

**AFPP – 4^e CONFÉRENCE SUR L'ENTRETIEN
DES JARDINS, ESPACES VÉGÉTALISÉS ET INFRASTRUCTURES
TOULOUSE – 19 et 20 OCTOBRE 2016**

**GESTION *IN SITU* DES JARDINS FAMILIAUX CONTAMINÉS AU PLOMB :
CULTURE DE LÉGUMES TRÈS FAIBLEMENT ACCUMULATEURS ET PHYTOEXTRACTION**

D. BOUQUET ⁽¹⁾, A. LEPINAY ⁽¹⁾, P. GAUDIN ⁽¹⁾, C. LE GUERN ⁽²⁾, L. JEAN-SORO ⁽³⁾ et T. LEBEAU ⁽¹⁾

⁽¹⁾ LPG-NANTES, 2 RUE DE LA HOUSSINIÈRE 44322 NANTES CEDEX, FRANCE

⁽²⁾ BRGM RGM DIRECTION REGIONALE DES PAYS DE LA LOIRE, 1 RUE DES SAUMONIERES BP 92342 -
44323 NANTES CEDEX 3, FRANCE

⁽³⁾ IFSTTAR, ROUTE DE LA BOUAYE 44340 BOUGUENAI, FRANCE

RÉSUMÉ

Malgré sa faible disponibilité dans le sol, le plomb (Pb) peut être absorbé par les productions potagères cultivées sur sol contaminé et entraîner un risque de transfert vers la chaîne alimentaire. L'objectif de ce travail est de développer un système de culture adapté aux jardins familiaux permettant de maintenir l'activité potagère – légumes peu accumulateurs – tout en dépolluant par phytoextraction le sol en place. Deux modes de culture sont testés : association et rotation. Ces tests de mise en culture se font *in situ* et de manière participative. Les premières saisons de culture sur le site expérimental des Eglantiers (Nantes, France) ont confirmé la possibilité de cultiver sans risque la tomate et le chou ; teneurs en Pb dans les parties consommables inférieures à la valeur seuil réglementaire. La phytoextraction par *Brassica juncea* semble être plus efficace en rotation qu'en association mais est peu efficace sur sol modérément enrichi en Pb (178 mg/kg MS en moyenne).

Mots-clés : contamination diffuse, maintien de l'usage, *Brassica juncea*, tomate, chou.

ABSTRACT

***IN SITU* MANAGEMENT OF LEAD-CONTAMINATED ALLOTMENT GARDENS: CULTURE OF VERY LOW ACCUMULATING VEGETABLES AND PHYTOEXTRACTION**

Despite its low availability in soil, lead (Pb) can be absorbed in vegetables cultivated on contaminated soils and resulting in a risk of transfer to the food chain. The aim of this study is to develop a crop system adapted to contaminated allotment gardens which allows maintaining the gardening activity – low accumulating vegetables – while cleaning up soil by phytoextraction. Two cultivation methods are tested: co-culture and rotation. These assays are performed at the field scale using a participative approach. First seasons of culture on the experimental site of "Les Eglantiers" (Nantes, France) confirmed the possibility of cultivating tomatoes and cabbages without any risk. Lead concentrations in consumable parts are below threshold values. Phytoextraction by *Brassica juncea* seems to be more efficient cultivating in rotation than in co-culture but remains poorly effective with a moderately contaminated soil (178 mg/kg DM in average).

Key words: diffusive contamination, keeping soil use, *Brassica juncea*, tomato, cabbage.

INTRODUCTION

Le plomb est l'un des composés inorganiques les plus présents dans les sols pollués (Alkorta *et al.*, 2004), terres agricoles, industrielles et zones urbaines confondues. Très toxique en faible quantité, il fait partie des quatre seuls métaux réglementés dans l'alimentation humaine (CEE 1881/2006). Malgré sa faible disponibilité dans le sol, le plomb (Pb) peut être absorbé par les productions potagères cultivées sur sol contaminé et entraîner un risque de transfert vers la chaîne alimentaire (Jean-Soro *et al.*, 2015). Cette état de fait parfois observé dans les jardins familiaux, potagers communautaires souvent implantés dans ou en périphérie des zones urbaines et présentant en raison de leur contexte urbain, des teneurs en métaux lourds deux fois supérieures à celles des sols agricoles (Schwartz, 2013), doit être prise en compte par les propriétaires et les gestionnaires de ces sites, en raison du risque potentiel encouru par les usagers.

Dans le but d'éviter ce transfert sol-plante, une des solutions de gestion *in situ* serait d'en traiter la source, c'est-à-dire le sol. Cependant, la réhabilitation des sols contaminés peut s'avérer coûteuse lorsqu'il s'agit de techniques physico-chimiques. Selon Witters *et al.* (2012), la dépollution par lavage, qui implique d'excaver le sol, coûterait entre 54-118 dollars/m³ en Belgique et 70-187 dollars/m³ aux Etats-Unis. De même, l'apport de terre a été estimé à 141 dollars/m³ dans le cadre d'un plan de réhabilitation d'une zone de jardins familiaux de Nantes (France).

La phytoextraction est une alternative plus économique et écologique. Elle permet de traiter les sols *in situ* et ainsi de limiter la consommation de terre végétale, ressource épuisable. *Brassica juncea* est l'une des plantes capables d'accumuler significativement Pb dans ses parties aériennes (Huang et Cunningham, 1996). Cependant, la vitesse d'extraction des métaux est lente et peut demander des centaines voire des milliers d'années, sur la base des teneurs totales en métal (Brunetti *et al.*, 2011 ; Witters *et al.*, 2012) ; beaucoup moins en se basant sur la fraction phytodisponible. Pour réduire le temps de traitement, l'ajout au sol de chélatants chimiques a été testé avec succès (Alkorta *et al.*, 2004) bien que leur emploi à grande échelle soit inenvisageable (toxicité et coût élevé des complexants). Le couplage de la bioaugmentation (introduction de microorganismes exogènes) à la phytoextraction pourrait être une alternative. Les bactéries inoculées au sol peuvent augmenter la biomasse de la plante et/ou la mobilité des métaux dans le sol pour, *in fine*, augmenter la quantité de métaux extraits par la plante (Lebeau *et al.*, 2008). Malgré des innovations qui permettent de réduire fortement les durées de traitement, celles-ci demeurent le plus souvent trop importantes au regard des contraintes temporelles des aménageurs et/ou des jardiniers.

