

Dépollution des sols par phytoremédiation : réduire la durée de traitement tout en maintenant l'activité agricole

Période : septembre 2014 à décembre 2014

Thierry LEBEAU | thierry.lebeau@univ-nantes.fr

Université de Nantes – LPG-Nantes, UMR 6112 CNRS – Nantes – France

Mots-clés : Bactéries, bioaugmentation, biodisponibilité, cadmium, décabromodiphényle, gestion des risques, métaux, plomb, phytoremédiation, sol, zinc

La plupart des sols pollués dans le monde le sont de manière diffuse (teneurs modérées en polluants sur des surfaces importantes). Tel est notamment le cas de la Chine avec 19,4 % des terres arables analysées (16,1 % de l'ensemble des sols) qui dépassent les limites réglementaires en vigueur dans ce pays, en particulier pour les métaux et les métalloïdes.

Sur de telles surfaces, la gestion la plus courante par excavation, puis tri et stockage (environ 50 % des terres polluées en France), le cas échéant suivi d'un traitement, ne peut être réservée qu'aux terres les plus polluées. Pour les pollutions diffuses, qui touchent plus particulièrement les sols agricoles, se pose la question de leur gestion *in situ* (sans excavation), de façon à poursuivre leur utilisation, en limitant le plus possible le risque de transfert des contaminants du sol vers la chaîne alimentaire. Plusieurs solutions de gestion existent qui permettent de poursuivre l'activité agricole, sans pour autant dépolluer les sols (1) : réduction des teneurs en contaminants dans les intrants, réduction de leur phytodisponibilité, sélection de plantes peu accumulatrices, gestion de l'eau et des intrants, etc. Lorsque ces solutions ne conviennent pas, il faut soit changer l'usage des sols, soit les dépolluer *in situ*. En raison de son faible coût (2) et de la préservation des propriétés physico-chimiques et biologiques qui font la qualité des sols agricoles, la phytoremédiation est une technique prometteuse pour la dépollution *in situ* des sols modérément pollués par des contaminants inorganiques (métaux dont métaux lourds, métalloïdes), mais les résultats parfois décevants d'expériences au champ (3) et la durée importante des traitements (plusieurs années voire dizaines d'années) freinent encore aujourd'hui son utilisation. L'ajout de chélatants augmente, parfois très significativement, les teneurs en métaux accumulés dans les plantes. Des chélatants synthétiques ont été testés avec succès mais leur coût élevé pour une application à grande échelle et leur toxicité (ex : EDTA) ne permettent pas d'envisager leur utilisation (4). La bioaugmentation¹, qui emploie des bactéries ou des champignons microscopiques capables dans certains cas d'accroître la mobilité des métaux et de les rendre absorbables en plus grande quantité par les plantes, est une alternative récente prometteuse dont la preuve du concept n'est pas encore faite en conditions de terrain (5).

Cependant, même si la durée des traitements par phytoremédiation peut être réduite significativement (cas de plantes fortement accumulatrices), elle demeurera probablement trop importante dans de nombreux cas, même s'il a été démontré que cette technique appliquée pendant six ans pouvait être économiquement plus rentable que de devoir changer de cultures alimentaires (6). Ainsi, dans la perspective de dépolluer les sols tout en maintenant leur exploitation à usage alimentaire, sans risque pour le consommateur, il a été proposé de cultiver des plantes dépolluantes tout en maintenant certaines cultures alimentaires pas ou peu accumulatrices, le temps de la dépollution – cultures associées² ou rotations culturales³ (7,8) – en prenant soin de vérifier à la récolte, que les teneurs en métaux dans les parties consommées ne dépassent pas les valeurs maximales autorisées.

Les deux articles choisis présentent deux méthodes innovantes de gestion *in situ* des sols pollués basées sur la phytoremédiation. La première porte sur la bioaugmentation associée à la phytoextraction dans le cas de sols pollués au cadmium. La seconde teste une rotation culturale comportant une plante censée réduire la teneur en métaux (cadmium, plomb et zinc) du sol suivie d'une culture de riz.

