

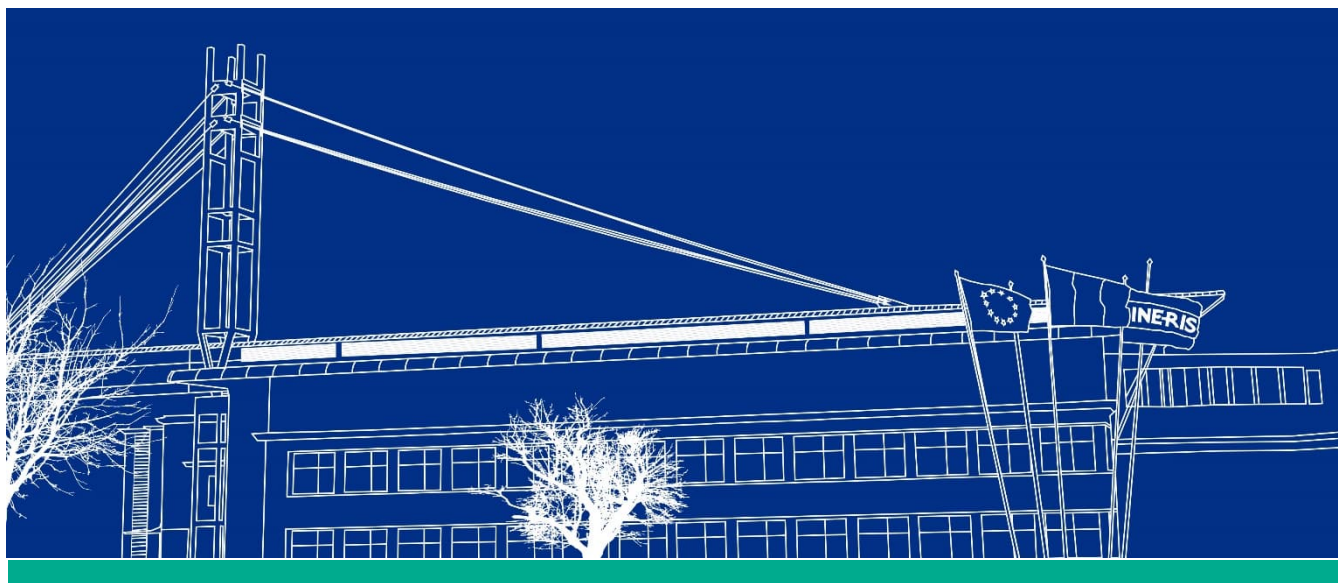


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INERIS

maîtriser le risque
pour un développement durable



(ID Modèle = 454913)

Ineris-230485-1814948-v2.0

29/08/2025

Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols

Témoignages et évolutions réglementaires

Seconde édition

PRÉAMBULE

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : BERT VALERIE - Karen PERRONNET

Vérification : Nathalie VELLY- CHARMOILLE ARNAUD

Approbation : DUPLANTIER STEPHANE - le 29/08/2025

L'Ineris remercie toutes les personnes interviewées pour avoir pris le temps de l'échange et partagé leurs avis et retours d'expériences, et Guillaume GAY du ministère de l'environnement (Bureau Sol et Sous-sol) pour les échanges.

Table des matières

1	Contexte	6
2	Des phytotechnologies au phytomanagement : définitions.....	8
2.1	Phytotechnologies : trois techniques opérationnelles, fonction de la nature de la pollution, des objectifs de gestion et des usages projetés	8
2.2	Un retour d'expérience cumulé en France.....	14
2.3	Atouts et contraintes inhérents aux phytotechnologies.....	23
2.4	Une variété de contextes d'application.....	30
3	Plan de gestion – applicabilité des phytotechnologies.....	32
3.1	Cadre du plan de gestion	32
3.2	Contexte du plan de gestion appliqué aux phytotechnologies– cas fictif	32
3.3	Schéma conceptuel – cas fictif.....	33
3.4	Plan de gestion – étape par étape	36
3.5	Plan de gestion appliqué aux phytotechnologies – identification des freins	43
3.6	Focus sur le bilan coût-avantage	44
3.7	Proposition de plan de surveillance associé aux phytotechnologies.....	51
4	Synthèse et perspectives	53
4.1	Synthèse quant à l'applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des sols pollués	53
4.2	Perspectives	54

Table des figures

Figure 1 : Application des phytotechnologies dans le cas du traitement de	33
Figure 2 : usages futurs considérés dans le plan de gestion fictif dans le cadre de l'application des phytotechnologies.....	35

Table des tableaux

Tableau 1 : Descriptif de la technique de phytostabilisation (aidée).....	10
Tableau 2 : Descriptif de la technique de phytoextraction (aidée).....	11
Tableau 3 : Descriptif de la technique de phytorhizodégradation (aidée).....	12
Tableau 4 : Atouts (A), faiblesses (B), opportunités (C) et menaces (D) des phytotechnologies	
Tableau 5 : Principaux contextes d'application des phytotechnologies	30
Tableau 6 : Techniques conventionnelles et phytotechnologies considérées dans le plan de gestion fictif	36
Tableau 7 : Plan de gestion fictif – étape par étape	37
Tableau 8 : critères et sous-critères retenus pour le bilan coût-avantage en lien avec l'application des phytotechnologies	45
Tableau 9 : Paramètres à suivre pendant les travaux – surveillance	52

Résumé

Le développement opérationnel des phytotechnologies (notamment en lien avec des projets de reconversion des friches industrielles) soulève un certain nombre de questionnements dans le contexte de gestion des sites et sols pollués (SSP). Les interrogations portent d'une part sur l'applicabilité des phytotechnologies dans le cadre des textes existants en matière de gestion des terres polluées, et d'autre part sur le besoin éventuel d'encadrement réglementaire dans les situations du ressort de l'inspection des installations classées, besoin induit notamment par le caractère pérenne des dispositifs de culture mis en place.

Cette seconde édition fait suite au rapport de décembre 2019 intitulé « Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols » (Ineris-19-180756-1814948-v1.0, 2019). La première édition considérait le déroulement fictif en six étapes du plan de gestion d'un site dont les sols présentaient une pollution métallique, appliqué à deux phytotechnologies (phytostabilisation (aidée) et phytoextraction).

Cette seconde édition clarifie les concepts et les termes relatifs aux deux phytotechnologies. Elle introduit la phytorhizodégradation, attachée à la gestion des pollutions organiques dégradables en condition aérobie, aussi incluse dans le plan de gestion fictif.

Cette seconde édition valorise également les retours collectés auprès des acteurs opérationnels au travers de :

- l'illustration de 6 études opérationnelles avec un rappel des objectifs visés, ayant mis en œuvre les phytotechnologies dans plusieurs contextes (urbain, agricole, friche, post-minier) ;
- l'analyse des Atouts, Faiblesses, Opportunités et Menaces à lever des phytotechnologies.

Sur la base des connaissances développées depuis plus de 10 ans à travers des projets consacrés aux phytotechnologies, il a été possible de :

- analyser les avantages et les limites techniques des phytotechnologies ainsi que les freins à leur application en comparaison des avantages et limites des techniques conventionnelles éprouvées (excavation, lavage, confinement, biodégradation dynamisée ou désorption thermique) ;
- proposer pour le bilan coûts-avantages de nouveaux sous-critères mettant en lumière, notamment, les services écosystémiques procurés par les végétaux ;
- émettre des recommandations quant à la surveillance des milieux pour évaluer d'une part les performances des phytotechnologies et, d'autre part, leurs impacts potentiels sur le transfert des polluants.

Le cadre d'application de ces travaux concerne la gestion des sols pollués des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et les aménagements urbains/réhabilitations (hors cadre ICPE) présentant des pollutions métalliques et/ou organiques, pour lesquelles des plans de gestion sont à réaliser.

Abstract

The operational development of phytotechnologies (especially in connection with projects for the conversion of brownfield sites) raises a number of questions in the context of contaminated sites and soils management (SSP). The questions relate on the one hand to the applicability of phytotechnologies within the framework of existing texts in terms of polluted land management, and on the other hand on the possible need for regulatory framework in situations falling within the scope of the inspection of classified facilities, a need induced in particular by the perennial nature of the plant cultivation devices put in place.

This second edition follows the December 2019 report entitled "Applicability of phytotechnologies in soil pollution management" (Ineris-19-180756-1814948-v1.0, 2019). The first edition considered the fictitious six-step development of the management plan for a site with metallic soil pollution, applied to two phytotechnologies (phytostabilization (aided) and phytoextraction).

This second edition clarifies the concepts and terms related to both phytotechnologies. It introduces phytorhizodegradation, associated with the management of degradable organic pollution, also included in the fictitious management plan.

This second edition also highlights the feedback collected from operational actors through:

- illustration of 6 operational studies with a reminder of the objectives pursued, having implemented phytotechnologies in several contexts (urban, agricultural, wasteland, post-mining);
- the analysis of Strengths, Weaknesses, Opportunities and Barriers to overcome phytotechnologies.

On the basis of the knowledge developed over more than 10 years through projects devoted to phytotechnologies, it has been possible to:

- Analyze the benefits and technical limitations of phytotechnologies and the barriers to their application in comparison with the advantages and limitations of proven conventional techniques (excavation, washing, containment, enhanced biodegradation or thermal desorption);
- propose new sub-criteria for the cost-benefit balance, highlighting in particular the ecosystem services provided by plants ;
- issue recommendations for monitoring environments to assess the performance of phytotechnologies and their potential impacts on pollutant transfer.

The framework for the application of this work concerns the management of polluted soils in installations classified for environmental protection (ICPE) and urban development/rehabilitation (outside ICPE) with metallic and/or organic pollution, for which management plans are to be drawn up.

Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols, Bert V., Perronnet K., Verneuil-en-Halatte : Ineris-230485-1814948-v2.029/08/2025.

Mots-clés :

Phytotechnologies, sites et sols pollués, pollution non concentrée, plan de gestion, bilan coût-avantage

1 Contexte

Le développement opérationnel des phytotechnologies (notamment en lien avec des projets de reconversion des friches industrielles) soulève un certain nombre de questionnements dans le contexte de gestion des sites et sols pollués (SSP). Les interrogations portent d'une part sur l'applicabilité des phytotechnologies dans le cadre des textes existants en matière de gestion des terres polluées, et d'autre part sur le besoin éventuel d'encadrement réglementaire dans les situations du ressort de l'inspection des installations classées, besoin induit notamment par le caractère pérenne des dispositifs de culture mis en place.

Suite à ce constat et dans le cadre de ses missions d'appui aux politiques publiques, l'Ineris a publié en 2019 un rapport traitant de l'« Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions de sol » (Ineris-19-180756-1814948-v1.0).

Ce rapport considérait le déroulement fictif en six étapes du plan de gestion d'un site dont les sols présentaient une pollution métallique. Ce plan de gestion était conduit en comparant les deux phytotechnologies (phytostabilisation et phytoextraction) aux techniques conventionnelles, telles que l'excavation, le lavage ou le confinement.

Sans distinguer la phytostabilisation de la phytoextraction, ce rapport mentionnait les avantages et les limites techniques des phytotechnologies ainsi que les freins à leur application en comparaison des avantages et limites des techniques conventionnelles éprouvées. Ce travail théorique, qui s'est appuyé sur un retour d'expérience issu essentiellement de l'expertise et des projets de recherche de l'Ineris, avait permis de mettre en évidence des atouts mais également des freins repris ci-après.

En termes de bénéfices, il a été mis en évidence que la gestion d'une pollution résiduelle par les phytotechnologies pouvait donner lieu à la fourniture de services écosystémiques de natures diverses du fait de la présence d'une couverture végétale sélectionnée :

- régulation (ex : cycles de l'eau et du carbone, séquestration-extraction-dégradation des polluants) ;
- approvisionnement (ex : production alimentaire et non alimentaire), culturels (ex : bien-être des populations) ;
- support (ex : biodiversité, formation du sol, habitat).

Ces bénéfices confèrent à ces techniques un intérêt et une pertinence bien au-delà du seul contexte des sites et sols pollués. D'autres bénéfices ont été suggérés par le bilan coûts-avantages de cette étude comme la non-consommation de terres végétales, qui permet de préserver la ressource sol et/ou de maintenir la couverture végétale existante, et, également, l'absence d'utilisation d'énergies fossiles ou d'électricité pour excaver, transporter ou traiter des terres *in-situ*.

En parallèle, plusieurs freins ont été identifiés tels que :

- *frein organisationnel* en raison des compétences techniques nécessaires (génie biologique, paysager, gestion SSP...) avec le besoin fort de transversalité pour articuler des disciplines très variées ;
- *frein technique* en raison d'approches différentes (maîtrise des impacts uniquement pour la phytostabilisation ; maîtrise des sources pour la phytoextraction sur des pas de temps plus longs et des facteurs d'abattement moindres ; retour d'expérience en cours d'acquisition pour certaines espèces végétales et amendements) ;
- *frein méthodologique* en raison de changements de pratique et d'approche (absence d'apport de terres exogènes sur les premiers centimètres ; prise en compte des services écosystémiques dont les bénéfices sont en cours d'évaluation et de monétisation ; place de l'analyse des risques résiduels pour les traitements temporaires...) ;
- *frein technico-économique* en raison de données économiques en cours de consolidation tant pour la mise en place et l'entretien des phytotechnologies que pour les filières de valorisation des phytomasses produites, existantes ou à développer.

Cette seconde édition vise à clarifier les concepts et les termes abordés en 2019 relatifs aux phytotechnologies, en raison des méconnaissances ou des idées reçues sur ces solutions de gestion des sites et sols pollués. Ce rapport introduit la phytorhizodégradation dans le plan de gestion fictif, attachée à la gestion des pollutions organiques dégradables en condition aérobie et s'attèle à distinguer la phytoextraction de la phytostabilisation à chacune des étapes du plan de gestion fictif.

De plus, l'Ineris a mené, entre 2019 et 2021, des entretiens avec plusieurs parties prenantes confrontées à des situations concrètes de projets de phytotechnologies. Cette seconde édition du rapport permet ainsi de valoriser les retours collectés et d'étoffer le retour d'expérience sur le territoire national, au travers de :

- l'illustration de 6 études opérationnelles avec un rappel des objectifs visés, ayant mis en œuvre les phytotechnologies dans plusieurs contextes (urbain, agricole, friche, post-minier) ;
- l'analyse des Atouts, Faiblesses, Opportunités et Menaces (AFOM ou SWOT) des phytotechnologies.

Enfin, ce rapport s'inscrit dans le contexte règlementaire¹ et normatif² actuel en faveur d'une meilleure prise en compte de l'environnement, de la biodiversité et des sols qui devrait inciter les acteurs de la gestion des SSP à mettre davantage en œuvre les phytotechnologies. En effet, les phytotechnologies font partie du panel d'outils disponibles pour atteindre les objectifs fixés par le nouvel usage de renaturation (décret n° 2022-1588 du 19 décembre 2022) et pour répondre aux enjeux de restauration et d'amélioration de la qualité des sols et des services écosystémiques qui en découlent.

Ce rapport s'adresse à tous les acteurs mobilisés autour de la réhabilitation écologique de sites pollués et de l'usage de renaturation : i/ exploitant ICPE, propriétaire ou aménageur du terrain, ii/ prestataire de services assurant les études environnementales concernés par la mise en œuvre de techniques de traitement et de gestion, iii/ autorités de l'Etat (services d'instruction des dossiers pour la préfecture, avis), iv/ les populations, les élus et les associations de protection de l'environnement.

Ressources

MTECT, 2022. Les sols en France - Synthèse des connaissances en 2021 <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-sols-en-france-synthese-des-connaissances-en-2021#:~:text=Mi%2D2021%2C%20un%20peu%20plus,accidents%20ou%20de%20mauvais%20confinements>

DGPR, 2017. Introduction à la méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. http://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/upload/documents/intro_methodo_ssp_2017.pdf

Méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués. http://ssp-infoterre.brgm.fr/sites/default/files/upload/documents/methodo_ssp_2017.pdf

<https://agirpourlatransition.ademe.fr/entreprises/aides-financieres/20220215/friches2022-31>

La pollution des sols, 2020. <https://www.notre-environnement.gouv.fr/themes/sante/article/la-pollution-des-sols#:~:text=Les%20deux%20cat%C3%A9gories%20de%20polluants,moins%20d'un%20tiers>

Loi n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924>

<https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/strategie-nationale-biodiversite-2030>

Perronnet K, Bert V. 2019. Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols. Ineris-19-180756-1814948-v1.0. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/rapport/phytotechnologies-appliquees-ssp>

¹ Projet de Directive européenne sur la surveillance et la résilience des sols ; Règlement européen sur la restauration de la nature et plan national de restauration d'août 2023 ; Loi ZAN de juillet 2023 (Zéro Artificialisation Nette) ; Loi Climat et Résilience de 2021 ; Stratégie nationale biodiversité 2030 ; Loi sur l'industrie verte d'octobre 2023 ; Décret n° 2022-1588 du 19 décembre 2022 qui introduit l'usage de renaturation « impliquant une désartificialisation ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols, notamment des opérations de désimperméabilisation, à des fins de développement d'habitats pour les écosystèmes ».

² Commission biodiversité PR NF ISO 17620 Biodiversité - Processus de conception et prise en compte et mise en œuvre du gain net de biodiversité dans les projets en développement ; ISO TC 190 – qualité du sol ; Commission sol AFNOR/X31 relative à la qualité des sols ; GT AFNOR caractérisation des fonctions X31E ; normes internationales en projet sur les services écosystémiques, les fonctions et les paramètres du sol.

2 Des phytotechnologies au phytomanagement : définitions

Les **phytotechnologies** regroupent un ensemble de techniques qui utilisent *in situ* et sur site des **espèces végétales sélectionnées** pour contenir, extraire ou dégrader des **polluants** inorganiques ou organiques, dans des conditions biogéo-climatiques données. Les espèces concernent les strates herbacées, arbustives, arborescentes. Les espèces sont plantées en pleine terre, sans recouvrement préalable par des terres végétales, pour atteindre les objectifs de performance en lien avec la pollution à traiter et les services écosystémiques souhaités.

Jugées a priori plus conformes aux enjeux du développement durable que les techniques classiques de traitement des pollutions sur site et hors site, elles ont pour objectif en plus de la maîtrise (phytostabilisation) et/ou de la réduction des sources de pollution (phytoextraction, phytorhizodégradation), d'**améliorer** les fonctions et la structure du sol pollué et par conséquent les services écosystémiques. Ces techniques constituent une **alternative** ou un **complément** aux techniques conventionnelles dans le cas de pollution non concentrée et, notamment, de surfaces polluées importantes (Bert et al. 2017 ; outil interactif SelecDEPOL).

Les phytotechnologies sont perçues comme des techniques de réhabilitation « douces ». A ce titre, elles sont appelées dans la littérature anglophone « gentle remediation options » et font partie de la palette des « **solutions fondées sur la nature** (sfm) ».

Le **phytomanagement** comprend d'une part la **gestion** des sols pollués par les espèces végétales (phytotechnologies), permettant la maîtrise des impacts au travers de la maîtrise :

- des voies de transfert de polluants (réduction/suppression des envols de poussières et du lessivage des polluants) ; et
- des voies d'exposition aux polluants (réduction/suppression du contact entre le sol impacté et les usagers) ;

et, d'autre part, la **valorisation** du foncier via un usage compatible avec l'état des milieux (ex : aménagement paysager, production de phytomasse non alimentaire, trame verte).

2.1 Phytotechnologies : trois techniques opérationnelles, fonction de la nature de la pollution, des objectifs de gestion et des usages projetés

La distinction des trois techniques repose avant tout sur la nature de la pollution à gérer : pollution inorganique (phytostabilisation, phytoextraction) versus pollution organique (phytorhizodégradation).