Une alternative pour la gestion *in situ* consisterait à cultiver des légumes très faiblement accumulateurs (Tremel-Schaub et Feix, 2005). Sans dépollution, le jardinage sans contrainte ne peut être restauré mais présente l'avantage de maintenir l'usage potager du site en l'adaptant à la qualité du sol en place. Coupler cette restriction d'usage (légumes peu accumulateurs) le temps de la dépollution par phytoextraction a été envisagé. En raison du prélèvement préférentiel des métaux par la plante utilisée en phytoextraction, les légumes accumuleraient moins ; on pourrait alors envisager d'élargir la gamme de légumes qu'il est possible de cultiver. Pour ce faire, différents systèmes sont possibles, la culture en association ou la culture en rotation (Kidd *et al.*, 2015). Ces systèmes de co-cultures ont surtout été testés pour la phytoextraction du cadmium sur des sols présentant souvent des contaminations multi-élémentaires (Yu *et al.*, 2014). Quasiment aucune étude de ce genre ne concerne le plomb.

L'objectif de ce travail est de développer un système de culture permettant de poursuivre l'activité potagère tout en dépolluant le sol en place (ici, enrichissement naturel en Pb). Les modes de culture, précédemment cités, sont testés : association et rotation. Ce travail répond aussi à un enjeu local de la ville de Nantes qui souhaite trouver une alternative au moyen de gestion actuel des sols contaminés (excavation puis transfert vers un centre de stockage, soit 50 % des terres polluées en France). Dans ce contexte, le Service des Espaces Verts de la ville a mis à disposition d'anciennes parcelles de jardins, sur lesquelles un enrichissement naturel au plomb du sol a été décelé (Jean-Soro *et al.*, 2015), pour tester ce dispositif de dépollution innovant.

MATERIEL ET METHODES

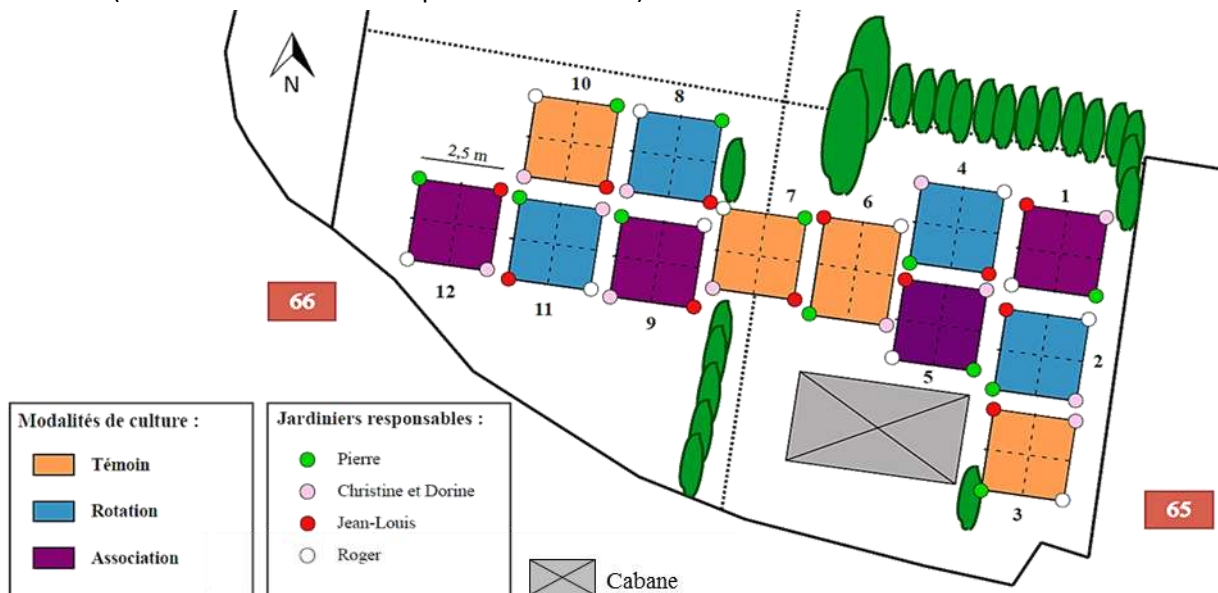
SITE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAUX

Le site expérimental est situé au nord de Nantes (France), sur le site des jardins familiaux des Eglantiers (1° 34' 30.6'' O ; 47° 16' 00.3'' N). La teneur en Pb total de l'horizon cultivable (< 30 cm) est mesurée par spectrométrie à fluorescence X sur l'ensemble de la parcelle.

Le dispositif expérimental est constitué de 12 placettes bloc de 6,25 m² chacune placées perpendiculairement au gradient est-ouest de Pb du sol. Chaque placette, représentant une modalité de culture, est elle-même divisée en 4 carrés cultivés par 4 jardiniers différents. Les modalités sont les suivantes : Témoin – monoculture de légumes (successivement tomate en 2015, chou en 2015-2016, pomme de terre en 2016, poireau en 2016-2017 et haricot en 2017) ; Association – culture de ces mêmes légumes en association avec la plante dépolluante *Brassica juncea* cv. Vitamine ; Rotation – la plante dépolluante remplace le chou en saison 2 et le haricot vert en saison 5.

Chaque modalité est répliquée 4 fois (Figure 1). Le tableau I présente les différentes cultures par modalité. L'expérience est participative et fait intervenir 4 jardiniers amateurs se partageant le site.

Figure 1 : Schéma du dispositif de culture *in situ*
(Schema of the on field experimental device)



Brassica juncea cv Vitamine, communément appelée moutarde brune (Mb), a été fournie par Terrena, groupe coopératif agroalimentaire français. Les plants de légumes ont été fournis par les jardiniers eux-mêmes (différentes variétés de tomate) ou proviennent de la jardinerie Truffaut. La tomate, le chou et le haricot sont répertoriés comme étant des légumes peu accumulateurs de Pb.

