



ADEME

# Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués

## État de l'art et guide de mise en œuvre

Coordonné par Valérie Bert

# Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués

---

**ÉTAT DE L'ART  
ET GUIDE DE MISE EN ŒUVRE**

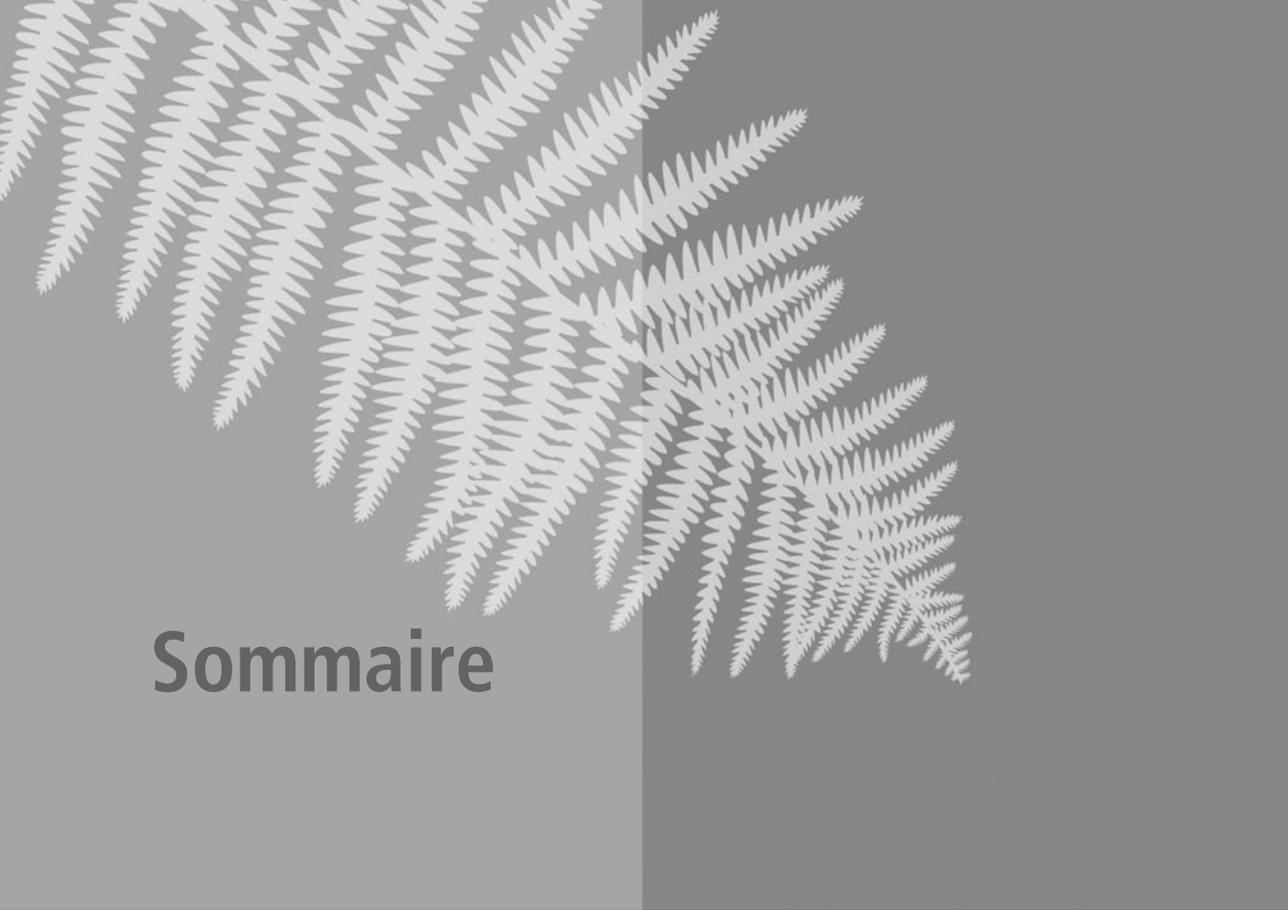
Valérie Bert – Anissa Hadj-Sahraoui – Corinne Leyval  
Joël Fontaine – Stéphanie Ouvrard



