

# PHYTOSED 2 (ECHELLE 1)

## ETUDE DE L'EFFICACITE ET DE LA PERENNITE DE LA PHYTOSTABILISATION AIDEE COUPLEE A UNE VALORISATION BIOMASSE EN BOIS-ENERGIE

Développement d'outils pour le suivi et application *in situ* à l'échelle d'un site de dépôt de sédiment pollué par les éléments traces

Janvier 2016

N° de contrat ADEME : 1072C0044  
N° INERIS : DRC-16-119602-02666A

Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par : *Valérie BERT*, unité Technologies et Procédés Propres et Durables, INERIS, Parc Technologique Alata, BP 2, 60 550 Verneuil en Halatte ([valerie.bert@ineris.fr](mailto:valerie.bert@ineris.fr))

**Coordination technique ADEME :** *Frédérique CADIÈRE* – Direction \Service : *Direction villes et territoires durables (DVTD) - Service friches urbaines et sites pollués (SFUSP)*



---

**SYNTHESE DE RECHERCHE**

## REMERCIEMENTS

Membres du comité de pilotage :

Jérémie Somon, Catherine Thomas, Marion Delplanque (VNF)  
Frédérique Cadière, Amandine Uhmman (ADEME)  
Michel Chalot (Université de Franche-Comté)  
François Ponchon, Jean-Paul Van Meyel (Carmeuse Chaux)  
Michel Mench (Université Bordeaux I-INRA Biogeco)  
S Guimont (Valterra dépollution / réhabilitation)

## CITATION DE CETTE SYNTHÈSE

**ADEME. Bert V. 2016. Projet PHYTOSED 2 (Echelle 1), étude de l'efficacité et de la pérennité de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse bois-énergie – Synthèse: 11p.**  
Cet ouvrage est disponible en ligne [www.ademe.fr](http://www.ademe.fr), rubrique Médiathèque

### En français:

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

### En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

## Table des matières

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| Résumé .....                         | 4 |
| 1. Contexte du projet .....          | 5 |
| 2. Objectifs du projet .....         | 5 |
| 3. Principaux résultats obtenus..... | 6 |
| 4. Recommandations .....             | 9 |
| 5. Conclusions / Perspectives.....   | 9 |

## Résumé

Dans le cadre de sa politique environnementale, Voies Navigables de France (VNF) privilégie les voies de valorisation des sédiments de dragage des cours d'eau. Cependant, pour les sédiments du Nord-Pas-de-Calais (NPDC), compte tenu de la charge en métaux et en hydrocarbures, la mise en dépôt est à l'heure actuelle la destination principale et demeure, en l'absence de filière industrielle pour le traitement et la valorisation des sédiments pollués, la solution principale, sûre et économique. L'utilisation de la phytostabilisation aidée conjointement avec la valorisation de la biomasse produite sur certains sites de dépôt de sédiment pollués comme mode de gestion de ces sites, pourrait permettre le renforcement de la mise en sécurité du site. En effet, les voies de transfert seraient contrôlées et cette gestion pourrait dégager une plus-value sociale et économique via le développement de débouchés déjà existants, que sont les filières non alimentaires. Dans ce contexte, le projet **Phytosed 2 (Echelle 1)**, d'une durée de 4 ans (2011-2014), a permis d'expérimenter en vraie grandeur la phytostabilisation aidée sur une surface d'un hectare sur un ancien terrain de dépôt de sédiments pollués, principalement par les éléments traces et d'acquérir des informations pratiques sur sa mise en œuvre. Après épandage d'un amendement minéral basique, le dispositif expérimental a été constitué d'une couverture herbacée de canche cespiteuse et de deux cultivars de saules (Tordis et Inger) plantées en taillis à très courte rotation (TTCR). La graminée (*Barcampsia cespitosa*) s'est montrée très pertinente. En effet, elle s'est développée très rapidement après le semis et depuis lors recouvre le sédiment à environ 95 % de sa surface de manière pérenne. Elle est très tolérante au Zn, Cd, Pb, Cu et ne transfère pas ces éléments dans ces parties aériennes. La canche en synergie avec des opérations de tonte a permis de diminuer la vigueur de la renouée du Japon, plante invasive dont le contrôle constituait un des objectifs du projet. Dans les conditions de l'étude, il n'a pas été possible de mettre en évidence l'effet de l'amendement minéral basique sur la diminution de la mobilité des éléments traces, en particulier du Zn et du Cd, et sur la diminution des concentrations foliaires de la canche et des saules, malgré l'augmentation de pH constatée après l'épandage qui semblait suggérer l'efficacité court terme de l'amendement. Dans ce projet, l'utilisation des deux cultivars de saules Tordis et Inger pour la partie valorisation du foncier via la valorisation de la biomasse ne semble pas pertinente pour la filière bois-énergie au regard du comportement accumulateur des saules envers les éléments Cd et Zn et de leur faible rendement en biomasse.

