
Soumis le : 08 Novembre 2013

Forme révisée acceptée le : 01 Juin 2014

Email de l'auteur correspondant :

saraharb@hotmail.fr

Nature & Technology

Phytoextraction du zinc et du cadmium par le kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) cultivé sur un sol pollué par des métaux traces

Sarra Arbaoui^a, Roger Paul^b, Taoufik Bettaieb^a

^a Département Agronomie et Biotechnologies Végétales, Institut National Agronomique de Tunisie, 43 avenue Charles Nicolle, 1082 Tunis Mahragène, Tunisie ^b Laboratoire de Toxicologie environnementale, Gembloux Agro Bio Tech, Belgique, 2, Passage de Déportés, 5030 Gembloux, Belgique

Résumé

L'irrigation continue à l'eau usée traitée apporte au sol des quantités en éléments traces métallique tels que le Cd et le Zn est constituée, ainsi, une source de contamination des terres agricoles. Cette contamination perturbe le fonctionnement des écosystèmes, mais aussi présente un danger pour la santé humaine à cause du transfert de ces contaminants à travers la chaîne alimentaire. La phytoextraction repose sur la capacité des plantes supérieures à extraire les métaux toxiques et les accumuler dans leurs tissus. Dans le présent travail la capacité du kenaf à extraire le Cd et le Zn à partir d'un sol irrigué depuis 20 ans par l'eau usée traitée a été évaluée. L'essai a été conduit selon un dispositif en bloc aléatoire. Après la récolte les teneurs des métaux traces dans les différentes parties de la plante ont été déterminées par des analyses d'absorption atomique. Les concentrations du kenaf en Zn et en Cd ont atteint 65 mg/kg MS et 2.6 mg/kg MS respectivement. Ces résultats montrent la possibilité d'utilisation du kenaf dans la dépollution des sols contaminés par ces éléments traces.

Mots clés: kenaf ; phytoremédiation ; zinc ; cadmium.

Abstract

Problems with contaminated soils are more and more preoccupying. Among the contaminants generated by industrial urban emissions and agri-cultural practices, the most common are trace metals. Phytoextraction has emerged as an approach to clean up metal polluted soils in which plants are used to extract toxic metals from soils. For rapid land remediation, plant species used for the phytoextraction process must produce sufficient biomass while accumulating high concentration of metals. The potential of kenaf for extraction of cadmium and zinc from polluted soil in Monastir, a town from Tunisian Sahel, was investigated. Kenaf plants were grown in a soil irrigated by waste water during 20 years. Experiment was carried out according bloc design. Growth and yield parameters were collected. Cd and Zn content of plants and soil were determined using atomic absorption spectrophotometry. The quantities of Zn and Cd extracted reach 65 mg/kg DW and 2.6 mg/kg DW, respectively and showed that decontamination of Zn and Cd polluted substrates is possible by kenaf crop.

Keywords: kenaf; phytoremediation; zinc; cadmium.

1. Introduction

La pollution des sols par les éléments traces métalliques (ETM) résulte principalement de l'altération des matériaux de base et de l'activité humaine, à savoir, l'exploitation minière, l'application de boues et l'irrigation par des eaux usées [1]. En effet, dans les pays de la rive sud de la Méditerranée, connus pour leurs climats arides à semi arides, les ressources naturelles en eau sont limitées, alors que la demande est en constante augmentation. En Tunisie, depuis 1960, la réutilisation des eaux usées traitées (EUT) a été adoptée afin de satisfaire les différents besoins de l'agriculture. Ainsi, la réutilisation des eaux usées traitées peut apporter des suppléments en azote et phosphore et améliorer le rendement des cultures. Néanmoins, si cette ressource constitue une valeur hydrique et un potentiel d'apport de matières fertilisantes, elle peut être également une source de pollution. Son contenu en éléments traces métalliques peut présenter un risque pour l'environnement et la santé humaine [2 ; 3]. En effet, l'accumulation des ETM tels que le Pb, As, Se, Cu, Cd et le Zn dans les terres agricoles a non seulement des effets néfastes sur le fonctionnement de l'écosystème, mais aussi pose des risques potentiels pour la santé en raison du transfert de ces contaminants dans la chaîne alimentaire [4]. Bien que les métaux tels que le zinc sont essentiels pour la croissance et le développement des végétaux, leur présence dans le sol avec des fortes doses devient toxiques. D'autre part, plusieurs métaux non essentiels, comme le cadmium, sont phytotoxiques, même à faible concentration [5; 6]. La phytoremédiation est un ensemble de techniques permettant de dépolluer des sols, d'épurer des eaux usées ou d'assainir l'air en utilisant des plantes supérieures [7; 8]. Des stratégies développées par les plantes pour résister ou accumuler de fortes quantités de métaux ont été bien étudiées, notamment afin d'identifier des espèces végétales hyperaccumulatrices, en l'occurrence, les plantes accumulant des métaux traces plus de 1% dans leurs

