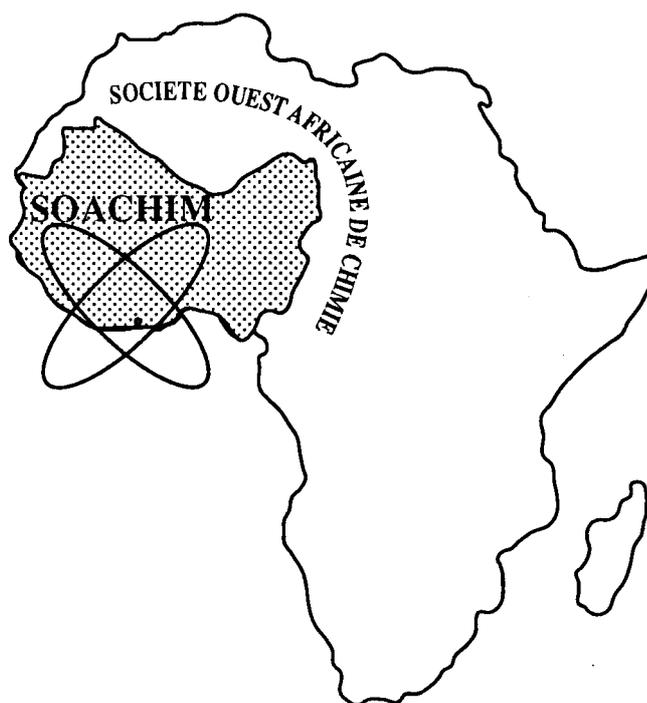


Journal de la Société Ouest-Africaine de Chimie

J. Soc. Ouest-Afr. Chim.
Code Chemical Abstracts : JSOCF2
Cote INIST (CNRS France) : <27680>

ISSN 0796-6687

17^{ème} Année, Décembre 2012, N° 034



Site Web: <http://www.soachim.org>

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

Issaka Senou ^{1*}, Zacharia Gnankamary ², Antoine N. Somé ¹, Michel P. Sedogo ²

¹Laboratoire des Systèmes Naturels, des Agro-systèmes et de l'Ingénierie de l'Environnement (Sy.N.A.I.E), Institut du Développement Rural (IDR), université polytechnique de Bobo-Dioulasso. BP 1091 Bobo-Dioulasso (Burkina Faso). E-mail: issakasenou@gmail.com, ansome@hotmail.com

²Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA). 01 BP 476 Ouagadougou 01, Burkina Faso. E-mail: gnank_zach@hotmail.com, michel_sedogo@yahoo.fr

(Reçu le 29/06/2012 – Accepté après corrections le 05/12/2012)

Résumé : Nous avons étudié en station, la capacité de *Oxytenanthera abyssinica* (bambou) pour dépolluer les sols ferrugineux tropicaux et les sols vertiques du Burkina Faso contaminés par les métaux lourds : cuivre (Cu), plomb (Pb), zinc (Zn) et cadmium (Cd). Les sols ont été contaminés aux métaux lourds par application de déchets urbains solides aux doses de 0, 10 ; 15 et 20 tonnes/ha. Le taux de survie, la croissance de *Oxytenanthera abyssinica* et la bioaccumulation des métaux lourds ont été déterminés. Les résultats ont montré un potentiel de *Oxytenanthera abyssinica* à la bioaccumulation des métaux lourds. Les feuilles ont exporté 2 ; 3 ; 4 et 6 fois plus de Cd, Zn, Pb et Cu que les racines. Les plantes cultivées dans les sols ferrugineux ont exporté des quantités de métaux lourds supérieures comparées aux plantes qui ont évolué dans les sols vertiques. Les biomasses des feuilles ont été de 13,56 et 29,26 g respectivement avec les doses de 0 et 20 tonnes /ha. Les biomasses des racines ont été de 7,21 et 12,98 g avec les doses de 0 et 20 tonnes/ha. L'apport de déchets urbains solides a augmenté la performance des plantes tant du point de vue de la croissance en hauteur (68,75%) que de la circonférence du tronc (45,95%).

Mots-clés : bambou, bioaccumulation, déchets urbains solides

Phytoextraction of heavy metals (Cd, Cu, Pb and Zn) by *Oxytenanthera abyssinica* in tropical ferruginous soils and in vertic soils, in the South-Sudanese zone of Burkina Faso

Abstract : We investigated on station, on the capacity of *Oxytenanthera abyssinica* (bamboo) to clean up tropical ferruginous soils and vertic soils from Burkina Faso, contaminated by heavy metals: Copper (Cu), Lead (Pb), Zinc (Zn) and Cadmium (Cd). Soils has were been contaminated to with heavy metals through application the using of urban solid wastes to at the dose of 0; 10; 15 and 20 t/ha. The Survival rate, *Oxytenanthera abyssinica* growth and heavy metals bioaccumulation has been were determined. The results showed a potential of *Oxytenanthera abyssinica* to for heavy metals bioaccumulation. Leaves exported 2; 3; 4 and 6 times more Cd, Zn, Pb and Cu than roots. Plants cultivated on ferruginous soils exported more heavy metals compared to plants cultivated in vertic soils. Leaves biomass were 13,6 g and 29,26 g with a dose of 0 and 20 t/ha respectively. Roots biomass were 7,21 g and 12,98 grams with a dose of 0 and 20 tons to the hectare, respectively. Urban solid wastes providing increased plants performance, in terms of height growth (68,75%) as well as trunk circumference (45,95%).

Key words: bamboo, bioaccumulation, urban solid wastes.

