



plante

LES PHYTOTECHNOLOGIES APPLIQUÉES AUX SITES ET SOLS POLLUÉS

MARS
2017

NOUVEAUX RESULTATS
DE RECHERCHE
ET DEMONSTRATION

aide à la décision

phytomanagement



sol

ADEME



Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

REMERCIEMENTS

Cet ouvrage a bénéficié de la relecture et des conseils de :

Rodolphe Gaucher, Serge Collet, Pierre Boucard, Sandrine Andres, Isabelle Zdanevitch et Séverine Vaselli (INERIS) ;
Géraldine Bidard (ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France) ; Cécile Grand, Patrick Jacquemin, Alba Departe, Bruno Gagnepain, Simon Thouin (ADEME) ;

Frédéric Astolfi (Industeel France) ; Antoine Billard (MEEM DGPR - BSSS) ; Luc Bolévy (Métropole de Lyon) ; Sophie Chambon et Christel de la Hougue (UPDS) ; Jean-Marie Côme (Ginger-Burgeap) ; Jean-Louis Crabos (Prism environnement) ; Véronique Croze (Element Terre) ; Vincent Douard (RETIA) ; Guillaume Lemoine (EPF Nord-Pas-de-Calais) ; Laurent Mansuelle (SERPOL) ; Jean-François Nau (EODD Ingénieurs Conseils) ; Aurélie Ohannessian (Axelera) ; Pascal Pelinski (DREAL Lorraine) ; Philippe Reynaud (Pépinières Soupes) ; Fabien Robert (ASTREDHOR) ; Laurent Thannberger (Valgo) ; Pierre-Antoine Thevenin (UNEP).

COMMENT CITER CET OUVRAGE DANS VOS BIBLIOGRAPHIES ?

ADEME, INERIS, ISA-Lille, Mines Saint-Etienne. 2017. Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (nouveaux résultats de recherche et démonstration). 68 pages.

Auteur(s) : Valérie Bert (INERIS), Francis Douay (ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France), Olivier Faure (Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS), Frédérique Cadière (ADEME)
Numéros des contrats : 1572C0076, 1572C0077 et 1572C0078

Projet de recherche coordonné par Valérie Bert (INERIS)
et réalisé avec Francis Douay (ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France) et Olivier Faure (Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS)
et cofinancé par l'ADEME

Ce document est édité par l'ADEME

ADEME

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

Coordination technique : Frédérique Cadière (ADEME)

Coordination éditoriale : Sylvie Guyader-Cogneau (ADEME)

Rédacteurs : Valérie BERT (INERIS), Francis DOUAY (ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France) et Olivier FAURE (Mines Saint-Etienne)

Crédits photo : ADEME, INERIS, ISA-Lille, Mines Saint-Etienne

Création graphique : A4 Editions - ANGERS

Brochure réf. 010191

ISBN : 979-10-297-0786-5

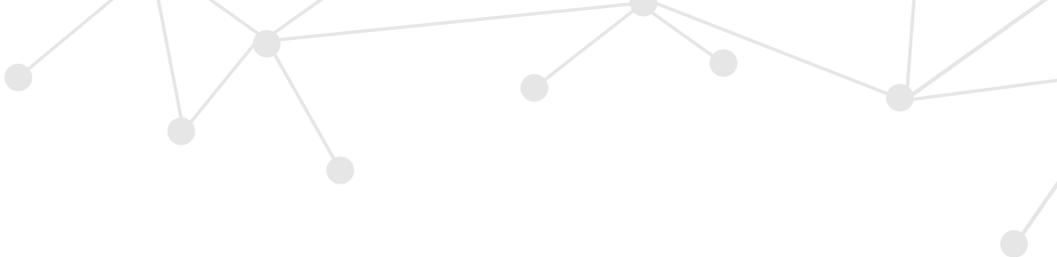
Dépôt légal : ©ADEME éditions, mars 2017

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 L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du 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.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	p 4
Avant-propos	p 5
Introduction : rappel sur les phytotechnologies	p 7
Chapitre 1 – Phytotechnologies : présentation d’outils d’aide à la décision	p 9
Phase 1 : faisabilité	
Phase 2 : confirmation	
Phase 3 : conception	
Arbre de décision : synthèse des outils d’aide à la décision	
Références et auteurs	
Chapitre 2 - La phytostabilisation : retours d’expériences et exemples d’applications	p 19
Retours d’expériences	
Recommandations	
Références et auteurs	
Chapitre 3 - Evaluation de la biodisponibilité des polluants dans le suivi des phytotechnologies : outils d’estimation des transferts et exposition des écosystèmes	p 29
La biodisponibilité : principes fondamentaux	
Le phytomanagement des sites pollués nécessite une évaluation et un suivi de la phytodisponibilité des contaminants	
Exemples d’évaluation intégrée de sites gérés par phytomanagement	
Bilan	
Références et auteurs	
Chapitre 4 - Valorisation de la biomasse issue des phytotechnologies : enjeux et filières énergétiques	p 37
Contexte réglementaire	
Biomasses issues des phytotechnologies : ressource d’énergie renouvelable	
Les différents procédés de conversion de la biomasse énergie	
Les principaux enjeux	
Conclusions et recommandations	
Références et auteurs	
Chapitre 5 - De la gestion des sols pollués à la valorisation de la biomasse : outils d’évaluation économique des phytotechnologies	p 47
Outil d’évaluation économique d’un projet de phytotechnologie	
Evaluation économique des projets BIOFILTEREE, PHYTOSED 2 et PHYTENER	
Conclusions et perspectives	
Références et auteurs	
Conclusions et perspectives	p 55
Annexes	p 57
Annexe 1 - Focus projet GREENLAND	
Annexe 2 - Outils bio-indicateurs	
Index des tableaux et figures	p 64
Sigles et acronymes	





Résumé

Les phytotechnologies appliquées à la gestion des sites pollués regroupent un ensemble de techniques qui utilisent *in situ* des espèces végétales pour contenir, extraire ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques du sol. Ces techniques, bien que connues et relativement bien perçues par les gestionnaires et opérateurs des sites pollués, restent encore émergentes sur les marchés des techniques de gestion des sites et sols pollués, notamment par manque de recul opérationnel et d'informations sur les possibilités de valorisation de la biomasse produite et les coûts et bénéfices associés.

Cet ouvrage présente de nouveaux résultats de recherche et de démonstration issues de projets encouragés ou soutenus par l'ADEME et finalisés depuis 2012. A ce titre, il complète et enrichit le contenu du guide « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : Etat de l'art et guide de mise en œuvre » réalisé par l'ADEME et l'INERIS. L'approche globale de gestion des sites et sols pollués (phytomanagement) est envisagée au travers de 5 chapitres dédiés à la présentation d'outils d'aide à la décision (Chapitre 1), de retours d'expériences et d'exemples d'application de phytostabilisation (Chapitre 2), d'outils d'estimation des transferts et des expositions des écosystèmes en lien avec l'évaluation de la biodisponibilité des polluants (Chapitre 3), de filières de conversion de la biomasse en énergie et de leurs enjeux sociaux, réglementaires (Chapitre 4) et économiques (Chapitre 5). La synthèse des outils disponibles d'aide à la décision et les informations à caractères techniques, économiques, réglementaires et sociaux présentés dans cet ouvrage doivent permettre à tout utilisateur ou prescripteur potentiel des phytotechnologies de valider la pertinence de l'utilisation des phytotechnologies au regard des objectifs de gestion du site.

Abstract

Phytotechnologies are plant-based options for in situ contaminated land management. These technologies, although known and favorably viewed by site owners and managers, remain emerging and not marketable. This may be due to a lack of field expertise and demonstration feedback as well as a lack of information related to biomass conversion possibilities, costs and benefits expected from these technologies.

This publication presents new results from research projects supported by the French Agency of Environment and Energy Management (ADEME). This publication provides additional content to the guidance published by ADEME and INERIS in 2012 « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : Etat de l'art et guide de mise en œuvre ». Phytomanagement, the overall polluted site management concept, is presented through 5 chapters which concern decision support tools (Chapter 1), phytostabilisation feedback from field experiences (Chapter 2), ecosystem exposure and transfer through bioavailability assessment of pollutants (Chapter 3), biomass energy conversion referring to technical, regulatory, social (Chapter 4) and economic (Chapter 5) point of view. The synthesis of available decision support tools and technical, regulatory, economical and social information presented in this publication should allow future users of phytotechnologies to validate the relevance of using such technologies according to specific site objectives.

Avant-propos

Les phytotechnologies restent encore émergentes sur les marchés des techniques de gestion des sites et sols pollués. Elles peuvent s'appliquer *in situ* sur une large variété de sols pollués (sols agricoles, friches, délaissés, sédiments stockés à terre...) et constituer *a priori*, des solutions technico-financières particulièrement bien adaptées aux sites pollués de vastes surfaces. A l'échelle de la parcelle, elles peuvent certainement constituer des alternatives aux objectifs de gestion dans des contextes où la durée d'immobilisation du site à gérer n'est pas une contrainte et répondre à des attentes sociétales, notamment en milieu urbain.

Le recours aux phytotechnologies est souvent évoqué lors des opérations de réhabilitation de friches industrielles ou urbaines, mais trop rarement concrétisé par manque de recul opérationnel.

Pourtant, des expérimentations en France ou à l'étranger, encouragées ou soutenues notamment par l'ADEME depuis plusieurs années, permettent aujourd'hui de présenter des retours d'expériences dans différentes situations de pollution et de donner une vision plus concrète des apports et des limites des différentes solutions appliquées sur le terrain.

Face à ce constat, un guide intitulé « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - Etat de l'art et guide de mise en œuvre » a été publié en 2012 aux éditions edp sciences. Il faisait le point sur l'état des connaissances et présentait trois techniques : la phytostabilisation, la phytoextraction et la phyto/rhizodégradation sous les aspects techniques, économiques et opérationnels et ceci, selon le niveau de maturité de chaque technique.

Objectif de l'ouvrage

L'objectif de cet ouvrage est de présenter les nouveaux résultats de recherche et démonstration disponibles depuis le guide publié en 2012.

Pour cela sont présentés :

- les connaissances issues de projets financés par l'ADEME ou dans lesquels l'ADEME était fortement impliquée (PHYTENER, PHYSAFIMM, PHYTOSED 2 (Echelle 1), PHYTOPOP, GREENLAND),
- les nouveaux résultats opérationnels obtenus sur les étapes de mise en œuvre des phytotechnologies.

A qui s'adresse cet ouvrage ?

Il est à destination des **utilisateurs potentiels ou prescripteurs des phytotechnologies** (propriétaires et gestionnaires de sites pollués, sociétés de travaux, bureaux d'étude en ingénierie environnementale, entreprises du végétal, administration, etc.).

Ce que vous trouverez dans cet ouvrage (et ce que vous n'y trouverez pas)

Cet ouvrage est structuré en 5 chapitres qui illustrent et complètent le contenu du guide de 2012 :

- **Chapitre 1** - Phytotechnologies : présentation d'outils d'aide à la décision
- **Chapitre 2** - Phytostabilisation : retours d'expériences et exemples d'application
- **Chapitre 3** - Evaluation de la biodisponibilité des polluants dans le suivi des phytotechnologies : outils d'estimation des transferts et exposition des écosystèmes
- **Chapitre 4** - Valorisation de la biomasse issue des phytotechnologies : filières et enjeux
- **Chapitre 5** - De la gestion de sols pollués à la valorisation de la biomasse : outils d'évaluation économique des phytotechnologies.

L'approche globale de gestion des sites et sols pollués, encore appelée **phytomanagement**, est reprise au fil de ces 5 chapitres, lesquels apportent des informations approfondies et nouvelles sur l'ensemble de la chaîne de valeur des phytotechnologies.

Chaque chapitre a été rédigé pour en permettre une lecture indépendante de celle des autres.

A l'exception des chapitres 1 et 3, la rhizo/phytodégradation n'est pas mentionnée dans cet ouvrage. Cette phytotechnologie ne bénéficie pas, au moment de l'écriture, de retours d'expérience suffisamment importants et novateurs par rapport au guide de 2012 pour être valorisés.

Par conséquent **l'ouvrage traite essentiellement des éléments traces dans un contexte de phytostabilisation** (chapitres 2, 4 et 5) **ou de phytoextraction** (chapitre 4).



- **GREENLAND** - Gestion douce des terres contaminées par les éléments traces 2011-2014

Basé sur un réseau européen de cas d'étude, le projet GREENLAND avait pour objectifs :

- de capitaliser des connaissances sur les freins à leur mise en pratique
- et de proposer un guide pour la mise en œuvre pratique des phytotechnologies et des outils pour faciliter la décision de les mettre en œuvre.

Pour en savoir plus : annexe « focus projet GREENLAND » et www.GREENLAND-project.eu

- **PHYTENER** - Développement de la phytostabilisation sur des sols contaminés par des métaux à des fins énergétiques : viabilité écologique, intérêt social et bilan économique (2009-2015)

L'objectif était de développer des procédés de phytostabilisation de sols très contaminés, tout en contribuant à la restructuration de l'agriculture sur un territoire fortement dégradé.

Pour en savoir plus :

www.ademe.fr/phytener-developpement-phytostabilisation-sols-contamines-metaux-a-fins-energetiques

- **PHYSAFIMM** - La phytostabilisation, méthodologie applicable aux friches industrielles métallurgiques et minières (2009-2014)

L'objectif était d'étudier la faisabilité de la gestion par phytostabilisation d'un crassier métallurgique.

Pour en savoir plus :

www.ademe.fr/physafimm-phytostabilisation-methodologie-applicable-friches-industrielles-metallurgiques-minieres

- **PHYTOSED 2** (Echelle 1) – Étude de l'efficacité et de la pérennité de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse bois-énergie (2011 – 2015)

L'objectif était de transposer à l'échelle *in situ* (parcelle de 1 ha) les conclusions d'un essai sur 200 m² de phytostabilisation aidée (projet PHYTOSED) pour la gestion environnementale d'un site de dépôt de sédiments pollués par les éléments traces métalliques.

Ce projet se poursuit avec le projet DEMOPHYTO (2014 – 2018).

Pour en savoir plus :

www.ademe.fr/projet-phytosed-2-etude-lefficacite-perennite-phytostabilisation-aidee-couplee-a-valorisation-bio-masse-bois-energie

- **PHYTOPOP** - Stratégies culturales, valorisation de la biomasse, et sélection de géotypes plus performants appliquées à l'utilisation du peuplier pour la remédiation de sols pollués (2006 – 2010)

L'objectif était de vérifier les potentialités du peuplier en phytoremédiation par la mise en place et le suivi d'essais *in situ*, afin de tester différents itinéraires culturaux et géotypes de peupliers, ainsi que le potentiel d'exploitation énergétique des biomasses produites.

Pour en savoir plus : dendroremediation.univ-fcomte.fr/spip.php?rubrique5

INTRODUCTION :

rappel sur les phytotechnologies

Les phytotechnologies regroupent un ensemble de techniques qui utilisent *in situ* des espèces végétales pour contenir, extraire ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques. Jugées *a priori* plus conformes aux enjeux du développement durable que les techniques classiques de traitement sur site et hors site, elles ont pour objectif d'améliorer les fonctions et la structure du sol. Ces techniques constituent une alternative ou un complément aux techniques conventionnelles dans le cas notamment de surfaces polluées importantes.

- **La phytostabilisation** est une technique de stabilisation basée sur l'utilisation des végétaux. Ce n'est pas une technique de dépollution mais un mode de gestion destiné à stabiliser les éléments traces du sol, c'est-à-dire les métaux (ex : zinc, cadmium) et les métalloïdes (ex : arsenic). Les espèces végétales, éventuellement en combinaison avec des amendements (phytostabilisation aidée), réduisent la mobilité des polluants et donc les transferts horizontaux et verticaux de polluants (chapitre 2).

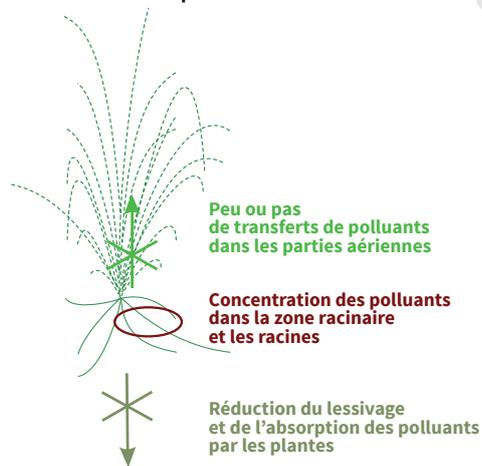


Figure 1 : schéma de fonctionnement de la phytostabilisation

- **La phytoextraction** est l'utilisation d'espèces végétales qui, en accumulant les éléments traces dans leurs parties aériennes récoltables, permettent de réduire les concentrations de polluant dans les sols, et ainsi contribuent à leur dépollution. Celle-ci n'est cependant que partielle car elle ne concerne que la fraction phytodisponible de polluant (chapitre 3), c'est-à-dire la fraction de polluant susceptible d'être assimilée par les espèces végétales mises en œuvre.

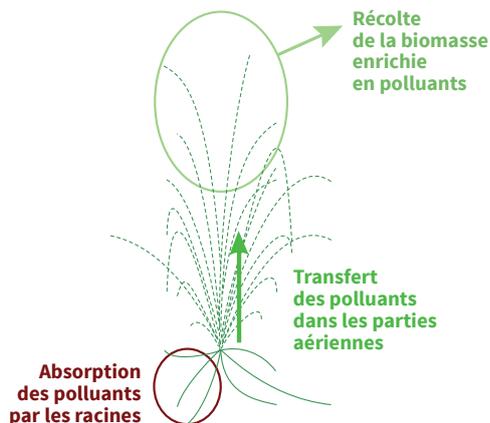


Figure 2 : schéma de fonctionnement de la phytoextraction

- **La phyto / rhizodégradation** est une technique utilisant des végétaux et des microorganismes pour dégrader des polluants organiques en constituants élémentaires (minéralisation). Les descriptifs techniques détaillés de ces techniques, les préconisations pour leur application ainsi que des exemples d'application sont disponibles dans le guide 2012.

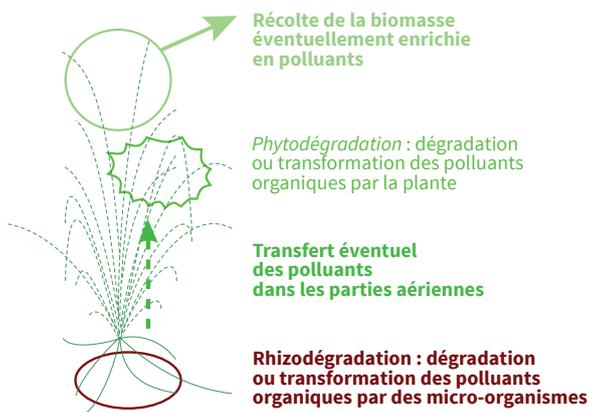
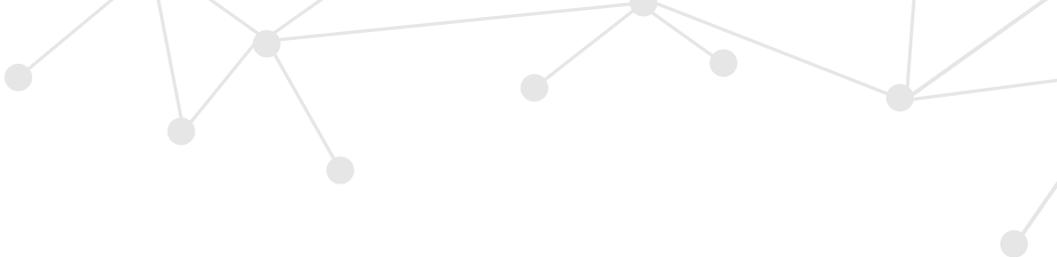


Figure 3 : schéma de fonctionnement de la rhizo/phytodégradation







PHYTOTECHNOLOGIES

PRÉSENTATION D'OUTILS D'AIDE À LA DÉCISION

Les phytotechnologies ne sont pas applicables sur tous les sites pollués et dans toutes les situations. Aussi, des outils d'aide à la décision ont été développés pour répondre à deux interrogations majeures :

- (1) quand peut-on s'orienter vers les phytotechnologies ?
- (2) s'il est possible de les utiliser, quelle est la phytotechnologie la plus pertinente ?

La mise en œuvre de ces outils suppose la définition préalable des objectifs de gestion pour le site (maîtrise ou réduction des polluants en place), en cohérence avec l'usage futur ou constaté de celui-ci, l'évaluation de la pollution des milieux et des risques sanitaires associés, conformément à la méthodologie nationale en vigueur pour la gestion des sites et sols pollués.

Il est donc nécessaire de disposer d'informations sur la nature des polluants présents sur la zone concernée (l'intégralité du site ou une partie), des caractéristiques du site (son état et sa situation) ainsi que de connaître les attentes et contraintes quant au projet d'aménagement ou de ré-usage du site (Tableau 1).

Ces outils sont des supports à la décision, ils informent sur les choix possibles mais ne remplacent pas l'avis d'experts, seuls à même de prendre en compte des paramètres spécifiques hors du champ de ces outils, tels que la configuration du site ou la présence d'un « cocktail » de polluants, par exemple.

Avant la mise en œuvre sur site de la ou des techniques choisies, il est donc recommandé de réaliser des essais de validation de la faisabilité technique prenant en compte les contraintes du site.

Le présent chapitre propose une sélection d'outils d'aide à la décision récemment développés dans le cadre de deux projets européens : GREENLAND et HOMBRE pour proposer une méthode d'aide à la décision. La démarche se veut itérative, elle est structurée autour de 3 phases et présente des niveaux de complexité croissante qui requièrent une augmentation de l'investissement en temps au fil des phases (Figure 4).

HOMBRE - Holistic Management of Brownfield Regeneration

Ce consortium de partenaires européens visait à proposer un changement de paradigme sur la gestion des friches, par l'élaboration de stratégies, technologies ou solutions de gestion alternative, prenant en compte leur valeur positive et les bénéfices sociaux, économiques et environnementaux associés. Le projet a conduit à l'élaboration d'outils de planification et d'aide à la décision pour les gestionnaires de friches tels la matrice d'opportunité.

Pour en savoir plus : www.zerobrownfields.eu/Displaynews.aspx?ID=568

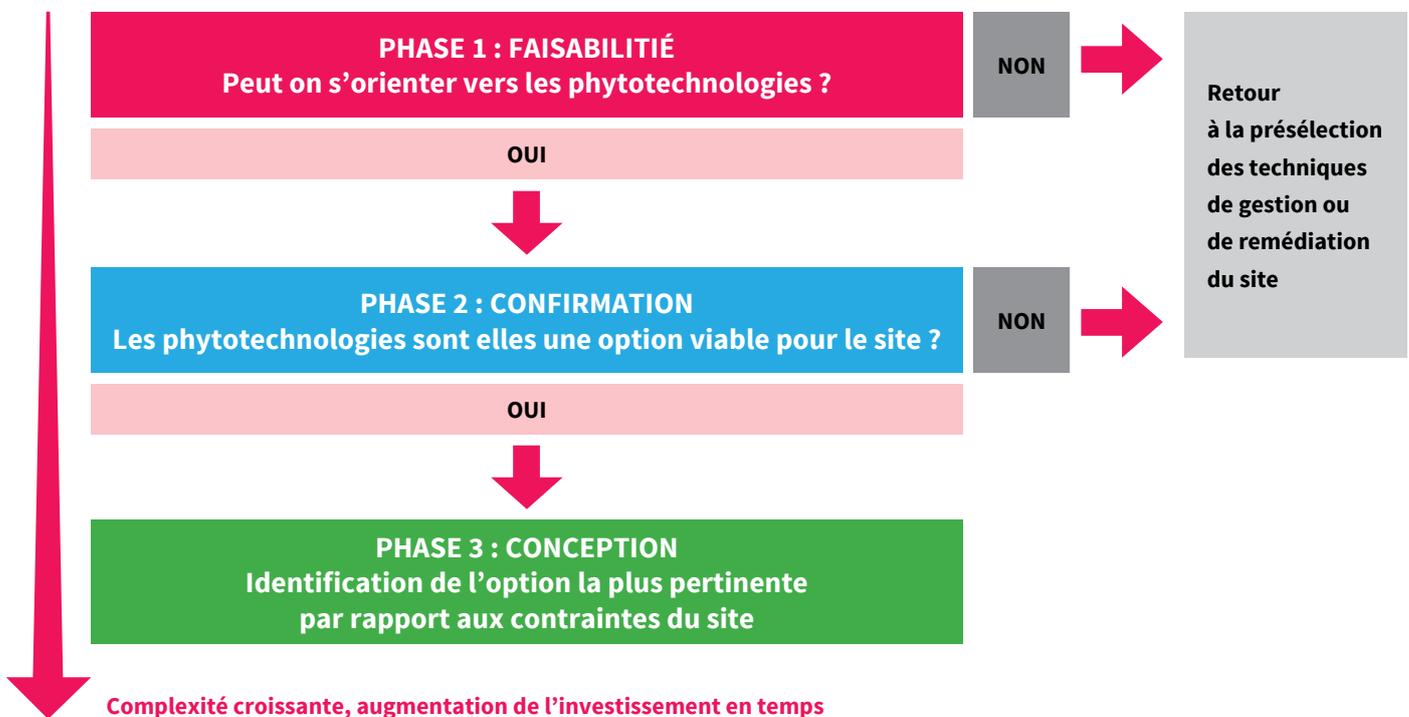


Figure 4 : approche itérative pour l'aide à la décision (adaptée d'après GREENLAND)

PHASE 1 : FAISABILITÉ

Peut-on s'orienter vers les phytotechnologies ?

