



# LES PHYTOTECHNOLOGIES

## UTILISATION DES ESPÈCES VÉGÉTALES POUR UNE GESTION ET RÉDUCTION DES RISQUES SUR UN SITE POLLUÉ

### DESCRIPTION THÉORIQUE DU PRINCIPE DE LA TECHNIQUE

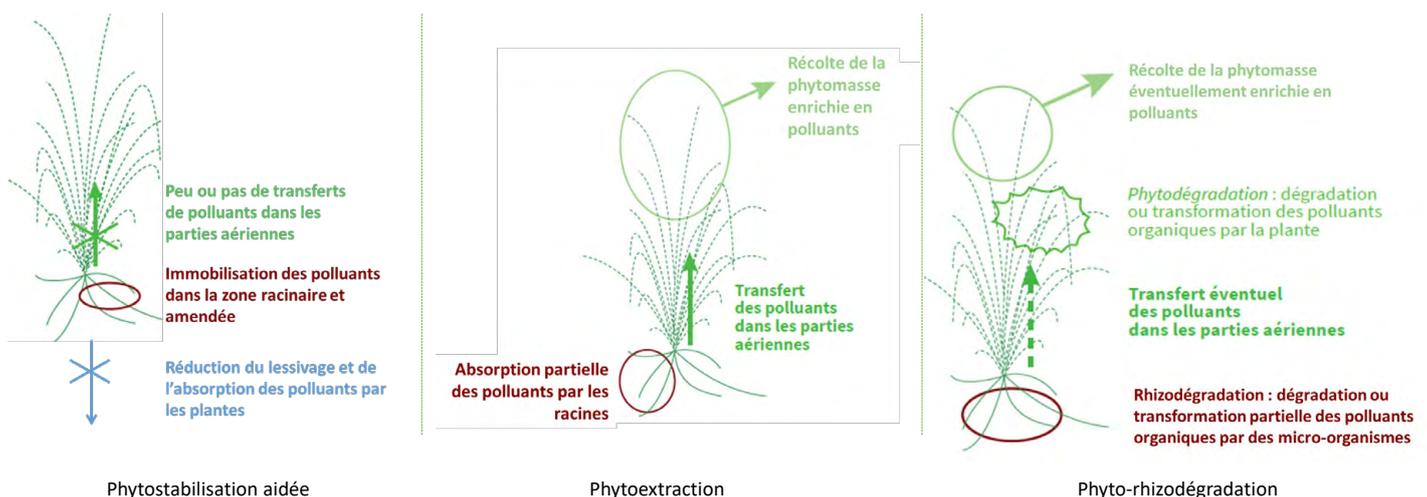
Les **phytotechnologies** sont des méthodes de gestion des sites pollués. Ces écotechnologies sont fondées sur l'utilisation d'espèces végétales, herbacées et/ou ligneuses, pour **maitriser les sources de pollution et réduire les transferts et les expositions** (usagers, écosystèmes). La phytostabilisation aidée et, dans une moindre mesure, la phytoextraction et la phyto-rhizodégradation sont les principales phytotechnologies qui bénéficient de retours d'expériences importants.

La **phytostabilisation aidée** est une technique de gestion qui repose sur l'utilisation combinée d'espèces végétales et d'amendements du sol pour limiter la mobilité des polluants dans le sol et les transferts vers les différents compartiments de l'environnement et de la chaîne trophique. Les espèces végétales sélectionnées tolèrent les polluants présents sur site et ne doivent pas avoir un comportement accumulateur.

La **phytoextraction** est une technique de dépollution des sols qui utilise des espèces végétales capables d'accumuler

certains polluants inorganiques dans leurs parties aériennes. La dépollution des sols avec ces (hyper)accumulateurs n'est cependant que partielle puisque les plantes n'ont accès qu'à une partie des polluants du sol : la fraction phytodisponible. La dépollution nécessite la récolte régulière de la biomasse végétale (phytomasse). Enrichie en polluants, cette phytomasse devra intégrer une ou des filières afin de permettre sa valorisation ou le cas échéant son élimination.