Tableau I : Enchaînement des cultures pour les modalités « Témoin », « Rotation » et « Association »
(Crops succession on the modalities "Control", "Rotation" and "Co-culture")

| | SAISON 1 | SAISON 2 | SAISON 3 | SAISON 4 | SAISON 5 |
|--------------------|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| Période | <i>Eté 2015</i> | <i>Aut. 2015 / Hiver 2016</i> | <i>Printemps 2016</i> | <i>Eté-Aut. 2016 / Hiver 2017</i> | <i>Printemps 2017</i> |
| Témoin | Tomate (différentes variétés) | Chou « de Milan » | Pomme de terre « Amandine » | Poireau | Haricot |
| Rotation | Tomate | Mb | Pomme de terre | Poireau | Mb |
| Association | Tomate + Moutarde brune (Mb) | Chou + Mb | Pomme de terre + Mb | Poireau + Mb | Haricot + Mb |

DEROULEMENT DES CULTURES

Les cultures des saisons 1 et 2 ont débuté respectivement les 22 juin et 1^{er} octobre 2015. Les légumes ont été repiqués, un à deux par carré. Plusieurs variétés de tomate ont été testées : Marmande, Roma, Cœur de bœuf, Prune noire et Cornue des Andes. Seule la variété de Milan a été utilisée. La moutarde brune (Mb) a été semée le 10 juillet (saison 1 ; modalité « Association ») et le 1^{er} octobre 2015 (saison 2 ; modalités « Association » et « Rotation ») afin de faire coïncider le stade montaison de la Mb avec le développement des parties consommables des légumes plantés – développement des fruits pour les tomates et formation de la pomme pour le chou d’hiver. La densité de semis est de 100 graines par m². Les légumes et la moutarde ont été récoltés le 4 septembre 2015 pour la saison 1 (soit 11 semaines de culture pour la saison des tomates) et le 1^{er} avril 2016 pour la saison 2 (soit 5 mois de culture pour la saison des choux).

ECHANTILLONNAGE ET ANALYSES

Echantillonnage des végétaux

A la fin des saisons 1 et 2 (T1 et T2), les échantillons de moutarde ont été récoltés sur chaque placette où elle a été cultivée (« Association » pour T1 ; « Association » et « Rotation » pour T2). Des échantillons composites à partir de 4 plants ont été constitués par carré. Les plants ont été séparés en parties aériennes (PA) et en parties racinaires (PR). Les racines ont été rincées mécaniquement à l’eau du réseau, à l’eau distillée et à l’EUP. Les échantillons ont été séchés à 40° C pendant 5 jours. Pour la saison 1, une tomate à maturité, si possible, a été prélevée sur chaque plant de chaque carré. Concernant la saison 2, un chou sur les deux plantés a été entièrement récolté en ne conservant que les feuilles pommées (partie consommée). Les échantillons récoltés ont été placés à – 80° C, grossièrement écrasés puis lyophilisés. Ils ont ensuite été broyés afin d’obtenir un échantillon homogène.

Echantillonnage du sol rhizosphérique

Les prélèvements ont été effectués respectivement à T0, T1 et T2 sur une profondeur maximale de 30 cm correspondant à l’horizon cultivé. L’échantillonnage de sol à T1 et T2 a été fait au même moment que celui de la moutarde. Le sol a été prélevé dans un rayon de 5 cm de diamètre autour de la racine principale de chaque plante de l’échantillon végétal considéré comme étant rhizosphérique. Les sols prélevés autour des 4 plants d’un carré ont été rassemblés et homogénéisés afin d’obtenir un échantillon de sol composite. Les échantillons T0 (sols non rhizosphériques) ont été prélevés aux quatre coins de chaque carré pour former également un échantillon composite. Ils ont ensuite été mis à sécher à 40° C pendant 5 jours au minimum. Après séchage ils ont été tamisés à 2 mm.

Analyses des échantillons

A partir des échantillons composites de sol, le pH_{eau} a été mesuré selon la norme NF ISO 10390:2005 (ratio sol:eau (m:m) de 1:5). Tous les échantillons végétaux récoltés ont été minéralisés après avoir été mis en contact avec de l’acide nitrique (HNO₃ 65 % ; 8 mL) et de l’eau oxygénée (H₂O₂ 30 % ; 2 mL). Les teneurs en Pb dans les échantillons minéralisés ont été mesurées soit par Spectrométrie d’Absorption Atomique (SAA ; parties aériennes des plantes : Mb et légumes) soit par ICP-OES (parties racinaires de Mb).

ANALYSES STATISTIQUES

Des valeurs moyennes ont été calculées. Des Analyses de variance (ANOVA) et des t-tests de Student ont été réalisés au seuil de 5 %. Les facteurs de Bioconcentration (FBC) et de Translocation (FT) ont aussi été calculés ; FBC étant la teneur en Pb dans les parties aériennes de la plante (mg/kg MS) rapportée à la teneur totale du sol (mg/kg MS) et FT, la teneur en Pb dans les parties aériennes (mg/kg MS) rapportée à celle dans les parties racinaires (mg/kg MS).

RESULTATS

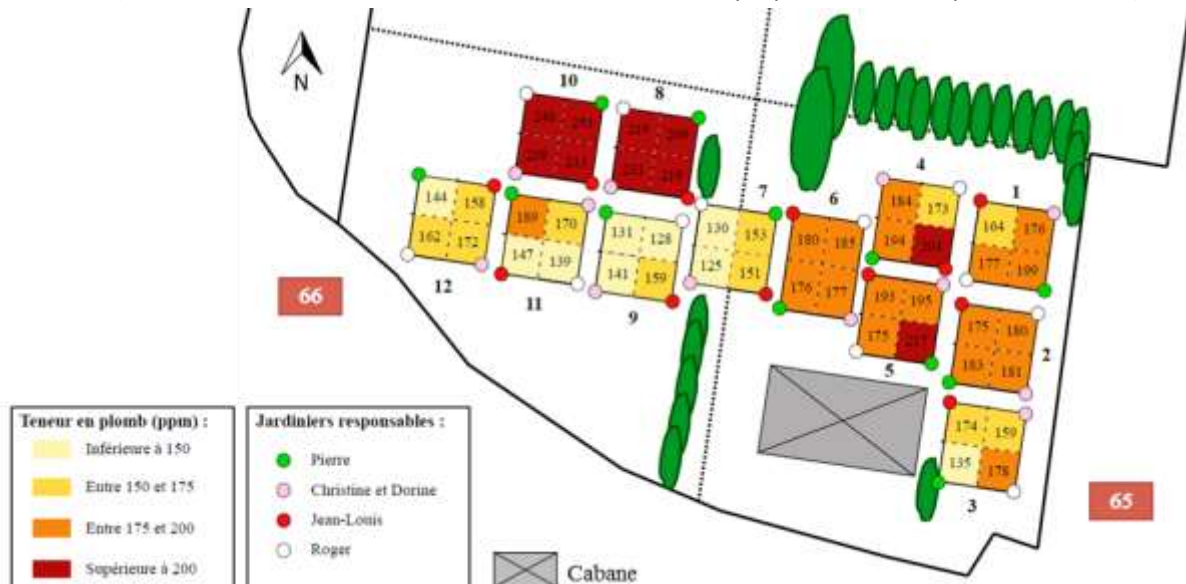
Actuellement, seules les deux premières saisons (cultures de tomates et de choux) ont été réalisées et analysées sur le site expérimental. La saison 3 (pommes de terre) est actuellement en cours. Avant l'expérimentation (T0), le terrain était en jachère. Les temps T1 et T2 correspondent respectivement à la fin de la saison 1 et de la saison 2.

