



**HAL**  
open science

## Gestion par la nature d'un sédiment excavé contaminé

Valérie Bert, Claire Alary

► **To cite this version:**

Valérie Bert, Claire Alary. Gestion par la nature d'un sédiment excavé contaminé. 5ème Rencontres Nationales de la Recherche sur les sites et sols pollués, Feb 2025, Paris, France. <ineris-05306598>

**HAL Id: ineris-05306598**

**<https://ineris.hal.science/ineris-05306598v1>**

Submitted on 9 Oct 2025

**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.



HAL Authorization

# Gestion par la nature d'un sédiment excavé contaminé

## Renaturation par phytostabilisation aidée : un Rex de 20 ans

**Valérie BERT<sup>1</sup>, Claire ALARY<sup>2,3</sup>**

1 : Unité Impact Sanitaire et Expositions (ISAE), Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris), Parc Technologique Alata, 60550 Verneuil en Halatte, valerie.bert@ineris.fr

2 : IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom, Centre for Materials and Processes, 59000 Lille ;

3 : Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 - LGCgE – Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, 59000 Lille, claire.alary@imt-nord-europe.fr

\* contact : valerie.bert@ineris.fr

### Résumé

Dans un contexte de gestion de site pollué par phytostabilisation aidée et dans une logique d'évaluation des expositions et des risques, plusieurs projets se sont succédés pendant 20 ans sur un même site expérimental où 9 modalités ont été testées afin d'étudier l'évolution de l'écosystème mis en place en termes de biodiversité et la réduction attendue des transferts de polluants métalliques (Cd, Zn, Pb et Cu et As) du sédiment excavé vers les plantes. Initialement, ce dispositif a été réalisé avec deux modalités d'amendements (hydroxylapatite et amendement sidérurgique) et deux espèces végétales de la famille des Poacées (*Deschampsia cespitosa* et *Festuca rubra*). Par la suite, ce dispositif n'a pas été modifié et a évolué naturellement vers un écosystème naturel composé d'autres espèces végétales. De très nombreuses espèces ont pu coloniser le néosol, la présence de la pollution n'ayant pas limité le processus de succession végétale qui a conduit en 20 ans au stade climacique forestier sur certaines des modalités étudiées. Sur d'autres parcelles ce processus est en cours ou est limité par des facteurs qui ont modifié l'évolution normale du processus comme l'ensemencement initial d'espèces vivaces, l'ombrage ou le pH du néosol. Un recouvrement végétal qui permet de limiter les transferts aériens de particules de sol pollué ainsi que les transferts verticaux de polluants par lixiviation a été obtenu sur les parcelles non boisées. L'amendement sidérurgique a diminué les concentrations aériennes en polluants métalliques, notamment en Cd, dans la plupart des espèces qui se sont succédées sur le néosol ainsi que leur disponibilité dans le néosol mesurée par extraction chimique. Vingt ans après le dépôt, le néosol présente toujours des phases de sulfures métalliques ce qui suggère qu'une partie du pool métallique est mobilisable. C'est le cas en particulier du Cd associé majoritairement à la fraction échangeable. Toutefois, les amendements continuent à jouer un rôle dans l'immobilisation du Pb dans les phases les plus réfractaires de la matrice minérale, et dans une moindre mesure du Zn et du Cd ; une diminution de 15 à 20% de la fraction échangeable du Zn et du Cd est en effet constatée en présence des amendements, essentiellement l'amendement sidérurgique pour le Cd. La phytostabilisation aidée avec l'hydroxyapatite et l'amendement sidérurgique semble pérenne et efficace sur au moins deux décennies.

### Introduction

La phytostabilisation aidée est une solution basée sur la nature qui a pour objectif de diminuer la mobilité des métaux et métalloïdes et de réduire l'entrée excessive de ces éléments dans les plantes et, par voie de conséquence, l'exposition du reste du réseau trophique. Pour répondre à cet objectif, des plantes et des amendements, spécifiques à chaque site, sont utilisés en synergie pour modifier la spéciation des éléments traces et leur mobilité. Ainsi, l'utilisation de la phytostabilisation aidée peut constituer sur certains sites anciens (non confinés) de dépôt de sédiment pollués, une solution de gestion alternative pertinente, temporaire ou définitive, qui peut permettre le