Dans le cadre du projet DEMOPHYTO (2014-2018) l'expérimentation est poursuivie. Les questions soulevées par le projet Phytosed 2 (Echelle 1) y sont en cours d'approfondissement.

## Abstract

*Human activities during the last decades have contaminated canal sediments with various organic and inorganic pollutants. In absence of industrial network to treat and to valorise polluted sediments, dredged materials from canals are disposed on landfill sites, this solution being currently considered as the most safe and economically viable. In the Nord-Pas-de-Calais region (France), which was affected by intensive industrial activities, Voies Navigables de France (VNF) is required to manage contaminated landfill sites where large volumes of polluted dredged sediments were deposited. In this context, the **Phytosed 2 (Echelle 1)** project which lasted 4 years (2011-2014), allowed to experiment aided phytostabilisation on 1 ha of a metal contaminated sediment landfill site and gain practical information on its deployment. On a first step, a basic mineral amendment was spread and mixed on the top surface sediment. The experimental design was then made up with the tufted hair-grass as a plant cover and two willow cultivars (Tordis and Inger) planted in a very short rotation coppice (VSRC). The perennial grass *Barcampsia cespitosa* was highly relevant as it quickly grew, quite totally covered the sediment, did not show toxicity signs and did not transfer trace elements in its aerial parts. In addition, it participated in the regression of the invasive species, *Fallopia japonica*, an invasive species of which the monitoring was one of the objectives of the project. In our sediment conditions, the mineral basic amendment did not give the expected effects, i.e. decrease of the metal mobility in the sediment and of the foliar metal concentrations in the plants, although the pH increase was significant. In our study, the use of Tordis and Inger willow clones for biomass production seemed not relevant due to their Zn and Cd accumulator behaviour and low biomass yield. The on-going DEMOPHYTO (2014-2018) project will allow to further the questions raised by Phytosed 2.*

## 1. Contexte du projet

Les quantités de sédiments qui se déposent dans les cours d'eau sont trop importantes pour retourner à leur origine par l'épandage sur les terres agricoles et le régalage le long des berges. De plus, l'absence de cadre réglementaire spécifique et la qualité des sédiments est un frein à la valorisation et la réutilisation des sédiments. Le dragage est nécessaire pour prévenir les inondations, faciliter la navigation, permettre les différents usages des voies d'eau, préserver le bon état écologique du milieu mais aussi pour réaliser le traitement de certains de ces sédiments qui peuvent présenter un risque pour l'environnement et la santé humaine. Selon leurs caractéristiques, plusieurs filières de gestion des sédiments à terre sont possibles : aménagements paysagers, renforcement de berges, comblement de carrières et de gravières, valorisation en technique routière, épandage agricole, le stockage en terrain de dépôt temporaire ou définitif. Pour les sédiments du Nord-Pas-de-Calais (NPDC), compte tenu de la charge en métaux et hydrocarbures, stockage en terrain de dépôt est à l'heure actuelle la destination principale. Il existe en NPDC près de 200 terrains de gestion de sédiments à terre.

Dans le cadre de sa politique de développement durable, Voies Navigables de France (VNF) privilégie les voies de valorisation. Aujourd'hui, les sédiments de curage sont souvent peu, voire non valorisables en raison des concentrations en polluants dangereux. Avant toute valorisation, les sédiments nécessitent des opérations de (pré)traitement, difficilement applicables aux sédiments pollués par les éléments traces. Bien que de nombreux projets de valorisation existent (matériaux de construction, etc.), ces voies de traitement et de valorisation ne sont qu'au stade pilote ; il n'existe pas aujourd'hui de filière industrielle pour le traitement et la valorisation des sédiments pollués capable d'absorber l'ensemble du gisement disponible. En conséquence, le stockage en terrain de dépôt des sédiments pollués demeure jusque-là la solution principale, sûre et économique.

La phytostabilisation aidée peut être mise en place sur des sites anciens (non confinés) de dépôt de sédiment pollués par les métaux en utilisant les techniques conventionnelles de l'agriculture et la biomasse récoltée en utilisant les techniques des services des espaces verts, de l'agriculture ou de la foresterie. Les amendements sont mélangés au sédiment lors de la mise en place. Le choix des couples plantes/amendement est spécifique à chaque site. Il dépend de la nature de la pollution présente sur le site et des conditions d'exploitation envisagées pour le site. **L'utilisation de la phytostabilisation aidée conjointement avec la valorisation de la biomasse produite sur certains sites de dépôt de sédiment pollués comme mode de gestion de ces sites, pourrait permettre le 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 biomasses non alimentaires.**