La **phyto-rhizodégradation** est une technique de dépollution qui permet la dégradation des polluants organiques en composés plus simples et moins toxiques, grâce à l'action combinée d'espèces végétales et de microorganismes. La plupart des polluants organiques étant totalement ou en partie hydrophobes, ils sont en général peu transférés dans les parties aériennes des espèces végétales. Ils sont dégradés dans la zone des racines de ces dernières, la rhizosphère, grâce aux microorganismes bactériens et fongiques stimulés par l'exsudation racinaire.



*Principe de fonctionnement de la phytostabilisation aidée, de la phytoextraction et de la phyto-rhizodégradation.*

L'objectif premier de ces trois phytotechnologies est de **réduire autant que possible, voire supprimer, les transferts des polluants** par envol de poussière, ruissellement et lixiviation. La limitation des transferts se fait via divers mécanismes (modification du bilan hydrique, précipitation/sorption/dégradation des polluants dans le sol rhizosphérique ou translocation) et grâce à la couverture

du sol par les espèces végétales. L'objectif secondaire de la phytoextraction et de la phyto-rhizodégradation est de **diminuer les concentrations en polluants dans les sols** avec une efficacité qui est fonction notamment de la durée de mise en œuvre de ces phytotechnologies sur le sol pollué et du contexte.

# LES PHYTOTECHNOLOGIES

## CONTEXTE D'UTILISATION

Les phytotechnologies peuvent s'appliquer *in situ* voire sur site dans des **contextes variés de sites pollués** (sols agricoles, sites miniers, friches, sites délaissés, sites de gestion de sédiments...), en milieu urbain dans un contexte de renaturation, ou en milieu péri-urbain ou rural. Elles peuvent être appliquées **de manière définitive** pour l'aménagement paysager d'un site **ou de manière temporaire** tel qu'un parc ou espace vert en attente d'un projet bâti.

La pollution peut être présente au niveau du sol mais aussi au niveau de la nappe superficielle. La gestion des sols se limite en profondeur à la zone d'influence des racines qui varie en fonction de l'espèce végétale utilisée (de quelques dizaines de centimètres jusqu'à quelques mètres) et de celle des amendements (de quelques centimètres à une quinzaine de centimètres).

Dans le cas de sites avec plusieurs polluants et en fonction de leur nature, plusieurs phytotechnologies peuvent être envisagées sur un même site. Ces techniques peuvent également être utilisées sur une ou plusieurs parties du site et de **manière indépendante, en complément ou à la suite d'un traitement par des techniques de dépollution conventionnelles**, pour la gestion de la pollution résiduelle.

Les phytotechnologies sont généralement mises en œuvre sur des sites avec peu de pression foncière. On parle de **phytomanagement** lorsque ces techniques, basées sur

l'utilisation d'espèces végétales, combinent sur le long terme :

- Une gestion de la pollution en maîtrisant les risques environnementaux et sanitaires,
  - Et une contribution à de nombreux enjeux de société pour un développement durable : reconversion de friches et sites délaissés, zéro artificialisation nette, énergies renouvelables (production de phytomasse valorisable en matière et/ou énergie ou mise en place au pied d'éoliennes ou des panneaux photovoltaïques), biodiversité, adaptation au changement climatique (réduction des îlots de chaleur).
- Le phytomanagement est le terme utilisé pour décrire **un mode de gestion technologique et managérial qui met en avant la valorisation du foncier** pour un site pollué, valorisation rendue possible grâce aux bénéfices rendus par les phytotechnologies. Ce concept est de plus en plus utilisé par les professionnels en contexte de sites dégradés mais non pollués.

### À quelle étape ?

Évaluées dans le cadre du plan de gestion et du plan de conception des travaux, elles sont utilisées lors des **étapes de dépollution ou de gestion de la pollution. La surveillance du site**, intégrée dans la mise en œuvre, permet de s'assurer de la compatibilité entre les performances de la technique appliquée et les usages du site.

