

Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de différents jardins potagers de la ville minière de Lubumbashi et risques de contamination des cultures potagères

Mpundu Mubemba Mulambi^{1&2}, Useni Sikuzani Yannick¹, Mwamba Mulembo Theodore¹, Kateta Malangisha Guy¹, Mwansa Muyembe¹, Ilunga Kampanyi¹, Kamengwa Kissi Ckeface¹, Kyungu Kalilo³, Nyembo Kimuni Luciens¹

¹Département de phytotechnie, faculté des sciences agronomiques, Université de Lubumbashi, BP 1825, Lubumbashi, RD Congo

²Ecole Supérieure du Tourisme et hôtellerie, Université de Lubumbashi, BP 1825, Lubumbashi, RD Congo

³ Département de phytotechnie, faculté des sciences agronomiques, Université de Kalémie, Kalémie, RD Congo

Auteur correspondant : yannickuseni@gmail.com

Original submitted in on 21st February 2013 Published online at www.m.elewa.org on 29th May 2013.

RÉSUMÉ

Objectifs : Dans la ville de Lubumbashi, l'expansion des activités minières a entraîné une contamination des sols de la région en éléments traces métalliques (ETM) et les terres agricoles n'ont pas été épargnées. Les cultures potagères vendues dans les différents marchés présentent des teneurs élevées en ETM. Cet essai a été installé dans le but d'évaluer le niveau de contamination en ETM de l'horizon cultivé des sols de jardins ainsi que son impact sur la croissance et la bioaccumulation dans les cultures potagères.

Méthodologie et résultats : Trente-neuf (39) échantillons composites de sols ont été récoltés dans 39 sites maraîchers de la ville minière de Lubumbashi et un essai a été installé suivant un dispositif expérimental complètement randomisé comprenant 4 répétitions de 39 traitements (sol) utilisant l'amarante et la poirée bette comme culture test. Les échantillons de sols (avant essai) et de végétaux (à la récolte) ont été analysés pour déterminer les teneurs en Cu, Co, Pb, Cd et Zn. Les résultats obtenus ont montré d'une part que les sols des jardins présentent des teneurs élevées en ETM et de l'autre les fortes teneurs en ETM du sol entraînent un ralentissement de croissance des cultures potagères et un niveau élevé de bioaccumulation des ETM.

Conclusion et potentielle application de la recherche : les risques de contamination de la chaîne alimentaire par la consommation des légumes récoltés dans différents sites maraîchers de la ville minière de Lubumbashi sont réels. Le recours aux techniques efficaces et efficaces de biorémediation des sols contaminés est important pour réduire les risques de toxicité aiguë et/ou chronique chez les consommateurs.

Mots clés : sol contaminé, ETM, culture potagère, bioaccumulation, ville minière de Lubumbashi

ABSTRACT

Determination of levels of trace metals in soils of kitchen gardens in the mining town of Lubumbashi and the risk of contamination of vegetable crops

Objectives: in the city of Lubumbashi, the mining activity expansion has caused the contamination of the soils of the region with metallic trace elements (MTE) and the agricultural soils have not been spared. The vegetable crops sold in different markets have high levels of MTE.

Methodology and results: This study was done in order to assess the level of contamination in the MTE cultivated garden soil and its impact on growth and bioaccumulation in vegetable crops. Thirty nine (39) composite soil samples were collected from 39 sites in the vegetable mining town of Lubumbashi and a trial was set up following a completely randomized experimental design with 4 replicates of 39 treatments (soil) using amaranth and spinach as test culture. Soil samples (before test) and plants (at harvest) were analyzed for Cu, Co, Pb, Cd and Zn. The results showed, first, that the garden soil had high levels of MTE and these high levels of MTE lead to slower growth of vegetable crops and a high degree of bioaccumulation.

Conclusion and potential application of the research: There is a risk of contamination of the food chain through the consumption of vegetable harvested in different sites of the mining town of Lubumbashi vegetables. The use of efficient and effective techniques of bioremediation of contaminated soils is important to reduce the risk of acute and / or chronic toxicity among consumers.

Keywords: contaminated soil, MTE, vegetable gardening, bioaccumulation, mining town of Lubumbashi

INTRODUCTION

Le développement de la ville de Lubumbashi (RDC) est intimement lié à l'extraction minière et au traitement des minerais de cuivre. Ceux-ci connaissent actuellement un regain d'activités impressionnant dans tout le Katanga. Les industries d'extraction de minerais sont nombreuses et la densité de la population est en constante augmentation. Malheureusement, dans diverses usines hydro-métallurgiques et fonderies, l'extraction du cuivre et du cobalt s'est accompagné de rejets de sous-produits riches en zinc, plomb, arsenic, cadmium ou encore de composés soufrés (Ngoy et al., 2010). Ces rejets ont un effet néfaste sur l'environnement : l'air, l'eau, le sol accumulent des contaminants, leurs propriétés et fonctionnement sont perturbés et des troubles sur les êtres vivants et leur environnement sont constatés (Bruneau, 1983 ; Tembo et al., 2005).

La contamination des sols présente un risque de toxicité pour les êtres vivants et l'homme à travers la chaîne alimentaire. Elle entrave la croissance et la viabilité de la végétation. En conséquence, la mise en place de cultures y est ardue voire impossible, selon le degré de pollution, mais aussi

risquée de par l'accumulation des contaminants dans le végétal et son transfert dans la chaîne alimentaire (Mench & Baize, 2004 ; Bourrelrier & Berthelin, 1998). Dans cette ville de Lubumbashi, le milieu naturel est peu favorable aux cultures maraîchères à première vue. Les sols des plateaux, argileux et latéritiques, sont souvent pauvres. Plus fertiles, les sols hydromorphes des fonds de vallées doivent être drainés en saison des pluies. Suite à leur position topographique, ces sols sont également des récolteurs des déchets enrichis en ETM provenant des usines installées autour de la ville, des lavages de minerais réalisés par les exploitants artisanaux dans leur parcelle résidentielle, de bijouteries en malachite éparpillées dans tous les quartiers de la ville, ainsi que des colluvions des scories épandues dans les avenues pour lutter contre les poussières (en saison sèche) et des boues (en saison de pluies). Les différentes sources d'émission conjuguées (usines, circulation) et donc les retombées de proximité sont plus importantes dans les zones urbaines et périurbaines. Elles ont ainsi conduit à faire des sols urbains (jardins publics ou privés) ou de ceux de zones industrielles (jardins ouvriers

notamment) des sols présentant des risques en raison de la contamination des plantes potagères qu'ils peuvent produire (Bourrelier & Berthelin, 1998). Il a été constaté également que 91% des laitues récoltées en zone contaminée de France, excédaient la concentration moyenne recommandée (CMR) pour le Cd, et 50% celle pour le Pb (Mench & Baize, 2004). A un autre niveau éco-systémique, les teneurs observées dans les muscles de poissons qui ont été pêchés dans les cours d'eau du bassin de la Lufira (contaminés par le complexe hydro métallurgique de la Gécamines/Shituru à Likasi) au Katanga, excèdent 4 fois (*Oreochromis macrochir*) et 8 fois (*Tilapia rendalli*), les teneurs normales en Zn dans les muscles des poissons (Katemo, 2009). Dans la ville de Lubumbashi, l'expansion des activités

minières a entraîné une contamination des sols de la région en ETM et les terres agricoles n'ont pas été épargnées. Les cultures potagères vendues dans les différents marchés présentent des teneurs élevées en ETM. Dans le domaine de la santé publique, les ETM absorbés par les végétaux entrent dans la chaîne alimentaire et entraînent un phénomène de bio-concentration à chaque passage dans le maillon trophique supérieur (McLean *et al.*, 2009). Cette accumulation d'ETM s'avère dangereuse pour la santé (De Burbure *et al.*, 2006).