CARACTERISATION DU DISPOSITIF

La cartographie des teneurs en Pb total du sol (Pb total ; Figure 2) révèle une répartition spatiale non homogène à l'échelle du site expérimental. Les teneurs de l'horizon de surface varient entre 123 et 253 mg/kg MS, avec une moyenne à $178,3 \pm 23,5$ mg/kg MS. La majorité des teneurs supérieures à cette moyenne est localisée à l'Est du site sauf pour les placettes 8 et 10 qui présentent les plus fortes teneurs en Pb total (> 200 mg/kg MS).

De même, l'analyse du pH des sols (données non montrées) met en évidence l'hétérogénéité spatiale de cette variable à l'échelle du site expérimental. Les variations restent cependant assez faibles, les valeurs étant comprises entre 7,22 et 7,59 (0,4 unité de différence). La comparaison des résultats de Pb total et du pH révèle qu'aux teneurs en Pb total élevées sont associées des pH élevés.

Figure 2 : Distribution des teneurs en Pb total à T0 par carré sur la parcelle expérimentale
(Distribution of Pb total concentration in soil at T0 by square on the experimental site)



COMPORTEMENT DES LEGUMES CULTIVES VIS-A-VIS DE L'ACCUMULATION DE Pb DANS LES ORGANES CONSOMMABLES

Les teneurs en Pb dans les parties consommables des fruits et légumes cultivés sur le site expérimental sont présentées pour les tomates (figures 3) et les choux pommés (figure 4). Les teneurs mesurées dans les tomates et les choux sont toutes inférieures à la valeur seuil réglementaire européenne CEE n°1881/2006, soit respectivement 0,1 et 0,3 mg/kg de matière brute (MB). Seuls les tomates cultivées sur le carré 1P (cv. Cornue des Andes) et les choux sur 10P affichent une teneur légèrement supérieure (respectivement 0,12 et 0,36 mg/kg MF) à cette valeur seuil.

EFFICACITE DE LA PHYTOEXTRACTION PAR *B. JUNCEA* SUR LE DISPOSITIF

Brassica juncea, largement étudiée en tant que candidate pour la phytoextraction, est utilisée dans cette étude comme plante dépolluante. Le tableau II présente les teneurs en Pb (mg/kg MS) dans les parties aériennes et racinaires de *B. juncea* ainsi que les valeurs des facteurs de Bioconcentration (FBC) et de Translocation (FT) pour les modalités « Association » et « Rotation » à la fin des saisons de culture 1 (T1) et 2 (T2). Seuls les résultats de la modalité « Association » peuvent être comparés d'une saison à l'autre, la moutarde brune n'étant cultivée en « Rotation » qu'en saison 2.

Figure 3 : Teneurs en plomb mesurées dans les tomates et dans le sol à T0
(Lead concentration analyzed in tomatoes and soil at T0)

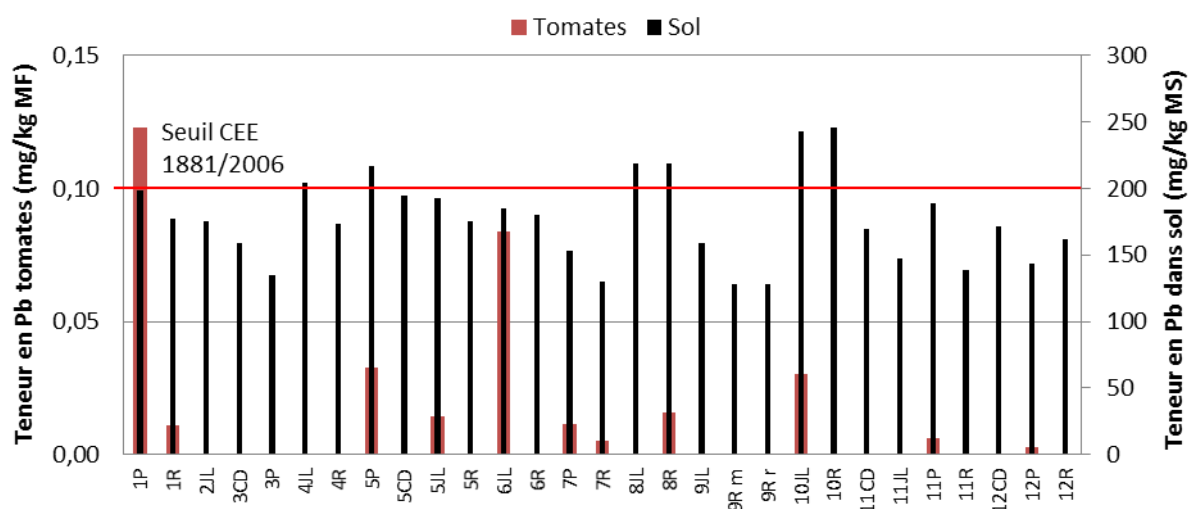
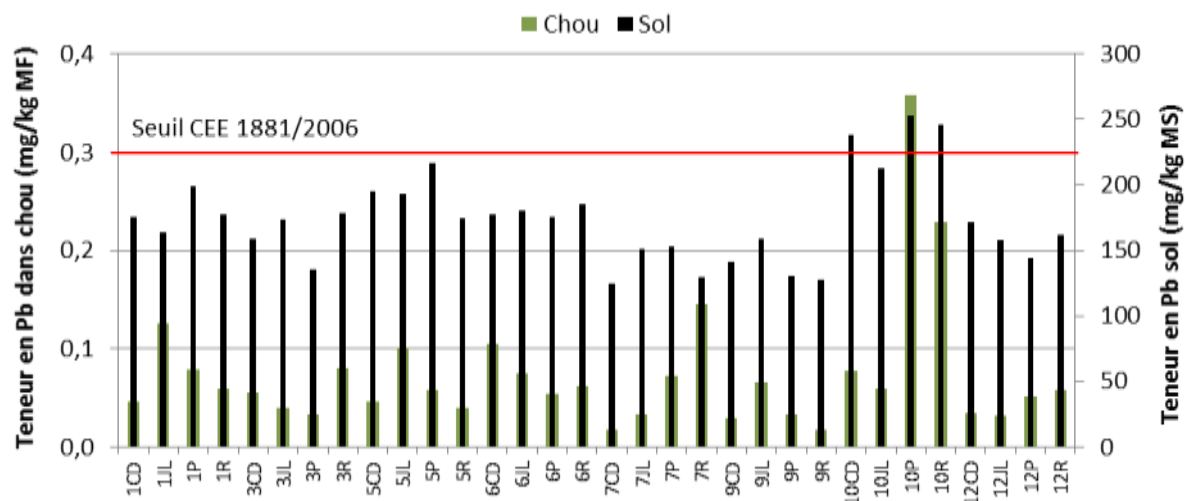


