 dans le traitement T0. Au niveau des grains les TF étaient compris entre 0,33 et 0,52 respectivement pour les traitements T3 et T0. L'analyse de variance au seuil de 5% a révélé que les transferts de Zn vers les tiges et les feuilles ont varié significativement entre les traitements à l'exception des grains dont les TF sont restés statistiquement identiques.

Au regard des valeurs de TF ($TF > 1$), le transfert de Cd s'est fait préférentiellement dans les tiges uniquement au niveau du traitement T3 et dans les feuilles au niveau des traitements T1 et T3. Le transfert du Cu s'est fait préférentiellement dans les grains pour tous les traitements, puis dans les feuilles pour les traitements T0, T2, T3 et enfin dans les tiges uniquement pour le traitement T3. Concernant le Pb, le transfert s'est fait préférentiellement dans les grains pour les traitements T1, T2, T3 ensuite dans les feuilles pour les traitements T0, T1 et enfin dans les tiges seulement dans le traitement T0. Le Zn est stabilisé cependant au niveau des racines.

Tableau 1. Facteurs de translocation du Cd, du Cu, du Pb et du Zn dans les tiges, les feuilles et les grains du maïs par traitement.

MÉTAU X LOURDS	TRAITEMENTS	ORGANES			
		Racines	Tiges	Feuilles	Grains
Cd	T0	0,30a ± 0,11	0,72a ± 0,22	1,19a ± 0,23	1,03a ± 0,12
	T1	0,81a ± 0,20	0,45a ± 0,05	2,32a ± 0,38	1,71a ± 0,20
	T2	1,17b ± 0,33	0,82 a± 0,10	1,46a ± 0,11	1,24a ± 0,33
	T3	1,32b ± 0,20	0,63a ± 0,12	2,22a ± 0,33	1,69a ± 0,35
Probabilité (5%)		0,031	0,08	0,115	0,122
Cu	T0	1,6a ± 0,23	0,99b ± 0,16	1,39ab ± 0,13	2,89b ± 0,19
	T1	1,64a ± 0,08	0,79a ± 0,21	1,13a ± 0,20	1,93ab ± 0,16
	T2	0,82a ± 0,03	0,81b ± 0,06	1,23a ± 0,17	1,44a ± 0,09
	T3	0,23b ± 0,26	0,73c ± 0,27	1,38b ± 0,07	1,42a ± 0,10
Probabilité (5%)		0,003	0,009	0,014	0,001
Pb	T0	1,01a ± 0,12	1,81a ± 0,23	1,01a ± 0,10	1,01ab ± 0,09
	T1	0,97a ± 0,24	0,97ab ± 0,17	0,97b ± 0,03	0,34b ± 0,01
	T2	1,44a ± 0,09	1,44a ± 0,15	1,59b ± 0,08	1,15ab ± 0,10
	T3	1,43a ± 0,18	0,69b ± 0,13	2,02b ± 0,33	2,73a ± 0,15
Probabilité (5%)		0,083	0,004	0,018	0,02
Zn	T0	2,58b ± 0,24	1,32b ± 0,18	2,22a ± 0,23	1,14a ± 0,12
	T1	2,46a ± 0,11	0,57a ± 0,32	1,49a ± 0,16	0,59ab ± 0,25
	T2	2,86a ± 0,14	0,83ab ± 0,12	1,67a ± 0,15	0,92ab ± 0,11
	T3	1,25ab ± 0,13	0,27a ± 0,28	0,61a ± 0,09	0,36b ± 0,02
Probabilité (5%)		0,026	0,035	0,147	0,001

T0 : sans apport de déchet ;
 T1 : apport de 20 kg de déchet ;
 T2 : apport de 40 kg de déchet ;
 T3 : apport de 60 kg de déchet.

Corrélation entre les translocations des métaux lourds

La relation de translocation qui lie les différents organes du maïs est illustrée dans les tableaux 2, 3, 4 et 5.

La corrélation de Pearson montre qu'il existe une relation entre les translocations des éléments traces en fonction des différents organes du maïs. Au niveau du cadmium les résultats montrent une forte corrélation positive entre les teneurs dans les racines, les tiges et celles des feuilles. Au niveau du cuivre il y a une corrélation négative entre la translocation des racines et des feuilles. Concernant le plomb, les résultats montrent une relation forte entre les teneurs dans les racines et les grains ainsi qu'entre les feuilles et les grains.