Pour la gestion des terres majoritairement impactées par les **composés inorganiques**, deux techniques sont possibles :

- 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 polluants métalliques (éléments traces métalliques (ETM)) 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.
- La **phytoextraction** est l'utilisation d'espèces végétales qui, en accumulant certains éléments traces métalliques (ETM) dans leurs parties aériennes récoltables, permettent la **réduction** des concentrations de ces polluants 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, c'est-à-dire la fraction de polluant susceptible d'être assimilée par les espèces végétales mises en œuvre. Pour qu'il y ait dépollution du sol, les espèces végétales (le plus souvent, les parties aériennes – feuilles, tiges, branches, troncs) doivent être récoltées. Afin d'éviter que cette technique ne corresponde qu'à un transfert de pollution du sol vers les parties récoltables des espèces végétales, la question du devenir de cette phytomasse chargée en polluants doit être envisagée en amont de la mise en œuvre de cette technique. La performance de dépollution dépend du nombre de collectes de la phytomasse.

Pour la gestion des terres majoritairement impactées par les **composés organiques dégradables en condition aérobie** :

- la **phytorhizodégradation** est une technique de **dépollution** qui permet la dégradation, en condition aérobie, de certains polluants organiques en composés plus simples, grâce à l'action combinée d'espèces végétales et de microorganismes rhizosphériques. 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. La dépollution peut être totale si les composés organiques ciblés sont totalement minéralisables. Dans le cas d'un transfert éventuel de polluants dans les parties récoltables des espèces végétales, comme pour la phytoextraction, la question du devenir de cette phytomasse doit être envisagée en amont de la mise en œuvre de cette technique.

Dans le cas de pollutions mixtes des sols, les espèces végétales peuvent agir de manière concomitante, directement ou indirectement, sur les polluants organiques et inorganiques.

Focus sur les notions de phytomasse et d'amendement :

Phytomasse

Représente la **biomasse végétale**, couramment opposée par exemple à la biomasse microbienne ou fongique. Dans le contexte de ce rapport, elle correspond aux parties aériennes (tige, tronc, branche, feuille) produites à la surface du sol qui peuvent être facilement récoltables.

Amendement du sol

Ajoutés au sol, ces **produits minéraux, organiques ou biologiques**, servent à améliorer la qualité du sol, notamment en termes de fertilité et de structure. Dans le contexte de ce rapport, ils servent de plus à maîtriser et/ou réduire les sources de pollution et maîtriser les impacts. Ils complètent l'action des végétaux sur la mobilité des polluants, notamment en hiver, lorsque ceux-ci sont moins actifs physiologiquement.

Les trois tableaux suivants synthétisent pour chaque technique, les objectifs et les paramètres de performance mesurés (Tableau 1- phytostabilisation, Tableau 2- phytoextraction et Tableau 3- phytorhizodégradation). Plusieurs notions sous-jacentes apparaissent :

- l'enrichissement souhaité de la phytomasse pour la phytoextraction, ou non pour la phytostabilisation ;
- la gestion de la phytomasse produite sur le site pollué ;
- le transfert des polluants du sol vers d'autres compartiments environnementaux ;
- la durée des cultures et la disponibilité du foncier ;
- la polyculture ou le recours à plusieurs espèces végétales pour gérer un mélange de polluants, améliorer les performances des phytotechnologies et les services écosystémiques.

In fine, l'objectif de la phytoextraction est de produire une phytomasse enrichie en ETM tandis que celui de la phytostabilisation (aidée) est de produire une phytomasse ayant des concentrations proches des concentrations habituellement mesurées dans la phytomasse sur sols non pollués.

Tableau 1 : Descriptif de la technique de phytostabilisation (aidée)

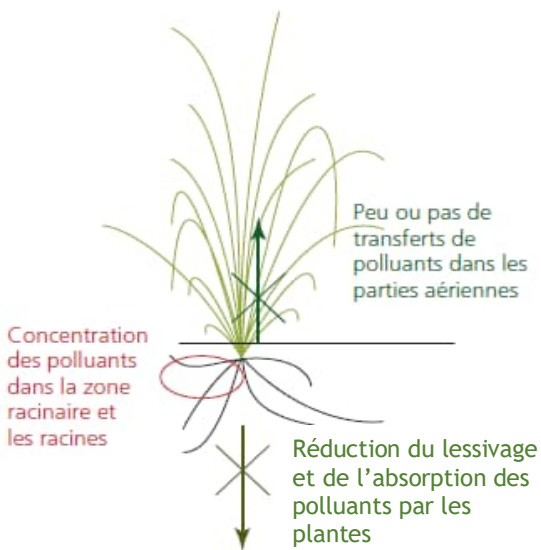
Phytostabilisation (aidée) La phytostabilisation (aidée) est une technique <i>in situ</i> de stabilisation basée sur l'utilisation d'espèces végétales (en combinaison avec des amendements). Ce n'est pas une technique de dépollution mais un mode de gestion des sites et sols pollués destiné à immobiliser les polluants dans le sol. La phytomasse produite sur un site phytostabilisé contient peu de polluants car les plantes sélectionnées excluent les polluants ou présentent un transfert limité de polluants dans leurs parties aériennes (tiges et feuilles). Il est donc envisageable que cette phytomasse soit récoltée et valorisée dans le cadre, par exemple, de la filière bois-énergie ou d'une filière industrielle non alimentaire.	
Objectifs de la technique Maîtrise des impacts environnementaux et sanitaires	
Paramètres de performance mesurés ▪ un couvert végétal optimum (100%) ▪ un transfert des contaminants métalliques dans le végétal réduit à une valeur minimale (limiter leur mobilité dans les sols, réduire leur phytodisponibilité)	
A savoir <i>Les végétaux utilisables doivent être tolérants aux polluants présents dans le sol et non accumulateurs de ces polluants. A ce jour, il n'existe pas de liste d'espèces végétales pour la mise en œuvre de cette technique.</i> <i>Cependant, les études montrent que de nombreuses espèces végétales accomplissent tout leur cycle de développement sur des sites pollués sans présenter de signes de toxicité ni de concentrations supérieures à celles couramment mesurées sur les mêmes espèces végétales sur sol non pollué. Les espèces végétales de la famille des Poacées présentent très souvent ces caractéristiques. La majorité du retour d'expérience sur cette technique concerne les sols pollués par les ETM.</i>	

Tableau 2 : Descriptif de la technique de phytoextraction (aidée)

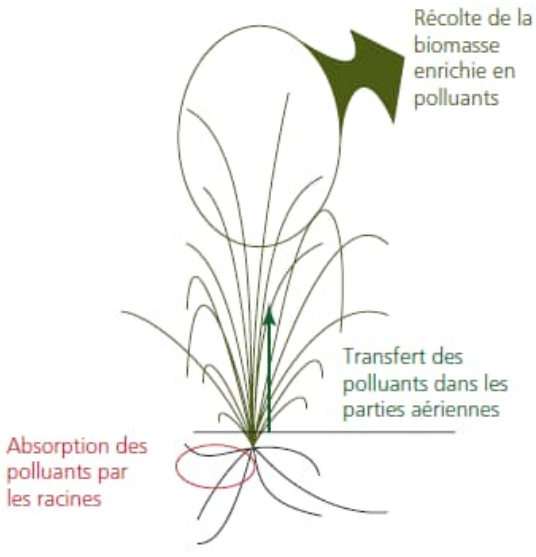
Phytoextraction (aidée) La phytoextraction est une technique <i>in situ</i> de dépollution partielle des sols fondée sur l'utilisation d'espèces végétales. Elles sont sélectionnées pour leur capacité à transférer et à stocker les polluants dans leurs parties aériennes (tiges, branches, tronc et feuilles). La phytoextraction est aidée si elle utilise également des amendements. La phytomasse, produite est alors enrichie en polluants et doit ensuite être récoltée afin de retirer définitivement du sol les polluants ainsi extraits. La valorisation de cette phytomasse enrichie en polluants dans diverses filières fait l'objet de nombreuses recherches appliquées (bioraffinerie, bioplastiques, huiles essentielles, éco-catalyseurs, combustion, pigments...) dans des contextes différents (après-mine, anomalies géochimiques naturelles). Cette étape est nécessaire pour viabiliser cette technique.	
Objectifs de la technique Maîtrise et réduction des sources de pollution ; maîtrise des impacts	
Paramètres de performance mesurés ▪ un couvert végétal optimum (100%) ▪ la quantité d'éléments traces extraite annuellement par la plante par unité de surface (en kg de métal /ha /an)	
A savoir <i>Les végétaux utilisables doivent, d'une part, être tolérants aux polluants présents dans le sol et, d'autre part, les (hyper)accumuler dans leurs parties aériennes récoltables. L'(hyper)accumulation concerne essentiellement les ETM et est un trait peu répandu dans le monde végétal. Les études montrent que plusieurs genres et espèces de la famille des Brassicaceae (ex : Nocceae sp. ; Arabidopsis halleri) se développant en France métropolitaine présentent ces caractéristiques, tout comme les genres Populus et Salix (Salicaceae). Ces espèces végétales n'accumulent qu'un ou deux ETM à la fois (ex : Cd et Zn).</i>	

Tableau 3 : Descriptif de la technique de phytorhizodégradation (aidée)

Phytorhizodégradation (aidée) C'est une technique de dépollution <i>in situ</i> des sols pollués qui consiste à dégrader, en condition aérobie, des polluants organiques en composés plus simples et moins toxiques. Elle s'applique sur des pollutions peu profondes, sans lien avec la nappe sous-jacente. Elle utilise des plantes et les microorganismes rhizosphériques (bactéries, champignons). La phytorhizodégradation est aidée si elle utilise également des amendements.	 Récolte de la biomasse éventuellement polluée Phytodégradation : dégradation ou transformation des polluants organiques par la plante Transfert éventuel des polluants dans les parties aériennes Rhizodégradation : dégradation ou transformation des polluants organiques par des micro-organismes
Cette phytotechnologie peut être mise en oeuvre selon deux modes : - la rhizodégradation correspond à la dégradation des polluants organiques grâce à la stimulation de l'activité des microorganismes présents dans l'environnement des racines (<u>rhizosphère</u>). La plante fournit la source de carbone nécessaire à la croissance de la microflore <u>rhizosphérique</u> (bactéries, <u>champignons saprotrophes</u>) via son exsudation racinaire et permet l'aération du sol via son réseau racinaire. - la phytodégradation désigne la dégradation des polluants organiques dans la plante elle-même, à travers son activité métabolique, au niveau des parties aériennes et/ou racinaires (ce qui suppose alors l'absorption du polluant au préalable), ou en dehors de la plante via la production d'enzymes extra-racinaires (exsudats).	
Objectifs de la technique Maîtrise et réduction des sources de pollution ; maîtrise des impacts	
Paramètres de performance mesurés ▪ un couvert végétal optimum (100%), ▪ la concentration de polluants organiques résiduelle (suite à l'abattement) par unité de masse (en mg/kg)	
A savoir <i>Les végétaux utilisables doivent être tolérants aux polluants présents dans le sol. A ce jour, il n'existe pas de liste d'espèces végétales pour la mise en œuvre de cette technique. Cependant, les études montrent que de nombreuses espèces végétales accomplissent tout leur cycle de développement sur des sites pollués par des polluants organiques sans présenter de signes de toxicité en relation avec la présence de ses polluants ni de concentrations supérieures à celles couramment mesurées sur les mêmes espèces végétales sur sol non pollué.</i>	

Ressources

Fiches Techniques Innovantes <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/fiches-techniques-innovantes/phytotechnologies>

SelecDEPOL – présélection interactive de solutions pour la gestion des sites et sols pollués : <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/base-de-donnees/selecdepol>

BERT V, DOUAY F, FAURE O, CADIÈRE F. 2017. Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (Nouveaux résultats de recherche et démonstration). ADEME. Ed. ADEME Collection Expertises. P68. ISBN : 979-10-297-0786-5.

<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/guidephyto2-mars2017-1496923668.pdf>

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.

<https://www.ineris.fr/sites/ineris.fr/files/contribution/Documents/phytotechnologies-ademe-2013-1463054029.pdf>

2.2 Un retour d'expérience cumulé en France

Depuis les années 1990, les phytotechnologies font l'objet de multiples travaux de recherche menés par des équipes nationales selon deux axes complémentaires :

- l'un, de nature fondamentale, vise à acquérir des connaissances sur les mécanismes de tolérance, d'accumulation des plantes vis-à-vis des polluants et les interactions plantes-microorganismes ;
- l'autre, appliqué, se partage en deux volets qui visent :
 - à améliorer les performances des plantes candidates aux phytotechnologies (ex : séquestration racinaire des polluants à l'aide de mycorhizes, augmentation de l'accumulation foliaire des polluants à l'aide de bactéries stimulant la croissance des plantes, dégradation des polluants dans la rhizosphère) ;
 - à mettre en œuvre et optimiser les itinéraires techniques (du semis à la récolte) et les filières de valorisation de la phytomasse collectée pour que la gestion des pollutions par les phytotechnologies soit un cycle vertueux complet.

Même si de nombreux projets sont encore menés en conditions contrôlées afin d'acquérir des résultats sur les mécanismes, une tendance nette à travailler *in situ* en conditions réelles est visible depuis 2010. Parmi les phytotechnologies testées *in situ*, il est à noter que les retours d'expérience concernant la phytostabilisation restent toujours plus nombreux que ceux concernant la phytoextraction et la phytorhizodégradation.

Plusieurs exemples de cas d'application des phytotechnologies au contexte français, soulignant les motivations des gestionnaires vis-à-vis de ces techniques, peuvent être cités :

Exemple 1 : Intégration des phytotechnologies en milieu urbain (projet PHYTOAGGLO) et production de phytomasse enrichie en zinc par phytoextraction pour l'écocatalyse (projet EXTRA-Zn) : Ces deux projets, portés par l'Ineris en collaboration avec l'agglomération Creil Sud Oise (ACSO) et les villes de Montataire et Creil depuis 2013, visent à concilier renouvellement urbain, dans une démarche de ville durable, et valorisation des friches polluées en redonnant un nouvel usage aux sols en place par l'étude des phytotechnologies pour mieux intégrer les sols pollués dans les projets d'aménagement urbain sans procéder à l'excavation puis à la mise en site de stockage de déchets des terres polluées. Dans ces projets, la production de plants d'hyperaccumulateurs s'est appuyée sur les compétences locales (serres). Les filières de valorisation de la phytomasse produite ont été explorées, en prenant en compte notamment les équipements du territoire (combustion) et les compétences techniques des équipes locales.

Les raisons de l'engagement de l'ACSO : une gestion novatrice et durable des terres polluées.

Les projets se mettent en œuvre sur les espaces en friches ou sous-valorisés au cœur de l'agglomération, à proximité du centre-ville de Creil et de la gare de Creil. Il traduit la politique de l'ACSO qui consiste à mettre en valeur son territoire, être avant-gardiste au sein du département de l'Oise et de la région Hauts-de-France et devenir force d'innovation grâce à une politique volontariste en matière de gestion durable du territoire et de la valorisation environnementale. Ces espaces, localisés sur un site historiquement industriel depuis le XIX^e siècle, ont été réaménagés en écoquartier. Du fait de cet héritage industriel, de nombreux terrains sont affectés par des pollutions plus ou moins importantes. Un des enjeux des projets consiste en une gestion innovante de cette pollution au sein du quartier par le biais des phytotechnologies. Par ailleurs, les phytotechnologies, constituent, via une signalétique appropriée, une vitrine technologique et s'intègrent parfaitement dans le projet global d'éco-quartier. Les projets répondent donc à un triple objectif :

- faire entrer la nature dans le quartier ;
- réduire ou maîtriser les quantités de polluants présents dans les sols afin de changer leur destination finale ;
- faire de l'éco-quartier un lieu d'expérimentation en matière de développement durable.



Vues des sites de démonstration des projets PHYTOAGGLO et EXTRA-Zn sur le territoire de la communauté d'agglomération Creil-Sud-Oise. Site 1 (Commune de Creil) : création d'une noue végétalisée pour la récupération des eaux de ruissellement. 100 m de long, couverture végétale constituée de calamagrostide commun (*Poacée*) dans un objectif de **phytostabilisation** ; Site 2 (Commune de Montataire) : changement d'usage (jardins potagers à aménagement paysager). 850m², couverture végétale constituée de saules des vanniers et d'arabette de Haller dans un objectif de **phytoextraction**. Le site est entouré d'une barrière végétale.

Ressources

Projet EXTRA-Zn:

https://librairie.ademe.fr/recherche?controller=search&orderby=position&orderway=desc&search_query=extra+zn&submit_search=

Projet PHYTOAGGLO :

<https://librairie.ademe.fr/recherche-et-innovation/4516-integration-des-phytotechnologies-comme-techniques-de-gestion-et-de-traitement-des-sols-pollues-dans-un-projet-de-renouvellement-urbain.html>

GRIGNET A, DE VAUFLEURY A, PAPIN A, BERT V (2020). Urban soil phytomanagement for Zn and Cd in situ removal, greening and Zn-rich biomass production taking care of snail exposure. Environmental Science and Pollution Research. 27: 3187-3201. DOI: [10.1007/s11356-019-06796-2](https://doi.org/10.1007/s11356-019-06796-2)

Exemple 2 : Produire des métaux biosourcés grâce à la phytoextraction. Pour dépolluer le sol, les espèces (hyper)accumulatrices doivent être récoltées. Plus elles sont récoltées et plus la dépollution est effective. La phytomasse récoltée est en conséquence enrichie en métaux. Une stratégie pour éviter que la phytoextraction ne soit qu'une technique de transfert des polluants métalliques du sol à la plante consiste à valoriser les métaux contenus dans la phytomasse. Le développement de filières de valorisation viables techniquement et économiquement est par conséquent un enjeu majeur pour l'applicabilité de la phytoextraction. De plus, la mise en œuvre de la phytoextraction permet la valorisation de terres délaissées riches en métaux via l'implantation d'une activité économique respectueuse de l'environnement.

[Les raisons de l'engagement d'Econick : la valorisation de terres délaissées riches en métaux en y implantant une activité économique écoresponsable.](#)

Des procédés d'extraction des métaux (Ni, Zn, Mn) à partir des phytomasses d'(hyper)accumulateurs (*Alyssum murale* ; *Noccea caerulescens*, *Arabidopsis halleri*, *Salix* sp.) ont été mis au point. Après combustion ou pyrolyse des phytomasses récoltées, les cendres sont traitées pour en extraire les métaux. Les filières de valorisation de ces métaux concernent par exemple le secteur de la chimie verte (Deyris et al. 2018 ; Cybulska et al. 2022) et la production de matériaux à base de métaux (van der Ent et al. 2015). Un développement commercial porté par la start-up Econick (<https://www.econick.fr/>) a pour objectif de substituer le Ni industriel par du Ni biosourcé provenant de plantes hyperaccumulatrices de Ni dans des objets de luxe destinés au marché asiatique. Plus récemment, Econick et Aperam, un producteur d'acier inoxydable, ont créé une entreprise commune, Botanickel, dont l'objectif est de produire du Ni biosourcé pour l'industrie de l'acier inoxydable.

Ressources

<https://la1ere.francetvinfo.fr/mine-du-futur-lorraine-econick-produit-du-nickel-metaux-grace-aux-plantes-700822.html>

www.botanickel.com

CYBULSKA P, LEGRAND YM, BABST-KOSTECKA A, DILBERTO S, LEŚNIEWICZ A, OLIVIERO E, BERT V, BOULANGER CL, GRISON CL, OLSZEWSKI TK. 2022. Green and Effective Preparation of -Hydroxyphosphonates by Ecocatalysis. Molecules, section Green Chemistry, 27(10), 3075. <https://doi.org/10.3390/molecules27103075>.