Figure 4 : Teneur en Pb dans les choux et dans le sol à T0
(Lead concentration analyzed in cabbages and soil at T0)



Tout d'abord, quelle que soit la saison de culture de la Mb ou la modalité, les teneurs moyennes en Pb dans les parties aériennes restent inférieures à 1,00 mg/kg MS. Celles analysées dans les parties racinaires sont plus élevées, comprises entre 1,1 et 5,31 mg/kg MS.

Tableau II : Teneurs en Pb (moyenne ± écart-type) dans les parties aériennes et racinaires de *B. juncea* cv. Vitamine et facteurs de Bioconcentration (FBC) et de Translocation (FT)

(Lead concentrations (mean ± sd) in shoots and roots of *B. juncea* cv. Vitamine and Bioconcentration (FBC) and Translocation (FT) factors)

| Fin de culture | Modalité | Teneur moyennes en Pb (mg/kg MS) | | FBC | FT |
|----------------|-------------|----------------------------------|--------------------|-----------------|-------------|
| | | Parties aériennes | Parties racinaires | | |
| 1 - T1 | Association | 0,80 ± 0,68 | 1,10 ± 0,56 | 0,0049 ± 0,0042 | 1,53 ± 1,61 |
| 2 - T2 | Rotation | 0,55 ± 0,39 | 3,01 ± 1,25 | 0,0031 ± 0,0022 | 0,20 ± 0,13 |
| | Association | 0,19 ± 0,16 | 5,31 ± 2,21 | 0,0010 ± 0,0008 | 0,03 ± 0,02 |

Les concentrations en Pb des parties aériennes de la modalité « Association » diminuent en moyenne entre T1 et T2 (0,80 et 0,19 mg/kg MS) alors que celles des racines augmentent (1,1 et 5,31 mg/kg MS). Ceci explique les différences importantes de FT (0,72 à T1 contre 0,03 à T2). De même, le FBC, déjà faible initialement, diminue entre les saisons 1 et 2 (0,0049 et 0,0010). La modalité « Rotation » (à T2) affiche des valeurs intermédiaires : 0,55 pour les parties aériennes, 3,01 pour les parties racinaires, un FT de 0,18 et un FBC de 0,0031.

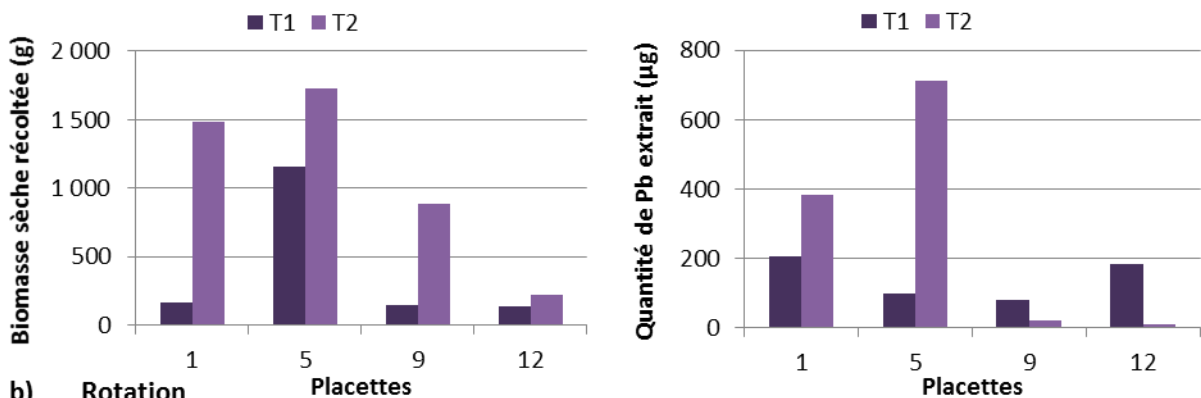
Pour évaluer pleinement l'efficacité de la phytoextraction, il est important de raisonner en quantité de Pb extrait (Figure 5) par placette. Cette variable permet de prendre en compte la biomasse végétale produite, un des critères de choix pour la plante dépolluante. La biomasse sèche récoltée sur les placettes « Association » à T2 est moins homogène (A-T2 : 1080,7 g ± 525,4) qu'à T1 (A-T1 sauf 5 : 152,8 g ± 10,9), où la placette 5 présentait un rendement 7,6 fois plus élevé que le rendement moyen récolté sur les autres placettes. La biomasse sèche récoltée à T2 pour la modalité « Rotation » est elle aussi homogène avec en moyenne 626,0 g ± 37,6 (R-T2).