Imprimé en France  
ISBN : 978-2-7598-0805-2

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2012

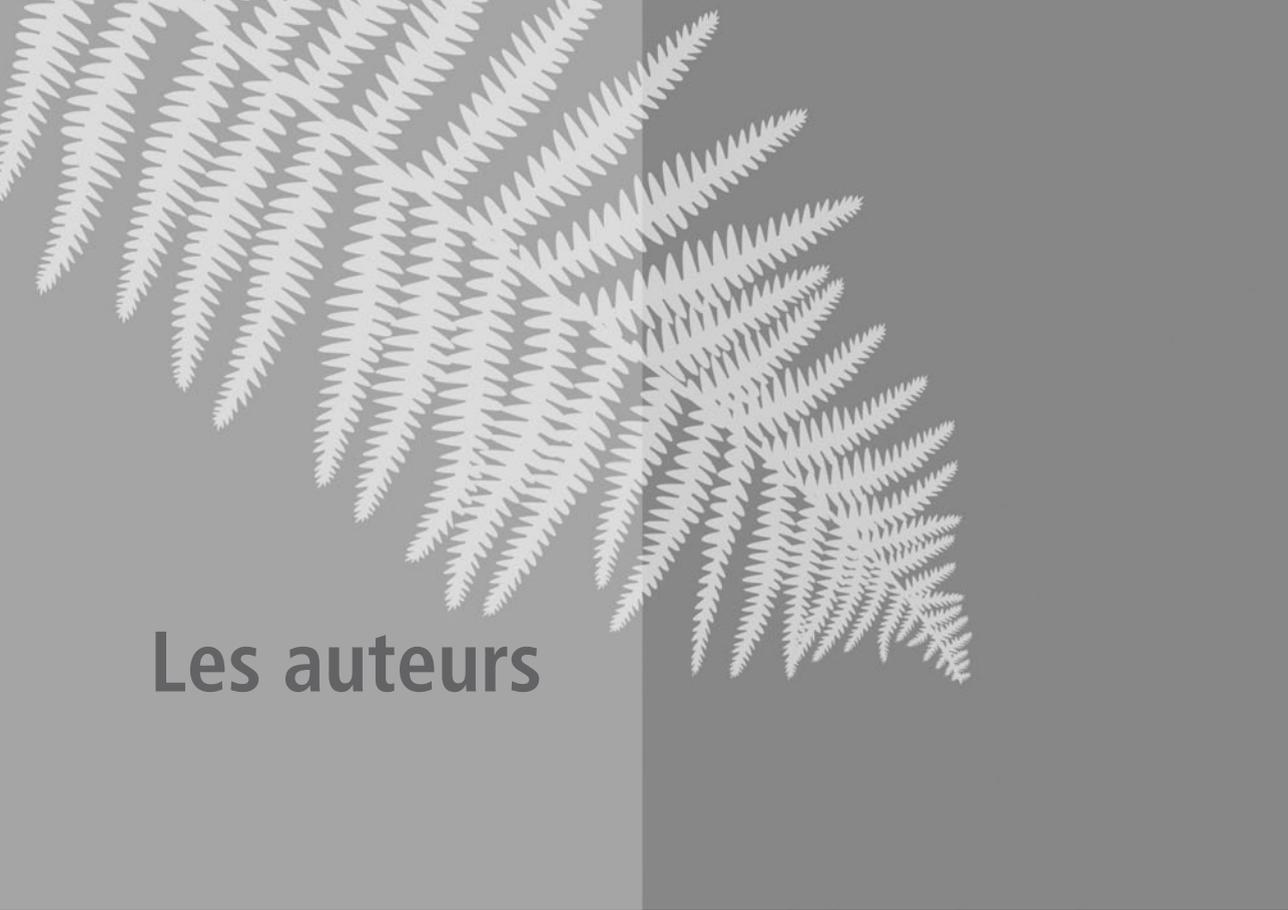


# Sommaire

<b>Les auteurs</b> .....	V
<b>Table des figures</b> .....	VII
<b>Table des tableaux</b> .....	IX
<b>Abréviations utilisées</b> .....	XI
<b>Avant-propos</b> .....	1
<b>Chapitre 1</b> Présentation générale .....	3
1.1 Contexte .....	3
1.2 Applications en France et à l'International .....	4
1.3 Enjeux .....	7
<b>Chapitre 2</b> Applicabilité .....	9
2.1 Compétences nécessaires .....	9
2.2 Caractérisation du site et paramètres clefs .....	10
2.3 Protocole de mise en place et d'entretien .....	11
2.4 Avantages et limites des phytotechnologies .....	12
2.5 Évaluation de la performance .....	13

2.6 Questions/réponses .....	14
2.7 Arbre de décision .....	16
2.8 Aspects règlementaires .....	18
<b>Chapitre 3</b> Phytostabilisation .....	23
3.1 Descriptif technique .....	23
3.2 Préconisations .....	25
3.3 Applications.....	34
3.4 Questions/réponses .....	40
<b>Chapitre 4</b> Phytoextraction .....	43
4.1 Descriptif technique .....	43
4.2 Préconisations .....	45
4.3 Applications.....	54
4.4 Questions/réponses .....	59
<b>Chapitre 5</b> Phyto et rhizodégradation .....	61
5.1 Descriptif technique .....	61
5.2 Préconisations .....	63
5.3 Applications.....	68
5.4 Questions/réponses .....	71
<b>Références</b> .....	73
<b>Glossaire</b> .....	85

- Tous les mots avec une astérisque \* sont définis dans le glossaire.
- Les références complètes correspondant à celles mentionnées dans le texte (dans les encarts *En savoir plus*) sont répertoriées dans la partie Références.



