HAL
open science

Phytostabilisation d'un site pollué par les éléments traces : opération pilote et pérennité du traitement

Valérie Bert, Sophie Lacherez, Lucie Caron, Christine Lors, Gwendoline Desailly, Agnès Laboudigue, Denis Damidot, Rodolphe Gaucher

To cite this version:

Valérie Bert, Sophie Lacherez, Lucie Caron, Christine Lors, Gwendoline Desailly, et al.. Phytostabilisation d'un site pollué par les éléments traces : opération pilote et pérennité du traitement. 2. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Oct 2009, Paris, France. pp.NC. ineris-00973369

HAL Id: ineris-00973369

https://ineris.hal.science/ineris-00973369v1

Submitted on 4 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Phytostabilisation d'un site pollué par les éléments traces : opération pilote et pérennité du traitement

Valérie Bert [1], Sophie Lacherez [1], Lucie Caron [1], Christine Lors [2,3], Gwendoline Desailly [2,3], Agnès Laboudigue [2,3], Denis Damidot [2,3], Rodolphe Gaucher [1]

[1] INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), Unité Technologies et Procédés Propres et Durables, Parc Technologique Alata, BP2 - 60550 Verneuil en Halatte
valerie.bert@ineris.fr,

[2] Univ Lille Nord de France - 59000 Lille

[3] EMDouai, MPE-GCE - 59508 Douai

Résumé

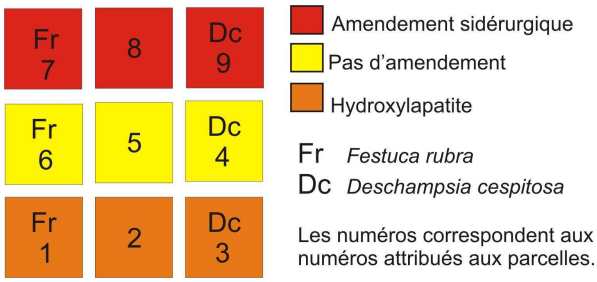
Grâce à l'utilisation combinée de plantes et d'agents immobilisants, la phytostabilisation assistée limite les risques associés à un sol contaminé en réduisant la biodisponibilité des polluants. Le rôle des plantes est de réduire le lessivage et l'érosion. En Europe et dans le monde, de nombreux sites ont déjà été phytostabilisés avec succès. Cependant, peu de projets de phytostabilisation associent une surface et une durée d'expérimentation suffisantes pour établir l'efficacité sur le long terme et en conditions réelles d'une telle pratique pour la gestion d'un site pollué. La nécessité de conduire des opérations pilotes sur une longue durée a été ainsi mise en avant par la communauté scientifique.

L'objectif de ce projet mené sur un dispositif pilote mis en place en 2002 est d'estimer l'efficacité dans le temps d'une phytostabilisation assistée appliquée à un sédiment pollué par les éléments traces (Cd, Zn, Pb, Cu, As). Les paramètres suivis dans cette étude sont liés aux plantes initialement semées, aux espèces végétales venues spontanément coloniser le dispositif, aux agents immobilisants utilisés et aux caractéristiques physico-agronomiques de la matrice polluée. Une synthèse des résultats obtenus sur 7 années de suivi sera présentée lors du colloque.

Matériels et Méthodes

Le site d'étude (Douaisis) a été divisé en 9 parcelles sur lesquelles un sédiment issu du curage du canal de la Scarpe a été déposé. Sur ce site, deux traitements et deux espèces de plantes sont testés. Ceux-ci ont été sélectionnés lors d'expériences préliminaires en vases de végétation.

Trois parcelles ont ainsi été amendées avec l'hydroxylapatite (phosphate de calcium de la famille des apatites), trois l'ont été avec un amendement sidérurgique (sous-produit de la fabrication de l'acier riche en chaux) et les trois dernières constituent les témoins. Deux poacées, la Fétuque rouge (*Festuca rubra*) et la Canche cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*) ont été semées sur les parcelles amendées et les témoins selon le schéma ci-contre.



