



HAL
open science

PHYTOSTABILISATION D'UN SITE MINIER Etude de faisabilité: application au site du Bois Vert

Souhir Soussou, Geoffroy Alexandre, Jean-Claude Cleyet-Marel, Valérie Guérin, Louis de Lary

► **To cite this version:**

Souhir Soussou, Geoffroy Alexandre, Jean-Claude Cleyet-Marel, Valérie Guérin, Louis de Lary. PHY-TOSTABILISATION D'UN SITE MINIER Etude de faisabilité: application au site du Bois Vert. 5eme rencontres nationales de la recherche Sur les Sites et Sols pollués, Feb 2025, Paris palais des congrès, France. hal-04854286

HAL Id: hal-04854286

<https://hal.science/hal-04854286v1>

Submitted on 23 Dec 2024

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 MINIER

Etude de faisabilité : application au site du Bois Vert

Souhir SOUSSOU^{1*}, Alexandre GEOFFROY¹, Jean-Claude CLEYET-MAREL¹, Valérie GUERIN², Louis DE LARY DE LATOUR^{2*}

1 : Fertil'Innov Environnement ; 460 Rue Louis Pasteur ; 34790 Grabels.

2 : BRGM ; 3 avenue Claude Guillemin BP 36009 ; 45060 ORLÉANS cedex 2.

* s.soussou@fertilinnov-environnement.com

* l.delarydelatour@brgm.fr

Résumé

Les éléments traces métalliques (ETMs) dans les sols constituent une préoccupation majeure en raison des risques potentiels pour la santé humaine et les écosystèmes. Des approches impliquant la phytostabilisation ont donné des résultats intéressants pour limiter le transfert des ETMs par érosion hydrique et éolienne. Sur les anciens sites miniers, garantir l'atteinte des performances (taux de couvert végétal, limitation des flux solides, etc.) peut être difficile en raison non seulement des concentrations élevées en polluants métalliques mais également à cause de la faible fertilité du substrat. Chaque site étant un cas particulier, le recours à la phytostabilisation doit être raisonné et adapté aux contraintes particulières du site à traiter. Pour valider le recours à la phytostabilisation, des essais de faisabilité sont communément réalisés.

Cette étude présente les résultats de l'étude de faisabilité menée sur 2 zones de l'ancien site minier du Bois Vert sur la commune d'Abbaretz (44) pour valider la faisabilité du recours à cette technique et pour définir la meilleure approche de phytostabilisation en vue de gérer les transferts par érosion. Cette étude de faisabilité a intégré des essais en pots au laboratoire et des essais sur site.

Au final, après 3 ans, les essais sur site ont montré que la phytostabilisation des deux zones d'études est envisageable. Le suivi des parcelles a permis de sélectionner les espèces végétales (ligneux et herbacées) pour chaque zone et de mettre en évidence des points d'attention opérationnels pour une mise en œuvre à grande échelle.

Introduction

Les anciennes exploitations minières ont engendré des friches caractérisées par des substrats présentant de fortes teneurs en ETMs, des carences en matières organiques et éléments minéraux essentiels à la croissance des végétaux, le tout générant des sols très dégradés et un paysage fortement impacté avec une absence quasi-totale de végétation (Madhupriya et al., 2020). De ce fait, les sites miniers abandonnés peuvent être à l'origine d'impacts environnementaux et sanitaires, d'autant plus s'ils sont situés à proximité de villages et/ou entourés par des terres agricoles. Les transferts vers l'environnement des polluants issus des déchets miniers peuvent notamment être dus à des phénomènes de drainage minier acide (DMA), de dispersion éolienne et d'érosion hydrique (Cidu et al., 2009 ; Resongles et al., 2014 ; Sims et al., 2013).

