



**HAL**  
open science

## Essais à grande échelle de phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse en bois énergie

Valérie Bert, Battle Karimi, Mohamad Assad, Damien Blaudez, Olivier Girardclos, Pierre Boucard, Cécile Raventos, Sébastien Roy, Arnaud Papin,  
Michel Chalot

### ► To cite this version:

Valérie Bert, Battle Karimi, Mohamad Assad, Damien Blaudez, Olivier Girardclos, et al.. Essais à grande échelle de phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse en bois énergie. 3. Rencontres nationales de la recherche sur les sites et sols pollués, Nov 2014, Paris, France. ineris-01862483

**HAL Id: ineris-01862483**

**<https://ineris.hal.science/ineris-01862483>**

Submitted on 27 Aug 2018

**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.

# Essais à grande échelle de phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse en bois énergie

Valérie BERT<sup>1</sup>, Battle KARIMI<sup>2</sup>, Mohamad ASSAD<sup>2</sup>, Damien Blaudez<sup>3</sup>, Olivier GIRARDCLOS<sup>2</sup>, Pierre BOUCARD<sup>4</sup>, Cécile RAVENTOS<sup>5</sup>, Sébastien Roy<sup>6</sup>, Arnaud PAPIN<sup>7</sup>, Michel CHALOT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : Unité Technologies et Procédés Propres et Durables, DRC/RISK, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr)

<sup>2</sup> : Laboratoire Chrono-environnement, UMR 6249, Université de Franche-Comté, Pôle Universitaire du Pays de Montbéliard, 4 place Tharradin, BP 71427, 25 211 MONTBELIARD, [battle.karimi@univ-fcomte.fr](mailto:battle.karimi@univ-fcomte.fr); [michel.chalot@univ-fcomte.fr](mailto:michel.chalot@univ-fcomte.fr); [olivier.girardclos@univ-fcomte.fr](mailto:olivier.girardclos@univ-fcomte.fr); [mohamadkassad@yahoo.fr](mailto:mohamadkassad@yahoo.fr)

<sup>3</sup> : Laboratoire Interdisciplinaire des Environnements Continentaux, UMR 7360 CNRS-Université de Lorraine, Faculté des Sciences et Technologies, Bld des Aiguillettes, BP 70239, 54506 Vandoeuvre-les-Nancy, [Damien.Blaudez@univ-lorraine.fr](mailto:Damien.Blaudez@univ-lorraine.fr)

<sup>4</sup> : Unité Economie et Décision pour l'Environnement, DRC/RISK, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [pierre.boucard@ineris.fr](mailto:pierre.boucard@ineris.fr)

<sup>5</sup> : Unité Sources et Emissions, DRC/CARA, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [cecile.raventos@ineris.fr](mailto:cecile.raventos@ineris.fr)

<sup>6</sup> : Laboratoire de biotechnologies, AGRONUTRITION, 436 rue Pierre et Marie CURIE, 31670 LABEGE, [s.roy@agro-nutrition.fr](mailto:s.roy@agro-nutrition.fr)

<sup>7</sup> : Unité Ressources Analytiques, DRC/CARA, INERIS, Parc Technologique Alata, BP2, 60550 Verneuil en Halatte, [arnaud.papin@ineris.fr](mailto:arnaud.papin@ineris.fr)

## Résumé

Les projets PHYTOSED échelle 1 et BIOFILTEREE ont comme objectifs de démontrer la pertinence de la phytostabilisation aidée couplée à la valorisation de la biomasse en bois-énergie. A grande échelle, sur plusieurs hectares de terres polluées par les éléments traces, la technique de phytostabilisation aidée a été mise en œuvre en testant des protocoles différents (ex : amendement chimique dans le cas de PHYTOSED Echelle 1 et amendement biologique dans le cas de BIOFILTEREE). Le retour d'expérience a permis de valider l'utilisation d'espèces végétales pertinentes pour la phytostabilisation (ex : canche cespiteuse, peupliers SKADO) et de définir des protocoles pour la mise en œuvre de cette technique en fonction des caractéristiques des sols pollués. Les résultats issus de la première année de suivi ne mettent pas en évidence d'effet significatif des amendements sur la diminution des transferts de Zn et de Cd dans les feuilles des espèces végétales étudiées (canche, saules, peupliers). En revanche, l'inoculation de peupliers SKADO a un effet positif sur le rendement en biomasse de ces arbres. La poursuite de l'analyse des transferts de polluants vers les parties récoltables des végétaux devrait permettre de vérifier l'effet des amendements sur ce paramètre et d'orienter les végétaux vers une filière de valorisation pertinente.