organes aériens sans montrer des effets phytotoxiques [9]. Cependant, ces espèces présentent généralement une faible biomasse et donc accumulent de faibles quantités de métaux extraits. Parallèlement à la recherche sur les hyperaccumulateurs, l'idée d'utiliser des espèces végétales à biomasse élevée a émergé au cours des dernières années. En effet, le kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) est une annuelle appartenant à la famille des malvacées caractérisée par une croissance rapide et une forte biomasse. C'est une plante prometteuse puisqu'elle constitue une source de fibre à multi usages à savoir la fabrication des biomatériaux, de la pâte à papier et de textile [10]. L'objectif de ce travail est d'évaluer la capacité du kenaf à extraire et à accumuler le Cd et le Zn à partir d'un sol pollué par des ETM suite à son irrigation par des eaux usées traitées.

2. Matériel et méthodes

2.1. Matériel végétal

Le matériel végétal utilisé est constitué de jeunes plants de Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.), du cultivar Tainung 2, obtenus par semis. Le semis a été réalisé le 1 avril 2012 en plaques alvéolées sur la tourbe brune. La plantation dans la parcelle expérimentale a été faite le 02 Mai 2012.

2.2. Conditions de culture et traitements réalisés

L'essai a été conduit en plein champ dans deux parcelles du terrain de Golf de Monastir, ville côtière du Sahel tunisien située au centre-est de la Tunisie.

La première parcelle n'a jamais été irriguée par des eaux usées traitées (NC) et la seconde a été, pendant 20 ans, continuellement irriguée à l'eau usée traitée (C). Lors de cet essai, quatre traitements ont été réalisés. Dans chacune des deux parcelles, les plants mis en place ont été irrigués, durant toute la période de la culture, soit à l'eau potable (Ep) ou à l'eau usée traitée (Eu). Les 4 traitements sont les suivants :

- T1 (Témoin) : Sol non contaminé (NC) irrigué à l'eau potable (Ep) = NC Ep

- T2 : Sol non contaminé (NC) irrigué à l'eau usée (Eu) = NC Eu
- T3 : Sol contaminé (C) irrigué à l'eau potable (Ep) = C Ep
- T4 : Sol contaminé (C) irrigué à l'eau usée (Eu) = C Eu

L'essai a été conduit selon un dispositif expérimental en blocs complètement aléatoire à 3 répétitions. Chaque unité expérimentale relative à un traitement dans un bloc a été constituée de 20 plantules, homogènes, âgées de 1 mois.

Les deux parcelles de culture sont caractérisées par un sol léger composé d'argile (9,5%), de limon (23%), de sable (66%), ses propriétés physico-chimiques sont présentées

dans le tableau 1. La fertilisation organique et minérale appliquée à cette culture a été composée de fumier bien décomposé (3 kg. m⁻²), de sulfate de potasse à 54% K₂O (30 g.m⁻²), de superphosphate à 45% P₂O₅ (20 g.m⁻²) et du nitrate d'ammonium à 33% (25 g.m⁻²) additionné en cours de culture.

Les valeurs moyennes des caractéristiques chimiques de l'eau d'irrigation présentées au tableau 2 proviennent d'analyses faites au mois d'avril, juillet et octobre.