* Auteur correspondant : issakasenou@gmail.com

1. Introduction

La contamination des sols agricoles par les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) est de nos jours une question de santé publique et de conservation de l'environnement. Ces métaux sont présents dans les sols à la suite des activités géogéniques^[1] ou anthropiques telles que le raffinage, la combustion de combustibles fossiles, l'application d'engrais phosphatés, et des boues d'épuration aux sols^[2]. Les métaux ne sont pas biodégradables et donc peuvent persister dans le sol pendant de longues périodes. Le Zn, Cu et Pb sont toxiques pour les végétaux et les animaux y compris l'homme. Le cadmium est un des oligo-éléments les plus mobiles dans les sols et est souvent largement absorbé par les plantes^[3]. L'augmentation de la charge de Cd dans les sols augmente le risque de la contamination de la chaîne alimentaire par son absorption par les plantes améliorées. Ainsi, les métaux lourds accumulés dans les sols doivent alors être éliminés pour éviter leur transfert aux plantes et aux chaînes alimentaires. Aucune méthode appropriée n'est encore disponible pour éliminer sélectivement ces métaux lourds dans un court temps tout en préservant les propriétés du sol. La phytoextraction est une option pour l'assainissement des sols contaminés par des métaux^[4], en utilisant soit des cultures de biomasse élevées telles que les saules^[5], *Thlaspi caerulescens*^[6] et *Arabidopsis halleri* L.^[7]. La phytoextraction est une technologie appropriée et potentiellement peu coûteuse en utilisant des plantes supérieures pour la décontamination in situ des métaux dans les sols pollués, des boues et les sédiments^[8]. Dans les cas extrêmes des déblais miniers, la revégétalisation des sols contaminés peut poser des problèmes, en raison de la phytotoxicité des métaux lourds, nécessitant l'utilisation des plantes tolérantes à fournir un couvert végétal^[9].

Les bambous sont des plantes monocotylédones appartenant à la famille des *Poaceae*. Ils comptent environ 80 genres et plus de 1200 espèces. L'utilisation de *Oxytenanthera abyssinica* (bambou), (cas de notre étude) en phytoremediation sur les sols pollués par les métaux lourds n'est pas connue en raison de l'absence de travaux détaillés sur sa capacité à absorber les contaminants. Cependant, il limite l'érosion grâce à son réseau racinaire très dense sur 60 centimètres de profondeur et restaure les sols appauvris. Très peu d'études ont été menées sur la phytoextraction en Afrique et particulièrement au Burkina Faso. L'urbanisation galopante au Burkina

Faso engendre des déchets dans les grandes villes. Ces déchets sont essentiellement constitués d'ordures ménagères, de déchets d'industrie, de déchets biomédicaux, de boues d'épuration etc. Certaines populations démunies des villes utilisent ces déchets comme engrais en agriculture dans les champs et jardins urbains et périurbains. Cette application directe des déchets introduit dans les sols des composés biocides (métaux lourds et composés organiques toxiques) qui peuvent entrer dans la chaîne alimentaire à travers les plantes.

Notre étude vise à éliminer les composés toxiques dans les sols en évaluant la capacité de *Oxytenanthera abyssinica* à accumuler le Cd, Cu, Pb et Zn. Les hypothèses de travail étaient : (1) *Oxytenanthera abyssinica* accumule les métaux lourds tels que le Cd, Cu, Pb et Zn ; (2) la quantité de métal exportée augmente avec le niveau de pollution du sol (3) la quantité de métal exportée est fonction du type de sol.

1. Matériels et méthodes

2.1. Sites d'étude

Les échantillons de sol ont été prélevés en novembre 2010, à la profondeur de 0-20 cm dans des champs non cultivés des villages de Boni (11°35'N; 3°26' O) et de Dossi (3°17'-3°30'Ouest; 11°22'-11°30' Nord). Les sols ont été ensuite transportés à l'Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso (4°10'- 4°30'Ouest; 11°-12 Nord) au Burkina Faso où l'expérimentation en serre à été conduite. Les sols prélevés à Boni et Dossi sont respectivement de type ferrugineux tropical lessivé et vertique. Le climat des sites de prélèvement de d'expérimentation est de type sud-soudanien avec une pluviométrie annuelle comprise entre 900 et 1200 mm.

2.2. Plante test

Le bambou a été utilisé comme plant test. Il provient d'un pépiniériste. Les plants de bambou présentant le même développement morphologique avec 2 cm de circonférence et 30 cm de hauteur ont été sélectionnés. La longueur des racines des plantes sélectionnées a été réduite à 6 cm.

2.3. Dispositif expérimental

Les seaux en plastique (diamètre intérieur 30 cm et profondeur 28 cm) contenant 10 kg de terre sont placés dans la serre. Les températures moyennes dans la serre étaient quotidiennement mesurées et l'insolation était naturelle. Durant l'expérimentation, les températures moyennes

minimales et maximales étaient de 21 et 36 °C. La température maximale dans la serre était de 34,5 °C. Les déchets urbains triés ont été utilisés dans notre expérimentation comme source de pollution en métaux lourds; ils ont été apportés dans les seaux et mélangé intimement au sol. Les plants ont été ensuite repiqués dans les pots. Le dispositif expérimental utilisé est un bloc complètement randomisé avec 4 traitements et 3 répétitions. Les traitements sont : i) T0, sans apport de déchet; ii) T1, apport de 3,4 kg de déchet; iii) T2, apport de 5,1 kg de déchet; iv) apport de 6,8 kg de déchet. En termes de quantité de déchets apportés au champ, les traitements T0, T1, T2 et T3 correspondent à 0, 10, 15 et 20 t/ha, respectivement.

Durant l'expérimentation, la teneur en eau du sol dans les seaux a été maintenue constante à 60% de la capacité maximale de rétention du sol. Pour maintenir l'humidité du sol constante, les seaux étaient quotidiennement pesés, et la quantité d'eau distillée nécessaire était ajoutée pour maintenir le poids constant.