## 2. Objectifs du projet

L'INERIS poursuit un essai de phytostabilisation aidée débuté en 2002 sur un site expérimental de 200 m<sup>2</sup> mimant un site de dépôt de sédiments pollués par les éléments traces métalliques (projet PHYTOSED). Ces connaissances ont été mises à profit pour mettre en œuvre une expérimentation à l'échelle d'un vrai site de dépôt de sédiments. Ainsi, le projet PHYTOSED 2 (Echelle 1) lancé en 2011, co-financé par VNF, avait pour objectif d'étudier l'efficacité et la pérennité de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse en bois-énergie à l'échelle d'un site de dépôt de sédiment pollué par les éléments traces. Le projet a permis (1) d'étudier la dynamique d'espèces sélectionnées, colonisatrices et invasives et la co-culture d'espèces sélectionnées, (2) l'effet d'un amendement sur la mobilité des éléments traces du sédiment et sur l'accumulation dans les parties aériennes des plantes, (3) de développer une batterie de tests pour évaluer les effets écotoxicologiques potentiels sur les plantes et les organismes vivants au contact du sédiment étudié, et (4) d'évaluer à l'échelle de l'expérimentation la faisabilité technique, réglementaire et économique de la filière bois-énergie. Une surface d'un hectare sur le terrain de dépôt (TD) 107, situé à Fresnes-sur-Escaut (59) a été retenue pour l'expérimentation.

### 3. Principaux résultats obtenus

La mise en place de l'essai a débuté en septembre 2011 et s'est achevée en mars 2012. Les étapes ont été les suivantes : prise en charge de la végétation existante (colonisatrice et invasive), nivelage et décompactage du sédiment, épandage de l'amendement (amendement minéral basique Optiscor, Carmeuse, France; 9 t ha<sup>-1</sup>), semis de la canche cespiteuse (*Barcampsia cespitosa*, 40 g m<sup>2</sup>), pose des bâches horticoles et plantation des saules (5544 plançons du cultivar Tordis et 5566 plançons du cultivar Inger) en taillis à très courte rotation (TTCR) (Fig. 1). En parallèle, des témoins ont été réalisés: cultivar Tordis sans canche et sans amendement (T1), cultivar Inger sans canche et sans amendement (T2), chaux (T3), cultivar Inger avec canche et sans amendement (T4), cultivar Tordis avec canche et sans amendement (T5), canche (T6) (Fig. 1).

La caractérisation initiale du site d'expérimentation a révélé une pollution métallique très élevée, en particulier en Zn, Cd et Pb, ainsi qu'une importante hétérogénéité spatiale et quantitative de la pollution. Ces paramètres ont été pris en compte pour établir la stratégie d'échantillonnage des plantes et des sédiments.

A partir de 2012, les campagnes d'échantillonnage ont eu lieu chaque année en juin. Une campagne d'échantillonnage a également eu lieu en octobre 2012 et en octobre 2013. Elles ont consisté en l'échantillonnage des feuilles de canche et des sédiments associés, des feuilles de saules et à mesurer le recouvrement au sol par la canche, les adventices et la renouée du Japon (plante invasive), la hauteur et le diamètre des saules et le taux de survie des saules. Les résultats de la première campagne d'échantillonnage (juin 2012) ont mis en évidence :

- un recouvrement très satisfaisant de la canche (>95%)
- une bonne reprise des saules (taux de survie à 3 mois après la plantation >99%)
- l'apparition d'adventices et la reprise de la renouée du Japon aux endroits où elle était initialement présente
- l'apparition d'un jaunissement sur les feuilles de saules sur le bloc B6
- des dégâts sur les tiges de saules dus à la présence d'herbivores.

Ces résultats ont permis de formuler plusieurs hypothèses concernant l'apparition du jaunissement des feuilles de saule sur le bloc B6 : une plantation mal réalisée (profondeur de plantation des plançons insuffisante ? bâche horticole imperméable non appropriée ?), la compétition avec la canche pour l'eau et les nutriments, une carence en azote assimilable, l'écotoxicité du sédiment, un pH du sédiment inapproprié pour la croissance des saules ou une remobilisation des éléments traces dans le sédiment suite à la préparation du terrain. Les campagnes d'échantillonnage suivantes et les actions entreprises sur le terrain ont eu pour objectif, notamment, de confirmer ou d'infirmer l'une ou l'autre de ces hypothèses.

Les résultats du suivi sur 3 années de la canche cespiteuse montrent que ce cultivar est pertinent pour la phytostabilisation dans les conditions du projet (sédiment excavé très contaminé en Zn, Cd et Pb). En effet, le recouvrement de l'espèce est très important. Il avoisine les 95 % sur l'ensemble du terrain, y compris sur les blocs présentant les concentrations en polluant les plus élevées. L'espèce participe ainsi à l'objectif de réduction de l'envol des poussières de sédiment contaminées et d'ingestion de terre contaminée par évitement du contact direct avec le sédiment. De plus, les concentrations en éléments traces (Zn, Cd, Pb, Cu) dans les parties aériennes de la canche sont proches des concentrations physiologiques, indiquant que ce cultivar ne transfère pas les éléments traces dans ses parties aériennes. La canche par son recouvrement et l'effet occasionnée par deux tontes annuelles, contribuent en synergie à diminuer la vigueur de la renouée du Japon, la diminution de la surface colonisée par la plante invasive ayant significativement diminuée de 27 % en 2 ans.