## Introduction

La phytostabilisation aidée est une technique in situ de stabilisation basée sur l'utilisation combinée de plantes et d'amendements. Ce n'est pas une technique de dépollution mais un mode de gestion des sites et sols pollués destiné à stabiliser les polluants potentiellement toxiques afin de réduire les transferts de ces polluants et ainsi limiter l'exposition des organismes vivants présents sur le site. En plus de diminuer l'impact de la pollution sur le site lui-même et les écosystèmes adjacents, l'utilisation conjointe de la technique de phytostabilisation aidée et de la valorisation dans des filières existantes de la biomasse végétale produite peut constituer, dans certains cas, une valorisation économique de l'espace immobilisé, et une solution alternative pertinente aux modes de gestions actuels des sites et sols pollués.

Les projets PHYTOSED échelle 1 (2011-2014) et BIOFILTEREE (2011-2014) ont comme objectifs de démontrer la pertinence de la phytostabilisation aidée couplée à la valorisation de la biomasse en bois-énergie. A grande échelle, sur plusieurs hectares de terres polluées par les éléments traces, il s'est agit de mettre en œuvre la technique de phytostabilisation aidée en testant des protocoles différents (ex : amendement chimique dans le cas de PHYTOSED Echelle 1 et amendement biologique dans le cas de BIOFILTEREE) et de suivre l'efficacité de la technique mise en œuvre, via notamment l'étude de la couverture végétale et des transferts, jusqu'à l'évaluation des possibilités de valorisation de la biomasse produite dans des filières existantes (combustion) et en émergence (torréfaction, pyrolyse, gazéification).

## Matériels et Méthodes

Le projet PHYTOSED échelle 1 est réalisé sur 1 ha d'un ancien terrain de dépôt de sédiments pollués en éléments traces situé à Fresnes sur Escault (Nord Pas de Calais, 59). En septembre 2011, un amendement alcalin, utilisé en agriculture, a été épandu à une dose de  $9 \text{ t ha}^{-1}$  sur 25 cm de profondeur à l'aide d'engins agricoles. Une variété commerciale de canche (*Deschampsia cespitosa*) a été semée à forte densité ( $40 \text{ g m}^{-2}$ ) pour éviter l'envol de poussières durant l'automne et l'hiver et pour constituer une couverture végétale pérenne. En mars 2012, la canche a été remplacée par une bâche horticole aux endroits où des saules allaient être plantés. Des plançons de 2 clones de saule ('Inger' et 'Tordis'), sans racine et de 2 m environ, ont été plantés manuellement à une densité de 12 000 arbres à l'hectare, dont 6000 'Inger' et 6000 'Tordis', en suivant le schéma de plantation classique d'un taillis à très courte rotation (TTCR) (Figure 1a). Le choix des clones de saule s'est effectué sur la base des informations scientifiques disponibles au moment du démarrage du projet et de leur disponibilité commerciale. Deux opérations d'entretien du dispositif ont été nécessaires la première année. Sur le même terrain de dépôt de sédiments, un autre hectare a été utilisé dans le cadre du projet BIOFILTREE. En avril 2011, des plançons de peupliers, sans racine et de 2 m environ, ont été plantés mécaniquement à environ 60 cm de profondeur. Deux clones de peupliers ont été retenus pour ce projet ('I214' et 'SKADO'), choisis parmi 14 clones préalablement testés sur un sol agricole pollué par les éléments traces ; ce sont les clones qui accumulaient le moins de Zn et de Cd [1]. Au total, 1536 peupliers ont été plantés, dont une moitié était des I214 et l'autre moitié des SKADO. Les peupliers ont été protégés des herbivores par des filets grillagés de 60 cm de haut. Un entretien est réalisé une fois par an. L'inoculation a été réalisée manuellement en badigeonnant le pied des plançons. L'inoculum utilisé est un mélange de mycorhizes commercialement disponible et habituellement utilisé par les pépiniéristes et les maraîchers pour augmenter le rendement en biomasse des plantes et des légumes (Figure 1b). Sur un autre hectare de terre agricole polluée par les éléments traces, situé à Pierrelaye (Ile de France, 95), le même dispositif a été mis en place en février 2011. Cette terre a été polluée par l'épandage régulier d'eaux usées non traitées.