Au total, 48 seaux ont été utilisés à raison de 4 seaux par traitement. Pour évaluer la biomasse totale, une moitié (2 seaux par traitement) a été détruite à 3 mois après repiquage et la deuxième à 7 mois après repiquage.

2.4. Collecte des données

Pour chaque traitement, l'évolution de la hauteur des plants et de diamètre du tronc a été mesurée tous les 10 jours à l'aide d'une règle graduée et d'un pied à coulisse.

Les taux de croissance de la hauteur et de la circonférence du tronc ont été appréciés à l'aide des formules suivantes :

$$TCH (\%) = \frac{(H_f - H_i)}{H_f} \times 100$$

$$TCC (\%) = \frac{(C_f - C_i)}{C_f} \times 100$$

Où :

TCH = Taux de croissance de la hauteur ; H_f = Hauteur finale de la plante ; H_i = Hauteur initiale de la plante ; TCC = Taux de croissance de la circonférence du tronc ; C_f = Circonférence finale du tronc ; C_i = Circonférence initiale du tronc.

Pour déterminer les biomasses racinaire et aérienne, les plantes entières ont été récoltées dans 2 seaux par traitement à 3 mois et à 7 mois après repiquage. Ces parties végétales ont été lavées à l'eau distillée

et séchées à l'air libre puis à l'étuve à 60°C jusqu'à poids constant.

2.5. Analyse des sols et des plantes

Les teneurs en métaux lourds ont été déterminés dans les sols et dans les biomasses aérienne et racinaire du bambou. Les différents échantillons ont été d'abord minéralisés à chaud avec HNO₃, puis les teneurs en Cd, Cu, Pb et Zn ont été déterminées à l'aide d'un spectromètre de masse à torche de plasma (ICP-MS modèle Elan 5000, Perkin Elmer, Sciex). La quantité (Q) d'un métal exportée (mg) a été déterminée par la formule suivante :

$$Q (\text{mg}) = C (\text{mg/kg}) \times P (\text{kg})$$

Où :

Q = Quantité du métal exportée dans la biomasse; C = Concentration du métal dans la biomasse ; P = Production de biomasse.

Après la récolte des plantes (3 et 7 mois après repiquage), le sol dans les seaux a été uniformément mélangé avant et un échantillon a été prélevé. Les sols ont ensuite été séchés à l'ombre, puis tamisés à 2 mm pour les déterminations des paramètres chimiques. Par la suite, les teneurs en N-total et en P-total ont été déterminées dans les minéralisats à l'aide d'un calorimètre automatique SKALAR (Segmented flow analyser, model SANplus 4000-02, Skalar Hollande). Le K-total a été déterminé à l'aide d'un photomètre de flamme (JENCONS. PFP 7, Jenway LTD, Felsted, England). Le P assimilable a été déterminé selon la méthode Bray I^[10]. Le carbone du sol a été déterminé par la méthode de Walkley-Black^[11]. Le pH_{eau} du sol a été déterminée après agitation pendant 1h de 20g d'échantillon de sol dans 50 ml d'eau distillée. La capacité d'échange cationique (CEC) a été déterminée par la méthode de chlorure d'ammonium de Metson.

2.6. Analyses statistiques

Le traitement des données a été réalisé grâce au logiciel Genstat version 10.3. Les données collectées ont été soumises à une analyse de variance (ANOVA) en utilisant le modèle linéaire général avec le logiciel Minitab (V. 14) pour Windows (Minitab Inc). La séparation des moyennes est effectuée par le test de Tukey au seuil de 5%.

3. Résultats

3.1. Teneurs initiales en métaux lourds

Les teneurs initiales en métaux lourds des déchets et dans les différents substrats (sols + déchets) sont consignées dans le **tableau I**. Les différents substrats présentent des teneurs en zinc plus élevés que les autres métaux lourds. Le Cd est le métal qui a la plus faible teneur.

3.2. Le taux de survie et tolérance de *Oxytenanthera abyssinica* aux métaux lourds

L'application des déchets urbains a augmenté le taux de survie des plants. Malgré les fortes teneurs en Cd ($0,6 \text{ mg kg}^{-1}$), en Cu (87 mg kg^{-1}), en Pb (28 mg kg^{-1}) et en Zn (313 mg kg^{-1}) observées dans les sols étudiés, la performance de l'espèce étudiée n'a pas été altérée (**figures 1 et 2**). Par ailleurs, le taux

de survie a augmenté avec la quantité de déchets apportée.

3.4. Croissance des plantes

La croissance des plantes est représentée dans les **figures 1 et 2**. Quel que soit le type de sol, l'apport de déchets urbains solides a augmenté la performance des plantes tant du point de vue de la croissance de la hauteur que de la circonférence du tronc. Les biomasses sèches des feuilles et des racines ont augmenté avec les quantités de déchet apporté (**figures 3 et 4**). Les analyses de variance (tests ANOVA) à plusieurs facteurs confirment ces résultats. Elles indiquent clairement que la croissance des plantes a une corrélation hautement significatif ($p < 0,001$) et significatif ($p < 0,05$) avec les facteurs sol et traitement ainsi que leur interaction (sol x traitement) (**tableaux II, III, IV, V**).