Phytoremédiation d'un sol co-contaminé par des métaux lourds et du déca-BDE par une co-culture de *Sedum alfredii* et de fétuque, associée à *Bacillus cereus* JP12

Lu M, Zhang Z Z. Phytoremediation of soil co-contaminated with heavy metals and deca-BDE by co-planting of *sedum alfredii* with tall fescue associated with *Bacillus cereus*. *Plant Soil* 2014;382:89-102.

Résumé

L'étude porte sur la dépollution d'un sol co-contaminé par des métaux (Cd, Pb et Zn respectivement à 10, 100 et 200 mg kg⁻¹

de sol) et du décabromodiphényle (DBDE à 5 mg kg⁻¹ de sol), un retardateur de flamme utilisé dans les textiles, peintures et appareils électroniques. En raison de ses capacités à dégrader des polluants variés (ici le DBDE), de la fétuque a été cultivée en association avec *Sedum alfredii*, hyperaccumulateur de Cd et Zn, et accumulateur de Pb. Le sol a également été bioaugmenté par la bactérie *Bacillus cereus* JP12 pour améliorer les rendements de dégradation du DBDE.

Lorsque la fétuque est co-cultivée avec *S. alfredii*, l'ajout de *Bacillus cereus* augmente la biomasse végétale racinaire et aérienne de 22 % en moyenne pour *S. alfredii* et de 15 % pour la fétuque.

De même, les concentrations (quantités) en Cd, Pb et Zn dans les parties aériennes de *S. alfredii* sont accrues respectivement de 42 %, 57 % et 34 % (71 %, 72 % et 63 %) comparées au témoin non bioaugmenté. Pour la fêtuque (en association avec *S. alfredii*), la bioaugmentation augmente également les teneurs en métaux dans les parties aériennes et racinaires. Toutefois, les teneurs sont plus faibles que celles obtenues en monoculture. En 4 mois, 3,3 % du Cd, 0,55 % du Pb et 2,7 % du Zn sont accumulés dans les parties aériennes de la culture associée. 69,6 % du DBDE est dissipé grâce à la bioaugmentation du sol, pourcentage porté à 93,4 % avec l'association de la fêtuque et de *S. alfredii*. Le rôle de la plante dans la dégradation du DBDE est cependant limité (<10 %). En revanche, l'association végétale et de *B. cereus* permet de réduire le plus la proportion de congénères les plus substitués en brome et d'aboutir à un taux de minéralisation de 40 %, le reste étant représenté par les métabolites de dégradation du DBDE. Il en découle une augmentation de l'activité polyphénol oxydase indiquant une réduction de la pollution. La survie et la colonisation du sol par *B. cereus* réduit légèrement la diversité bactérienne du sol durant le temps de l'expérience.

Commentaire

Cette expérience présente l'intérêt de tester une pollution mixte inorganique (DBDE, Cd, Pb, Zn) par un procédé de traitement combinant la phytoremédiation et la bioaugmentation. Cette combinaison est bien choisie puisque les métaux sont efficacement extraits et le DBDE presque totalement dégradé (93,4 %). La bioaugmentation apporte un triple avantage : augmentation de la biomasse végétale, augmentation de la concentration en métaux accumulés par la plante et augmentation du taux de dégradation du DBDE.

Concernant le devenir du DBDE, une distinction a été faite entre dissipation, dégradation du DBDE en métabolites – processus majoritaire mis en évidence sur la base d'une comparaison avec un témoin abiotique – et suivi du dégagement du $^{14}\text{CO}_2$, indicateur de minéralisation du DBDE marqué.