En rapportant les biomasses fraîches récoltées à l'hectare, le rendement moyen obtenu sur les placettes « Association » est de 1,75 t/ha ± 0,16 (placettes 1, 9 et 12) à T1. La placette 5 présente un rendement beaucoup plus important, environ 7 t/ha. A T2, le rendement moyen est de 2,7 t/ha ± 1,53, avec respectivement 3,4 T/ha ± 1,97 et 2,0 ± 0,84 pour les modalités Association et Rotation.

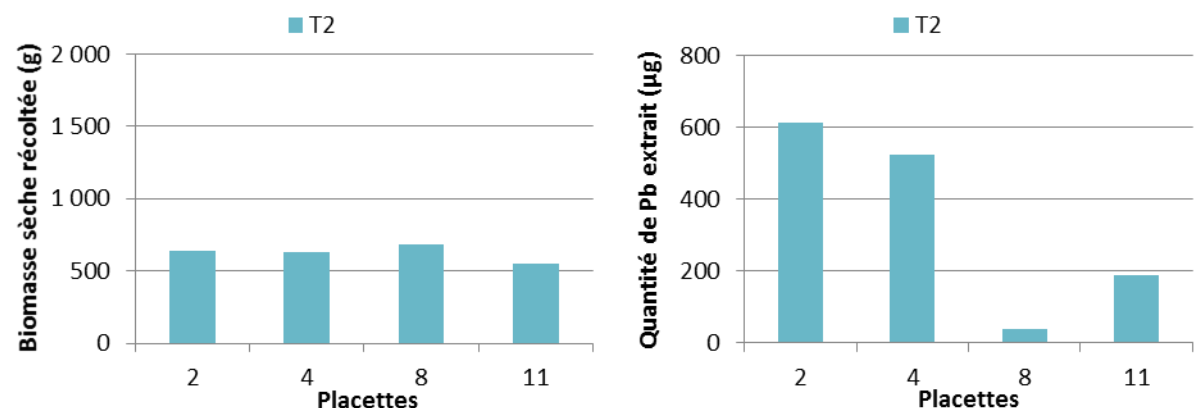
Figure 5 : Quantité de Pb extraite (μg) par *Brassica juncea* cv Vitamine et sa biomasse sèche (g) récoltée par placette des modalités « Association » (a) et « Rotation » (b)

(Lead amounts extracted (μg) by *B. juncea* cv. Vitamine and dry biomass (g) harvested on each plot on the modalities "Co-culture" (a) and "Rotation" (b))

a) Association



b) Rotation



De façon générale, une biomasse sèche élevée n'est pas forcément associée à une quantité de Pb extrait élevée ($r^2 = 0,21$ pour A-T1 ; 0,80 pour A-T2 et 0,003 pour R-T2). De même, l'accumulation de Pb par *B. juncea* diffère selon la placette. Pour A-T1, l'ordre est le suivant : 12 > 1 > 9 > 5 ; pour A-T2 : 9 > 12 > 1 > 5 et pour R-T2 : 2 > 4 > 11 > 8.

Il est possible d'observer sur les placettes « Association » deux comportements différents au cours des 2 saisons de culture. En effet, la quantité de Pb extraite et la biomasse sèche produite augmentent entre T1 et T2 sur les placettes 1 et 5 alors que sur les placettes 9 et 12, la quantité de Pb extraite est plus faible à T2 qu'à T1 malgré une production de biomasse sèche plus élevée.

EFFET DE LA MODALITE SUR L'EFFICACITE DE LA PHYTOEXTRACTION DE Pb PAR *B. JUNCEA*

La réalisation de t-tests entre « Association » et « Rotation » ne révèle aucune différence significative vis-à-vis de la quantité de Pb extraite à T2 (p-value = 0.791) mais met en évidence une différence significative entre « Association » et « Rotation » par rapport à l'accumulation de Pb par *B. juncea* dans ses parties aériennes (p-value = 0.009).

DISCUSSION

Les analyses de Pb et de pH du site expérimental révèlent des valeurs hétérogènes, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de son histoire récente. En effet, ce site a été constitué en regroupant deux parcelles de jardins (65 et 66) anciennement occupés par deux jardiniers différents. Ainsi, il est très probable que d'autres paramètres ne soient pas homogènes sur l'ensemble du site. Cependant, un des objectifs de cette étude est de travailler dans des conditions réalistes de jardins incluant ces phénomènes d'hétérogénéités liés à la grande diversité des pratiques des jardiniers (Schwartz, 2013). Ce point a été pris en compte grâce au découpage de chaque placette (1 réplica) en 4 carrés. Ce dispositif permet d'étudier l'effet des pratiques culturales de chaque jardinier. Cependant, afin de contrôler au maximum cette variabilité intra-site, des analyses agronomiques de chaque placette sont prévues (CEC, MO, C/N, phosphates) pour caractériser au mieux le système complet.

La répartition particulière de Pb total sur le site peut être, d'une part, due au caractère naturel de l'enrichissement du sol en Pb. Il suivrait les veines minéralisées enrichies en Pb, présentes dans les micaschistes (Jean-Soro *et al.*, 2015). D'autre part, Pb total et le pH pourraient aussi être influencés par les anciennes pratiques culturales des jardiniers (apport de chaux, labour profond). Il serait intéressant d'estimer la fraction phytodisponible de Pb en réalisant des extractions chimiques au CaCl₂ et au DTPA.

Comme recensé dans l'ouvrage de Tremel-Schaub et Feix (2005), les deux légumes cultivés sont très faiblement accumulateurs. Les choux récoltés présentent toutefois des teneurs en Pb plus proches de 0,1 mg/kg MF mais qui restent en dessous de la valeur seuil. Ainsi, à l'exception de deux valeurs, la tomate et le chou sont bien tous les deux en dessous des valeurs seuils réglementaires – 0,1 mg/kg MF pour la tomate et 0,3 mg/kg MF pour le chou (CEE n°1881/2006) – donc consommables.

Ces résultats ne sont valables que pour les variétés testées *i.e.* la variété de Milan pour le chou et les variétés Marmande, Roma, Cœur de bœuf et Prune noire pour la tomate. Un doute persiste pour la Cornue des Andes avec une valeur légèrement au-dessus (0,12 mg/kg MB) de la valeur seuil.