DEYRIS PA, BERT V, DILBERTO S, BOULANGER C, PETIT E, LEGRAND YM, GRISON C. Biosourced polymetallic catalysis: a surprising and efficient means to promote the Knoevenagel condensation. 2018. Frontiers in Chemistry, 6: 48, doi: 10.3389/fchem.2018.00048.

Exemple 3 : Valoriser le foncier par la production de services écosystémiques. Application de la phytostabilisation aidée sur un terrain de gestion de sédiments pollués par les métaux (projets PHYTOSED 2, BIOFILTREE, DEMOPHYTO, New-C-Land, EVALPHYTO) : Depuis 2011, l'Ineris étudie cette technique sur 2 ha en collaboration avec Voies Navigables de France (VNF). L'objectif est de mieux comprendre les déterminants de la mobilité et des transferts de polluants pour mieux maîtriser les risques associés tout en étudiant la faisabilité technico-économique de la valorisation de la phytomasse récoltée, la valorisation d'anciens sites de gestion de sédiment étant un enjeu fort pour VNF. Plusieurs couverts végétaux ont été étudiés (canche cespiteuse, sorgho, mauve, phacélie, lin, saules, peupliers) en combinaison avec des amendements du sol dans le but de réduire les transferts et l'exposition aux polluants et d'identifier des filières pertinentes pour la valorisation de la phytomasse. En plus de ces aspects, la phytostabilisation aidée a été testée comme stratégie de limitation d'une plante invasive, la renouée du Japon.

Les raisons de l'engagement de VNF : la gestion du passif environnemental

Dans la région Hauts de France, du fait du passé industriel, les sédiments présentent une forte concentration en hydrocarbures et en métaux. La mise en dépôt sur des terrains de gestion a été par le passé la destination principale une fois les matériaux extraits du cours d'eau. La gestion du passif et notamment des 183 anciens terrains de gestion de sédiments fait l'objet d'une stratégie pour valoriser ce foncier. Pour chaque terrain existant, des études environnementales et paysagères ont permis de vérifier la compatibilité des usages avec l'état des milieux et de définir des usages futurs, aussi appelés vocations des terrains de gestion. Ces vocations sont notamment : installation de transit et stockage en vue de la valorisation des sédiments, espaces naturels, de loisirs, économiques ou agricoles. Certains dépôts de sédiments présentent des pollutions en métaux. Il existe de nombreuses techniques de traitement des sédiments contaminés. Peu sont cependant applicables aux sédiments pollués par les métaux. Celles envisagées sont basées sur un blocage des métaux dans le sédiment. Dans ce contexte, l'utilisation de la **phytostabilisation aidée** constitue pour certains sites anciens (non confinés), une solution de gestion alternative pertinente, temporaire ou définitive, qui peut permettre le renforcement de la mise en sécurité du site du fait de la maîtrise des impacts via la maîtrise des voies de transfert.

Ressources

Projet NEW-C-LAND :

<https://ineris.hal.science/ineris-04158387/document>

<https://ineris.hal.science/ineris-03246881/>

PERLEIN A, BERT V, FERNANDES DE SOUZA M, GAUCHER R, PAPIN A, GEUENS J, WENS A, MEERS E. 2021. Phytomanagement of a trace element contaminated site to produce a natural dye: first screening of an emerging biomass valorization chain. Applied Sciences, 112, 613. <https://doi.org/10.3390/app112210613>.

Projet EVALPHYTO :

<https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7825-evaluation-de-l-efficacite-et-de-la-perennite-de-la-phytostabilisation-aidee-sur-un-sediment-excave-contamine-par-les-elements-traces.html>

Projet PHYTOSED 2 :

<https://ineris.hal.science/ineris-01869626>

Projet DEMOPHYTO :

https://theses.hal.science/tel-02862733/preview/these_A_PHANTHAVONGSA_Phonethip_2018.pdf

Projet BIOFILTREE :

PHANTHAVONGSA P, CHALOT M, PAPIN A, LACERCAT-DIDIER L, ROY S; BLAUDEZ D, BERT V. 2017. Effect of mycorrhizal inoculation on metal accumulation by polar leaves at phytomanaged sites. Environmental and Experimental Botany, 143 : 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.08.012>

Exemple 4 : Produire des matériaux biosourcés à haute valeur ajoutée. La faisabilité technique, économique et sociale de la production d'huiles essentielles à partir de végétaux se développant sur des sols agricoles pollués a été étudiée au travers des projets PhytEO et DEPHYTOP. L'Ineris a étudié la faisabilité de la phytostabilisation aidée sur des sols agricoles pollués par les métaux (Cd, Pb, Zn) à l'aide de plantes à parfum aromatiques et médicinales (coriandre, sauge, angélique), et la possibilité de leur valorisation en huiles essentielles au regard du devenir des métaux. Ces projets coordonnés par l'Université du Littoral-Côte d'Opale visaient à réduire les transferts et l'exposition aux polluants, à apporter des réponses quant à la maîtrise des polluants tout au long de la filière et aux risques sanitaires pour les travailleurs et les riverains et à faire des recommandations concernant la sélection d'espèces pour cette application.

Les raisons de l'engagement de l'association « Agriculture enjeux de territoire », de la Chambre d'Agriculture du Nord-Pas de Calais et de Direction Régionale de l'Alimentation, l'Agriculture et la Forêt Hauts de France : la reconversion du métier d'agriculteur vers la production non-alimentaire

Durant son activité, l'ancienne fonderie de plomb Métaleurop Nord a contribué à la pollution d'une large surface de terres agricoles (730 ha). La « zone Métaleurop » fait l'objet de politiques territoriales qui prévoient un encadrement des activités et productions agricoles en fonction du degré de pollution du sol dans trois zones autour de l'ancien site industriel. Toute activité agricole est exclue dans la zone la plus proche du site industriel (> 1000 ppm de Pb ou > 20 ppm de Cd) tandis que dans les zones plus éloignées et moins polluées (entre 200 et 1000 ppm de Pb ou entre 4 et 20 ppm de Cd), couvrant près de 700 ha de terres agricoles, un encadrement sanitaire des productions agricoles a été mis en place pour vérifier la conformité des productions agricoles avant leur mise sur le marché. Les productions ne répondant pas aux critères de qualité attendus et présentant notamment des concentrations élevées en métaux sont déclassées ou détruites. Sur ce secteur, les agriculteurs sont confrontés à la fois à un enjeu économique et à un enjeu sanitaire. Dans ce cadre, un plan d'action a été proposé avec 3 volets d'action pour la zone agricole polluée de Métaleurop ayant pour objectifs de créer les conditions permettant de garantir à la fois la sécurité sanitaire, le maintien d'une activité agricole dynamique et le développement du territoire par l'encadrement sanitaire des productions agricoles, l'accompagnement foncier et la mise en place de filières de reconversion vers le non alimentaire.



Vues des parcelles expérimentales des projets PHYTEO et DEPHYTOP sur le territoire expérimental « Métaleurop ». 3 espèces végétales (coriandre, sauge sclarée et angélique), chacune sur environ 1ha ont été cultivées dans double objectif, de **phytostabilisation aidée** par un amendement biologique (inoculum mycorhizien) d'une part, et de production d'huiles essentielles à partir des inflorescences et graines des plantes, d'autre part.

Ressources

Projet DEPHYTOP : <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7872-produire-des-huiles-essentiels-sur-sols-pollues.html>

Projet PHYTEO : PERLEIN A, ZDANEVITCH I, GAUCHER R, ROBINSON B, ARNAUD PAPIN, LOUNES-HADJ SAHRAOUI A, BERT V. 2021. Phytomanagement of a metal(loid)-contaminated agricultural site using aromatic and medicinal plants to produce essential oils: analysis of the metal(loid) fate in the value chain. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15045-4>.

<https://ineris.hal.science/ineris-03310658>

Exemple 5 : Dépollution par phytorhizodégradation à Chambéry. Un exemple réussi de phytorhizodégradation a été valorisé en 2021 dans le cadre de la Journée Technique n°17 d'information et de retour d'expérience sur la gestion des sols pollués. Dans le cadre de la session dédiée à l'applicabilité des phytotechnologies dans le plan de gestion et de la table ronde organisée par l'Ineris, l'Etablissement Public Foncier Local (EPFL) de Savoie a décrit le contexte et les raisons de son engagement pour réaliser une phytorhizodégradation de terres polluées aux hydrocarbures légers (essences) à l'aide d'un végétal, la luzerne, au lieu d'excaver les terres polluées et de les mettre en site de stockage de déchets. Le site est une ancienne station-service dont les sols ont été d'abord excavés sur 6 m de profondeur puis étalés sur 60 cm de profondeur sur toute la surface du site après recouvrement d'un géotextile. La luzerne semée en été s'est développée sur les terres jusqu'en novembre de l'année suivante. La phytorhizodégradation a duré 14 mois et a permis d'atteindre des seuils compatibles avec les usages tertiaire et d'accueil de populations sensibles envisagés (bureaux, crèche). L'interview est à écouter sur : Retour d'expérience de la gestion des Sites et Sols Pollués | SSP-InfoTerre.

Les raisons de l'engagement de l'EPFL de la Savoie : l'efficacité de la phytorhizodégradation

Sur la base d'analyse des terres et de la nature des polluants présents, l'EPFL a proposé à la collectivité la phytorhizodégradation comme technique de dépollution, convaincue de son efficacité dans ces conditions. De plus, un des arguments déterminant dans l'acceptation de la collectivité a été de comprendre qu'il y aurait création d'un espace vert en lieu et place d'une zone remaniée en friche et absence de nuisance pour les riverains, en particulier, pas d'aller-retour de camions pour le transport des terres. Enfin, le coût de la phytorhizodégradation de ces terres était équivalent à celui de l'excavation et mise en décharge des terres. En 2023-2024, L'EPFL a renouvelé l'expérience avec succès sur un autre site ayant une pollution légèrement différente.

Ressources

Interview à écouter :

<https://ssp-infoterre.brgm.fr/journee-technique/jt17-09-novembre-2021>

Exemple 6 : Phytostabilisation aidée de l'ancien site minier des Avinières. L'exploitation intensive des gisements de minerais métallifères au XIXe et XXe siècles a généré d'importantes quantités de stériles et de résidus à fortes teneurs en métaux lourds induisant des risques sanitaires pour les populations. De nombreux sites sont ainsi impactés sur toute la bordure sud du Massif Central. C'est notamment le cas du site des Avinières à Saint Laurent le Minier (Gard) qui a constitué une zone d'exploitation de plomb et zinc majeure en France.

Les raisons de l'engagement de l'ADEME : les mesures de réduction des expositions et des risques sanitaires

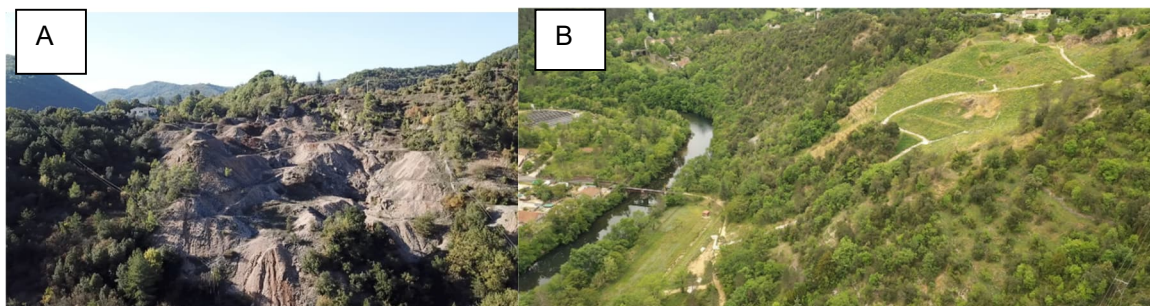
L'Ademe (Maîtrise d'Ouvrage), suivant les prescriptions de l'arrêté préfectoral de travaux d'office n°2019-04-010 du 8 avril 2019, a été mandatée pour réaliser la mise en sécurité du site des Avinières. Les travaux consistent, entre autres opérations, à la végétalisation de la verse de stériles des Avinières afin de réduire l'émission de poussières chargées en ETM et notamment en plomb qui présente un danger pour la population habitant en aval. Pour réaliser les travaux de mise en sécurité du site, l'Ademe a fait appel à des prestataires (conception et suivi des travaux (Maîtrise d'Œuvre) assurés par MICA Environnement, assisté pour la partie technique concernant la phytostabilisation par Fertil'Innov Environnement (Assistant à Maîtrise d'Ouvrage) ; réalisation des travaux confiée à l'entreprise MTPS et ses sous-traitants ; surveillance environnementale, à Antea Group ; et coordination de la sécurité et de la protection de la santé, à Alpes Contrôle).

L'opération de réhabilitation engagée sur le site s'inscrit dans la durée et comprend plusieurs étapes :

- Contrôle et amélioration de la qualité du substrat minier : Outre la forte charge en ETM (5 % de plomb, 10 % de zinc), le substrat a une faible teneur en matière organique et en éléments majeurs indispensables à la croissance des plantes. Une stratégie particulière a été développée pour apporter des amendements à fortes teneurs en composés organiques.
- Essais en laboratoire : Des semences de toutes les espèces autochtones ont été récoltées puis testées en laboratoire afin de déterminer leur niveau de tolérance aux ETM. Au total, 18 espèces

végétales adaptées aux conditions du site et tout un ensemble de microorganismes symbiotiques ont été identifiés.

- Essais *in situ* : Avant de procéder à la réhabilitation de l'ancienne mine, des essais *in situ* ont été réalisés afin de confirmer l'efficacité de l'apport de matières organiques et d'optimiser l'association des différentes espèces végétales et microbiennes permettant de couvrir rapidement les stériles miniers.
- Mise en place d'une pépinière *in situ* pour multiplier les espèces autochtones : Le but était de produire des semences en quantités suffisantes pour phytostabiliser la verse à stériles des Avinières.
- Travaux de terrassement du site : l'objectif de ces travaux était de réduire les fortes pentes des haldes afin d'améliorer leur stabilité, de limiter l'érosion de surface et de favoriser la reprise de la végétation. Les travaux de terrassement ont été réalisés en déblais-remblais équilibrés par zone, avec de petits engins mécanisés, et sous brumisation continue afin de prévenir l'émission de poussières.
- Un suivi environnemental de l'air et de l'eau a été également réalisé pendant les travaux, afin de vérifier l'absence d'impact des travaux sur l'environnement.
- Amendement du substrat : pour garantir le bon développement de la végétation, un amendement organique à base de compost de déchets verts a été apporté. Une attention particulière a été accordée aux quantités de compost et à l'homogénéité de l'incorporation du compost dans les 30 premiers centimètres du substrat minier à travers la réalisation de contrôles spécifiques et réguliers du substrat après préparation. Des géofilets en fibres de coco ont par la suite été agrafées sur les talus pour favoriser l'accroche des semences.
- Mise en place du système d'irrigation : afin de garantir la germination et le développement correct des plantes autochtones durant les premières années, il a été nécessaire de mettre en place un système d'irrigation. Les apports d'eau ont été programmés pour favoriser le développement du système racinaire des plantes en profondeur.
- Travaux de végétalisation : le semis final des plantes autochtones a été effectué par semis hydraulique.
- Pour l'ensemble des étapes, un suivi de l'air et de l'eau est réalisé afin de vérifier l'impact des travaux sur l'environnement.



Vues du site des Avinières avant (A) et après (B) phytostabilisation aidée (photos prises par drone, Techdrone)

Les travaux de phytostabilisation des Avinières constituent une démarche innovante en contexte après-mine qui a permis d'obtenir, deux ans après le semis, une couverture végétale dense permettant de réduire efficacement les phénomènes d'érosion hydrique et éolienne des stériles miniers de la verse des Avinières. Un suivi de la zone végétalisée sera effectué jusqu'en 2026 afin de contrôler l'implantation de la végétation et éventuellement d'apporter les corrections nécessaires pour le bon développement de la couverture végétale.

Ressources

De Lary de Latour I. 2024. Phytostabilisation des sites miniers. Retour d'expérience du DPSM et synthèse opérationnelle. Rapport final V0. BRGM :RP-73554-FR, 55p., 19 ill., 1 ann.

<http://ficheinfoterre.brgm.fr/document/RP-73554-FR>

Souhir Soussou, Geoffroy Alexandre, Jean-Claude Cleyet-Marel, Valérie Guérin, Louis de Lary. PHYTOSTABILISATION D'UN SITE MINIER Etude de faisabilité: application au site du Bois Vert. 5eme rencontres nationales de la recherche Sur les Sites et Sols pollués, Feb 2025, Paris palais des congrès, France. <https://hal.science/hal-04854286v1>

Film ADEME sur le réaménagement du site orphelin de la mine des Avinères :

2023 ADEME PROJET ST LAURENT LE MINIER FINAL

Autres ressources

Etude de faisabilité technique du phytomanagement d'une ancienne plaine maraîchère contaminée par des éléments traces métalliques (ETM). 25/04/2025.

[https://www.solscope.fr/environnement-etude-de-faisabilite-technique-du-phytomanagem\[...\]contaminee-par-des-elementstraces-metalliques-etm,b3-1219.htm](https://www.solscope.fr/environnement-etude-de-faisabilite-technique-du-phytomanagem[...]contaminee-par-des-elementstraces-metalliques-etm,b3-1219.htm)

Etude et application du phytomanagement aux sites et sols pollués. Perle et al. Techniques de l'Ingénieur. 6-2025. Editions T.I. REX 303-1 :16. [Étude et application du phytomanagement aux sites et sols pollués : Dossier complet | Techniques de l'Ingénieur](#)

Plan de gestion et Phytotechnologies – Journée technique nationale SSP, 2021

<https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/journee-technique/jt17-09-novembre-2021>

L'Ineris poursuit les objectifs suivants via la mise en place d'expérimentations *in situ* à l'échelle de la parcelle et du territoire :

- évaluer les enjeux associés aux phytotechnologies/phytomanagement en termes de maîtrise des risques environnementaux et sanitaires marqués par la temporalité propre à ces projets (gestion sur le long terme);

- accompagner la levée des menaces technico-économiques et réglementaires.

Dossier thématique

<https://www.ineris.fr/fr/dossiers-ineris-phytotechnologies-appliquees-sites-sols-pollues>

2.3 Atouts et contraintes inhérents aux phytotechnologies

Les phytotechnologies apparaissent pertinentes pour gérer des pollutions résiduelles présentes notamment sur de grandes superficies, dans les situations où les techniques conventionnelles affichent des limites technico-économiques, environnementales et sociales. Le phytomanagement apparaît pertinent pour les territoires préoccupés par le devenir de leur foncier et qui cherchent des alternatives à la production alimentaire en conservant les terres polluées en place. Ce mode de gestion peut permettre alors de concilier un développement économique avec la maîtrise des impacts des pollutions. Enfin la combinaison de plusieurs phytotechnologies avec la valorisation de la phytomasse produite sur les sols pollués au sein de plusieurs filières est tout à fait envisageable. La mise en œuvre du phytomanagement est souvent associé à un changement d'usage des sols pollués.

Afin de compléter l'identification des atouts et des freins inhérents aux phytotechnologies, l'Ineris a souhaité pouvoir s'appuyer sur les retours d'expérience de cas d'études opérationnels, réalisés en France, finalisés ou en cours. Dans cet objectif, l'Ineris a mené sur la période 2019-2021, 10 entretiens avec des chefs de projets issus de différents types de structure (bureaux d'études, gestionnaire et propriétaire de foncier, entreprise) du domaine SSP et d'autres domaines. Ces dernières sont spécialisées en agronomie, aménagement paysager, écologie, botanique et chimie. Le contenu de chaque entretien a été analysé en utilisant une démarche qui s'appuie sur l'identification des « atouts », « faiblesses », « opportunités » et « menaces » (AFOM ou *SWOT*). Le détail des entretiens est inséré en annexe.