Cette étude a été menée en vue d'évaluer le niveau de contamination en ETM de l'horizon cultivé des sols de jardins potagers ainsi que son impact sur la croissance et la bioaccumulation dans les cultures potagères.

MATERIELS ET METHODES

Appelée capitale du cuivre, la ville de Lubumbashi (11°39' sud et 27°28' est) est le chef lieu de la province du Katanga localisée au sud-est de la République démocratique du Congo. Elle est actuellement composée de 42 quartiers répartis sur 7 communes : Lubumbashi, Kenya, Kampemba, Katuba, Kamalondo, Ruashi et Annexe, commune regroupant l'habitat en périphérie de la ville (couronne autour d'autres communes) (Munyemba, 2010). Le climat de Lubumbashi est du type CW6, selon le système de classification de Koppen, caractérisé par une saison des pluies (de novembre en mars), une saison sèche (mai à septembre) et deux mois de transition (Avril à Octobre). Les précipitations annuelles s'élèvent à 1270 mm avec les valeurs extrêmes de 717 et 1770 mm. La température moyenne annuelle est d'environ 20°C (Malaisse, 1990). La végétation primaire de la ville de Lubumbashi est la forêt claire du type *miombo*. Cependant, à cause des activités anthropiques, cette forêt claire est remplacée par une végétation secondaire constituée par une savane dans la région périurbaine (Mujinya *et al.*, 2011).

Sols : Les sols utilisés dans cette étude ont été prélevés à l'aide d'une bêche dans l'horizon labouré (0-20 cm) de 39 jardins potagers repartis dans les 7 communes de la ville de Lubumbashi (figure 1).

Plantes potagères : Les espèces *Amaranthus viridis* « amarante commune/ Lenga lenga » et *Beta vulgaris var cicla* « poirée bette/ Epinard » largement cultivées

dans les jardins potagers de la zone de Lubumbashi ont été retenues pour l'expérimentation. Les semences ont été achetées sur un marché du centre ville de Lubumbashi. Cette figure 1 montre également que les cultures maraîchères se pratiquent majoritairement au bord des cours d'eau. Une quantité de 20 kg de terre a été prélevée par jardin dans la couche de 0- 20 cm de profondeur. Cette quantité a été mélangée soigneusement pour obtenir un échantillon composite représentatif du jardin. Dans cet échantillon, une partie de terre a été conservée pour l'analyse au laboratoire, tandis qu'une autre a été émotée dans un bac en plastique, mis en pots suivant un dispositif expérimental complètement randomisé avec 4 répétitions.

Conduite de l'essai : L'essai réalisé a été conduit en pots de 2 kg de terre. Ces pots ont été placés sous serre dans le jardin expérimental de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université de Lubumbashi (FSA/UNILU). Le semis direct a été effectué à raison de 10 graines d'amarante et 3 graines de poirée bette par pot. Un seul plant vigoureux par pot a ensuite été conservé. La dose journalière d'arrosage a été de 50 ml par pot. Le binage a été effectué superficiellement, une fois tous les 15 jours en vue de favoriser l'infiltration de l'eau, mais aussi d'éliminer les adventices présentes dans les différents pots. La récolte des plantes a été effectuée manuellement par arrachage des plantes à 30 jours pour l'amarante, et 45 jours pour la poirée bette.