En juin 2013, le taux de survie des saules sur le terrain amendé était respectivement de 94 et 89 % pour les cultivars Inger et Tordis et de 93 et 100 % pour ces mêmes cultivars sur les parcelles témoins sans amendement. En juin 2014, le taux de survie des 2 cultivars sur la parcelle amendée a diminué. Il était de 67 % pour le cultivar Inger et de 79 % pour le cultivar Tordis. Le cultivar Tordis affichait 100% de survie sur les témoins avec et sans canche tandis que le cultivar Inger présentait une survie moindre dans les mêmes conditions (83 % sans canche et 61 % avec canche). En octobre 2013, les systèmes racinaires des saules ont été observés sur le terrain en présence et en absence de canche. Sur ces parcelles sans canche (T1 et T2), les systèmes racinaires des saules sont visibles en dehors de la bâche à l'intérieur des doubles rangées et présentent de nombreuses racines latérales nourricières. Au contraire, les systèmes racinaires des saules en présence de canche (T4, T5, parcelle amendée) longent la bâche et sont moins développés. La diminution du taux de survie des saules en présence de canche et les observations des systèmes racinaires suggèrent une compétition entre la canche et les saules, le cultivar Inger étant plus sensible à cette compétition que le cultivar Tordis. Suite à ces

observations et pour tester cette hypothèse, une modification du dispositif expérimental a été effectuée en mars 2014. Un linéaire de bêche et un linéaire de canche ont été enlevés. La bêche a été remplacée par un paillage non acidifiant.

La mesure de l'azote foliaire des saules en juin 2013 n'a pas révélé de carence, les concentrations mesurées étant toutes suffisantes voire optimales pour la croissance des saules. Les concentrations en azote étaient néanmoins supérieures chez les saules des parcelles témoin sans canche qu'avec canche, suggérant là encore une compétition des saules avec la canche.

La profondeur d'enracinement des saules mesurée en juin 2012 variait entre 15 et 60 cm et la longueur des systèmes racinaires variait de 30 à 60 cm, suggérant que la plantation avait été réalisée conformément aux règles de l'art. L'étude du pH a montré qu'il avait significativement augmenté depuis l'épandage de l'amendement jusqu'à atteindre 8,05 en juin 2013. Bien que ce pH ne soit pas optimal pour la croissance des saules, il n'a pas été considéré comme un facteur limitant, d'autres études en cours montrant qu'un développement normal des saules était possible à un pH de 8,2 (ex : projet PHYTOAGGLO).

La mesure des concentrations de Zn et de Cd extractibles du sédiment mesurées par extraction chimique ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  0,01M) met en évidence une mobilité plus grande pour le Cd que pour le Zn, relativement à leur concentration pseudo-totale et une forte hétérogénéité spatiale et quantitative pour le Zn. En juin 2013, la moyenne des concentrations extractibles du Cd est de  $0,0012 \text{ mg kg}^{-1}$  soit 0,013 % du Cd pseudo-total (concentration pseudo-totale moyenne :  $8,9 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et celle du Zn de  $0,58 \text{ mg kg}^{-1}$  soit 0,009 % du Zn pseudo-total (concentration pseudo-totale moyenne :  $6047 \text{ mg kg}^{-1}$ ). En termes d'évolution entre 2012 et 2014, les analyses n'ont pas révélé de diminution significative de la mobilité des éléments traces, ce qui suggère que l'amendement n'a pas eu d'effet sur ce paramètre. La comparaison de la fraction extractible de Zn dans le sédiment sous saule et sous canche réalisée en juin 2014 met en évidence une réduction significative du Zn sous le saule. Ce résultat suggère que le saule contrairement à la canche prélève le Zn dans le sédiment. Une tendance similaire est obtenue pour le Cd. Les pH sous canche (8,05) et sous saule (7,98) sont statistiquement différents bien que proches. La mobilité du Zn pourrait être favorisée sous le saule.

Contrairement à la canche, les saules transfèrent le Cd et le Zn dans leurs feuilles à des concentrations très supérieures aux valeurs physiologiques (Cd <  $2 \text{ mg kg}^{-1}$  ; Zn :  $81\text{-}296 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Le suivi des concentrations foliaires depuis 2012 a mis en évidence l'augmentation des concentrations. En juin 2012, la concentration en Cd chez Tordis et Inger était respectivement en moyenne de 2,9 et de  $3,1 \text{ mg kg}^{-1}$  et pour le Zn de respectivement 790 et de  $695 \text{ mg kg}^{-1}$ . En juin 2013, ces concentrations étaient respectivement, pour le Cd, de 23,5 et  $15,7 \text{ mg kg}^{-1}$  et, pour le Zn, de 3160 et  $2495 \text{ mg kg}^{-1}$  pour Tordis et Inger. Concernant le bois des saules, la comparaison entre les analyses réalisées avant plantation (Cd<sub>Tordis</sub> :  $1,9 \text{ mg kg}^{-1}$  ; Cd<sub>Inger</sub> :  $2,1 \text{ mg kg}^{-1}$  ; Zn<sub>Tordis</sub> :  $158 \text{ mg kg}^{-1}$  ; Zn<sub>Inger</sub> :  $139 \text{ mg kg}^{-1}$ ) et en juin 2014 sur plusieurs tronçons de bois montre que les concentrations ont aussi augmenté. En effet, la distribution verticale des concentrations révèle des valeurs de Cd variant de 1,7 à  $4 \text{ mg kg}^{-1}$  chez Inger et de 2,5 à  $5,3 \text{ mg kg}^{-1}$  chez Tordis et des valeurs de Zn de 170 à  $585 \text{ mg kg}^{-1}$  chez Inger et de 172 à  $705 \text{ mg kg}^{-1}$  chez Tordis.