La synthèse des résultats des 10 interviews menées met en évidence les points suivants :

- **les principaux atouts des phytotechnologies sont techniques et environnementaux** (Tableau 4, **A**). Grâce à la présence du couvert végétal, elles permettent de répondre aux enjeux sanitaires et environnementaux d'un site pollué en limitant l'envol de poussière, le ruissellement et le contact direct des populations avec les sols (réduction des transferts de polluants et des expositions à ces polluants). Elles sont jugées par les répondants comme étant plus vertueuses que les techniques conventionnelles de gestion des SSP et en adéquation avec les enjeux de la transition écologique (ex : biodiversité, zéro artificialisation nette, développement durable, économie circulaire). Plus de la moitié des répondants ont mis en avant le fait que les phytotechnologies permettent de valoriser les terres polluées *in situ* et de donner ou redonner un nouvel usage aux sols pollués de manière temporaire ou définitive.
- **Les principales faiblesses des phytotechnologies sont liées à la méconnaissance des contextes d'application et de l'absence d'affichage de performances techniques.** En outre, les répondants notent la prépondérance de la prise en compte des risques sanitaires par rapport aux risques environnementaux dans la grille de lecture actuelle de la méthodologie nationale SSP (Tableau 4, **B**). Les autres freins à leur utilisation mis en avant par plus de la moitié des répondants sont liés au manque de retour d'expérience en situation réelle dans le contexte de la méthodologie nationale des SSP (ex : plan de gestion, plan de conception des travaux -PCT). Ceci conduit à un manque de connaissance et de confiance des potentiels utilisateurs qui préfèrent utiliser les techniques conventionnelles plus éprouvées. Le retour d'expérience fourni au §2.2 est une première réponse à ce besoin de connaissance accrue de ce mode de gestion ainsi que ses contextes d'application. Au-delà de ce manque de retour d'expérience pour les phytotechnologies, la durée des essais préconisés à petite échelle dans le plan de conception des travaux (PCT) est jugée trop longue par la plupart des répondants entraînant un problème d'articulation avec celui-ci. Ainsi, dès lors que le site pollué fait l'objet d'un projet de construction à court terme (moins d'1 an), elles ne seraient pas pertinentes.

Certains des points faibles mis en exergue par les interviewés confirment ceux listés en comparaison des techniques éprouvées⁸. C'est le cas de l'absence d'abattement de la pollution dans le cas de la phytostabilisation et de dépollution totale dans le cas de la phytoextraction qui n'a cependant été perçue comme une faiblesse que pour 3 interviewés sur 10.

- **En termes d'opportunités, les phytotechnologies** étant perçues par la majorité des répondants comme des techniques innovantes, elles **gagneraient à être davantage mises en œuvre dans le contexte de la méthodologie nationale SSP pour renforcer l'aspect opérationnel et faciliter leur transfert vers les acteurs de la gestion des SSP dans le**

cadre des démarches de gestion existantes (ex : plan de gestion, plan de conception des travaux) (Tableau 4, C). La multiplication des cas d'étude dans des contextes variés (ex : pollution modérée, aménagement paysager, agriculture urbaine) permettrait d'enrichir le retour d'expérience.

L'absence de retour d'expérience suffisant dans des situations de mise en oeuvre et le fait que la méthodologie nationale sur les SSP soit, dans sa version actuelle, essentiellement basée sur l'évaluation du risque pour la santé humaine expliquent aussi en partie cette faible utilisation⁸.

- **Afin de favoriser l'utilisation de ces techniques et lever les menaces**, il ressort des réponses des interviewés qu'il conviendrait d'**augmenter la robustesse de ces approches en multipliant les retours d'expérience technico-économiques de façon à accroître les connaissances, l'appropriation et le niveau de confiance des utilisateurs potentiels** (Tableau 4, D).

Les interviewés regrettent que les contextes d'utilisation des phytotechnologies ne soient pas définis dans un guide. La définition d'indicateurs de suivi avec les méthodologies correspondantes permettrait de quantifier la réduction des risques sanitaires et environnementaux sur le long terme. Il est apparu nécessaire à la plupart des interviewés de préciser le cadre contractuel et juridique adapté à ces techniques basées sur l'utilisation du vivant, de façon à répondre à la question de la responsabilité de chacun des acteurs face à ce vivant « non maîtrisé » qui peut engendrer des retards, des coûts supplémentaires, etc. L'encadrement réglementaire de ces techniques est, de plus, apparu nécessaire, pour accompagner les changements de pratiques des professionnels des SSP (ex : le fait de ne pas apporter de terres végétales sur le site pollué) et pour favoriser la prise en compte des risques environnementaux en complément des risques sanitaires dans la méthodologie nationale. Les textes réglementaires existants (loi Climat et Résilience, Plan biodiversité, Stratégie en faveur des sols, décret relatif à la définition des types d'usage dans la gestion des SSP qui mentionne l'usage de renaturation) et en préparation, comme la future directive européenne sur la santé des sols, en plus d'inciter les gestionnaires de sites pollués à s'intéresser aux solutions de gestion des sols pollués à l'aide des phytotechnologies, devraient répondre en partie à ces attentes.

La question de la définition des débouchés pour la phytomasse produite sur un site pollué a également émergé. La phytomasse récoltable peut contenir des polluants métalliques dont les concentrations peuvent être supérieures à celles habituellement mesurées dans une végétation similaire récoltée sur des sols non pollués. En effet, les concentrations en polluant dans la partie récoltable de la plante dépendent du comportement des espèces végétales vis-à-vis des polluants, des paramètres physico-chimiques et des caractéristiques agronomiques des sols. Ainsi, l'objectif de la phytoextraction est de produire une phytomasse enrichie en ETM tandis que celui de la phytostabilisation (aidée) est de produire une phytomasse ayant des concentrations proches des concentrations habituellement mesurées dans la phytomasse sur sols non pollués. Cette phytomasse 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. Dans le cadre de projets de recherche, 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. Plusieurs projets de recherche ont notamment été réalisés par l'Ineris. La classification de la phytomasse 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. Elle devrait être résolue par la multiplication des retours d'expérience concomitants à l'accompagnement réglementaire par les pouvoirs publics de la question du statut de ce type de biomasse.

Enfin, un besoin de formation de tous les acteurs de la société sur ces techniques biologiques (ex : vers clients issus de la chimie et du bâtiment, promoteur, aménageur, architecte, élu, DREAL, ARS, professionnels SSP, pépiniériste, paysagiste, urbanistes, riverains, etc.) a été mis en exergue par la majorité des interviewés. Ces acteurs souhaiteraient acquérir un niveau de connaissance équivalent à celui qu'ils ont sur les techniques conventionnelles. En effet, les phytotechnologies s'appuient sur des compétences existantes mais disséminées, ce qui nécessite de la transversalité pour constituer des équipes pluridisciplinaires.

Tableau 4 : Atouts (A), faiblesses (B), opportunités (C) et menaces (D) des phytotechnologies

Les taux de réponse exprimés en pourcentage (%) sont classés par couleur : taux $\geq 60\%$ (bleu foncé); taux [40-50%] (bleu clair); taux = 30% (bleu très clair); taux < 30% (blanc). MO : matière organique ; ISD : Installation de Stockage des Déchets ; ISDND : Installation de Stockage des Déchets Non Dangereux ; ACV : Analyse de Cycle de Vie ; TCR : Taillis à Courte Rotation ; PCT : Plan de Conception des Travaux.

Critères	Atout (A) des phytotechnologies	Type de répondant (nombre/type)	Nombre de répondant (%)
Environnemental	Création de milieu naturel/vert/pérenne	Entreprise (2) Propriétaire (2) BE (2)	6/10 (60)
	Techniques en adéquation avec le développement durable	BE (2) Autre Propriétaire (2)	5/10 (50)
	Absence de recouvrement avec des terres d'apport exogène	Aménageur Entreprise (2) BE (2)	5/10 (50)
	Amélioration/préservation de la qualité du sol en comparaison des techniques conventionnelles	Entreprise (2) BE (2) Propriétaire	5/10 (50)
	Techniques de gestion des terres sur site	Entreprise Propriétaire (2)	3/10 (30)
	Préservation/augmentation de la biodiversité autochtone	Entreprise BE	2/10 (20)
	Limitation de plantes invasives	BE	1/10 (10)
	Utilisation de MO du site (pas d'export de la phytomasse)	Entreprise	1/10 (10)
	Evite la mise en ISD /ISDND des terres	Entreprise	1/10 (10)
Technique	Réduction de l'envol de poussière, du ruissellement et du contact direct (réduction des expositions et des transferts)	Aménageur Entreprise (2) BE (4) Propriétaire Autre	9/10 (90)
	Existence de nombreuses espèces végétales et de microorganismes adaptées à la pollution métallique	Entreprise BE Propriétaire Autre	4/10 (40)
	Existence d'expertises (ex : agronomique pour rectifier les paramètres physico-chimiques des sols)	Entreprise BE Propriétaire	3/10 (30)
	Utilisation d'espèces végétales excluant les polluants inorganiques	Entreprise BE Autre	3/10 (30)
	Existence de pépinières (ex : multiplication d'espèces métallicoles)	Aménageur Entreprise	2/10 (20)
	Techniques adaptées aux pollutions non concentrées	Entreprise BE	2/10 (20)
	Techniques modulables (forme, superficie)	BE Propriétaire	2/10 (20)
	Techniques adaptées aux sols très pollués, de grande surface, « historiques »	BE	1/10 (10)
	Techniques adaptées si terrain en pente	Aménageur	1/10 (10)
	Entretien de la couverture végétale non nécessaire (en fonction des objectifs – phytostabilisation)	Entreprise	1/10 (10)
	Existence d'itinéraires cultureux (phytostabilisation)	Entreprise	1/10 (10)
Economique	Pas de difficulté à fournir des coûts (mise en œuvre et suivi)	Entreprise BE (2) Propriétaire Autre	5/10 (50)
	Evite la mise en ISD /ISDND des terres	Entreprise	1/10 (10)
Economie circulaire	Valorisation temporaire (ex : en attente de projet immobilier) ou définitive des sols	Propriétaire (2) BE (3) Autre	6/10 (60)
	Valorisation possible des végétaux après validation/certification (phytostabilisation) dans l'attente d'un cadre réglementaire ou normatif	Entreprise BE (2) Autre	4/10 (40)
	Existence de retour d'expérience technique sur filière matériaux et énergie (ex : en termes de concentrations des polluants et des performances des matériaux/combustibles)	Autre	1/10 (10)
	Compatibilité avec cahier des charges sur matières premières et produits finis (ex : étude des contraintes et cartographie étape par étape des procédés)	Autre	1/10 (10)
	Existence d'ACV	Autre	1/10 (10)
Social/sociétal	Augmentation du cadre de vie des riverains	Propriétaire (2)	2/10 (20)
	Bonne image (technique attractive ; perception positive riverain et collectivité)	Entreprise Propriétaire	2/10 (10)

Critères	Faiblesses (B) des phytotechnologies	Type de répondant (nombre/type)	Nombre de répondant (%)
Technique	Jugées non adaptée si pression foncière	Entreprise (2) Propriétaire (2) BE (4)	8/10 (80)
	Manque de retour d'expérience hors projet de recherche donc de robustesse et de confiance	Aménageur Entreprise (2) BE (2) Propriétaire	6/10 (60)
	Durée jugée longue des essais dans le cadre du PCT à prévoir sur une saison (1 an)	Entreprise (2) BE (3) Propriétaire	6/10 (60)
	Réputées moins faciles pour mise en œuvre et suivi que techniques conventionnelles (ex : traçabilité, effet levier superficie, contraintes vs gain)	Aménageur Entreprise BE Propriétaire	4/10 (40)
	Non adaptées à tout type de sol (ex : bassin de décantation ; site avec pollution polymétallique [Phytoextraction]; à forte pression foncière)	Aménageur Entreprise (2)	3/10 (30)
	Peuvent nécessiter une irrigation/accès à l'eau (ex : mise en œuvre, canicule)	Aménageur Entreprise Propriétaire	3/10 (30)
	Absence d'abattement de la pollution (phytostabilisation)/Absence de dépollution totale (phytoextraction)	Aménageur BE (2)	3/10 (30)
	Nécessiteraient le suivi des transferts de polluants dans la phytomasse	Entreprise (2)	2/10 (20)
	Peuvent nécessiter un entretien du site (en fonction des objectifs)	Entreprise	1/10 (10)
	Nécessitent une surface minimale	Entreprise	1/10 (10)
	Nécessitent de prendre en compte la problématique ravageurs	Entreprise	1/10 (10)
	Nécessitent une pépinière pour obtention de graines/plants	Aménageur	1/10 (10)
	Nombre d'experts insuffisant	Propriétaire	1/10 (10)
	Absence de certitude sur le maintien des équipes de gestion et de suivi dans le temps (ex : changement de propriétaire, maître d'œuvre et d'ouvrage ; réponse aux AO)	Propriétaire	1/10 (10)
	Pas d'engagement possible sur des délais car efficacité non linéaire (ex : extrapolation des résultats de quelques mois à plusieurs années ?)	BE	1/10 (10)
	Nécessité de maintenir en place une couverture végétale de 100% sur le long terme (ex : complexité quand hétérogénéité)	BE	1/10 (10)
	Vigilance pour éviter les déplacements des contaminations avec machines roulantes hors de la zone traitée (ex : sol-poussière ; arbres et écorces posés au sol puis évacués du site)	Autre	1/10 (10)
	Techniques dépendantes de la saisonnalité (printemps vs hiver)	Propriétaire	1/10 (10)
Economique	Manque de retour d'expérience hors des projets de recherche financés	Entreprise BE (2)	3/10 (30)
	Rentabilité inférieure à celle de techniques conventionnelles	Entreprise	1/10 (10)
	Gestion des stocks intermédiaires et conséquences financières (ex : surcoûts pour la filière bois)	Autre	1/10 (10)
Social/sociétal	Cadre temporel non adapté (fonctionnement collectivités/ supérieur à la durée des mandats des élus ; incertitudes dans le temps des budgets et lignes de crédits)	BE Propriétaire	2/10 (20)
	Souffrent de l'image de technique « bas de gamme » en comparaison des techniques conventionnelles (peu technique et technologique, peu chère)	BE Propriétaire	2/10 (20)
	Confusion et amalgame entre phytostabilisation et phytoextraction	BE	1/10 (10)
	Image de la phytostabilisation comparable à celle d'un confinement (« polluants sous le tapis »)	BE	1/10 (10)
	Mauvaise réputation de la phytoextraction (historique ; estimation du temps de dépollution)	BE	1/10 (10)
	Maîtres d'ouvrage réticents à essayer des techniques peu éprouvées	BE	1/10 (10)
	Absence de cadre juridique (ex : responsabilité de chacun des acteurs)	BE Propriétaire	2/10 (20)
Réglementaire	Vigilance concernant l'effet dilutif dû à l'ajout d'amendement (ex : quantité >10%)	BE Entreprise	2/10 (20)
	Pas adapté pour un usage avec contraintes sanitaires (grille de lecture basée sur le risque sanitaire ; pas de valeur d'abattement à proposer)	BE	1/10 (10)

Critères	Opportunités (C) des phytotechnologies	Type de répondant (nombre/type)	Nombre de répondant (%)
Environnemental	Préserver/rétablir la biodiversité, les fonctions et les services écosystémiques	Entreprise Propriétaire	2/10 (20)
	Inclure l'impact environnemental dans la grille de lecture des techniques	BE	1/10 (10)
	Phytomasses produites utilisables pour fabrication de matériaux biosourcés si adéquation avec réglementation - Bénéfice en termes d'impact carbone si durée d'usage de ces matériaux longue	Autre	1/10 (10)
	Réutilisation des terres traitées (ex : sur un espace attenant/proche)	Propriétaire	1/10 (10)
Technique	Multiplier les cas d'étude pour enrichir le retour d'expérience (ex : pollution modérée, aménagement paysager, agriculture urbaine)	BE (4) Entreprise Propriétaire (2)	7/10 (70)
	Techniques alternatives innovantes à promouvoir	Entreprise Propriétaire (2) BE (3)	6/10 (60)
	Adapter aux sites sans pression foncière	Entreprise (2) BE Propriétaire	4/10 (40)
	Faire des essais à toutes les échelles comme le PCT le préconise et l'encadre (ex : diminution des incertitudes)	Aménageur Entreprise BE	3/10 (30)
	Applicable pour des usages de type espace vert (ex : confinement végétal sur site)	BE (2) Propriétaire	3/10 (30)
	Complémentarité avec les techniques conventionnelles et dans les aménagements (ex : zones avec phytotechnologies)	BE Propriétaire	2/10 (20)
	Mise en œuvre temporaire possible	BE Propriétaire	2/10 (20)
	Atteinte d'un double objectif en parallèle (ex : gestion de la pollution et réalisation de projets de type aménagement paysager)	BE Propriétaire	2/10 (20)
	Possibilité de co-culture de végétaux (ex : alimentaire et non-alimentaire)	Entreprise Autre	2/10 (20)
	Nécessité de compétences transverses et de plus d'experts	Entreprise Propriétaire	2/10 (20)
	Pas d'objectifs sur les concentrations ni les niveaux d'exposition (ex : abattement des poussières).	Aménageur	1/10 (10)
	Pas de contrainte en termes de surface de terres polluées	BE	1/10 (10)
	Accroissement des compétences des pépiniéristes (ex : plantation racines nues ; maîtrise du végétal)	BE	1/10 (10)
	Durée des phytotechnologies adaptée à l'usage d'exploitation forestière des sols avec des plantations d'arbres (ex : TCR avec coupe tous les 7 ans sur 21 ans)	Autre	1/10 (10)
	Sélection d'espèces végétales pertinentes à partir d'espèces présentes sur site avant-projet (ex : garantie de succès)	Propriétaire	1/10 (10)
	Nécessité de protocoles d'échantillonnage des espèces végétales	Entreprise	1/10 (10)
	Nécessité d'échanges entre acteurs (ex : experts, BE, aménageurs public et privés, collectivités, services de l'Etat et établissements publics)	Propriétaire	1/10 (10)
	Adopter des pratiques évitant les transferts de contamination (ex : sites de stockage sur site, lavage des stocks et des machines, écorçage)	Autre	1/10 (10)
Economique	Pas de difficulté à fournir des coûts de mise en œuvre et de suivi (fourchette comme pour techniques conventionnelles)	BE (2)	5/10 (50)
	Multiplier des cas d'étude pour enrichir le retour d'expérience (ex : alimenter le bilan coût-avantage et l'ACV)	BE (2) Autre Propriétaire	4/10 (40)
	Compenser le coût de gestion de la pollution par la valorisation	BE	1/10 (10)
	Adaptées pour gros volumes de terres faiblement contaminées (techniques conventionnelles non compétitives)	Entreprise	1/10 (10)
	Possibilité de co-culture de végétaux à usage non alimentaire pour augmenter la rentabilité	Autre	
Economie circulaire	Valorisation temporaire possible (ex : en attente de projet immobilier, entre 2 projets, changement de propriétaire, retard de chantier...) ou définitive des sols	BE Propriétaire	6/10 (60)

Critères	Opportunités (C) des phytotechnologies	Type de répondant (nombre/type)	Nombre de répondant (%)
	Valorisation de la phytomasse produite après analyse/comparaison aux normes existantes (compost ; méthanisation ; produits manufacturés dont matériaux de construction, d'isolement, d'ameublement)	Entreprise BE Autre	4/10 (40)
Social/sociétal	Maîtres d'ouvrage prêts à essayer ces techniques	Entreprise (2) BE	3/10 (30)
	Communiquer/former/ assurer la transversalité entre tous les acteurs (ex : vers clients issus de la chimie et du bâtiment, riverains, élus, DREAL, professionnels) sur les opportunités et avantages des phytotechnologies par rapport aux techniques conventionnelles	BE Propriétaire (2)	3/10 (30)
	Améliorer l'image des phytotechnologies auprès des industriels	BE	1/10 (10)
	Amélioration de l'esthétique des chantiers (même si temporaire) et du bien-être des riverains (ex : facteur d'importance pour les élus)	Propriétaire	1/10 (10)