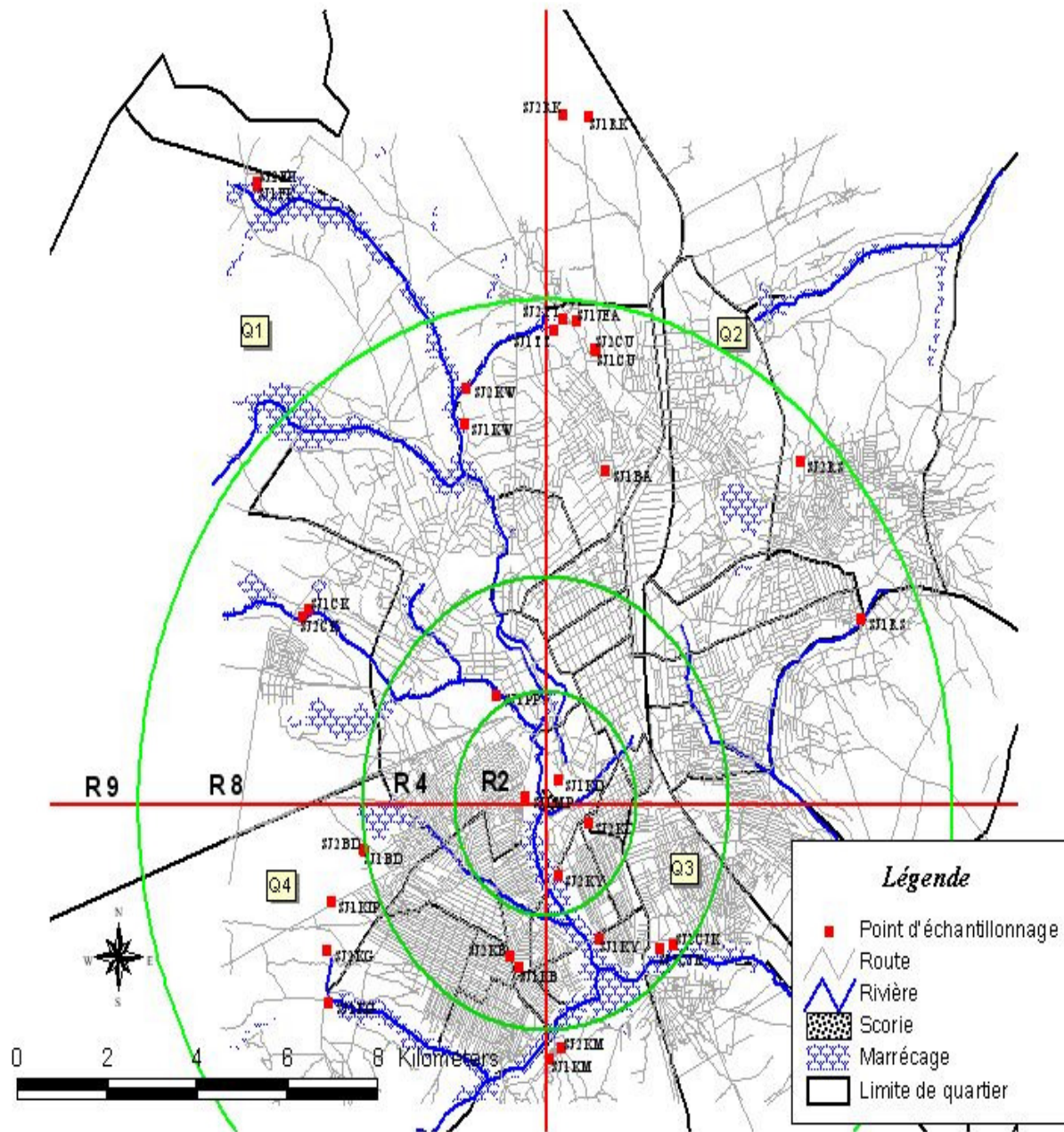


Figure 1. Répartition des jardins étudiés sur la carte de Lubumbashi dans lesquels les sols ont été prélevés(S : sols ; J1 : jardin 1 ; J2 : jardin 2 ; CU : cités universitaires Unilu, PP : penga penga ; MP : mampala ; KD : kamalondo ; KY : Kenya ; CJK : cité de jeunes Kenya ; KB : katuba ; BD : badolite ; TT : tingi tingi ; JEA : jardin expérimental agronomie ; BA : bâtiment administratif Unilu ; RS : rwashi ; KW : kalubwe ; CK : cité karavia ; KIP : route kipushi, KG : kisanga ; KM : Kasungami ; GM : golf munwa ; FK : ferme Kassapa ; RK : pompage régie des eaux Kassapa ; KEB : ferme kebumba ; KS : Kiswishi).

Paramètres observés et analyse des échantillons :

Le taux de levée a été observé à 7 jours après semis. La survie, la taille de plantes, le nombre de feuilles et le poids ont été observés à la récolte. Les déterminations analytiques ont été réalisées sur les sols ainsi que les légumes récoltés. Le pH (H₂O, KCl N, au 2/5), le Carbone Organique Total (oxydation sulfo-chromique à chaud), l'azote (Méthode de Kjeldhal) et les teneurs disponibles (CH₃OONH₄ + EDTA, à pH 4,65) en ETM (Cu, Co, Pb, Cd et Zn) des sols ont été déterminées selon des protocoles standardisés (AFNOR, 1995). Les teneurs totales en ETM (Cu, Co, Pb, Cd et Zn) dans les plantes ont été mesurées après mises en solution par un mélange d'acide nitrique et perchloridrique. Ces déterminations analytiques (sols et végétaux) ont été réalisées au laboratoire de l'unité Science du sol de la faculté des sciences agronomiques de Gembloux, à l'Université de Liège en Belgique. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel Statistica 07. L'analyse de la variance et le test Fischer LSD ont été utilisés en vue de comparer différentes moyennes. Les normes locales ou nationales pour diagnostiquer la contamination des sols et des végétaux sont absentes en RDC. Pour ce faire, les

résultats d'analyse des échantillons des sols et des végétaux, seront confrontés aux normes utilisées dans plusieurs pays du monde. Pour les sols, les valeurs seuils en ETM extraits à l'EDTA pour tous les ETM étudiés sont également rares. Dans ce cas, les résultats obtenus seront comparés aux seuils en ETM totaux, même si la teneur totale n'est pas opérationnelle pour évaluer l'exposition des végétaux (Mench & Baize, 2004) et même si les divers auteurs ne s'accordent pas à ce sujet. Pour les végétaux, les teneurs totales en ETM seront comme pour les sols, comparés aux normes internationales. Cependant, la démarche la plus simple et fiable consiste à comparer l'analyse de l'échantillon végétal aux résultats obtenus pour la même espèce végétale et variété, et pour le même organe, sur le même type de sol non contaminé (Mench & Baize, 2004).

La notion de danger a été basée sur les niveaux de teneurs seuils réglementaires. Le diagnostic de danger d'un produit végétal récolté se formalise par le rapport : concentration mesurée/ concentration maximale réglementaire (CMR) ou concentration maximale recommandée (CMREC). On considère le danger comme avéré si le rapport est supérieur à 1.

RESULTATS

Sols de jardins : La synthèse statistique de propriétés des sols prélevés dans 39 jardins potagers disséminés en milieu urbain et péri urbain de la ville de Lubumbashi est reprise au tableau 1. Le **pHH₂O** des sols varie entre 4,7 (J2JEA) et 7,9 (J1RK) ; tandis que le pH KCl varie entre 3,8 (J2JEA) et 7,4 (J2KM). Les sols d'un jardin (2,5 %) peuvent être qualifiés d'acides, 17 jardins (43,5 %) de peu acides, 19 jardins (48,7 %) de neutres et 2 jardins (5,1%) de basiques. Le **COT** varie entre 0,3 (J2KJG) et 7,9 % (J1KW) avec une moyenne de 3,5%. La valeur minimale de **C/N** a été trouvée dans les sols du jardin J2CU (9,7) tandis que la valeur maximale a été observée dans les sols du jardin SJ1KY (21,2). Néanmoins, 85 % des horizons labourés des jardins, présentent des C/N inférieurs à 15.

de neutres et 2 jardins (5,1%) de basiques. Le **COT** varie entre 0,3 (J2KJG) et 7,9 % (J1KW) avec une moyenne de 3,5%. La valeur minimale de **C/N** a été trouvée dans les sols du jardin J2CU (9,7) tandis que la valeur maximale a été observée dans les sols du jardin SJ1KY (21,2). Néanmoins, 85 % des horizons labourés des jardins, présentent des C/N inférieurs à 15.

Tableau 1. Synthèse statistique de propriétés des sols prélevés dans les jardins potagers de la zone de Lubumbashi (N= 39).