Pré-requis :

- Définitions et champs d'application des phytotechnologies
- Objectifs de gestion pour le site
- Pollution du site (nature des polluants et concentration)
- Spécificités du site (aménagement, situation)
- Projet envisagé pour le site

Outils d'aide à la décision à mobiliser :

- Guide phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - 2012
- Outil d'aide à la décision GREENLAND
Phase 1 "contam matrix"
Phase 1 "practical GRO examples"
- Questions à se poser (cf. tableau 1)

1- Quand peut-on s'orienter vers les phytotechnologies ?

Pour déterminer si les phytotechnologies peuvent s'appliquer au site pollué dans son intégralité ou sur une partie, les caractéristiques du site (son état et sa situation) ainsi que les attentes et contraintes quant au projet d'aménagement ou de ré-usage du site doivent être connues (Tableau 1).

Le tableau 1 permet d'identifier le potentiel d'application des phytotechnologies au site concerné en cas de réponse affirmative aux questions listées.

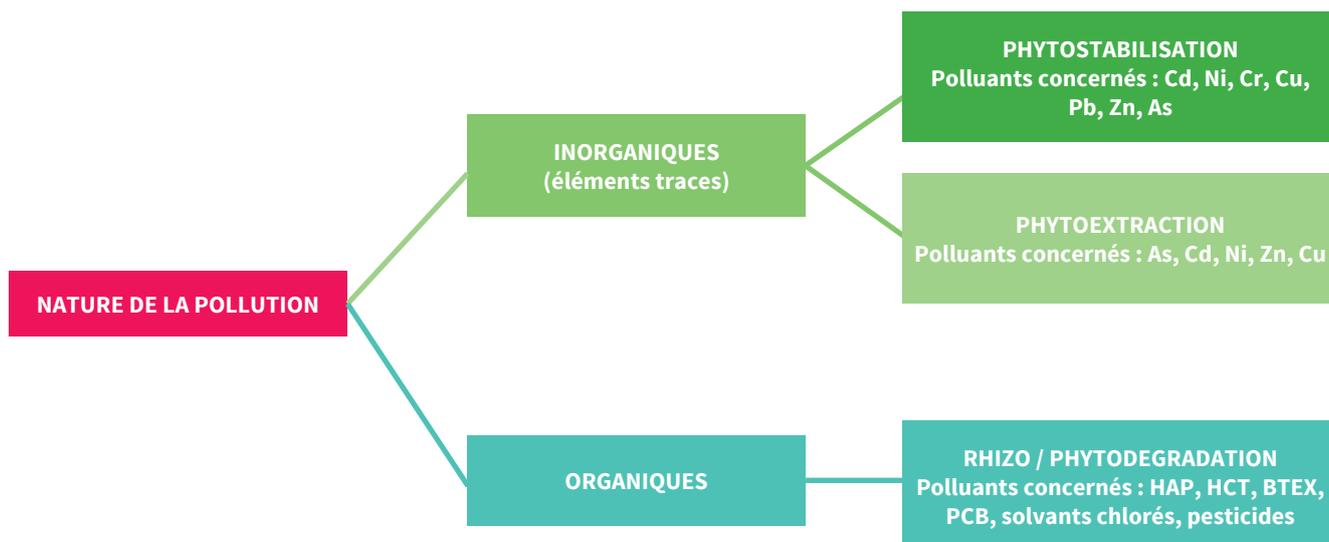
	Application potentielle des phytotechnologies
1 / Aménagement du site	
Le site ne doit pas être réhabilité dans les plus brefs délais.	Oui
Le site n'est pas bétonné et n'est plus en activité.	Oui*
L'utilisation de solutions conventionnelles de gestion de sites pollués n'est pas envisagée.	Oui
Le site est vaste et accessible aux engins.	Oui
2 / Projet envisagé	
Le site a vocation à être au moins partiellement un aménagement paysager ou à produire de la biomasse.	Oui
L'objectif de réhabilitation du site intègre la restauration ou l'amélioration des fonctions du sol.	Oui
3 / Pollution du site (pré-requis)	
Les concentrations en polluants sont très importantes.	Dans ce cas, le sol peut être écotoxique. L'emploi d'amendements du sol peut contribuer à réduire l'écotoxicité et permettre l'utilisation des phytotechnologies.
Les polluants sont localisés majoritairement dans les horizons de surface des sols du site.	Les phytotechnologies sont utilisables avec la plupart des végétaux si les polluants sont localisés dans les 30 à 50 premiers cm de profondeur du sol. Au-delà, il est préférable d'utiliser des arbres ou d'excaver les terres pour les gérer.

*Le béton n'est pas un obstacle insurmontable pour la mise en œuvre des phytotechnologies si ce n'est le coût de la démolition pour accéder aux terres polluées sous-jacentes. De même, sur un site en activité, la mise en œuvre des phytotechnologies est possible si la parcelle polluée est accessible.

Tableau 1 : application potentielle des phytotechnologies en fonction des spécificités du projet et du site



2- Quels polluants peut-on traiter avec les phytotechnologies ?



La phytoextraction et la phytostabilisation sont des techniques utilisables pour la gestion des sols pollués par les métaux (ex : nickel, zinc, cadmium) et métalloïdes (ex : arsenic).

Lors de la présence simultanée de polluants inorganiques et organiques, ces derniers, en fonction de leur nature, peuvent être éventuellement dégradés par les microorganismes rhizosphériques (bactéries et champignons) associés au couvert végétal (phyto/rhizo-dégradation). Il est recommandé pour ces cas de mélanges de polluants d'avoir recours à un avis d'expert.

3- Exemples d'application

Le chapitre 2 présente trois exemples réussis d'application des phytotechnologies relatifs aux projets, PHYTENER et PHYSAFIMM. D'autres exemples sont présentés dans le projet GREENLAND.

PHASE 2 : CONFIRMATION

Les phytotechnologies sont-elles une option viable pour le site ?



Pré-requis :

- Définitions et champs d'application des phytotechnologies
- Position des décideurs
- Identification des bénéfices environnementaux
- Données financières associées à la mise en œuvre (coûts) et bénéfices financiers envisagés (valorisation de la biomasse...)

Outils d'aide à la décision à mobiliser :

- Guide phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - 2012
- matrice d'opportunité HOMBRE
- Outil d'aide à la décision GREENLAND Phase 2 "cost calculator module"

1- Les décideurs sont-ils prêts à s'engager ? L'acceptabilité sociale a-t-elle été prise en compte ?

D'une manière générale, l'engagement des décideurs est une étape indispensable à la réussite d'un projet de réhabilitation des sols pollués. En particulier, dans le cas des phytotechnologies, l'engagement nécessite l'acceptation des limites et délais de ces techniques et d'avoir identifié les bénéfices sociaux, environnementaux et économiques que peuvent délivrer ces techniques tout comme les risques éventuels. L'engagement des dé-

cideurs doit contribuer à faciliter la gestion par les opérateurs du projet et à éviter les échecs. De plus, pour que le projet soit viable, il faut s'assurer qu'il n'existe pas de verrou social, les phytotechnologies devant être acceptées par tous les acteurs de l'ensemble de la chaîne de valeur des phytotechnologies. Ces aspects sont traités dans le chapitre 4.

2- Quels bénéfices environnementaux apportent les phytotechnologies ?

Au-delà de la gestion du sol pollué, les décideurs devront considérer les bénéfices environnementaux des différentes techniques. Dans ce contexte, une matrice d'opportunités a été créée dans le cadre du projet HOMBRE. Ce projet visait à développer un outil d'aide à la décision centré sur les opportunités de re-développement des friches en identifiant les plus-values sociétales. C'est un outil qualitatif, fonctionnant sous Excel, et qui permet aux décideurs d'identifier les opportunités de réhabilitation et les bénéfices apportés par les techniques de gestion des sols

pollués ou dégradés, dont les phytotechnologies. La valeur ajoutée de la mise en œuvre des phytotechnologies par rapport aux techniques traditionnelles peut concerner la préservation de la ressource en eau, la diminution du risque d'inondation, le maintien ou l'amélioration de la fertilité et de la structure du sol, la production de biomasses non-alimentaires pour divers usages, la diminution des émissions des gaz à effet de serre, l'augmentation de la biodiversité, etc.

3 - Quels sont les coûts et les bénéfices financiers associés à la mise en œuvre des phytotechnologies ?

Un calculateur de coûts (chapitre 5) adapté aux phytotechnologies a été développé dans le cadre du projet GREENLAND. Il permet de renseigner les données financières liées à la caracté-

risation du site, à la préparation du site, à l'achat des espèces végétales et leur plantation, à l'entretien, à la récolte et à la vente de la biomasse produite, au suivi et à la surveillance du site, etc.



PHASE 3 : CONCEPTION

Identification de l'option la plus pertinente



Pré-requis :

- Définitions et champs d'application des phytotechnologies
- Caractérisation du site et paramètres clés liés au site : type de sol, pH, éléments climatiques,...
- Protocole de mise en place et entretien

Outils d'aide à la décision à mobiliser :

- Guide phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués - 2012
- Outil d'aide à la décision GREENLAND - Extrait «operating windows»
 - Phase 3 "operating windows"
 - Phase 3 "technical assessment"

1- S'il est possible d'utiliser les phytotechnologies, quelle est la plus pertinente ?

Pour orienter la prise de décision et vérifier la faisabilité d'appliquer telle ou telle phytotechnologie sur le site considéré, il est nécessaire de s'assurer que les caractéristiques du site conviennent (pH du sol, climat, diversité végétale, densité de végétation, nature du sol, profondeur de la pollution). Des questionnaires ont été développés pour la phytostabilisation et la

phytoextraction dans le cadre du projet GREENLAND (Tableau 2). Cet outil n'anticipe pas le succès de la technologie retenue. Le résultat est une **recommandation accompagnée d'un code couleur du type « option pertinente » (vert) ou « un avis d'expert est souhaitable, il faudrait réaliser des tests écotoxicologiques » (orange ou rouge).**

OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION GREENLAND - EXTRAIT «OPERATING WINDOWS»

Tableau 2. Exemple de questionnaire pour la mise en œuvre de la phytoextraction avec un exemple de réponse (ne choisir qu'une des 3 options proposées et écrire « oui » en face de l'option choisie).

pH du site ?	pH
5-8	Oui
4-5 / 8-9	
2-4 / 9-11	

Diversité et densité du couvert végétal ?	Composition floristique
Similaire à la composition floristique des alentours (sur sol non pollué)	Oui
Moins importante que la composition floristique des alentours (sur sol non pollué)	
Aucune plante ne se développe sur le site	

Climat de la région où se situe le site ?	Climat
---	--------

OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION GREENLAND - EXTRAIT «OPERATING WINDOWS»

Nature du sol du site ?	Type de sol
Argile Limon Sable	Oui

Profondeur de la pollution sur le site ?	Localisation des polluants
Surface (0-30 cm) Sub-surface (30-80 cm) > 90 cm	Oui

Recommandation : Possibilité de mettre en oeuvre la phytoextraction sur ce site.

2- Comment mettre en œuvre la phytotechnologie choisie ?

Des recommandations sur la mise en œuvre des phytotechnologies ainsi que sur la sélection des espèces végétales, les amendements, l'utilisation de la biomasse produite et les outils de suivi du succès de la technologie mise en place sont disponibles dans les chapitres 2, 3, 4 et 5 ainsi que dans les annexes au projet GREENLAND.

La mise en œuvre et le suivi des phytotechnologies sur un site pollué nécessitent des compétences en :

- phytotechnologies,
- gestion des sites et sols pollués.

L'équipe projet, incluant des spécialistes de ces domaines, est à même de déterminer les besoins supplémentaires (hydrologie, biologie végétale, toxicologie, aménagement paysager, écologie, agronomie...) spécifiques à chaque site.

L'équipe de travaux peut inclure des :

- professionnels des espaces verts ou de la foresterie,
- professionnels agricoles,
- professionnels en génie écologique.

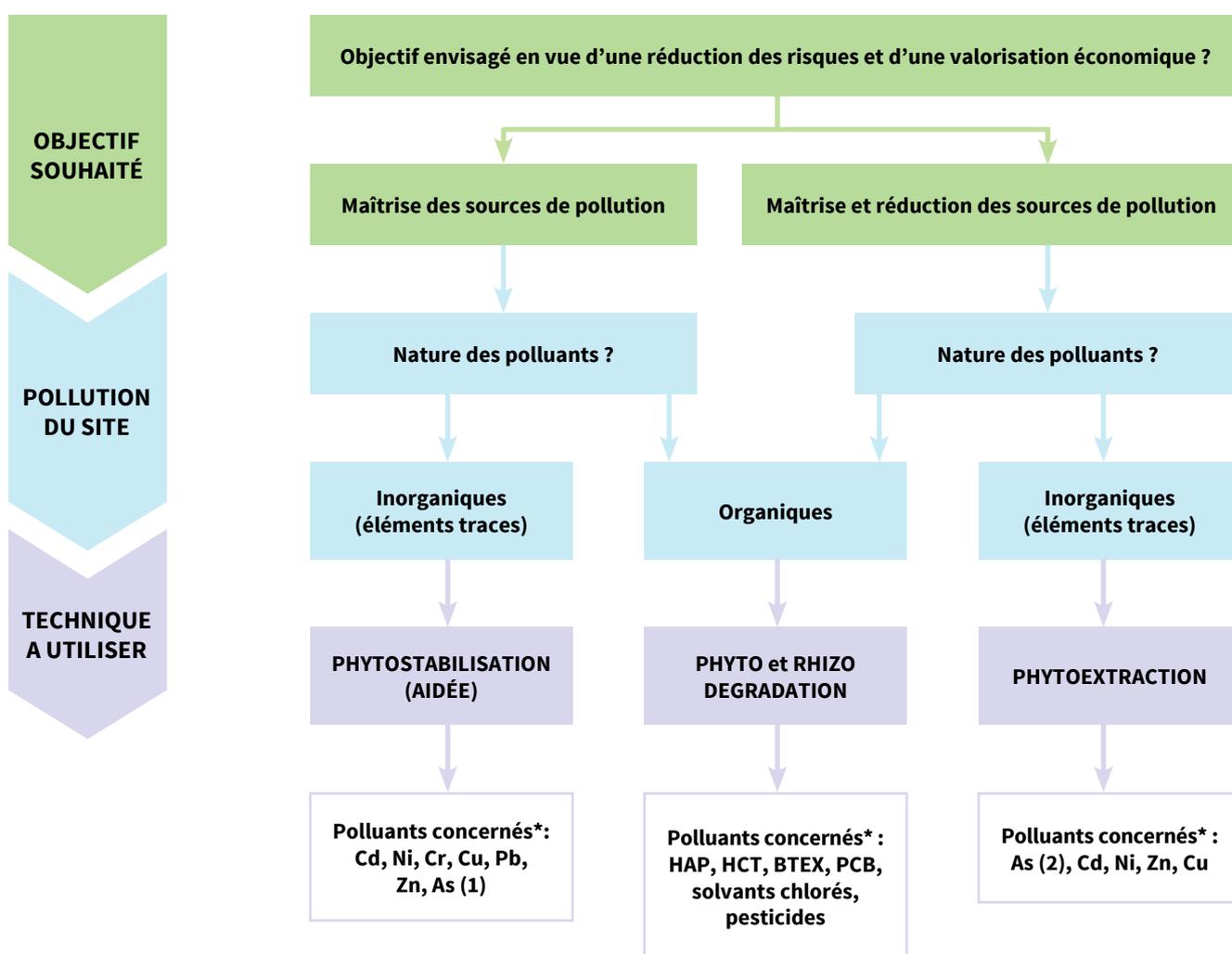


Arbre de décision : synthèse des outils d'aide à décision

L'arbre de décision (Figure 5) vise à identifier parmi les phytotechnologies disponibles, celles qui seraient les plus pertinentes au regard des objectifs de gestion fixés pour le site (maîtrise ou réduction de(s) source(s) de pollution) et de la nature des polluants présents sur la zone concernée. L'utilisation d'une phytotechnologie n'est pas exclusive sur un site pollué. Il peut s'avérer pertinent, en fonction des polluants mis en évidence, de leurs concentrations et répartition, de gérer de manière différenciée

une zone du site avec une technique et une autre zone du site avec une autre technique. De même, une zone multicontaminée (polluants organiques et inorganiques) peut être gérée par les phytotechnologies exclusivement ou en combinaison avec d'autres techniques. La concentration en polluants seule ne constitue pas un critère pour le choix d'une phytotechnologie plutôt qu'une autre.

Figure 5 : arbre de décision



*Polluants concernés en accord avec les connaissances du moment

(1) l'immobilisation de l'As peut être réversible en fonction du cycle de la matière organique

(2) la présence de Cu peut affecter négativement les performances de la phytoextraction de As

Questions à se poser pour confirmer le choix de la technique retenue

1) Les caractéristiques du site

- le site est-il bétonné ? y a-t-il des constructions ? est-il encore en activité ?
- le site est-il vaste ?
- le site est-il accessible aux engins agricoles/véhicules ?

2) Le contexte

- l'objectif de réhabilitation du site est-il la restauration ou l'amélioration des fonctions du sol ?
- le site a-t-il vocation à être un aménagement paysager ou à produire de la biomasse non alimentaire ?

3) Les caractéristiques du sol

- le pH :
 - Entre pH 5 – 8 : les phytotechnologies sont applicables
 - Pour pH entre 4-5 ou entre 8-9 : les phytotechnologies sont potentiellement applicables
 - Pour pH entre 2-4 et entre 9-11 : les phytotechnologies peuvent ne pas être applicables
- y a-t-il une végétation déjà présente sur le site ? Est-elle similaire à celle des sites voisins non pollués ?
- à quelle profondeur rencontre-t-on les polluants présents ?

4) Quelle est la concentration en polluant acceptable ou souhaitée dans les parties récoltables des plantes pour l'usage envisagé de la biomasse ?

Les réponses aux questions des sections 1 à 4 permettent la sélection des espèces végétales, des amendements éventuels et des itinéraires techniques.

- 5) La mise en œuvre de la technique permettra t'elle d'atteindre les objectifs en termes d'exposition résiduelle ou de concentration résiduelle en polluant acceptable pour l'usage envisagé du site ?
- 6) Le temps disponible pour la mise en œuvre de la technique est-il en adéquation avec le temps nécessaire à l'atteinte des objectifs ?
- 7) Les coûts de mise en place et de suivi / exploitation de la technique sont-ils compatibles avec le budget envisagé pour le projet ?
- 8) Les différents acteurs concernés par le projet sont-ils prêts à s'engager (acteurs des filières de valorisation de la biomasse, collectivités, agriculteurs, population locale, etc.) ?

OUI

NON

**Confirmation du choix
de la phytotechnologie retenue**

**Incompatibilité
de la phytotechnologie sur le site**

**FAISABILITÉ
TECHNIQUE**

**FAISABILITÉ
ECONOMIQUE
ET SOCIALE**

**RESULTATS
FAISABILITÉ**



4. Références

• Projets cités

1 - GREENLAND : « Gentle remediation of trace element contaminated land »

www.GREENLAND-project.eu

2 - HOMBRE « Holistic Management of Brownfield Regeneration »

www.zerobrownfields.eu/Displaynews.aspx?ID=568

3 - PHYTENER : Développement de la phytostabilisation sur des sols contaminés par des métaux à des fins énergétiques : viabilité écologique, intérêt social et bilan économique.

www.ademe.fr/phytener-developpement-phytostabilisation-sols-contamines-metaux-a-fins-energetiques

4-PHYSAFIMM : la phytostabilisation, méthodologie applicable aux friches industrielles métallurgiques et minières.

www.ademe.fr/physafimm-phytostabilisation-methodologie-applicable-friches-industrielles-metallurgiques-minieres.

• Pour en savoir plus

SelecDEPOL. Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution ADEME/BRGM. www.selecdepol.fr

Crosaz Y, Rey, F, Cassoti F, De Matos M, Dehaye JM, Cadière F, Bert V, Huyghe G. Travaux d'aménagement et d'entretien des zones naturelles. Règles professionnelles.

Travaux de Génie végétal. N° : N.C.1-R0, février 2015. p30.

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.

Evangelou MWH, Deram A. Phytomanagement : A realistic approach to soil remediating phytotechnologies with new challenges for plant science. Int J Plant Biol Res 2014; 2(4):1023.

5. Liste des auteurs

Valérie Bert, INERIS (contact : valerie.bert@ineris.fr) ; Frédérique Cadière, ADEME (contact : frederique.cadiere@ademe.fr)

Contribution à la relecture : Francis Douay (ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France) ; Olivier Faure (Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS)



LA PHYTOSTABILISATION

RETOURS D'EXPÉRIENCES ET EXEMPLES D'APPLICATION

Avant-propos

Le principe de la phytostabilisation repose sur l'utilisation de plantes herbacées et/ou ligneuses afin de réduire la mobilité des éléments traces métalliques (par lixiviation, ruissellement ou érosion éolienne) et de limiter leur transfert et/ou accumulation dans les réseaux trophiques. De fait, outre une stabilisation mécanique du substrat, les plantes et les microorganismes présents dans leur rhizosphère y induisent des modifications physiques, chimiques et biochimiques. Ces modifications peuvent conduire à une diminution de la biodisponibilité des polluants (chapitre 3) et donc, à une diminution de leurs transferts vers les différents compartiments de l'environnement et, *in fine*, vers la chaîne alimentaire. Afin d'accroître l'efficacité de la phytostabilisation, des amendements minéraux et/ou organiques visant à diminuer la mobilité des polluants, peuvent être utilisés. On parlera alors de « phytostabilisation aidée ». Ces amendements, dont les effets reposent sur des mécanismes complexes de précipitation, d'adsorption, de complexation..., peuvent aussi favoriser l'installation et le développement du couvert végétal, notamment pour les sols avec des potentialités agronomiques médiocres tels que les sols de friches industrielles ou de crassiers miniers.

Selon les contextes, les techniques et les végétations mises en œuvre, la phytostabilisation peut être un mode de gestion temporaire ou de longue durée, compatible avec la production de biomasses végétales répondant ainsi à de nouvelles attentes socio-économiques.

La phytostabilisation n'a pas pour objectif de dépolluer les sols mais de limiter les risques que présentent les contaminants, tant sur le plan environnemental que sanitaire. Cependant, l'évolution temporelle de certains paramètres physico-chimiques des sols (pH, teneur en matières organiques...) en lien notamment avec leurs usages peut influencer fortement sur le comportement et la disponibilité des polluants sur les moyen et long termes

Trois retours d'expériences sur la phytostabilisation sont présentés. Ils portent sur deux sites ateliers du réseau national SAFIR (<http://www.safir-network.com/>), fortement contaminés par des éléments traces métalliques (ETM), mais différents par leur contexte environnemental (surface, nature et usages des sols...), les modes de contamination et les attentes socio-économiques.

1. Retours d'expériences

1-1. Production de biomasses sur des sols agricoles contaminés : exemple du site atelier Metaleurop

• Contexte environnemental

Le site atelier Metaleurop correspond à une portion de l'ancien bassin minier du Nord - Pas de Calais, comprise entre Lens et Douai. Durant près d'une centaine d'années, ce site, d'une surface avoisinant 120 km², a été sous l'influence de deux usines métallurgiques distantes de 3 km : Metaleurop Nord (Noyelles-Godault) et Nyrstar (Auby). Leurs émissions atmosphériques passées ont conduit à une forte contamination des sols en plomb, cadmium, zinc mais aussi, à un degré moindre, en arsenic, mercure, antimoine, indium, thallium... A ce jour, la pollution historique du site concerne des sols agricoles et boisés mais aussi, des zones résidentielles et des zones d'activités économiques.

Depuis 1993, le site atelier fait l'objet de travaux de recherches dans différents domaines (environnementaux, sanitaires, so-

cio-économiques). La mise en place de modalités de gestion des sols permettant de limiter les risques est évidemment au cœur des recherches et c'est dans cette optique que la phytostabilisation a été expérimentée, notamment dans le cadre du programme pluridisciplinaire PHYTENER (2009-2015), soutenu par l'ADEME. La démarche visait à développer des procédés de phytostabilisation de sols très contaminés, tout en contribuant à la restructuration de l'agriculture sur un territoire fortement dégradé.