L'évolution de l'accroissement des saules en hauteur entre 2012 et 2014 met en évidence une augmentation uniquement sur les blocs B7, B8 et B9 qui sont les blocs les moins pollués et sur les témoins T1 et T2 sans canche. Cette augmentation s'est accompagnée d'une augmentation du diamètre des saules sur les parcelles précitées.

L'inventaire des adventices réalisé au printemps 2013 a permis d'identifier 38 espèces végétales, non réparties uniformément sur le terrain. Six espèces dominantes ont été prélevées en juin 2014 et mesurées pour leurs concentrations en éléments traces. La plupart des espèces échantillonnées présente des concentrations en éléments traces, en particulier en Zn et en Cd, supérieures aux concentrations physiologiques (4 à 7 fois plus selon les éléments). Dans un objectif de maîtrise des risques, le transfert des éléments traces est à surveiller pour proposer des mesures de gestion adaptées.

Des tests écotoxicologiques et des tests chimiques d'extraction des éléments traces ont été réalisés sur le sédiment avant (septembre 2011) et après épandage de l'amendement (octobre 2013) afin d'estimer le succès de la phytostabilisation aidée. Les tests chimiques ont été les suivants : extraction à l'eau régale (fraction pseudo-totale), extraction au nitrate d'ammonium (fraction échangeable, DIN ISO 19730, 2008), extraction au nitrate de sodium (fraction échangeable), extraction à l'eau (ISO/TS 21268-1, 2002). Les tests écotoxicologiques ont été les suivants : plantox utilisant la laitue (ISO, 17126, 2005) et le haricot (Vangronsveld and Clijsters, 1992), test d'émergence et de croissance du navet (ISO, 11269-2, 2012), test d'évitement des vers *Eisenia fetida* (ISO, 17512-1, 2008) et test de croissance et de reproduction

des nématodes (ISO, 10872, 2010). L'indice de toxicité qui résume les mesures de biomasse du haricot et d'activités enzymatiques (stress oxydant) sur les feuilles et les racines du haricot indiquait que le sédiment avant épandage était légèrement toxique tandis que le sédiment après épandage était non toxique, suggérant le succès de la phytostabilisation aidée. Le rendement en biomasse de la laitue était supérieur après développement sur sédiment amendé ce qui suggérait aussi un bénéfice lié à la phytostabilisation aidée. Les sédiments avant et après épandage n'ont pas montré d'écotoxicité suite aux tests d'émergence et de croissance du navet, d'évitement des vers et de croissance et de reproduction des nématodes. En juin 2013, les tests d'émergence et de croissance du navet et le test d'évitement des vers a été reconduit sur un échantillon du bloc B6 (le plus pollué) ainsi que sur les témoins T1 et T5. Ces tests n'ont pas conclu à une écotoxicité des sédiments testés. Sur la base des tests chimiques et écotoxicologiques, Kumpiene et al. (2014) ont suggéré l'extraction chimique  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  et le test plantox sur le haricot (activités liées au stress enzymatique) comme batterie de test minimale pour comparer et suivre des sites gérés par les phytotechnologies.

Une étude économique prospective a été conduite avec les coûts et les bénéfices potentiels issus du projet. Les coûts identifiés ont été des coûts d'investissement liés à la mise en œuvre de l'expérimentation (enlèvement de la végétation, labour, pose de la bâche horticole), l'achat de l'amendement, des graines de canche et des plançons de saule et leur mise en œuvre (épandage, semis, plantation). Les coûts opérationnels étaient des coûts de suivi (analyses sous-traitées) et d'entretien (végétation, traitement insecticide). La gestion de la biomasse produite a engendré des coûts liés à la coupe des arbres et la production de plaquettes ainsi que des coûts de remise en état du site après 24 années d'exploitation du TTCR. Les revenus identifiés correspondaient à la vente des plaquettes forestières. Les coûts et les revenus liés à la gestion de la biomasse étaient prévisionnels, cette partie n'ayant pas été réalisée dans le cadre du projet. Le résultat de cette étude a montré que, dans notre cas, le revenu généré par la vente de plaquettes n'est pas suffisant pour compenser les coûts dus à la mise en place et au suivi de la phytostabilisation aidée et à la plantation des saules. A noter que dans cette étude, les coûts de recherche n'ont pas été pris en compte et les bénéfices n'ont pas été extrapolés à une surface supérieure à l'hectare.