<i>Variable</i>	<i>Moy</i>	<i>Std-dev</i>	<i>CV</i>	<i>Min</i>	<i>Q1</i>	<i>Medi</i>	<i>Q3</i>	<i>Max</i>
pH Eau	6,5	0,8	0,12	4,8	5,8	6,7	7,1	7,9
KCl	5,8	1,0	0,17	3,9	5,0	5,8	6,6	7,4
COT	3,5	1,7	0,49	0,3	2,3	3,1	4,7	7,9
C/N	12,8	2,4	0,18	9,2	11,3	12,5	13,6	21,2
ETM								
(CH₃OONH₄+EDTA)								
Cu (dispo)	862,3	1937,6	2,24	15,0	94,8	174,3	854,2	11388,4
Co (dispo)	8,4	7,3	0,90	0,3	3,0	5,9	10,0	26,2
Cd (dispo)	2,47	2,86	1,16	0,20	0,59	1,01	3,67	11,41
Pb (dispo)	82,2	99,0	1,20	5,1	10,0	35,3	145,8	373,8
Zn (dispo)	209,6	294,8	1,41	1,1	24,3	110,4	271,5	1520,0

Pour le **Cu**_{EDTA}, les teneurs moyennes ont varié entre 15 mg/kg (J2KS) et 11388 mg/kg (J1PP) avec une moyenne de 862,3 mg/kg. Les sols de 28 jardins (71,8 %) excèdent les normes internationales en Cu. Comme pour Cu, les teneurs moyennes en **Co**_{EDTA} ont varié entre 0,3 mg/kg (J2KS) et 26,2 mg/kg (J1PP), avec une moyenne de 8,4 mg/kg. Aucun jardin n'affiche une teneur au delà des normes internationales en Co. En ce qui concerne le **Cd**_{EDTA}, les sols de 17 jardins (43,4 %) excèdent les normes internationales en Cd. Les jardins J2KS, J2JEA et J1KEB présentent la valeur minimale de 0,2 mg/kg; tandis que le jardin JBD montre la valeur maximale (11,4 mg/kg), avec une moyenne générale de 2,5 mg/kg. Pour le **Pb**_{EDTA}, la valeur minimale a été observée en J2RS (5,1 mg/kg), tandis que la valeur maximale a été également trouvée comme pour Cu et Co, en J1PP (373,8 mg/kg), avec une moyenne générale de 83,4 mg/kg. Les sols de 15 jardins (38,5 %) excèdent les normes internationales en Pb. Comme pour Cu et Co, la teneur minimale en **Zn**_{EDTA}, a été trouvée en J2KS. Par contre, la teneur maximale a été observée en J1KIP (1520 mg/kg). La moyenne générale en Zn a été de 214,6 mg/kg. Les sols de 17 jardins (43,4 %) excèdent les normes internationales en Zn.

Levée, survie, taille et poids de végétaux en sols de jardins : L'effet jardin a été significatif ($P < 0,01$) sur le taux de survie, la taille, le nombre de feuilles et le rendement des espèces potagères testées. Pour l'**amarante**, l'effet jardin a été significatif sur la survie, la taille et le rendement (tableau 2). L'analyse de la variance révèle que les taux moyens de **levée** ont été similaires ($P = 0,45$) pour (100 %) des jardins étudiés à Lubumbashi. Le taux de **survie** a varié entre 0% (J1PP) et 100%, avec une moyenne de l'essai de 90,3 %. L'analyse de la variance montre que la survie a été similaire ($P > 0,05$) pour 27% de sols de jardins (J1KM, J2CJK, J1MP, J2BD, J1RK, J1FK, J2FK, J1KW, J2TT et J1CU) qui ont présenté les taux de survie variant entre 60 - 90 %; par ailleurs, les sols de 50 % de jardins ont également montré la valeur maximale (100 %). Toutes les plantes qui ont levé sur sols du jardin J1PP n'ont pas survécu jusqu'à la récolte. La **taille** minimale des plantes a été de 14 cm (J1BD), tandis que la taille maximale a été observée sur sol du jardin J1KB (36 cm), avec une moyenne de l'essai 24,3 cm. Il ressort de l'analyse de la variance que les tailles

moyennes des plantes sur J1BD (taille minimale), J2BD, J1CK et J2CK sont similaires ($P > 0,05$). Par ailleurs, la taille moyenne des plantes récoltées sur sol du jardin J1KB (taille maximale), n'est pas statistiquement différente de celles mesurées sur J2KB, J2KY, J1RS et J2RS ($P > 0,05$). Le **rendement** moyen a varié entre 1,13 t/ha (J1KM) et 6,8 t/ha (J1KB), avec une moyenne de l'essai de 3,91 t/ha. L'analyse de la variance révèle que les sols de 6 % de jardins (J1MP et J1CK) ont donné des rendements moyens similaires ($P > 0,05$) au rendement minimal (J1KM). Par ailleurs, les sols de 20 % des jardins (J2KB, J2KY, J2RS, J2CK, J1FK, J2FK et J1KEB) ont présenté des rendements moyens similaires au rendement maximal (J1KB). Comme pour l'amarante, l'effet jardin a été significatif sur la survie, la taille, le nombre de feuilles par plant et le rendement de la **poirée bette** (tableau 2) : Le taux moyen de levée a varié entre 80 et 100%, avec une moyenne de l'essai de 93,2%. Les taux moyens de **levée** ont été identiques pour 100 % de sols des jardins ($P > 0,05$). Le taux moyen de **survie** a varié entre 0% (J1PP) et 100%, avec une moyenne de l'essai de 93,7%. La mortalité a été maximale pour J1PP (0%). L'analyse de la variance révèle que seul J1PP a présenté un taux survie inférieur ($P < 0,001$) par rapport à ceux d'autres jardins étudiés. Cependant, les taux de survie obtenus sur sols de 97 % de jardins ont été identiques ($P > 0,05$). La **taille** minimale des plantes a été de 15 cm (J1BD) et la taille maximale a été de 25 cm (J1KS) avec une moyenne de l'essai de 19 cm. L'analyse de la variance révèle que les tailles moyennes sur sols de 20 % des jardins (J1CJK, J2CK, J2KM, J1MP, J1CK, J2CK, J2BD) sont identiques ($P > 0,05$) à la valeur minimale (J1BD). Par ailleurs, les tailles des plantes récoltées sur sols de 11 % de jardins (J2KS, J1JEA, J2KY et J1RK) sont similaires ($P > 0,05$) à la valeur maximale (J1KS). Le **nombre moyen de feuilles** par plant a varié entre 7 (J1CJK) et 12 feuilles (J2RK) avec une moyenne de l'essai de 10 feuilles par plant. Il ressort de l'analyse de la variance que les nombres de feuilles par plant sur sols de 28 % de jardins (J1KB, J2KB, J1MP, J1CJK, J1RK, J1TT, J1CU, J1BA, J2JEA et J1KIP) sont identiques à la valeur minimale (J1BD). Par ailleurs, 36 % des jardins (J1KY, J2KY, J2KD, J2CJK, J2CK, J1KG, J2KS, J1FK, J2TT, J2CU, J1BA, J1KEB et J2RK) ont montré des moyennes similaires ($P > 0,05$) à la valeur maximale (J1KS).