La proportion importante dans le sol de bactéries du genre *Bacillus* dans les modalités « bioaugmentées » avec *B. cereus* tend à démontrer (pas de preuve formelle dans l'étude) que la souche a survécu et colonisé le sol. Il serait intéressant de vérifier qu'à l'issue du traitement, la structure de la communauté bactérienne revient à son état originel (résilience). La question de la survie de l'inoculum microbien et de la colonisation du sol, suite à la bioaugmentation, doit également faire l'objet d'une validation en conditions réelles de terrain.

On notera enfin que le sol a été contaminé artificiellement pour les besoins de l'expérience. On peut raisonnablement s'attendre à ce que les performances de dépollution soient moins élevées dans le cas d'un sol historiquement pollué, en raison d'une plus faible biodisponibilité des polluants dans ce cas de figure (notamment Pb, Zn et DBDE) par rapport à une pollution artificielle.

Application d'une rotation de moutarde brune et de riz à des terres agricoles contaminées par du cadmium (Cd) pour garantir la sécurité des aliments

Yu L, Zhu J, Huang Q, Su D, Jiang R, Li H. Application of a rotation system to oilseed rape and rice fields in Cd-contaminated agricultural land to ensure food safety. *Ecotoxicol Environ Saf* 2014;108:287-93.

Résumé

Afin de maintenir l'activité rizicole, sans risque pour la santé humaine, tout en dépolluant des sols modérément contaminés au cadmium (0,96 mg Cd kg⁻¹ de sol; seuil chinois de 0,6 mg Cd kg⁻¹ pour les sols cultivés), une rotation culturale associant moutarde brune et riz a été expérimentée en conditions réelles (en plein champ). L'objectif est d'extraire suffisamment de Cd par la moutarde brune afin de réduire les teneurs en Cd du riz en dessous des limites réglementaires chinoises (seuil de 0,2 mg Cd kg⁻¹ de riz). L'efficacité de phytoextraction du Cd par la variété de moutarde brune Zhucang Huazi (ZC) est 50 à 60 % supérieure à celle de la variété Chuanyou II-93 (CY), avec des teneurs en Cd dans les graines deux fois plus élevées (1,2 et 1,6 pour les pailles), ce qui interdit sa consommation en alimentation humaine. Du riz est ensuite cultivé dont le rendement n'est pas affecté par le précédent cultural (moutarde brune). En revanche, contrairement à ce qui était attendu, le riz accumule plus de Cd, suite à la culture de moutarde brune, qu'en l'absence de ce précédent cultural. Cette accumulation est plus importante avec la variété ZC (1,6 à 2,2 fois plus dans les grains de riz, selon l'année, comparé au témoin sans culture de moutarde brune). La translocation du Cd de la paille au grain augmente de 10 à 52 % (selon la variété de riz) lorsque la culture de riz est précédée d'une moutarde brune. Au lieu de réduire la fraction biodisponible de Cd du sol, la moutarde brune l'augmente (variété CK en année 1 de l'essai), ce qui pourrait expliquer la teneur plus élevée en Cd dans le riz brun. Dans les conditions de cette expérimentation, il n'est donc pas envisageable d'employer la moutarde brune en phytoextraction du Cd puisque, d'une part, les performances de phytoextraction sont faibles, et, d'autre part, la moutarde brune peut augmenter la part de Cd mobilisable par le riz.

Commentaire

Cette étude a pour intérêt de tester une rotation de cultures qui, si elle était efficace, permettrait à la fois de dépolluer les sols faiblement contaminés au Cd par la moutarde brune (utilisation non alimentaire) tout en poursuivant la culture de riz.

Un autre intérêt de l'étude tient à l'expérimentation réalisée en conditions réelles (en plein champ), et non en pots dans des conditions contrôlées de laboratoire et ce, pendant deux ans, de façon à tenir compte de la variabilité interannuelle. Enfin, l'effet variété de la moutarde brune a été testé.