## POLLUANTS CONCERNÉS

La **phytostabilisation aidée** et la **phytoextraction** sont adaptées pour la gestion des sols impactés par les **composés inorganiques**. Les polluants concernés sont les éléments traces métalliques (ETM) porteurs d'enjeux sanitaires et environnementaux, c'est-à-dire les métaux (ex. : Cd, Pb, Cu) et les métalloïdes (ex. : As). Parmi les métaux, le Zn et le Ni lorsqu'ils sont présents en excès ainsi que les terres rares, considérés comme des matières premières stratégiques,

peuvent également être extraits du sol par phytoextraction.

La **phyto-rhizodégradation** est adaptée dès lors que le sol présente des **polluants organiques susceptibles d'être dégradés** par les espèces végétales et les microorganismes. Les polluants bénéficiant de retour d'expérience sont les hydrocarbures dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). D'autres composés comme les BTEX ou les PCB sont étudiés dans le cadre de projets de recherche.

## MATÉRIEL NÉCESSAIRE

**Le matériel** utilisé pour la mise en œuvre, le suivi, et la récolte de la phytomasse produite lorsque nécessaire, n'est généralement pas spécifique. Il est celui utilisé dans les **secteurs agricole et forestier** ou dans les services espaces verts des collectivités : engins pour préparer le sol avant semis ou plantation, pour épandre les amendements du sol, pour semer, repiquer et récolter les espèces végétales ou pour entretenir les espaces verts. La disponibilité du matériel nécessaire à la récolte de la phytomasse produite sur site pollué peut être limitante et doit être anticipée dès le début du projet.

La plupart des espèces végétales (plantes vivaces, arbres...) sont disponibles chez les semenciers, les pépiniéristes et dans les catalogues des professionnels du

végétal. De même, la plupart des amendements chimiques ou biologiques (organiques ou micro-organismes) utilisables sont commercialisés. Il faut cependant signaler l'absence de commercialisation de la plupart des espèces végétales (hyper) accumulatrices de métaux utilisables en phytoextraction, plantes souvent spécifiques à certains polluants. Cette limitation devrait disparaître puisque plusieurs structures développent des itinéraires culturaux (choix du fertilisant, de l'amendement, besoin en irrigation, fréquence de coupe...) adaptés à ces espèces.

Les méthodologies et matériel employés lors du suivi pour le prélèvement et l'analyse des sols, des espèces végétales et des eaux souterraines sont identiques à ceux utilisés de manière conventionnelle lors de la gestion d'un site pollué.



© Serpol



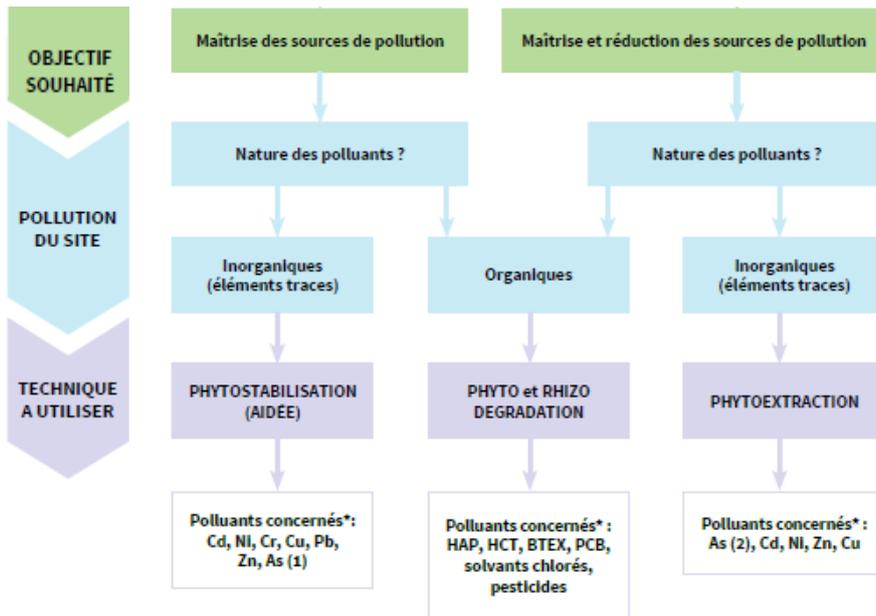
© Ineris

Mise en place des semences et culture obtenue.