Deux expérimentations avec des objectifs de production de biomasses ont été réalisées sur d'anciens sols agricoles : la culture de miscanthus (phytostabilisation) et le boisement (phytostabilisation aidée). Dans les deux cas, la viabilité écologique de ces modes de gestion et leurs intérêts socio-économiques ont été évalués (chapitre 4).

• LE MISCANTHUS : un bon candidat à la phytostabilisation de sols contaminés

Le miscanthus (*Miscanthus x giganteus*) est une graminée vivace, robuste, peu sensible aux maladies et montrant une croissance importante et rapide. Cette espèce hybride est aujourd'hui considérée avec intérêt, notamment pour la production d'une biomasse à vocation énergétique. Bien que d'origine asiatique, le miscanthus est apte à se développer sous climat tempéré. En revanche, très peu de retours d'expériences existent sur son aptitude à se développer sur des sols contaminés par des ETM et sur son comportement en termes d'accumulation de polluants dans ses différents organes.

Trois souches de miscanthus d'origine différente ont été cultivées sur des sols agricoles fortement contaminés (Cd : 3,8 à 14,1 mg kg⁻¹ ; Pb : 214 à 731 mg kg⁻¹ ; Zn : 330 à 1 000 mg kg⁻¹), afin d'étudier l'accumulation des ETM dans les différentes parties de la plante et les effets de la culture sur la disponibilité environnementale des polluants (cf chapitre 3). Les effets de la densité de plantation, d'une fertilisation azotée et de l'ajout d'un inoculum mycorhizien sur ces paramètres ont été évalués. Selon les modalités étudiées, il s'agit de placettes de 40 m² ou de parcelles d'une surface comprise entre 0,8 et 1,3 ha (Figure 7).



Vue de placettes expérimentales destinées à évaluer les effets de pratiques culturales sur *Miscanthus x giganteus*

Les résultats obtenus ont montré que les racines accumulent fortement les ETM. En revanche, leurs concentrations dans les rhizomes, les tiges et les feuilles des plantes cultivées sur les sols contaminés sont proches de celles de plantes ayant poussé sur un sol non contaminé (Figure 8) et ceci, indépendamment du gradient de contamination des sols étudiés. Le calcul des facteurs de bioaccumulation pour le Cd et le Pb (ratio entre la

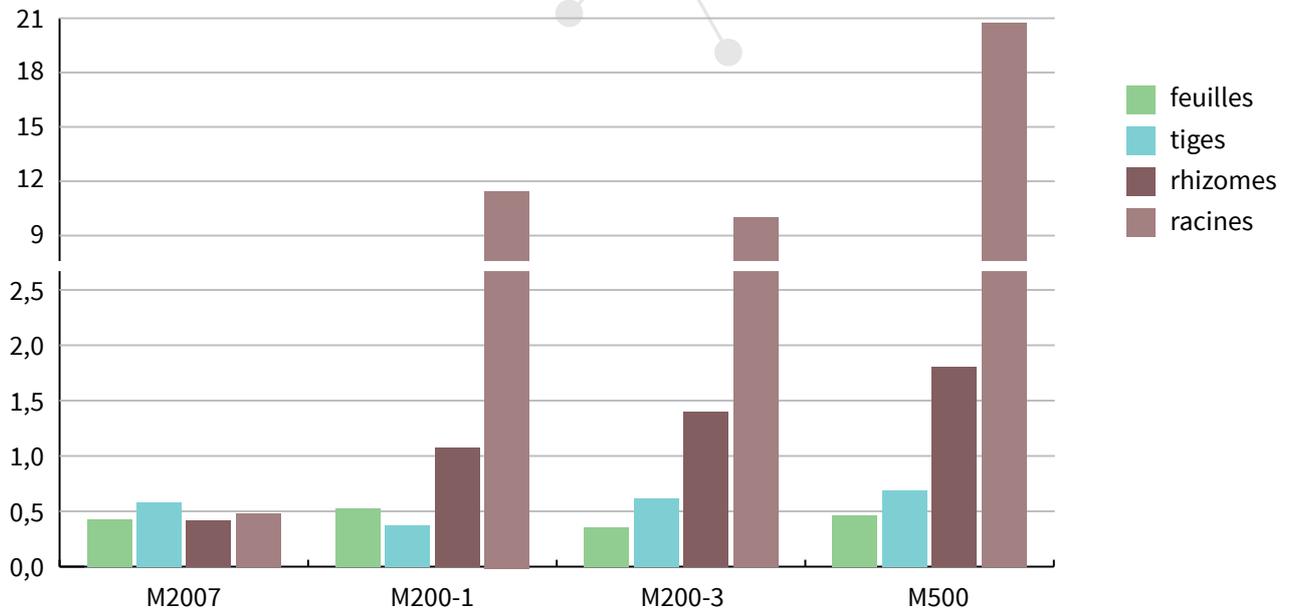
concentration en métal dans les parties aériennes de la plante et sa concentration dans le sol) a confirmé le caractère non accumulateur du miscanthus dans ses parties aériennes. Il a aussi été montré que l'origine du miscanthus, la densité de plantation et l'ajout d'un inoculum mycorhizien n'influencent pas l'accumulation et la répartition des ETM dans les différents organes de la plante.

Paramètres des sols	M2007	M200-1	M200-3	M500
Argile (%)	21,3	25,4	19,1	29
Limons (%)	69,2	44,4	54,7	51,1
Sables (%)	9,5	30,2	26,2	19,9
pH	5,9	7,6	7,8	8,1
CaCO ₃ (g kg ⁻¹)	< 1	2,1	1,4	22,2
Carbone organique (g kg ⁻¹)	19,5	16,1	16,5	31,3
Cd (mg kg ⁻¹)	0,57	5,0	5,1	10,6
Pb (mg kg ⁻¹)	11,1	213,5	215,2	476,7
Zn (mg kg ⁻¹)	51,7	324,0	335,7	546,9

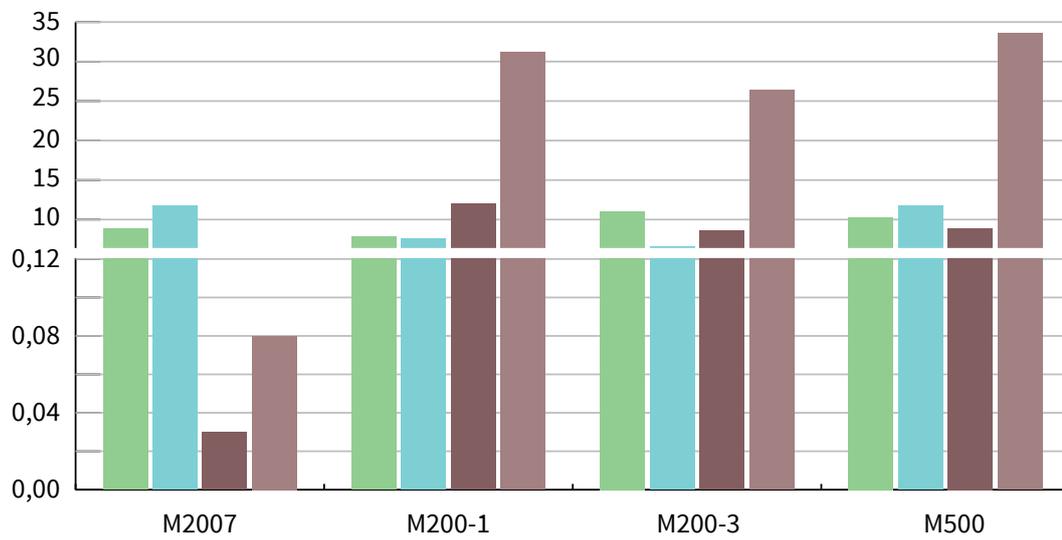
Figure 7 : paramètres physico-chimiques des sols (0-25 cm) témoin (M2007) et contaminés (M200-1 et -3, M500)



Cd (mg kg⁻¹)



Pb (mg kg⁻¹)



Zn (mg kg⁻¹)

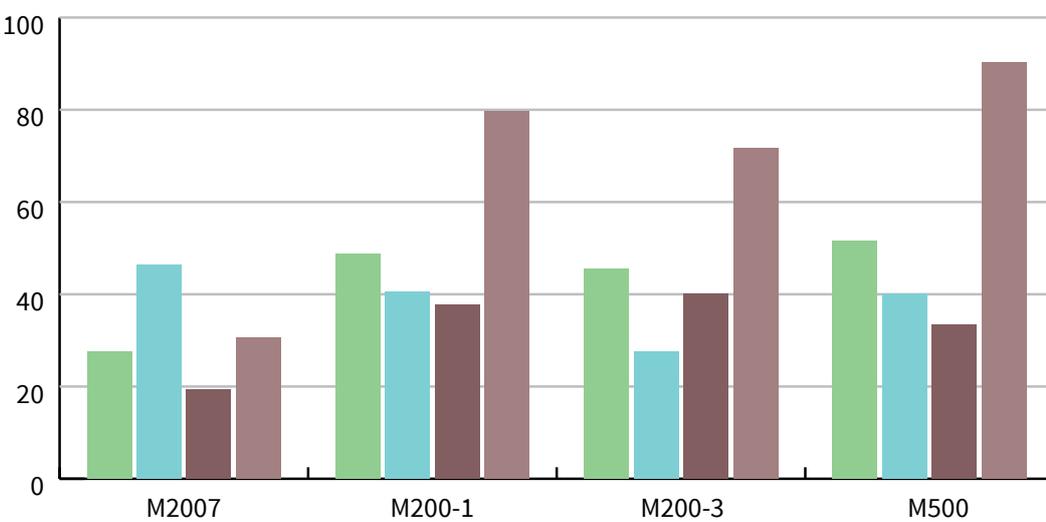


Figure 8 : concentrations moyennes en métaux (mg kg⁻¹ poids sec) dans les différents organes du miscanthus

Il a été constaté, au moyen d'extractions chimiques, que la disponibilité de Cd, Pb et Zn dans les sols les plus contaminés diminue à l'issue de la première année de culture de miscanthus. En revanche, trois ans après la plantation, une évolution moins favorable de la disponibilité environnementale des ETM a été

constatée au point de retrouver, dans le meilleur des cas, une mobilité similaire à celle mesurée dans le sol avant la mise en place de l'expérimentation. C'est particulièrement le cas pour Cd et de façon moins tranchée, pour Pb. Pour Zn, la disponibilité excède celle observée initialement.

→ • LE MISCANTHUS

Au bilan, dans les conditions du site atelier Metaleurop, il a été montré que Miscanthus x giganteus accumule peu de Cd et le Pb dans ses organes aériens. Cette aptitude constitue un atout pour d'une part, une utilisation du miscanthus en phytostabilisation et d'autre part, envisager la valorisation de la biomasse produite (chapitre 4). Les données ont toutefois été acquises sur des plantations relativement jeunes au regard de leur durée d'exploitation espérée (20 ans). Il est nécessaire de suivre sur le long terme les paramètres physico-chimiques des sols, le comportement des cultures sur la disponibilité des ETM et les effets de celles-ci sur les communautés floristiques et faunistiques (chapitre 3).

• PHYTOSTABILISATION AIDÉE PAR AJOUT DE CENDRES VOLANTES : un mode de gestion basé sur le boisement

La deuxième expérimentation a concerné une ancienne parcelle agricole dont le sol est fortement contaminé (Cd : 14-20 mg kg⁻¹, Pb : 696-1 150 mg kg⁻¹ et Zn : 916-1 400 mg kg⁻¹). Elle a reposé sur l'utilisation de deux amendements minéraux constitués de cendres volantes issues de centrales thermiques équipées de chaudières à lit circulant fluidisé (FA1 – cendre silico-alumineuse et FA2 – cendre sulfo-calcique) et la plantation en mélange de cinq espèces arborées (Robinier faux-acacia, Aulne glutineux, Chêne pédonculé, Erable sycomore et Saule blanc). Avant la plantation des arbres, un couvert herbacé (fétuque, brome, ray-grass, trèfle) a été semé sur les sols non amendé (R) et amendés (F1 et F2) afin de limiter l'érosion éolienne et hydrique. Ce dispositif a été mis en place une dizaine d'années avant son intégration dans le programme PHYTENER. L'échantillonnage des sols et des végétaux a permis d'évaluer les effets des modes de gestion sur les paramètres physico-chimiques des sols, le comportement des métaux, leur accumulation dans les organes aériens des arbres et la santé de ceux-ci.



Vue du dispositif expérimental de phytostabilisation aidée par ajout de cendres volantes

Les résultats obtenus ont montré que l'apport des cendres a profondément modifié certains paramètres physico-chimiques des sols : augmentation du pH, des teneurs en matières organiques, carbonates et soufre. Ces modifications ont favorisé la réduction de la disponibilité environnementale de Cd, Pb et Zn dans les sols. Cet effet, observable un an après les amendements, perdure après plus de 10 ans d'expérimentation malgré un début de lixiviation de certains constituants des cendres tels que le calcium et le soufre.

Les processus naturels d'acidification des sols et d'accumulation de matières organiques marquent le passage d'un fonctionnement des sols correspondant à celui d'un agrosystème vers ceux de jeunes sols forestiers carbonatés. L'ajout de cendres permet de limiter l'acidification des sols qui conduirait à accroître la disponibilité des ETM.

Les cendres n'ont eu aucun effet sur la croissance (diamètre des troncs) du robinier et de l'aulne glutineux. Ce n'est pas le cas pour l'érable et le saule sur lesquels un développement plus faible a été constaté. La chétivité des chênes n'a pas permis de dégager une influence des cendres sur son développement.

Parmi les espèces étudiées, le saule est celle stockant le plus Cd et Zn dans ses feuilles, confirmant ainsi son caractère accumulateur, et le robinier accumule le moins les ETM. D'une façon générale, les feuilles et brindilles des aulnes et robiniers contiennent des métaux en concentrations faiblement supérieures à celles de végétaux poussant sur des sols non contaminés. Les concentrations de leurs branches sont assez proches des valeurs physiologiques, critère favorable à la valorisation de la biomasse produite.

Par ailleurs, il a été constaté des concentrations en Cd moindres dans les feuilles et les fines branches des aulnes plantés sur le sol F2, et de Zn dans ces dernières ainsi que dans les brindilles et les fines branches des robiniers, confirmant le rôle immobilisant de la cendre FA2 (Figure 9). Dans certains cas, la cendre FA2 n'a eu aucun effet sur la phytodisponibilité des ETM. C'est aussi le plus souvent vrai avec la cendre FA1 ; dans de rares cas, une augmentation de leur phytodisponibilité a été constatée.



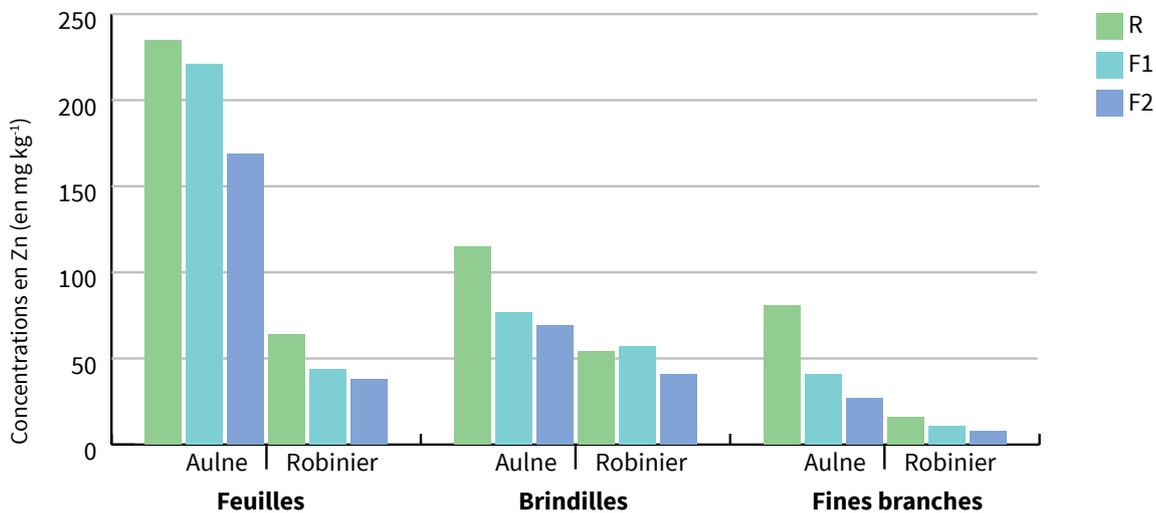
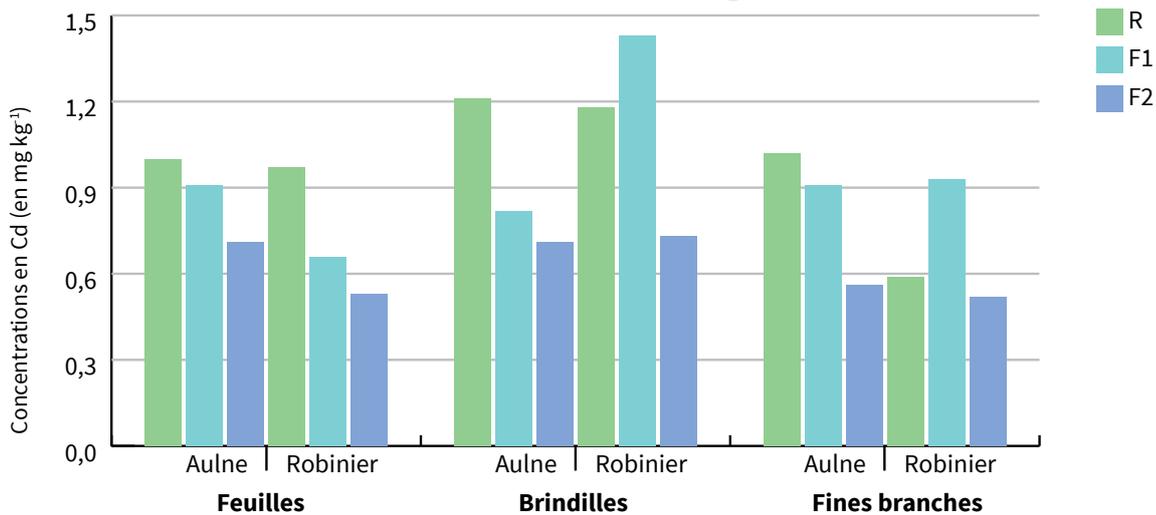


Figure 9 : concentrations moyennes en Cd et Zn (mg kg⁻¹ poids sec) dans les feuilles, les brindilles et les fines branches d'aulnes et de robiniers faux acacias plantés dans le sol non amendé R et les sols F1 et F2 amendés respectivement avec les cendres FA1 et FA2, 11 années après la mise en place de l'expérimentation

→ • LE MODE DE GESTION BASÉ SUR LE BOISEMENT

Au regard des résultats obtenus 12 ans après les plantations, l'érable sycomore, le robinier faux-acacia et l'aulne glutineux sont de bons candidats à la phytostabilisation de Cd, Pb et Zn dans les sols du site étudié. L'ajout d'amendements minéraux basiques, tels que les cendres volantes ou tout autre matériau de même propriété, a pour effet de limiter durablement la phytodisponibilité de Cd, Pb et Zn dans les sols, avec un effet plus marqué pour l'aulne glutineux.

1-2. Intégration paysagère d'un site très fortement anthropisé : l'exemple de la phytostabilisation aidée du site Industeel France / ArcelorMittal

• Contexte environnemental

Le groupe Industeel France / ArcelorMittal possède, sur la commune de Châteauneuf (Loire, 42), une fonderie spécialisée dans la production d'aciers spéciaux dont l'activité remonte à la seconde moitié du 19^{ème} siècle. Jusqu'à la fin des années 1990, une vaste décharge a été progressivement constituée par dépôts successifs des déchets générés par les activités de l'entreprise. Aujourd'hui, ce crassier s'étend sur une quinzaine d'hectares, pour une hauteur comprise entre 7 et 10 m. Une des caractéristiques fondamentales des matériaux constituant le crassier est leur richesse en éléments métalliques (Al, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn...). Aucun impact significatif sur la qualité des eaux de la nappe n'a été mis en évidence, mais le crassier reste un « point noir » paysager et constitue par ailleurs une source potentielle de contamination secondaire de l'environnement par l'envol sporadique de poussières.

Un Arrêté préfectoral en date du 11 mai 2010 impose à l'exploitant de transmettre un cahier des charges visant à assurer la protection du site vis-à-vis des eaux pluviales et de l'érosion éolienne, tout en garantissant une intégration dans l'environnement compatible avec la présence des déchets. A côté de la solution classique de confinement au moyen d'une couverture géosynthétique, l'intérêt d'un mode de gestion par phytostabilisation aidée a été étudié dans le cadre du programme PHYSAFIMM, financé par l'ADEME.

Compte tenu des caractéristiques spécifiques du substrat, la pertinence de cette option a au préalable été évaluée sur des parcelles expérimentales installées sur le site (Figure 10) afin d'étudier :

- 1) les effets d'amendements organiques,
- 2) l'influence du cortège d'espèces, sur le développement et la dynamique de la couverture végétale.



Figure 10 : vue générale du site Châteauneuf (Loire, 42) et des parcelles expérimentales avant phytostabilisation



• Cahier des charges et plan expérimental

La principale contrainte pour la phytostabilisation d'un crassier métallurgique reste évidemment l'absence de sol, au sens pédologique du terme. De fait, outre des teneurs très élevées en ETM, le substrat est totalement dépourvu de matière organique, très pauvre en azote et en phosphore et ses teneurs en cations échangeables (Ca, K, Mg...) sont fortement déséquilibrées. De plus, ce substrat présente des pH très basiques (> 8,5), qui limitent fortement la disponibilité du fer et des ETM, et une texture de sable grossier, qui lui confère une très faible capacité de rétention en eau. Dans ces conditions, la phytostabilisation nécessite une amélioration des qualités agronomiques du substrat au moyen d'amendements, lesquels doivent être, dans la mesure du possible, facilement disponibles et peu onéreux. Dans le cadre du programme PHYSAFIMM (2009-2014), deux types d'amendements ont été étudiés. Il s'agit d'une part, de BRF (Bois Raméal Fragmenté, généralement considéré comme un excellent matériau pour améliorer la capacité de rétention en eau d'un sol et stimuler le développement de la microflore fongique et bactérienne), apporté à la dose de 500 m³/ha et d'autre part, de MIATE (Matériau d'Intérêt Agronomique Issu du Traitement des Eaux, constitué de boues de station d'épuration compostées en présence de déchets verts et couramment utilisé comme amendement agricole), apporté à la dose de 120 t MS/ha.

Le choix des espèces végétales est un autre critère conditionnant la réussite d'un projet de phytostabilisation.

La conception d'une couverture herbacée pérenne et capable de s'auto-entretenir est généralement basée sur l'utilisation d'espèces issues d'au moins trois grandes familles botaniques, associant des fonctions complémentaires : des graminées (*Poaceae*), pour leur fort potentiel de recouvrement et leur caractère pérenne, des légumineuses (*Fabaceae*), pour leur capacité de fixation de l'azote atmosphérique et leur contribution à l'enrichissement du sol et, en complément, des espèces issues d'autres familles botaniques, pour leur impact visuel et éventuellement leur capacité d'attraction d'insectes pollinisateurs. Le choix du cortège végétal doit également tenir compte des conditions pédo-climatiques du site et de la toxicité potentielle du substrat. Il convient aussi, lorsque des données sont disponibles, de retenir des espèces qui accumulent préférentiellement les éléments toxiques dans leurs racines, et limitent leur transfert vers les organes aériens. Enfin, pour des opérations de phytostabilisation à grande échelle, il convient évidemment que les espèces sélectionnées soient disponibles en quantités suffisantes sur le marché européen de la semence. Compte tenu de ce cahier des charges, deux cortèges d'espèces ont été comparés dans le programme PHYSAFIMM : un mélange de semences « courant », classiquement utilisé dans les travaux de revégétalisation de talus routiers ou ferroviaires et un mélange « optimisé », constitué d'espèces peu exigeantes, connues pour leur plus forte tolérance à la sécheresse, à la pauvreté du substrat et à une éventuelle toxicité métallique (Tableau 3).