Critères	Menaces (D) des phytotechnologies	Type de répondant (nombre/type)	Nombre de répondant (%)
Technique	Augmenter les retours d'expérience pour augmenter la confiance des clients/maîtres d'ouvrage (ex : comparaison confinement sous plantes vs confinement sous membrane ; phytostabilisation vs stabilisation par liant hydraulique et réactifs de réduction ; phytostabilisation assistée avec des consortiums microbiens)	Entreprise BE (3) Propriétaire (2) Autre	7/10 (70)
	Nécessité de fixer des indicateurs de suivi de l'efficacité sur le long terme avec méthodologies (ex : densité de recouvrement, abattement des poussières, qualité des eaux superficielles (rivière) et souterraines, transfert dans les plantes)	Aménageur BE (4) Propriétaire Autre	7/10 (70)
	Besoin de définir les débouchés pour la phytomasse produite	Aménageur BE (2) Entreprise Autre	5/10 (50)
	Définir des contextes d'utilisation des phytotechnologies aux regard des enjeux sanitaires et environnementaux et pour lesquels le temps n'est pas une contrainte	BE (4) Entreprise	5/10 (50)
	Identifier et quantifier les bénéfices sanitaires (ex : poussières) et environnementaux	Entreprise (2) BE (2)	4/10 (40)
	Proposer une autre grille de lecture que celle basée sur les risques sanitaires (ex : services écosystémiques, fonctions écologiques)	BE (2) Entreprise Propriétaire	4/10 (40)
	Besoin de diversifier les compétences et l'ingénierie des parties prenantes (ex : agricole et non terrassier ; agronomie pour augmenter les possibilités d'utilisation sur tout type de sol dont sols pauvres ou absents ; augmenter les échanges avec des BE autres que dépollution pour construire l'interface sur végétal/sol/amendement)	Aménageur BE Propriétaire	3/10 (30)
	Définir les aléas (ex : climatique, élévation de nappe, ravageurs, apparition de plante invasive/protégée) et les conséquences (ex : risques technique, économique et juridique)	BE (2) Propriétaire	3/10 (30)
	Besoin d'augmenter le nombre de prestataires compétents et spécialisés (ex : qualification/certification des professionnels)	Aménageur BE	2/10 (20)
	Besoin de définir des protocoles opérationnels par phytotechnologie (ex : espèce ; amendement ; valorisation)	BE	1/10 (10)
Economique	Augmenter les retours d'expérience (ex : projets non subventionnés par la recherche) pour consolider le bilan financier (ex : phytotechnologies vraiment moins chères que excavation/envoi en filière ?)	Entreprise BE (4) Propriétaire (2) Autre	8/10 (80)
Social/sociétal	Former tous les acteurs de la société sur ces techniques biologiques (ex : vers clients issus de la chimie et du bâtiment, riverains, élus, DREAL, ARS, professionnels SSP, pépiniériste, paysagiste, promoteur, aménageur, architecte, etc.) sur les opportunités et avantages des phytotechnologies par rapport aux techniques conventionnelles	Aménageur Entreprise BE (4) Propriétaire (2)	8/10 (80)
	Faire évoluer les habitudes des professionnels basées sur la simplicité (ex : apport de terre végétale) et la réduction des incertitudes (ex : techniques avérées préférées pour remplir l'obligation de résultats)	BE (3) Propriétaire	4/10 (40)
Juridique	Nécessité d'établir un cadre juridique (ex : responsabilité dû au vivant non maîtrisé donc risqué - comment traduire cela dans un contrat avec le client/maître d'ouvrage ?)	BE (4) Propriétaire (2)	6/10 (60)
Règlementaire	Besoin d'accompagnement des politiques publiques (ex : guide – notion de couverture végétale) et d'outils réglementaires pour favoriser la prise en compte des risques environnementaux en complément des risques sanitaires (ex : loi sol) et définir le statut des phytomasses (ex : déchet ? biomasse ?) afin de favoriser le développement de débouchés (ex : filière, achat-vente)).	Aménageur Propriétaire BE (3) Autre	6/10 (60)

2.4 Une variété de contextes d'application

Bien que les solutions de gestion des sols pollués basées sur le végétal (phytotechnologies) soient décrites depuis trois décennies et régulièrement mises en avant via des guides auprès des acteurs SSP, elles sont encore peu utilisées par les gestionnaires de sites pollués et peu proposées par les professionnels de la dépollution.

Les contextes d'application des phytotechnologies se révèlent multiples, en raison de la multiplicité des pollutions, des concepts basés sur le végétal, de la pression foncière, des attendus environnementaux, sociétaux, techniques, économiques. La pression foncière est une contrainte qui s'applique à toutes les techniques de traitement et ne s'oppose pas au recours aux phytotechnologies dès lors qu'à minima une saison de culture peut se dérouler normalement. A ce jour, aucune surface minimale n'est requise pour mettre en œuvre les phytotechnologies et des pépinières commercialisent des graines/plants adaptés. D'autres éléments, étroitement liés, sont à considérer : nature de l'occupation (activité industrielle/tertiaire ou friche), fréquentation humaine, durée d'implantation des espèces végétales (temporaire ou permanente).

Quelques exemples de contexte d'application sont présentés en Tableau 5, certains contextes s'inscrivant a priori dans l'usage de renaturation (décret n° 2022-1588 du 19 décembre 2022 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués). Les contextes se différencient selon plusieurs paramètres : l'occupation du site, la nature de la pollution, les objectifs de gestion (maîtrise des sources et/ou des impacts), l'usage futur, la fréquentation humaine envisagée, la pérennité des cultures végétales. Ces contextes feront ainsi appel à l'une des trois phytotechnologies ou à la combinaison de plusieurs techniques en fonction de l'état actuel et de l'aménagement envisagé. Les friches sont entendues comme des sites inutilisés, éventuellement dégradés par la présence d'installations, de déchets, d'une pollution avérée ou suspectée et dont l'état, la configuration ou l'occupation totale ou partielle ne permet pas de retrouver un usage sans un aménagement ou des travaux préalables ([Glossaire | SSP-InfoTerre](#)).

Tableau 5 : Principaux contextes d'application des phytotechnologies

Site en activité		Cessation d'activité		Friche	Occupation
Polluants organiques		Polluants métalliques*			Pollution
Maîtrise des sources de pollution		Maîtrise des impacts			Gestion
Traitement par le végétal	Production non alimentaire	Biodiversité	Agrément /loisirs		Usage des milieux/ objectif
Fréquentation humaine occasionnelle		Fréquentation humaine régulière			Fréquentation
Implantation végétale temporaire		Implantation végétale permanente			Végétation
Phytorhizo-dégradation		Phytostabilisation	Phytoextraction		Technique

*Métaux/métalloïdes

Ainsi, la mise en œuvre de phytotechnologies est pertinente pour tous les sites présentant potentiellement des problématiques de pollution de leurs sols et sur lesquels des aménagements de renaturation sont envisagés. En plus de la gestion de la pollution par les phytotechnologies, l'objectif peut être de produire une phytomasse à visée non alimentaire, d'accroître la biodiversité et de créer des espaces de nature plus ou moins accessibles au public ayant des fonctions variées (loisirs, gestion de l'eau, ...).

La pression foncière est classiquement un critère discriminant qui conduit à écarter les phytotechnologies lorsque le projet de réhabilitation foncière est à très court terme. Cependant, dans

l'intervalle entre la cessation d'activité et la mise en œuvre d'un nouvel aménagement, les phytotechnologies peuvent être utilisées comme solution temporaire pour maîtriser les impacts (couverture végétale contre le ré-envol des poussières notamment).

Ressources

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.

BERT V, DOUAY F, FAURE O, CADIÈRE F. 2017. Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (Nouveaux résultats de recherche et démonstration). ADEME. Ed. ADEME Collection Expertises. P68. ISBN : 979-10-297-0786-5.

Perronnet K, Bert V. 2019. Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols. Ineris-19-180756-1814948-v1.0. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/rapport/phytotechnologies-appliquees-ssp>

PERLEIN A, BERT V, FERNANDES DE SOUZA M, PAPIN A, MEERS E. 2023. Field evaluation of industrial non-food crops for phytomanagement of a trace element contaminated site. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24964-9>.

PERLEIN A, BERT V, FERNANDES DE SOUZA M, GAUCHER R, PAPIN A, GEUENS J, WENS A, MEERS E. 2021. Phytomanagement of a trace element contaminated site to produce a natural dye: first screening of an emerging biomass valorization chain. Applied Sciences, 11, 613. <https://doi.org/10.3390/app112210613>.

PERLEIN A, ZDANEVITCH I, GAUCHER R, ROBINSON B, ARNAUD PAPIN, LOUNES-HADJ SAHRAOUI A, BERT V. 2021. Phytomanagement of a metal(loid)-contaminated agricultural site using aromatic and medicinal plants to produce essential oils: analysis of the metal(loid) fate in the value chain. Environmental Science and Pollution Research. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15045-4>.

PERLEIN A, BERT V, DESANNAUX O, FERNANDES DE SOUZA M, PAPIN A, GAUCHER R, ZDANEVITCH I, MEERS E. 2021. The Use of Sorghum in a Phytoattenuation Strategy: A Field Experiment on a TE-Contaminated Site. Applied Sciences, 11, 3471. <https://doi.org/10.3390/app11083471>.

BRGM, 2010. <https://ssp-infoterre.brgm.fr/fr/rapport/quelles-techniques-quels-traitements>

ADEME, BRGM, 2021. <https://www.selecdepoll.fr/>

Karr G, Bert V, 2025. Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape, Verneuil-en-Halatte :Ineris - 213291 - v2.0, 24/01/2025. <https://www.ineris.fr/fr/methodologie-encadrer-usage-renaturation-gestion-sites-sols-pollues-premier-rapport-etape>

Démarche TRIADE : Guide technique d'application. <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7947-demarche-triade-guide-technique-d-application.html>

3 Plan de gestion – applicabilité des phytotechnologies

L'applicabilité des phytotechnologies est évaluée dans le cadre d'un plan de gestion fictif. Celui-ci met en évidence les atouts et contraintes des 3 techniques alternatives reposant sur le végétal, en complément des techniques conventionnelles.

3.1 Cadre du plan de gestion

Le code de l'Environnement constitue le cadre de gestion des sites pollués pour l'essentiel au titre de la législation des ICPE et vise à définir les modes de gestion des sites. Il permet de traiter les conditions d'exploitation et de fonctionnement des activités susceptibles de porter atteinte aux intérêts visés au L.511-1 du code de l'Environnement, à savoir : la santé, la sécurité, la salubrité publiques, l'agriculture, la protection de la nature et de l'environnement, la conservation des sites et des monuments, les éléments de patrimoine archéologique.

Les fondements de la politique nationale de gestion des sites et sols pollués sont détaillés dans les textes décrivant la méthodologie élaborée en 2007 (circulaire du 8 février 2007) et mise à jour en 2017. Les démarches à disposition telles que le plan de gestion (PG) et l'interprétation de l'état des milieux (IEM) y sont précisées.

Le plan de gestion porte sur le traitement des sources de pollution et notamment des pollutions concentrées, ainsi que sur la maîtrise des pollutions résiduelles prenant en compte les techniques de réhabilitation et leurs coûts. Le plan de gestion traite également des pollutions non concentrées. Le plan de gestion s'adresse aussi bien aux installations classées qu'aux projets de réhabilitation ayant mis en évidence une dégradation des milieux et pour lesquels des mesures sont mises en œuvre pour assurer l'adéquation entre les futurs usages et la qualité des milieux.

Cette approche est en parfaite cohérence avec les politiques publiques en matière d'enjeux sanitaires et de maîtrise de la ressource en eau. Elle va dans les sens de la gestion des risques selon l'usage pour améliorer ou préserver la qualité des milieux.

3.2 Contexte du plan de gestion appliqué aux phytotechnologies– cas fictif

Il s'agit de considérer un plan de gestion fictif dans un contexte de pollution des sols superficiels par une pollution dite mixte, impliquant des polluants inorganiques (métaux/métalloïdes) et organiques en condition aérobie (pollution non concentrée et pollution concentrée). L'objectif est d'identifier et d'évaluer les limites et les avantages des 3 phytotechnologies : phytoextraction, phytostabilisation aidée et phytorhizodégradation.

Deux temporalités se dessinent dans le cas des phytotechnologies (Figure 1) :

- situation 1 : les phytotechnologies sont des techniques **de traitement temporaire**, permettant l'installation d'un usage similaire à l'usage actuel ou plus sensible (connu ou non au moment de la mise en œuvre). Du fait de la couverture végétale, l'aspect paysager est un objectif inhérent aux techniques. Le traitement s'étend de quelques mois à quelques années (temporalité de l'ordre d'un ou plusieurs cycles de culture) ;
- situation 2 : les phytotechnologies sont des **techniques de traitement** mises en œuvre dans le cadre de divers usages **pérennes** (ex : usage récréatif, usage de renaturation, usage agricole). Comme dans la situation 1, l'aspect paysager est un objectif inhérent à ces techniques.

Les phytotechnologies s'appliqueraient dans deux contextes de pollution superficielle, correspondant à la zone d'enracinement, sous réserve de l'absence de transfert des polluants vers les eaux souterraines : 1/ pollution non concentrée et 2/ pollution concentrée dans le cas de l'usage de renaturation, comme illustré en Figure 1. Dans le cas d'une pollution non concentrée, après traitement, la couverture végétale sélectionnée peut être maintenue ou pas, selon l'usage envisagé. Dans le cas d'une pollution concentrée, à l'issue des traitements permettant d'atteindre les seuils de coupure, une couverture végétale permanente est mise en œuvre et sélectionnée en fonction de la phytotechnologie retenue.

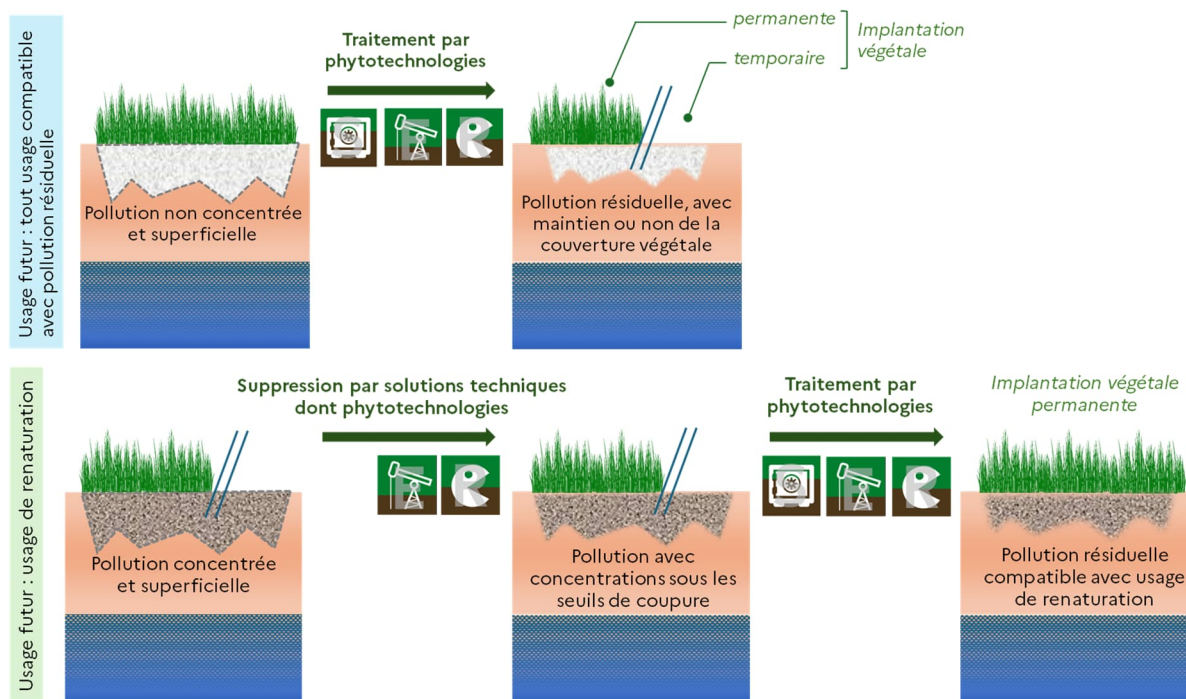


Figure 1 : Application des phytotechnologies dans le cas du traitement de pollutions non concentrées et de pollutions concentrées

L'emploi des phytotechnologies implique la plantation de végétaux directement en pleine terre, sans recours à un recouvrement du sol par des terres végétales, sous réserve d'une compatibilité des usages.

3.3 Schéma conceptuel – cas fictif

La variété des contextes sur le territoire national conduit à ne pas restreindre le cas fictif à un seul usage. Aussi, quatre futurs usages³ sont retenus dans cet exemple pour les phytotechnologies, repris dans le schéma conceptuel, présentés en Figure 2 :

- Usage **récréatif de plein air** comprenant des espaces de nature, parcs, aires de jeux ;
- Usage **de renaturation** impliquant une désartificialisation ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la fonctionnalité des sols avec fréquentation humaine occasionnelle ou régulière (voir Méthodologie pour encadrer l'usage de renaturation dans la gestion des sites et sols pollués : premier rapport d'étape, Ineris - 230485 - 2772344 - v2.0, janvier 2025) ;
- Usage **d'accueil** de populations sensibles comprenant des espaces de nature– non illustré sur le schéma ;
- Usage **agricole** consistant en la production de phytomasse non alimentaire ;
- Usage **résidentiel** comprenant des jardins d'agrément collectifs ou espaces communs ne produisant pas de denrées alimentaires – non illustré sur le schéma.

Les phytotechnologies s'appliquent uniquement sur sols pollués aux zones dédiées aux espaces de nature, qui regroupent différentes formes (jardins d'agrément, espaces verts, parcs, aires de jeux, espaces de nature). L'épaisseur de sol superficiel « traitable » correspond à la profondeur d'enracinement des espèces végétales. Elle est variable selon les espèces et peut atteindre 20-

³ L'usage résidentiel mentionné dans la version 2019 du rapport a été remplacé par l'usage de renaturation, du fait d'un retour d'expérience limité sur la co-culture alimentaire et de la publication du décret n° 2022-1588 du 19 décembre 2022 relatif à la définition des types d'usages dans la gestion des sites et sols pollués et du guide sur les types d'usage définis dans le cadre des cessations d'activité des ICPE et de projets d'aménagement - Ineris - 213282 - 2759342 - v3.0, 2023

30 cm en moyenne, et plus rarement 50 cm voire 1 m pour les espèces herbacées. La profondeur atteinte par les arbres peut être plus élevée.

Dans ce cas fictif, une nappe souterraine est présente à une faible profondeur (transfert potentiel des polluants du sol vers les eaux souterraines). La pollution mixte, métallique et organique, est fréquemment rencontrée et est étudiée dans le cas fictif considéré.

Les voies de transfert des polluants sont succinctement rappelées et illustrées : ré-envol de poussières, ruissellement, lixiviation (migration vers la nappe). Les voies d'exposition sont liées aux usages (ingestion non intentionnelle de sols, ingestion de végétaux par la faune, ingestion potentielle de végétaux comestibles mais non cultivés pour l'alimentation humaine⁴) auxquelles s'ajoutent la gestion de la phytomasse.