La topographie, la texture des résidus miniers, le couvert végétal, les conditions climatiques et la gestion du site sont des facteurs importants qui influencent la dispersion des ETMs dans les différents compartiments des écosystèmes (García-Rizo et al., 1999). Les événements pluvieux intenses ainsi que les faibles couverts végétaux amplifient les processus érosifs. La restauration et la réhabilitation de ces sites par des méthodes physico-chimiques avec des approches conventionnelles de Génie Civil sont à la fois très délicates et extrêmement coûteuses (Berti & Cunningham 2000). Une alternative plus en accord avec les principes du développement durable est d'associer des stratégies de Génie Civil et d'ingénierie écologique afin de créer une couverture végétale capable de prévenir l'érosion des sols et limiter les transferts (Jacquemin et al., 2006). Toute opération impliquant la phytostabilisation, doit permettre de créer un technosol fertile favorable à l'installation d'un couvert végétal.

L'ancien site minier du Bois Vert est localisé sur la commune d'Abbaretz (44) à environ 1 km au nord-ouest du bourg (Figure 1). Ce gisement d'étain a fait l'objet d'exploitations très anciennes, dès l'époque gallo-romaine, mais l'exploitation principale a été réalisée à ciel ouvert de 1952 à 1957, générant environ 3,7 Mm³ de résidus et stériles miniers.

Parmi les conséquences environnementales générées par cette activité minière, le DMA et l'érosion des résidus sont les principales voies de transfert vers l'environnement devant être gérées sur ce site.

Le site a une surface totale d'environ 45 ha et trois zones peuvent être distinguées (Figure 2) :

- Un terril dit conique composé de stériles de découverte et d'exploitation ;
- Un terril dit tabulaire constitué par plusieurs dépôts. Ce terril comporte une végétation clairsemée. Il est soumis à une très forte érosion (éolienne et hydrique) entraînant localement la formation de ravines de plusieurs mètres de profondeur avec transport de matériaux ;

- Une zone située au nord du site présentant des résidus relativement fins oxydés de couleur orangée. À ce niveau se trouve un DMA. Un réseau de fossés et des lagunes sont présents pour collecter les eaux provenant du site. Dans cette zone, située en aval du site, les résidus sont la plupart du temps humides ou gorgés d'eau.

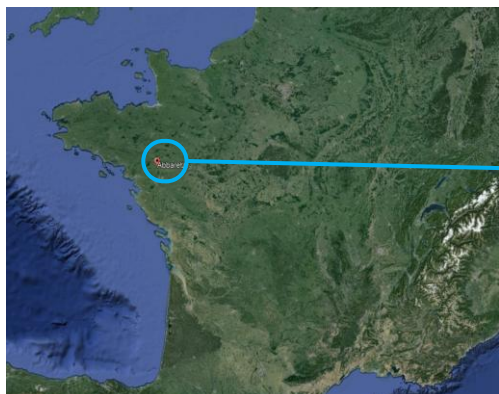


Figure 1 : Localisation du site.

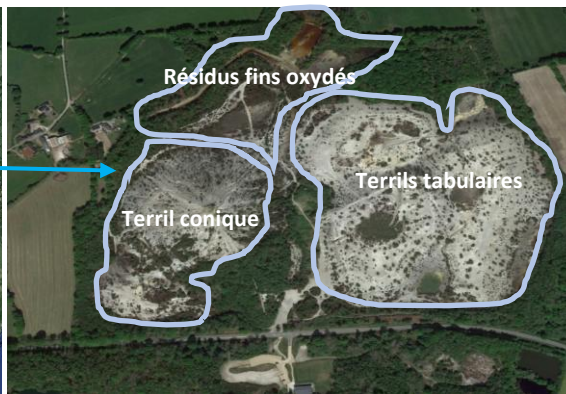


Figure 2 : Vue aérienne du site.

Les résidus miniers constituent un substrat sablo-limoneux sans fertilité et globalement incompatible avec la croissance des plantes. En effet, le substrat est acide (pH eau 4-5), très pauvre en matière organique (<0,5 %) et en minéraux, et présente une réserve utile très faible. De plus, le substrat est très peu perméable ce qui peut entraîner une stagnation de l'eau. Ces propriétés ont pour conséquence une faible stabilité structurale du substrat, ce qui le rend particulièrement vulnérable à l'érosion.