Mélange « courant »	
Espèce	Famille
<i>Dactylis glomerata</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Festuca arundinacea</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Lolium perenne</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Coronilla varia</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Lotus corniculatus</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Onobrychis viciifolia</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Trifolium repens</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Plantago lanceolata</i>	<i>Plantaginaceae</i>
<i>Sanguisorba minor</i>	<i>Rosaceae</i>

Mélange « optimisé »	
Espèce	Famille
<i>Brachypodium pinnatum</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Bromus erectus</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Festuca ovina</i>	<i>Poaceae</i>
<i>Anthyllis vulneraria</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Medicago lupulina</i>	<i>Fabaceae</i>
<i>Achillea millefolium</i>	<i>Asteraceae</i>
<i>Centranthus ruber</i>	<i>Valerianaceae</i>
<i>Valeriana officinalis</i>	<i>Valerianaceae</i>

Tableau 3 : cortèges d'espèces utilisées pour les essais de phytostabilisation du crassier Industeel Loire – ArcelorMittal (site Châteauneuf, Loire - 42)

Les expérimentations ont été conduites sur des parcelles de 50 m² préparées fin 2009 et ensemencées au printemps 2010 (Figure 11). Plusieurs paramètres ont été suivis afin de comparer les effets des amendements : (1) l'importance, la richesse et la diversité du couvert végétal, (2) l'accumulation d'éléments potentiellement toxiques dans les parties aériennes des végétaux, (3) l'impact du couvert végétal sur la réduction de l'envol de poussières et (4) l'impact du couvert végétal sur la reconstruction d'un sol et sur la limitation de l'infiltration des eaux de précipitations.

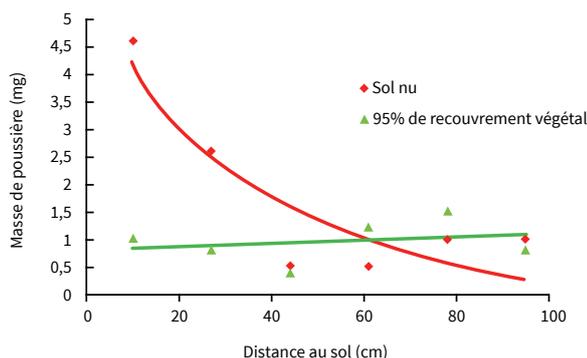
• Résultats

A l'issue de trois ans d'expérimentations, les résultats obtenus ont montré qu'il était tout à fait possible d'obtenir rapidement une couverture végétale homogène et pérenne sur un crassier métallurgique. Les meilleures conditions d'installation de la végétation ont été atteintes en combinant un amendement par des MIATE et un ensemencement par un cortège d'espèces, adaptées à la fois aux fortes teneurs en ETM, à la pauvreté du substrat en matières organiques et à la sécheresse du milieu (mélange "optimisé"). Dans les conditions expérimentales optimales, un recouvrement végétal proche de 100 % a été obtenu dès la première année suivant l'ensemencement. Il s'auto-entretient depuis 2011, sans aucune intervention extérieure.

L'analyse des teneurs foliaires en ETM de cette communauté « optimisée » montre que la plupart des éléments (Al, Cu, Mn, Ni, Pb, Fe) sont présents à des teneurs comparables ou légèrement supérieures à celles mesurées dans des plantes provenant de sols non contaminés ; seuls deux d'entre eux (Cr et Mo) présentent des valeurs très supérieures à une communauté témoin, mais aucun symptôme de toxicité n'a été observé.

Il convient de noter que la communauté végétale issue du mélange « optimisé » a perdu quelques espèces présentes dans le cortège initial (*C. ruber*, *V. officinalis*), mais s'est progressivement enrichie d'un certain nombre d'espèces colonisatrices, telles que la Sauge sclarée et le Compagnon blanc. Ces espèces, manifestement adaptées aux conditions très particulières du site, et présentant par ailleurs un certain intérêt écologique (augmentation de la diversité spécifique de la communauté végétale, attraction des pollinisateurs...), pourraient donc être incluses dans le cortège de semences optimisé pour la phytostabilisation à grande échelle du crassier.

Afin d'évaluer précisément l'influence de la couverture végétale sur la diminution de l'envol de poussières, des mesures quantitatives ont été réalisées à l'aide d'un dispositif de type « tunnel à vent ». Les résultats obtenus ont confirmé un lien très net entre l'importance du couvert végétal et la réduction de l'envol de poussières. De fait, **un pourcentage de recouvrement proche de 100% conduit à un abattement de près de 90% de la dispersion des contaminants par voie éolienne.**



Outre une diminution de l'érosion éolienne, la présence de plantes, en conduisant à une augmentation de l'évapotranspiration et de la capacité de rétention d'eau du substrat, conduit à une diminution du flux d'infiltration des eaux pluviales, vecteur potentiel du transfert des contaminants vers la nappe. Sur un crassier de type métallurgique, constitué principalement de matériaux grossiers très drainants, la question se pose de savoir si cet effet attendu de la phytostabilisation est réellement significatif. Pour répondre à cette question, un modèle de bilan hydrique dynamique a été construit. Les données de sortie de ce modèle ont montré qu'**un recouvrement végétal de 100% conduisait à une diminution de l'ordre de 30% de l'infiltration efficace des eaux pluviales à travers le crassier**, ce qui représente autant d'eau en moins vers l'aquifère.

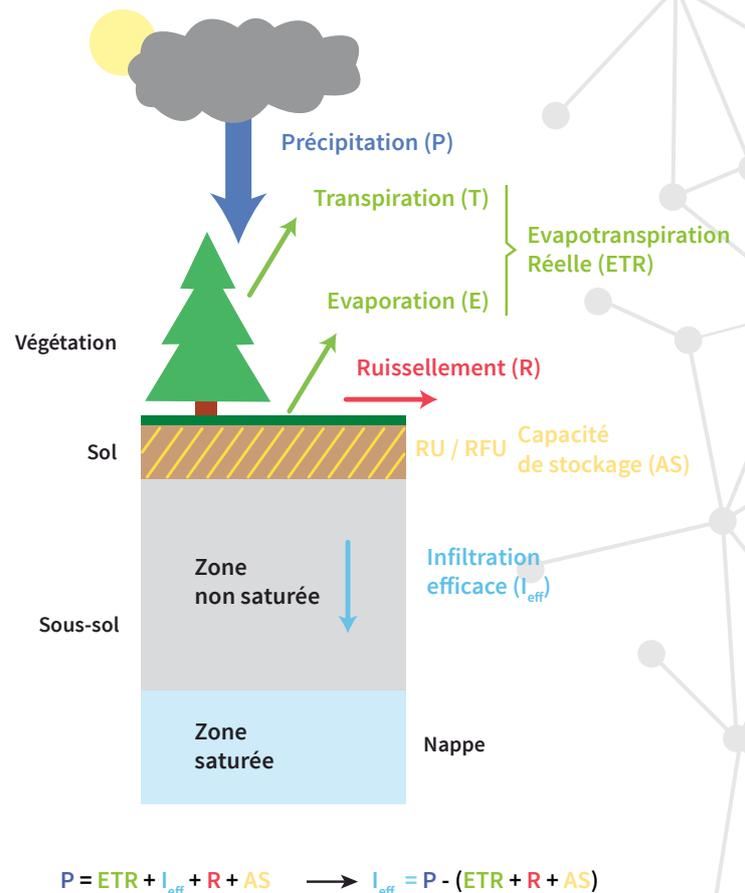


Figure 11 : Bilan des essais de phytostabilisation sur le crassier métallurgique Industeel France / ArcelorMittal (site Châteauneuf, Loire - 42)

→ • La phytostabilisation aidée d'un crassier métallurgique

En conclusion, le traitement du site par phytostabilisation aidée représente une alternative pertinente à un confinement par couverture géosynthétique. Le procédé permet à la fois une réduction très significative des flux de contaminants vers les milieux récepteurs (air et nappe), tout en accélérant une restauration écologique du crassier et la formation d'un technosol présentant des fonctions propres (rétention d'eau, puit de carbone minéral et organique, habitat pour la biodiversité, intégration paysagère...). Cette solution a été retenue par l'industriel pour le réaménagement de son crassier. Sa mise en œuvre est en discussion avec les services de l'état et devrait intervenir à l'automne 2017.



2. Recommandations

- S'entourer de professionnels du génie végétal dès les premières étapes du projet
- Disposer d'une caractérisation pédologique du site et de son degré de contamination (concentrations totales et biodisponibles)
- Choisir des amendements conformes à la réglementation et répondant aux objectifs visés (diminution de la biodisponibilité des polluants et/ou amélioration des potentialités agronomiques), disponibles à moindres coûts (sous-produits industriels, boues compostées...) et faciles à mettre en œuvre
- Réaliser si besoin des tests préliminaires pour s'assurer de la pertinence des amendements retenus au regard des conditions environnementales des sites à gérer et de leurs futurs usages
- Sélectionner des plantes herbacées et/ou arborées adaptées aux conditions pédoclimatiques locales en s'assurant de leur caractère non invasif et non allergène et en adéquation avec les objectifs de gestion et l'usage futur du site. Cette sélection gagne à s'appuyer sur un inventaire floristique préalable du site
- Constituer une communauté associant au moins des graminées et des légumineuses lorsqu'il est nécessaire de couvrir rapidement la surface du sol et de contribuer à l'amélioration de ses paramètres physico-chimiques et biologiques
- S'assurer de la disponibilité des espèces sélectionnées sur le marché européen de la semence. Si ces taxons ne sont pas disponibles, choisir des espèces écologiquement similaires
- Intégrer dans la conception du projet un suivi temporel de l'état de la couverture végétale, de la dynamique des communautés végétales et de la biodisponibilité des polluants afin de vérifier l'adéquation aux objectifs de gestion
- Intégrer la perception sociale dans la conception et la maintenance du mode de gestion proposé avec pour objectif de s'assurer que le projet répond bien *in fine* aux attentes des populations concernées.

3. Références

- **PHYTENER** : Développement de la phytostabilisation sur des sols contaminés par des métaux à des fins énergétiques : viabilité écologique, intérêt social et bilan économique.
www.ademe.fr/phytener-developpement-phytostabilisation-sols-contamines-metaux-a-fins-energetiques
- **PHYSAFIMM** : la phytostabilisation, méthodologie applicable aux friches industrielles métallurgiques et minières.
www.ademe.fr/physafimm-phytostabilisation-methodologie-applicable-friches-industrielles-metallurgiques-minieres.

4. Liste des auteurs

Francis Douay, ISA-Lille, Yncrea Hauts-de-France (contact : francis.douay@yncrea.fr) ; Olivier Faure, Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS (contact : ofaure@emse.fr)

Contribution à la relecture : Géraldine Bidard (ISA-Lille, Yncrea Hauts-de-France) ; Valérie Bert (INERIS) ; Frédérique Cadière (ADEME)

EVALUATION DE LA BIODISPONIBILITÉ DES POLLUANTS DANS LE SUIVI DES PHYTOTECHNOLOGIES :

OUTILS D'ESTIMATION DES TRANSFERTS ET EXPOSITION DES ÉCOSYSTÈMES



Avant-propos

Les phytotechnologies conduisent à gérer les contaminants en conservant les sols en place, avec pour objectifs de stabiliser les polluants (phytostabilisation), de les dégrader (phyto-dégradation) ou de les extraire progressivement (phytoextraction). En conséquence, comme pour toute méthode *in situ*, ce type de gestion doit s'accompagner d'un monitoring des sites, afin de s'assurer que les risques environnementaux associés à la présence des contaminants restent durablement acceptables dans le cadre de l'usage prévu du sol.

Dans ce contexte, un paramètre essentiel concerne la détermination, aussi précise que possible, de la biodisponibilité des contaminants, c'est-à-dire de la fraction de contaminant susceptible d'interagir avec des organismes vivants.

L'objet de ce chapitre est de présenter ce concept de biodisponibilité, en le positionnant dans les démarches opérationnelles d'une évaluation des phytotechnologies, puis, plus généralement, d'une évaluation des risques pour les écosystèmes.

1. La biodisponibilité : principes fondamentaux

D'un point de vue strictement réglementaire, les procédures d'évaluation de la qualité des sols doivent identifier et quantifier les contaminants présents. Cette approche, si elle permet de caractériser le danger potentiel d'un sol en renseignant sur ses concentrations totales en polluants, est sécuritaire pour l'évaluation du risque mais ne garantit pas toujours son réalisme. De fait, quelle que soit la contamination considérée, le risque (R) qui lui est associé est classiquement décrit par le modèle « Danger-Transfert-Cible » [$R = f(D, T, C)$]. L'évaluation du risque doit donc être basée non seulement sur une identification précise du danger (D, nature et concentrations totales des substances présentes) et des cibles à protéger (C, populations humaines, eaux souterraines, espèces remarquables, écosystèmes...), mais aussi sur une caractérisation de la mobilité potentielle des contaminants et de leur transfert (T) vers les organismes exposés, c'est-à-dire de leur biodisponibilité.

Une évaluation précise de la biodisponibilité des contaminants est particulièrement importante dans les procédures d'évaluation des risques écologiques et dans la réalisation des « plans de gestion ». En effet, les contaminants présents dans un sol sont toujours répartis entre les phases liquides, gazeuses et solides, et ils sont plus ou moins fortement liés à la matrice organo-minérale. Selon la composition de cette matrice (notamment ses teneurs en argile, matières organiques, oxydes et hydroxydes de fer et manganèse, carbonates...) et ses caractéristiques physico-chimiques (CEC, pH, potentiel Redox...), un même contaminant, présent à une concentration donnée, pourra être soit fortement fixé à la phase solide, et donc très peu mobile et faiblement biodisponible, soit au contraire facilement détachable (« labile »), potentiellement soluble et donc fortement biodisponible. Il est évident que dans ces deux cas extrêmes le risque associé sera très différent, alors que le danger initialement évalué sera le même. Malgré un concept très simple (NF EN ISO 17402 : 2008), une évaluation précise de la biodisponibilité n'est cependant pas aisée. De fait, la

mobilité potentielle d'un contaminant dans un sol et son absorption par des organismes vivants dépendent non seulement de sa concentration « labile », mais aussi des espèces considérées, qui, en fonction de leur habitat, de leur mode de vie et de leur régime alimentaire, seront diversement exposées. En conséquence, il est illusoire de chercher à caractériser la biodisponibilité par une seule valeur ; il convient au contraire d'envisager différentes mesures de cette variable, tout en précisant à quel(s) type(s) d'organisme(s) récepteur(s) les résultats sont applicables (part des polluants biodisponible pour les végétaux, pour les invertébrés du sol, pour les escargots...). Par ailleurs, la biodisponibilité d'un contaminant mesurée au temps t , est la résultante d'interactions dynamiques entre le sol et les organismes vivants qui l'habitent ; c'est donc, fondamentalement, un paramètre susceptible d'évoluer avec le temps. Dans le cas d'une gestion par phytotechnologies, ou dans le cadre d'une évaluation des risques écologiques, il est indispensable de disposer de différents outils de monitoring, permettant une évaluation précise de la biodisponibilité des contaminants et de son évolution à moyen et long termes.

D'un point de vue opérationnel, l'évaluation de la biodisponibilité peut être envisagée selon deux angles complémentaires : celui du sol et/ou celui du vivant (Figure 12). **Abordée sous l'angle du sol**, la mobilité potentielle des contaminants est généralement estimée par des méthodes d'extraction chimiques douces, supposées mimer des conditions physico-chimiques environnementalement réalistes (paragraphe 2) ; analysée sous cet angle, la biodisponibilité est alors qualifiée de **disponibilité environnementale**. **Abordée sous l'angle du vivant**, la fraction disponible pour une interaction avec des systèmes biologiques peut être évaluée par des dosages dans des organismes prélevés sur le site étudié, ou par la caractérisation de leurs effets toxiques sur différents organismes du sol ; on parlera alors de **biodisponibilité environnementale**.

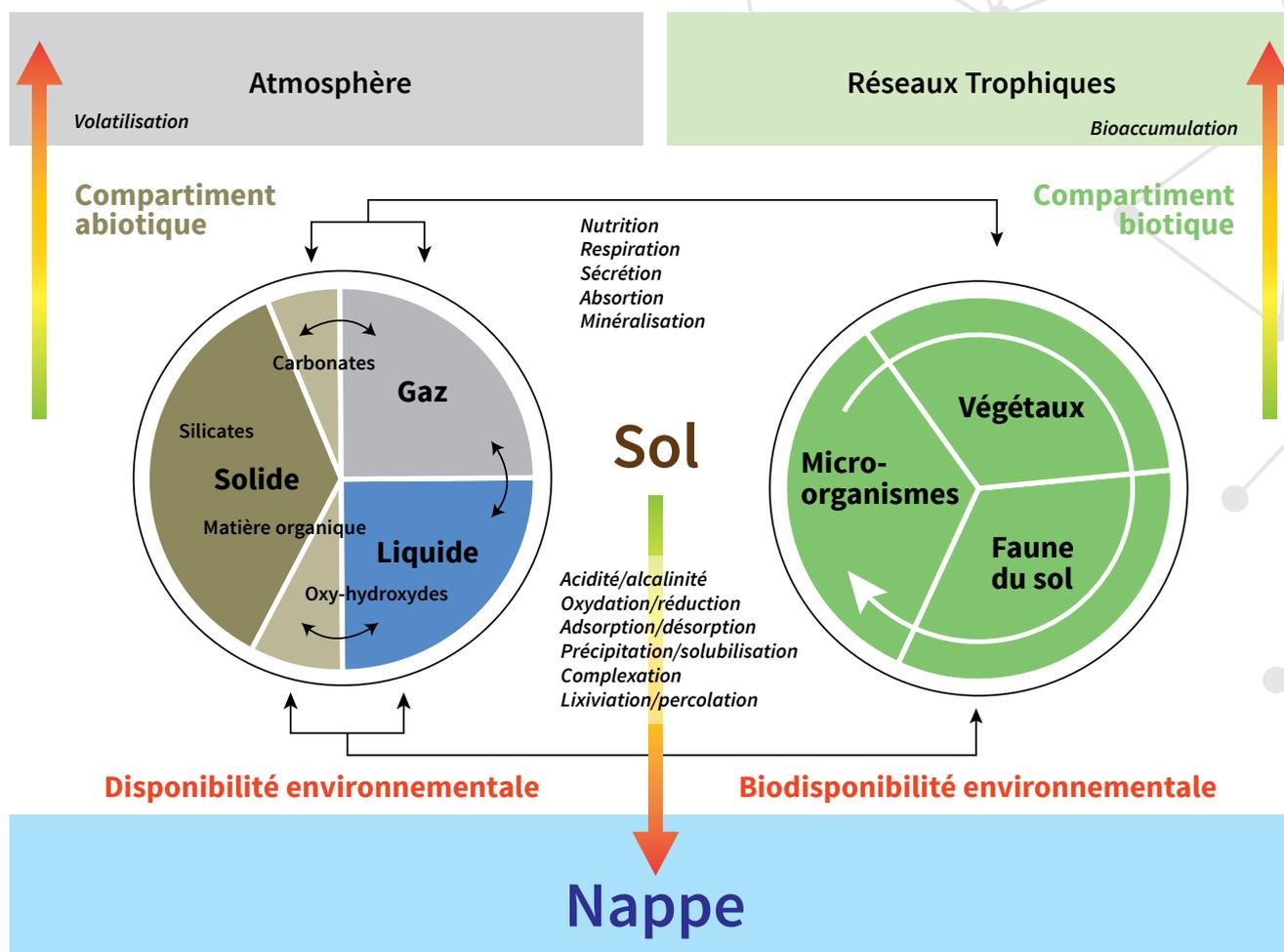


Figure 12 : disponibilité environnementale et biodisponibilité environnementale ; les deux facettes d'une évaluation opérationnelle de la biodisponibilité

Aujourd'hui, plusieurs procédures normalisées ou validées permettent d'évaluer les disponibilité et biodisponibilité environnementales des éléments traces métalliques, mais aussi de différents contaminants organiques. Le but de ce chapitre n'étant pas de présenter ces méthodes en détail, seules les plus utilisées d'entre-elles seront citées ici, en les resituant dans leur contexte opérationnel.



2. Le phytomanagement des sites pollués nécessite une évaluation et un suivi de la phytodisponibilité des contaminants

La gestion d'un site par des phytotechnologies, que ce soit dans une optique de phytostabilisation, de phytoextraction ou de phytodégradation, nécessite évidemment de disposer d'outils permettant d'estimer la biodisponibilité des polluants pour les plantes, c'est-à-dire leur phytodisponibilité. Ces mesures sont indispensables à la fois pour l'étude préalable de faisabilité du projet, et pour évaluer et suivre son efficacité au cours du temps. Dans le cas d'une phytostabilisation, on cherchera à limiter la mobilité des contaminants en utilisant éventuellement des amendements appropriés et des plantes peu accumulatrices (Chapitre 2).

A l'inverse, dans le cas d'une phytoextraction (ou d'une phytodégradation), on cherchera à augmenter la phytodisponibilité des contaminants, de façon à favoriser leur bioaccumulation et/ou biodégradation. Dans les deux cas, les approches utilisées pour évaluer la phytodisponibilité sont essentiellement basées sur l'utilisation de deux types d'outils : des outils chimiques, renseignant sur la disponibilité environnementale, et des outils biologiques, renseignant sur la biodisponibilité environnementale pour les plantes.

2-1. Les approches chimiques : outils d'évaluation de la disponibilité environnementale

Les approches chimiques utilisées pour évaluer la disponibilité environnementale des contaminants consistent à mesurer des fractions qualifiées de « mobiles », « mobilisables » ou « facilement échangeables », obtenues à partir d'extractants plus ou moins forts (eau, solutions salines, acides faibles, agents chélatants...). Dans leur principe, ces démarches considèrent qu'un contaminant donné sera d'autant plus susceptible d'interagir avec des organismes vivants, et notamment d'être absorbé par des plantes, qu'il sera facile à extraire de la matrice solide.

Un grand nombre de méthodes a été proposé dans ce but et plusieurs sont aujourd'hui normalisées. A titre d'exemple, et de façon non exhaustive, les méthodes les plus souvent utilisées pour l'évaluation de la phytodisponibilité des éléments traces métalliques sont des extractions par des solutions de CaCl_2 0,01 M (NEN 5704:1996) ou 0,001 M (ISO/TS 21268-1:2002), de DTPA 0,005 M (ISO 14870:2002) ou de NH_4NO_3 1 M (ISO 19730:2008).

Ces méthodes d'extraction chimiques sont faciles et rapides à mettre en œuvre. Les résultats obtenus sont toutefois différents selon la méthode utilisée ; le choix d'une méthode particulière garde donc une part d'empirisme. Par ailleurs, bien que ces méthodes soient censées refléter la fraction « absorbable » par les plantes - et par extension, par les organismes du sol -, les corrélations avec les teneurs réellement accumulées sont souvent assez faibles et variables selon les types de sols et les espèces considérées.

En d'autres termes, ces méthodes doivent plutôt être considérées comme des outils permettant d'évaluer le « potentiel » de transfert des contaminants vers les végétaux, et non comme des méthodes permettant de prévoir les teneurs effectivement présentes dans les organismes exposés.

2-2. Les approches biologiques : outils d'évaluation de la biodisponibilité environnementale

Contrairement aux approches chimiques, qui s'intéressent au sol, les méthodes permettant d'évaluer la biodisponibilité environnementale s'intéressent aux plantes et visent à répondre, plus directement, à deux questions principales :

- 1) Quelle est l'accumulation effective des contaminants dans les plantes ?
- 2) Ces contaminants entraînent-ils des effets néfastes sur les communautés végétales en place ?

Si ces questions sont simples, les méthodologies permettant d'y répondre ne se développent réellement que depuis quelques années, notamment suite aux travaux engagés dans le cadre des programmes « Bio-indicateurs » (2007-2012) financés par l'ADEME et de projets visant leur application dans différentes situations (par exemple le projet APPOLINE).

Globalement, deux grands types d'outils peuvent être utilisés pour évaluer les transferts et les effets des contaminants sur les plantes :

- **des bio-indicateurs d'accumulation** : organismes dont les teneurs tissulaires en contaminants renseignent sur les teneurs effectivement disponibles dans l'environnement.

Une seule méthode est actuellement normalisée pour les végétaux (ISO 16198:2015 : « test végétal pour l'évaluation de la

phytodisponibilité environnementale des éléments traces pour les plantes », dite « Rhizotest ») et permet d'évaluer la phytodisponibilité des éléments traces métalliques en conditions de laboratoire. Une autre approche, encore non normalisée, a été validée dans le cadre du programme « Bio-indicateurs », pour des mesures directes en conditions de terrain. Il s'agit notamment de l'indice CMT-végétaux (annexe 2), qui permet d'évaluer l'accumulation des ETM à l'échelle des communautés végétales en place.

- **des bio-indicateurs d'effet** : des bioessais de laboratoire basés sur la mesure de la croissance, de la germination et de l'élongation racinaire (norme NF EN ISO 11 269- 1-2-3) permettent d'évaluer « l'état de santé » des plantes. D'autres approches de type « biomarqueurs » ont été développées comme l'analyse de la composition en acides gras foliaires chez les végétaux dite « Indice oméga 3 » (NF XP-X31 233:2012) ou comme la mesure des effets génotoxiques (cassure des chromosomes ou dysfonctionnement du fuseau mitotique) des sols sur une plante supérieure (*Vicia faba*) (NF ISO 29200:2013). A noter que l'Indice Oméga 3 qui est normalisé en conditions de laboratoire est en cours de normalisation pour une application sur le terrain.

Ces bioindicateurs sont présentés plus en détail en annexe 2 de l'ouvrage.