⁴ Se référer au projet DEPHYTOP pour les organes comestibles (Projet DEPHYTOP : <https://librairie.ademe.fr/urbanisme-territoires-et-sols/7872-produire-des-huiles-essentielles-sur-sols-pollues.html>)

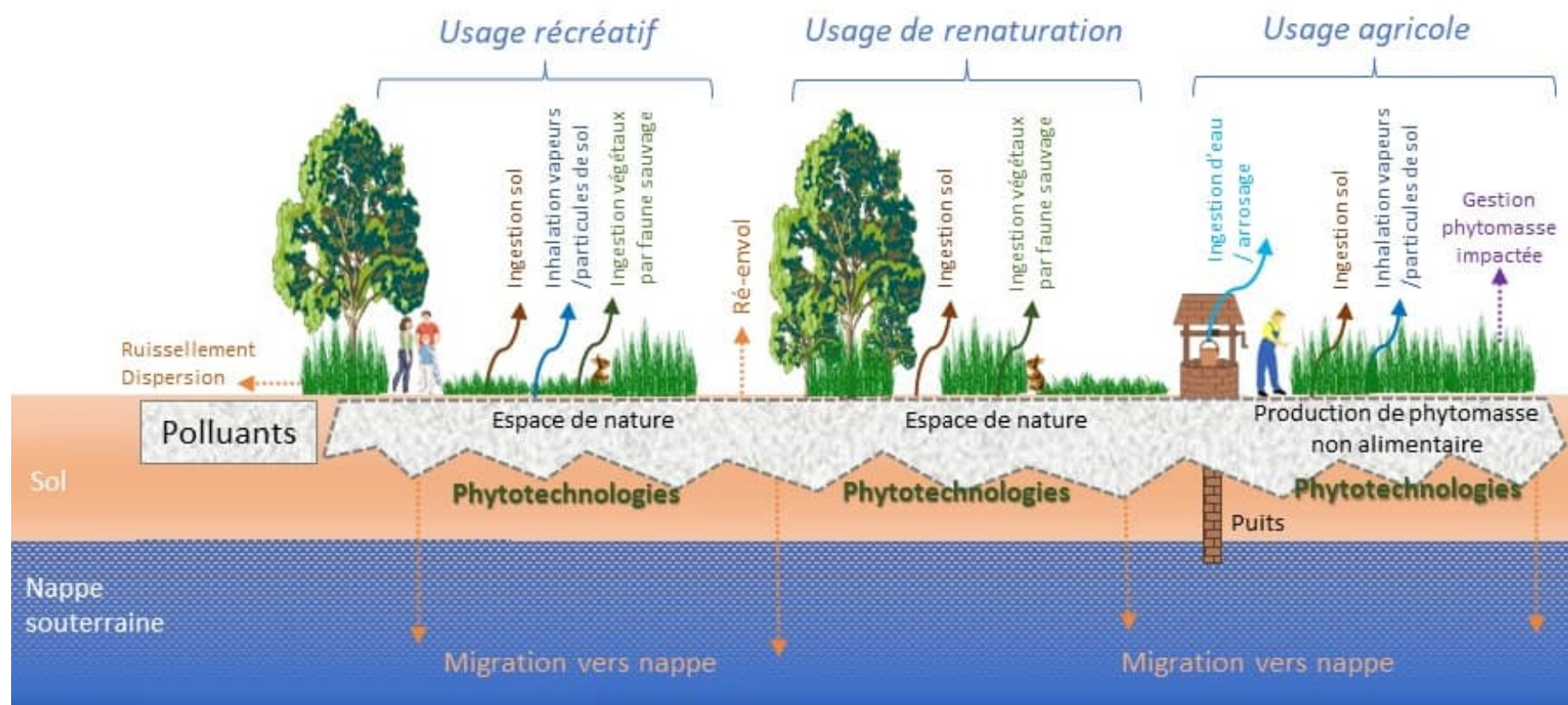


Figure 2 : usages futurs considérés dans le plan de gestion fictif dans le cadre de l'application des phytotechnologies

3.4 Plan de gestion – étape par étape

Dans le présent cas fictif, les six étapes du plan de gestion sont déroulées et mettent en parallèle les phytotechnologies et les techniques de dépollution conventionnelles (Tableau 7).

Pour chacune des techniques, les pratiques actuelles et potentielles sont identifiées ainsi que leurs avantages et leurs limites techniques. A l'issue de cette analyse, l'ensemble des freins associés au déploiement des phytotechnologies sont identifiés (freins organisationnel, méthodologique, réglementaire, économique...). Les étapes sont présentées dans le tableau de synthèse, pages suivantes.

Le Tableau 6 présente les techniques conventionnelles retenues pour le plan de gestion fictif, auxquelles les phytotechnologies seront confrontées.

Tableau 6 : Techniques conventionnelles et phytotechnologies considérées dans le plan de gestion fictif

Techniques conventionnelles (en jaune) :	Phytotechnologies (en bleu) :	
- lavage in situ : lessiver les sols sans excavation (zones saturée et non saturée) par injection d'eau (et d'agents mobilisateurs en solution) en amont ou au droit de la source de pollution - excavation / lavage ex situ - excavation / traitement ex situ - confinement physique (par couverture et étanchéification) : empêcher l'écoulement des eaux souterraines hors du lieu contaminé. Pour cela une couverture multi-couche est mise en œuvre en surface. Elle peut être surmontée par une couche d'apport de terre végétale - biodégradation dynamisée <i>in situ</i>* : créer les conditions favorables à l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des polluants organiques - désorption thermique in situ : apporter une source de chaleur dans le sol pour volatiliser puis en extraire certains polluants volatils et semi-volatils		phyto <u>E</u> xtraction (pollution métallique)
		phyto <u>S</u> tabilisation aidée (pollution métallique)
		phyto <u>R</u> hizodégradation (pollution organique)

* biodégradation dynamisée ou atténuation naturelle dynamisée

NB : fiches techniques disponibles sur le site internet www.selecdepoll.fr

Tableau 7 : Plan de gestion fictif – étape par étape

Etapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
Techniques	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies		Techniques conventionnelles
1. Délimitation spatiale des sources de pollution (pollutions concentrées et non concentrées) <i>= caractériser et cartographier horizontalement et verticalement les sources de pollution</i>	Diagnostic SSP classique basé sur les concentrations totales <u>Compléments en anticipation de l'étape 2</u> : paramètres physiques et agronomiques du sol à prévoir (granulométrie, pH, matières fertilisantes du sol, matière organique, réserve utile), éléments climatiques (précipitations, températures) pour anticiper l'adaptation des cultures de végétaux. Besoin de caractériser l'horizon occupé par les racines (0-30m)	Diagnostic SSP classique basé sur les concentrations totales <u>Compléments en anticipation de l'étape 2</u> : granulométrie, test de lixiviation, paramètres en lien avec le développement des microorganismes. Les profondeurs à investiguer sont à adapter en fonction de la migration des polluants et des usages envisagés.	👍 Compléments au diagnostic ne nécessitant pas de techniques analytiques spécifiques pour les pollutions métalliques et organiques 👍 Aucune nécessité d'étudier la mobilité des polluants métalliques du sol (via des extractions sélectives, par exemple)		
2. Performances techniques de dépollution <i>= identifier et choisir les techniques adaptées à la pollution</i>	Citation dans l'outil SELECDEPOL (www.selecdepol.fr) de toutes les techniques. Dans cet outil, le terme phytodégradation est synonyme de phytorhizodégradation.	👍 Trois techniques permettant le traitement in-situ et sur site des pollutions sur de grandes surfaces	👉	Techniques conventionnelles in-situ ou ex-site listées dans tableau 1 peu adaptées aux pollutions sur de grandes surfaces (excavation, apport de chaleur)	Pour la phytoextraction : -difficulté d'afficher des objectifs de performance en termes de concentration résiduelle dans les sols -taux d'abattement de la pollution inférieur aux techniques conventionnelles in-situ, Les phytotechnologies s'appuient sur des champs d'expertise disséminés – besoin de transversalité pour constituer des équipes pluridisciplinaires (espaces verts, agriculture, foresterie, écologues et sites pollués)
		👍 Techniques de mise en oeuvre éprouvées issues des professions agricoles, espaces verts, foresterie en termes de préparation des sols, de la plantation et de l'entretien. Préservation et/ou amélioration des fonctionnalités de la ressource sol	👉	Plusieurs approches possibles pour traiter les pollutions dans les sols, reposant sur des compétences ciblées	Nécessité d'entretenir pour maintenir les espèces sélectionnées Analyse économique peu accessible (coût du déploiement versus valorisation) Pour les filières existantes : statut de la phytomasse issue de sites pollués - sujet à discussion Pour les filières émergentes de valorisation des phytomasses : projets de recherche en cours (molécule plate-forme pour la bioraffinerie,...)
		👍 Préservation et/ou amélioration des fonctionnalités de la ressource sol	👉	- Perte de la ressource sol (si excavation) - Destruction partielle ou totale des caractéristiques et des fonctionnalités du sol, due au remaniement et au traitement du sol (lavage, désorption thermique)	
Existence de guides français pour la mise en oeuvre des phytotechnologies et la diffusion des connaissances scientifiques auprès des acteurs (maîtres d'ouvrage, bureaux d'études), et d'un outil de calcul de coûts spécifiques à la mise en oeuvre des phytotechnologies (voir §2.4 Ressources).		👉 🔭 + 🏠 + 🐛 : i/ profondeur optimale entre 0 et 30 cm, choix des espèces végétales plus restreint jusqu'à 1 m ii/ gamme de pH optimale à respecter pour l'adéquation des espèces végétales (impossibilité pour les pH extrêmes) 🔭 : i/ choix limité des espèces végétales contraint par la nature des polluants à traiter et des filières de valorisation possible ii/ tous les métaux ne sont pas phytoextractibles 🐛 : polluant dégradable pour les microorganismes et non toxique pour la micro-flore			

Étapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👍 / 👎)		Freins à l'application des phytotechnologies
Techniques	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	
3. Objectifs de réhabilitation = définir les concentrations maximales à respecter pour le futur usage, à l'issue des travaux de dépollution	Objectif primaire des trois phytotechnologies  ou  ou  : réduire autant que possible ou supprimer les voies de transfert des polluants vers l'air (ré envol) et vers la nappe (lixiviation) et les eaux de surface (ruissellement) Objectif secondaire des deux phytotechnologies  ou  : abattre les concentrations totales dans les sols avec un taux fonction du temps de traitement	Techniques conventionnelles - <i>Excavation</i> : objectif défini en fonction de l'usage (concentrations maximales admissibles) - <i>Lavage/ biodégradation/ désorption</i> : objectif défini en fonction de l'usage (concentrations résiduelles) - <i>Confinement</i> : absence d'objectif de réhabilitation (maintien des polluants en place) dans le cadre de la maîtrise des impacts, avec l'objectif de supprimer les voies de transfert des polluants vers l'air (ré envol) et vers la nappe	Phytotechnologies 👍 Maitrise des plantes : a/ qui peuvent être choisies comme non comestibles pour l'Homme  ou non appétentes pour la faune en fonction de l'usage envisagé ( ; ) b/  +  +  qui sont de préférence indigènes non invasives	Techniques conventionnelles 👍 - <i>Excavation</i> à adapter en fonction des sources à éliminer : profondeur, volume/surface, durée d'intervention courte - Technique adaptée aux pollutions concentrées et mobiles - <i>Lavage/ biodégradation/ désorption</i> : durée dépendante des concentrations résiduelles à atteindre - Horizons profonds traitables	Absence affichée d'objectif de suppression de la source, du fait de la considération d'une action sur les voies de transfert et d'exposition (excepté pour la phytorhizodégradation) Pratiques courantes dans le domaine des SSP, qui consistent à couvrir les sols impactés avec des terres apportées plutôt qu'à envisager une couverture « végétale »
			👍 Pas de nécessité d'apport de terre de qualité contrôlée.	👎 Nécessité d'apport de terre de qualité contrôlée (pratique usuelle avec une épaisseur de 30-50cm) en cas de pollution résiduelle + nécessité de gestion des terres excavées. Phénomènes de tassement /bioturbation qui réduisent l'effet protecteur de l'apport de terre	
			👍  +  +  : la lixiviation des polluants vers les eaux souterraines est majoritairement la résultante des caractéristiques pédo-agronomiques des sols. Les plantes contribuent à limiter le lessivage via le phénomène d'évapotranspiration.	👎 <i>Confinement</i> : pérennité des géotextiles à assurer dans le temps et l'espace Nécessité d'une surveillance de la qualité des eaux souterraines sur la durée du confinement	
			👎 Assurer la pérennité de la couverture végétale. Surveillance de la qualité des eaux souterraines au cas par cas. Persistance des pollutions		
	Phytotechnologies : exposition acceptable au plan sanitaire (par réduction/suppression des voies d'exposition)	Excavation : vérification de la qualité des bords et fond de fouille (mesure des concentrations résiduelles)	👍 Compatibilité entre les milieux et les usages respectée sous réserve du maintien d'une couverture végétale pérenne (diminuer les envols de poussières et limiter le contact direct avec le sol) Pas de nécessité d'apport de terre végétale en surface Création de barrières végétales pour éviter le stationnement prolongé et le contact des usagers avec le sol dans les espaces publics.	👎 Nécessité d'apport de terre végétale pour supprimer le contact entre pollution résiduelle et usagers (maîtrise des impacts) avec effet limité dans le temps du fait du tassement et de la bioturbation	

Étapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)				Freins à l'application des phytotechnologies
Techniques	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies		Techniques conventionnelles		
4. Etude des scénarios de gestion							
4.1 Bilan cout-avantages (BCA) = comparer les scénarios de gestion sur la base de 5 familles de critères	Voir tableau BCA (page suivante)		👍	Bénéfices au travers de la création de nouveaux sous-critères : valorisation phytomasse produite ; services écosystémiques (biodiversité, support sol, rétention/infiltration de l'eau, etc.) ; absence de déchets connexes, ...			Absence de référentiel pour évaluer les services écosystémiques à l'issue de la mise en œuvre des phytotechnologies, par rapport aux techniques conventionnelles. De nombreux travaux R&D sont en cours.
4.2 Mesures constructives = proposer des mesures en lien avec la conception et le fonctionnement des bâtiments/aménagements pour réduire/supprimer l'exposition	Pour les bâtiments : non applicable pour les polluants métalliques et non volatils.						
	Pour rappel, les végétaux cultivés assurent un recouvrement des sols à traiter et donc une « couverture végétale », limitant les contacts directs avec les sols ainsi que le ré-envol des poussières	Pratique usuelle pour les pollutions résiduelles : couverture de sol de surface avec des terres d'apport dont la qualité est contrôlée pour supprimer les voies de transfert et d'exposition	👉	Peut nécessiter l'apport de terres exogènes et d'amendements si les conditions pédo-agronomiques ne sont pas favorables au développement des végétaux	👉	Contribue à l'épuisement de la ressource sol (excepté la biodégradation dynamique)	
4.3 Restrictions d'usage = proposer les moyens garantissant la compatibilité des usages avec les pollutions résiduelles laissées en place	1. accès interdit ou restreint possible à la zone traitée (ex : réserve naturelle intégrale), ou fréquentation occasionnelle pour les usagers (avec chemins balisés visant à éviter le contact avec le sol, par exemple) 2. plantations à vocation alimentaire pouvant être interdites (jardin potager, verger) ou nécessité de plantation hors sol 3. choix des cultures non alimentaires dépendant de débouchés garantis	Techniques conventionnelles : 1.couverture des sols par des terres d'apport contrôlé 2.plantations à vocation alimentaire pouvant être interdites (jardin potager, verger) ou nécessité de plantation hors sol	👉	Peu de succès dans les retours d'expérience de la co-culture de végétaux comestibles avec les végétaux mis en œuvre dans le cadre des phytotechnologies ce qui conduit, dans l'état actuel des connaissances, à ne pas considérer ce scénario	👉	Nécessité d'assurer la pérennité de la couverture de surface (contrôle de la qualité et de l'épaisseur, emploi de grillage avertisseur entre les sols en place et les terres apportées). Impact négatif des matériaux plastiques dans les sols du fait de l'emploi de grillage avertisseurs et de leur dégradation (en microplastiques et nanoplastiques)	Nombreux travaux R&D en cours appliqués sur les usages non alimentaires sur les sites phytomanagés pour acquérir et compléter les connaissances sur les débouchés possibles (logique de maîtrise des transferts des polluants dans l'environnement tout au long de la filière et logique de préservation des performances des procédés de valorisation). Nécessité de retour d'expérience sur l'acceptabilité sociale (phytotechnologies et phytomanagement)
		Confinement : contrainte forte (aucun usage possible) dès lors que des géomembranes sont mises en œuvre pour couper les voies de transfert et d'exposition			👉	Confinement : la zone concernée est condamnée (aucun usage : aucun accès, aucun aménagement, aucune plantation possible)	

Etapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
Techniques	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	
4.4 Validation sur le plan sanitaire = s'assurer de la validité de l'analyse des risques résiduelles	 et  - 2 situations envisagées : - traitement temporaire (ex : valorisation phytomasse produite) : l'analyse des risques résiduels (ARR) prédictive est menée par rapport à l'usage futur ; ou - traitement permanent, inclus dans le futur usage (ex : espaces de nature) : l'ARR prédictive est menée sur les concentrations totales initiales en polluants.	Validation sur le plan sanitaire des risques résiduels, suite à l'abattement des concentrations totales	 Voies d'exposition potentielles considérées et maîtrisées : 1/ ingestion de sol 2/ inhalation de poussières	 Réduction des concentrations totales des polluants dans le sol	L'utilisation des phytotechnologies soulève : - la question de la réalisation d'une ARR lors d'un traitement <u>temporellement limité</u> (5 à 20 ans versus temporalité de 6 à 12 mois pour les techniques conventionnelles) ; - la question de l'exposition aux polluants des travailleurs des productions non alimentaires normalement couverte par les dispositions du Code du Travail
	 - Validation sur le plan sanitaire des risques résiduels, suite à l'abattement des concentrations totales	Confinement : validation sanitaire - absence d'exposition pour l'homme à court terme car suppression des voies d'exposition	  Les concentrations totales en polluants inorganiques peuvent diminuer avec le traitement mais une pollution résiduelle persistera et généralement aucune diminution dans les sols sur le court terme (<5 ans).	 Confinement : avec le temps, détérioration possible de la couverture et des géomembranes avec mise en contact des terres avec les usagers, phénomène de bioturbation, et possible transfert des polluants vers les eaux souterraines	
	Les phytotechnologies induisent en parallèle une préservation ou une amélioration de la ressource sol (fonctionnalités, habitat), non évaluée et non prise en compte dans le plan de gestion en termes de validation environnementale	Pas d'évaluation des risques résiduels sur l'environnement après les travaux de réhabilitation qui peuvent affecter la ressource sol			La démarche du PG à l'heure actuelle aborde peu souvent l'évaluation des risques résiduels pour les écosystèmes (faune, flore et fonctions du sol...). Existence d'outils pour l'estimation des impacts sur les écosystèmes avec un retour d'expérience limité* (ex : logiciel Terrasys, Guide TRIPODE d'application de l'approche Triade, bioindicateurs d'accumulation et d'effet).