Le principal polluant identifié est l'arsenic. Les concentrations mesurées sont en moyenne de plusieurs centaines de mg/kg. Localement, certaines mesures atteignent 1 400 mg/kg.

Le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du BRGM, en tant que maître d'ouvrage délégué de l'Etat est missionné pour mettre en sécurité ce site. Parmi les mesures envisagées figurent des solutions de réhabilitation innovantes impliquant une végétation adaptée pour limiter les voies de transfert vers l'environnement.

Cette communication présente une synthèse des étapes de gestion, des méthodes utilisées, des résultats obtenus et des défis rencontrés dans l'application de la phytostabilisation sur le site minier d'Abbaretz. Sur ce site, l'approche par phytostabilisation a été retenue dans l'objectif principal de maîtriser les sources de polluants en limitant les transferts par érosion hydrique et éolienne. Une limitation des transferts hydriques du fait de la phytostabilisation est aussi attendu, qui devrait limiter la production du DMA.

Matériel et méthodes

Zones étudiées

Dans le cadre de l'essai de faisabilité, deux zones du site avec des conditions contrastées ont été étudiées :

- La zone des résidus fins oxydés, qui présente une zone humide avec des eaux très acides (environ 3) ;
- La zone du terril tabulaire, qui présente une zone exposée au vent et à la sécheresse.

Méthodes

L'approche de mise en œuvre de la phytostabilisation sur l'ancien site minier d'Abbaretz a comporté plusieurs phases :

- Diagnostic végétal initial : un inventaire botanique a été réalisé sur site ainsi que des coupes pédologiques et des analyses dans des zones sans végétation et des zones avec végétation spontanée de sorte à identifier les conditions permettant l'installation du couvert végétal.
- Essais en laboratoire :
 - o Amélioration de la qualité du substrat minier : des essais en pot avec 3 espèces végétales et différents taux de MO et d'amendement calcaire ont été testés permettant de corriger les propriétés physico-chimiques du substrat ;
 - o Essais de croissance : tests de végétalisation permettant de finaliser la définition de la composition du substrat optimal pour favoriser l'installation de végétaux. Une attention particulière a été portée à la maîtrise des coûts ainsi qu'à l'utilisation d'amendements locaux.
- Essais *in situ* : avant de procéder à la réhabilitation de l'ancien site minier, des essais *in situ* ont été réalisés afin de confirmer l'efficacité de l'apport des amendements et de tester l'association des différentes espèces végétales (herbacées (10 espèces) et ligneux (5 espèces) et microbiennes pour couvrir rapidement les différentes zones. Deux parcelles de 100 m² ont été mise en place à l'automne 2020 sur deux zones différentes : terril tabulaire et zones des résidus fins oxydés. Etant donnée la configuration des deux zones, la démarche appliquée pour la préparation du substrat de chaque pilote a été différente (incorporation au motoculteur ou mélange en tas à la pelle hydraulique).
- Suivi : un suivi des parcelles pilote a été réalisé tous les trimestres au cours de la première année et ensuite annuellement.

Résultats et discussion

Diagnostic végétal initial

L'inventaire botanique a montré une association de plantes pionnières acidophiles (bouleau, bruyère), ainsi que quelques herbacées (agrostis, fétuque, lotier). Les processus de végétation spontanée sont néanmoins trop lents pour permettre un recouvrement suffisant du site à court terme.

Essais en laboratoire

L'analyse des substrats a confirmé la mauvaise qualité agronomique des substrats prélevés au niveau du terril tabulaire, du terril conique et des résidus oxydés. La texture, avec une forte proportion de limons, rend le substrat asphyxiant pour les systèmes racinaires. Les analyses chimiques ont révélé des teneurs élevées en ETMs et notamment en aluminium et en arsenic. Les fortes teneurs en aluminium, associées à un pH acide, sont de nature à n'autoriser la croissance que de quelques rares végétaux adaptés à ces conditions.