renforcement de la mise en sécurité du site, les voies de transfert étant contrôlées. Sur un même site expérimental mimant un sédiment excavé pollué par les éléments métalliques, plusieurs projets se sont succédés avec pour objectifs l'étude de la dynamique végétale en lien avec des modalités de phytostabilisation aidée mise en œuvre lors de la mise en place du dispositif (figure 1) ainsi que l'étude des transferts en éléments métalliques sédiment-plantes via le suivi des concentrations en éléments métalliques dans les parties aériennes des espèces végétales et de la mobilité des éléments métalliques du sédiment dont l'As. La bioaccessibilité orale du Cd à partir de l'ortie présente sur le dispositif a fait l'objet d'un focus.

## Matériel et méthodes

La mise en place de l'essai a débuté en mai 2002. Trois parcelles de 60 m<sup>2</sup> et de 40 cm de profondeur ont été réalisées sur un terrain agricole privé à Lallaing (région des Hauts de France). Ces parcelles ont été remplies avec du sédiment de dragage issu du canal de la Scarpe. Ce sédiment était contaminé en Zn (3000ppm), Cd (100ppm), Cu (100ppm) et Pb (400ppm) du fait du passé industriel de la région. Deux parcelles ont été utilisées pour estimer l'effet d'amendements du sol. L'amendement sidérurgique et l'hydroxylapatite, tous deux sous forme de poudres, ont été incorporés dans le sédiment à hauteur de 5% poids sec pour l'amendement sidérurgique et 3% poids sec pour l'hydroxylapatite. L'amendement sidérurgique a été obtenu via la société Cedest (Macon) (qui n'existe plus) et l'hydroxylapatite via la société Brenntag (Mülheim/Ruhr, Allemagne). La pureté de l'hydroxylapatite était de 99 %. L'amendement sidérurgique contenait 37,8 % de CaO et 1,9 % de MgO, ainsi que du SiO<sub>2</sub>, AlO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub> et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, chacun de ces éléments étant présent à moins de 2 %. Les amendements n'apportaient pas d'éléments traces (Cd, Pb, Zn, Cu) en concentrations notables par rapport aux concentrations de ces éléments mesurés dans le sédiment. L'amendement sidérurgique présentait une concentration en Cr de 819 mg kg<sup>-1</sup>. La 3ème parcelle n'a pas reçu d'apport d'amendement. Après l'apport d'amendement, le sédiment des parcelles traitées et non traitées a été homogénéisé mécaniquement avec une pelle mécanique pendant 2 heures. Le sédiment a ensuite séché pendant 2 mois pour permettre le semis des espèces sélectionnées. Les 3 parcelles ont été subdivisées en 9 parcelles de 20 m<sup>2</sup> chacune, de façon à obtenir 3 parcelles sans amendement, 3 parcelles amendées avec l'hydroxylapatite et 3 parcelles amendées avec l'amendement sidérurgique. Six des parcelles ont ensuite été semées avec des poacées (canche cespiteuse [*Deschampsia cespitosa* variété Caline ; *Festuca rubra* variété Marker] obtenues auprès de la société Carneau (Orchies) (Figure 1). Par la suite, aucune gestion de la végétation n'a été réalisée sur les 20 années de suivi du projet ce qui a conduit à l'expression progressive de la banque de graine du sédiment et à la colonisation par les espèces avoignant le site expérimental.