Même s'il ne s'agit ici que d'une expérience, elle a le mérite de relativiser une précédente étude réalisée en pots en conditions de laboratoire ayant montré que la première année d'une rotation, les plantes utilisées en phytoextraction permettaient de réduire l'accumulation de Cd par la culture suivante, à usage alimentaire

(8). Ces résultats contradictoires peuvent entre autres s'expliquer par des différences de biodisponibilité du Cd (contamination artificielle dans cette précédente étude) et par des conditions de cultures éloignées de celle du terrain.

Se pose aussi la question de la pertinence des rotations culturales par rapport aux cultures associées et ce, pour deux raisons : 1/ dans le cas de la rotation étudiée, la culture alimentaire n'est produite qu'un an sur deux, même si la moutarde brune est valorisée (énergie), en plus de son rôle de plante dépolluante, 2/ la dégradation des racines de moutarde brune dans le sol durant l'interculture contribue très probablement à une augmentation de la biodisponibilité des métaux pour la culture suivante.

La moutarde brune a accumulé moins qu'escompté (moins que le riz !) en raison des faibles teneurs en Cd du sol, ce qui pose la question du choix de la plante à employer. Une sélection végétale basée sur leur capacité à accumuler le plus de Cd à partir de sols faiblement contaminés plutôt que de transposer des résultats d'expériences réalisées à partir de sols fortement pollués serait plus pertinente.

Enfin, la modalité témoin est discutable : une succession moutarde brune-riz a été comparée à du riz sans précédent cultural. Dans la logique de comparer des sols cultivés, une succession riz-riz aurait été plus appropriée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La phytoextraction doit, pour être crédible, gagner en efficacité et les durées de traitement être raccourcies – durées variables selon les usages du sol et la pression économique – sur la base des métaux mobiles, voire mobilisables, du sol. Pour accélérer la dépollution, de nouvelles stratégies émergent avec le couplage de la bioaugmentation des sols (microorganismes, microfaune) et de la phytoextraction. Mais les durées de traitement restent souvent trop importantes pour envisager la réutilisation des sols à l'échelle de seulement quelques années et posent la question de poursuivre l'activité agricole, sans risque pour la santé humaine, tout en dépolluant. Des cultures associées (plante dépolluante + plante n'accumulant pas la pollution) ou des rotations culturales bien choisies, associant une culture dépolluante qui précède une culture alimentaire permet parfois de réduire la quantité biodisponible de métal pour la plante alimentaire et ainsi d'abaisser les teneurs en-dessous des seuils réglementaires. Mais ces nouvelles pratiques doivent encore faire la preuve de leurs concepts en particulier en conditions réelles au champ.

GENERAL CONCLUSION

To be credible, the efficiency of phytoextraction used to clean up soils must be improved and the duration of the treatment must be reduced – varying duration according to the land use and economical pressure – on the basis of mobile or mobilisable metals. To accelerate the soil cleaning, new research strategies are emerging with the coupling of bioaugmentation (microorganisms, microfauna) and phytoextraction. But the treatment duration still remains too long to consider the reuse of soil in only a few years and the question arises of maintaining the crop activity without risk to human health while decontaminating. Combined crops (depolluting plants and non accumulating plants) or well-chosen rotations with a depolluting plant before to cultivate a crop plant allow sometimes to reduce the amount of metal available for the crop plant and then to reduce the content below the legal thresholds. But these new practices must provide evidence of their concept, particularly at the field scale.

Lexique

- (1) Bioaugmentation : Microorganismes ou microfaune sélectionnés à partir d'échantillons environnementaux, cultivés en masse *ex situ* et inoculés dans le sol d'origine ou dans un autre sol.
- (2) Culture associée : Culture de plusieurs espèces végétales ou variétés sur la même parcelle en même temps
- (3) Rotation culturale : Succession dans le temps de cultures sur une surface donnée