L'étude de faisabilité en laboratoire a montré qu'il est possible de corriger le pH de façon efficace par l'apport d'amendements. Les amendements constitués de carbonate de calcium et de matières organiques ont entraîné une correction du pH et une bonne croissance des végétaux comparé à un témoin sur sol non pollué. De plus, il a été vérifié que l'incorporation d'amendements n'entraînait pas de mise en solution des ETMs.

Les essais en laboratoire ont permis de valider le protocole à l'échelle du pot. Les essais en laboratoire étant réalisés en conditions contrôlées, sans facteur limitant tels que l'eau, il était nécessaire de valider la solution sur site pour confronter le protocole aux réalités de terrain.

Essais in situ

Trois ans après la mise en place des parcelles pilotes de phytostabilisation :

- Il a été observé la mise en place d'un couvert végétal diversifié et dense (taux de recouvrement de 50 à 100 % suivant les saisons et les parcelles) permettant une bonne stabilité du substrat (Figure 3) ;
- Aucune figure d'érosion n'a été reportée sur les parcelles, tandis qu'aux alentours, de nombreuses figures actives ont été observées ;
- Les végétaux implantés ont été à même de réaliser leur cycle et d'assurer la pérennité des espèces ;
- Il a été vérifié que les transferts en ETM vers les parties aériennes des plantes sont limités au regard des teneurs dans les sols (concentration foliaire en As < 10 mg/kg de matière sèche) ;
- Globalement, il a été observé une stabilité de la teneur en matière organique dans le substrat, ce qui est interprété comme un indicateur de pérennité. En effet sur le long terme, la durabilité du système est liée au taux de matière organique du sol (Sheoran et al., 2013) (Figure 4).

Au final, les essais sur site ont montré que la phytostabilisation des deux zones d'études est envisageable. Le suivi des parcelles a permis de sélectionner les espèces végétales (ligneux et herbacées) pour chaque zone et de mettre en évidence de points d'attention opérationnels pour la mise en œuvre à grande échelle, notamment la gestion des épisodes de sécheresse, l'incorporation de l'amendement et la maîtrise des populations de rongeurs.



Figure 3 : Parcelles pilotes de phytostabilisation sur le site d'Abbaretz à l'automne 2022.

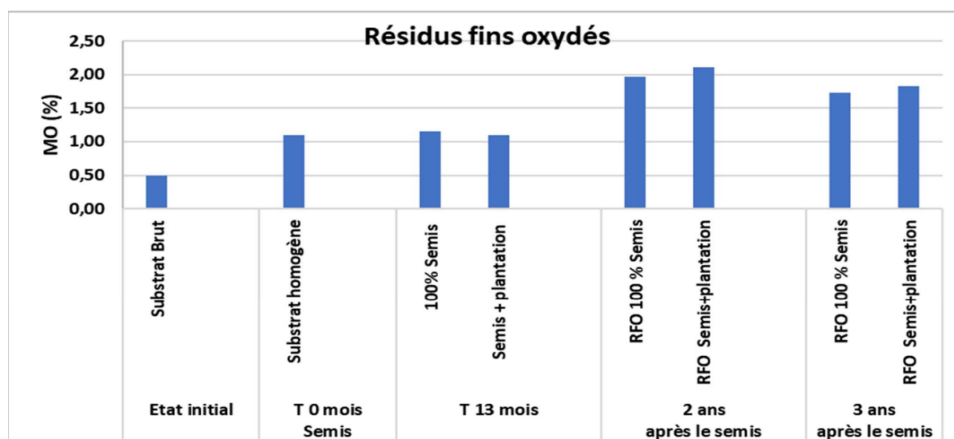


Figure 4 : Evolution des teneurs en MO dans le substrat du pilote au niveau des résidus fins oxydés.