Etapas du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
Techniques	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	
5. Contrôle de l'efficacité et de la pérennité des mesures de gestion = proposer les mesures de contrôle de la mise en œuvre et de la pérennité (surveillance environnementale)	Paramètres suivis communs à la mise en place et à l'entretien/exploitation pour les techniques  : - Croissance, survie et couverture des espèces plantées ; - Paramètre du sol tel que pH dans le cas de l'utilisation d'un amendement visant à modifier ce paramètre. Paramètres suivis spécifiques à l'entretien/exploitation pour  et  : Analyses des polluants dans les végétaux et les sols (la fraction lixiviable ou extractible de polluants ne doit pas augmenter). Paramètres suivis spécifiques à l'entretien/exploitation pour  : Vérification des concentrations résiduelles dans les sols. Autres paramètres possibles à suivre en lien avec les services écosystémiques (indice de biodiversité...) ciblés	Excavation : vérification des concentrations résiduelles au niveau des bords et fonds de fouille Confinement : vérification de l'efficacité du confinement via la surveillance des eaux souterraines, au cas par cas Lavage in-situ/ biodégradation dynamique : vérification des concentrations résiduelles dans les sols et dans les eaux souterraines (pour s'assurer de l'absence de lixiviation dans compartiment aquifère le cas échéant)	👉 Nécessité d'assurer une surveillance des plantations et l'entretien des parcelles, voire de nouveaux semis/ plantations en cas de couverture ou taux de survie insuffisant (conditions météorologiques, ravageurs, maladies, compétition entre espèces végétales). Peut nécessiter une surveillance de la qualité des eaux sur la durée du traitement, au cas par cas. Nécessite une conservation accrue de la mémoire de la pollution laissée en place.	👍 Excavation : aucun suivi nécessaire 👉 Confinement : suivi dans le temps (couverture, surveillance des eaux souterraines) et conservation de la mémoire Lavage in-situ : nécessité de s'assurer qu'il n'y a pas de lixiviation des polluants du sol vers l'aquifère pendant le traitement Biodégradation dynamique : nécessité d'une expertise élevée ; léger tassement autour des ouvrages ; surveillance assidue de la qualité des milieux en lien avec le bon contrôle des mouvements des polluants et des produits de dégradation ; caractérisation d'éventuels effets 'rebonds' (remobilisation des polluants)	Absence de guide sur les protocoles de suivi intégrant notamment le prélèvement des parties aériennes (feuille, tige, branche, bois) et la constitution des échantillons (représentativité, incertitudes...), et leur optimisation en fonction de l'évolution du site. Protocoles internes non harmonisés, harmonisation possible dans la continuité des travaux menés dans le cadre du GT végétaux**
6. Plan de conception des travaux (PCT) = définir les essais de faisabilité pour consolider le choix des scénarios de gestion	Réalisation de préférence d'essais <i>in-situ</i> (essai E3) ou, éventuellement, en laboratoire (enceinte de culture - essai E2) pour s'assurer de la bonne croissance des espèces végétales pressenties au regard des conditions pédo-géo-climatiques et pour acquérir des données sur les caractéristiques agronomiques de sols (essai E1).	Excavation/confinement : non concerné. Lavage in-situ : essai E2 pour s'assurer que la texture du sol est compatible avec ce type de traitement	👍 Phytoextraction : essais facilement mis en œuvre (essais pilote <i>in-situ</i> ou dans une enceinte de culture en laboratoire) permettant de s'assurer du succès du traitement et de tester différentes modalités de traitement 👉 Phytoextraction/ phytorhizodégradation : durée des essais à adapter en fonction du cycle de culture des végétaux 👍 Phytostabilisation aidée : retour d'expérience robuste sur les performances de plusieurs familles de végétaux/amendements sur tous sites et toutes pollutions métalliques, pouvant rendre le PCT optionnel.	👍 Lavage in-situ : essai facilement mis en œuvre (essais E2/E3) et de courte durée (< 3 mois)	Phytoextraction : réalisation d'un PCT recommandée pour les situations non éprouvées (absence de données scientifiques : recours à des espèces végétales non étudiées, expérimentations sur de courtes durées ou en conditions spécifiques). Temps long pour l'abattement de la pollution nécessitant une extrapolation pour anticiper les quantités extraites de polluants et la durée nécessaire pour atteindre l'abattement souhaité de la pollution.

Étapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
Techniques	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	
7 – Ingénierie de dépollution = suivre l'exécution des travaux de dépollution et procéder à leur réception	 : Pour les polluants inorganiques, il s'agit davantage de maîtriser les impacts (voies de transfert et d'exposition) que de maîtriser la source. Nécessite un entretien et la gestion de la phytomasse produite.	Excavation : nécessite des travaux de terrassement, le suivi et la gestion des terres excavées et le contrôle des bords & fonds de fouille Confinement : nécessite des travaux de terrassement et la pose de géomembranes. Lavage in-situ : nécessite une unité mobile, des utilités et la gestion des déchets. Biodégradation dynamique : nécessite d'optimiser les paramètres influant la dégradation (injection d'oxygène, apport de nutriments, ensemencement de micro-organismes exogènes, ajout de donneurs ou d'accepteurs d'électrons - cométabolisme)	 Utilisation des techniques et des engins classiquement utilisés et disponibles en espaces verts et agro-foresterie. Réception après contrôle visuel des plantations.	 Excavation/confinement : techniques conventionnelles maîtrisées et éprouvées (techniques du génie civil). Réception après analyse des milieux et/ou contrôle visuel/technique.  Lavage in-situ : technique peu utilisée par rapport au lavage on-site qui est conventionnellement utilisé et éprouvé, du fait d'une pollution potentielle des eaux souterraines lors de la mise en œuvre des solutions acides. Réception après analyse des milieux Biodégradation dynamique : nécessite une expertise et un contrôle des mouvements des polluants, dépend de la biodisponibilité et dégradabilité des polluants, possibilité d'un léger risque de tassement autour des puits d'injection Désorption thermique : nécessite une expertise notamment pour le traitement des gaz captés	Besoin de transversalité entre les champs d'expertise/métiers pour la mise en œuvre des phytotechnologies (espaces verts, agriculture, foresterie et sites pollués) et la surveillance (SSP, écologie notamment)

Légende :

	Limite technique		Case bleue (phytotechnologies)
	Avantage technique		Case jaune (techniques conventionnelles)

* Outils et démarches pour estimer les impacts sur les écosystèmes : 1/ logiciel Terrasys mis en œuvre dans le projet de recherche TROPHé (ADEME/Ineris ; livrable n°4, <https://www.ineris.fr/fr/trophe-transferts-risques-organiques-persistants-homme-ecosystemes-livrable-ndeg4-retour-experience>), 2/ ISO 19204, 2017. Qualité du sol - Procédure d'évaluation des risques écologiques spécifiques au site de la contamination des sols (approche TRIADE de la qualité du sol), 3/ travaux menés sur les bio-indicateurs des outils biologiques pour des sols durables, <https://www.ademe.fr/bioindicateurs-outils-biologiques-sols-durables-fiches-outils>

** Groupe de travail « Végétaux » démarré pour le compte du Ministère de l'Environnement fin 2018 et visant à harmoniser les pratiques des laboratoires quant à la préparation et à l'analyse des végétaux consommés par l'Homme, prélevés dans le cadre d'évaluations des risques sanitaires ([Guide pratique pour la préparation et l'analyse des végétaux consommés par l'Homme dans le contexte des sites et sols pollués | Ineris](#), actualisation en cours)

3.5 Plan de gestion appliqué aux phytotechnologies – identification des freins

L'application du plan de gestion au cas fictif considérant les phytotechnologies au même titre que les techniques de dépollution conventionnelles a permis de mettre en évidence plusieurs freins qui peuvent être classés selon 4 catégories :

- **frein organisationnel** : les compétences techniques permettant la mise en œuvre des phytotechnologies existent mais sont disséminées conduisant à un besoin de transversalité pour articuler des disciplines très variées évoluant dans le domaine des phytotechnologies ;
- **frein technique** :
 - absence d'objectif de suppression de la source, justifiée par l'action sur les voies de transfert et d'exposition qui permet une maîtrise des impacts ;
 - pour la phytoextraction, facteur d'abattement de la pollution globalement inférieur à celui des techniques conventionnelles ;
 - retour d'expérience limité sur certaines espèces végétales ou sur le long-terme pour certains aspects tels que les amendements du sol ;
 - nombreux travaux de recherche appliqués sur les usages non alimentaires sur les sites phytomanagés et peu de travaux de recherche réussis à ce jour sur les stratégies à mettre en œuvre pour s'assurer de la compatibilité sanitaire des cultures alimentaires ;
- **frein méthodologique** :
 - changement des pratiques classiques consistant à substituer par une couverture « végétale » le recouvrement des sols impactés avec des terres apportées ;
 - RETOUR D'EXPÉRIENCE limité pour évaluer les services écosystémiques à l'issue de la mise en œuvre des phytotechnologies, par rapport aux techniques conventionnelles (nécessité de démarche ou de guide) ;
 - considération ou non d'une ARR dans le cadre d'un traitement temporellement limité (5 à 20 ans) pour les futurs employés ;
 - absence d'évaluation des risques résiduels sur les écosystèmes en lien avec les polluants laissés en place ;
 - absence de guide sur les protocoles de suivi des cultures intégrant notamment le prélèvement des parties aériennes (feuille, branche, tige, bois) des espèces végétales cultivées et la constitution des échantillons, ainsi que leur optimisation en fonction de l'évolution du site ;
- **frein technico-économique** :
 - retour d'expérience économique sur le long terme limité pour la mise en place et l'entretien des phytotechnologies (phytostabilisation, phytoextraction) ;
 - besoin de consolider à l'échelle nationale la pérennité de filières de valorisation des phytomasses produites (phytoextraction) afin d'intégrer l'aval des phytotechnologies et de viabiliser le bilan économique sur l'entièreté de la filière (phytomanagement).

3.6 Focus sur le bilan coût-avantage

Le Bilan Coût-Avantage (BCA) est le pilier du plan de gestion, il permet de comparer plusieurs scénarios de gestion sur la base de critères argumentés, objectifs et transparents. Cinq familles de critères sont ainsi à considérer comme recommandé dans le guide ADEME-UPDS⁵ de 2017 : critères économiques, critères environnementaux et d'hygiène et sécurité, critères juridiques et réglementaires, critères socio-politiques et critères techniques, normatifs et organisationnels. Pour les sous-critères, leur nombre et leur intitulé sont à la main du rédacteur du plan de gestion qui les définit en fonction du contexte et des caractéristiques du site. Ils font l'objet d'un argumentaire.

Le Tableau 8 présente les 5 familles de critères dans le cadre de l'application des phytotechnologies, ainsi que les sous-critères associés, dont certains ont été développés dans le cadre de la présente étude pour rendre compte des atouts spécifiques de la phytoextraction, de la phytostabilisation et de la phytorhizodégradation dans la gestion des sols pollués. Ces derniers apparaissent en orange dans le tableau.

⁵ Elaboration des bilans coûts-avantages adaptés aux contextes de gestion des sites et sols pollués, ADEME-UPDS, 2017

Tableau 8 : critères et sous-critères retenus pour le bilan coût-avantage en lien avec l'application des phytotechnologies

Famille de critères	Sous-critères	Phytotechnologies
Critères techniques et normatifs	Caractéristiques des polluants et adéquation de la technique	Choix des espèces végétales pour les pollutions métalliques en fonction des objectifs de dépollution/immobilisation et des polluants à traiter (retour d'expérience étayé, notamment en termes de choix des plantes et d'amendements). Pour la phytorhizodégradation, la majorité des espèces végétales est indiquée pour une dépollution à partir du moment où leur adéquation avec les paramètres pédo-géo-climatiques a été validée. Technique adaptée aux pollutions sur de grandes superficies et aux terrains en pente.
	Accessibilité du site	Applicable également sur site isolé, éloigné d'infrastructures routières et de potentiels fournisseurs d'équipements. Portance des sols à vérifier dans le cadre d'une exploitation forestière (passage camions).
	Absence d'accès à l'eau et à l'électricité sur site	Phytoextraction/phytostabilisation/phytorhizodégradation : mise en œuvre possible dans ces contextes. Un arrosage lors de l'implantation des végétaux peut être nécessaire.
	Temps disponible	Temps lié à l'usage du site (traitement, valorisation économique/écologique/sociale). De l'ordre de l'année à des dizaines d'années en fonction des espèces végétales implantées (ex : jusqu'à 20-25 ans, pour agroforesterie). Pas de contrainte de temps pour une réhabilitation paysagère.
Critères économiques	Coût de la mise en œuvre de la technique	Coûts équivalents à ceux estimés pour les espaces agricoles, forestiers, espaces verts. Technique dont la rentabilité augmente avec la surface à traiter (versus excavation), au travers des bénéfices dégagés via les filières de valorisation, en regard des coûts de mise en œuvre. Toutefois, une surface minimale d'exploitation peut être nécessaire (agroforesterie, couplage phytotechnologies/panneaux photovoltaïques).
	Coût des suivis ultérieurs	Technique demandant peu d'entretien (similaire aux coûts d'entretien sur un site non pollué). La fréquence d'entretien dépend de l'usage du site. Nécessité d'un suivi des teneurs en composés métalliques dans la phytomasse produite et récoltée, dont la fréquence est à adapter en fonction de la filière de valorisation. Nécessité d'une surveillance des milieux au cas par cas (eaux souterraines).

Famille de critères	Sous-critères	Phytotechnologies
Critères économiques	Valorisation temporaire ou définitive	Valorisation possible du foncier par la production de : - phytomasse pour la filière bois énergie : revente de la phytomasse ; - molécules à haute valeur ajoutée à partir de la phytomasse (chimie verte, bioraffinerie, production d'huiles essentielles) pour les métaux tels que zinc, cadmium et nickel ; - matériaux à base de végétaux (produits biosourcés manufacturés), Filière de méthanisation pour les co-produits et déchets issus de l'agriculture dont les CIVE (culture intermédiaire à vocation énergétique). Des analyses de cycle de vie (ACV) sont disponibles.
	Autres éléments non monétisés	De nombreux travaux en cours pour monétiser les services écosystémiques dont la séquestration du carbone.
Critères environnementaux	Augmentation du trafic	Le traitement in situ et sur site et la valorisation locale de la phytomasse produite (mise en place, suivi et valorisation) limitent le trafic routier (versus excavation).
	Déchets générés	Faible production de déchets équivalente à celle concernant les espaces agricoles, forestiers, espaces verts. Absence de déchets connexes (charbon actif, solvant et additif employés pour traiter les gaz issus de la désorption thermique).
	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie uniquement liée à la mise en œuvre et à l'entretien/récolte (engins agricoles).
	Encombrement des installations de stockage de déchets	Aucun encombrement lié au traitement in situ versus excavation. Diminution potentielle de la charge en polluants dans les sols (totale et lixiviable) après traitement pouvant mener à un déclassement de la filière d'élimination des terres (installation de stockage de déchets) – concerne la phytoextraction (sans retour d'expérience sur le long-terme) et la phytorhizodégradation.
	Gestion de la phytomasse produite pouvant être enrichie en composés métalliques	Enrichissement de la phytomasse en composés métalliques recherché ou subi. Valorisation de la phytomasse produite et/ou des métaux contenus dans la phytomasse : filières existantes (énergie) et émergentes (bioraffinerie, chimie verte, biomatériaux, etc.), avec respect des normes en vigueur lorsqu'elles existent.

Famille de critères	Sous-critères	Phytotechnologies
Critères environnementaux	Services écosystémiques Aménités environnementales	Création d'espaces de nature. Dépollution. Séquestration du carbone via la production de phytomasse et l'utilisation éventuelle d'amendement du sol. Régulation de la température de l'air au droit des espaces de nature (îlots de fraîcheur en particulier en milieu urbain) – non liée aux sols pollués mais à la présence des espèces végétales en pleine terre. Eau : épuration (amélioration de la qualité de l'eau) et diminution du lessivage par rétention (réduction des transferts verticaux). Amélioration du bien-être des populations riveraines et usagers (esthétisme, qualité des aménités paysagères, gain sur la santé humaine via l'amélioration du cadre de vie et des bénéfices dus à la perception positive des riverains). Production de matériaux biosourcés, énergies renouvelables (phytomasse renouvelable). Préservation, amélioration/ restauration des fonctionnalités du sol (fonction des objectifs des services écosystémiques). Maintien et/ou augmentation des habitats pour les vivants de l'écosystème sol et sa biodiversité (microflore, microfaune,...). Limitation/éradication des espèces exotiques envahissantes. Préservation de la ressource sol en tant que support.
	Réduction des expositions aux polluants	Réduction des voies de transfert vers d'autres milieux : air (envol de poussières), eau (ruissellement, infiltration), chaîne trophique (niveaux trophiques supérieurs) pendant la durée du traitement
	Consommation de ressources	Non nécessité d'emploi de terres végétales de recouvrement. Absence d'utilisation d'énergies fossiles ou d'électricité. Emploi potentiel d'amendements du sol (dans l'idéal, locaux et issus de l'économie circulaire). Absence d'export de la matière organique produite sur site (intrants organiques non nécessaires).
Critères socio-politiques	Nuisances au voisinage (bruit, poussières, odeurs)	Hormis lors de la mise en œuvre éventuellement et lors des récoltes de phytomasse où les nuisances sont équivalentes à des travaux d'espaces verts/ agroforesterie. Acceptabilité sociale d'espaces de nature en zone urbaine ou rurale, quelle que soit la densité de population. Aucune nuisance sonore. Aucun ré-envol de poussières en raison du couvert végétal pérenne. Aucune odeur générée.

Famille de critères	Sous-critères	Phytotechnologies
Critères juridiques et réglementaires	Contraintes résiduelles (restrictions d'usage, surveillances ultérieures...)	Restrictions d'usage possibles en fonction de l'analyse des risques résiduels : limitation d'accès à la zone en traitement, interdiction de jardins potagers/vergers, restriction en adéquation avec l'usage envisagé. Surveillances ultérieures : surveillance des paramètres de performance (qualité des eaux souterraines au cas par cas, maintenance de la couverture végétale, absence de transferts dans les parties aériennes des espèces végétales et mobilité des polluants dans les compartimentaux environnementaux). Responsabilité du propriétaire de site. Traçabilité nécessaire de la pollution laissée en place.
Total	18	

en couleur : sous-critère développé pour les phytotechnologies

Conclusions sur le tableau BCA élaboré dans le cadre de l'applicabilité des phytotechnologies :

Les sous-critères classiquement retenus dans le bilan coûts-avantages permettent de comparer les phytotechnologies aux autres techniques conventionnellement utilisées pour la gestion des sols pollués. Ces sous-critères répartis selon les 5 familles de critères définies dans la méthodologie nationale portent sur :

- critères techniques et normatifs : adéquation de la technique de dépollution avec les polluants, accessibilité du site, accès aux utilités, durée du traitement.
- critères économiques : coût de la mise en œuvre et des suivis ultérieurs.
- critères environnementaux : trafic routier, déchets, consommation d'énergie, encombrement des installations de stockage.
- critères socio-politiques : nuisances par rapport aux riverains.
- critères juridiques et réglementaires : contraintes résiduelles.

Toutefois, l'examen de l'applicabilité des phytotechnologies permet aussi d'introduire de nouveaux sous-critères :

1/ Pour les critères économiques :

- la **valorisation du foncier** par la production de phytomasse au travers de la filière bois énergie (culture d'arbres dans le cadre de phytostabilisation et de phytoextraction) et au travers de la production de matériaux biosourcés et molécules à haute valeur ajoutée. Il est aussi possible pour les co-produits et déchets issus de l'agriculture d'alimenter la filière de méthanisation, comme il est possible de mettre en place une culture intermédiaire (CIVE : culture intermédiaire à vocation énergétique) dans le cadre d'un itinéraire technique associant successivement différentes cultures (rotation culturale) ou une culture dédiée à la phytomasse.
- les services écosystémiques tels que la séquestration du carbone, **éléments encore peu utilisés dans les bilans économiques**.

2. Pour les critères environnementaux :

- la **gestion de la phytomasse produite pouvant être enrichie en composés métalliques**. Cet enrichissement recherché (phytoextraction) ou subi (phytostabilisation) conduit préférentiellement à la valorisation de la phytomasse et des métaux qu'elle contient au sein de filières existantes ou émergentes, dans le respect des normes en vigueur lorsqu'elles existent.
- les **« services écosystémiques »** considérant ici uniquement les aménités⁶ environnementales. L'emploi d'espèces végétales en phytotechnologies pour gérer des pollutions des sols contribue à apporter une multitude de services à l'Homme, via la préservation et/ou l'amélioration des fonctions du sol, tels que la préservation des ressources sol et eau, la séquestration du carbone, la participation à la régulation de la température de l'air en luttant, notamment, en milieu urbain contre les îlots de chaleur dans le cadre de l'adaptation au changement climatique et en participant à la préservation/création d'espaces de nature à partir d'espaces non utilisés ou sous-utilisés comme les friches. Les milieux concernés sont ainsi à la fois le sol, l'air, l'eau, la faune, la flore mais aussi la microfaune et la microflore.