Quant au zinc la corrélation est forte entre les teneurs dans les tiges et les feuilles mais également entre les feuilles et les grains.

Tableau 2. Corrélation translocation du Cd

	Racine	Tige	Feuille	Grain
Racine	1			
Tige	0,99	1		
Feuille	0,99	0,99	1	
Grain	0,71	0,7	0,7	1

Tableau 3. Corrélation translocation du Cu

	Racine	Tige	Feuille	Grain
Racine	1			
Tige	-0,65	1		
Feuille	-0,97	0,7	1	
Grain	0,57	-0,67	-0,74	1

Tableau 4. Corrélation translocation du Pb

	Racine	Tige	Feuille	Grain
Racine	1			
Tige	-0,33	1		
Feuille	0,73	-0,57	1	
Grain	0,93	-0,51	0,93	1

Tableau 5. Corrélation translocation du Zn

	Racine	Tige	Feuille	Grain
Racine	1			
Tige	-0,04	1		
Feuille	0,27	0,95	1	
Grain	0,59	0,75	0,87	1

Évolution de la translocation des métaux lourds

Les résultats de la régression linéaire des teneurs en métaux lourds dans les différents organes du maïs en fonction des teneurs dans le sol initial ont révélés que lorsque le cadmium dans le sol augmente de 1 mg il y a une forte probabilité qu'il augmente de 0,22 mg dans les racines, 1,33 mg dans les tiges, 0,31 mg dans les feuilles et 0,56 mg dans les grains. De même, au niveau du cuivre, il peut augmenter de 2,56 mg, 0,28 mg, 0,57 mg respectivement pour les racines, tiges et feuilles pour un apport de 1 mg de Cu dans le sol. Au niveau du plomb, il y a une forte probabilité que les teneurs dans les feuilles et dans les grains augmentent respectivement de 6,84 mg et 5,81 mg pour une augmentation de 1 mg de plomb dans le sol. Pour le cas du zinc, il peut augmenter de 0,61 mg, 0,17 mg, 0,15 mg respectivement pour les tiges, feuilles et grains.

Tableau 6. Évolution de la translocation des métaux lourds dans les différents organes

ETM	Racine	Tige	Feuille	Grain
Cd	0,22 ± 0,05*	1,33 ± 0,60*	0,31 ± 0,08*	0,56 ± 0,44*
Cu	2,56 ± 1,71*	0,28 ± 0,20*	0,57 ± 0,23*	0,94 ± 0,29
Pb	0,11 ± 0,005	7,03 ± 3,52	6,84 ± 5,99*	5,81 ± 4,71*
Zn	-0,09 ± 0,15	0,61 ± 0,08*	0,17 ± 0,07**	0,15 ± 0,10*
Signification :	0 '****'	0,001 '***'	0,01 '*'	0,05 '!' 0,1 '' 1

Discussion

Translocation des métaux lourds dans les différents organes du maïs

Les résultats obtenus suite aux calculs des facteurs de translocation ont révélé des valeurs supérieures à 1 pour le Cd, le Cu et le Pb, permettant de classer le maïs parmi les plantes phytoextractrices pour ces métaux. Ce qui veut dire que le maïs transfère préférentiellement le Cd, le Cu et le Pb des racines vers les parties aériennes. De ce fait le Cd est accumulé dans les tiges et les feuilles, le Cu et le Pb, dans les feuilles et les grains. Nos résultats sont en adéquation avec ceux de Wuana et Okieimen (2010) et Awokunmi *et al.* (2015). Selon ces auteurs le maïs transfère une grande quantité de métaux dans ses parties aériennes à tel enseigne qu'il est aujourd'hui utilisé pour la décontamination des sols dans les pays développés. Par contre nos observations ne sont pas en accord avec celles de Khatori et Benhoussa (2017) qui ont révélé que le maïs accumule préférentiellement les métaux lourds dans ses racines au détriment de ses parties aériennes. Cette divergence des résultats pourrait s'expliquer par la différence des zones climatiques ou à la variété cultivée entre le Maroc, zone d'étude de Khatori et Benhoussa (2017) et le Burkina Faso.