Les rendements de biomasses fraîches récoltées au cours de cette étude sont en moyenne de 2 à 3 t/ha. Ils sont environ 8 fois plus faibles que ceux classiquement récoltés en agriculture (Kumar *et al.*, 1995). Les conditions de culture n'étaient cependant pas optimales. Les cultures n'ont reçu aucune fertilisation si ce n'est l'apport de compost avant le début de l'expérimentation (T0). Des conditions météorologiques défavorables et une attaque d'insectes/mollusques peuvent expliquer ces résultats.

Les facteurs de bioconcentration (FBC) et de translocation (FT) sont utilisés pour estimer l'efficacité de la phytoextraction (Brooks, 1998). Les concentrations en Pb dans les parties aériennes de *B. juncea* (0,19 ; 0,55 et 0,80 mg Pb/kg MS) sont faibles par rapport à celles de la littérature. Kumar *et al.* (1995) avait obtenu une teneur moyenne dans les parties aériennes de *B. juncea* de 10 300 ± 2 900 mg/kg MS ce qui correspond à un FBC de 16,5. L'étude avait cependant été faite en hydroponie, condition de culture où le plomb est entièrement disponible et donc facilement prélevé par la plante. Les résultats sont différents pour les expériences en champ. Par exemple, une expérimentation *in situ* menée par Del Rio *et al.* (2005) a révélé un FBC de 0,17 pour *B. juncea*. Bien que beaucoup plus faible que celui calculé par Kumar *et al.* (1995), il reste entre 35 à 170 fois supérieur au FBC obtenu au cours de cette étude. Une telle différence pourrait s'expliquer par la spéciation du plomb. Etant

d'origine naturelle, le plomb sur le site des Eglantiers est majoritairement dans la fraction résiduelle (plus de 80 % ; Bouquet *et al.*, soumis). La contamination du site d'Aznalcolla (Del Rio *et al.*, 2005) est quant à elle d'origine anthropique (épandage accidentel des liquides d'exploitation de la mine de pyrite située à proximité). Les déchets riches en métaux (dont Pb) et en sulfures ont non seulement pollué le sol mais ont aussi fortement abaissé son pH (jusqu'à 3 unités de différence ; Simon *et al.*, 1999). Le plomb est par conséquent plus disponible sur ce site que sur celui des Eglantiers (pH >7).

L'accumulation de Pb dans les racines est, comme attendu, plus élevée que celle analysée dans les parties aériennes de *B. juncea*. Sauf pour A-T2 pour qui le FT est faible (0,003), les autres valeurs sont du même ordre de grandeur que celles rencontrées dans la littérature pour *B. juncea* (ou autres *Brassicaceae*) soit 0,1 et 1 (Kumar *et al.*, 1995, Liu *et al.*, 2000, Brunetti *et al.*, 2011, Rahman *et al.*, 2013, Ramesar *et al.*, 2014) bien que Del Rio *et al.* (2005) ait obtenu des FT de 17,2 en 1999 et de 3,0 en 2000 pour l'expérimentation *in situ* ; différence explicable par l'origine naturelle de Pb.

Les valeurs du FT sont aussi plus élevées à T1 qu'à T2. Cela pourrait s'expliquer par la différence de durée de culture de la moutarde entre les saisons. Cette dernière était de 6 mois à T2 contre 11 semaines à T1. Au cours de la saison 2, les racines étaient beaucoup plus développées et anciennes et possédaient donc une plus grande capacité de fixation de Pb. Les racines ne seraient alors pas saturées ce qui limiterait le transfert vers les parties aériennes (Kumar *et al.*, 1995, Kabata-Pendias, 2011). Ainsi, cultiver la moutarde sur une longue durée ne serait pas nécessaire, cela pourrait même limiter l'efficacité de la phytoextraction vis-à-vis du FT.

Il pourrait aussi y avoir un effet de dilution de Pb dans la masse végétale 1/ à cause de la levée inégale des graines semées sur les placettes et 2/ si la croissance de la plante est plus rapide que le processus d'accumulation de Pb et de sa translocation vers les parties aériennes.

Lors d'une précédente étude, *B. juncea* (cv. 426308, le même que celui utilisé par Kumar *et al.*, 1995) a été cultivée en pots de sol des Eglantiers dans une enceinte de culture. L'accumulation dans les parties aériennes était limitée, en moyenne $0,30 \pm 0,08$ mg/kg MS, du même ordre que celle retrouvée *in situ* pour le cultivar Vitamine. L'ajout d'EDTA multiplie par 46 la concentration de Pb dans les parties aériennes (Bouquet *et al.*, soumis).

L'analyse des résultats a permis de détecter l'effet de la modalité de culture sur de Pb dans les parties aériennes de *B. juncea* mais cet effet n'est pas confirmé pour la quantité de Pb extrait. Les résultats ont pu être « brouillés » par l'hétérogénéité de la biomasse sur la modalité « Association ». L'effet du mode de culture reste toutefois à confirmer sur la prochaine saison où Mb reviendra dans la rotation. En effet, ce qui a été détecté peut ne pas être l'effet de la modalité de culture mais plutôt l'effet de la première saison de culture de *B. juncea* sur la modalité. Certes, la teneur en Pb dans les parties aériennes de *B. juncea* sur R-T2 (0,55) est significativement plus élevée que celle sur A-T2 (0,19). Mais Pb A-T1 (0,80) était aussi plus élevé que Pb A-T2. Cette différence pourrait être due à l'épuisement progressif du pool phytodisponible de Pb dans le sol, qui a commencé en saison 1 pour l'Association et en saison 2 pour la Rotation.