## MÉTHODOLOGIE

Le choix de la **phytotechnologie** retenue doit prendre en considération plusieurs critères :

- L'usage futur du site,
- L'objectif de gestion (maîtrise et réduction des transferts de pollution ou des sources d'exposition) et le délai associé,
- Le(s) type(s) de polluants présents sur le site,
- Les caractéristiques du site (bâti, topographie, hydrogéologie...),
- Les caractéristiques du sol (pH, structure du sol, fertilité...).



*Choix des phytotechnologies selon le site, les objectifs souhaités et les polluants.*

© ADEME/meris, 2012

*\* en lien 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 l'As*

### Caractérisation du site

La caractérisation chimique et agronomique du site permet de collecter l'ensemble des informations pour vérifier la faisabilité de la technique comme mesure de gestion. À l'issue de cette étape sont définis : **les espèces végétales, les amendements éventuels, les itinéraires culturels et le programme de suivi des performances.** Les espèces végétales peuvent être choisies non comestibles pour l'homme et la faune en fonction de l'usage envisagé, et de préférence indigènes et non invasives. A cette étape du projet, une expertise en agronomie et biologie végétale est nécessaire.

### Mise en œuvre

En accord avec la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, des essais, en laboratoires et/ou sur site au niveau de certaines zones, dimensionnés au regard des enjeux associés au site, peuvent être nécessaires pour **évaluer la faisabilité et les bénéfices attendus.**

La mise en œuvre consiste ensuite à **préparer le site** (défrichage, déboisement ou désherbage éventuels, aplanissement du terrain, gestion des eaux de ruissellement...), puis **préparer le sol** (décompactage, épandage, bâchage éventuels) avant le semis ou la plantation.

### Suivi des performances et entretien

Il est important de réaliser un **suivi des performances via des prélèvements** (sol, espèces végétales, eau, poussières...) et un entretien lors du cycle de culture (arrosage, lutte contre les adventices et les ravageurs).

Pour s'assurer de la performance sur le long terme, l'entretien peut conduire à répéter tout ou partie de l'itinéraire culturel (amendements et espèces végétales).

### Récolte de la phytomasse

La récolte de la phytomasse peut être réalisée de manière unique ou périodique, selon l'itinéraire culturel et la durée de la gestion du site. Elle peut être valorisée, si une voie de valorisation existe et est appropriée.

### Points de vigilance :

- Le phytomanagement est à l'interface de nombreux contextes réglementaires, en lien avec les sites et sols pollués, les amendements et la phytomasse récoltée. Certains points comme le statut de la phytomasse (déchet ou produit) ou sa valorisation dans des filières existantes ou à développer ne sont pas encore bien encadrés.
- Pour la phytostabilisation aidée, il n'existe pas d'amendement universel pour réduire la mobilité et la biodisponibilité des polluants pour l'ensemble des sols pollués. Les amendements sont spécifiques à la nature des polluants et leur efficacité dépend des paramètres influant sur la mobilité et la biodisponibilité des polluants dans le sol.
- La réalisation d'essais préliminaires, a minima au laboratoire et si possible *in situ*, pour s'assurer de la pertinence des amendements et des espèces végétales retenus au regard des caractéristiques pédologiques, du degré de pollution et des conditions environnementales du site à gérer est fortement conseillée.
- Comme tout mode de gestion d'un site, la mise en place de ces techniques nécessite une conservation de la mémoire de la pollution laissée en place et des éventuelles restrictions d'usages pour notamment éviter l'exposition des populations.



## AVANTAGES – INCONVÉNIENTS – MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

### AVANTAGES

#### Polluants

- Différentes techniques applicables selon les polluants présents.