La culture a été conduite durant la saison estivale 2012 qui s'est caractérisée par des températures moyennes maximales de 28,1°C et minimales de 18,9°C (Tableau 3) et un apport de 123 mm d'eau de pluie (Tableau 4).

Tableau 1
Propriétés physico-chimiques du sol

pH	C _{org} (g/kg MS)	C/N	% MO
6,3	62,83	22,71	1,5

C_{org} : Carbone organique
MO : Matière organique

Tableau 2
Caractéristiques chimiques de l'eau d'irrigation (moyennes de trois prélèvements)

Origine de l'eau	pH	Salinité (g.l ⁻¹)	Cd (µg.l ⁻¹)	Zn (µg.l ⁻¹)
SONEDE	7,4	1,04	00	00
Eau usée traitée	7,8	2,3	30	180

Tableau 3
Evolution des températures moyennes maximales et minimales au cours de la période de culture du kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.)

Mois	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Moyennes
Températures moyennes maximales (°C)	24,2	28,1	31	32,1	29,1	25,3	28,1
Températures moyennes minimales (°C)	15	18,2	21	22,4	20,7	16,6	18,9

Tableau 4
Précipitations mensuelles au cours de la période de culture du kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.)

Mois	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Total
Pluviométrie (mm)	14	7	1	8	32	61	123

2.3. Paramètres observés

Les observations réalisées ont concerné des paramètres de croissance et des analyses des teneurs en Zn et Cd du sol et de la plante. Les paramètres de croissance concernés sont la hauteur de la plante, le diamètre de la tige mesuré à une hauteur de 2 cm à partir du collet et la matière sèche de la partie caulinaire et la partie racinaire. Ces observations ont

été réalisées à la fin de la culture indiquée par le jaunissement et la chute du feuillage.

2.4. Analyses du sol et des plantes

Après trois mois de culture, les différentes parties de la plante sont récoltées (racine, tige et feuille) et séchées à

l'étuve à 80°C pendant 48 heures jusqu'à l'obtention d'un poids constant.

Des échantillons plantes de 0,5 g chacun sont pesés avec précision dans des creusets de silice et placés dans un four à moufle à 450°C pendant 4 heures. La cendre a été complètement dissoute 5 ml de HCl à 20%. Les échantillons du sol ont été séchés, broyés et minéralisés par HNO₃ et HCl₄ concentrés. Les concentrations en Cd et Zn de sol et des différentes parties de plante ont été déterminées par spectrophotométrie d'absorption atomique par AAS-four (ASS800-PerkinElmer).

2.5. Analyse des résultats

Le test statistique ANOVA et le test à la PPDS au seuil 5%, utilisé pour la séparation des moyennes, ont servi pour analyser les résultats obtenus.

3. Résultats et discussions

3.1. Croissance du kenaf

La croissance du Kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) ne varie ni en fonction du site de culture ni en fonction de la qualité de l'eau d'irrigation utilisée (Tableau 5). En effet, le kenaf végète sans différence apparente et sans aucun signe de phytotoxicité sur les deux parcelles du terrain de golf de

Monastir dont une irriguée depuis 20 par des eaux usées traitées. Lors de cette culture de kenaf conduite pendant les saisons printanière et estivale, l'eau potable ainsi que l'eau usée sont indépendamment utilisées. Tous les paramètres de croissance observés à savoir la hauteur de la plante, le diamètre de la tige mesuré à une hauteur de 2 cm à partir du collet et la matière sèche de la partie caulinaire et la partie racinaire ne présentent aucune différence significative ($p < 0,05$) (Tableau 5). Ces observations montrent l'indifférence de cette plante à son irrigation aux usées traitées d'une part et à sa culture sur un sol irrigué depuis deux décennies par la même eau. Ceci peut être considéré comme une première indication de la capacité de l'espèce à tolérer les métaux traces présents dans le sol. En effet, Cartago *et al.* [11] rapportent que le kenaf peut être cultivé sur des sols contaminés au mercure, cadmium, cuivre et chrome sans réduction de la productivité. Les résultats obtenus confirment ceux de Arbaoui et Ben Salah [12] qui ont observé un comportement similaire du kenaf irrigué aux eaux usées traitées et parlent même d'un effet positif, estimé à 7%, par rapport à des cultures conduites avec une eau de puits légèrement chargée en sel avec une conductivité électrique de 1.45 dS/m.