# Les auteurs

- Pour les parties générales et les parties sur la phytostabilisation et la phytoextraction :  
**Valérie BERT** – *INERIS*
- Pour la partie sur la phyto/rhizodégradation :  
**Anissa HADJ-SAHRAOUI** – *ULCO/UCEIV*  
**Corinne LEYVAL** – *LIMOS*  
**Joël FONTAINE** – *ULCO/UCEIV*  
**Stéphanie OUVRARD** – *Université de Lorraine/INRA*
- La coordination technique pour la réalisation et la relecture de ce guide a été assurée par  
**Amandine UHMANN** – *ADEME*
- Les personnes suivantes ont participé à la conception de ce guide :  
Pour l'INERIS : Martine RAMEL et Rodolphe GAUCHER  
Pour l'ADEME : Nadine DUESO et Frédérique CADIERE

- Les auteurs et les concepteurs de ce guide expriment leur reconnaissance aux personnes qui ont fait partie du comité de relecture :

Cécile GRAND – *ADEME*

Yves DUCLOS – *ADEME*

Francis DOUAY – *ISA*

Claude GRISON – *CEFE Montpellier*

Olivier FAURE – *EMSE*

Guillaume ECHEVARRIA – *Université de Lorraine/INRA*

Michel CHALOT – *UFC*

Jean-Louis MOREL – *Université de Lorraine/INRA*

Michel MENCH – *INRA Bordeaux*

Ce guide est édité par l'ADEME pour le compte de l'ADEME et de l'INERIS.



# Table des figures

Figure 2.1 : Principales étapes de la mise en œuvre d'une phytotechnologie.....	11
Figure 2.2 : Arbre de décision.....	17
Figure 3.1 : Schéma de fonctionnement de la phytostabilisation.....	24
Figure 3.2 : Peuplier (photo du projet BIOFILTREE, Valérie Bert) .....	25
Figure 3.3 : Miscanthus (photo du projet PHYTENER) .....	26
Figure 3.4 : Description des trois exemples de situation de phytostabilisation (état initial / état d'arrivée) .....	31
Figure 3.5 : Protocole de mise en œuvre d'une phytostabilisation et d'une phytostabilisation aidée .....	32
Figure 4.1 : Schéma de fonctionnement de la phytoextraction.....	44
Figure 4.2 : Noccea caerulea (photo de Thibault Sterckeman) .....	46
Figure 4.3 : Alyssum murale (photo de Guillaume Echevaria) .....	46
Figure 4.4 : Protocole de mise en œuvre d'une phytoextraction (avec amendement ou non) .....	52
Figure 5.1 : Schéma de fonctionnement de la phyto et rhizodégradation .....	62
Figure 5.2 : Protocole de mise en œuvre d'une phyto et rhizodégradation.....	67

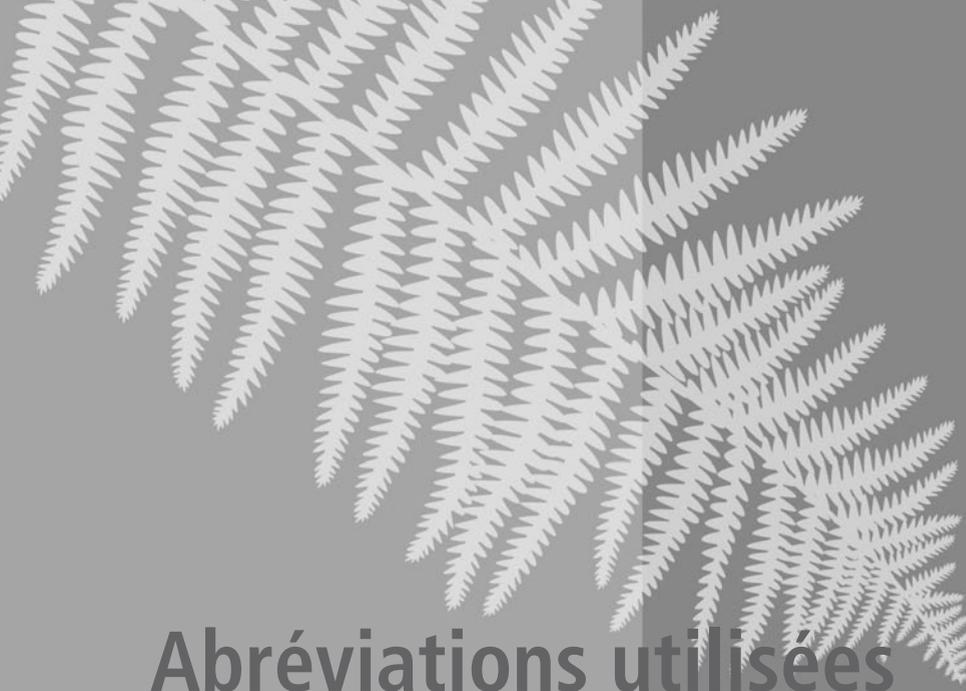
**Vj k' r ci g' k' p v g p v k' q p c m ( ' i g h v' d i e p m**