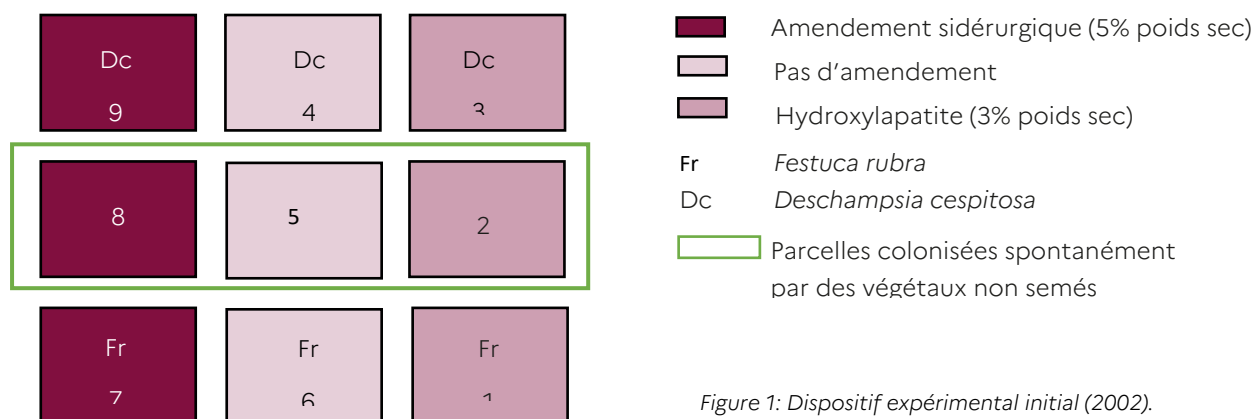


Figure 1: Dispositif expérimental initial (2002).

Les mesures suivantes ont été réalisées :

- Un inventaire floristique régulier sur toutes les parcelles pour évaluer le suivi de la dynamique végétale (recouvrement des parcelles, indices d'abondance-dominance, sociabilité) ainsi que des indices de diversité.
- La mesure des concentrations en éléments métalliques dans les parties aériennes des espèces végétales dominantes au cours des 20 années du suivi
- Le suivi de la mobilité des éléments métalliques dans le sol par extraction chimique unique (Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 0,01M)
- La distribution des éléments métalliques sur les phases porteuses du sol par extraction chimique séquentielle
- L'analyse agro-physico-chimique du sol
- L'analyse de la bioaccessibilité orale des éléments métalliques dans des espèces végétales comestibles.

## Résultats et discussion

Sans gestion particulière des parcelles, l'étude a montré que les espèces sélectionnées pour leur aptitude à la phytostabilisation (canche cespiteuse, fétuque rouge) ont régressé avec le temps jusqu'à disparaître des parcelles où elles avaient été initialement semées. Ce processus qui s'est étalé sur 17 ans est dû à la moindre compétition de ces espèces vis-à-vis d'espèces colonisatrices issues de la banque de graines du sédiment et des alentours qui se sont, de manière concomitante, installées sur les parcelles. Ce résultat indique que la conservation d'espèces sélectionnées pour la phytostabilisation nécessite des pratiques de gestion pour endiguer la dynamique de colonisation naturelle.

Un des objectifs du suivi était d'étudier la dynamique végétale. Les résultats ont mis en évidence que de très nombreuses espèces ont pu coloniser le sédiment excavé pollué ce qui démontre leur tolérance et leur adaptabilité aux conditions du néosol et de sa pollution en Eléments métalliques. La présence de la pollution n'a pas limité le processus de succession végétale qui a conduit en une vingtaine d'année au stade climacique forestier sur certaines des parcelles. Sur d'autres parcelles ce processus est en cours ou est limité non pas par la pollution mais par des facteurs qui ont modifié l'évolution normale du processus tels que l'ensemencement d'espèces vivaces, l'ombrage ou le pH du sédiment.

Le recouvrement végétal permet de limiter les transferts aériens de particules de sol pollué ainsi que les transferts verticaux de polluants par lixiviation ; il est donc essentiel dans une stratégie de phytostabilisation de conserver une couverture végétale au sol la plus importante possible (figure 2). Comme le stade climacique forestier ne permet pas ce recouvrement, la pérennité de la couverture végétale ne peut être conservée qu'aux niveaux des stades herbacé et arbustif, ce qui nécessite des mesures de gestion pour conserver ces stades. Il a été montré que les herbacées vivaces du type poacées sont des candidates pertinentes pour cela. Les arbustes ou les arbres plantés en faible densité sur un site, de façon à laisser passer la lumière au sol peut permettre d'obtenir un couvert végétal maximal et une diversité importante. Dans ce cas, quelques points de vigilance sont à garder en tête : de nombreux arbres et arbustes perdent leurs feuilles à l'automne ce qui peut entraîner la dispersion de la pollution dans les milieux environnants ; lors de la décomposition des feuilles sur le sol, une remobilisation potentielle des polluants métalliques pourrait se produire au niveau du sol de surface, suite à un changement de spéciation.