Tableau 5

Effets des eaux usées traitées sur la croissance du kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.)

Traitements	Hauteur (cm)	Diamètre (mm)	Matière sèche totale (g/plante)	Matière sèche caulinaire (g/plante)	Matière sèche racinaire (g/plante)
1	125.34±3.51	14.76±1.62	54.16±2.12	47.22±1.52	7.38±0.83
2	128.56±2.62	15.32±1.43	55.18±1.81	48.15±1.71	7.03±0.74
3	124.78±3.77	14.45±1.34	53.45±2.36	46.31±1.83	7.14±1.12
4	126.45±2.45	16.23±1.32	56.04±2.48	48.12±1.74	7.92±0.71

1 (Témoin) : Sol non contaminé (NC) irrigué à l'eau potable (Ep) = NC Ep

2 : Sol non contaminé (NC) irrigué à l'eau usée (Eu) = NC Eu

3 : Sol contaminé (C) irrigué à l'eau potable (Ep) = C Ep

4 : Sol contaminé (C) irrigué à l'eau usée (Eu) = C Eu

3.2. Extraction et Accumulation des métaux traces

L'analyse du sol des parcelles sur lesquelles est conduite la culture du kenaf a montré une différence de

leurs contenus en Zn et en Cd avant et après la récolte (Tableau 6). En effet, quelque soit le traitement, les teneurs du sol en ces éléments traces diminuent après la récolte des plantes montrant la capacité d'*Hibiscus cannabinus* L. à extraire à partir du support de culture le Cd et le Zn. Les résultats présentés au tableau 6 montrent que le kenaf élimine environ 3 mg.kg⁻¹ de Zn et environ 0,2 mg de Cd par kg de sol dans tous les traitements. L'irrigation à l'eau potable ou à l'eau usée n'a pas d'effets sur ce pouvoir dépolluant du sol de cette plante.

Les résultats présentés dans le tableau 7 montrent une différence d'accumulation du Zn et du Cd par *Hibiscus cannabinus* L. dans ces différents organes en fonction de la parcelle de culture et de la qualité de l'eau d'irrigation.

Sur les sols irrigués pendant 20 ans et en cours de culture à l'eau usée traitée, les teneurs du kenaf en Zn et en Cd sont les plus élevées où elles atteignent environ 65 mg de Zn et environ 2.6 mg de Cd/kg de matière sèche. Ces teneurs en ces ETM sont voisines de 60 mg de Zn et ne dépassent pas 0,3 Cd/kg de matière sèche lorsque le sol n'a pas été irrigué par les eaux usées avant et encours de culture. Chez le traitement 2, l'accumulation du Zn et du Cd par le kenaf prend des valeurs intermédiaires. Les concentrations

élevées en Zn et en Cd trouvées chez les plants d'*Hibiscus cannabinus* L. témoignent d'une contamination métallique des sols irriguées par les eaux usées. En effet, La concentration de l'eau usée utilisée en Cd qui est de 30 µg/l dépassent largement le maximum recommandé pour les eaux d'irrigation qui est de 10 µg/l [13].

Les résultats obtenus démontrent que l'accumulation des métaux dans les différents organes de la plante se caractérise par une hiérarchie des concentrations ; les plus élevées étant celles du Zn suivies de celles du Cd. Dans toutes les situations et avec tous les traitements même sur le sol qui n'a pas été irrigué par les EUT, *Hibiscus cannabinus* L. accumule le Zn et le Cd dans ses racines. Ces quantités peuvent être 65,33 mg de Zn et 2,67 mg de Cd/kg de matière sèche des racines. Les concentrations en ces ETM sont moins importantes dans la matière sèche des tiges et ensuite des feuilles. Toutefois, les quantités accumulées par la partie caulinare (tiges et feuilles) sont beaucoup plus importantes que celles des racines à raison de la forte biomasse produite dans cette partie de la plante (Tableau 7). La capacité du kenaf à accumuler le Cd a été rapportée par Nabulo et al. [14] qui ont montré que l'espèce peut accumuler jusqu'à 3,3 mg/kg MS.