# Table des tableaux

Tableau 1.1 : Essais français de phytotechnologies en plein champ .....	6
Tableau 3.1 : Association des filières de valorisation et des espèces de plantes utilisées pour la phytostabilisation .....	27
Tableau 3.2 : Association des polluants avec des amendements (préconisés ou à éviter) ...	29
Tableau 3.3 : Exemples de coûts de mise en œuvre de phytostabilisation (sur une surface d'un hectare) .....	31
Tableau 4.1 : Association des polluants avec des plantes pour la phytoextraction et leurs valorisations potentielles.....	47
Tableau 4.2 : Exemple de coûts pour la mise en œuvre d'une phytoextraction (sur une surface d'un hectare).....	51
Tableau 5.1 : Association des polluants avec les plantes pour la phyto et rhizodégradation.....	64

Vj k'ri ci g'kpvkqpcmf 'igh'dic pm



# Abréviations utilisées

**HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

**PCB** : PolyChloroBiphényles

**BTEX** : Benzène Toluène Ethylbenzène Xylènes

**EDTA** : acide éthylène diamine tétraacétique

**DPTA** : acide diéthylène triamine pentaacétique

**NTA** : acide nitrilotri-acétique

**EDDS** : acide éthylène-diamine-di-succinate

**M** : unité de la concentration molaire, équivalente à mol/l

**TCR et TTCR** : Taillis à Courte Rotation et Très Courte Rotation

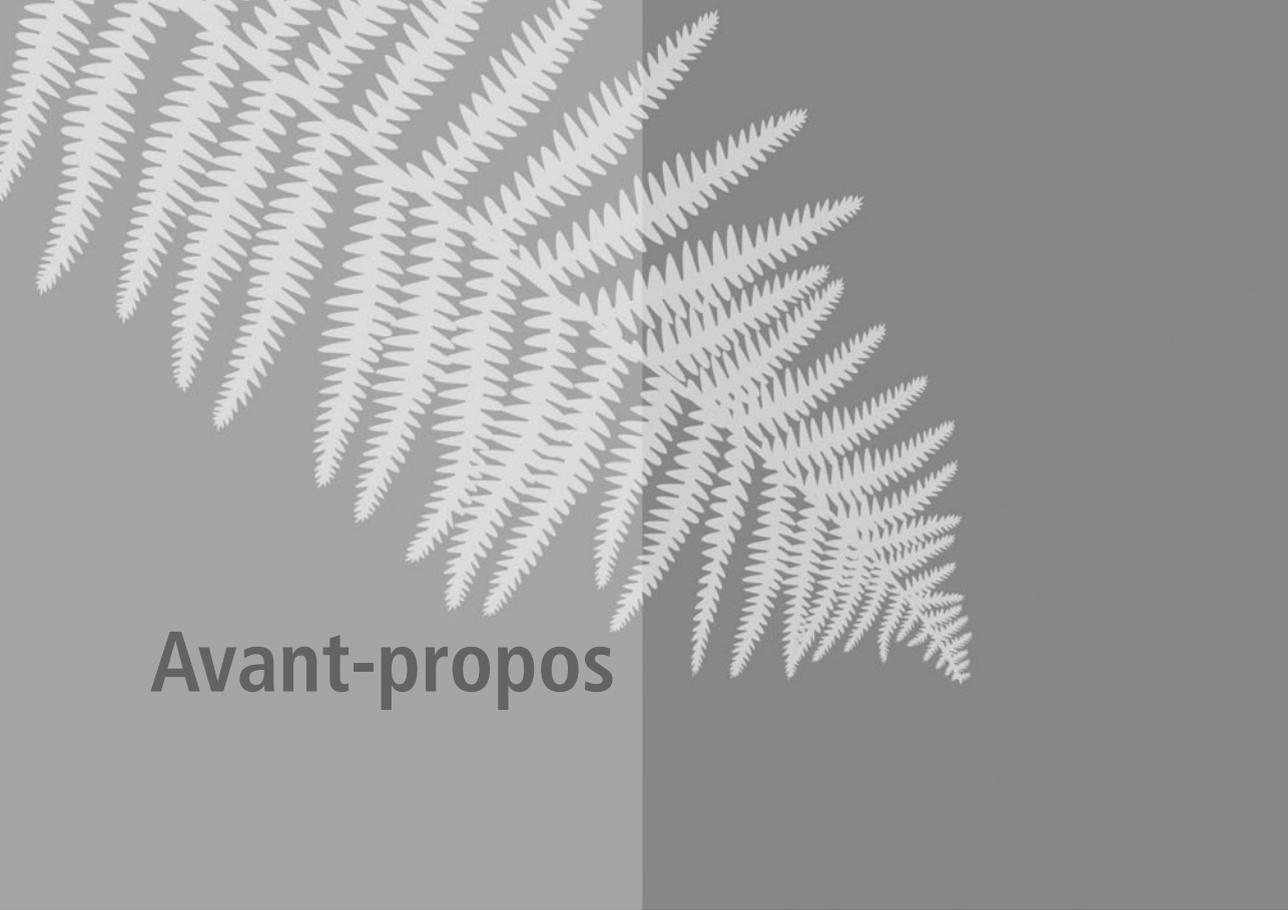
**DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement ; services déconcentrés du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE)