Conclusions et perspectives

Les études de faisabilité menées sur le site de l'ancienne mine d'Abbaretz ont démontré qu'une approche innovante de phytostabilisation pouvait être une solution de gestion pertinente pour des aspects environnementaux du site. Les résultats obtenus sur les parcelles tests soulignent plusieurs points cruciaux :

- Faisabilité d'un couvert végétal : 3 ans après, la végétation s'est bien développée sur les deux parcelles test, montrant la capacité de la phytostabilisation à créer les conditions favorables à un développement de la végétation et ce malgré deux années particulièrement sèches.
- Gestion des transferts : la phytostabilisation a permis de réduire l'érosion hydrique. Ces résultats illustrent le potentiel de certaines espèces végétales à stabiliser le substrat.
- Amélioration de la qualité du substrat : la solution mise en place a permis d'améliorer la structure du sol et à le stabiliser avec l'apport de matières organiques.

En conclusion, les études de faisabilité pour la phytostabilisation du site de l'ancienne mine d'Abbaretz montrent que les solutions basées sur des méthodes douces peuvent jouer un rôle clé dans la gestion des sites et sols pollués. En intégrant des approches scientifiques rigoureuses avec des pratiques durables, il est possible de transformer des paysages dégradés en écosystèmes fonctionnels, tout en minimisant les impacts environnementaux et en favorisant la résilience écologique.

Cette initiative reflète l'engagement à long terme pour la protection de l'environnement et la restauration de l'ensemble du site. En parallèle de ce travail, une réflexion est en cours pour évaluer la refunctionalisation du sol. Pour cela, des tests par bioindicateurs notamment sont mis en œuvre.

Ces résultats ont été intégrés dans le cadre d'un avant-projet de lutte contre l'érosion à l'échelle du site qui a défini les différentes actions à mener. Dans le cadre de cet AVP, il a notamment été préconisé la végétalisation ciblée de certaines zones du site. La phase PRO est en cours actuellement.

Références

- Berti, W R., Cunningham, S D., 2000.** Phytostabilization of metals. In *Phytoremediation of toxic metals: using plants to clean-up the environment*, Eds I Raskin and B D Ensley. pp 71-88. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Cidu, R., Biddau, R., Fanfani, L., 2009.** Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy). *J Geochem Explor* 30: 125-132.
- García-Rizo, C., Martínez-Sánchez, J., Pérez-Sirvent, C., 1999.** Environmental transfer of zinc in calcareous soils in zones near old mining sites with semi-aridic climate. *Chemosphere* 39: 209-227.
- Jacquemin, P., Arguillat M., Tuphé R., Le Guen S., Boisson J., Pottecher G., Ruttens A., Vangronsveld J., Saunal B., 2006.** Une combinaison combinaison du confinement des déchets et de la phytostabilisation des sols. *Travaux* 831 : 56-66
- Madhupriya, M., Shyamala Gowri, R., Saranya, A., Rajarajeswari, P., Prabhavathi, P., Dinesh Kumar, S., 2020.** Remediation techniques for heavy metal contaminated ecosystem – A review. *J Adv Sci Res*, 11 (2): 01-09
- Resongles, E., Casiot, C., Freyrier, R., Dezileau, L., Viers, J., Elbaz-Poulichet, F., 2014.** Persisting impact of historic mining activity to metal (Pb, Zn, Cd, Tl, Hg) and metalloid (As, Sb) enrichment in sediments of the Gardon River, Southern France. *Sci Tot Environ* 481: 509-521.
- Sheoran et al. (2013)** - Phytostabilization of metalliferous mine waste. *J Ind. Pollut. Control* 29(2):183–192.
- Sims, DB., Hooda, PS., Gillmore, GK., 2013.** Mining activities and associated environmental impacts in arid climates: a literature review. *Environ Pollut* 2: 22-43.

Remerciements

Nous tenons à remercier les autorités locales de la commune d'Abbaretz pour leur coopération et leur soutien logistique.

Ces travaux ont été financés par le MTECT au travers de la subvention pour charge de service publique du DPSM.