Tableau 6

Teneur des sols en Zn et en Cd avant et après la récolte du kenaf (<i>Hibiscus cannabinus</i> L.)				
Teneurs en métaux traces	Zn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cd (mg/kg)
	Avant la récolte	Après la récolte	Avant la récolte	Après la récolte
T1	54,39 ± 0,09	51,55 ± 0,87	0,23 ± 0,15	0,013 ± 0,006
T2	54,39 ± 0,09	50,64 ± 0,6	0,23 ± 0,15	0,07 ± 0,05
T3	87,86 ± 1	84,86 ± 1,88	2,13 ± 0,13	1,96 ± 0,06
T2	87,86 ± 1	85,08 ± 1,75	2,13 ± 0,13	1,92 ± 0,12

Tableau 7

Teneur des plantes en Zn et en Cd à la fin de la culture			
Traitement	Parties	Zn (mg.kg ⁻¹)	Cd (mg.kg ⁻¹)
T1	Racines	60,49 ± 6,44	0,31 ± 0,02
	Tiges	47,84 ± 0,25	0,25 ± 0,10
	Feuilles	25,30 ± 4,08	0,0013 ± 0,006
T2	Racines	50,57 ± 2,24	0,22 ± 0,09
	Tiges	35,00 ± 3,57	0,007 ± 0,006
	Feuilles	21,85 ± 2,25	0,007 ± 0,005
T3	Racines	65,33 ± 4,45	2,67 ± 0,41
	Tiges	53,90 ± 1,74	1,74 ± 0,22

T4	Feuilles	21,62 ± 1,05	0,37 ± 0,07
	Racines	60,98 ± 1,55	1,95 ± 0,32
	Tiges	54,55 ± 3,17	1,06 ± 0,15
	Feuilles	22,09 ± 0,72	0,43 ± 0,03

T1 (Témoin) : Sol non contaminé (NC) irrigué à l'eau potable (Ep) = NC Ep

T2 : Sol non contaminé (NC) irrigué à l'eau usée (Eu) = NC Eu

T3 : Sol contaminé (C) irrigué à l'eau potable (Ep) = C Ep

T4 : Sol contaminé (C) irrigué à l'eau usée (Eu) = C Eu

A partir de ces résultats, on constate que le kenaf a extrait des quantités relativement élevées en Zn et en Cd malgré la phytotoxicité de ce dernier et les a accumulés dans ses tissus tout en produisant une forte biomasse. En effet, selon Schwartz et al. [15], l'efficacité de la phytoextraction est relative à la capacité d'espèce à pousser sur des sols pollués et de produire une biomasse avec des quantités importantes de métaux cibles dans les parties aériennes. Un comportement similaire a été enregistré sous des conditions tropicales chez Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.) une annuelle appartenant au même genre que le kenaf [16; 17]. Comme pour le kenaf, d'autres plantes industrielles à grande biomasse sont utilisées dans la phytoremédiation comme la carambole (*Averrhoa caramboles* L.) qui présente une option réalisable pour remédier les sols agricoles contaminés par le Cd et pour produire du bois. Dans un sol légèrement contaminé, l'arbre serait capable d'extraire 50% du Cd total du sol pendant 13 ans de présence sur le même site [18].

4. Conclusion

Une culture printanière et estivale du kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) a été menée dans la région de Monastir sur un sol contaminé en Zn et Cd suite à son irrigation pendant 20 ans par une eau usée ou sur un sol non contaminé par ces ETM. Dans les deux cas, les cultures ont été irriguées soit à l'eau usée ou à l'eau potable. Cette culture a permis :

- la production d'une biomasse importante équivalente avec tous les traitements. La quantité de matière sèche produite a été voisine de 55 g/plante,
- la confirmation de la capacité d'*Hibiscus cannabinus* L. d'accumuler dans ses tissus caulinaires des ETM.