Sur ces trois sites, les concentrations totales et biodisponibles d'éléments traces ont été mesurées ainsi que les paramètres permettant l'évaluation de la structure des sols et de leur fertilité. L'évaluation de la performance de la phytostabilisation aidée s'est effectuée par la mesure du couvert végétal, des transferts des éléments traces dans la végétation et de la mobilité dans les sols.

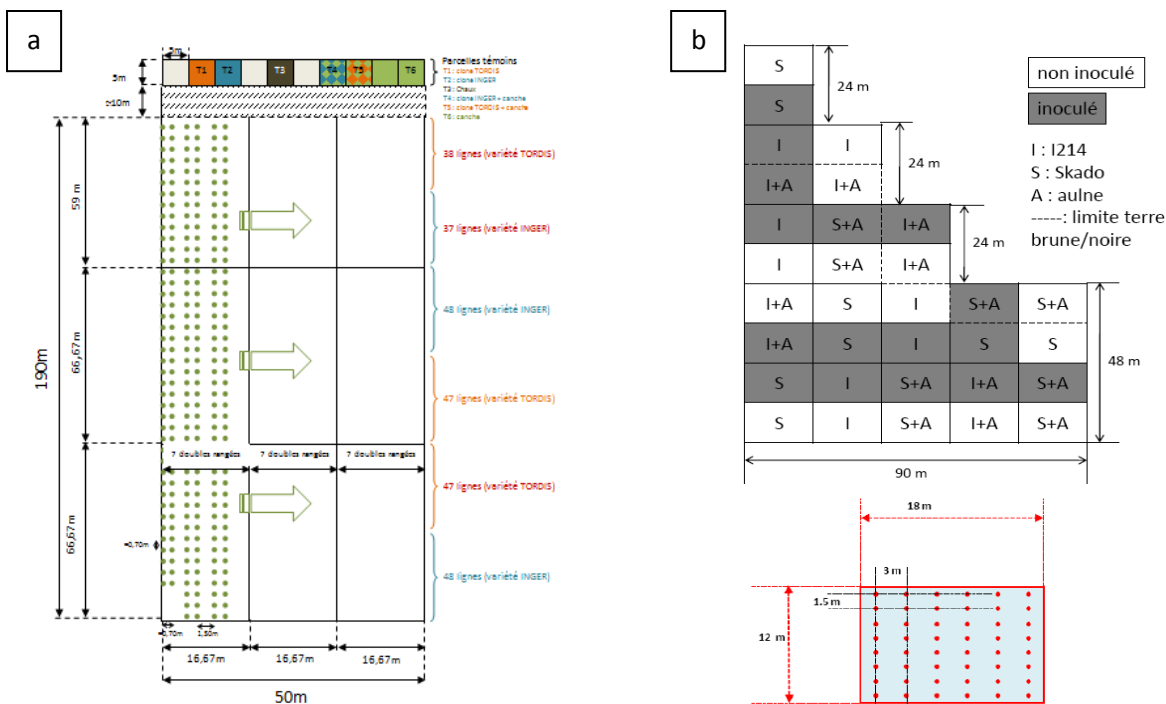
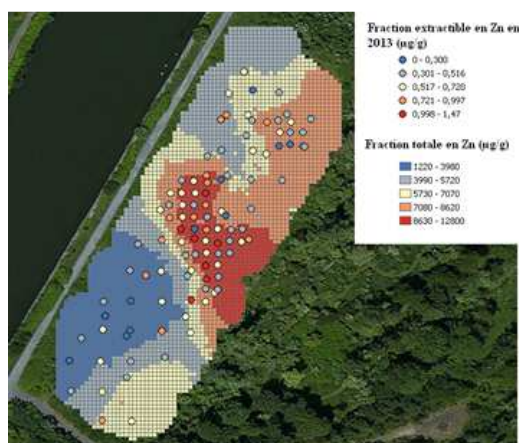


Figure 1. Dispositifs expérimentaux des projets PHYTOSED Echelle 1 (a) et Biofiltree (b).

## Résultats et Discussion

La mesure des concentrations totales et biodisponibles (mesurées par extraction sélective au  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  0,01M) en éléments traces du sédiment dans le cadre du projet PHYTOSED Echelle 1 a mis en évidence une hétérogénéité spatiale de la pollution (Figure 2). Les concentrations totales en Cd varient de 6 à 18 mg

kg<sup>-1</sup> tandis que les concentrations en Zn varient de 1200 à 13000 mg kg<sup>-1</sup>. De plus, les concentrations totales et biodisponibles ne sont pas corrélées ( $p > 0.05$  pour tous les éléments traces mesurés). La prise en compte de l'hétérogénéité de la pollution a déterminé le schéma de plantation des saules ainsi que les échantillonnages de sédiments et de végétation.