#### Bibliographie citée :

Vangronsveld, J and Clijsters, H (1992) A biological test system for the evaluation of metal phytotoxicity and immobilization by additives in metal contaminated soils. **Metal Compounds in Environment and Life**, vol. 4, pp. 117-125.

Kumpiene J, Bert V, Dimitriou I, Eriksson J, Friesl-Hanl W, Galazka R, Herzig R, Janssen J, Kidd P, Mench M, Müller I, Neu S, Oustriere N, Puschenreiter M, Renella G, Roumier P-H, Siebielec G, Vangronsveld J, Manier N (2014). Selecting chemical and ecotoxicological test batteries for risk assessment of trace element-contaminated soils (phyto)managed by gentle remediation options (GRO). **Science of the Total Environment**, 496: 510-522.

Publications dans lesquelles le projet PHYTOSED 2 (Echelle 1) a été valorisé :

Marchand L, Lamy P, Bert V, Quintela-Sabaris C, Mench M. 2015. Potential of *Ranunculus acris* L. for biomonitoring trace element contamination of riverbank soils: photosystem II activity and phenotypic responses for two soil series. **Environment Science and Pollution Research**, DOI 10.1007/s11356-015-4646-9.

Kidd P, Mench M, Álvarez-López V, Bert V, Dimitriou I, Friesl-Hanl W, Herzig R, Janssen JO, Kolbas A, Müller I, Neu S, Renella G, Ruttens A, Vangronsveld J, Puschenreiter M. 2015. Agronomic practices for improving gentle remediation of trace element-contaminated soils. **International Journal of Phytoremediation**, 17: 1005-1037.

Projet GREENLAND (**best practice guidance** for practical application of GRO). <http://www.greenland-project.eu/>

Andersson-Sköld Y, Bardos P, Chalot M, Bert V, Crutu G, Phanthavongsa P, Delplanque M, Track T, Cundy AB. (2014). Developing and validating a practical decision support tool (DST) for biomass selection on marginal land. **Journal of Environmental Management**, 145: 113-121.

Bert V, Hadj-Sahraoui A, Leyval C, Fontaine J, Ouvrard S (2012). Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués. Etat de l'art et guide de mise en œuvre. **ADEME/INERIS. Ed. EDP sciences**. ISBN : 978-2-7598-0805-2.



## 4. Recommandations

Le retour d'expérience sur ce projet permet de conforter la pertinence de la canche comme plante utilisable dans la technique de phytostabilisation, y compris sur site très pollué par les éléments traces métalliques. Dans notre étude, les éléments traces sont peu mobiles, du fait du pH du sédiment  $> 7$  et de son pouvoir tampon élevé. La tolérance aux éléments traces de *Barcampsia cespitosa* serait à vérifier avant de la mettre sur le terrain à grande échelle dans le cas où la mobilité des éléments traces serait très élevée.

Dans la perspective où une valorisation de la biomasse est envisagée, il faut penser à un protocole qui évite la compétition entre les espèces végétales afin d'obtenir le rendement en biomasse attendu. Pour la plantation d'espèces ligneuses, il est préférable d'utiliser du paillage forestier plutôt qu'une bâche horticole non biodégradable. Le choix des espèces ligneuses est primordial pour la filière de valorisation. Les saules au comportement accumulateur sont susceptibles d'accumuler le Zn et le Cd dans le bois et les feuilles, ce qui peut-être limitant pour leur valorisation. La gestion spécifique des feuilles enrichies en métaux est à envisager pour limiter le retour au sol des métaux accumulés.

## 5. Conclusions / Perspectives

Le projet d'une durée de 4 ans a permis d'expérimenter en vraie grandeur la phytostabilisation aidée sur une surface d'un hectare d'un ancien terrain de dépôt de sédiment pollué principalement par les éléments traces et d'acquérir des informations pratiques sur sa mise en œuvre.

La graminée sélectionnée pour la couverture au sol (*Barcampsia cespitosa*) s'est montrée très pertinente dans le cadre de cette étude. En effet, elle s'est développée très rapidement après le semis et depuis lors recouvre le sédiment à environ 95 % de sa surface de manière pérenne. Après floraison, elle se ressème naturellement. Son maintien nécessite cependant d'éviter la présence de trop d'adventices plus compétitrices qui pourraient la faire régresser. Son maintien peut être obtenu par passage d'un girobroyeur en mars, avant la reprise de végétation, et en octobre. Cette graminée s'est montrée très tolérante aux éléments traces présents dans le sédiment (Zn, Cd, Pb, Cu), la plante n'ayant pas montré de signe de toxicité durant le projet. Elle ne transfère pas les éléments traces dans ces parties aériennes et affiche des concentrations proches des valeurs physiologiques. La canche en synergie avec des opérations de tonte a permis de diminuer la vigueur de la renouée du Japon.