2-3. L'approche TRIADE : vers de nouvelles démarches d'évaluation des risques écologiques

Si les méthodes mentionnées ci-dessus permettent d'évaluer la phytodisponibilité des contaminants et de caractériser leurs effets chez les plantes, elles ne sont cependant pas suffisantes, à elles seules, pour caractériser le risque écologique lié à un site pollué. Dans la mesure du possible, il est donc important d'utiliser une batterie de tests complémentaires, afin d'obtenir une image aussi fidèle que possible de l'impact potentiel d'une contamination sur un site géré par phytomanagement. Dans cet esprit, l'utilisation de « l'approche TRIADE », initialement développée pour la caractérisation des sédiments pollués, a récemment fait l'objet d'un projet d'une norme internationale (PR NF ISO 19204:2015) pour son application à l'évaluation des risques écologiques liés aux sols contaminés.

Selon cette approche, la caractérisation précise du risque lié à un sol pollué doit s'appuyer sur trois éléments de preuve indépendants, issus de trois domaines d'expertise complémentaires: la chimie, l'écotoxicologie et l'écologie (Figure 13).

Selon la méthodologie TRIADE, ces différents éléments de preuve sont acquis selon une approche graduée, par « niveaux » de complexité analytique et de réalisme écologique croissants. Le premier niveau utilise des outils d'investigation simples et peu onéreux, souvent génériques et ayant une signification écologique limitée (par ex. teneurs totales en contaminants du sol, éventuellement complétées par des relevés floristiques sommaires). Si toutefois les résultats sont concordants et suffisants pour permettre une conclusion, l'évaluation peut s'arrêter à ce stade. Dans le cas contraire, un deuxième, voire un troisième niveau d'investigation peut être envisagé, faisant appel à des approches analytiques progressivement plus spécifiques et plus complexes, intégrant un réalisme écologique augmenté (par ex. études *in situ*). L'investigation s'arrête lorsque les éléments de preuves collectées sont suffisamment solides et convergents pour conclure à une absence (ou non) de risque en fonction de l'usage prévu du sol.

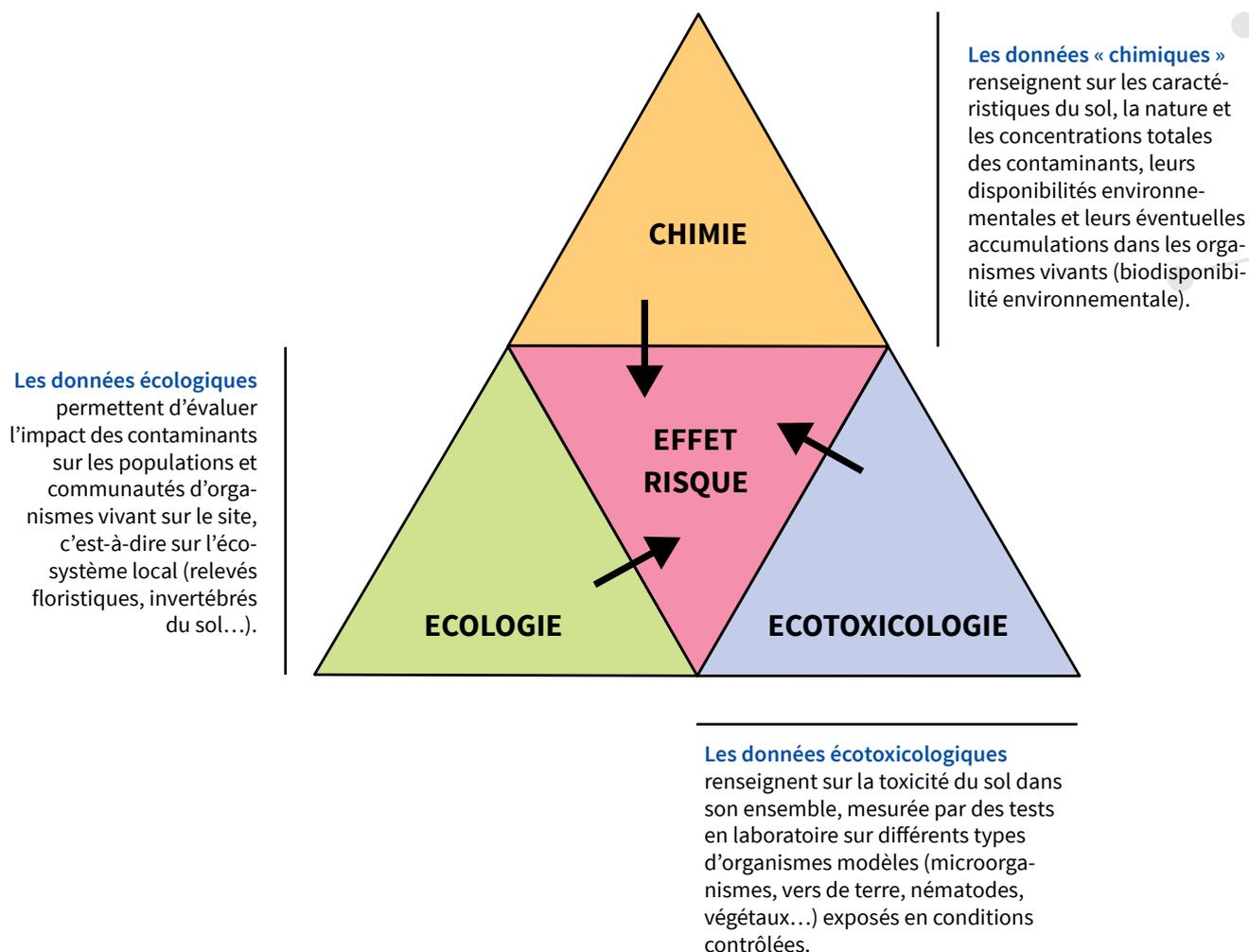


Figure 13: l'approche «TRIADÉ», trois domaines d'expertises fournissant trois éléments de preuve indépendants



3. Exemples d'évaluation intégrée de sites gérés par phytomanagement

3.1. Le projet GREENLAND

Dans le cadre du projet européen GREENLAND, deux batteries de tests ont été pré-sélectionnées afin d'évaluer l'impact de différentes procédures de phytomanagement sur la qualité des sols, une pour quantifier l'exposition aux éléments traces (caracté-

sation chimique du sol) et une pour évaluer l'écotoxicité du sol et sa fonctionnalité (caractérisation écotoxicologique). Ces différents tests ont été appliqués sur des échantillons de sol provenant de 8 sites des partenaires du projet GREENLAND.

→ Résultats :

Sur la base des tests chimiques et écotoxicologiques menés dans le cadre de cette étude, Kumpiene et al. (2014) ont proposé l'extraction chimique au nitrate d'ammonium (1 M) et le test « Plantox » sur le haricot (incluant des mesures de la biomasse racinaire, de la croissance des parties aériennes, et des activités enzymatiques liées au stress oxydant), comme batterie de tests minimale pour comparer et suivre des sites gérés par les phytotechnologies. En plus des tests précités, les auteurs recommandent la réalisation d'une évaluation écologique des sols, à partir de tests standardisés tels que la mesure de la respiration et de la biomasse microbiennes, des activités enzymatiques du sol ainsi que la détermination de la minéralisation de l'azote et de la nitrification dans les sols (Tableau 4).

Test	Élément de preuve	Objectif	Référence
Extraction NH ₄ NO ₃ 1 M	Chimie	Éléments traces phytodisponibles	ISO 19730:2008
Plantox (haricot)	Ecotoxicologie	Phytotoxicité du sol	Vangronsveld et Clijsters, 1992
Plantox (activités enzymatiques)	Ecotoxicologie	Phytotoxicité du sol	Vangronsveld et Clijsters, 1992
Tests additionnels recommandés			
Minéralisation de l'azote, nitrification potentielle et inhibition de la nitrification	Ecologie	Toxicité du sol	NF ISO 14238:2014 NF ISO 15685:2012
Biomasse et respiration microbiennes	Ecologie	Toxicité du sol	NF EN ISO 14240-1:2011 NF EN ISO 16072:2011
Activités enzymatiques	Ecologie	Toxicité du sol	NF EN ISO 23753-1:2011 ISO/TS 22939:2010

Tableau 4 : batterie minimale de tests recommandés et éléments de preuve associés pour évaluer la qualité de sols en phytomanagement.

3.2. Le projet APPOLINE : retour d'expérience sur l'utilisation de bio-indicateurs pour évaluer l'efficacité de la phytostabilisation sur un crassier métallurgique

L'étude réalisée visait à évaluer l'efficacité d'opérations de phytostabilisation aidée en cours sur le site Industeel France / Arcelor Mittal de Châteauneuf à l'aide de bio-indicateurs d'impact (Indices Nématodes et Oméga-3) et d'accumulation (CMT - Végétaux). Ce crassier est constitué de déchets sidérurgiques ayant de fortes teneurs en éléments traces (Cr > 2000 mg kg⁻¹, Ni > 2000 mg kg⁻¹, Mo > 500 mg kg⁻¹, Pb > 150 mg kg⁻¹), une faible teneur

en matières organiques et en éléments nutritifs ainsi qu'un pH très élevé (> 8,5). L'efficacité de la phytostabilisation a été testée avec différents types d'amendements organiques (Bois raméal fragmenté : BRF et Matières d'intérêt agronomique issues du Traitement des eaux : MIATE). Une description plus détaillée du projet de phytostabilisation mené sur ce site est fournie dans le chapitre 2.

→ Résultats :

Transfert vers la végétation

Le calcul de l'indice CMT-Végétaux montre que, quelles que soient les conditions de sol, la végétation des parcelles accumule des éléments traces en quantité supérieure à celle d'une végétation témoin, se développant sur site non contaminé (CMT >> 0). En particulier l'utilisation de BRF conduit à une augmentation de l'accumulation des métaux dans les végétaux ; à l'inverse, un amendement par des MIATE diminue la phytodisponibilité des éléments traces.

Evaluation de l'état de santé du couvert végétal

A partir des notes obtenues suite à la mise en œuvre de l'indice Oméga 3 mesuré sur différentes espèces végétales, les effets liés à la présence de contaminants dans les sols sont moindres sur les zones ayant reçu un amendement organique (MIATE ou BRF) que sur les zones témoins ayant reçu un amendement minéral (NPK).

Ce résultat met en évidence que l'apport des deux amendements (MIATE ou BRF) permet d'améliorer la « qualité » du sol pour les végétaux.

Evaluation du fonctionnement biologique d'un sol

Les apports des amendements de type MIATE et de type BRF ont un effet positif sur le développement des activités biologiques dans le sol, évaluées à partir de l'étude de la structure et de la diversité des communautés nématofauniques. Cinq ans après la mise en place des expérimentations, la diversité nématofaunique reste toutefois assez faible, et restreinte à un nombre extrêmement limité de groupes biologiques.

Le gestionnaire avait pour obligation la mise en œuvre d'un mode de gestion et de réhabilitation du site. Les bioindicateurs ont montré que les apports d'amendements permettent d'améliorer l'activités biologiques des sols et la santé des végétaux. Cependant, le bioindicateur d'accumulation a montré que l'apport de BRF induit une augmentation de l'accumulation des métaux dans les végétaux.

L'ensemble des analyses réalisées a permis d'orienter la stratégie de réhabilitation du site avant le passage à grande échelle.

4. Bilan

Il est aujourd'hui évident que les procédures réglementaires d'évaluation des sols pollués, basées sur la seule mesure des teneurs totales en contaminants, peuvent conduire à une évaluation surestimée du risque. Il apparaît donc indispensable de compléter les analyses « réglementaires », par un ensemble de données renseignant sur la biodisponibilité des contaminants afin d'améliorer le réalisme de cette évaluation. Dans un projet de phytomanagement, la disponibilité environnementale (reflétée par des extractions chimiques « douces ») et la phytodisponibilité (évaluée par des bioindicateurs d'accumulation ou d'effet)

sont deux paramètres à mesurer, *a minima*. Pour des évaluations plus générales mais aussi plus précises du risque écologique, des approches plus complètes, conduites sur la base de la démarche TRIADE, doivent être menées. Quoi qu'il en soit, les approches et les méthodes permettant d'évaluer l'efficacité des phytotechnologies et les risques résiduels liés à une gestion *in situ* des sites contaminés sont encore récentes et il n'existe pas de procédure type, applicable à toute situation. Il est très probable que des protocoles plus précis seront proposés à la normalisation dans les prochaines années.



5. Références

- **APPOLINE** – « Applicabilité à l'étude des sites pollués du biomarqueur lipidique des végétaux et du bioindicateur nématofaune » - Programme ADEME GESIPOL 2013
- ISO 14870 (2002) - Qualité du sol - Extraction des éléments en traces par une solution tamponnée de DTPA.
- ISO 16198 (2015) - Qualité du sol - Test végétal pour l'évaluation de la biodisponibilité environnementale des éléments traces pour les végétaux.
- ISO 17402 (2008) - Qualité du sol – Lignes directrices pour la sélection et l'application des méthodes d'évaluation de la biodisponibilité des contaminants dans le sol et les matériaux du sol.
- ISO 19730 (2008) - Qualité du sol - Extraction des éléments traces du sol à l'aide d'une solution de nitrate d'ammonium.
- ISO/TS 21268-1 (2002) - Qualité du sol -- Modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol -- Partie 1: Essai en bûche avec un rapport liquide/solide de 2 L/kg de matière sèche
- ISO/TS 22939 (2010) - Qualité du sol -- Mesure en microplaques de l'activité enzymatique dans des échantillons de sol en utilisant des substrats fluorogènes.
- NEN 5704 (1996) – Soil – Sample preparation of Soil – Extraction with a calcium chloride solution (0.01 Mol/L)
- NF EN ISO 14240-1 (2011) - Qualité du sol - Détermination de la biomasse microbienne du sol - Partie 1 : méthode par respiration induite par le substrat.
- NF EN ISO 16072 (2011) - Qualité du sol - Méthodes de laboratoire pour la détermination de la respiration microbienne du sol.
- NF EN ISO 23753-1 (2011) - Qualité du sol - Détermination de l'activité des déshydrogénases dans les sols - Partie 1 : méthode au chlorure de triphényltétrazolium (CTT).
- NF ISO 14238 (2014) - Qualité du sol - Méthodes biologiques - Détermination de la minéralisation de l'azote et de la nitrification dans les sols, et de l'influence des produits chimiques sur ces processus.
- NF ISO 15685 (2012) - Qualité du sol - Détermination de la nitrification potentielle et inhibition de la nitrification - Essai rapide par oxydation de l'ammonium.
- PR NF ISO 19204 : 2015 – Procédure d'évaluation des risques écologiques spécifiques aux sites et sols contaminés (approche TRIADE)
- **Programme « Bio-indicateurs »** (2007-2012) financé par l'ADEME (ecobiosoil.univ-rennes1.fr/ADEME-Bioindicateur/index.php)
- 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.
- Vangronsveld J, Clijsters H. A biological test system for the evaluation of metal phytotoxicity and immobilization by additives in metal-contaminated soils. In: Merian E, Haerdi W, editors. *Metal compounds in environment and life, 4 (interrelation between chemistry and biology)*. Northwood: Science and Technology Letters; 1992. p. 117-25.
- XP-X31 233 (2012) - Qualité du sol - Détermination des effets des polluants sur la flore du sol - Effets des sols contaminés sur la composition en acides gras foliaires de *Lactuca sativa*.
- **GREENLAND** - "Gentle REmediation of Trace Element Contaminated Land", 2011-2014 (www.greenland-project.eu/),

6. Liste des auteurs

Olivier Faure, Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS (contact : ofaure@emse.fr), Valérie Bert, INERIS (contact : valerie.bert@ineris.fr)

Contribution à la relecture : Francis Douay (ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France) ; Cécile Grand et Frédérique Cadière (ADEME)

VALORISATION DE LA BIOMASSE ISSUE DES PHYTOTECHNOLOGIES ENJEUX ET FILIÈRES ÉNERGÉTIQUES

Avant-propos

Ce chapitre a pour objectif d'une part, de présenter des éléments techniques et sociaux à travers les retours d'expériences de projets financés par l'ADEME ou dans lesquels l'ADEME était fortement impliquée et d'autre part, de replacer ces éléments dans le contexte réglementaire. Sur ces aspects, ce chapitre ne traite que des éléments traces métalliques (ETM) et ne détaille

que les procédés de conversion de la biomasse en énergie bien que d'autres voies de valorisation soient explorées (chimie verte, bioraffineries, hydrométallurgie). Les aspects économiques de la valorisation de la biomasse sont traités dans le chapitre 5.

1. Contexte réglementaire

La Directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables, modifiée par la Directive 2015/1513/CE, crée un cadre commun pour l'utilisation des énergies renouvelables dans l'Union européenne (UE) afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de promouvoir des transports plus propres. Pour ce faire, elle fixe des objectifs avec l'ambition générale d'atteindre une part de 20 % de l'énergie provenant de sources renouvelables dans l'énergie de l'UE et une part de 10 % de ce type d'énergie dans les transports d'ici à 2020.

La directive définit l'énergie produite à partir de sources renouvelables comme étant une énergie produite à partir de sources non fossiles renouvelables, parmi lesquelles la biomasse. La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture, de la sylviculture et des industries

connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux.

Afin d'éviter les conflits d'usage, les terres arables ou riches en biodiversité sont de préférence non utilisées pour une production de biomasse non alimentaire. L'utilisation de sols qui ont été sévèrement dégradés ou fortement pollués et qui ne peuvent, par conséquent, être exploités dans leur état actuel à des fins agricoles, pour une alimentation humaine et animale, est un moyen d'augmenter les surfaces disponibles pour les cultures énergétiques. A cette fin, la directive encourage la restauration de ces terres pour la production de biofuels et de bioliquides, en accordant notamment un bonus d'émission de gaz à effet de serre. Au moment de l'écriture de ce chapitre, aucune mise en œuvre pratique en France et en Europe n'a cependant été recensée.

2. Biomasses issues des phytotechnologies : source d'énergie renouvelable

Dans ce contexte, les phytotechnologies peuvent contribuer aux objectifs de la directive pour la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. En plus de contribuer à restaurer la qualité et les fonctions du sol, les phytotechnologies peuvent produire de la biomasse renouvelable (herbacée ou ligneuse) utilisable dans différentes voies de valorisation énergétique ou matière. En fonction de la phytotechnologie utilisée sur le site pollué, dépendant du comportement de(s) la plante(s) vis-à-vis des polluants, des paramètres physico-chimiques et des caractéristiques agronomiques des sols, la biomasse récoltée peut contenir des ETM dont les concentrations peuvent être supérieures à celles habituellement mesurées dans une végétation similaire poussant sur des sols non pollués. Ainsi, l'objectif de la phytoextraction est de produire une biomasse végétale enrichie en ETM tandis

que celui de la phytostabilisation (aidée) est de produire une biomasse végétale ayant des concentrations proches de leurs concentrations physiologiques. Cette biomasse végétale peut intégrer, dans les conditions fixées par la réglementation, les filières de valorisation existantes à condition qu'elle ne perturbe pas le fonctionnement et la performance des procédés et que les émissions d'ETM soient maîtrisées afin de prévenir les transferts dans l'environnement. Depuis quelques années, des tests en laboratoire et en pilotes industriels sont conduits pour définir les paramètres d'entrée de telles biomasses dans les filières existantes et les éventuelles limites ou contraintes. Ces éléments sont nécessaires dans la perspective du développement à grande échelle de ce gisement. Plus globalement, ils permettront de confirmer la faisabilité de la filière, d'un point de vue technique comme économique.

3. Les différents procédés de conversion de la biomasse en énergie

La biomasse végétale peut être convertie en énergie par des procédés thermiques ou biologiques (Tableau 5). La combustion est le procédé le plus couramment utilisé pour convertir la biomasse en gaz valorisé en chaleur et en électricité. La torréfaction et la pyrolyse sont deux procédés thermochimiques en émergence. Le produit généré par la torréfaction est un combustible solide de haute qualité. Le gaz de synthèse (syngas) est

un mélange gazeux combustible produit par pyrolyse dont les usages peuvent être variés (ex : carburant). La méthanisation (ou fermentation anaérobie) est un procédé biologique de dégradation partielle de la matière organique qui produit du biogaz. Comme pour le syngas, ses valorisations sont diverses (ex : injection dans le réseau de gaz naturel après épuration).

Tableau 5 : voies de valorisation énergétique de la biomasse végétale traitées dans le chapitre 4.

Biomasse	Bois, sous-produits de l'industrie du bois	Procédés thermochimiques		Valorisation
		Combustion	Cendres sous-foyer	Retour au sol*
Cendres volantes				
Gaz	Chaleur, électricité			
Torréfaction	Biomasse torréfiée		Combustible	
	Pyrolyse	Biochar	Retour au sol*	
		Huile	Chimie, transport, etc.	
Syngaz		Carburant, etc.		
Biomasse	Déchets agricoles, forestiers, d'espaces verts, etc.	Procédés biologiques		Valorisation
		Méthanisation	Digestat	Retour au sol*
			Biogaz	Chaleur, électricité

* Sous certaines conditions

Procédés thermochimiques : combustion, torréfaction, pyrolyse

Ces procédés ont récemment été mis en œuvre sur des biomasses ligneuses (saules, peupliers, miscanthus) résultant des phytotechnologies à l'échelle de pilotes industriels (projets GREENLAND, PHYTOPOP, BIOFILTER, PHYTENER).

- Ces projets mettent en évidence que ces biomasses peuvent être valorisées dans des chaudières collectives ou industrielles équipées d'installations efficaces de dépoussiérage. Les bois de saules et de peupliers utilisés dans les essais de combustion contenaient environ 6-7 et 285-288 mg kg⁻¹ de cadmium (Cd) et de zinc (Zn), respectivement, qui sont des valeurs supérieures aux valeurs physiologiques pour ces essences ligneuses.
- Ces projets mettent également en évidence la nécessité de séparer les cendres sous-foyer des cendres volantes pour permettre le retour au sol des cendres sous-foyer, ces dernières étant moins chargées en polluants que les cendres volantes. Les concentrations en Cd et en plomb (Pb) des cendres sous-

foyer issues de la combustion du miscanthus, une espèce utilisée en phytostabilisation (Chapitre 2), sont comparables à celles mesurées dans les cendres sous-foyer issues de la combustion de paille de blé ou d'écorce et copeaux d'épicéa.

- Les essais de torréfaction et de pyrolyse ont permis de mieux comprendre le comportement des ETM en fonction de la température opérée et des différents facteurs d'influence, notamment du chlore.

Procédés biologiques : méthanisation

La distribution des ETM dans le biogaz et le digestat a été étudiée. Du fait notamment de la réduction massive qui s'opère pendant la méthanisation, les ETM se concentrent dans la fraction solide du digestat. Des concentrations en ETM élevées dans la biomasse de phytoextraction pourraient conduire à l'impossibilité de valoriser le digestat par retour au sol. A l'inverse, un digestat de biomasse de phytostabilisation, dont les teneurs en ETM seraient proches des valeurs physiologiques devrait pouvoir être valorisé par retour au sol (Witters et al., 2012, GREENLAND).

4. Les principaux enjeux

Les enjeux de la gestion de la biomasse produite sur sols pollués relèvent de son acceptabilité, de son statut réglementaire et de son bilan économique (Chapitre 5). Les projets GREENLAND et PHYTENER ont plus particulièrement approfondi les questions de l'acceptabilité de cette biomasse par les acteurs des filières

bois énergie et méthanisation (GREENLAND) et par les agriculteurs, populations et collectivités d'un projet de phytotechnologies (PHYTENER). Les aspects réglementaires connus au moment de l'écriture de ce chapitre sont présentés sur les filières de combustion, pyrolyse, torréfaction et méthanisation.



4-1. L'acceptabilité des biomasses issues des phytotechnologies : un enjeu majeur du développement des filières

Acceptabilité par les acteurs des filières : exemple du projet GREENLAND

Dans le projet GREENLAND, des enquêtes ont été réalisées en 2012 et 2013 auprès de 8 opérateurs de chaudières à biomasse (en France, Allemagne et Suède) et de 11 plateformes de méthanisation (en France, Allemagne et Autriche) pour apprécier l'acceptabilité et les limites potentielles à l'utilisation de plantes issues des phytotechnologies dans ces installations. Ces enquêtes abordaient les caractéristiques des installations et des biomasses végétales utilisées, les analyses effectuées et la connaissance des phytotechnologies.

Acceptabilité par les opérateurs de plateformes de méthanisation

8 des 11 opérateurs questionnés ne connaissaient pas les phytotechnologies. Interrogés sur l'acceptation d'une biomasse issue de phytostabilisation, les opérateurs ont estimé qu'ils pourraient accepter cette biomasse dans leurs installations après avoir vérifié ses concentrations en ETM et à condition que les éventuels polluants contenus dans cette biomasse n'occasionnent pas d'effets négatifs sur leurs équipements et la performance des micro-organismes et qu'il y ait un intérêt économique.