Ceci s'est manifesté par l'extraction d'environ 3 mg de Zn et de 0,2 mg de Cd par kg de sol au cours d'une seule culture.

Au vue de ces résultats, *Hibiscus cannabinus* L. peut constituer un moyen biologique pour la dépollution des sols contaminés par les ETM et ainsi valoriser des terres marginales.

Références

- [1] A. Kabata-Pendias, H. Pendias. Trace Elements in Soils and Plants, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, (2001) 432 pp.
- [2] A. Bahri, Utilization of treated wastewater and sewage sludge in agriculture in Tunisia, Desalination, 67 (1987) 233–244.
- [3] B. Bahri, Environmental impact of marginal waters and sewage sludge use in Tunisia, Report N° 1013, Lund Sweden, (1995) 141 pp.
- [4] K.E. Giller, E. Witter and S.P. McGrath. Toxicity of heavy metals to microorganism and microbial processes in agricultural soils: A review. Soil Biology and Biochemistry, 30(1998) 1389-1414.
- [5] M.M. Lasat. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms. Journal of Environmental Quality, 31 (2002) 109-20.
- [6] M. Bertrand et I. Poirier. Photosynthetic organisms and excess of metals. otosynthetic 43 (2005) 345-353.
- [7] I. Raskin, N.P.B.A. Kumar, S. Dushenkov, D.E. Salt. Bioconcentration of heavy metal by plants. Curr Opin Biotechnol 5(1994) 285–290.

- [8] D.E. Salt, M. Blaylock, N.P.B.A. Kumar, V. Dushenkov, B.D. Ensley, I. Chet, I. Raskin. Phytoremediation : a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants. *Biotechnology*, 13(1995) 468–474.
- [9] N. Rascio, F. Navari-Izzo . Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*, 2 (2011) 169-181.
- [10] C. Webber, L. Harbans, K. Venita Kenaf production: fiber, feed and seed. In: Janick J, Whipkey A (eds) *Trends in new crops and new uses*, ASHS Press, Alexandria, 13(2002) 327–339.
- [11] A. Cartoga, A. Fernando, J.S. Oliveira. Effects on growth, productivity and biomass quality of kenaf of soils contaminated with heavy metals. *Sci Ref Cosmos*, 4 (2005)1-4.
- [12] S. Arbaoui et H. Ben Salah .Effets de la qualité de l'eau d'irrigation sur le rendement et la qualité d'une plante industrielle: le kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.). *Revue de l'INAT*, 26 (2012) 34-39.
- [13] M. A. Smith. Retention of bacteria, viruse and heavy metal on cops irrigated reclaimed water. *Australian Water Resources Council*, 74 (1982) 206- 246.
- [14] G. Nabulo, C.R. Black, S.D. Young. Trace metal uptake by tropical vegetables grown on soil amended with urban sewage sludge. *Environ Pollut*, 15 (2011) 368–376.
- [15] C. Schwartz, S. Guimont, C. Saison, K. Perronnet, J.L. Morel. Phytoextraction of Cd and Zn by the hyperaccumulator plant *Thlaspi caerulescens* as affected by plant size and origin, *South Afr. J. Sci*, 97(2001) 561-564.
- [16] N. Anyinkeng , A.M. Mih. Soil nutrient supplementation on growth and biomass production of roselle under tropical conditions. *Agric Biol J N Am.*, 2 (2011) 603–609.
- [17] J.A. Ondo et al. Translocation of metals in two leafy vegetables grown in urban gardens of Ntoun, Gabon. *Afr J Agric Res.* 7 (2012) 5621–5627.
- [18] J.T. Li, B. Liao, Z.Y. Dai, R. Zhu and W.S. Shu. Phytoextraction of Cd-contaminated soil by carambola (*Averrhoa carambola*) in field trials. *Chemosphere*, 76 (2009)1233-1239.