Tableau I : Teneurs en métaux lourds (mg/kg) des déchets et des sols avant repiquage

Echantillons de sols (substrats)	Teneurs en métaux lourds (mg/kg)			
	Cd	Cu	Pb	Zn
Déchet	1	48	28	313
Sols ferrugineux tropicaux sans apport de déchets (SFT/T0)	0,5	28	2	58
Sols ferrugineux tropicaux + 3,4 kg de déchets (SFT/T1)	1	30	4	110
Sols ferrugineux tropicaux + 5,1 kg de déchets (SFT/T2)	2	38	26	126
Sols ferrugineux tropicaux + 6,8 kg de déchets (SFT/T3)	0	41	20	170
Sols vertiques sans apport de déchets (SV/T0)	0	87	16	59
Sols vertiques + 3,4 kg de déchets (SV/T1)	0,6	71	20	118
Sols vertiques + 5,1 kg de déchets (SV/T2)	1	70	22	160
Sols vertiques purs + 6,8 kg de déchets (SV/T3)	1	76	25	166

Tableau II: Résultat ANOVA de l'impact des principaux facteurs sur le taux de croissance de la hauteur

Facteurs	ddl	F	Probabilité (5%)	Signification
Sol	1	33,89	< 0,001	HS
traitement	3	174,42	< 0,001	HS
sol x traitement	3	4,43	0,019	S

ddl : degré de liberté ; F : ratio de variances; HS : hautement significative ; S : significative

Tableau III: Résultat ANOVA de l'impact des principaux facteurs sur le taux de croissance de la circonférence du tronc

Facteurs	ddl	F	Probabilité (5%)	Signification
sol	1	10,94	0,004	S
traitement	3	137,8	< 0,001	HS
sol x traitement	3	21,11	< 0,001	HS

ddl : degré de liberté ; F : ratio de variances; HS : hautement significative ; S : significative

Tableau IV: Résultat ANOVA de l'impact des principaux facteurs sur la biomasse des feuilles

Facteurs	ddl	F	Probabilité (5%)	Signification
sol	1	2249,46	< 0,001	HS
traitement	3	927,65	< 0,001	HS
sol x traitement	3	222,52	< 0,001	HS

ddl : degré de liberté ; F : ratio de variances; HS : hautement significative

Tableau V: Résultat ANOVA de l'impact des principaux facteurs sur la biomasse des racines

Facteurs	ddl	F	Probabilité (5%)	Signification
sol	1	4513,16	< 0,001	HS
traitement	3	2189,03	< 0,001	HS
sol x traitement	3	671,61	< 0,001	HS

ddl : degré de liberté ; F : ratio de variances; HS : hautement significative

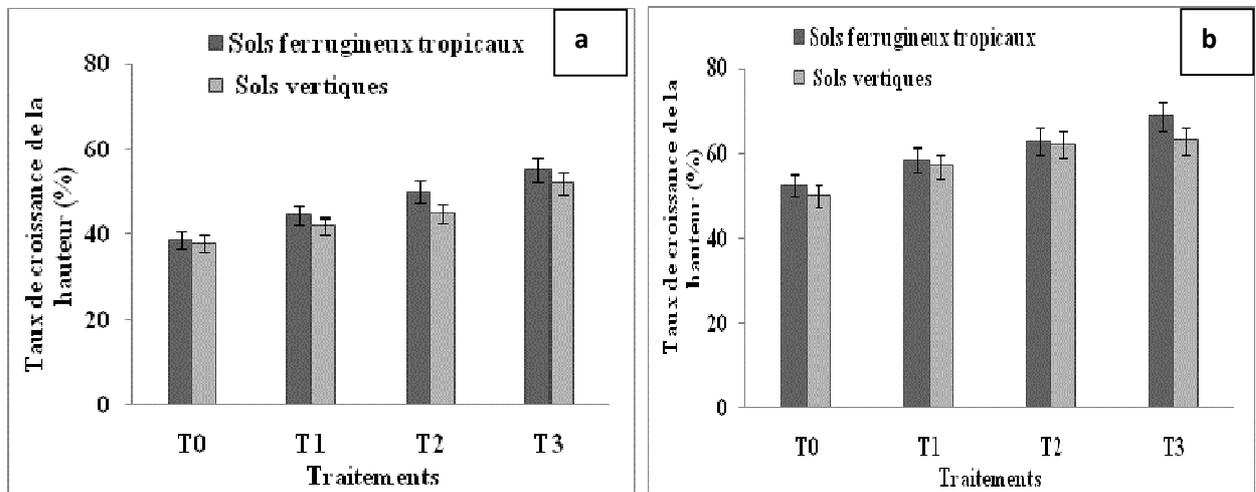


Figure 1 : Taux de croissance de la hauteur : a) à 3 mois après repiquage et b) à 7 mois après repiquage

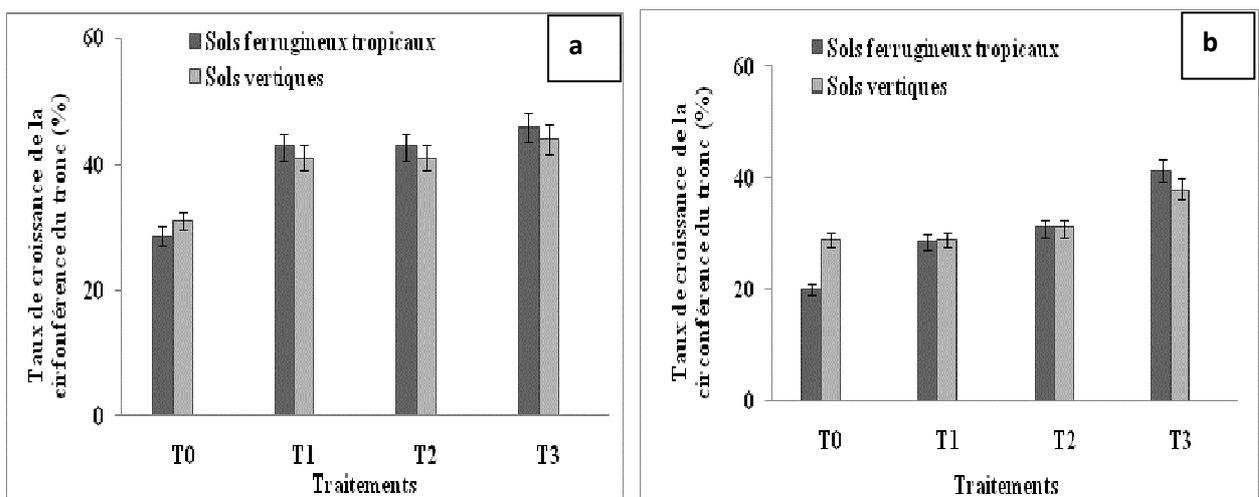


Figure 2 : Taux de croissance de la circonférence du tronc a) à 3 mois après repiquage et b) à 7 mois après repiquage