Le transport de ces éléments toxiques vers les parties aériennes pourrait s'expliquer d'une part par l'efficacité des systèmes transporteurs non spécifiques. Selon Kramer *et al.* (2007) l'efficacité de l'acheminement des métaux lourds vers les parties aériennes est liée à la présence importante de transporteurs membranaires tels que des ATPases membranaires au niveau des tissus conducteurs. Ces protéines permettent de transférer des métaux lourds dans le xylème des tissus racinaires puis de le libérer dans les organes aériens car retenus par les parenchymes qui jouent ici le rôle de tamis.

D'autre part, le transport pourrait être favorisé par la compétition entre les métaux lourds et les éléments nutritifs du maïs. En effet selon Sanita di Toppi et Gabbrielli (1999) et Greger (1999), certains métaux lourds comme le Cd ont la capacité d'emprunter les mêmes transporteurs que les éléments nutritifs de la plante et se retrouver dans tous les organes.

Quant au Zn il est stabilisé au niveau des racines, probablement parce qu'il dispose de peu de transporteurs ou parce qu'il ne peut pas concurrencer les autres éléments chimiques. Ce résultat n'est pas conforme à celui de Khatori et Benhoussa (2017) qui ont montré que le Zn est concentré au niveau des feuilles par rapport aux racines.

Bien-que les teneurs en Cd, en Cu, en Pb et en Zn des sols soient dans les normes, au niveau des grains, tous les autres métaux sont au-delà du seuil limite de consommation humaine excepté le Cd. Ce résultat est similaire à celui d'Awokunmi *et al.* (2015) qui a révélé que le maïs transférait des métaux lourds à des teneurs toxiques dans ses grains. Les animaux quant à eux ne courent de risque d'intoxication que pour le Cu et le Pb.

Selon Almeida et Stearns (1998), Garnier (2005) et Bradberry (2007), l'ingestion quotidienne de ces produits contaminés pourrait exposer les consommateurs à une intoxication chronique pouvant provoquer à la longue une ostéoporose, une dégénérescence hépatique, une insuffisance rénale et des crampes d'estomac respectivement pour le Cd, le Cu, le Pb et le Zn.

Toutefois, des symptômes visibles de toxicité sur les feuilles ou les tiges n'ont pas été observés, certainement parce que les teneurs en métaux lourds dans les tissus étaient inférieures aux seuils limites définis par Fageria *et al.* (2002) ; Prasad et De Oliveira Freitas (2003).

Corrélation de la translocation dans les différents organes

Les résultats de la corrélation de Pearson montrent que lorsque les teneurs en cadmium dans les racines augmentent celles dans les tiges et les feuilles augmentent aussi. Au niveau du cuivre, une augmentation de la teneur dans les feuilles entraîne une réduction dans les racines. Ce qui montre que le maïs préfère accumuler le cuivre dans les feuilles plutôt que de le stabiliser au niveau de ces racines. Selon Awokunmi *et al.* (2015), le cuivre est un oligoélément qui contribue dans la respiration cellulaire, la photosynthèse et dans l'absorption de l'azote, ainsi sa présence au niveau de feuilles est plus utile pour la plante qu'au niveau des racines.

Au niveau du plomb, il ressort des analyses de corrélation qu'une accumulation du plomb dans les racines entraîne également son accumulation dans les feuilles puis dans les grains. Ces résultats viennent confirmer ceux de Garnier (2005) et Remon (2006) qui ont découvert que l'accumulation du plomb se fait de proche en proche d'abord au niveau des racines, puis des tiges, feuilles et grains. Quant au zinc son accumulation dans les racines favorise sa translocation dans les feuilles et les grains. À l'instar du cuivre, le zinc intervient dans la photosynthèse mais aussi d'après Comeau *et al.* (2006) dans la croissance des différents organes.

Conclusion

L'objectif principal est d'évaluer le potentiel de translocation du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc dans les différents organes du maïs (*Zea mays*). Il ressort des résultats obtenus que la teneur en cadmium, cuivre, plomb et zinc des sols avant semis peuvent influencer plus ou moins la translocation de ces métaux lourds dans les différents organes du maïs. Les facteurs de translocation montrent que les métaux étudiés sont transloqués dans tous les organes du maïs, à l'exception du cadmium et du zinc qui sont faiblement transloqués dans les tiges. De plus, il existe une relation entre le potentiel de translocation en métaux lourds des organes.