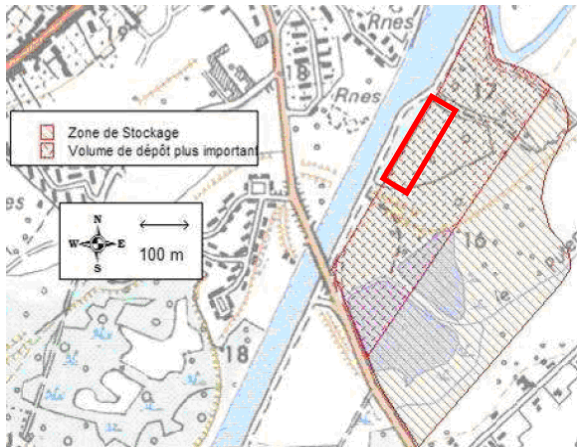
L'amendement basique sidérurgique (classe IV, NF U 44-051) utilisé dans cette étude est proche de par sa composition de celui utilisé dans un projet précédent (PHYTOSTAB). Dans ce projet, l'amendement basique sidérurgique (Thomas Basic Slag, 195 t ha<sup>-1</sup>) avait été logiquement très efficace à forte dose en diminuant la mobilité du Zn et du Cd d'un sédiment excavé très pollué ainsi que les concentrations foliaires en Zn et en Cd de la canche cespitoseuse. La dose d'amendement basique sidérurgique utilisée dans notre étude (9 t ha<sup>-1</sup>) résulte d'un compromis entre pratiques agricoles (1 à 1,5 t ha<sup>-1</sup>), faisabilité technique de l'épandage (3 passages maximum de l'épandeur), des contraintes réglementaires, de la viabilité économique de l'opération, du développement des végétaux (optimum de croissance des saules pH  $< 8$ ) et des résultats d'expérimentation en pot de détermination de l'effet d'un produit sur le pH d'un sol (NF EN 14984: 2006 méthode B). Dans les conditions de notre étude, il n'a pas été possible de mettre en évidence l'effet de l'amendement sur la diminution de la mobilité des éléments traces, en particulier du Zn et du Cd, et sur la diminution des concentrations foliaires de la canche et des saules, malgré l'augmentation de pH constatée après l'épandage qui semblait suggérer l'efficacité court terme de l'amendement. Des concentrations extractibles faibles, une hétérogénéité forte de la pollution, des concentrations foliaires de la canche cespitoseuse faibles et un pouvoir tampon très fort du sédiment pourraient pour partie expliquer ce résultat.

Concernant les saules, la campagne de juin 2013, a révélé des concentrations foliaires en Cd plus élevées dans la zone amendée que dans la zone témoin sans amendement et une tendance pour le Zn, ce qui va à l'encontre du résultat souhaité. Les hypothèses explicatives pourraient être les suivantes : dose d'amendement utilisée insuffisante pour engendrer une diminution significative sur le transfert sédiment-saule, un comportement accumulateur des saules sélectionnés plus fort que l'effet immobilisant de l'amendement.

Dans notre cas, l'utilisation des deux cultivars de saules Tordis et Inger pour la partie valorisation du foncier via la valorisation de la biomasse ne semble pas pertinente pour la filière bois-énergie. En effet, cette étude confirme, malgré le choix fait d'utiliser des cultivars de saule les moins accumulateurs et les plus producteurs de biomasse selon les connaissances du moment, le comportement accumulateur des saules envers les éléments Cd et Zn. Dans un TTCR, les

saules produisent 10 à 15 t ha<sup>-1</sup> de matière sèche après la 1<sup>ère</sup> coupe qui a lieu 3 à 4 ans après la plantation. La mortalité des saules a augmenté au cours du projet, rendant non viable la réalisation d'une coupe en fin de projet. Les deux cultivars ne se sont pas bien développés sur le sédiment. La cause de cette mortalité reste à élucider ; néanmoins la sensibilité de ces cultivars aux concentrations très élevées en Zn et en Cd du sédiment en synergie avec la compétition avec la canche pour l'eau et les nutriments semblent des facteurs probables. D'autre part, les concentrations très élevées mesurées dans les feuilles sont problématiques pour la partie phytostabilisation aidée du projet, les feuilles et donc les éléments Zn et Cd retombant au sol à l'automne.

Dans le cadre du projet DEMOPHYTO (2014-2018), l'expérimentation est poursuivie. Les questions soulevées dans le projet PHYTOSED 2 (Echelle 1) sont en cours d'approfondissement. Via des expérimentations spécifiques, les causes de la mortalité des saules sont explorées et une attention particulière est portée à la répartition des éléments traces dans les différentes phases du sédiment amendé et non amendé ainsi que sur le rôle des matières organiques réactives. Le suivi de la canche cespiteuse et des adventices colonisatrices et invasives permettra de confirmer la pertinence de la technique de phytostabilisation sur le moyen terme et de donner des recommandations de gestion sur la végétation. Pour poursuivre la réflexion sur les bénéfices apportés par la phytostabilisation aidée, des tests écotoxicologiques chroniques sont proposés en complément du suivi physicochimique. L'analyse coût-bénéfice sera poursuivie et consolidée, notamment au travers de la prise en considération d'un autre site sur lequel un protocole différent de phytostabilisation aidée est appliqué depuis 2011.