**UPDS** : Union des Professionnels de la Dépollution des Sites

**COST** : European Cooperation in Science and Technology

**SAFIR** : Sites Ateliers Français pour l'Innovation et la Recherche sur la gestion des sols

Vj k' r ci g' k' p v g p v k' q p c m ( ' i g h v' d i e p m



# Avant-propos

Les phytotechnologies restent encore émergentes sur les marchés des techniques de gestion et de dépollution des sols. Elles constituent pourtant, a priori, des solutions technico-financières particulièrement bien adaptées aux sites à vastes surfaces polluées. À des échelles plus petites, elles peuvent certainement constituer des alternatives douces aux objectifs de gestion dans des contextes où la durée du traitement n'est pas une contrainte.

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.

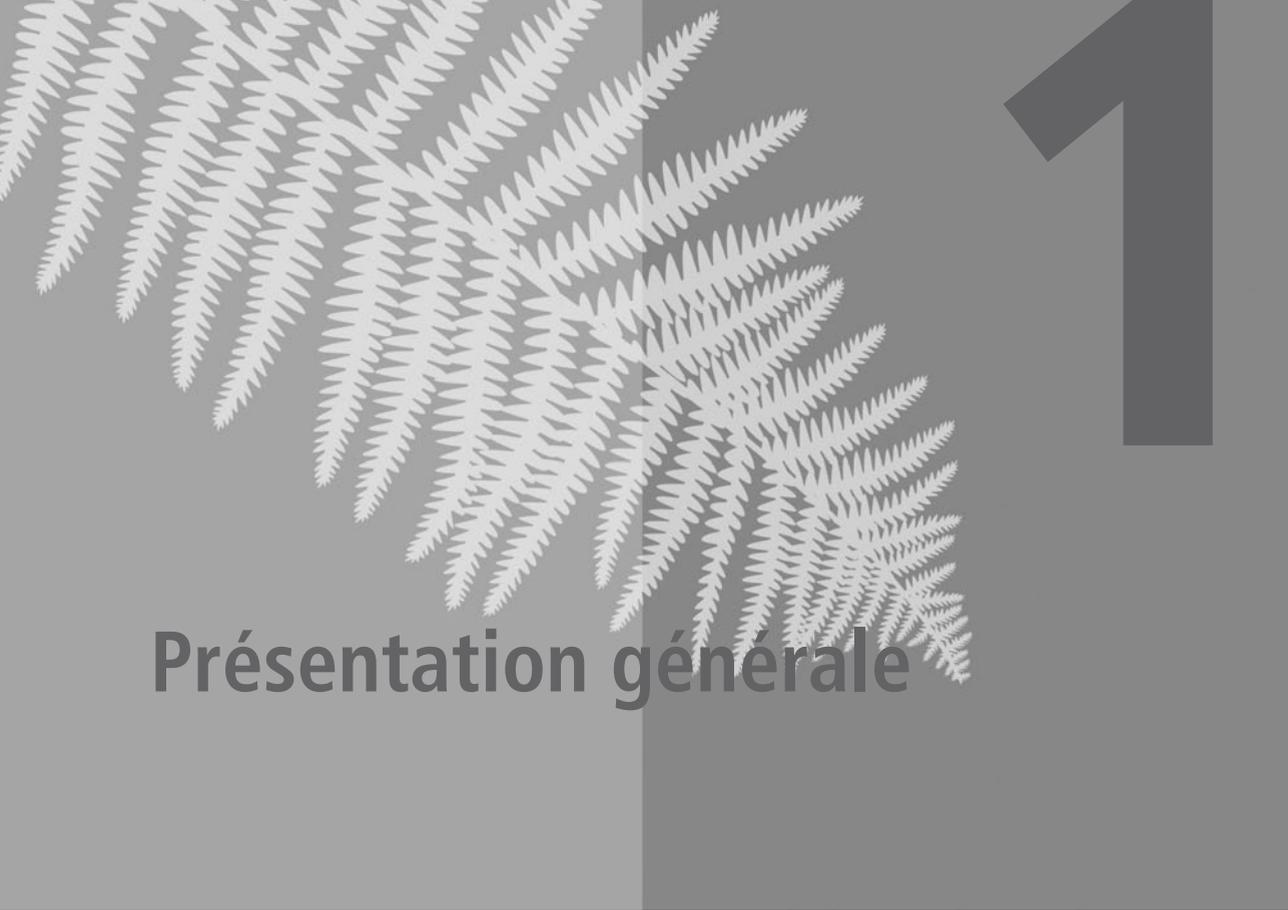
Pourtant, un certain nombre d'expérimentations sur l'ensemble du territoire, encouragées et soutenues par l'Ademe depuis plusieurs années, permettent aujourd'hui de présenter des retours d'expériences dans différentes situations de pollution et de donner une vision concrète des apports et des limites des différentes solutions appliquées sur le terrain.