Concernant l'acceptation de biomasses issues de phytoextraction, 2 des 11 opérateurs ne l'accepteraient pas en première intention. Les autres opérateurs pourraient accepter des plantes enrichies en métaux dans leurs installations, après avoir vérifié les concentrations en ETM dans le digestat, en plus des conditions énoncées précédemment.

Les principaux freins perçus :

Finalement, les opérateurs pensaient qu'il pourrait y avoir plus de désavantages que d'avantages à utiliser des plantes ayant poussé sur des sols pollués, surtout des plantes issues de la phytoextraction car ils devraient probablement réaliser davantage de contrôles et, éventuellement, modifier leurs installations. En termes d'image, les opérateurs étrangers ont mentionné la crainte de voir leur activité assimilée à du traitement de déchets.

Les principaux avantages perçus :

En termes d'avantages, les opérateurs ont principalement mis en avant la diversification des sources d'approvisionnement et la non compétition avec des terres utilisées pour l'alimentation.

Acceptabilité par les acteurs de la filière bois-énergie

4 des 8 opérateurs questionnés ne connaissaient pas les phytotechnologies. 6 opérateurs considéraient le bois produit sur des sols pollués comme ayant des concentrations proches de celles mesurées dans du bois issu de forêts. Dans ce contexte, le bois issu de sols pollués peut être considéré comme une biomasse et non comme un déchet. Cette perception était logiquement motivée par la prise en compte des caractéristiques du bois plutôt que du lieu où le bois avait poussé. Par contre, du bois enrichi en ETM issus de phytoextraction était considéré intuitivement par 5 des opérateurs comme un déchet. Les raisons de ce choix étaient motivées par le fait que les cendres pourraient ne plus être valorisables par retour au sol et que leurs équipements pourraient être impactés par les ETM.

Les principaux freins perçus :

Les acteurs de la filière bois ont pensé qu'ils devraient effectuer davantage de contrôles, qu'ils pourraient avoir à modifier leurs installations et que celles-ci risqueraient d'être assimilées à du traitement de déchets.

Les principaux avantages perçus :

Les opérateurs ont mis en avant la diversification des sources d'approvisionnement et la non compétition avec des terres utilisées pour l'alimentation. Ils pensaient également que le bois issu des phytotechnologies pourrait être moins cher que le bois habituellement commercialisé.

→ Conclusions de l'étude d'acceptabilité par les acteurs des filières

Les résultats des questionnaires suggèrent que les biomasses végétales issues des phytotechnologies pourraient être utilisées en méthanisation et en combustion, sous certaines conditions. Selon les opérateurs, les limites majeures proviendraient des contrôles supplémentaires qu'ils pourraient être amenés à réaliser sur la biomasse, les émissions et leurs installations, engendrant potentiellement des coûts supplémentaires. Le prix de la biomasse issue des phytotechnologies, s'il est équivalent ou inférieur à celui du marché, pourrait argumenter en faveur de l'utilisation de ces plantes. De même, les plantes issues de la phytostabilisation semblaient poser moins de difficultés et par conséquent bénéficiaient d'après les acteurs des filières questionnées d'une meilleure acceptabilité que les plantes issues de la phytoextraction.

Acceptabilité par les acteurs locaux : exemple du projet PHYTENER

Dans le cadre du programme PHYTENER, deux filières de valorisation de la biomasse produite, miscanthus et bois, ont été évaluées sur le plan de la perception sociale et de l'acceptabilité de la phytostabilisation au moyen de 320 enquêtes qualitatives auprès de la population vivant dans 4 communes localisées sur le site atelier Metaleurop (Région Hauts-de-France), dont 12 agriculteurs et des représentants de 5 collectivités locales.

Acceptabilité par la population locale

58 % des personnes interrogées n'ont pas d'attentes vis-à-vis du devenir des terres contaminées. La catégorie des « artisans, commerçants, chefs d'entreprises » a majoritairement manifesté des attentes (62 %), espérant notamment l'installation de nouvelles activités économiques. Outre des perspectives d'embauche en lien avec la mise en place d'une filière de valorisation de la biomasse produite, les attentes en termes d'activités non polluantes et de « dépollution » des sols sont aussi très fortes (37 % des personnes interrogées). Malgré la faible proportion de personnes interrogées et déclarant avoir des attentes en matière de dépollution, environ 83 % sont favorables aux boisements des terres agricoles polluées et à l'installation de cultures de miscanthus. Ce score est néanmoins à relativiser, 16 % seulement des personnes interrogées connaissant le miscanthus. Selon 65 % des personnes interrogées, la mise en place de cultures énergétiques et l'installation d'une chaudière utilisant les biomasses produites sur le site doivent être prises en charge par les collectivités territoriales.

Acceptabilité par les agriculteurs concernés

11 agriculteurs vendent leurs productions aux industries de l'agroalimentaire et pour l'alimentation animale ; 5 d'entre eux pratiquent la vente directe. Jusqu'en 2010, les productions agricoles n'étaient parfois pas conformes à la réglementation en vigueur pour leur commercialisation à destination de l'alimentation humaine dès que les concentrations en Cd dans les sols excèdent 4 mg kg^{-1} . Bien que les agriculteurs aient exprimé une certaine déception et une lassitude quant à l'absence de projets concrets concernant la réhabilitation de la zone affectée par les activités passées de Metaleurop, la phytostabilisation et la valorisation de la biomasse produite en énergie ont été considérées par la majorité (8 agriculteurs) comme une piste intéressante. Les agriculteurs souhaitent des conseils techniques ainsi que la preuve d'une rentabilité de la filière. Les incertitudes sur la rentabilité constituent la principale résistance des agriculteurs à la mise en place de cultures de miscanthus sur leurs terres.

Acceptabilité par les collectivités territoriales

Pour les 5 représentants des collectivités rencontrés, la contamination des sols pèse sur un certain nombre de projets et d'activités sur le long terme comme l'agriculture. La possibilité de développer la culture de miscanthus à des fins énergétiques est bien perçue. Les représentants des communes souhaitent un positionnement et des actions de la communauté d'agglomérations. Le développement de cette filière est préféré à celle d'un boisement plus contraignant au regard des projets d'urbanisme. Un accompagnement scientifique et technique est souhaité. Les questions techniques posées portent notamment sur la possibilité de mélanger des biomasses de différentes natures, les coûts et les aides potentielles.

→ Conclusions de l'étude d'acceptabilité par les acteurs locaux

Les enquêtes ont montré que l'alimentation d'une chaudière par du miscanthus obtenu sur des sols contaminés par des ETM constitue une piste à explorer sur le secteur étudié. Elles ont mis en évidence un besoin en termes de communication sur l'utilisation de cette biomasse. Compte tenu des attentes très variables, cette communication doit être ciblée en fonction des populations : agriculteurs, élus, utilisateurs des biomasses... De plus, si la viabilité technique et économique de cette valorisation du miscanthus n'est plus à démontrer, un accompagnement scientifique s'avère nécessaire pour passer à une phase opérationnelle. Ceci passe aussi par la mise en place d'une logique de projet territorial incluant le soutien des élus à une agriculture fortement pénalisée du fait de la contamination des sols par plus d'un siècle d'activités métallurgiques.

4-2. Les enjeux réglementaires liés à la biomasse issue des phytotechnologies

Statut de la biomasse

La classification de la biomasse végétale issue de sols pollués (biomasse ou déchets) est essentielle pour choisir la filière de valorisation appropriée. A l'heure actuelle, cette question reste ouverte aux échelles nationale et européenne. Parmi les aspects qui devraient être considérés, peuvent être cités : 1) la définition de déchet et la notion d'abandon, 2) le fait que la biomasse soit produite sur un sol pollué et l'absence d'une définition commune à l'échelle européenne d'un sol pollué, 3) les réglementations concernant les filières de valorisation de la biomasse et les définitions de la biomasse dans ce contexte, 4) la directive sur la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et les plans nationaux qui en découlent et 5) les critères de sortie de statut de déchet.

Application de la réglementation française sur la combustion à des biomasses ligneuses issues des phytotechnologies

Résumé de la réglementation française sur la combustion

Le régime de classement des installations de combustion sous la rubrique 2910, combustion de la nomenclature des installations classées, est basé sur la puissance thermique nominale de l'installation et du type de combustible utilisé (Tableau 6). A partir de la définition d'une biomasse, précisée dans la rubrique 2010, la biomasse végétale issue des phytotechnologies pourrait être classée en produits composés d'une matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique (a) ou déchets tels que déchets végétaux agricoles ou forestiers (b(i)) ou (b(v)) déchets de bois. A chaque régime de classement correspond l'un des arrêtés ministériels publiés en 2013 et fixant les exigences environnementales à respecter par les installations.



Tableau 6. Catégories d'installation de combustion en fonction de la puissance thermique nominale (P) et du type de combustible accepté dans chaque catégorie.

Catégorie	Déclaration (2 MW < P < 20 MW)	Enregistrement (0,1 MW < P < MW)	Autorisation (P > 20 MW)
Déclaration (2 MW < P < 20 MW)	a - b(i) – b(iv) b(v) connexes de scierie et « biomasse issue de déchet » ayant subi une procédure de sortie de déchet	b(ii) – b(iii) b(v) : sauf connexes de scierie	a – b(i) à b(v)

a Matière végétale agricole ou forestière susceptible d'être employée comme combustible en vue d'utiliser son contenu énergétique

b(i) Déchets végétaux agricoles ou forestiers

b(ii) Déchets végétaux provenant du secteur industriel de la transformation alimentaire, si la chaleur produite est valorisée

b(iii) Déchets végétaux fibreux issus de la production de pâte vierge et de la production de papier à partir de pâte, s'ils sont coïncinés sur le lieu de production et si la chaleur produite est valorisée

b(v) Déchets de bois

Exemple d'application de la réglementation dans le cadre du projet GREENLAND

Dans le cadre du projet GREENLAND, les résultats d'essais de combustion réalisés sur des biomasses issues de différentes essences ligneuses de saules et de peupliers, brûlées seules ou en mélange, ont été confrontés aux exigences des arrêtés encadrant la combustion de biomasse. Cet exercice permet d'illustrer les possibilités d'utiliser en combustion des bois provenant d'essais de phytoextraction et en épandage les sous-produits issus de leur combustion (cendres sous-foyer). Les bois issus de phytoextraction ont été volontairement utilisés pour les essais de combustion car ils constituent un scénario majorant.

En fonction du type d'installation, les exigences concernant les concentrations ETM dans le combustible, les cendres sous-foyer et les cendres volantes diffèrent. Les valeurs limites à ne pas dépasser considérées dans la réglementation pour les installations soumises à déclaration et à enregistrement ainsi que les valeurs issues des essais de combustion du projet GREENLAND sont rapportées dans le Tableau 7 pour comparaison.

Tableau 7. Concentrations maximales réglementaires pour les combustibles utilisables en installations soumises à enregistrement et répondant à la définition de déchet de bois b(v), pour les cendres sous-foyer dans le cas où l'épandage est considéré ; et volantes, et concentrations mesurées dans les bois ayant servi aux essais de combustion (saule S1, peuplier P1, mélange saule S2 / peuplier P2), les cendres sous-foyer et volantes associées.

(mg kg ⁻¹ poids sec)	Cd	Zn
Valeur maximale combustible	5	200
Saule S1	2	91
Peuplier P1	4	102
Mélange saule S2/peuplier P2	39	929
Valeur maximale cendres sous-foyer (1)	10	3000
Saule S1	12	946
Peuplier P1	18	766
Mélange saule S2 /peuplier P2	42	2608
Valeur maximale cendres volantes (2)	130	15000
Saule S1	759	38476
Peuplier P1	436	12154
Mélange saule S2 /peuplier P2	6279	247868

(1) En régimes de déclaration et d'enregistrement, les cendres sous-foyer peuvent être épandues.

(2) En régime d'enregistrement, cendres volantes issues de la combustion de déchets répondant au b(v) de la définition de biomasse

Si la biomasse issue des phytotechnologies est considérée selon la réglementation en vigueur comme de la biomasse (a), la comparaison avec les valeurs limites du Tableau 7 n'est pas pertinente. Au contraire, si cette biomasse est considérée comme b(v), une interprétation préliminaire peut être proposée. Les concentrations en Cd et en Zn dans le saule S1 et le peuplier P1

ne dépassent pas les valeurs réglementaires. Par contre, le mélange saule S2 / peuplier P2 dépasse ces valeurs. Concernant les cendres volantes et sous-foyer, les concentrations mesurées dépassent toutes les valeurs réglementaires, au moins pour un élément métallique. Dans ce cas précis, le retour au sol des cendres sous-foyer serait interdit.

Essais de combustion et réglementation : conclusions et perspectives du projet GREENLAND

- A partir de la réglementation française en vigueur, trois options pourraient être envisagées pour classer la biomasse issue de phytoextraction ou de phytostabilisation moins chargée en ETM : produits constitués de matière végétale agricole ou forestière qui peut être utilisée comme combustible (a), déchets tels que déchets végétaux agricoles ou forestiers (b(i)) ou déchet de bois (b(v)). Ces options n'étant que des hypothèses, les contraintes ou les limitations sur l'usage de cette biomasse en combustion ne sont pas clairement définies au niveau européen et dans les différents états membres.
- Dans le projet GREENLAND, seules des biomasses issues de phytoextraction (scénario majorant) ont été utilisées pour les essais de combustion. Les résultats des essais et l'interprétation de ces résultats au regard de la réglementation montrent que cette voie de valorisation n'est pas pertinente dans toutes les situations et que le niveau d'accumulation des ETM prévisible dans la biomasse est un critère à prendre en compte pour confirmer ou infirmer la décision d'une valorisation en bois-énergie.
- Pour être brûlées en installation de combustion en France sans limitation, les biomasses devraient présenter des concentrations en ETM ne dépassant pas les valeurs réglementaires définies pour les déchets de bois b(v). Les bois issus de phytostabilisation pourraient correspondre à ce critère.
- Les essais de combustion ont montré que les ETM se concentrent davantage dans les cendres-volantes que dans les cendres sous-foyer. Néanmoins, une faible concentration dans le bois ne signifie pas que les cendres sous-foyer pourront être valorisées par retour au sol (Tableau 7) dans tous les cas. De nouveaux essais de combustion avec des biomasses moins enrichies en ETM permettront de mieux répondre à ce point.
- Les essais de combustion menés dans le cadre du projet GREENLAND ont également montré que la fraction gazeuse des fumées constituait un compartiment mineur pour les émissions de Zn et de Cd. La réduction des émissions de ces polluants à la cheminée peut-être facilement obtenue en chaudière industrielle ou collective par l'utilisation de systèmes de filtration efficaces.

Application de la réglementation française à la méthanisation et à la pyrolyse

Comme pour la combustion, la biomasse végétale issue des phytotechnologies n'est pas considérée dans la réglementation qui encadre la torréfaction ou la pyrolyse, qu'elle soit française ou européenne.

Un décret sur la méthanisation paru en 2016 (Décret n° 2016-929) ouvre la voie à la culture sur sols pollués pour cet usage. En effet, dans son article D. 543-293, le décret introduit la possibilité

d'approvisionner les « installations de méthanisation de déchets non dangereux ou de matières végétales brutes par des cultures principales provenant de zones reconnues contaminées, notamment par des métaux lourds ».

Le Tableau 8 résume les principaux textes réglementaires et normatifs qui pourraient impacter l'utilisation des biomasses végétales issues de phytotechnologies dans l'une ou l'autre de ces filières.

Tableau 8. Principaux textes réglementaires et normatifs sur la méthanisation et la pyrolyse.

Filière	Réglementation / Normes
Méthanisation (intrants)	Décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016
Méthanisation (digestat (a))	Arrêté du 10 novembre 2009 (Déclaration) Arrêté du 10 novembre 2009 (Autorisation) Arrêté du 12 août 2010 (Enregistrement) Arrêté du 2 février 1998 (Installations classées) NF U44-051 : 2006 (Amendements organiques) NF U44-095 : 2002 (Amendements organiques - Composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux)
Pyrolyse (biochar (b))	NF U44-051 : 2006 (Amendements organiques) NF U44-551 : 2002 (Supports de culture)

a, b en vue d'un retour au sol



La méthanisation (Tableau 8) :

Les installations de méthanisation sont des installations classées soumises à déclaration, enregistrement ou autorisation en fonction de la nature et de la quantité des intrants. Ces installations acceptent des déchets non dangereux et des matières végétales brutes (rubrique 2781). La caractérisation des matériaux entrants dépend du régime de l'installation. Elle concerne notamment leur origine, désignation et masse dans le cas de la déclaration et de l'enregistrement et leur composition (ex : taux de matière sèche) dans le cas de l'autorisation. Quel que soit le régime de l'installation, la caractérisation des végétaux ne concerne pas les polluants. Le digestat peut être épandu sur des terres agricoles aptes à l'épandage après sa caractérisation (ex : valeur agronomique, quantité, rendement, innocuité) et la réalisation d'un plan d'épandage. La caractérisation des digestats et des sols aptes à l'épandage ne concernent pas les polluants sauf dans le cas de l'arrêté d'autorisation qui doit fixer les teneurs

maximales en ETM du digestat et la quantité maximale d'ETM épandus à l'hectare (Arrêté du 2 février 1998). Après compostage, il ne peut être commercialisé que si les exigences des normes « amendements organiques », qui définissent notamment des valeurs maximales et des flux sur les ETM, sont respectées.

La pyrolyse (Tableau 8) :

Le biochar issu de pyrolyse peut être utilisé dans le domaine agricole comme amendement du sol ou support de culture ou comme combustible si les exigences des normes correspondantes sont respectées. Les huiles de pyrolyse peuvent notamment être utilisées dans les domaines de la chimie et des transports ou encore comme combustibles. A l'heure actuelle, il n'existe pas de réglementation définissant des valeurs limites en polluants dans les huiles.

5. Conclusions et recommandations

- La connaissance de la distribution des ETM dans les sous-produits des procédés de valorisation est essentielle pour anticiper les transferts et les limitations potentielles à l'utilisation de ces sous-produits.
- En fonction du procédé de valorisation envisagé, des concentrations importantes en ETM dans la biomasse peuvent être recherchées (ex : production d'écocatalyseurs) ou au contraire redoutées (ex : impact sur les installations ou la performance du procédé). Dans le 1^{er} cas, une biomasse issue de phytoextraction est pertinente. Dans le 2nd cas, une biomasse issue de phytostabilisation peut être préférable. Le choix du procédé de valorisation peut aider à la décision en sélectionnant la ou les plantes pertinentes pour une phytotechnologie.
- Bon nombre d'essais à l'échelle pilote de valorisation de biomasses végétales enrichies en ETM pour le bois-énergie ont été réalisés et sont en cours de réalisation. Ils apportent un éclairage nécessaire pour garantir la bonne maîtrise des risques lors de la valorisation de la biomasse.
- L'ambiguïté existante sur le statut de la biomasse (biomasse ou déchet) peut constituer une contrainte concernant le développement des phytotechnologies.
- Les aspects techniques, sociaux et réglementaires doivent être pris en considération le plus en amont possible pour aider à la décision de mise en oeuvre des phytotechnologies.

6. Projets cités

GREENLAND : Gentle remediation of trace element contaminated land. www.GREENLAND-project.eu

PHYTOPOP : Stratégies culturales, valorisation de la biomasse, et sélection de génotypes plus performants appliquées à l'utilisation du peuplier pour la remédiation de sols pollués. Complément ADEME au projet ANR sur installation d'un filtre à manche sur une chaudière expérimentale.

BIOFILTER : Filtration biologique pour la réduction des éléments traces dans la biomasse des arbres :

[www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/blanc-international/fiche-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-10-INTB-1703](http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/blanc-international/fiche-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-10-INTB-1703).

PHYTENER : Développement de la phytostabilisation sur des sols contaminés par des métaux à des fins énergétiques : viabilité écologique, intérêt social et bilan économique.

www.ademe.fr/phytener-developpement-phytostabilisation-sols-contamines-metaux-a-fins-energetiques

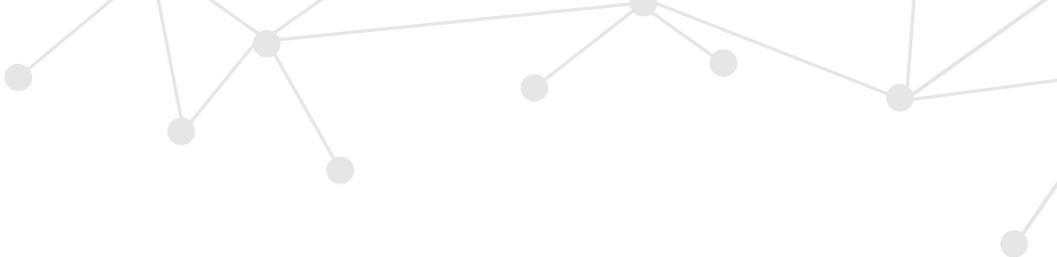
7. Références

- Directive (UE) du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables et modifiant puis abrogeant les directives 2001/77/CE et 2003/30/CE. .
- Directive (UE) 2015/1513 du Parlement européen et du Conseil du 9 septembre 2015 modifiant la directive 98/70/CE concernant la qualité de l'essence et des carburants diesel et modifiant la directive 2009/28/CE relative à la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de sources renouvelables. www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2013/9/24/DEV-P1300516A/jo/texte.
- Arrêté du 26 août 2013 modifiant l'arrêté du 25 juillet 1997 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 2910 (Combustion). www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2013/8/26/DEV-P1300524A/jo/texte.
- Arrêté du 24 septembre 2013 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2910-B de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2013/9/24/DEV-P1300516A/jo/texte.
- Arrêté du 26 août 2013 relatif aux installations de combustion d'une puissance supérieure ou égale à 20 MW soumises à autorisation au titre de la rubrique 2910 et de la rubrique 2931. www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2013/8/26/DEV-P1300515A/jo/texte.
- Décret n° 2016-929 du 7 juillet 2016 pris pour l'article L. 541-39 du code de l'environnement. JORF n°0158 du 8 juillet 2016 www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2016/7/7/DEV-R1617121D/jo/texte.
- Arrêté du 12 août 2010 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation relevant du régime de l'enregistrement au titre de la rubrique n° 2781-1 de la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement. www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2010/8/12/DEVP1020761A/jo/texte.
- Arrêté du 10 novembre 2009 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées de méthanisation soumises à déclaration sous la rubrique no 2781-1. www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2009/11/10/DEV-P0920876A/jo/texte.
- Arrêté du 10 novembre 2009 fixant les règles techniques auxquelles doivent satisfaire les installations de méthanisation soumises à autorisation en application du titre Ier du livre V du code de l'environnement. www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2009/11/10/DEVP0920874A/jo/texte.
- Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation. JORF n°52 du 3 mars 1998 page 3247.
- Witters N, Mendelsohn RO, Van Slycken SV, Weyens N, Schreurs E, Meers E, Tack F, Carleer R, Vangronsveld J. Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study: I: energy production and carbon dioxide abatement. Biomass Bioenerg 2012; 39: 454-69.
- Delplanque M, Collet S, Del Gratta F, Schnuriger B, Gaucher R, Robinson B, Bert V. Combustion of Salix used for phytoextraction: the fate of metals and viability of the processes. Biomass Bioenerg 2013; 49: 160-170.
- Chalot M, Blaudez D, Rogaume Y, Provent AS, Pascual Ch. Fate of trace elements during the combustion of phytoremediation wood. Environ Sci Technol 2012; 46(24): 13361-9.
- Bert V, Allemon J, Sajet Ph, Dieu S, Papin A, Collet S, Gaucher R, Chalot M, Michiels B, Raventos C. Torrefaction and pyrolysis of metal-enriched poplars from phytotechnologies: Effects of temperature and biomass chlorine content on metal distribution in end-products and valorization options. Biomass Bioenerg 2017; 96:1-11.
- Bert V, Neu S, Zdanevitch I, Friesl-Hanl W, Collet S, Gaucher R, Puschenreiter M, Müller I, Kumpiene J. How to manage plant biomass originated from phytotechnologies? Gathering perceptions from end-users. Int J Phyto 2017; 10.1080/15226514.2017.1303814.
- Tendero M, Plottu B. Perceptions et acceptabilité sociale de la phytoremédiation. Anses, Bulletin de veille scientifique 2016 : 28 : 92-94.

8. Liste des auteurs

Valérie Bert, INERIS (contact : valerie.bert@ineris.fr); Francis Douay, ISA-Lille, Yncréa Hauts-de-France (contact : francis.douay@yncrea.fr)
Contribution à la relecture : Olivier Faure (Mines Saint Etienne, UMR 5600 EVS), Frédérique Cadière (ADEME)







DE LA GESTION DES SOLS POLLUÉS À LA VALORISATION DE LA BIOMASSE

OUTILS D'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES PHYTOTECHNOLOGIES



Avant-propos

Ce chapitre a pour objectif de présenter un outil d'évaluation économique développé dans le cadre du projet européen GREENLAND et des éléments financiers issus de trois projets sur les phytotechnologies, BIOFILTER, PHYTOSED2 et PHYTE-NER, ces projets ayant bénéficié de l'implication de l'ADEME ou de ses financements. Ces projets avaient pour objectifs la gestion de terres polluées par les éléments traces métalliques (ETM) (chapitre 2) et la valorisation de la biomasse produite dans une filière énergétique (combustion, torréfaction, pyrolyse) (chapitre 4).