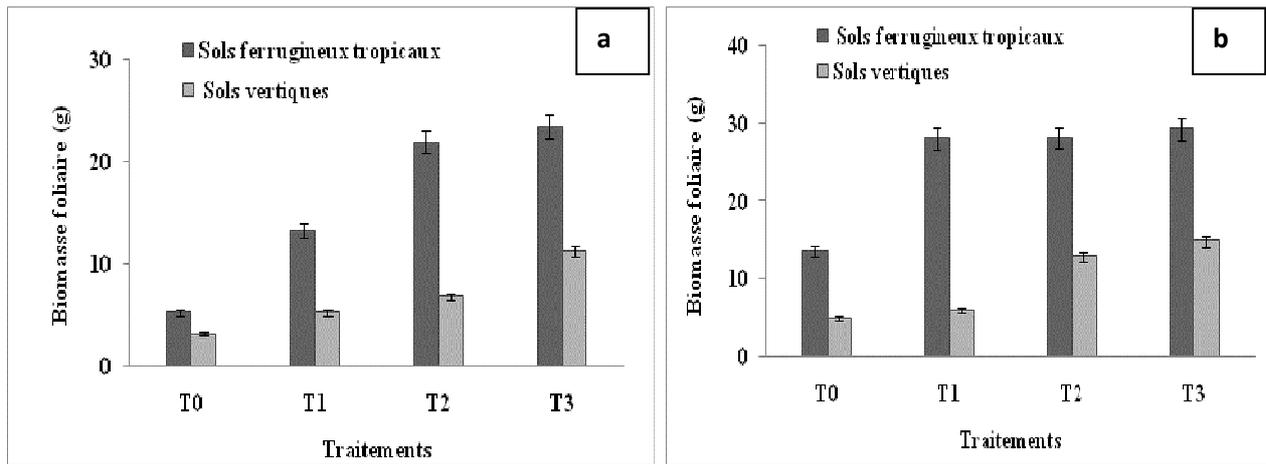


Figure 3 : Biomasse foliaire a) à 3 mois après repiquage et b) à 7 mois après repiquage

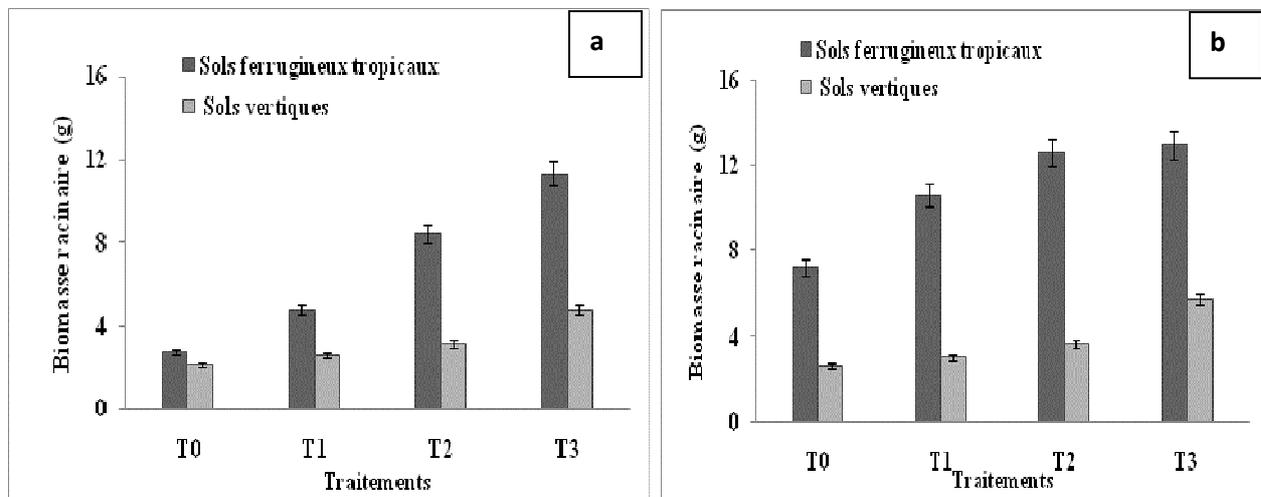


Figure 4 : Biomasse racinaire a) à 3 mois après repiquage et b) à 7 mois après repiquage

3.5. Caractéristiques chimiques des sols des différents traitements

Les caractéristiques chimiques des sols des différents traitements avant le repiquage et à la récolte du bambou sont consignés dans le **tableau VI**. La période 0 mois correspond au repiquage.

Les sols ferrugineux utilisés ont un pHeau modérément acide (6,5) tandis que les sols vertiques ont un pHeau modérément basique (7,1). L'apport des déchets solides urbains a augmenté le pHeau de 2 unités et 1 unité respectivement pour les sols ferrugineux et vertiques. Quel que soit le traitement et le type de sol, le pHeau a augmenté avec l'apport de déchet et la durée de la mise en culture.

Les teneurs en éléments nutritifs ont augmenté avec la dose d'application des déchets urbains solides. Par contre, le rapport C/N a baissé avec l'application des déchets. Quel que soit le type de sol et la dose d'apport des déchets, la CEC a baissé avec le temps de mise en culture. La CEC des sols vertiques est 2,5 fois plus élevée que celle des sols

ferrugineux tropicaux.