Afin d'évaluer la pérennité de la phytostabilisation et l'efficacité des couples plantes/amendement, nous avons réalisé :

- le suivi de la végétation initiale et spontanée (inventaire floristique, taux de recouvrement pour chaque espèce, étude des biotopes environnants, calcul d'indices de diversité, dosage des éléments traces et majeurs dans les parties aériennes des plantes) ;
- le suivi du sédiment et de la fraction extractible des éléments traces (mesure du pH, dosage des éléments traces et majeurs et du carbone organique dissous dans les extraits au nitrate de calcium ($Ca(NO_3)_2$ 0,01M)) ;
- le suivi de la microflore bactérienne totale et spécifique (dénombrement de la microflore bactérienne totale, de la microflore sulfo-oxydante et de la microflore sulfato-réductrice).

Principaux résultats

Suivi de la végétation :
Après 7 années de suivi, *D.cespitosa* et *F. rubra* ont des taux de recouvrement inférieurs à 50% sur toutes les parcelles. *F.rubra* a disparu d'une des parcelles. De nouvelles espèces ont ainsi colonisé spontanément le site et occupent l'espace laissé vide par les espèces initialement semées.
L'accumulation a été mesurée chez quatre espèces (*F.rubra*, *D.cespitosa*, *C.epigejos*, *Urtica dioica*). Quelque soit le traitement, *Deschampsia cespitosa* présente les concentrations en cadmium les plus faibles.

Efficacité des amendements :
L'amendement sidérurgique est le plus efficace pour limiter la fraction extractible au $Ca(NO_3)_2$ du zinc et du cadmium. Il est cependant moins efficace que l'hydroxylapatite pour la limiter la mobilité du cuivre. L'arsenic n'a fait l'objet d'un suivi que depuis 2 ans. Les résultats montrent que l'amendement sidérurgique n'augmente pas la mobilité de l'arsenic.

Au début du projet, il avait été montré que l'amendement sidérurgique diminuait de manière significative les concentrations en cadmium et en zinc dans les parties aériennes de *D.cespitosa* et *F.rubra* en comparaison du témoin et du traitement à l'hydroxylapatite. Cet effet n'est plus visible aujourd'hui car les concentrations en Cd et en Zn dans les plantes sont extrêmement faibles quelque soit le traitement.

Suivi de la microflore bactérienne totale et spécifique:
La taille de la population bactérienne totale est du même ordre que celle que l'on peut rencontrer dans un sol sain, ce qui indique une bonne activité biologique du sédiment.

Quel que soit le traitement, un faible nombre de bactéries sulfato-réductrices a été détecté.

Parmi les microflores sulfo-oxydantes recherchées, la population neutrophile est la mieux représentée (10^5-10^6 bactéries/g de sédiment sec), en relation avec le pH du sédiment proche de la neutralité. Toutefois, aucun impact de cette microflore sur la mobilisation des métaux n'a été mis en évidence.

Discussion

Sur l'ensemble des parcelles, les plantes initialement semées, *F. rubra* et *D.cespitosa*, laissent progressivement place à d'autres espèces végétales. Les parcelles sont ainsi colonisées par un mélange d'espèces pérennes et annuelles [1].

Depuis le début de l'expérience, une bonne activité biologique a été observée sur toutes les parcelles et la diversité végétale augmente régulièrement [2], [3]. Ceci confirme la restauration des fonctions du sol et l'enrichissement de la biodiversité qui sont deux objectifs importants de la phytostabilisation.

Il semble donc que la phytostabilisation du site soit un succès. Cependant, le suivi du dispositif est nécessaire pour estimer la pérennité du traitement. Il faut en effet vérifier sur le long terme que les plantes et les amendements poursuivent leur action stabilisatrice, que l'établissement de nouvelles espèces végétales sur le site sont des espèces non accumulatrices et que la fonctionnalité du sol perdure.