Sous réserve de compatibilité avec la réglementation, les phytotechnologies pourraient, en plus de leurs vertus en matière de gestion des sites et sols pollués, générer des revenus économiques via la valorisation de la biomasse obtenue, dans la filière énergétique ou dans d'autres filières à plus forte valeur ajoutée telles que la chimie du végétal, l'hydrométallurgie et les bioraffineries. Il s'agit dès lors de pouvoir évaluer leur via-

bilité économique tant pour les acteurs publics que pour les propriétaires des terres contaminées, cet aspect ayant été très peu consolidé jusqu'alors. Dans ce chapitre, seuls les éléments économiques liés à la valorisation de la biomasse en énergie sont présentés bien que d'autres valorisations économiques soient explorées. Ces éléments ont vocation à enrichir l'outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution SelecDEPOL, lequel qui présente des coûts partiels ne tenant pas compte des différents scénarios de valorisation de la biomasse produite. Enfin, d'autres indicateurs économiques, non pris en compte dans ce chapitre, seraient à considérer en lien avec les bénéfices rendus par les phytotechnologies (préservation de la nature, biodiversité, etc.) pour évaluer de manière plus exhaustive les phytotechnologies.

1. Outil d'évaluation économique d'un projet de phytotechnologie

Afin d'inventorier les coûts et recettes associés à un projet de type phytostabilisation ou phytoextraction pour un site donné, et d'en déduire le bilan économique global actualisé de ces technologies, un premier outil de calcul pratique au format Excel a été développé dans le cadre du projet GREENLAND. Ce modèle

a été réalisé après la revue de la littérature puis, ajusté et validé après l'avoir appliqué sur les cas d'études du projet. A notre connaissance, cet outil est le seul outil public disponible pour évaluer le coût financier d'un projet de phytostabilisation ou de phytoextraction.

1-1. Objectifs de l'outil

L'outil développé permet de calculer, à partir des données d'entrée, les coûts et bénéfices associés à chaque année du projet. Par ailleurs, compte tenu du taux d'actualisation choisi par l'utilisateur, il permet de calculer la valeur actuelle nette du projet (VAN).

La VAN correspond à la somme des bénéfices (recettes - coûts) associés au projet chaque année et corrigés du taux d'actualisation. Le taux d'actualisation permet de rendre comparable des flux monétaires ayant lieu à des dates distinctes en intégrant notamment le coût d'opportunité du capital.

$$VAN = \sum_{p=1}^n \frac{R_p - C_p}{(1+r)^p} - I_0$$

avec : R_p , les recettes réalisées l'année p
 C_p , les coûts rencontrés l'année p
 I_0 , l'investissement initial
 n , la durée du projet en nombre d'années.

1-2. Disponibilité et structure de l'outil

L'outil de calcul des coûts et recettes est disponible en anglais via le lien www.greenland-project.eu/ en téléchargeant le DST sur le site (Greenland DST).

L'outil est composé de deux grandes parties : la première, correspond aux données d'entrée que l'utilisateur doit renseigner ; la seconde, fournit les résultats des calculs des coûts et des bénéfices globaux actualisés. Certaines cases sont pré-remplies à titre d'exemple (**Figure 15**).

Un premier feuillet permet d'intégrer des données générales résumant les spécificités du projet (**Figure 15a**) :

- caractéristiques du site (nom, lieu, type, superficie, distance pour rejoindre l'installation où sera transformée la biomasse, profondeur de la contamination, densité du sol, etc.) ;
- caractéristiques de la contamination (substances, concentration, etc.). L'utilisateur est invité à dire si son projet a pour objectif la phytostabilisation ou la phytoextraction et à renseigner la durée du projet envisagé ;
- caractéristiques des plantes cultivées (types de plantes, vitesse de rotation des cultures, etc.).

Un second feuillet permet d'intégrer les données de coûts et de bénéfices attendus du projet (**Figure 15b**) :

- coûts d'investissement (préparation du site, achat des plantes, etc.) ;
- autres coûts non récurrents (remise en état du site, etc.) ;
- coûts et bénéfices d'exploitation (entretien du site, vente de la biomasse, etc.).

Enfin, un dernier feuillet résume les données précédemment intégrées et affiche la valeur actuelle nette (VAN) du projet ainsi que les coûts et recettes actualisés chaque année (Figure 15c).

OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION GREENLAND - EXTRAIT « COST CALCULATOR »

Figure 15 : feuillet associé au renseignement des données générales du projet (a), feuillet permettant de renseigner les coûts et les recettes associés au projet (b), résumé des coûts et des bénéfices par année et valeur actuelle nette (VAN) (c).

feuillet a

General Site Information	
Name of site	<input type="text"/>
Country	<input type="text"/>
Site type	<input type="text"/>
Site coordinates	<input type="text"/>
Distance to crop supplier	<input type="text"/> km
Distance to biomass processor	<input type="text"/> km
Size of site	<input type="text"/> 1000 m ²
	<input type="text"/> 0,1 ha
Depth of contamination	<input type="text"/> m
Density soil	<input type="text"/> ton/m ³
Total weight per ha	<input type="text"/> 0 ton
Discount rate	<input type="text"/> 4 %

General contamination information	
Extraction (0) or stabilisation (1)?	<input type="text"/> 1
Define metal(s):	<input type="text"/>
Concentration in soil	<input type="text"/> 1
Concentration in solution	<input type="text"/>
Start:	
Start concentration	<input type="text"/> mg/kg soil
Contamination in soil	<input type="text"/> 0 kg/ha
stabilisation for how long?	<input type="text"/> 15 years

General Plant Information	
Plant used	<input type="text"/>
Rotation speed of crop	<input type="text"/> 3 Years
Remediated surface/plant	<input type="text"/> 5 m ² /plant <input type="text"/> 0,0005 ha/plant
Kg of dry mass per harvest per ha	<input type="text"/> Kg DM/ha
Of which ...% is in	
Plant part 1	<input type="text"/> plant part 1
% of total biomass plant part 1	<input type="text"/> 100%
Plant part 2	<input type="text"/> plant part 2
% of total biomass plant part 2	<input type="text"/>
Plant part 3	<input type="text"/> plant part 3
% of total biomass plant part 3	<input type="text"/>
Plant part 4	<input type="text"/> plant part 4
% of total biomass plant part 4	<input type="text"/>
Plant part 5	<input type="text"/> plant part 5
% of total biomass plant part 5	<input type="text"/>
Extraction in mg/kg DM per harvest per part, only for extraction	
plant part 1	<input type="text"/> mg/kg DM
plant part 2	<input type="text"/> mg/kg DM
plant part 3	<input type="text"/> mg/kg DM
plant part 4	<input type="text"/> mg/kg DM
plant part 5	<input type="text"/> mg/kg DM



OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION GREENLAND - EXTRAIT « COST CALCULATOR »

feuille b

Costs associated with start of project Costs associated with licences and permits 100		Cost of plants Price per plant OR 5 /plant Price seed OR 100 /t/ha Plant density 20 plant/ha Cost of transporting plant to 5 /plant							
Preparation of site Surface to be deforested 100 m² Surface to be leveled 100 m² Removing asphalted surface 100 m² Price per m² Deforestation 5 /m² Leveling 5 /m² Asphalt removal 5 /m²									
Adding new crops (100%) OR replacing crops (% of original amount)									
	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	Year 7	Year 8
Adding new plants		100%	5%	5%	100%	5%	5%	100%	0
Maintenance costs site and crops									
	Year 0	Year 1	Year 2	Year 3	Year 4	Year 5	Year 6	Year 7	Year 8
Cost of plants									
Variable cost (in /plant)		0	0	0	0	0	0	0	0
define variable cost 1									
define variable cost 2									
define variable cost 3									
define variable cost 4									
define variable cost 5									
Fixed cost (in /year)		0	0	0	0	0	0	0	0
define fixed cost 1									
define fixed cost 2									
define fixed cost 3									
define fixed cost 4									
define fixed cost 5									
Cost of site									
Variable cost (in /m²)		0	0	0	0	0	0	0	0
define variable cost 1									
define variable cost 2									
define variable cost 3									
define variable cost 4									
define variable cost 5									
Fixed cost (in /jaar)		0	0	0	0	0	0	0	0
general maintenance									
define fixed cost 2									
define fixed cost 3									
define fixed cost 4									
define fixed cost 5									

feuille c

General info	
Site	0
Duration remediation	15 years
Discount rate	4 %

Total discounted cost project € 2 674,80

Year	0	1	2	3	4	5	6	7
Preparation costs	€ 1 600,00	-	-	-	-	-	-	-
Planting crops	€ 1 000,00	€ 1,00	€ 1,00	€ 20,00	€ 1,00	€ 1,00	€ 20,00	€ 0,00
Maintenance costs	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Crops	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Site	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Biomass costs and revenues	-	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Monitoring costs	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Other costs	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00	€ 0,00
Total	€ 2 600,00	€ 1,00	€ 1,00	€ 20,00	€ 1,00	€ 1,00	€ 20,00	€ 0,00
Discounted total	€ 2 600,00	€ 0,96	€ 0,92	€ 17,78	€ 0,85	€ 0,82	€ 15,81	€ 0,00

2. Evaluation économique des projets BIOFILTREE, PHYTOSED 2 et PHYTENER

Le tableau 9 présente succinctement les 3 projets pour lesquels une évaluation économique a été conduite.

Projet	Phytotechnologie	Biomasse	Valorisation	Mode cultural	Densité (/ha)	Surface
BIOFILTREE	Phytostabilisation	Peupliers	Torréfaction, pyrolyse	TCR*	1 152 arbres / ha	1 ha
PHYTOSED 2 (Echelle 1)	Phytostabilisation	Saules	Combustion	TTCR**	13 000 arbres / ha	1 ha
PHYTENER	Phytostabilisation	Miscanthus	Combustion	-	20 000 rhizomes / ha ; 13 000 et 20 000 plants pré-démarrés / ha	3,7 ha

*Taillis à Courte Rotation

**Taillis à Très Courte Rotation

2-1. Inventaire des coûts et bénéfices des projets

Les coûts et bénéfices des projets BIOFILTREE et PHYTOSED 2 ont été évalués sur la base de dépenses et de recettes effectivement réalisées au cours des projets, ou sur la base d'enquêtes ou de devis lorsque les opérations n'ont pas encore été menées. Dans le cadre de PHYTENER, les coûts et bénéfices ont été évalués sur la base de données fournies par la Chambre régionale d'agriculture du Nord-Pas de Calais, partenaire du projet (Tableau 10).

Pour rappel, dans le cadre de l'étude technico-économique menée dans ces projets, seuls les coûts et bénéfices économiques directs ont été pris en compte. Les bénéfices potentiels associés à la gestion de la pollution et donc au contrôle des impacts éventuels d'ordres environnemental et sanitaire n'ont pas été intégrés dans cet inventaire comptable puisqu'ils ne sont pas valorisés monétairement sur un marché.

Tableau 10. Inventaire des coûts et des recettes considérées dans les projets BIOFILTREE, PHYTOSED 2 et PHYTENER.

	BIOFILTREE	PHYTOSED 2	PHYTENER
Coûts d'investissement	Préparation du site Achat de l'amendement Achat des arbres Achat des protections herbivores Plantation des arbres	Préparation du site Achat de l'amendement Achat des arbres Achat de graines et de plançons* Semis des graines Plantation des arbres	Préparation du site Achat des rhizomes ou plants prédémarrés** Plantation des rhizomes ou des plants prédémarrés Désherbage à un stade de post levée
Coûts d'exploitation	Entretien de la parcelle (produits phytosanitaires, girobroyage...) Réalisation des analyses biologiques pour suivi des performances Récolte (coût dépendant de la quantité de biomasse produite)	Entretien de la parcelle (produits phytosanitaires, girobroyage...) Réalisation des analyses biologiques pour suivi des performances Récolte (coût dépendant de la quantité de biomasse produite)	Désherbage la première année Récolte des parties aériennes au moyen d'une enséuse à maïs à compter de la deuxième année
Autres coûts non récurrents	Remise en état du site (dessouchage) Divers coûts liés aux aléas	Remise en état du site (dessouchage) Divers coûts liés aux aléas	Remise en état du site (destruction de la culture par désherbage chimique et travail du sol)
Recettes d'exploitation	Revenus issus de la vente du bois récolté	Revenus issus de la vente du bois récolté	Revenus issus de la vente du miscanthus récolté

*Pour l'implantation de la culture des saules, des plançons de 2 m de haut non enracinés ont été privilégiés à la place de boutures, moins chers à l'achat mais nécessitant davantage d'entretien, afin d'éviter le recépage en 1ère année d'exploitation.

**Pour l'implantation de la culture du miscanthus, deux options ont été considérées : plantation à une densité de 20 000 rhizomes ou de 13 000 plants pré-démarrés par hectare. Cette seconde option a pour avantage d'assurer une régularité de la plantation en faisant abstraction de difficultés de reprise des rhizomes.



2-2. Résultats de l'analyse coût-bénéfice

2-2-1. Projets BIOFILTREE et PHYTOSED 2

Une fois l'inventaire des coûts et des bénéfices associés aux projets réalisés, l'outil de calcul présenté dans la partie 1 permet d'estimer la valeur actuelle nette (VAN) des projets.

Pour le projet BIOFILTREE, elle correspond à un coût actualisé de 55 k€ (€ de 2012) pour un hectare de terre et pour le projet PHYTOSED 2 à un coût actualisé de 107 k€ (€ de 2012) pour un hectare de terre. La différence entre les VAN des deux projets est notamment attribuable à des coûts d'investissement très différents, en particulier les coûts de mise en place de la phytostabilisation la 1^{ère} année (préparation du site) et l'achat des arbres. Dans le cas de PHYTOSED 2, la préparation du terrain a nécessité le désherbage du terrain pollué et la gestion spécifique d'une plante invasive avant les travaux de labour. De même, l'achat de boutures de saules à la place de plançons dans le cas de PHYTOSED 2 aurait contribué à diminuer grandement ce poste.

Ces deux projets sont associés à une démarche de valorisation de la biomasse produite sur les sites. Cette valorisation devait permettre, entre autres motivations, de diminuer les coûts globaux associée à l'objectif de phytostabilisation. Afin de vérifier cette hypothèse, la VAN de la seule culture des plants, c'est-à-dire la balance entre coûts (associés à l'achat des plants, etc.) et les recettes (liées à la revente de la biomasse produite) a été évaluée. Dans les deux projets, cette VAN s'est avérée négative de -12 k€ (BIOFILTREE) et -21 k€ (PHYTOSED 2), les coûts surpassant les recettes. Bien que les résultats d'exploitation soient positifs (au sens où la vente de la biomasse fait plus que compenser les coûts de récolte), les coûts d'investissement sont trop importants pour que la culture soit globalement rentable. Ces résultats sont cependant propres à ces projets, développés pour un besoin expérimental sur 1 ha de terrain contaminé. La mise en place de tels projets sur des dizaines d'hectares de sols pollués devrait engendrer une diminution des coûts d'exploitation.

Ce résultat permet donc de tirer deux conclusions :

- En l'état actuel de la filière énergétique des cultures en TCR et en TCCR, et compte tenu des informations disponibles pour élaborer le bilan financier, il n'est pas pertinent pour le propriétaire d'un terrain agricole pollué de mettre en place une telle culture, et *a fortiori* d'en faire une alternative à une culture rentable.
- L'état actuel de la filière énergétique des cultures en TCR et en TCCR doit conduire le décideur qui souhaiterait mettre en place un projet de phytostabilisation à étudier la possibilité de dispositifs techniques alternatifs plus rentables. Dans un objectif de phytostabilisation, d'une parcelle d'une superficie inférieure à 1 ha ou de l'ordre d'1 ou de quelques hectares, le choix de produire de la biomasse énergie, en plus d'une solution de base qui serait constituée d'un couvert végétal n'est pas nécessairement économiquement pertinent.

2-2-2. Projet PHYTENER

Sur la base d'un prix de vente établi en 2013 à 70 Euros la tonne de biomasse de miscanthus et d'un taux d'actualisation de 2,5 %, le retour sur investissement est de 7 ans dans le cas d'une plantation de rhizomes et de 10 ans pour des plants pré-démarrés. Ceci s'explique par la différence des coûts d'achat entre les rhizomes et les plants pré-démarrés. Dans les deux cas, les marges dégagées sont faibles.

Un des facteurs limitant le développement de la culture du miscanthus est le coût d'achat des plants (environ 3 000 EUR ha⁻¹ pour les rhizomes). Or la première récolte n'est possible qu'à partir de la deuxième année, voire la troisième. De plus, la faible densité de la biomasse récoltée nécessite une valorisation locale.

3. Conclusions et perspectives

Les résultats obtenus ne sont pas, sans étude approfondie, généralisables à tout projet de phytostabilisation aidée, une incertitude étant en particulier liée à des éléments de contexte très spécifiques (préparation du site, etc.) mais aussi parce que la valorisation énergétique des cultures d'arbres en TCR ou TCCR et du miscanthus est peu développée en France.

• Evaluation économique :

Pour autant, compte tenu du retour d'expérience issu d'autres projets de phytostabilisation aidée, les résultats obtenus semblent suggérer que cette technologie se situe parmi les options de gestion de sols contaminés les moins coûteuses. Elle deviendrait par ailleurs d'autant plus intéressante que la valorisation énergétique de la biomasse deviendrait rentable en s'accompagnant notamment d'une baisse des coûts de récolte et d'une hausse des prix de marché du bois. Car si la phytostabilisation aidée apparaît comme une voie pertinente de gestion des sols pollués, la filière bois-énergie à elle seule ne semble pas constituer une alternative viable à des types de cultures plus traditionnelles.

• Bénéfices sociaux :

La prise en charge d'un site contaminé peut être bénéfique d'un point de vue social sans que cela se traduise par des recettes économiques immédiates. Du point de vue du bien-être collectif donc, il conviendrait d'évaluer les impacts d'un tel projet à l'échelle plus large de la société, et pas seulement du point de vue du gestionnaire du site. Ces impacts, appelés

externalités, sont ignorés du marché mais devraient faire l'objet d'une évaluation dans le cadre d'une analyse coût-bénéfice exhaustive.

• Bénéfices environnementaux :

De même, les bénéfices environnementaux liés à la mise en œuvre d'une phytotechnologie et de la valorisation de la biomasse produite peuvent être nombreux : préservation de la ressource en eau, augmentation de la biodiversité, diminution des envols de poussière, limitation des plantes invasives, diminution des émissions de gaz à effet de serre, restauration des fonctions du sol, etc. Comme précédemment, ces externalités devraient être prises en compte dans les analyses coût-bénéfice.

Les préoccupations économiques et environnementales justifient la recherche de matières premières capables de réduire la dépendance en combustibles fossiles. Les voies de valorisation à haute valeur énergétique, comme les bioraffineries, sont notamment explorées. Les résultats des projets GREENLAND, BIOFILTREE, PHYTOSED 2 et PHYTENER ont posé les bases pour évaluer les coûts et les recettes liées à gestion des sites pollués et la valorisation de la biomasse produite sur ces sites. Les tensions sur les besoins en biomasse pourraient localement valider l'intérêt de ces projets grâce notamment au surenchérissement induit du fait des coûts des transports. Les projets en cours et futurs permettront de réaliser d'autres analyses coût-bénéfice dans d'autres situations et avec d'autres filières.

4. Projets cités

GREENLAND : Gentle remediation of trace element contaminated land. www.GREENLAND-project.eu/.

BIOFILTREE : Filtration biologique pour la réduction des éléments traces dans la biomasse des arbres, [www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/blanc-international/fiche-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2\[CODE\]=ANR-10-IN-TB-1703](http://www.agence-nationale-recherche.fr/suivi-bilan/editions-2013-et-anterieures/recherches-exploratoires-et-emergentes/blanc-international/fiche-projet/?tx_lwmsuivibilan_pi2[CODE]=ANR-10-IN-TB-1703).

PHYTOSED 2 (Echelle 1) : Etude de l'efficacité et de la pérennité de la phytostabilisation aidée couplée à une valorisation biomasse en bois-énergie : 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. www.ademe.fr/projet-phytosed-2-etude-lefficacite-perennite-phytostabilisation-aidee-couplee-a-valorisation-biomasse-bois-energie

PHYTENER : Développement de la phytostabilisation sur des sols contaminés par des métaux à des fins énergétiques : viabilité écologique, intérêt social et bilan économique. www.ademe.fr/phytener-developpement-phytostabilisation-sols-contamines-metaux-a-fins-energetiques

5. Références

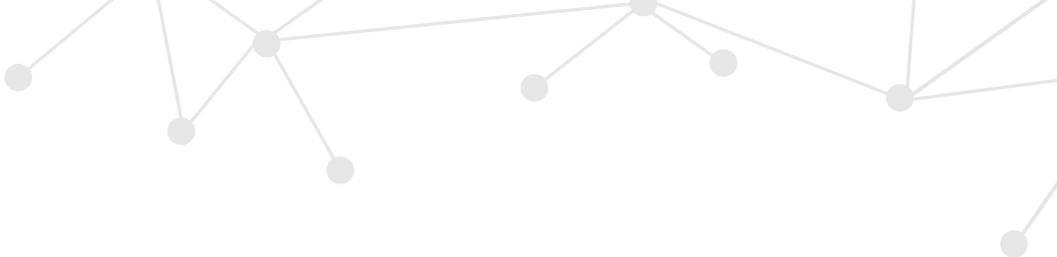
- SelecDEPOL. Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution ADEME/BRGM. <http://www.selecdepol.fr/>
- Witters N, Mendelsohn RO, Van Slycken SV, Weyens N, Schreurs E, Meers E, Tack F, Carleer R, Vangronsveld J. Phytoremediation, a sustainable remediation technology? Conclusions from a case study: I: energy production and carbon dioxide abatement. *Biomass Bioenerg* 2012; 39: 454-69.
- Linacre NA, Whiting SN, Angle JS. The impact of uncertainty on phytoremediation costs. *Int J Phytoremediation* 2005; 7:259-269.
- Thewys T, Witters N, Meers E, Vangronsveld J. Economic viability of phytoremediation of a cadmium contaminated agricultural area using energy maize. Part II: economics of anaerobic digestion of metal contaminated maize in Belgium. *Int J Phytoremediation*. 2010;12(7):663-79.
- Lewandowski i, Schmidt U, Londo M, Faaij A. The economic value of the phytoremediation function – Assessed by the example of cadmium remediation by willow (*Salix ssp*). *Agricultural Systems* 2006; 89(1): 68–89.

6. Liste des auteurs

Valérie Bert, INERIS (contact : valerie.bert@ineris.fr); Francis Douay, ISA-Lille Yncrea Hauts-de-France (contact : francis.douay@yncrea.fr)

Contribution à la relecture : Olivier Faure (Mines Saint-Etienne, UMR 5600 EVS) ; Frédérique Cadière (ADEME)







CONCLUSIONS & PERSPECTIVES



Depuis 2012, date de la publication par l'ADEME du guide sur les phytotechnologies (« Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués – Etat de l'art et guide de mise en œuvre » aux éditions edp sciences), le phytomanagement des sites contaminés tend progressivement à s'imposer, sinon dans les boîtes à outils des maîtres d'ouvrage, au moins dans le champ des alternatives possibles aux techniques classiques de remédiation. De fait, il est aujourd'hui établi que les modes de gestion basés sur la phytostabilisation (aidée ou non) appliquée aux pollutions métalliques les plus fréquentes (cadmium, plomb, zinc...) sont non seulement bien adaptés aux objectifs de réduction des risques sanitaires et environnementaux, mais aussi qu'ils permettent d'améliorer la fonctionnalité des sols dégradés (notion de services écosystémiques). Les phytotechnologies se distinguent donc des approches classiques, en considérant les sols pollués comme des ressources à requalifier et à valoriser, offrant des gisements potentiels de biomasses pour la bioéconomie et non plus systématiquement comme des externalités négatives en raison des coûts liés à leur gestion (par exemple, excavation et/ou confinement). En ce sens, elles répondent parfaitement aux attentes socio-économiques d'une gestion durable des sols corrélée avec une croissance verte et intelligente et sont aujourd'hui considérées avec intérêt par un nombre croissant de professionnels de la gestion des sites et sols pollués (entreprises de travaux, bureaux d'études) ou maîtres d'ouvrages. Une des finalités des recherches soutenues par l'ADEME ces dernières années est de promouvoir ces modes de gestion qui restent malgré tout encore insuffisamment mis en œuvre.