SFT/T0 : sols ferrugineux tropicaux sans apport de déchet. **SFT/T1** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 10 tonnes/ha. **SFT/T2** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 15 tonnes/ha. **SFT/T3** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 20 tonnes/ha. **SFT/B/T1** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 10 tonnes/ha + plant de bambou. **SFT/B/T2** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 15 tonnes/ha + plant de bambou. **SFT/B/T3** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 20 tonnes/ha + plant de bambou. **SV/T0** : sols vertiques sans apport de déchet. **SV/T1** : sols vertiques + déchets à la dose de 10 tonnes/ha. **SV/T2** : sols vertiques + déchets à la dose de 15 tonnes/ha. **SV/T3** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 20 tonnes/ha. **SV/B/T1** : sols vertiques +déchets à la dose de 10 tonnes/ha + plant de bambou. **SV/B/T2** : sols vertiques +déchets à la dose de 15 tonnes/ha + plant de bambou. **SV/B/T3** :

sols vertiques +déchets à la dose de 20 tonnes/ha + plant de bambou.

3.6. Métaux lourds exportés

Les quantités de Cd, Cu, Pb et Zn exportées par les racines et les feuilles de bambou sont consignées dans le **tableau VII**. Avec les sols ferrugineux tropicaux, la plante a prélevé en moyenne, 0,35 et 0,23 mg de Cd, 0,45 et 1,35 mg de Cu, 1,7 et 0,7 mg de Pb, 4,14 et 7,13 mg de Zn respectivement en 3 mois et 7 mois. Tandis qu'avec les sols vertiques, les prélèvements ont été en moyenne 0,09 et 0,11 mg de Cd ; 0,18 et 0,23 mg de Cu ; 0,31 et 0,7 mg de Pb ; 1,19 et 1,33 mg de Zn respectivement en 3 mois et 7 mois. La quantité des métaux exportés a augmenté avec le temps de culture avec les sols vertiques, tandis qu'avec les sols ferrugineux tropicaux, cette augmentation ne s'observe qu'avec le Cu et le Zn. Quelle que soit la dose appliquée, la quantité de métaux lourds exportée par les feuilles est supérieure à celle des racines. Les feuilles ont exporté 2 ; 3 ; 4 et 6 fois plus de Cd, Zn, Pb et Cu que les racines. Le Cd est le métal le moins prélevé par la plante (0,64 mg) tandis que le Zn est le plus prélevé (28,47 mg) soit 44 fois plus que le Cd. Les plantes cultivées dans les sols ferrugineux ont exporté des quantités de métaux lourds plus importantes comparativement aux plantes cultivées dans les sols vertiques.

4. Discussion

4.1. Taux de survie et tolérance de *Oxytenanthera abyssinica*

Le fort taux de survie observé, après 3 et 7 mois

de culture, pour les plantes poussant dans des sols contaminés par des déchets urbains et l'absence de dommages confirment la tolérance de *Oxytenanthera abyssinica* aux métaux lourds dans la limite des doses apportées.

La technique de bambou-assainissement permet de traiter les eaux usées et même de décontaminer les sols pollués ^[12]. Nos résultats sont similaires à ceux trouvés pour la plante *Thlaspi caerulescens* ^[13] qui, lorsqu'elle est exposée à des pollutions au Cd et au Zn montre une biomasse supérieure à celle observée chez les témoins. Ces résultats corroborent également avec les résultats trouvés avec *Lantana camara* (Verbenaceae) ^[14] et sur le *Salix vimilanis* ^[15] qui n'ont montré aucun symptôme de toxicité lorsqu'elles se sont développées dans des pots contenant des sols contaminés aux métaux lourds.

4.2. Croissance des plantes

Les apports des déchets urbains, contaminés par les métaux lourds, ont augmenté la croissance des plantes au cours du temps. Il est normal que le taux de croissance et les biomasses soient faibles en 3 mois comparés à 7 mois en raison de la très forte contamination en plusieurs métaux lourds. En effet, les plantes s'adapteraient aux conditions adverses du milieu de croissance.

Toutefois, le développement de *Oxytenanthera abyssinica* était remarquable, puisque les plantes ont atteint en 7 mois et avec le traitement T3 un taux de croissance de 68,75 et 63% respectivement en hauteur et en circonférence du tronc. Ces performances pourraient s'expliquer par les propriétés fertilisantes des déchets urbains solides.

Tableau VI : Caractéristiques chimiques des sols des différents traitements

Traitements	Période	pHeau	Paramètres						
			Carbone (g/kg)	N-total (g/kg)	C/N	P-total (mg/kg)	P-Bray I (mg/kg)	K-Total (mg/kg)	CEC (C mol/kg)
SFT/T0	0 mois	6,47	0,081	0,006	13	136	1,05	2245	4,55
SFT/T1	0 mois	8,34	0,156	0,013	12	525	25,49	2245	5,55
SFT/B/T1	3 mois	8,59	1,63	0,144	11	592	54,89	2068	4,30
SFT/B/T1	7 mois	8,58	1,37	0,138	10	507	39,77	2134	5,00
SFT/T2	0 mois	8,34	0,187	0,017	11	693	32,17	2134	5,85
SFT/B/T2	3 mois	8,61	1,55	0,174	9	702	64,13	2024	4,55
SFT/B/T2	7 mois	8,63	1,52	0,152	10	674	60,98	1935	4,90
SFT/T3	0 mois	8,31	0,2	0,018	11	736	40,32	2223	6,45
SFT/B/T3	3 mois	8,53	1,7	0,18	9	695	70,64	1891	4,75
SFT/B/T3	7 mois	8,63	1,66	0,167	10	655	56,36	1869	4,80
SV/T0	0 mois	7,14	0,122	0,009	14	152	1,13	1293	15,45
SV/T1	0 mois	8,06	0,199	0,016	12	585	60,14	1780	14,80
SV/B/T1	3 mois	8,41	1,77	0,168	11	663	23,35	1714	12,85
SV/B/T1	7 mois	8,48	1,77	0,169	10	663	21,92	1691,7	12,85
SV/T2	0 mois	8,16	0,217	0,019	11	752	67,28	1824	13,35
SV/B/T2	3 mois	8,47	1,96	0,218	9	805	28,39	1780	12,60
SV/B/T2	7 mois	8,49	1,98	0,215	9	879	30,49	1603	11,55
SV/T3	0 mois	8,14	0,237	0,020	12	850	69,38	1913	13,60
SV/B/T3	3 mois	8,49	2,25	0,225	10	881	39,35	1780	10,65
SV/B/T3	7 mois	8,46	1,93	0,200	10	817	37,04	1625	10,50