Ce guide permet de faire le point sur l'état opérationnel des phytotechnologies en France. Il présente trois techniques, la phytostabilisation, la phytoextraction et la phyto/rhizodégradation sous les aspects techniques, économiques et opérationnels. Il est à destination de tout maître d'ouvrage ou bureau d'étude qui souhaiterait utiliser ces phytotechnologies.

Martine RAMEL,  
Responsable du Pôle Risques et technologies durables,  
INERIS

et

Nadine DUESO,  
Chef de Service Adjointe du Service Friches Urbaines et Sites Pollués,  
ADEME



# Présentation générale

## 1.1 Contexte

En France, l'héritage de plus de 200 ans d'activité industrielle a fait de la gestion des sols pollués un enjeu d'autant plus important que les questions des impacts sur la santé sont aujourd'hui au centre des préoccupations sociétales. Deux phénomènes socio-économiques se combinent pour rendre prioritaire la valorisation des sites pollués. Les évolutions structurelles du secteur industriel conduisent à l'arrêt de nombreuses exploitations et à l'augmentation du nombre de friches industrielles. Par ailleurs, les pressions démographique et foncière en zones urbanisées incitent à envisager de reconvertir ces friches pour d'autres utilisations.

### 1.1.1 *La gestion des sites pollués, priorité du Grenelle de l'Environnement*

La pollution des sols par les activités industrielles, reconnue comme une question environnementale depuis les années quatre-vingt dix, fait l'objet d'une politique de gestion qui s'est d'abord attachée à recenser et hiérarchiser les sites pollués en fonction de leur niveau de pollution intrinsèque, potentiel ou avéré. L'approche actuelle de la gestion a évolué pour s'appuyer

sur une évaluation des risques en fonction de l'usage des sites. Elle met l'accent sur la compatibilité de l'état des milieux avec les usages constatés et futurs, avec la nécessité de rétablir cette compatibilité afin de maîtriser des impacts sur la santé et l'environnement (après réhabilitation des sites). Les sols pollués ont fait bien évidemment partie intégrante des préoccupations du Grenelle de l'Environnement traduit en dispositions dans la Loi Grenelle II : nécessité d'achever l'inventaire des sites pollués « historiques » afin d'établir les priorités d'action en fonction de la localisation (présence de points d'eau, de populations sensibles exposées...) ; besoin de renforcer les moyens dévolus à l'État pour réhabiliter les stations-service fermées et les sites pollués « orphelins ». Reprenant une proposition du Grenelle de l'Environnement, l'article 43 de la loi Grenelle II précise, concernant la réhabilitation des sites pollués, que « les techniques de dépollution par les plantes seront de préférence utilisées ».

### 1.1.2 Les phytotechnologies pour la gestion des sites pollués

Les phytotechnologies regroupent un ensemble de techniques qui utilisent des espèces végétales pour extraire, contenir ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques. Émergentes sur les marchés du traitement et de la gestion des sites et sols pollués, ces techniques douces peuvent s'appliquer *in situ* sur une large variété de sols pollués (sols agricoles, friches industrielles, sédiments excavés, etc.) en milieu rural et urbain. Jugées *a priori* plus conformes aux enjeux du développement durable que les techniques classiques de traitement sur site et hors site, elles impactent positivement les fonctions et la structure du sol. Ces techniques constituent une alternative ou un complément aux techniques conventionnelles dans le cas notamment de pollution à grande échelle.