| En mg/kg de MS | Moyenne  | Ecart type | Min-Max      |
|----------------|----------|------------|--------------|
| As             | 44,54    | 11,12      | 30-63        |
| Cd             | 11,49    | 3,27       | 6-18         |
| Cr             | 102,38   | 29,13      | 63-165       |
| Cu             | 88,81    | 20,52      | 65-130       |
| Fe             | 79420,85 | 17416,51   | 51460-107617 |
| Ni             | 52,00    | 10,31      | 36-69        |
| Pb             | 912,10   | 295,00     | 504-1457     |
| Zn             | 6869,55  | 2457,54    | 2888-10492   |

□ Zone d'expérimentation, 1 ha (200m x 50m)

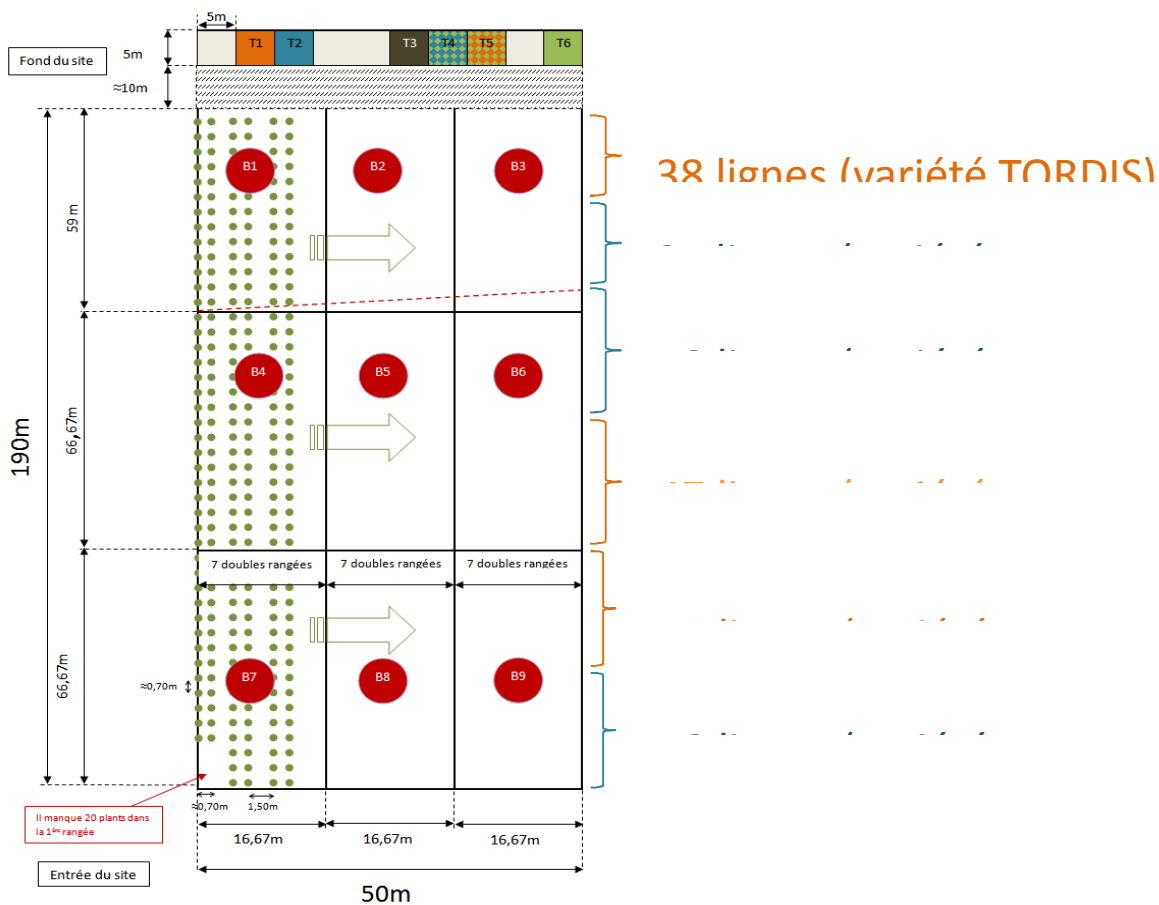


Figure 1 Localisation de la zone d'essai sur le TD 107, dispositif expérimental (témoins non amendée T1 à T6, parcelle amendée plantée de canche et de saules avec sous-parcelles B1 à B9) et concentrations en éléments traces métalliques (caractérisation initiale) de la zone d'essai.



## L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)

## ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development. The Agency provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work ADEME helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

ADEME is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development and Energy, and the Ministry for Education, Higher Education and Research.

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)



ADEME  
20, avenue du Grésillé  
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

[www.ademe.fr](http://www.ademe.fr)