Mpundu et al. J. Appl. Biosci. 2013. Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de jardins potagers en Lubumbashi et risques de contamination des cultures

Tableau 2 : Résultats d'analyse de la variance sur les paramètres de Levée, survie, taille, nombre de feuilles et rendement (rdt) des cultures d'amarante et de la poirée bette cultivés sur sols de jardins potagers de Lubumbashi.

Amarante	Source	df	P	Poirée Bette	Source	Df	P
Levée	Jardin	37	0,45 NS	Levée	Jardin	37	0,88 NS
	Erreur	140			Erreur	140	
Survie	Jardin	37	0,00***	Survie	Jardin	37	0,00***
	Erreur	140			Erreur	140	
Taille	Jardin	36	0,00***	Taille	Jardin	36	0,00***
	Erreur	123			Erreur	123	
Rdt	Jardin	36	0,00***	Feuilles	Jardin	36	0,00***
	Erreur	123			Erreur	123	
				Rdt	Jardin	36	0,00***
				Erreur	123		

df : degré de liberté ; P : probabilité ; NS : non significatif, P > 0,05 ; *** : très hautement significatif, p < 0,001

Le rendement minimum en feuilles de poirée bette a été obtenu sur sols du jardin J1CJK (3 t/ha) et la valeur maximale sur sols du jardin J1KS (6,2 t/ha). La moyenne de l'essai a été de 4,7 t/ha. Il ressort de l'analyse de la variance que les rendements moyens obtenus sur sols de 22 % de jardins (J1MP, J1CK, J2CK, J1BD, J1TT, J2JEA, J1KIP et J2KG) ont été identiques (P > 0,05) à la valeur minimale (J1CJK). Par ailleurs 36 % des sols des jardins (J1KY, J2KY, J2KD, J1JEA, J2CJK, J1KM, J2KM, J1KG, J1RS, J2KS,

J2RK, J1FK et J1BA) présentent des rendements moyens similaires (P > 0,05) au rendement maximal (J1KS).

Teneurs en ETM dans les productions végétales :

Les résultats sur l'analyse de teneurs en ETM dans les végétaux d'amarante et de la poirée bette sont repris dans le tableau 3. Ces échantillons proviennent des plantes récoltées sur les essais conduits en sachets, contenant les sols prélevés dans les horizons de sols labourés des jardins de la ville de Lubumbashi.

Tableau 3. Teneurs totales en ETM (mg/kg de MS) dans les végétaux d'amarante et de poirée bette récoltés sur sols des jardins potagers de Lubumbashi. Les valeurs en vert sont en dessous des normes

Jardin	AMARANTE					POIREE BETTE				
	Cu	Co	Cd	Pb	Zn	Cu	Co	Cd	Pb	Zn
J1CU	25,3	3,6	2,8	9,9	279,4	37,2	0,6	2,1	8	127,9
J2CU	21,3	1	1,7	9,8	77,7	107,1	12,9	14,7	14,4	581,5
J1TT	52,7	8,7	11,1	8	348,9	60,3	14,4	6,8	10	415
J2TT	52,5	14,9	6,9	10,5	376,7					
J1RK	10,8	0,4	0,4	8,5	55,7	21,3	1,2	0,6	7,6	44,2
J2RK	12	0,3	0,8	10,4	60,2	20,5	0,9	0,6	10	47,8
J1KW	19,6	2,9	3,6	10,3	123,8	76,2	5,5	9	8	321,6
J1BD	38,5	4,1	10,6	11	167,8					
J2BD	49,3	5,7	12,8	10,7	143,5					
J1KB	24,1	1,9	2,3	11,7	90,3	45,7	1,2	3,3	12,9	295,4
J2KB	31,5	1,8	1,3	9	90,7	38,8	1,3	3,2	13,9	271,5
J1KG	19,4	0,5	3	9,1	56,4					
J2KG						128,7	8,2	11	10,3	653,3
J1KM	10,9	0,6	1,1	9,4	92,3	16,4	0,5	0,5	7,2	61,1
J2KM	10,6	0,2	0,8	9,7	74,4	11,5	0,3	0,7	8,5	50,4

Mpundu et al. J. Appl. Biosci. 2013. Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols de jardins potagers en Lubumbashi et risques de contamination des cultures

J1KD	28,9	1,4	2,8	13,8	165,3	27,8	1,5	2,5	14,8	195,8
J2KD	39,8	4	3,9	11	190,6	25,6	1,5	2,8	12,9	144,1
J1KY	12,8	0,2	0,9	8,8	72,7	13,2	0,1	0,6	9,4	89,7
J2KY	43,9	7,6	6,2	14,2	179,8	41,8	9,4	2,5	17,9	78,5
J2CK	47,6	0,7	5,9	10,9	121,8					
J1CJK	22,4	0,8	2,2	6,4	87,4	87,9	6,1	5,8	18,4	219,8
J2CJK	27,4	1,1	3,7	8,6	142,9	81,4	2,7	4,7	14,7	198,4
J1RS	21,6	1,3	1,7	7,1	274,1					
J2RS	18,1	0,8	1,7	7,8	135,8					
J1KS	9	0,5	0,9	10,4	53,7	19,4	2,3	1,2	11,1	94,8
J2KS	14,9	0,7	4,6	13,3	130,9	12,6	0,6	1,3	13	34,1
J1FK	13,1	0,2	1,9	15,3	75,4	28	4	2,9	11,9	86,3
J2FK	25,6	1,3	6,2	9,2	186,7	13,5	0,4	1,2	13,8	41,6
J1MP	25,7	4	3,5	10,4	139,9	35,7	3,1	3,7	10,5	162,1
J1BA						75,5	13,4	3,1	16,7	239,6
J2BA	79,6	6,6	5,7	16,4	224,2					
J1JEA	23	3,2	6,2	11,1	98,2	17,5	3,6	1,9	3,7	46,7
J2JEA						92,3	6,6	6,5	14,3	69,4
J1KEB						71,6	4,6	2,4	9,1	326,5
J1KIP						137,1	4,1	7,4	15,3	473,3
Moyenne	27,7	2,7	3,9	10,4	143,9	49	4,1	3,8	11,7	196,9
Seuil	10	1	2	10	95	10	1	2	10	95

La comparaison des teneurs obtenues dans les plantes d'amarante avec les normes en vigueur donne les résultats suivants : Les légumes d'amarante récoltés sur 96,7%, 56,6%, 63%, 53,4% et 60% de sols de jardins potagers ont présenté respectivement des teneurs en Cu, Co, Cd, Pb et Zn qui excèdent les

valeurs normales. Tandis que pour la **poirée bette**, les récoltes effectuées sur 100%, 75%, 33%, 33% et 42% de sols des jardins potagers ont renfermé des teneurs respectives en Cu, Co, Cd, Pb et Zn qui dépassent les valeurs jugées normales par plusieurs auteurs