CONCLUSION

En réponse à un enjeu local mais aussi à une problématique plus globale, l'objectif principal de cette étude était de développer un système de culture qui permette le maintien de l'activité potagère sur les jardins familiaux contaminés en Pb, tout en dépolluant le sol en place. Les premiers résultats montrent que malgré l'enrichissement en Pb, il est tout à fait possible de continuer à cultiver de façon sécurisée des légumes. Les légumes testés, la tomate et le chou, sont bien des légumes très peu accumulateurs de Pb dans les parties consommables, avec des teneurs inférieures au seuil réglementaire fixé par la norme CEE n° 1881/2006 (0,1 et 0,3 mg/kg MF selon le légume). Ils sont donc consommables. En ce qui concerne la phytoextraction du plomb par la moutarde brune, son efficacité se révèle très limitée sur ce site (entre 0,2 et 0,80 mg/kg retrouvé dans les parties aériennes). La faible efficacité de cette méthode de dépollution peut être due à l'origine naturelle de la pollution, la majorité du plomb présent dans le sol (plus de 80%) n'étant pas associé aux fractions phytodisponibles. Un effet du mode de culture est cependant détecté ; une culture en rotation serait

plus efficace pour la phytoextraction que l'association. Ce résultat doit cependant encore être confirmé. Afin d'augmenter cette efficacité, il serait intéressant de tester le couplage de la bioaugmentation à la phytoextraction. Tout cela soulève cependant une question primordiale : quand considère-t-on que le sol ne nécessite plus d'être décontaminé ? Faut-il se baser sur le plomb total alors que nous savons que celui-ci ne pourra pas être éliminé entièrement à l'échelle de l'expérimentation ? Ne serait-il pas plus pertinent de se baser sur l'épuisement du pool phytodisponible dans le sol ?

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier la ville de Nantes pour sa contribution financière à ces travaux (bourse de thèse CIFRE de Dorine Bouquet), pour la mise à disposition du site expérimental et pour la participation régulière du Service des Espaces Verts et de l'Environnement (SEVE), plus particulièrement Marie-France Ringeard et Romaric Perrocheau au suivi de la thèse, à l'entretien du site et à la mise en relation avec l'association du jardin des Eglantiers. Nous remercions également les jardiniers ayant contribué à cette expérience participative Christine Joly, Roger Neel, Jean-Louis Chausset et Pierre Samuel.

BIBLIOGRAPHIE

- Alkorta I., Hernandez-Allica J., Becerril J.M., Amezaga I., Albizu I., Garbizu C., 2004 – Recent findings on the phytoremediation of soil contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead and arsenic. *Environ. Sci. Biotechnol.*, 3, 71-90.
- Bouquet D., Braud A., Lebeau T., soumis – *Brassica juncea* for phytoextraction of urban soils moderately contaminated by lead: origin of contamination and effect of chelates. *Int. J. Phyt.*
- Brooks RR., 1998 – *Plants that hyperaccumulate heavy metals*. Wallington: CAN International, 379 p.
- Brunetti G., Farrag K., Rovira P. S., Nigro F., Senesi N., 2011 – Greenhouse and field studies on Cr, Cu, Pb and Zn phytoextraction by *Brassica Napus* from contaminated soils in the Apulia region, Southern Italia. *Geoderma*, 160, 517-523.
- Del Rio M., Font R., De Haro A., 2005. *Differential accumulation of Pb, Zn and Cu by Brassica species grown on the polluted soil of Aznalcollar (Southern Spain)*. Del Valls T.A. & Blasco J. 55-60 p.
- Huang J.W., Cunningham S.D., 1996 – Lead phytoextraction: species variation in lead uptake and translocation. *New Phytologist*, 134, 75-84.
- Jean-Soro L., Le Guern C., Béchet B., Lebeau T., Ringeard M.F., 2015 – Origin of trace elements in an urban garden in Nantes, France. *Journal of Soils Sediment*, 15, 1802-1812.
- Kabata-Pendias A., 1989. *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- Kidd P., Mench M., Álvarez-López V., Bertc V., Dimitrioud I., Friesl-Hanle W., Herzig R., Janssens J. O., Kolbasbh A., Mülleri I., Neui S., Renellaj G., Ruttensg A., Vangronsveldg J., Puschenreiterk M., 2015 – Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils. *Int. J. Phyt.*
- Kumar P.B.A., Dushenkov V., Motto H., Raskin I., 1995 – Phytoextraction: the use of plants to remove heavy metals from soils. *Environ. Sci. Technol.*, 29, 1232-1238.
- Lebeau T., Braud A., Jézéquel K., 2008 – Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: a review. *Environ Pollut.*, 153, 3, 497-522.
- Liu D., Jiang W., Liu C., Xin C., Hou W., 2000 – Uptake and accumulation of lead in roots and shoots of Indian Mustard [*Brassica juncea* (L.)]. *Bioresource Technology*, 71, 273-277.
- Rahman M.M., Azirun S.M., Boyce A.N., 2013 – Enhanced Accumulation of Copper and Lead in Amaranth (*Amaranthus paniculatus*), Indian Mustard (*Brassica juncea*) and Sunflower (*Helianthus annuus*). *PLoS ONE* 8: e62941. doi:10.1371/journal.pone.0062941
- Ramesar N.S., Tavares M., Ebbs S.D., Sankaran R.P., 2014 - Transport and Partitioning of Lead in Indian Mustard (*Brassica juncea*) and Wheat (*Triticum aestivum*). *Bioremediation Journal*, 18, 345–355.
- Schwartz C., 2013 – Les sols de jardins, supports d'une agriculture urbaine intensive. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Hors-série 15, mis en ligne le 18 octobre 2012, consulté le 21 juin 2016. URL : <http://vertigo.revues.org/12858> ; DOI : 10.4000/vertigo.12858
- Simon M., Ortiz I., Garcla I., Fernandez E., Fernandez J., Dorronsoro C., Aguilar J., 1999 – Pollution of soils by the toxic spill of a pyrite mine (Aznalcollar, Spain). *The Science of the Total Environment*, 242, 105-115.

- Soriano-Disla J., Speir T.W., Gomez I., Clucas L.M., McLaren R.G., Navarro-Pedreno J., 2010 – Evaluation of different extraction methods for the assessment of heavy metal bioavailability in various soils. *Water Air Soil Poll.*, 213, 471-483.
- Tremel-Schaub A. et Feix I., 2005. *Contamination des sols*. EDP Sciences/ADEME, France, 164 p.
- Witters N., Mendelsohn R., Van Passel S., Van Slycken S., Weyens N., Schreurs E., Meers E., Tack F., Vanheusden B., Vangronsveld J., 2012 – Phytoremediation, a sustainable remediation technology? *Biomass Bioenerg.*, 39, 470-477.
- Yu L., Zhu J., Huang Q., Su D., Jiang R., Li H., 2014 – Application of a rotation system to oilseed rape and rice fields in Cd-contaminated agricultural land to ensure food safety. *Ecotox. Environ. Safe.*, 108, 287-293.