Cette étude nous a permis de connaître le potentiel de translocation du Cd, du Cu, du Pb et Zn par le maïs cultivé sur les sols amendés avec des

déchets urbains. Les résultats obtenus pourraient influencer positivement les prises de décisions lors d'une intervention de l'État ou des ONG sur les sites utilisant directement les déchets urbains et permettre de trouver des solutions adéquates vers une agriculture durable.

Remerciements

Nous remercions le Dr Issaka SENOU, le Pr Hassan Bismark NACRO, le Pr Antoine N. SOME, l'Institut du Développement Rural (IDR), le Bureau des Mines et de la Géologie du Burkina (BUMIGEB), le laboratoire des Systèmes naturels des Agrosystèmes et de l'Ingénierie de l'environnement (SyNAIE), le Laboratoire d'Etude et de Recherche sur la Fertilité du Sol (LERF).

Références:

1. Almeida P. and Stearns L., 1998. Political opportunities and local grassroots environmental movement : The case of Minamata. *Social Problems*. 45 (1) : 37-60.
2. Atidegla S. C.; Agbossou E. K.; Huat J. et Glele Kakai R., 2011. Contamination métallique des légumes des périmètres maraîchers urbains et périurbains : Cas de la commune de Grand-Popo au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. 5 (6) : 2351-2361.
3. Awokunmi E. E.; Adefemi O. S. and Asaolu S. S., 2015. Tissues accumulation of heavy metals by maize (*Zea mays* L.) cultivated on soil collected from selected dumpsites in Ekiti State, Nigeria. *American Chemical Science Journal*. 5 (2) : 156-162.
4. Baize D. 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols . Paris, France. INRA Editions, 408 p.
5. Batiano A., 2006. African soils : their productivity and profitability of fertilizer use. In Proceedings of the African fertilizer summit June 9-13, Abuja, Nigeria.
6. Bradberry S., 2007. Poisonous substances : Copper. *Medecine* 35 (1) : 11.
7. Comeau, A., Pageau, D., Voldeng, H. Brunelle, A. 2006. Les oligoéléments : Essentiels à l'établissement du couvert végétal dans les céréales. *Grandes cultures*, Vol. 16 (4) :34-36.
8. Dauguet S.; Denaix L.; Nguyen C.; Coudure R. et Barrier-Guillot B., 2010. Apports organiques, ETM : cerné les transferts du sol aux plantes. *PERSPECTIVES AGRICOLES - N°373*, 70-75.
9. Fageria N. K.; Baligar V. C. and Clark R. B., 2002. Micronutrient cultures. *Advances in agronomy*. 77 (1) : 189-272.

10. Garnier R., 2005. Toxicité du plomb et de ses dérivés. EMC (Elsevier SAS, Paris), *Toxicologie-Pathologie professionnelle*. 16 (1) : 7-10.
11. Greger, M., 1999. Metal availability and bioconcentration in plants. In : Prasad, M.N.V. & Hagemayer, J. (Eds.). Heavy metal stress in plants : From molecules to ecosystems. Springer-Verlag, Berlin, pp. 1-27.
12. Hadi F.; Bano A. and Fuller M. P., 2010. The improved phytoextraction of lead (Pb) and the growth of maize (*Zea mays* L.) : the role of plant growth regulators (GA 3 and IAA) and EDTA alone and in combinations. *Chemosphere*. 80 (1) : 457-462.
13. Ilboudo T. J. L., 2014. Effet de différents types de déchets urbains solides de la ville de Bobo-Dioulasso sur la disponibilité et la distribution verticale de métaux lourds dans le sol. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Science du sol. 51 p.
14. INERIS, 2006. Eléments traces métalliques : Rapport d'étude INERIS-DRC-06-66246/DESP-R01a. 119 p.
15. Kalonda D. M.; Tshikongo A. K.; koto F. K. K.; Busambwa C. K.; Bwalya Y. K.; Cansa H. M.; Tambwe J.-L. K.; Kalala Z. L. et Otshudi A. L., 2015. Profil des métaux lourds contenus dans les plantes vivrières consommées couramment dans quelques zones minières de la province du Katanga. *Journal of Applied Biosciences*. 96 (1) : 9049-9054.
16. Khan M. S.; Khan S. A.; Sajad M. A.; Ali F.; Ali H.; Khan W. M.; Ali S. et Hussain F., 2014. Phytoremediation of cadmium from effected soil using maize plant (*Zea mays* L.). *Journal of Biologie and Environmental Sciences*. 2 (1) : 1-8.
17. Khatori M. et Benhoussa A., 2017. ICP analysis of heavy metals in corn and soil irrigated by Berrechide waste water (Morocco). *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 8 (5) : 1853-1859.
18. Konaté H., 2018. Evaluation du niveau de transfert de métaux lourds (Cd, Cu, Pb et Zn) dans la laitue co-cultivée avec *Cymbopogon citratus* (DC). Mémoire d'ingénieur du Centre de formation agricole de Matourkou, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 64 p.
19. Kramer U.; Talke I. N. et Hanikenne M., 2007. Transition métal transport. *Journal FEBS Letters*. 581 (1) : 2263-2272.
 - a. Lock K. and De Zeeuw H., 2001. Health risks associated with urban agriculture. Centre de Recherche sur l'Agriculture Urbaine et les Forêts (RUAF)/ Netherlands, 6 p.
20. Macauley H. et Tabo R., 2015 . Les cultures céréalières : riz , maïs , millet , sorgho et blé. In Nourrir l'Afrique : Un plan d'action pour la transformation de l'agriculture africaine. Dakar, p 37.
21. OCDE/FAO, 2018. Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2018-2027. Céréales. pp 125-144.