**Figure 2. Cartographie des concentrations totales et biodisponibles en Zn pour le projet PHYTOSED Echelle 1.**

Quelques semaines après la fin de la plantation des saules, qui correspond à la fin des travaux de mise en place du dispositif expérimental de PHYTOSED Echelle 1, la canche couvrait déjà pratiquement toute la surface du site. Après une année de suivi, la canche confirme ses caractéristiques de plante stabilisatrice en couvrant 100 % du sédiment et en présentant des concentrations en polluants métalliques faibles (Zn : 430 mg kg<sup>-1</sup> ; Cd : entre 0,5 et 0,8 mg kg<sup>-1</sup>) bien que supérieures aux concentrations physiologiques habituellement mesurées chez les graminées se développant sur sols non pollués (Zn < 100 mg kg<sup>-1</sup> ; Cd < 0,5 mg kg<sup>-1</sup>).

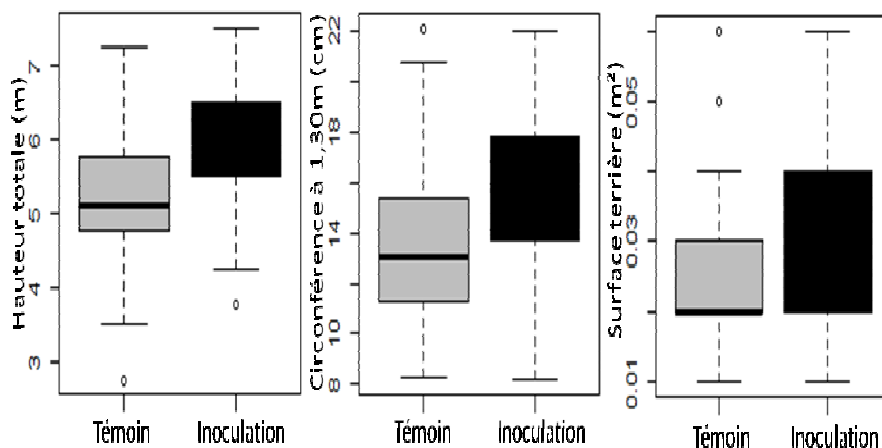
L'amendement alcalin utilisé dans PHYTOSED Echelle 1 est un produit commercialisé habituellement utilisé en agriculture pour augmenter le pH des sols. Dans le projet, l'amendement a été mélangé au sédiment pollué dont le pH était neutre. L'effet attendu de l'amendement est, dans ce cas, la diminution du transfert du Zn et du Cd dans les parties récoltables des végétaux (canche et saules) et la diminution du pool labile de métaux via l'augmentation de pH (effet court terme) et la mise en place de réactions chimiques de substitution et de précipitation (effet long terme) [2]. La dose d'amendement épandu a été choisie en tenant compte du pH optimal pour le développement des saules, qui ne devait pas excéder 8. Comme attendu, après une année de suivi le pH était en moyenne de 8,05 et ne dépassait pas 8,25. Le pH initial était de 7,25 ce qui suggère que l'effet court terme a bien eu lieu. Le taux de survie des saules était de 89,2 % et 93,5%, que l'on peut mettre en regard du taux de survie habituellement mesuré pour un TTCR (entre 95 et 97,6% en fonction des études). Malgré l'augmentation de pH et à ce stade du projet, aucun effet de l'amendement sur la mobilité des éléments traces dans le sédiment ni sur les concentrations dans les parties récoltables des plantes n'a été mis en évidence.

Concernant le projet BIOFILTREE, l'analyse des concentrations totales et biodisponibles, par les mêmes méthodes que pour PHYTOSED Echelle 1, a révélé un gradient de pollution en éléments traces pour le site sur sédiment (Fresnes sur Escault) et une hétérogénéité spatiale de la pollution pour le site sur terre agricole (Pierrelaye). Les concentrations totales sur Fresnes sur Escault varient, pour le Zn, de 79 à 2710 mg kg<sup>-1</sup> et, pour le Cd, de 2,0 à 67,1 mg kg<sup>-1</sup>. Les concentrations totales sur Pierrelaye varient, pour le Zn, de 218 à 689 mg kg<sup>-1</sup> et, pour le Cd, de 2,0 à 6,1 mg kg<sup>-1</sup>.