Les végétaux ayant moins d'activité d'évapotranspiration pendant la période automnale et hivernale, l'utilisation d'un amendement en synergie avec les plantes pour limiter toute l'année les transferts de polluants métalliques par ruissellement et lixiviation paraît pertinente. L'objectif d'EVALPHYTO était d'étudier la pérennité et l'efficacité de deux amendements chimiques de composition différente en regardant en fonction du temps la réduction de la mobilité des polluants métalliques dans le néosol et des concentrations des polluants métalliques dans les parties aériennes d'un certain nombre espèces.

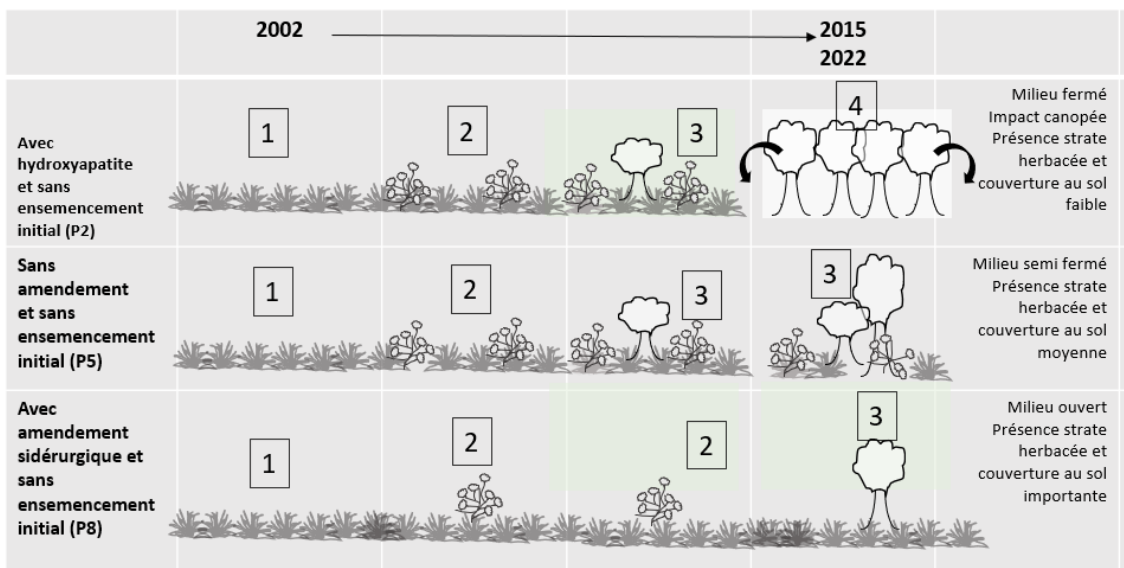


Figure 2: schématisation du processus de succession végétale observé sur les parcelles P2, P5 et P8 entre 2002 et 2022.

En 2018, les concentrations extractibles en Cu, en Cd, en Zn et en Pb du néosol représentaient 0,15%, 0,5%, 0,4% et 0,0025% de la concentration totale du Cu, Cd, Zn et Pb (100, 100, 3000, 400 mg/kg respectivement). Compte tenu de ces résultats, les éléments les plus mobiles sont le Cd et le Zn puis le Cu et dans une moindre mesure le Pb. En 2022, vingt ans après le dépôt, le sédiment pollué présente toujours des phases de sulfures métalliques. Il semble que ces dernières subissent toujours au cours du temps des processus d'oxydation entraînant une mobilisation des éléments Cd et Zn. Ainsi, 75% du Cd est très largement mobilisable car associée à la fraction échangeable. Toutefois, les amendements, continuent à jouer un rôle dans l'immobilisation du Pb dans les phases les plus réfractaires de la matrice minérale, et dans une moindre mesure du Zn et du Cd ; une diminution de 15 à 20% de la fraction échangeable du Zn, du Cd est en effet constatée en présence des amendements ; essentiellement l'amendement sidérurgique pour le Cd. Ainsi, les parcelles amendées en permettant une immobilisation forte du Pb et une limitation de la mobilité du Cd et du Zn participent donc au processus de phytostabilisation aidée. Ce résultat est à mettre en relation avec la limitation des concentrations en ces éléments dans les parties aériennes des plantes étudiées en lien avec le pH du néosol qui présente une alcalinité ce qui agit sur la réduction de la mobilité de ces éléments. Il semblerait donc que la phytostabilisation aidée avec l'hydroxyapatite et l'amendement sidérurgique soit pérenne et efficace sur au moins deux décennies.