1. INTRODUCTION

Grâce à l'utilisation combinée de plantes et d'agents immobilisants, la phytostabilisation assistée limite les risques associés à un sol contaminé en réduisant la biodisponibilité des polluants. Le rôle des plantes est de réduire le lessivage et l'érosion. En Europe et dans le monde, de nombreux sites ont déjà été phytostabilisés avec succès. Cependant, peu de projets de phytostabilisation associent une surface et une durée d'expérimentation suffisantes pour établir l'efficacité sur le long terme et en conditions réelles d'une telle pratique pour la gestion d'un site pollué. La nécessité de conduire des opérations pilotes sur une longue durée a été ainsi mise en avant par la communauté scientifique.

L'objectif de ce projet mené sur un dispositif pilote mis en place en 2002 est d'estimer l'efficacité dans le temps d'une phytostabilisation assistée appliquée à un sédiment pollué par les éléments traces (Cd, Zn, Pb, Cu, As) et mis en dépôt après curage. Les paramètres suivis dans cette étude sont liés aux plantes initialement semées, aux espèces végétales venues spontanément coloniser le dispositif, aux agents immobilisants utilisés et aux caractéristiques physico-agronomiques de la matrice polluée. La synthèse des résultats obtenus après 7 années de suivi est présentée ci-après.

2. MATERIELS ET METHODES

Le site d'étude (Douaisis) a été divisé en 9 parcelles sur lesquelles un sédiment issu du curage du canal de la Scarpe a été déposé. Sur ce site, deux traitements et deux espèces de plantes sont testés. Ceux-ci ont été sélectionnés lors d'expériences préliminaires en vases de végétation [1].

Trois parcelles ont ainsi été amendées avec l'hydroxylapatite (phosphate de calcium de la famille des apatites), trois l'ont été avec un amendement sidérurgique (sous-produit de la fabrication de l'acier riche en chaux) et les trois dernières constituent les témoins (Fig. 1). Deux poacées, la Fétuque rouge (*Festuca rubra*) et la Canche cespiteuse (*Deschampsia cespitosa*) ont été semées sur 6 des 9 parcelles amendées (Fig. 1).

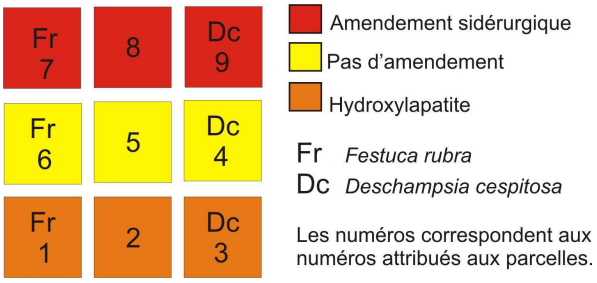


Figure 1 – Dispositif expérimental

Afin d'évaluer la pérennité de la phytostabilisation et l'efficacité des couples plantes/amendement, nous avons réalisé :

- le suivi de la végétation initiale et spontanée (inventaire floristique, taux de recouvrement pour chaque espèce, étude des biotopes environnants, calcul d'indices de diversité, dosage des éléments traces et majeurs dans les parties aériennes des plantes) ;
- le suivi du sédiment et de la fraction échangeable des éléments traces du sédiment (mesure du pH, dosage des éléments traces et majeurs et du carbone organique dissous dans les extraits au nitrate de calcium ($Ca(NO_3)_2$ 0,01M)) ;
- le suivi de la microflore bactérienne totale et de la microflore bactérienne spécifique (dénombrement des bactéries sulfo-oxydantes et sulfato-réductrices).

Les analyses ont été faites à la fois sur des échantillons de végétaux et sur des échantillons de sédiment. A chaque échantillon de végétal prélevé (trois réplicats par parcelle), on a associé un échantillon de sédiment prélevé au même endroit à l'aide d'une tarière sur environ 20 cm de profondeur (zone occupée par les racines).