## 1.2 Applications en France et à l'International

En bref :

- La **phytostabilisation** est une technique *in situ* de stabilisation basée sur l'utilisation des plantes. Ce n'est pas une technique de dépollution mais un mode de gestion destiné à stabiliser les éléments traces du sol. Les plantes, éventuellement en combinaison avec des amendements (**phytostabilisation aidée**), réduisent la mobilité des polluants et donc les transferts horizontaux et verticaux de polluants.
- La **phytoextraction** est l'utilisation *in situ* de plantes 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.
- La **phyto / rhizodégradation** est une technique *in situ* utilisant des plantes et des microorganismes pour dégrader des polluants organiques en constituants élémentaires (minéralisation).

Depuis les années quatre-vingt-dix, ces techniques font l'objet de multiples recherches menées par des équipes nationales et internationales. Les objectifs principaux de ces recherches sont orientés selon deux axes complémentaires : l'un, de nature plutôt fondamental, vise à

acquérir des connaissances sur les mécanismes de tolérance et d'accumulation des plantes candidates en phytotechnologies pour connaître, voire améliorer, leur capacité à tolérer, à immobiliser ou à extraire les polluants ; l'autre, plus appliqué, vise à mettre en œuvre et à optimiser les itinéraires techniques (du semis à la récolte) et les filières de valorisation de la biomasse collectée dans une approche intégrée de gestion durable des sols pollués. Depuis 1998, ces recherches ont été en particulier développées et valorisées au sein des réseaux européens de scientifiques formés dans le cadre des actions COST. Des expérimentations ont lieu notamment sur les sites ateliers du réseau SAFIR, mis en place afin de faciliter l'accès à des sites expérimentaux aux équipes de recherche ainsi que de mutualiser les connaissances et les retours d'expérience.

Des revues résument les connaissances acquises, au niveau physiologique, biochimique et moléculaire, sur les mécanismes d'absorption et d'exclusion des polluants et leur transfert des racines vers les parties aériennes, de stockage, de détoxification, etc. D'autres revues résument les connaissances acquises et le niveau d'application atteint par la phytostabilisation, la phytoextraction et la phyto- et rhizodégradation via la synthèse des travaux de recherche menés en parcelles, pilotes et plein champ.

Des travaux de recherche appliquée de grande envergure dont certains sont intégrés dans des projets d'aménagement sont en cours de réalisation au niveau français.

En France, le marché de la phytoremédiation est un marché naissant, comme le confirme le faible volume de terres traitées par phytoremédiation (selon l'étude Ernst & Young pour l'ADEME, 0,3 % des volumes de terres traitées en 2010).

En 2010, en Europe, une quarantaine d'essais de phytostabilisation et une quarantaine d'essais de phytoextraction étaient recensés par la communauté scientifique. Ces essais ont été conduits (ou le sont encore) principalement dans le cadre de projets de recherche sur des sols agricoles, des friches industrielles, des sites miniers et des sédiments excavés pollués par les éléments traces (cadmium, zinc, plomb, cuivre, nickel, arsenic, chrome, antimoine, thallium, bismuth), et en conditions réelles sur des surfaces variées, allant de quelques mètres carrés à quelques dizaines d'hectares. La France comptait une dizaine de sites phytostabilisés connus et deux sites où la phytoextraction était étudiée. Depuis 2011, le nombre de sites sur lesquels les phytotechnologies sont étudiés est en augmentation (tableau 1.1).

Peu de résultats issus de recherches appliquées sont disponibles pour la phytodégradation. En effet, en 2010, en Europe et aux États-Unis on pouvait recenser un peu moins d'une quinzaine de sites connus sur lesquels avait été mis en place une phyto/rhizodégradation. Parmi ces essais, un seul était recensé en France. Certains essais ont été menés sur sédiments ou dans des mangroves avec des plantes de milieux humides ou tolérant la salinité. D'autres ont été menés sur des sols agricoles ou des sols pollués par diverses activités industrielles (production de voiture, production d'explosifs, etc.) avec des arbres ou des herbacées sélectionnés ou colonisatrices.

Tableau 1.1 Essais français de phytotechnologies en plein champ.