Publications de référence

- (1) Zhao FJ, Ma Y, Zhu YG, *et al.* Soil Contamination in China: Current Status and Mitigation Strategies. *Environ Sci Technol* 2015; **49**:750-9.
- (2) ADEME. Taux d'utilisation et coûts des différentes techniques et filières de traitement des sols et des eaux souterraines polluées en France, synthèse des données 2010. 2012; 26 p.
- (3) Vangronsveld J, Herzig R, Weyens N, *et al.* Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ Sci Pollut Res* 2009; **16**:765-94.
- (4) Evangelou MWH, Ebel M, Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere* 2007; **68**:989-1003.
- (5) Lebeau T, Braud A, Jézéquel K. Performance of bioaugmentation-assisted phytoextraction applied to metal contaminated soils: a review. *Environ Poll* 2008; **153**:497-522.
- (6) Lewandowski I, Schmidt U, Londo M, *et al.* The economic value of the phytoremediation function - Assessed by the

example of cadmium remediation by willow (*Salix* spp). *Agricultural Systems* 2006; **89**:68-89.

- (7) **Wu QT, Wei ZB, Ouyang Y.** Phytoextraction of metal-contaminated soil by *Sedum Alfredii* H: Effects of chelator and co-planting. *Water Air and Soil Poll* 2007; **180**:131-9.
- (8) **Wu FL, Lin DY, Su DC.** The effect of planting oilseed rape and compost application on heavy metal forms in soil and Cd and Pb uptake in rice. *Agric Sci China* 2011; **10**:267-74.

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent :

- n'avoir aucun conflit d'intérêts ;
 avoir un ou plusieurs conflits d'intérêts.

Revue de la littérature

Sessitsch A, Kuffner M, Kidd P, et al. The role of plant-associated bacteria in the mobilization and phytoextraction of trace elements in contaminated soils. *Soil Biol Biochem* 2013; **60**:182-94.

Tang YT, Deng THB, Wu QH, et al. Designing cropping systems adapted to metal contaminated sites: a review. *Pedosphere* 2012; **22**:470-88.

Autres publications identifiées

Weyens N, Gielen M, Beckers B, et al. Bacteria associated with yellow lupine grown on a metal-contaminated soil: in vitro screening and in vivo evaluation for their potential to enhance Cd phytoextraction. *Plant Biology* 2014; **16**:988-96.

Sur la base de tests in vitro (sans plante), des bactéries isolées à partir d'un sol contaminé au Cd ont été sélectionnées pour leur potentiel à augmenter les rendements de phytoextraction. Les essais in vivo qui ont suivi associant les bactéries sélectionnées et la plante n'ont pas confirmé les résultats des tests. L'intérêt de cet article est de moduler le crédit porté à ces tests in vitro et à la transposition des résultats à des expériences in vivo.

Fumagalli P, Comolli R, Ferrè C, et al. The rotation of white lupin (*Lupinus albus* L.) with metal-accumulating plant crops: A strategy to increase the benefits of soil phytoremediation. *J Environ Manag* 2014; **145**:35-42.

L'étude porte sur une rotation associant le lupin comme culture d'hiver et le chanvre utilisée en phytoremédiation de sols contaminés par Cd, Cu, Ni et Zn. L'objectif est de couvrir le sol toute l'année et de prolonger la durée de phytoremédiation. Cependant le lupin ne présente pas d'intérêt en phytoremédiation, si ce n'est de servir d'engrais vert au bénéfice de la culture de chanvre.

Quartacci MF, Micaelli F, Sgherri C. *Brassica carinata* planting pattern influences phytoextraction of metals from a multiple contaminated soil. *Agrochimica* 2014; **58**:77-89.

Un sol polycontaminé (Cu, Mn, Pb) est traité par phytoextraction avec Brassica carinata en mono-culture, en co-culture avec de l'orge ou en rotation avec cette même plante. Les deux dernières modalités sont les plus intéressantes : teneurs en métaux extractibles du sol et dans les parties aériennes de B. carinata plus élevées en particulier pour la rotation. Les exsudats racinaires de cette association végétale augmentent la solubilité des métaux du sol et contribuent à améliorer la technique de phytoextraction sans avoir recours aux complexants chimiques.