DISCUSSION

Teneurs en ETM dans l'horizon labouré des sols des jardins de Lubumbashi : Il ressort des résultats qu'environ la moitié des horizons labourés étudiés renferment des sols acides (Baize, 2004). La pratique culturale d'apport d'amendements calcaires aux sols est quasiment rare dans les cultures potagères à Lubumbashi (SENAHUP, 2008). A de pH < 6, la plupart des ETM sont très mobiles dans la solution du sol (Baize, 1997 ; Baize, 2004). L'apport en résidus organiques diversifiés aux sols pourrait expliquer cette variabilité en matière organique observée dans les sols de jardins (SENAHUP, 2008). Le rapport C/N < 15 observé dans plus de 80% des horizons labourés des

jardins confirme l'indice de minéralisation rapide de la matière organique caractéristique des horizons labourés de sols tropicaux (Ngongo et al., 2009). La valeur moyenne en Cu obtenue est 5, 7 et 17 fois supérieure respectivement aux seuils de phytotoxicité fixés par Coppenet et al. (1993), Chevery (1994) (120-167 mg/kg Cu_{EDTA}) et à la valeur indicative des sols agricoles en Cu_{EDTA} de la grande Bretagne (Baize, 1997). La valeur moyenne en Co obtenue se situe dans la gamme de la norme générale allant de 1 à 10 mg/kg de Co total (Kabata-Pendias et Pendias, 2001). La valeur moyenne en Cd de jardins excède le seuil d'anomalie (Godin, 1983) et la norme AFNOR NF U 44-

041 (Baize, 1997) fixé à 2 mg/kg de Cd total. Alors 43,5%, 56% et 90% des jardins étudiés présentent des teneurs en Cd_{EDTA}, respectivement élevées par rapport aux teneurs totales en Cd fixées comme seuils d'investigations suisses pour les sites pollués (Tremel-Schaub et Feix, 2005), aux teneurs totales suisses indicatives des sites pollués (0,8 mg/kg), ainsi qu'aux teneurs normales (0,3 mg/kg) de Kabata- Pendias & Pendias (2001). Cette moyenne en Pb observée se situe en dessous de la teneur totale (100 mg/kg de Pb totale), valeur indicative des sites pollués en Suisse (Tremel- Schaub et Feix, 2005). Cependant environ 50 % des jardins présentent de teneurs en Pb_{EDTA} qui excèdent des teneurs totales suisses indicatives des sites pollués. La moyenne en Zn obtenue est au moins 2 fois supérieure aux seuils de phytotoxicité en Zn_{EDTA} de Coppenet et al. (1994) et à la valeur indicative (130 mg/kg Zn totale) des sols agricoles de la grande Bretagne (Baize, 1997). Cependant, 60% des horizons labourés de jardins échantillonnés à Lubumbashi, présentent des teneurs moyennes qui excèdent le seuil de phytotoxicité fixé à 100 ppm par Coppenet et al. (1994).

Les teneurs maximales en Cu, Co et Pb extraites à l'EDTA ont été observées dans l'horizon de sol du jardin J1PP. En effet, le jardin J1PP est installé premièrement dans les environs de l'usine Gécamines (< 2 km) au bord de la rivière Karavia, ensuite dans une zone localisée dans la direction des vents dominants (exposé aux retombées atmosphériques de l'usine de la Gécamines). Sa position topographique favorise la contamination de ces sols, suite aux dépôts alluvionnaires provenant en amont de cette rivière, ainsi que les colluvions fortement contaminés en métaux lourds provenant sur le plateau renfermant les sols dénudés, ainsi que sur les versants de la zone du cimetière Penga penga. A l'opposé, les valeurs minimales en ETM (Cu, Co, Cd et Zn) ont été trouvées dans l'horizon du sol du jardin du monastère de Kiswishi (J2KS). La position de ce jardin et les pratiques culturales pourraient expliquer ces résultats : En effet, ce jardin est entouré par la forêt peu perturbée de Miombo située à 12 km de la ville de Lubumbashi. Ce jardin est sous la gestion des moines catholiques qui font recours aux bonnes pratiques culturales. Globalement, les résultats montrent que plus de 50% des horizons labourés des sols des jardins étudiés dans ce secteur de Lubumbashi, présentent des teneurs supérieures aux seuils réglementaires de plusieurs pays. Les sols du milieu urbain et péri- urbain

de Lubumbashi ont été exposés aux diverses formes de pollutions déjà évoquées par plusieurs auteurs (Leteinturier et al., 1999 ; Baker & Malaisse, 1999 ; Malaisse, 1997). Actuellement la libéralisation de l'exploitation minière, et surtout l'exploitation artisanale a accentué la dispersion incontrôlée des polluants dans l'environnement. Les espèces *Haumaniastrum katangense* (S.Moore) P.A.Duvign. & Plancke / *Acrocephalus katangensis* S.Moore et *Bulbostylis pseudoperennis* Goetgh. Goetgh été observées dans le jardin potager J1KIP situé au bord de la route Kipushi. Leteinturier et al. (1999) ont montré que les sols situés au bord de routes ou de chemins de fer sont contaminés par les poussières des minerais lors du transport. Les différentes sources d'émission conjuguées (usines, circulation) et donc les retombées de proximité sont plus importantes et ont conduit à faire des sols de jardins potagers présentant des risques en raison de la contamination des plantes potagères qu'ils peuvent produire (Bourrelie & Berthelin, 1998).

Croissance des végétaux cultivés sur l'horizon labouré des sols de jardins : La survie de l'amarante et de la poirée bette a été nulle sur sols de J1PP. La toxicité des métaux lourds en J1PP pourrait expliquer cette mortalité maximale (Bourrelie & Berthelin, 1998). Les résultats d'analyse de l'horizon labouré des sols ont révélé que les teneurs en ETM sont élevées dans le jardin J1PP situé dans le cône de pollution. Pour l'obtention des récoltes sur ces sols, les jardiniers de cette zone font recours par l'apport des doses massives d'amendements organiques (SENAHUP, 2008). Boisson et al. (1999) ont montré d'une part que la croissance des cultures, peut être inhibée par la présence des teneurs élevées en ETM dans les sols non amendés. Selon Bourrelie & Berthelin (1998), la pollution des sols par les éléments traces entraîne une double conséquence : la phytotoxicité et la contamination de la chaîne alimentaire ; par conséquent, les rendements peuvent aussi être affectés par les teneurs élevées d'éléments traces dans les sols. Cependant, Mench & Baize (2004) confirment que l'exposition excessive des végétaux au Cu, Ni, Zn provoque souvent une phytotoxicité ; elle empêche en générale la récolte, ce qui évite l'exposition du consommateur.