En plus de prélever les espèces semées initialement (*Deschampsia cespitosa* et *Festuca rubra*), des échantillons de *Calamagrostis epigejos* et *Urtica dioica*, ont été prélevés. *C. epigejos* et *U. dioica* sont présentes de façon significative sur toutes les parcelles depuis 2007. *U. dioica* présente une physiologie différente des autres espèces car c'est une annuelle dicotylédone. Les différentes espèces échantillonnées selon les parcelles sont détaillées dans la figure 2.

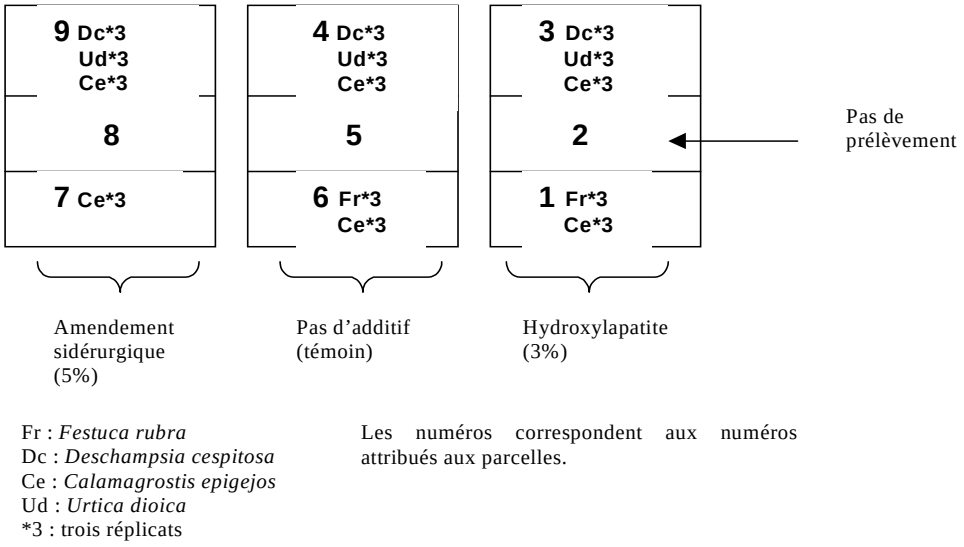


Figure 2 – Résumé des prélèvements effectués sur le dispositif expérimental

3. PRINCIPAUX RESULTATS

3.1. - Suivi de la végétation

Après 7 années de suivi, *D.cespitosa* et *F. rubra* ont des taux de recouvrement inférieurs à 50% sur toutes les parcelles. *F.rubra* a disparu d'une des parcelles. De nouvelles espèces ont ainsi colonisé spontanément le site et occupent l'espace laissé vide par les espèces initialement semées.
Les concentrations en éléments traces et majeurs ont été mesurées dans les parties aériennes des quatre espèces échantillonnées (*F.rubra*, *D.cespitosa*, *C.epigejos*, *Urtica dioica*). Quel que soit le traitement, *Deschampsia cespitosa* présente les concentrations en cadmium les plus faibles (fig. 3).