Dans ce projet, l'effet attendu de l'inoculum mycorhizien est, d'une part, la séquestration des éléments traces, et en particulier du Zn et du Cd, au niveau racinaire et donc une limitation du transfert de ces éléments dans les parties récoltables des peupliers et d'autre part, l'augmentation du rendement en biomasse des peupliers. A ce stade du projet, soit après une année de suivi, les résultats sur le site de Fresnes sur Escault ne mettent pas en évidence d'effet de l'inoculum sur la limitation du transfert des éléments traces vers les feuilles des peupliers. A l'exception des données sur la biomasse, les résultats pour Pierrelaye ne sont pas encore connus au moment de l'écriture de ce résumé.

Concernant la biomasse végétale, les résultats montrent que les deux clones de peupliers ont un comportement différent qui se vérifie sur les deux sites, le SKADO étant plus robuste que le I214 et ayant tendance à produire plus de biomasse. A Pierrelaye, alors que le SKADO ne subit pas de mortalité particulière, le I214 est en revanche sensible aux conditions du milieu, sensibilité réduite en présence de l'inoculum mycorhizien (pv=0.006). Des analyses plus détaillées sur le SKADO montrent que les variables dendrométriques telles que la hauteur totale de l'arbre, la circonférence à 1 m 30, la surface terrière

répondent favorablement à l'ajout d'un inoculum lors de la plantation de l'arbre ( $p < 0.005$  pour les 3 variables, Figure 3).



**Figure 3. Evolution des variables dendrométriques chez le SKADO en présence d'un inoculum mycorhizien sur le site de Pierrelaye, après deux années de croissance.**

### Conclusions et perspectives

La mise en place de la phytostabilisation aidée à grande échelle dans des conditions de sols et avec des modalités différentes a été réalisée avec succès dans le cadre des projets PHYTOSED Echelle 1 et BIOFILTREE. Elle s'est appuyée sur les compétences de professionnels du milieu agricole, des espaces verts et de la filière bois-énergie. Le retour d'expérience a permis de valider l'utilisation d'espèces végétales pertinentes pour la phytostabilisation (ex : canche cespiteuse, peupliers SKADO) et de définir des protocoles pour la mise en œuvre de cette technique en fonction des situations de sol pollué (ex : hétérogénéité de la pollution). Les résultats issus de la première année de suivie pour le site de Fresnes sur Escault ne mettent pas en évidence d'effet significatif des amendements sur la diminution des transferts de Zn et de Cd dans les feuilles des espèces végétales étudiées (canche, saules, peupliers). En revanche, l'inoculation de peupliers SKADO sur Pierrelaye a un effet positif sur le rendement en biomasse de ces arbres. La poursuite de l'analyse des transferts de polluants vers les parties récoltables des végétaux devrait permettre de vérifier l'effet des amendements sur ce paramètre et d'orienter les végétaux vers une filière de valorisation pertinente. Des essais de torréfaction, de pyrolyse et de gazéification sont en cours sur les peupliers SKADO afin d'évaluer l'influence éventuelle des métaux contenus dans la biomasse sur les émissions de ces procédés.

L'utilisation de la phytostabilisation aidée conjointement avec la valorisation de la biomasse produite sur certains sites pollués comme mode de gestion de ces sites, vise au renforcement de la mise en sécurité du site car les voies de transfert seront contrôlées et de dégager une plus value sociale et économique via le développement de débouchés déjà existants, que sont les filières non alimentaires.

### Références

- [1] Lacercat-Didier, L. ( 2013). Filtration biologique pour la réduction des éléments traces métalliques dans la biomasse du peuplier. Thèse, Université de Lorraine, pp151.
- [2] Bert, V., Lors, Ch., Ponge, J., F., Caron, L., Biaz, A., Dazy, M., Masfaraud, J., F. ( 2012). Metal immobilization and soil amendment efficiency at a contaminated sediment landfill site : a field study focusing on plants, springtails, and bacteria. *Environmental Pollution*, 169, 1-11.

### Remerciements

Les projets BIOFILTREE et PHYTOSED Echelle 1 sont soutenus respectivement par l'ANR, VNF et l'ADEME et, VNF et l'ADEME.