Risques de contamination de la chaîne alimentaire : La teneur totale en Cu rencontrée dans les végétaux récoltés sur sols d'un seul jardin J1KS (3,3%) se situe en deca du seuil réglementaire fixé par le ministère de commerce et de l'industrie en Finlande pour les

légumes (10 mg/kg de MS). Pour **Co**, les végétaux cultivés sur sols de 56,6% des jardins, ont montré des teneurs qui excèdent les valeurs normales (Kabata-Pendias & Pendias, 2001). Pour **Cd**, les récoltes effectuées sur 63% de sols des jardins ont présenté des teneurs au delà de la CMR fixée à 2 mg/kg MS, pour les légumes feuilles (Mench & Baize, 2004). Au niveau du **Pb**, les plantes récoltées sur 53,4% de sols des jardins ont dépassé la gamme jugée normale par Kabata- Pendias & Pendias (2001). Cependant, en confrontant ces teneurs en Pb observées dans les végétaux d'amarante aux seuils réglementaires utilisés dans plusieurs pays européens (teneurs limites de 3,41 mg/kg de MS) indiquées dans le règlement 1881/2006/CE du 19 décembre 2006 pour légumes feuilles (Tremel- Schaub & Feix, 2005 ; Mench & Baize, 2004), on trouve que 100 % de légumes d'amarante récoltés sur sols de jardins sont contaminés en Pb. Pour **Zn**, les légumes récoltés sur 60 % de sols des jardins ont renfermé des teneurs qui excèdent les valeurs normales selon le seuil de Kabata- Pendias & Pendias (2001). En ce qui concerne la **poirée bette**, la comparaison de teneurs avec les normes, montre ce qui suit : Pour **Cu**, 100 % de végétaux récoltés sur les sols de jardins dépassent le seuil fixé à 10 mg/kg de MS. Les teneurs en **Co** observées dans les végétaux récoltés sur 75 % de sols de jardins, ne dépassent pas le seuil (1,0 mg/kg de MS) de Kabata- Pendias & Pendias (2001). Pour le **Cd**, 33% de récoltes de jardins présentent des teneurs en dessous de la CMR fixée à 2 mg/kg MS, pour les légumes feuilles (Mench & Baize, 2004). Pour le **Pb**, les feuilles de poirée bette cultivée sur 33,3% des jardins, renferment des teneurs normales selon les seuils de Kabata- Pendias et

Pendias (2001). Au niveau du **Zn**, les plantes de 42% de jardins renferment des teneurs en dessous du seuil fixé à 95 mg/kg de MS (Kabata- Pendias & Pendias, 2001). Il ressort des résultats d'analyse des végétaux que plus de la moitié de jardins étudiés, produisent des légumes qui renferment des teneurs en ETM qui dépassent les normes internationales. La contamination de l'horizon labouré des sols de jardins potagers présentent des risques en raison de la contamination des plantes potagères qu'ils peuvent produire (Bourrelie & Berthelin, 1998). Le calcul du diagnostic de danger des légumes feuilles, en fonction de la CMR établie en France (Pb : 3 mg/kg MS et Cd : 2 mg/kg MS), révèle que le danger d'imprégnation en Cd est avéré pour 37% d'amarante et 33% de poirée bette récoltés sur les sols de jardins étudiés. Par ailleurs, 100% des végétaux récoltés sur sols des jardins, sont dangereux pour le Pb. Cependant, l'espèce végétale, la variété ainsi que le type des sols utilisés à Lubumbashi ne sont pas identiques à ceux sur lesquels la CMR a été établie en France (Mench & Baize, 2004 ; Carlton- Smith & Davis, 1983 in Bourrelie & Berthelin, 1998 ; Bingham et al., 1979 et John, 1973 in Bourrelie & Berthelin, 1998). Ces résultats ressemblent à ceux de la zone contaminée en France, dans laquelle il a été observé que 91% des laitues ayant excédé la CMR pour le Cd, et 50% pour le Pb (Mench & Baize, 2004). Les **teneurs disponibles en ETM** dans le sol, sont positivement liées aux **teneurs en ETM** dans les plantes (tableau 4). Autrement dit, l'augmentation des teneurs en ETM disponibles dans les sols, pourraient s'accompagner d'une augmentation des teneurs totales en ETM dans les végétaux.

Tableau 4. Corrélations entre teneurs en ETM dans les végétaux (amarante et poirée bette) et celles dans les horizons labourés des sols de jardins (mg/kg).

Espèce		r²
Amarante	Cu [Cu plante]= 0,0036 [Cu sol] + 25,57	0,04
	Co [Co plante]= 0,089 [Co sol] + 2,06	0,02
	Cd [Cd plante]= 0,546 [Cd sol] + 2,56	0,25
	Pb [Pb plante]= 0,0003[Pb sol]- 10,45	0,00
	Zn [Zn plante]= 0,037 [Zn sol] - 150,07	0,01
Poirée bette	Cu [Cu plante]= 0,158 [Cu sol] + 40,75	0,10
	Co [Co plante]= 0,152 [Co sol] + 2,86	0,07
	Cd [Cd plante]= 0,283 [Cd sol] + 3,33	0,03
	Pb [Pb plante]= 0,017[Pb sol] + 10,37	0,22
	Zn [Zn plante]= 0,241 [Zn sol] + 136,49	0,22

Néanmoins, les teneurs en Pb et Zn observées respectivement dans 23% et 50% d'amarante, sont élevées à celles des sols (tableau 4). Les corrélations négatives entre les ETM extractibles à l'EDTA (à l'exception du Zn) dans les sols et dans les plantes ont été également trouvées par Madejo'n et al. (2006). Diverses hypothèses pourraient expliquer ces résultats :

L'absorption foliaire : Kannan (1980) et Marchner (1986) in Bourrelier & Berthelin (1998) souligne que les éléments traces peuvent être absorbés directement par les parties aériennes ; ils emprunteraient les mêmes voies de pénétration foliaire que les éléments nutritifs (N, P) par les ectoderms de la cuticule

Les projections due à l'érosion hydrique (phénomène de Splash) et éolienne : Pinder & McLeod (1988) in Bourrelier & Berthelin (1998) ont montré que les quantités de terre retenues sur les surfaces végétales peuvent atteindre 120 mg/kg de grain chez le blé ; il a été démontré par ailleurs que la seule adhésion de

terre peut multiplier la teneur de Pb dans les feuille par 6 (Sheppard et Evenden, 1992 in Bourrelier & Berthelin, 1998). Toutes ces poussières ne sont pas éliminées par un simple lavage à l'eau (Faucon et al., 2007 ; Mench & Baize, 2004).

La réponse des plantes à l'accroissement de la concentration des éléments traces dans le sol : Leteinturier & Malaisse (1999) ont trouvé que les *accumulateurs* et *hyper-accumulateurs* accumulent des métaux dans leur partie aérienne, quelque soit la concentration dans le sol. Les espèces potagères et surtout les épinards sont connus comme accumulatrices des métaux lourds.