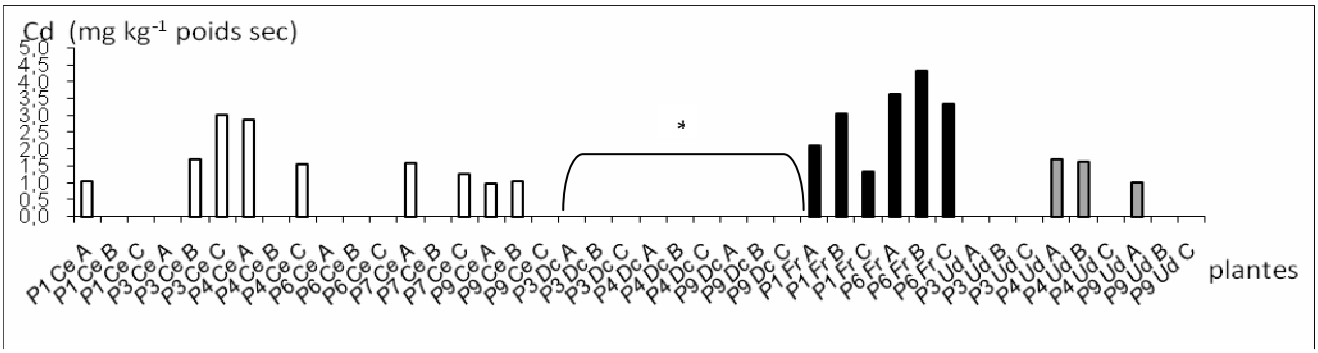


Figure 3 – Concentration en cadmium dans les échantillons de plantes prélevées en fonction des parcelles. (*C. epigejos* – blanc ; *F. rubra* – noir ; *U. dioica* – gris). L'intervalle marqué d'une étoile (*) correspond aux concentrations pour *D. cespitosa*, toutes inférieures à la limite de détection de l'appareil.

Les concentrations en Zn mesurées dans les parties aériennes de *C. epigejos*, *D. cespitosa* et *U. dioica* sur les parcelles 3, 4 et 9 ne sont pas significativement différentes (p>0,05 – fig 4), ne mettant en évidence ni d'effet plante ni d'effet du traitement.

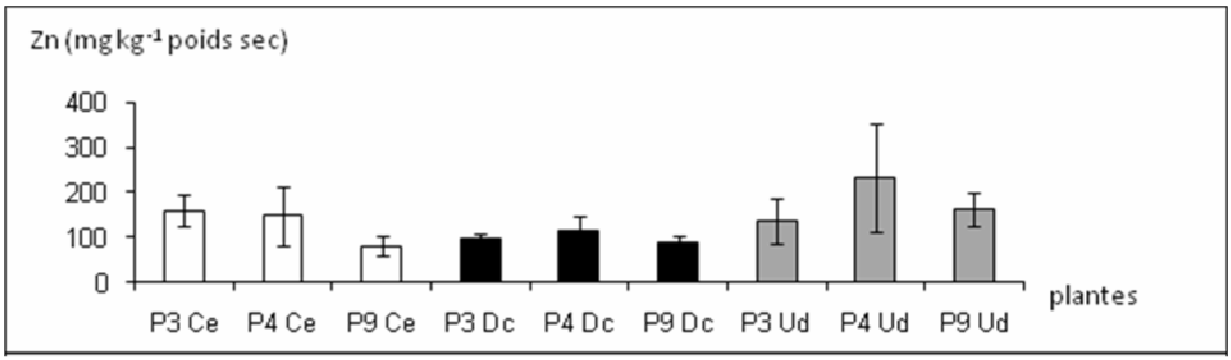


Figure 4 – Concentration moyennes en zinc (± écart type ; n=3) dans les parties aériennes de *C. epigejos* (blanc), *D. cespitosa* (noir) et *U. dioica* (gris) en fonction des parcelles.

3.2. - Efficacité des amendements

L'amendement sidérurgique est le plus efficace pour limiter la fraction échangeable de zinc (fig 5) et de cadmium. Ce résultat est indépendant de l'espèce végétale étudiée. L'hydroxylapatite montre une efficacité intermédiaire entre l'amendement sidérurgique et le témoin sans amendement.

L'amendement sidérurgique est moins efficace que l'hydroxylapatite pour limiter la mobilité du cuivre. Les concentrations moyennes mesurées en présence d'amendement sidérurgique sont cependant faibles (≈ 0,4 mg kg $^{-1}$ poids sec).

L'arsenic n'a fait l'objet d'un suivi que depuis 2007. Les résultats montrent que l'amendement sidérurgique n'augmente pas la mobilité de l'arsenic.