22. Ouattara S., 2014. Diagnostic des pratiques de valorisation agronomique de substrats organiques dans la zone urbaine et périurbaine de la ville de Bobo-Dioulasso. Mémoire de fin de cycle d'ingénieur du développement rural, option Agronomie. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso, Institut du Développement Rural, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 81 p.
23. Prasad M. N. V. and De Oliveira Freitas H. M., 2003. Metal hyperaccumulation in plants - Biodiversity prospecting for phytoremediation technology. *Electronic Journal of Biotechnology*. 6 (1) : 110-146.
24. Remon E., 2006. Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Thèse de doctorat en Biologie Végétale. Université Jean Monnet faculté des sciences et techniques. Saint Etienne. 157 p.
25. Sanita di Toppi L., Gabbrielli R. 1999. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*. 41 (1) : 105-130.
26. Sanou J., 2007. Nouvelles variétés de maïs vulgarisées au Burkina. Doc. CNRST/INERA- Burkina Faso.
27. Senou I.; Gnankambary Z.; Somé A. N. et Sedogo M. P., 2012. Phytoextraction de métaux lourds (Cd, Cu, Pb et Zn) par *Oxytenanthera abyssinica* en sols ferrugineux tropicaux et en sols vertiques dans la zone sud soudanienne du Burkina Faso. *Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie*. 34 (1) : 26 -34.
28. Senou I.; Gnankambary Z.; Some A. N. et Sedogo P. M., 2014. Projection de trois espèces de plantes locales pour la phytoextraction de métaux lourds à partir de deux types de sols au Burkina faso. *Agronomie Africaine*. 26 (2) : 155-166.
29. Senou I.; Gnankambary Z.; Some N. A. and Nacro H. B., 2018. Responses of five local plant species to metal exposure under controlled conditions. *International Journal of Development Research*. 8 (1) : 18507-18514.
30. Senou I., 2014. Phytoextraction du cadmium, du cuivre, du plomb et du zinc par cinq espèces végétales (*Vetiveria nigriflora* (Benth.), *Oxytenanthera abyssinica* (A. Rich.) Munro, *Barleria repens* (Ness), *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf et *Lantana camara*(Linn.)) cultivées sur des sols ferrugineux tropicaux et vertiques. Thèse de doctorat, Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (UPB).170 p.
31. Sezgin N.; Ozcan H. K.; Demir G.; Nemlioglu S. and Bayat C., 2004. Determination of heavy metal concentrations in street dusts in Istanbul E-5 highway. *Environment International*. 29 (1) : 979-985.

32. Wuana R. A.; Okieimen F. E. and Imborvungu J. A., 2010. Removal of heavy metals from contaminated soil using chelating organic acids. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 7 (3) : 485-496.
33. Wuana R. A. and Okieimen F. E., 2010. Phytoremediation Potential of Maize (*Zea mays* L.) *African Journal of General Agriculture*. 6 (4) : 275-287.
34. Yé L. 2007. Caractérisation des déchets urbains solides utilisables en agriculture urbaine et périurbaine : cas de Bobo Dioulasso. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Gestion Intégrée des Ressources Naturelles. Université Polytechnique de Bobo Dioulasso (Burkina Faso). 44 p.