#### Mise en œuvre

- Traitement *in situ* des pollutions diffuses,
- Techniques de mise en œuvre éprouvées,
- Maîtrise du choix des espèces végétales,
- Pas de nécessité d'apport de terre pour réduire l'exposition et le transfert,
- Technique utilisable de manière indépendante ou en soutien à d'autres mesures de gestion,

#### Performance

- Mesure de gestion adaptée pour de grandes surfaces,
- Préservation et/ou amélioration des fonctions du sol,
- Bénéfices au travers de la création de valeurs marchandes et non marchandes (valorisation phytomasse, biodiversité, bien-être des populations...).

### INCONVÉNIENTS

#### Polluants

- Pollution avec de multiples polluants non maîtrisée,
- Des teneurs élevées en polluants phytodisponibles peuvent être limitantes.

#### Mise en œuvre

- Nécessite un suivi avec des visites régulières,
- Peu d'encadrement par la réglementation.

#### Performance

- Limitée à la zone d'enracinement des espèces végétales et de travail du sol si utilisation d'amendements,
- Performances dépendantes des conditions affectant les espèces végétales (météo, ravageurs, maladies...),
- Difficulté d'afficher des objectifs et des mesures de résultats de performance,
- Nécessité de suivi des risques résiduels pour l'environnement (faune, flore ...) et la santé.

### MATURITÉ DE LA TECHNIQUE

Phytostabilisation aidée **++** Phytoextraction **- / +** Phytorhizodégradation **- / +**

Les phytotechnologies nécessitent et font l'objet de nombreuses recherches appliquées et de tests. Elles s'appuient sur des compétences existantes mais disséminées et le retour d'expérience est inégal selon la technique.

## DÉLAIS DE MISE EN ŒUVRE

Le phytomanagement est un mode de gestion d'un site qui peut demander **quelques mois à plusieurs dizaines d'années**. Néanmoins, **les interventions sur site sont ponctuelles** (un à plusieurs jours).

La mise en œuvre peut être réalisée sur une période de quelques jours selon l'état initial du sol et la superficie à traiter. La présence sur site pour le suivi des performances dépend du nombre de paramètres mesurés, de la fréquence

des mesures et de la durée de gestion. L'entretien peut être réalisé en une journée ou quelques jours selon la croissance des espèces conditionnée par la météo et se répète sur la période de gestion. Enfin, l'étape de récolte de la phytomasse dépend de la superficie à récolter ; une grande réactivité est parfois nécessaire au regard de la météo et de l'étape ultérieure de valorisation.

### PHASE

### MISE EN ŒUVRE SUR SITE

### SUIVI DES PERFORMANCES ET ENTRETIEN

Délai associé



⌚ : jour / ⌚⌚ : semaine / ⌚⌚⌚ : mois / ⌚⌚⌚⌚ : année / ⌚⌚⌚⌚⌚ : dizaine d'années

## ÉLÉMENTS DE COÛTS

Le coût de mise en œuvre des phytotechnologies est équivalent à celui de gestion d'espace agricole ou forestier et la rentabilité augmente avec la superficie à traiter. Le coût de suivi et d'entretien est équivalent à celui d'un site non pollué avec un surcoût lié à la gestion de la pollution, variable selon le site et non négligeable vis-à-vis des coûts de mise en œuvre. Si

les filières existent, la vente de la phytomasse peut représenter un revenu, faible pour la filière bois énergie ou plus conséquent sur d'autres filières encore à l'étude. Les **coûts totaux sont très disparates et dépendent fortement du site**. Les coûts connus se réfèrent à des coûts de mise en œuvre et varient très fortement d'un site à l'autre (de 2 à plus de 40 €/m<sup>2</sup>).

### PHASE

### MISE EN ŒUVRE SUR SITE

### SUIVI DES PERFORMANCES ET ENTRETIEN

Coût associé



-

€ < 100 € / €€ < 1 000 € / €€€ < 10 000 € / €€€€ < 100 000 € / €€€€€ > 100 000 €

## POUR EN SAVOIR PLUS - RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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

[2] *Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : Etat de l'art et guide de mise en œuvre - edp sciences, ADEME/Ineris - 2012*

[3] « *Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols* » - Ineris - 2019

[4] *Qu'est-ce que le phytomanagement?* - Fiche IDfriches Auvergne-Rhône-Alpes - Avril 2021.