Tableau VII : Quantités de métaux lourds exportés (mg)

	Traitements	Cd		Cu		Pb		Zn	
		3 mois	7 mois	3 mois	7 mois	3 mois	7 mois	3 mois	7 mois
Racines	SFT/T1	0,26	0,64	0,02	0,27	3,79	0,0001	5,17	14,18
	SFT/T2	0,31	0,35	0,59	0,68	0,56	0,0001	4,29	4,56
	SFT/T3	0,22	0,13	0,34	0,13	0,0001	0,91	2,09	2,21
Feuilles	SFT/T1	0,53	0,0003	0,37	5,69	1,59	2,52	5,60	14,29
	SFT/T2	0,42	0,28	0,66	0,70	2,39	0,06	4,38	4,65
	SFT/T3	0,35	0,0003	0,70	0,61	1,87	0,67	3,30	2,87
Racines	SV/T1	0,08	0,05	0,10	0,03	0,84	0,15	0,76	0,57
	SV/T2	0,04	0,06	0,18	0,10	0,00003	0,44	0,67	0,64
	SV/T3	0,09	0,11	0,19	0,15	0,24	0,17	1,47	0,91
Feuilles	SV/T1	0,11	0,10	0,09	0,15	0,58	0,29	1,07	0,80
	SV/T2	0,10	0,19	0,18	0,56	0,19	0,93	1,06	2,43
	SV/T3	0,14	0,15	0,35	0,40	0,0001	2,23	2,10	2,60

SFT/T1 : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 10 tonnes/ha, **SFT/T2** : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 15 tonnes/ha
SFT/T3 : sols ferrugineux tropicaux +déchets à la dose de 20 tonnes/ha, **SV/T1** : sols vertiques +déchets à la dose de 10 tonnes/ha
SV/T2 : sols vertiques +déchets à la dose de 15 tonnes/ha, **SV/T3** : sols vertiques +déchets à la dose de 20 tonnes/ha

D'une part, ces déchets sont riches en matière organique et en éléments nutritifs et d'autre part, contiendraient beaucoup moins de sels nocifs pour la croissance des plantes. Le sel en concentration élevée dans le sol, causerait une altération primaire qui inhibe la croissance des plantes. Plusieurs études ont montré que l'application d'amendement organique aux sols contaminés par des métaux conduit à leur revégétalisation ^[16].

4.3. Caractéristiques chimiques des sols des différents traitements

Les résultats indiquent une légère augmentation du pH pendant la durée de la mise en culture. Cette hausse s'expliquerait par la saturation du complexe d'échange cationique avec comme conséquence une diminution progressive du taux d'aluminium échangeable dans la solution du sol. Les travaux ^[17] ont également montré une hausse de la valeur du pH avec l'augmentation du taux de matière organique dans le sol au cours du temps. Des valeurs de pH basiques après cultures (8,5 et 8,1 respectivement en sol ferrugineux tropicaux et vertiques) (**tableau VI**) modifient sur la capacité d'adsorption des métaux lourds. Ceux-ci sont très mobiles dans des conditions acides; cette mobilité mais aussi la disponibilité diminuent au fur et à mesure que le pH se rapproche de la neutralité ^[18]. La minéralisation de matière organique au cours de la mise en culture libère les éléments nutritifs majeurs (N, P, K). Une carence de l'un de ces

éléments majeurs peut affecter la biodisponibilité des métaux lourds dans les sols pollués ^[19]. La CEC a baissé avec la dose de déchets et la durée de mise en culture. Cette diminution de la CEC est en contradiction avec les résultats rapportés sur des sols ferralitiques ^[20]. Ces résultats ont montré que les substrats organiques doivent maintenir, voire relever le niveau de fertilité du sol.

4.4. Métaux lourds exportés

Les résultats ont montré une capacité de bambou à accumuler de fortes teneurs de Cd, de Cu, de Pb et de Zn. Cela s'expliquerait par le fait que cette plante, produisant une grande quantité de biomasse (foliaire et racinaire) puisse être stimulée pour la bioaccumulation de grandes quantités de métaux lourds. Les teneurs en métaux lourds obtenues dans les biomasses aériennes et racinaires des plantes sont supérieures aux valeurs obtenues avec les concentrations critiques au-dessus desquelles les effets de toxicité sont possibles (30 mg kg⁻¹ pour le Cd, 100 mg kg⁻¹ pour le Cu, 300 mg kg⁻¹ pour le Pb et 400 mg kg⁻¹ pour le Zn selon ^[21]. Des études antérieures réalisées avec le colza sur des sols contaminés, montrent une accumulation du Pb, de Cu, Cd et du Zn dans la biomasse de la plante ^[22]. Des résultats similaires ont été observés avec les plantules d'*Arabidopsis thaliana* ^[23]. Des résultats comparables ont été enregistrés chez *Arabidopsis halleri* ^[24] avec des teneurs foliaires de 300 mg kg⁻¹ de Cd et 20800 mg kg⁻¹ de Zn.