De 2002 à 2006, les résultats montraient que l'amendement sidérurgique diminuait de manière significative les concentrations en cadmium et en zinc dans les parties aériennes de *D.cespitosa* et *F.rubra* en comparaison du témoin et du traitement à l'hydroxylapatite. Cet effet n'est plus visible aujourd'hui car les concentrations en Cd et en Zn dans les plantes sont extrêmement faibles quel que soit le traitement.

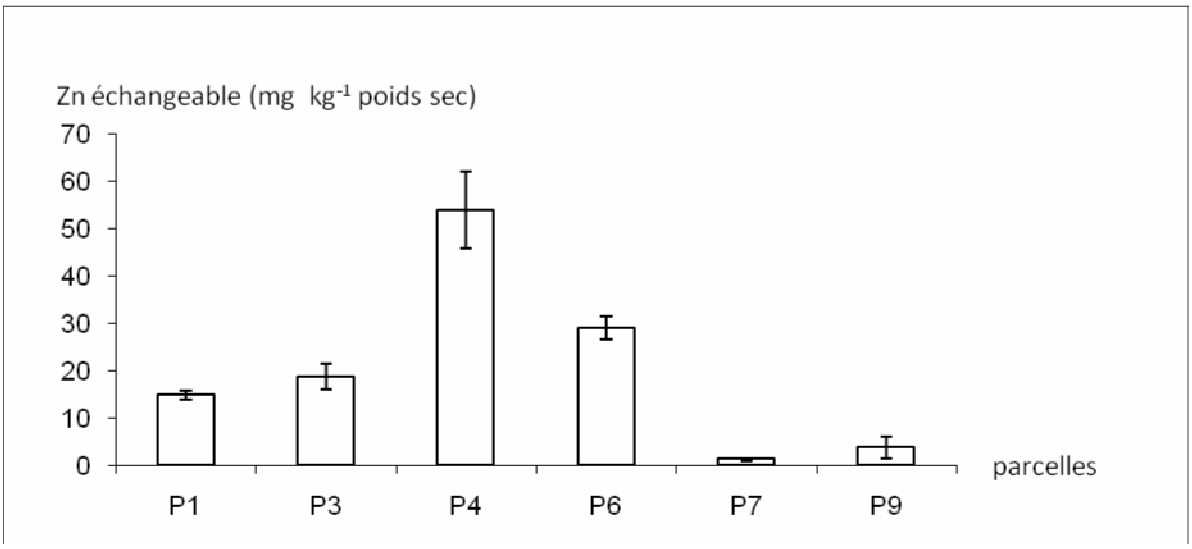


Figure 5 – Fraction échangeable de zinc (moyenne ± écart type ; n=3) dans les échantillons de sédiments prélevés sous *C. epigejos* en fonction des parcelles.

3.3. - Suivi des microflores bactériennes totale et spécifique

Quelle que soit la parcelle étudiée, la taille de la population bactérienne totale est du même ordre que celle que l'on peut rencontrer dans un sol sain, de l'ordre de 10^7-10^8 Unités Formant des Colonies/g de sédiment sec. Ceci indique une bonne activité biologique au sein de toutes les parcelles.

Quel que soit le traitement, un faible nombre de bactéries sulfato-réductrices (10^1-10^2 bactéries/g de sédiment sec) a été détecté. La faible représentativité de cette microflore peut s'expliquer par le fait que les prélèvements ont été réalisés sur les 20 premiers centimètres (en aérobiose), et que ces conditions sont défavorables au développement de cette microflore anaérobie stricte.

Parmi les microflores sulfo-oxydantes recherchées, les bactéries neutrophiles sont majoritaires (10^5-10^6 bactéries/g de sédiment sec) quelle que soit la parcelle étudiée. Ces résultats sont en accord avec les valeurs de pH du sédiment proches de la neutralité. En revanche, les bactéries intermédiaires et acidophiles sont moins représentées, de l'ordre de 10^3-10^4 bactéries / g de sédiment sec. Les résultats semblent également montrer que les amendements téestés n'influent pas sur la taille de ces populations sulfo-oxydantes.