Les cinq chapitres présentés dans ce complément au guide de 2012 renseignent sur les orientations et retours d'expériences récents de la recherche dans ce domaine. Ils confirment que, dans des contextes très variés et à différentes échelles (sols agricoles, friches industrielles ou urbaines, sites de gestion de sédiments...), les phytotechnologies peuvent effectivement constituer des alternatives pertinentes aux techniques classiques, dans la mesure où la durée d'immobilisation du site n'est pas une contrainte majeure. Quatre principaux mots clés ressortent de la sélection de thèmes présentés dans ces chapitres et témoignent des orientations actuelles des travaux de recherche : biomasse, faisabilité technico-économique, caractérisation du sol et de ses fonctions, et perception sociale.

En premier lieu, les phytotechnologies ont aujourd'hui la double ambition de gérer les contaminations des sols, tout en permettant la production d'une biomasse valorisable (chapitres 2, 4 & 5). Des travaux ont été consacrés à la filière biomasse énergie, notamment par la culture de *Miscanthus* ou de végétaux ligneux conduits en TCR ou TCCR. D'autres travaux

s'intéressent aux filières biomasse pour matériaux bio-sourcés, voire même à la culture de plantes productrices de molécules naturelles à haute valeur ajoutée. Quelle que soit l'option choisie, il est évident que la production et la valorisation de biomasse sur des sites contaminés est un atout supplémentaire des phytotechnologies et un argument de poids pour le développement de cette filière.

En second lieu, les phytotechnologies ne trouveront leur place sur le marché que si leur faisabilité technico-économique et leur acceptabilité sociale sont clairement démontrées. Les retours d'expériences accumulés au cours de ces dernières années ont apporté des données essentielles dans ce domaine en permettant non seulement la construction de schémas d'aide à la décision mais aussi le calcul précis des coûts et bénéfices de la méthode (chapitres 1, 4 & 5). Si certains verrous réglementaires restent encore à lever (concernant notamment le statut de la biomasse produite sur site contaminé), les données disponibles aujourd'hui permettent de monter des projets dont la viabilité économique peut être précisément évaluée et constituer un argument de décision.

Il ressort enfin que les phytotechnologies ont pour force principale un objectif sous-jacent : gérer le sol en place et lui permettre d'assurer ses fonctions. Elles doivent tenir compte, sur le moyen et long terme, de la biodisponibilité des polluants (chapitres 1, 2 & 3) et conduisent à caractériser les communautés d'organismes vivant du sol et à favoriser leur développement. *In fine*, les services écosystémiques rendus par les sols (rétention d'eau, cycle de la matière organique, accueil pour la biodiversité...) sont aujourd'hui au cœur d'une gestion par phytomanagement et se doivent d'être mieux considérés dans la définition des options de gestion des sites pollués. En cela, les phytotechnologies représentent une rupture fondamentale avec les approches classiques d'excavation et confinement.

Finalement, si les phytotechnologies ont du mal à se développer, ce n'est plus exclusivement par manque de retours scientifiques. C'est probablement parce qu'elles font appel à de nouveaux métiers, peu représentés dans le monde de la gestion des sites et sols pollués. Les phytotechnologies, et plus globalement le phytomanagement, exigent une expertise en pédologie et en génie végétal, mais aussi, en agronomie et en génie des procédés (valorisation des biomasses). Les bureaux d'études et maîtres d'ouvrages qui s'entoureront de ces compétences seront sans doute ceux qui contribueront à faire émerger ce segment de marché.



ANNEXES



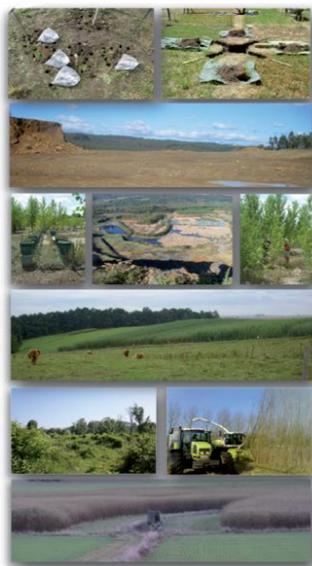
Annexe 1 : Focus projet GREENLAND

(5) Project Consortium

- Markus Puschenreiter, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna (Coordinator), Austria.
- Jaco Vangronsveld, Universiteit Hasselt, Belgium.
- Jurate Kumplene, Luleå tekniska universitet, Sweden.
- Michel Mench, Institut National de la Recherche Agronomique, Bordeaux, France.
- Valerie Bert, Institut National de l'Environnement industriel et des Risques, Verneuil En Halatte, France.
- Andrew Cundy, University of Brighton, England.
- Petra Kidd, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Santiago De Compostela, Spain.
- Giancarlo Renella, University of Florence, Italy.
- Wolfgang Friesl-Hanl, Austrian Institute of Technology, Tulln, Austria.
- Grzegorz Siebielec, Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy, Pulawy, Poland.
- Rolf Herzig, Phytotech-Foundation, Bern, Switzerland.
- Ingo Müller, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freiberg, Germany.
- Jannis Dimitriou, Sveriges lantbruksuniversitet, Uppsala, Sweden.
- Xose Quiroga Troncosa, Tratamientos Ecológicos del Noroeste SL, Touro, Spain.
- Anna Widawska, ATON, Wroclaw, Poland.
- Patrick Lemaitre, Innoveox, Paris, France.
- Anne Serani Loppinet, CNRS-ICMCB, Pessac, France.

(6) Project Duration

January 2011-December 2014



Greenland Website:
www.greenland-project.eu

Greenland Project

Gentle remediation of trace element contaminated land

FP7-KBBE-266124



Basé sur un réseau européen de cas d'étude des phytotechnologies (phytostabilisation, phytoextraction), le projet GREENLAND (Gestion douce des terres contaminées par les éléments traces) avait pour objectifs de capitaliser des connaissances sur les principaux freins à leur mise en pratique et de proposer un guide pour la mise en œuvre pratique des phytotechnologies et des outils pour faciliter la décision de mettre en œuvre les phytotechnologies.

Pour répondre à ces objectifs, le projet était structuré en 5 groupes de travail :

- Retours d'expériences sur les performances des phytotechnologies à grande échelle et sur le moyen-long terme (étude de cas).
- Valorisation de la biomasse végétale produite sur sols pollués dans différentes filières existantes, en voie de développement ou émergentes (essais).
- Harmonisation des méthodes pour évaluer la biodisponibilité environnementale des éléments traces et développement d'outils pour vérifier les performances des phytotechnologies (essais).
- Amélioration des performances des phytotechnologies via la sélection d'espèces végétales et d'amendements du sol (essais)
- Guide de mise en œuvre pratique des phytotechnologies et outils d'aide à la décision.

Les principaux résultats de ce projet sont répertoriés dans les documents en accès libre qui se trouvent sur le site internet du projet. Il s'agit du « Guide de mise en œuvre pratique des phytotechnologies » et ses annexes techniques et de l'outil d'aide à la décision (Decision Support Tool, DST).

En résumé, les résultats des performances de 11 cas d'étude à travers l'Europe sont présentés en détails dans des fiches, 5 cas d'étude étant consacrés à des retours d'expérience en phytoextraction. Après une description du site d'étude, de la phytotechnologie utilisée et des voies d'exposition aux polluants, un schéma conceptuel est proposé et les performances des phytotechnologies sont évaluées en termes de réduction des risques (maîtrise ou réduction des sources de pollution en fonction de la phytotechnologie). Chaque fiche est agrémentée de résultats significatifs. Des éléments financiers sont indiqués lorsqu'ils sont disponibles.

L'absence de débouchés clairement définis pour les biomasses végétales issues des phytotechnologies a été identifiée comme un verrou à lever pour la mise en œuvre des phytotechnologies. Des essais de combustion, de pyrolyse, de méthanisation et d'oxydation hydrothermale supercritique ont été conduits avec des biomasses de saules, de peupliers et de tabac utilisés sur les sites d'étude du projet avec un objectif de phytoextraction. Les objectifs de ces essais étaient de connaître la répartition des polluants métalliques dans les différentes émissions des procédés et de proposer des valorisations possibles des biomasses et des émissions au regard des réglementations et normes en vigueur. Les résultats de ces essais ont fait l'objet de publications scientifiques. Une étude de la perception des exploitants de chaudière à biomasse et de plateforme de méthanisation a également été réalisée. Certains des résultats sont discutés en détails dans le chapitre 4.

La détermination des concentrations totales en polluants dans les sols n'est pas suffisante pour évaluer le risque environnemental. Les propriétés du sol peuvent modifier la mobilité des éléments traces et leur disponibilité pour les organismes vivants. Des tests chimiques (disponibilité environnementale) et des bioessais (biodisponibilité environnementale) ont été appliqués sur l'ensemble des sols des sites d'étude du projet en 2011 et en 2013 pour évaluer le succès des phytotechnologies. Ce travail a permis d'identifier une batterie de tests qui serait à réaliser pour évaluer le succès des phytotechnologies. Les résultats de 2011 ont fait l'objet d'une publication scientifique et sont discutés en détails dans le chapitre 3.

La sélection des espèces végétales et l'utilisation d'amendements dépendent notamment de l'objectif de gestion souhaité pour le site et de la localisation des polluants. Des essais en pots et en parcelles ont été conduits durant le projet avec différents cultivars d'espèces végétales (arbres, espèces herbacées annuelles et vivaces), différents amendements chimiques et biologiques (compost, biochar, amendement minéral basique, bactéries, mycorrhizes) afin d'identifier les possibilités d'utilisation des meilleures combinaisons plantes/amendements en fonction des situations de pollution. Les résultats de ces tests ont fait l'objet de publications scientifiques.

L'engagement des décideurs est une étape primordiale dans le processus de décision jusqu'à la mise en œuvre des phytotechnologies. Des outils d'aide à la décision et un calculateur de coûts ont été développés spécifiquement pour les phytotechnologies (phytostabilisation et phytoextraction) sur la base d'outils existants. Ces outils et le calculateur de coût ont fait l'objet de publications scientifiques et sont détaillés dans les chapitres 1 et 5, respectivement.

Pour en savoir plus :

1. Cundy Ab, Bardos Rp, Puschenreiter M, mench m, bert v, friesl-hanl w, muller i, li xn, weyens n, witters n, vangronsveld j. 2016. *Brownfields to green fields: realizing wider benefits from practical contaminant phytomanagement strategies. Journal of Environmental Management*, 184:67-77.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Delplanque M, Collet S, Del Gratta F, Schnuriger B, Gaucher R, Robinson B, Bert V. 2013. *Bioenergy production by Salix used for phytoextraction: field study and process viability. Biomass and Bioenergy* 49: p. 160-170.



Annexe 2 :

Bioindicateurs d'effets Indice Oméga-3 - Végétaux

Principe de l'indicateur

L'indice Oméga-3 est un biomarqueur métabolique d'exposition et d'effets précoces des métaux mais aussi de différents types de polluants organiques (notamment HAP et herbicides). Il est basé sur l'analyse de la quantité relative de lipides des membranes chlorophylliennes, molécules très sensibles à la présence d'espèces réactives de l'oxygène générées en présence de polluants dans les sols. Ces lipides sont indispensables pour le bon fonctionnement de la photosynthèse, elle-même importante pour la croissance des végétaux. L'indice Oméga-3 renseigne ainsi sur l'état de santé des végétaux.

Prélèvements et mesures

La mesure peut être réalisée soit à partir de feuilles de l'espèce modèle *Lactuca sativa* cultivées sur un échantillon de sols à tester en conditions contrôlées au laboratoire (**bio-essai**) selon la norme AFNOR XP X31-233, soit à partir de feuilles de plantes prélevées directement sur le terrain (**test in situ**). Pour l'application sur le terrain et selon la question à aborder, cet indice peut être déterminé à partir d'une ou plusieurs espèces végétales. La teneur en lipides des membranes chlorophylliennes, est évaluée en mesurant la composition en acide gras des feuilles des végétaux par chromatographie en phase gazeuse. Les pourcentages d'acides gras obtenus permettent ensuite de calculer l'indice Oméga-3.

Conditions d'utilisation

Cet indice ne peut pas être utilisé pour déterminer la qualité intrinsèque d'un sol provenant d'une zone spécifique (considérée comme homogène). Cet indice est un outil de comparaison. La réalisation de ce test doit donc obligatoirement se faire en comparant différentes zones d'études (au moins 2) ayant les mêmes conditions climatiques.

Résultats

L'indice Oméga 3 diminue en présence de contaminants. Les données acquises sont interprétées par rapport à une situation de référence choisies sur le site étudié et varient de 0 à 1, 1 étant la valeur obtenue sur la zone témoin. Pour le test *in situ*, uniquement dans le cas où plusieurs espèces végétales sont prélevées, des notes pour chaque zone du site étudiée sont calculées à partir de l'indice Oméga-3. Ces notes varient aussi de 0 à 1, 1 étant la valeur obtenue sur la zone témoin.



Mise en œuvre en labo : bio-essai



Mise en œuvre sur le terrain : test in situ

Interprétation de l'indice Oméga 3 - Végétaux*

Etat de santé des végétaux	Bon	Moyen	Mauvais
	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Zone à risque (mesure de gestion)
Indice Oméga 3	1 à 0,93	0,93 à 0,85	< 0,85

* Interprétation établie pour un usage nature du sol (de type prairial ou forestier)

Bioindicateurs d'effets - Indice Oméga-3 - Végétaux

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	Aucune compétence en botanique nécessaire puisqu'il s'agit de prélever des feuilles sur des plantes identiques mais sans avoir besoin de connaître l'espèce.
Applicabilité à tous les sites	Nécessite un taux de recouvrement de la végétation suffisant sur tous les secteurs pour pouvoir trouver un certain nombre d'espèces en commun et pour que les prélèvements soient représentatifs de chaque secteur.
Représentativité	Nécessite un nombre de plantes suffisant par échantillon. Il faut éviter de prendre les feuilles les plus jeunes, s'orienter vers des feuilles matures et éviter les feuilles abîmées. Il faut prendre des feuilles sur des plantes de même taille pour tous les échantillons ou bien procéder pour tous les secteurs à des échantillons moyens contenant des feuilles de plantes de toute taille. L'horaire des prélèvements semble avoir peu d'impact sur la représentativité des résultats
Caractéristiques des prélèvements	Nécessite un repérage des prélèvements qu'il ne faut pas sous-estimer. La contribution d'un botaniste (même niveau débutant) peut permettre de gagner du temps. Prélèvement rapide et sans difficulté.
Contraintes techniques	Aucune difficulté physique, il suffit de se déplacer sur site, la matière prélevée étant des feuilles, les échantillons sont très légers.
Facilité de mise en œuvre	<p>Facile Difficile</p> 



Photos LEB Aquitaine

Indice Oméga-3 : LEB Aquitaine Transfert/ADERA/UMR5200, Villenave d'Ornon

Contact : Marina LE GUEDARD - marina.le-guedard@u-bordeaux.fr



Annexe 2 :

Bioindicateurs d'accumulation

Indice CMT - Végétaux

Principe de l'indicateur

L'indice CMT est un bioindicateur d'accumulation des éléments trace métalliques chez les végétaux. Il renseigne sur les transferts effectifs des contaminants métalliques à l'échelle de la communauté végétale du site d'étude. **Cet indice permet donc d'estimer la phytodisponibilité globale des contaminants métalliques et d'évaluer la contamination secondaire des végétaux, premiers maillons des réseaux trophiques.**

Prélèvements et mesures

Les analyses sont réalisées sur des échantillons composites de feuilles prélevées sur des espèces représentatives de la communauté végétale en place. En démarche de routine, cinq échantillons composites regroupant quatre à cinq espèces chacun sont récoltés sur la parcelle d'étude (à chaque angle et au centre). Les échantillons sont lavés, séchés et minéralisés en vue d'une analyse multi-élémentaire (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn).

Conditions d'utilisation

Les prélèvements doivent, si possible, être réalisés durant la période de développement optimal de la végétation (juin-juillet). Après récolte les échantillons peuvent être conservés 1 à 2 jours au réfrigérateur, mais ils doivent être lavés et séchés (à l'air libre ou à l'étuve à 40°C) le plus rapidement possible. Les échantillons secs peuvent être conservés indéfiniment.

Résultats

Le calcul de l'indice CMT - Végétaux est basé sur une comparaison des distributions des teneurs en éléments traces métalliques dans les échantillons étudiés avec celle d'échantillons témoins, caractéristiques de sites non contaminés (valeurs disponibles dans la base de données «Bioindicateurs»). Cet indice reflète l'écart entre les teneurs mesurées dans les végétaux présents sur le site contaminé et les valeurs mesurées dans les végétaux retrouvés sur site non contaminé.



Exemples contrastés de communautés végétales

Les bornes de l'indice CMT - Végétaux, définies dans le programme de l'ADEME « Bioindicateurs de qualité des sols », pouvant être utilisés dans l'évaluation des risques pour les écosystèmes sont les suivantes :

Interprétation de l'indice CMT - Végétaux*

	Aucun transfert anormal	Transfert faible à modéré	Transfert élevé
Etat des transferts	Aucune préconisation	Mise en place d'une surveillance	Zone à risque (mesure de gestion)
Indice CMT - Végétaux	0 à 5	5 à 15	> 15

Evaluation de l'outil par un bureau d'étude de gestion des sites et sols pollués

Thématique	Avis
Compétences techniques	Aucune compétence en botanique nécessaire puisqu'il s'agit de prélever des feuilles sur des plantes identiques mais sans avoir besoin de connaître l'espèce.
Applicabilité à tous les sites	Nécessite un taux de recouvrement de la végétation suffisant sur tous les secteurs pour pouvoir trouver un nombre d'espèces en commun et pour que les prélèvements soient représentatifs de chaque secteur.
Représentativité	Nécessite un nombre de plantes suffisant par échantillon. Echantillons à prélever durant la période de développement optimal des végétaux (en général juin / juillet).
Caractéristiques des prélèvements	Nécessite un repérage des prélèvements qu'il ne faut pas sous-estimer. La contribution d'un botaniste (même niveau débutant) peut permettre de gagner du temps. Prélèvement rapide et sans difficulté.
Contraintes techniques	Aucune difficulté physique, il suffit de se déplacer sur site, la matière prélevée étant des feuilles, les échantillons sont très légers.
Facilité de mise en œuvre	<p style="text-align: center;">Facile Difficile</p> 



Echantillonnage sur le terrain



Mesures analytiques des métaux

Photos Mines Saint-Etienne

Indice CMT-Végétaux : Mines Saint-Etienne, UMR 5600 (EVS), Saint-Etienne
 Contact : Olivier FAURE - ofaure@emse.fr



Index des tableaux et figures

Tableaux

- Tableau 1 : application potentielle des phytotechnologies en fonction des spécificités du projet et du site
- Tableau 2 : exemple de questionnaire pour la mise en œuvre de la phytoextraction avec un exemple de réponse
- Tableau 3 : cortège d'espèces utilisées pour les essais de phytostabilisation du crassier Industeel Loire – Arcelor Mittal (site Châteauneuf, Loire -42)
- Tableau 4 : batterie minimale de tests recommandés et éléments de preuve associés pour évaluer la qualité de sols en phytomanagement
- Tableau 5 : voies de valorisation énergétique de la biomasse végétale traitées dans le chapitre 4
- Tableau 6 : catégories d'installation de combustion en fonction de la puissance thermique nominale (P) et du type de combustible accepté dans chaque catégorie
- Tableau 7 : concentrations maximales réglementaires pour les combustibles utilisables en installations soumises à enregistrement
- Tableau 8 : principaux textes réglementaires et normatifs sur la méthanisation et la pyrolyse
- Tableau 9 : caractéristiques des projets avec évaluation économique (BIOFILTREE, PHYTOSED 2 et PHYTENER)
- Tableau 10 : inventaire des coûts et des recettes considérées dans les projets BIOFILTREE, PHYTOSED 2 et PHYTENER.

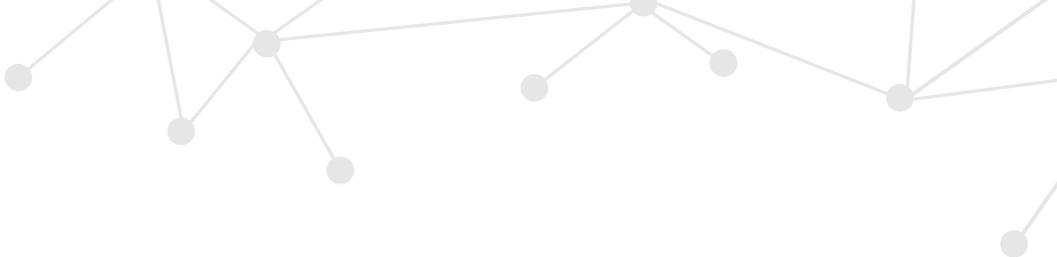
Figures

- Figure 1 : schéma de fonctionnement de la phytostabilisation
- Figure 2 : schéma de fonctionnement de la phytoextraction
- Figure 3 : schéma de fonctionnement de la rhizo/phytodégradation
- Figure 4 : approche itérative pour l'aide à la décision (adaptée d'après GREENLAND)
- Figure 4a : phase 1 : faisabilité
- Figure 4b : quels polluants peut-on traiter ?
- Figure 4c : phase 2 : confirmation
- Figure 4d : phase 3 : conception
- Figure 5 : arbre de décision
- Figure 7 : paramètres physico-chimiques des sols (0-25 cm) témoin (M2007) et contaminés (M200-1 et -3, M500)
- Figure 8 : concentrations moyennes en métaux (mg kg⁻¹ poids sec) dans les différents organes du miscanthus
- Figure 9 : concentrations moyennes en Cd et Zn (mg kg⁻¹ poids sec) dans les feuilles, les brindilles et les fines branches d'aulnes et de robiniers faux acacias plantés dans les sols non amendés R et les sols amendés F1 et F2 amendés respectivement avec les cendres FA1 et FA2, 11 années après la mise en place de l'expérimentation
- Figure 10 : vue générale du site Châteauneuf (Loire, 42) et des parcelles expérimentales avant phytostabilisation
- Figure 11 : bilan des essais de phytostabilisation sur le crassier métallurgique Industeel France / ArcelorMittal (site Châteauneuf, Loire- 42)
- Figure 12 : disponibilité environnementale et biodisponibilité environnementale; les deux facettes d'une évaluation opérationnelle de la biodisponibilité
- Figure 13 : l'approche «TRIADÉ», trois domaines d'expertises fournissent trois éléments de preuve indépendants
- Figure 14 : équation VAN
- Figure 15 : outil de calcul des coûts et recettes
- Figure 15a : feuillet associé au renseignement des données générales du projet
- Figure 15b : feuillet permettant de renseigner les coûts et les recettes associés au projet
- Figure 15c : résumé des coûts et des bénéfices par année et valeur actuelle nette (VAN)

Sigles et acronymes

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
Al	Aluminium
As	Arsenic
BTEX	Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylènes
Ca	Calcium
Cd	Cadmium
CEC	Capacité d'échange cationique
CMT	Charge Métallique Totale
Cr	Chrome
Cu	Cuivre
ETM	Eléments traces métalliques
Fe	Fer
HAP	Hydrocarbures aromatiques polycycliques
HCT	Hydrocarbures totaux
INERIS	Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques
ISA-Lille	Groupe Institut supérieur d'agriculture de Lille
K	Potassium
Mg	Magnésium
Mn	Manganèse
Mo	Molybdène
Ni	Nickel
Pb	Plomb
PCB	Polychlorobiphényles
pH	Potentiel hydrogène
TCR	Taillis à courte rotation
TTCR	Taillis à très courte rotation
VAN	Valeur actuelle nette
UE	Union européenne
Zn	Zinc





L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (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'Environnement, de l'Énergie et de la Mer et du ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.





LES PHYTOTECHNOLOGIES APPLIQUEES AUX SITES ET SOLS POLLUES

Le recours aux phytotechnologies reste encore émergent sur les marchés des techniques de gestion des sites et sols pollués. Ces phytotechnologies peuvent pourtant s'appliquer *in situ* sur une large variété de sols pollués (sols agricoles, friches, délaissés, sédiments stockés à terre...) et constituent a priori, des solutions technico-financières particulièrement bien adaptées aux sites de vastes surfaces polluées.

Des expérimentations en France ou à l'étranger, encouragées ou soutenues notamment par l'ADEME depuis plusieurs années, permettent aujourd'hui de présenter des retours d'expériences dans différentes situations de pollution et de donner une vision plus concrète des apports et des limites des différentes solutions appliquées sur le terrain

Les phytotechnologies gagnent à être mieux connues pour être mieux et plus souvent utilisées par les maîtres d'ouvrage et bureaux d'études en situation de gestion de sites pollués.

A l'échelle de la parcelle, elles constituent des alternatives pertinentes dans des contextes où la durée d'immobilisation du site à gérer n'est pas une contrainte. Elles permettent également de répondre à des attentes sociétales et participent au développement de la bioéconomie.

Ces nouveaux résultats de recherche le démontrent. Ils sont à partager et utiliser largement.



www.ademe.fr



010191