Les études en milieux hydroponiques ont montré la disponibilité de diverses espèces de Brassica à accumuler des métaux dans les pousses ^[25]. Des résultats similaires ont également été rapportés sur le peuplier ^[26] et sur le bouleau, l'érable, le tilleul et le saule ^[27]. La teneur en Zn trouvée dans les feuilles est au-dessus de la concentration toxique dans le fourrage ^[28]. Ce résultat est similaire à celui trouvé en Espagne chez *Lolium sp.*, une graminée, où la concentration en Zn dépasse très largement le niveau critique ^[29]. Les quantités élevées de métaux exportés par les feuilles comparativement aux racines au cours du temps s'expliquerait par la biomasse élevée en feuille par rapport aux racines.

5. Conclusion

Notre étude a montré que *Oxytenanthera abyssinica* tolère les fortes concentrations d'un sol en métaux lourds (Cd, Cu, Pb et Zn). *Oxytenanthera abyssinica* a aussi été capable d'absorber de grandes quantités de Cd, Cu, Pb et Zn et d'en transférer une majeure partie vers ses parties aériennes. Ces résultats offrent des perspectives encourageantes d'utilisation de cette plante pour décontaminer, à faible coût, les sols ferrugineux tropicaux et vertiques contaminés par les métaux lourds.

Remerciements

Les auteurs remercient le projet CORUS II N°6043 qui a entièrement financé ces travaux.

Bibliographie

- [1] Baize D. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France), INRA Editions, 1997
- [2] Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, 3rd edn. CRC Press, 2001
- [3] Gérard E., Echevarria G., Sterckman T., Morel J. L. J. Environ. Qual. (2000) 29, 1117-1123.
- [4] Mc Grath S.P. CAB Int., Wallingford, UK, (1998) 261-287.
- [5] Greger M., Landberg T. In J. Phytorem. (1999) 1, 115-123
- [6] Baker A. J. M., Mc Garth S.P., Sidoli C.M.D., Reeves R.D. Resour. Conserv. Recyc. (1994) 11, 41- 49.
- [7] Schwartz C., Gérard E., Perronnet K., Morel J. L. Sci. Total Environ. (2001) 279, 215-221.
- [8] Wenzel W. W., Adriano D.C., Salt D., Smith R. Phytoremediation: A plant-microbe –based system. In Bioremediation of contaminated Soils. Eds. D. C. Adriano, J-M Bollag, W. T. Frankenberger Jr. and R.C.

- Sim. (1999), 457-510
- [9] Johnson M.S., McNeilly T., Putwain P.D. Environ. Pollut. (1997) 12, 261-277.
- [10] Bray R.H., Kurtz L.T. Sci. (1945) 59, 39-45
- [11] Walkley A., Black A. Soil Sci. (1934) 37, 29-38
- [12] Véronique A., Dijella B., Nathalie K., Grégory B. Desalination. (2009) 247, 70-78
- [13] Epelde, L., Becerril, J.M., Hernandez-Allica, J., Barrutia, O., Garbisu C. App. Soil Ecol. (2008) 39, 299-310
- [14] Thi My D. H. Impacts des métaux lourds Sur l'interaction plante/ver de terre/microflore mellurique. Thèse de doctorat spécialité écologie microbienne. Université Paris, Paris Est, 2009
- [15] Walter R., Catherine K., Kattia B. Plant and soil. (2003) 256, 256-272
- [16] Juwarkar, A.A., Yadav, S.K., Kumar, G.P., Singh, S.K. Environmental Monitoring and Assessment (2008) 145, 7–15.
- [17] Logan T.J., Lindsay B.J., Goins L.E., Ryan J.A. J. Environ. Qual. (1997) 26, 543–550.
- [18] Alloway B. J. Heavy Metals in Soils, Blackie Academic and Professional, (1995), 36-40
- [19] Cooke J.A., Johnson M.S. Environmental Review (2002) 10, 41–71.
- [20] Zombré P. N. Biotechnol. Agron. Soc. Environ., (2006) 10, 139–148
- [21] Kabata-Pendias A., Pendias H. Trace elements in soils and plants, 2nd Edition. CRC press, Boca Raton, FL, (1992) 365-373
- [22] Blaylock M. J., Salt D.E., Dushenkro S, Zakhrova O., Gussman C. Environ. Sci. Technol. (1997) 31, 860-865
- [23] Chris F. M. M. Etude de mécanismes d'accumulation du cadmium chez *Arabidopsis thaliana* (écotype Wassilewskija) et chez un mélèze hybride (*Larix x eurolepis*) par des approches moléculaires et développementales. Thèse de doctorat de l'Université de Lomoges, 2010
- [24] Zhao F.J., Lombi E., Breedon, T., McGrath S.P. Plant Cell Environ (2000) 23, 507-514
- [25] Ebbs S.D., Lassat M.H., Brady D.J., Cornish J., Gordon R., Kochian L.V. J. Environ. Qual. (1997) 26, 1424-1430
- [26] Laureysens I., Blust R., De T. L., Lemmens, C., Ceulemans, R. Environmental Pollut. (2004) 131, 485-494
- [27] Piczak K., Lesniewicz A., Zyrnicki W. Environmental Monitoring and Assessment (2003) 86, 273-287.
- [28] Dudka S., Piotrowsk M., Chlopekca A., Witek T. Jour. of Geochemical Exploration (1995) 5, 237-250.
- [29] Maiz I., Arambarri R., Garcia E., Millan E. Environmental Pollut. (2000) 110, 3-9