La persistence d'un stock de bactéries sulfo-oxydantes et sulfato-réductrices montrent qu'il existe toujours un potentiel de libération et d'immobilisation des ETM, qui reste toutefois sous la dépendance des conditions environnementales.

4. DISCUSSION

Sur l'ensemble des parcelles, les plantes initialement semées, *F. rubra* et *D.cespitosa*, laissent progressivement place à d'autres espèces végétales. Les parcelles sont ainsi colonisées par un mélange d'espèces pérennes et annuelles [2].

Les résultats obtenus en 2008 montrent que l'amendement le plus efficace pour réduire la fraction biodisponible du Zn et du Cd est l'amendement sidérurgique. En effet, les concentrations moyennes en Zn et en Cd mesurées dans les extraits au nitrate de calcium sont plus faibles que celles mesurées en présence d'hydroxylapatite et beaucoup plus faibles que celles mesurées sur les parcelles non amendées. Cet effet significatif de l'amendement sidérurgique semble indépendant de l'espèce végétale. L'amendement sidérurgique est cependant sélectif vis-à-vis des métaux : il n'est pas l'amendement le plus efficace pour réduire la fraction biodisponible du Cu.

En 2008, sur la base des concentrations en éléments traces dans les parties aériennes, l'espèce la mieux adaptée à la phytostabilisation est *Deschampsia cespitosa*. Il est difficile de classer les autres espèces car l'accumulation semble variable en fonction des individus d'une même espèce. Pour ces espèces, les concentrations les plus basses sont souvent relevées en présence d'amendement sidérurgique.

Depuis le début de l'expérience, une bonne activité biologique a été observée sur toutes les parcelles et la diversité végétale augmente régulièrement [3], [4]. Ceci confirme la restauration des fonctions du sol et l'enrichissement de la biodiversité qui sont deux objectifs importants de la phytostabilisation.

Il semble donc que la phytostabilisation du site soit un succès. Cependant, le suivi du dispositif est nécessaire pour estimer la pérennité du traitement. Il faut en effet vérifier sur le long terme que les plantes et les amendements poursuivent leur action stabilisatrice, que les nouvelles espèces végétales s'établissant sur le site soient des espèces non accumulatrices et que la fonctionnalité du sol perdure.

Références

1] Bert V, Girondelot B, Marseille F, Laboudigue A. 2003. Use of vegetation and amendment for re-vegetation and stabilisation of a metal-polluted dredged sediment deposit. Mesocosm experiments and field trial. ICOBTE 2003, 7th International Conference on the Biogeochemistry of Trace Elements, 15-19 juin 2003, Uppsala, Suède

[2] Bert V, Lors C, Laboudigue A, Tack K, Damidot D, Bureau J. 2008. Use of phytostabilisation to remediate metal polluted dredged sediment. P275-279. Proceedings of the international symposium on sediment management (I2SM). 9-11 July, Lille, France.

[3] Bert V, L. Caron, C.L. Lors, A. Biaz, J.F. Ponge, M. Dazy and J.F. Masfaraud. Is Phytostabilization a sustainable technology for metal contaminated sediment. Proc. 9th Intern. Conf. on the Biogeochem. of Trace Elements. Pékin 2007, SP3 Plant-based technologies to remediate contaminated soils and sediments: processes, bioavailability, sustainability, consequences for ecosystems and human health. p155. ISBN 978-7-302-15627-7.

[4] Lacherez S. Phytostabilisation de sédiments contaminés par les métaux : pérennité du traitement. Rapport de stage master pro diagnostic des pollutions et bioremédiation, USTL (2008).

Remerciements

Ce projet est un projet du GIS 3SP, il est supporté par l'ADEME, INTERREG (projet GEDSET) et l'Union Européenne.