On observe que la MO qui est très largement présente permet la rétention du Cu mais aussi, dans une moindre mesure, du Cd pour les horizons de surface. Cet aspect positif peut être toutefois contrebalancé par sa minéralisation qui conduit à une diminution du pH qui a contrario peut favoriser la mobilité du Cd et du Zn.

L'attention portée à l'As montre que cet élément est très peu mobile. Toutefois, une vigilance doit être apportée lors de la mise en œuvre de l'amendement sidérurgique dans les milieux fortement contaminés en cet élément, cet amendement favorisant sa mobilisation à hauteur de ~4%.

Une étude exploratoire de la bioaccessibilité orale du Cd, Pb et Zn à partir d'ortie a été conduite pendant ce projet. Ces résultats préliminaires montrent que la fraction totale d'éléments métalliques surestime l'exposition. En cas d'ingestion de l'ortie, seule une fraction du métal présent traverse les membranes biologiques des mammifères. L'amendement sidérurgique qui diminue les concentrations notamment en Cd dans l'ortie n'a pas d'effet réducteur sur la fraction bioaccessible. De plus, il ne semble pas y avoir de proportionnalité entre les concentrations totales dans la plante et la bioaccessibilité. Afin de confirmer ces résultats, d'autres essais de bioaccessibilité pourraient être réalisés sur d'autres espèces végétales ayant des concentrations en éléments métalliques variées.

## Conclusions et perspectives

Ce suivi sur 20 ans a permis d'acquies un retour d'expérience conséquent sur une stratégie de gestion des sites pollués par les éléments métalliques basée sur la phytostabilisation aidée. Ce mode de gestion permet de réduire l'exposition des compartiments environnementaux aux polluants en limitant les transferts horizontaux et verticaux de ces polluants. La végétation est un élément essentiel pour limiter l'envol de poussière et les transferts de polluants par ruissellement et lixiviation tandis que les amendements permettent de pallier la diminution de l'activité de la végétation à certaines périodes de l'année et de renforcer l'action de la végétation en limitant la mobilité et donc le transfert des polluants par lixiviation. Ces résultats obtenus sur un sédiment excavé fortement pollué par certains éléments métalliques (Cd, Zn, Pb, Cu) devenu un néosol peuvent être extrapolés aux sédiments excavés pollués anciens de VNF (gestion du passif) ainsi qu'aux friches polluées et aux terres agricoles polluées en reconversion pour des usages non alimentaires, dans des contextes de trame verte et bleue et de réhabilitation écologiques de sites (renaturation). En 2012, une étude menée sur 3 parcelles du dispositif a permis d'étudier l'écotoxicité du sédiment, la santé de plusieurs espèces végétales et la diversité et le régime alimentaire des collemboles dans le sédiment (Bert et al. 2012). Ces éléments seraient à compléter afin d'évaluer la santé du néosol et la santé de la végétation au cours de son évolution de façon à vérifier qu'une gestion par phytostabilisation aidée contribue, en plus des objectifs de réduction des expositions aux polluants, à améliorer les caractéristiques du néosol et sa fonctionnalité. Des outils tels que l'indice de préoccupation et la TRIADE et l'étude de la dégradation de la matière organique pourraient en partie répondre à ce questionnement.

## Références

ADEME. BERT Valérie, Ineris, ALARY Claire, IMT-Nord Europe. 2023. **Evaluation de l'efficacité et de la pérennité de la phytostabilisation aidée sur un sédiment excavé contaminé par les éléments traces (Projet EVALPHYTO). 59 pages.**

ADEME. Bert V et ALARY Cl. 2016. Projet PHYTOSED, efficacité et pérennité de la phytostabilisation aidée sur un sédiment excavé contaminé par les éléments traces – Rapport: p.56.

BERT V, LORS CH, PONGE JF, CARON L, BIAZ A, DAZY M, MASFARAUD JF. 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 auteurs remercient l'ADEME pour le financement des projets PHYTOSTAB, PHYTOSED et EVALPHYTO.