Alors, ces phénomènes sont à l'origine de l'incorporation dans les aliments de quantités qui excèdent largement celles prédites à partir de l'absorption racinaire normale mesurée en conditions contrôlées (Pinder & McLeod, 1988 in par Bourrelier & Berthelin, 1998).

CONCLUSION

Les résultats montrent que les horizons labourés des sols des jardins étudiés dans la zone de Lubumbashi présentent des teneurs supérieures aux seuils réglementaires de plusieurs pays. La croissance et la production des légumes sont affectées par la contamination des sols cultivés. L'augmentation des teneurs en ETM disponibles dans les sols, s'accompagnent d'une augmentation des teneurs totales en ETM dans les végétaux. Le calcul du diagnostic de danger des légumes feuilles, en fonction

de la concentration maximale réglementaire établie en France (Pb : 3 mg/kg MS et Cd : 2 mg/kg MS), révèle que le danger d'imprégnation en Cd est avéré pour 37% d'amarante et 33% de poirée bette récoltés sur les sols de jardins étudiés. Par contre, 100% des végétaux récoltés sur sols des jardins sont dangereux pour le Pb. Les risques de contamination de la chaîne alimentaire sont évidents pour les consommateurs de légumes produits sur sols des jardins étudiés dans la zone de Lubumbashi.

BIBLIOGRAPHIE

- Baize D., 1997. Teneurs totales en éléments traces métalliques dans les sols (France). INRA Editions, Paris, 408 p.
- Baker A.J.M, Malaisse F., 1999. Early stages of natural revegetation of metalliferous mine workings in south central Africa: a preliminary survey. *Biotechnol.agron. soc. Environ.* **3(1)** : 28- 41
- Bourrelier P.H., Berthelin J., 1998. Contamination des sols par les éléments traces : les risques et leur gestion. Rapport n°42 Académie des sciences. 439 p.
- Bruneau J.C., 1983. « Cartographie de l'environnement et aménagement urbain à Lubumbashi » dans *Revue internationale d'écologie et de géographie tropicales* **1(4)**: 19-47
- Cheverry C., 1994. La dégradation chimique des sols en Bretagne. *Étude et Gestion des sols*, **1** :7-21
- Coppenet M., Golven J., Simon J.-C., Le Corre L., Le Roy M., 1993. Évolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère. *Agronomie*, **13**: 77- 83 p.
- De Burbure C., Buchet J.P., Leroyer A., Nisse C., Haguenoer J.M., Mutti A., Smerhovsky Z., Cikrt, M., Trzcinka-Ochocka M., Razniewska G., Jakubowski M., Bernard A., 2006. Renal and neurologic effects of cadmium, lead, mercury, and arsenic in children: evidence of early effects and multiple interactions at

- environmental exposure levels. *Environmental Health Perspectives* **144** : 584-590
- Faucon M.P., Shutcha M.N. & Meerts P., 2007. Revisiting copper and cobalt concentrations in 465 supposed hyperaccumulators from SC Africa: Influence of washing and metal concentration 466 in soil. *PL Soil* **301**, 29–36.
- Godin P., 1983. Les sources de pollution des sols : essai de quantification des risques dus aux éléments traces. *Science du Sol*, **2** :73-87.
- Kabata-Pendias A., Pendias H., 2001. Trace elements in soils and plants, Boca Raton, CRC Press Inc. 3^{ème} Ed.
- Katemo M.B., 2009. Évaluation de la contamination de la chaîne trophique par les métaux lourds dans le bassin de la Lufira supérieure (Katanga/ RD Congo). Mémoire de DEA, Université de Lubumbashi. 50 p.
- Leteinturier B., Malaisse F., 1999. De la réhabilitation des sols pollués par l'activité minière au cuivre en Afrique Centro-australe. *Bull. Séance. Acad. R. Sci. Outre-mer* **45 (4)** : 535-554 p.
- Leteinturier B., Baker A.J.M., Malaisse F., 1999. Early strategies of natural revegetation of metalliferous mine workings in south central Africa: a preliminary survey, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **3 (1)** : 28– 41.
- Majejo'n E., de Mora A.P., Felipe E., Burgos P. & Cabrera F. (2006). Soil amendments reduce trace element solubility in a contaminated soil and allow regrowth of natural vegetation. *Environ. Pollut.* **139** : 40- 52 p.
- Malaisse F., 1990. La couverture végétale de Lubumbashi. In Bruneau J.C., Pain M., (Ed), atlas de Lubumbashi. Edition publidix, université Paris X- Nanterre, pp 30-31
- Malaisse F., 1997. Se nourrir en forêt claire africaine. Approche écologique et nutritionnelle. Centre Les presses Agronomiques de Gembloux, ASBL. Gembloux.1665/3.
- McLean C.M., Koller C.E., Rodger J.C., MacFarlane G.R., 2009. Mammalian hair as an accumulative bioindicator of metal bioavailability in Australian terrestrial environments. *Science of the Total Environment* **407 (11)** : 3588-3596.
- Mench M. & Baize D., 2004. Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces mesures pour réduire l'exposition. Courrier de l'environnement de l'INRA n°52, septembre 2004.
- Mujinya B.B., Mees F., Boeckx P., Bode S., Baert G., Erens H., Delefortrie S., Verdoodt A., Ngongo M.L., Van Ranst E., 2011. The origin of carbonate in the termite mounds of the Lubumbashi area, DR Congo. *Geoderma*, **165**: 95-105
- Munyemba K.F., 2010. Quantification et modélisation de la dynamique paysagère dans la région de Lubumbashi : évaluation de l'impact écologique des dépositions issues de la pyrométallurgie. Thèse de doctorat, Faculté des sciences Agronomiques, Université de Lubumbashi, 284p
- Ngongo M.L., Van Ranst E., Baert G., Kasongo E.L., Verdoodt A., Mujinya B.B. & Mukalay J.M., 2009. Guide des Sols en R.D.Congo, Tome I. Étude et Gestion. UGent, HoGent, UNILU. Lubumbashi, 262 p.
- Ngoy S. M., Mpundu M. M., Faucon M-P., Michel Ngongo L.M., Marjolein Visser M., Colinet G., Meerts P., 2010. Phytostabilisation of copper-contaminated Soil in Katanga: An experiment with three native grasses and two amendments. *International Journal of Phytoremediation*, **12**:616–632
- SENAHUP, 2008. Rapport annuel du service national de l'horticulture urbaine et péri- urbaine à Lubumbashi. RD Congo.
- Tembo B. D., Sichilongo K., Cernak J., 2005. « Distribution of copper, lead, cadmium and zinc concentrations in soils around Kabwe town in Zambia ». *Elsevier, Chemosphere* **63** : 497–501.
- Tremel-Schaub A., Feix I., 2005. Contamination des sols : transferts des ETM des sols vers les plantes. EDP Sciences/ADEME. 156 p.