Technique	Polluant	Amendement	Plantes	Lieu	Surface	Référence
Phyto-stabilisation aidée	Cadmium / Nickel	Cendres volantes, Fe <sup>0</sup>	Maïs	Louis Fargues (33)	Parcelles	Mench <i>et al.</i> (2007), Boisson <i>et al.</i> (1998)
Phyto-stabilisation aidée	Cuivre / Arsenic / Chrome	Compost, dolomite, Fe <sup>0</sup>	<i>Agrostis capillaris</i> , <i>A. gigantea</i> , peuplier, saules, <i>Miscanthus</i>	Biogeco (33)	Parcelles	Bes <i>et al.</i> (2009), Mench <i>et al.</i> (2010)
Phyto-stabilisation aidée	Arsenic	Grenaille d'acier	Mélanges de poacées* et d'herbacées dicotylédones	La Combe du Sault (11)	10 ha	Difpolmine, phytoperf (voir exemple)
Phyto-stabilisation aidée	Cadmium, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic	Amendement minéral basique, hydroxylapatite	<i>Deschampsia cespitosa</i> , <i>Festuca rubra</i> , végétation colonisatrice	Lallaing (59)	Parcelles	Bert <i>et al.</i> 2012
Phyto-stabilisation aidée	Cadmium, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic	Amendement minéral basique	<i>Deschampsia cespitosa</i> , <i>Salix viminalis</i> (var Inger et Tordis)	Fresnes sur Escault (59)	1 ha	Phytosed Ec1 (voir exemple)
Phyto-stabilisation aidée	Arsenic, Mercure	Amendement biologique	Peupliers (var Skado et I214) et aulne	Tavaux (39)	1 ha	BIOFILTREE
Phyto-stabilisation aidée	Cadmium, Zinc, Plomb, Cuivre, Arsenic	Amendement biologique	Peupliers (var Skado et I214) et aulne	Pierrelaye (95) et Fresnes sur Escault (59)	2 ha	BIOFILTREE
Phyto-stabilisation aidée	Cadmium / Nickel	Béringite, grenaille d'acier	Maïs	Couhins (33)	Parcelles	Boisson <i>et al.</i> (1998)
Phyto-stabilisation aidée	Cadmium, Chrome, Cuivre, Nickel, Plomb, Zinc	MIATE, BRF	Mélanges de poacées* et d'herbacées dicotylédones	Châteauneuf (42)	Parcelles	Physafimm
Phyto-stabilisation (aidée et non aidée)	Cadmium / Plomb / Zinc	Cendres volantes	Trèfle, ray-grass, aulne, acacia, chêne, érable, saule, <i>miscanthus</i>	Evin-Malmaison, Courcelles Les Lens et Noyelles-Godault (62)	4 ha	PHYTENER, Lopareva-Pohu <i>et al.</i> (2011), Bidard <i>et al.</i> (2007)

Technique	Polluant	Amendement	Plantes	Lieu	Surface	Référence
Phyto-stabilisation et phyto-extraction	Cadmium / Zinc	/	Peupliers (14 cultivars*)	Pierrelaye (95)	5 ha	Phytipop
Phyto-extraction	Cuivre	/	Tournesol	Biogeco (33)	Parcelles	Kolbas <i>et al.</i> (2009)
Phyto-extraction	Cadmium / Zinc	/	<i>Thlaspi caerulescens</i>	La Bouzule (54)	Parcelle	Schwartz <i>et al.</i> (2003)
Phyto-extraction	Plomb	/	<i>Pelargonium</i>	Bazoches, Toulouse (31)	Parcelle	Arshad <i>et al.</i> (2008)
Phyto-extraction	Zinc / Cadmium, Zinc, Titane	/	<i>Noccea caerulescens</i> <i>Anthyllis vulneraria</i> <i>Iberis intermedia</i>	Saint Laurent Le Minier (30)	2,5 ha	Projet Ingecotech (voir exemple)
Phyto-rhizo-dégradation	HAP / Cuivre	Compost, dolomie	<i>Miscanthus</i>	Biogeco (33)	Parcelle	PHYTODEMO
Phyto/rhizo-dégradation	HAP, métaux	/		Homécourt (54)	Parcelles	Ouvrard <i>et al.</i> (2011) et Multipolsite (voir exemple)

*Pour en savoir plus*

Mench *et al.* (2009a ; 2009b ; 2010); Vangronsveld *et al.* (2009) ; Bert *et al.* (2009) ; Ernst & Young (2010 & 2012)

<http://lbewww.epfl.ch/COST837/>

<http://w3.gre.ac.uk/cost859/>

<http://www.safir-network.com/>

## 1.3 Enjeux

Les enjeux diffèrent en fonction du stade de développement des phytotechnologies.

### 1.3.1 La phytostabilisation

Les connaissances actuelles et le retour d'expérience sur la mise en place de la phytostabilisation (aidée) laissent penser que cette technique est en phase de démonstration à l'échelle du champ. Les travaux de recherche en cours et à venir restent nécessaires pour continuer à améliorer les connaissances scientifiques sur ce mode de gestion (écologie et fonctionnalité des sols, biodiversité, écotoxicité, etc.).

Les enjeux concernent les phases de suivi et de surveillance de la technique afin de garantir un niveau de maîtrise des impacts au moins équivalent à celui des techniques conventionnelles de gestion des sites pollués. Elle doit présenter des avantages par rapport aux autres