⁶ Aménités : du latin « *amoenitas* » (charme) – signifie à la fois l'amabilité et la douceur dans l'attitude de quelqu'un et, pour un lieu, son agrément. <https://www.cairn.info/revue-francaise-d-administrationpublique-2010-2-page-373.htm>

Une aménité environnementale est tout aspect de l'environnement appréciable et agréable pour l'humanité, dans un lieu ou site particulier. Les aménités environnementales sont *a priori* « gratuitement offertes par la nature », non-quantifiables, notamment par la monnaie, et donc « inestimables ». Ce concept est intégré dans les préoccupations éthiques et de développement durable.

https://fr.wikipedia.org/wiki/Am%C3%A9nit%C3%A9_environmentale

- la **consommation limitée de ressources** puisqu'il n'y a pas nécessité d'employer de la terre végétale pour couper la voie d'exposition « ingestion de sol » dès lors qu'une couverture végétale est maintenue. L'emploi d'amendements du sol minéraux, biologiques ou organiques peut être toutefois nécessaire dans le cadre de la phytostabilisation aidée en vue d'immobiliser les polluants et/ou d'améliorer certaines fonctionnalités du sol (ex : support pour production de phytomasse).

Les nouveaux sous-critères créés à l'occasion du déroulement du BCA mettent en lumière les atouts représentés par la mise en œuvre des phytotechnologies, et plus globalement l'intérêt d'aborder dans le plan de gestion les effets positifs de l'utilisation de ces techniques selon les usages envisagés et objectifs visés.

3.7 Proposition de plan de surveillance associé aux phytotechnologies

La mise en œuvre de mesures de gestion s'accompagne du suivi de paramètres de performance mais aussi d'un plan de surveillance des milieux. Les paramètres présentés dans le Tableau 9 sont une proposition de paramètres adaptés aux phytotechnologies pouvant, par exemple, faire l'objet d'une prescription dans le cadre d'un arrêté préfectoral prescrivant les travaux de réhabilitation.

Au-delà de ces paramètres, d'autres indicateurs peuvent être évalués :

- paramètres agronomiques (pH, matière organique, capacité d'échange cationique) ;
- indicateurs de biodiversité lorsque le maintien ou la restauration de la biodiversité est un objectif recherché de la mise en place des phytotechnologies.

Tableau 9 : Paramètres à suivre pendant les travaux – surveillance

	Phytoextraction	Phytostabilisation (aidée)	Phytorhizodégradation (aidée)
Rappel des performances	Quantité de contaminants métalliques ciblés, extraite annuellement par les plantes par unité de surface (<i>en kg de métal /ha /an</i>).	Croissance et pérennité des plantes avec : - un couvert végétal optimum (100%) avec des espèces pérennes - un transfert des contaminants métalliques dans les plantes réduit à une valeur minimale (limiter leur mobilité dans les sols, réduire leur phytodisponibilité)	Abattement dans les sols des contaminants organiques ciblés, exprimé en pourcentage par rapport aux concentrations initiales totales (% d'abattement).
Surveillance pendant la mise en œuvre des traitements	- vérification de la couverture végétale pour favoriser l'optimisation de l'extraction des polluants. Renouvellement du couvert végétal si emploi de végétaux annuels ou bisannuels. - surveillance de la qualité des eaux souterraines au cas par cas (hautes eaux/basses eaux – fréquence à adapter). - vérification du respect des itinéraires techniques prévus. - en l'état des connaissances actuelles, il n'est pas nécessaire de contrôler à une fréquence annuelle les concentrations en polluants dans les sols (concentrations totales ou mobiles). En effet, les quantités extraites par les plantes ne s'accompagnent pas toujours d'une réduction significative des concentrations dans les sols.	- re-semer/replanter si couverture initiale non optimale (vis- à-vis du ré envol de poussières et accès à un sol nu) - analyse dans le végétal des polluants potentiellement toxiques (parties aériennes telles que les tiges et les feuilles). Vérification des concentrations dans les parties aériennes après un premier cycle de développement des espèces, et confirmation de la présomption de réduction de ces concentrations par l'amendement du sol - surveillance de la qualité des eaux souterraines au cas par cas (hautes eaux/basses eaux – fréquence à adapter)	- vérification de la couverture végétale pour favoriser le développement racinaire et la dégradation des polluants organiques autour des racines et/ou au sein des végétaux. Renouvellement du couvert végétal si emploi de végétaux annuels ou bisannuels. - concentrations totales des polluants et des métabolites dans les sols et les végétaux (en lien avec les filières de traitement ultérieur de la phytomasse). Fréquence annuelle ou pluri-annuelle (à la même saison). -surveillance de la qualité des eaux souterraines au cas par cas (hautes eaux/basses eaux – fréquence à adapter).
	Possibilité d'adapter la surveillance (renforcement, allègement) en fonction du suivi des performances (notamment pour obtenir une phytomasse enrichie en polluants) et de l'évolution du couvert végétal mis en place (notamment pour éviter la compétition avec les espèces végétales issues de la banque de graines) et au regard des services écosystémiques rendus et souhaités.		

4 Synthèse et perspectives

4.1 Synthèse quant à l'applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des sols pollués

Les phytotechnologies apparaissent comme un complément et/ou une alternative aux techniques conventionnelles dans la gestion des sites et sols pollués notamment pour de grandes superficies impactées en surface. Elles présentent un intérêt certain pour traiter les sols impactés par des composés inorganiques et organiques, dans le cadre d'un traitement temporaire dans l'attente d'un changement d'usage, ou bien dans le cadre d'un nouvel usage (traitement pérenne).

Dans le cas fictif du plan de gestion déroulé dans le présent rapport, l'emploi d'espèces végétales pour traiter les pollutions *in situ* conduit à considérer :

- leurs **avantages techniques** telles que leur adéquation pour des pollutions sur de grandes superficies ; la transposition possible des techniques de mise en œuvre éprouvées en génie écologique et pédologique pour la réalisation et le suivi d'espaces de nature la préservation de la ressource sol et de ses fonctionnalités ; la maîtrise des espèces végétales sélectionnées ; la maîtrise des impacts au travers du maintien d'une couverture végétale pérenne ; la limitation du ré-entrainement de poussières et des transferts de polluants vers les compartiments environnementaux (faune, flore et eaux souterraines) ; l'absence d'apport de terre végétale ; la possibilité de réaliser des essais dans le cadre du Plan de Conception des Travaux ; le suivi des plantations et la réception aisée des travaux ;
- leurs **limites techniques** en lien avec le choix parfois limité des espèces (en particulier (hyper)accumulatrices) ; la profondeur d'enracinement et les conditions optimales de développement des plantations (caractéristiques pédo-agronomiques des sols) ; la mobilité des polluants à traiter ; la persistance de certains polluants peu biodégradables dans les sols ; des facteurs d'abattement des pollutions métalliques plus faibles que les techniques conventionnelles ; la nécessité d'assurer un entretien des plantations (compétition avec espèces végétales issues de la banque de graine et des alentours) et de protection vis-à-vis d'événements extrêmes (sécheresse, inondations, maladies, ravageurs, etc) ; la nécessité d'une conservation accrue de la mémoire en raison des pollutions laissées en place ; la durée parfois longue des essais dans le cadre du Plan de Conception des Travaux (entre 3 et 12 mois) ;
- les **freins** organisationnels, méthodologiques et technico-économiques, identifiés tels que la dissémination des compétences engendrant un besoin de transversalité pour articuler des disciplines très variées évoluant dans le domaine des phytotechnologies ; un retour d'expérience encore peu consolidé en terme économique ; l'absence de facteurs d'abattement de la pollution dans le cas de la phytostabilisation et de la phytoextraction tels qu'affichés par les techniques conventionnelles, justifiée par l'action sur les voies de transfert et d'exposition permettant une maîtrise des impacts ; l'absence de guide sur les protocoles de suivi des plantations et de leur optimisation ; un retour d'expérience encore limité sur le long-terme pour certains aspects (maintien de l'écosystème en place et des objectifs visés) ; l'absence de retour d'expérience pour évaluer les services écosystémiques ; l'absence d'évaluation des polluants résiduels pour l'environnement ; le besoin de consolider à l'échelle nationale la pérennité de filières de valorisation des phytomasses produites ; la pratique ancrée telle que l'apport d'une couche de terre exogène pour supprimer le contact avec les sols pollués.
- les **atouts** des phytotechnologies par rapport aux techniques conventionnelles mis en exergue dans le bilan coûts-avantages, comprenant la valorisation foncière par la production de phytomasse et de molécules à haute valeur ajoutée mais aussi les services écosystémiques rendus et la consommation limitée de ressources ;
- les critères de décision : la **pression foncière** et les **superficies concernées** du projet qui peuvent orienter vers un traitement temporaire par exemple sur un ou plusieurs cycles de culture ;
- les **contextes** économique, environnemental, socio-politique, juridique et réglementaire ;

- le **plan de surveillance** spécifique des milieux assurant la gestion des pollutions, la maîtrise des voies de transfert et d'exposition, susceptible d'être transcrit dans un arrêté préfectoral prescrivant les travaux de réhabilitation et de suivi.

4.2 Perspectives

Les phytotechnologies en tant que technique de gestion des sols pollués s'avèrent applicables dans les situations de gestion de sols pollués, reposant sur une pollution des sols par des métaux sur une grande superficie et/ou par des composés organiques dégradables. Aucune difficulté incontournable n'a été identifiée au cours de l'étude de cas fictive déroulée. Cette seconde édition a permis de :

- clarifier les spécificités de la phytoextraction, de la phytostabilisation et de la phytorhizodégradation évitant ainsi les amalgames et les confusions entre les techniques et leurs objectifs ;
- lister les contextes d'application qui permettent dorénavant d'identifier les situations éligibles à l'emploi des végétaux comme mode de gestion des pollutions. Les sites sans projet, les projets avec des temps morts et d'attentes, et les friches sont en particulier des opportunités pour ces technologies. Le Fond friches du plan de relance est à ce titre à mieux faire connaître aux acteurs ;
- intégrer l'analyse des atouts, faiblesses, opportunités et menaces à lever des phytotechnologies.

Ces techniques rentrent dans le champ de la renaturation. Le rapport Ineris de 2025 « méthodologie pour l'usage de renaturation dans la gestion des SSP : premier rapport d'étape » propose un cadre préliminaire pour encadrer cet usage. Le besoin d'outils d'analyse pour définir les objectifs de réhabilitation est en partie adressé par les propositions faites dans ce rapport. La restauration ou l'amélioration de la fonctionnalité des sols et des services écosystémiques qui en découlent sont encore peu regardées dans la méthodologie nationale SSP, ce qui se traduit par une grille de lecture essentiellement basée sur les risques pour la santé humaine. Cette grille de lecture est amenée à évoluer en faveur d'une meilleure prise en compte de l'environnement.

- souligner que la surface, la temporalité et la pression foncière n'étaient pas limitantes pour l'application des phytotechnologies.
- mettre en évidence le manque de communication et de vulgarisation auprès des élus, des acteurs de travaux de dépollution, des riverains, etc..
- répondre aux questionnements de certains acteurs sur l'opportunité de mettre en œuvre ces techniques au regard de la temporalité et de la finalité du projet d'aménagement et des enjeux sanitaires et environnementaux.

La synthèse des interviews de 10 acteurs divers (bureau d'étude, entreprise, propriétaire ou aménageur de foncier, autre) a globalement permis de conforter les résultats obtenus suite au déroulement fictif du plan de gestion intégrant les phytotechnologies en comparaison des techniques conventionnelles et de compléter le bilan coût-avantage au regard des avantages et inconvénients de la phytorhizodégradation. Les phytotechnologies étant des techniques permettant d'assurer les compatibilités d'usage avec le sol, une augmentation du retour d'expérience sur ces techniques (mise en œuvre et suivi) est attendue. L'analyse de ces retours d'expérience permettra de compléter et d'enrichir les critères et sous-critères du bilan coût-avantage déployé au sein des plans de gestion, et les paramètres à suivre lors de la phase de surveillance.

Pour lever certains freins méthodologiques et techniques précédemment listés, des pistes de travaux sont identifiées à ce stade :

- Poursuivre la compilation et la diffusion des essais épars, pilotes ou innovants non publiés car parcellaires ou non aboutis ou parce que ce n'est pas dans la culture de certains acteurs de valoriser leurs résultats ;
- Recueillir les analyses économiques complètes ;
- Développer et élargir l'acculturation et la formation des divers acteurs impliqués dans la gestion des SSP pour assurer la transversalité des compétences ;
- Rédiger des protocoles harmonisés pour assurer le suivi des phytotechnologies en termes de prélèvement et de constitution d'échantillons ainsi qu'en termes d'optimisation de la surveillance (allègement/renforcement du suivi) en fonction de l'évolution du site.

L'usage de renaturation ainsi que les textes à venir, dont la proposition de directive sur la surveillance des sols, sont de nature à inciter les gestionnaires de sites pollués à s'intéresser davantage aux phytotechnologies. Les résultats de projets⁷ de recherche en cours seront de nature à enrichir les RETOUR D'EXPÉRIENCE sur les services écosystémiques en contexte de gestion SSP par les phytotechnologies. De même, d'autres travaux dont les objectifs sont la détermination et la quantification d'indicateurs notamment environnementaux permettront d'alimenter cette réflexion. L'ensemble de ces travaux va contribuer à mieux préciser les objectifs de réhabilitation adaptés à l'usage de renaturation.

⁷ Projets de recherche en cours : OMISEP (Outils et Méthodologies de caractérisation des Impacts cumulés sur la Santé des Ecosystèmes et des Populations) ; REECOL (Ecological rehabilitation and long-term monitoring of post mining areas) ; EDAPHOS (Advanced mapping, risk assessment and nature-based depollution methods are combined to accelerate the recovery of contaminated soils and ensure that ecological restoration enters mainstream business) ; REVE (REqualification de sols urbains pollués par les métaux par la mise en œuvre d'un couvert Végétal : évaluation des bénéfices écologiques et sociaux).

ANNEXE

Témoignages des acteurs – analyse des atouts, faiblesses, opportunités et menaces à lever des phytotechnologies (entretiens menés entre 2019 et 2021)

NB : ces comptes-rendus synthétiques présentent la compréhension par l’Ineris du contenu des échanges ayant eu lieu pendant les interviews réalisées. En 2025, les personnes interviewées ont été de nouveau sollicitées afin de prendre en compte d’éventuelles évolutions significatives en termes de contenu et d’affiliation.

Dans le cadre de ces interviews, les interlocuteurs se sont exprimés à titre personnel, intuitu personae, et n’ont pas visé à représenter leurs organismes d’affiliation. Les points de vue exprimés ne reflètent pas nécessairement les décisions ou la politique déclarée de ces organismes.

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec P. Jacquemin (ADEME, chef de projet de réhabilitation de sites pollués, 25 janvier 2021) :**

Mr Jacquemin a été en charge du suivi des sites défaillants miniers de Salsigne (projets DIFPOLMINE, PHYTOPERF), Saint Sébastien d'Aigrefeuille et St Laurent Le Minier. Ces sites ont fait l'objet d'une mise en œuvre des phytotechnologies avec des objectifs de gestion du drainage acide ou ré-envol de poussières.

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytostabilisation aidée** qui sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité de la phytostabilisation (aidée).

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
ATOUTS - Pas de recouvrement avec des terres d'apport - Technique adaptée si pente - Existence de pépinière (ex : multiplication d'espèces métalliques). - Réduction de l'envol de poussière et du ruissellement.	FAIBLESSES - Pas d'abattement de la pollution - Manque de retour d'expérience donc de robustesse et de confiance - Réputée moins facile pour mise en œuvre et suivi que techniques conventionnelles - Pas adaptée à tout type de sol (ex : bassin de décantation) - Peut nécessiter une irrigation/accès à l'eau
OPPORTUNITES - Faire des essais à toutes les échelles comme le PCT le préconise et l'encadre. - Pas d'objectifs sur les concentrations ni les niveaux d'exposition (ex : abattement des poussières).	Menaces à lever - Nécessité d'outils règlementaires pour favoriser la prise en compte des risques environnementaux en complément des risques sanitaires (ex : loi sol). - Besoin de diversifier les compétences et l'ingénierie (ex : agricole et non terrassier ; agronomie pour augmenter les possibilités d'utilisation sur tout type de sol dont sols pauvres ou absents). - Besoin d'augmenter le nombre de prestataires compétents et spécialisés (ex : qualification/certification des professionnels). - Méconnaissance des DREAL, des professionnels et des acteurs SSP de ces techniques. - Nécessité de fixer des indicateurs de suivi avec méthodologies (ex : densité de recouvrement suivi par un drone en plus d'un suivi humain ; abattement des poussières au moyen d'un réseau de surveillance de jauges Owen ; qualité des eaux superficielles (rivière) et souterraines ; transfert dans les plantes. - Besoin de définir les débouchés pour les plantes.

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec S. SOUSSOU (Fondatrice et présidente de Fertil'Innov Environnement, 17 septembre 2021) :**

Mme Soussou est docteure en sciences et ingénieure agronome. Ses connaissances sur les pollutions (dont métaux), cultures d'espèces végétales et leur association avec les microorganismes sont mises à profit pour des projets de phytostabilisation aidée, notamment en contexte de réhabilitation de sites miniers.

Fertil'Innov Environnement a pour objectif d'améliorer la fertilité des sols (SSP, milieux agricoles, urbains et périurbains) grâce à l'association d'espèces végétales et de microorganismes.

Elle assure l'AMO pour l'ADEME pour la phytostabilisation aidée de l'ancienne mine de Saint-Laurent-Le-Minier. Elle a réalisé des essais en laboratoire et *in situ* sur parcelles dans le cadre de PCT pour valider le protocole de phytostabilisation aidée (correction des paramètres physico-chimiques du sol et sélection des espèces végétales adaptées et des microorganismes associés [biofertilisants]).

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytostabilisation aidée** qui sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)		Points négatifs (-)	
ATOUS		FAIBLESSES	
- Pas de recouvrement avec des terres d'apport - Réduction de l'envol de poussière et du ruissellement. - Préservation de la biodiversité autochtone - Création de milieu naturel/vert/pérenne - Existence de pépinière (ex : multiplication d'espèces métalliques). - Amélioration de la qualité du sol		- Travaux en période estivale en périodes de fortes chaleurs et émissions de poussières - Nécessité d'accéder à un point d'eau (arrosage pendant les travaux de préparation du sol)	
PHYTOSTABILISATION - Entretien de la couverture végétale non nécessaire (en fonction des objectifs) - Valorisation possible des végétaux après validation/certification - Existence de retour d'expérience technico-économique - Existence d'itinéraires culturels	PHYTOEXTRACTION - Non commenté	PHYTOSTABILISATION - Peut nécessiter un entretien (en fonction des objectifs) - Moindre rentabilité (<phytoextraction<technique conventionnelle)	PHYTOEXTRACTION - Manque de retour d'expérience technico-économique - Pas adaptée à tout type de sol (ex : site avec pollution polymétallique, à forte pression foncière)
OPPORTUNITES		Menaces à lever	
- Faire des essais à toutes les échelles comme le PCT le préconise et l'encadre. - Clients prêts à tester ces technologies dans le PG - Adapter aux sites sans pression foncière		- Méconnaissance des DREAL, professionnels, acteurs SSP, gestionnaires, riverains de ces techniques. - Augmenter la confiance des clients par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Identifier et quantifier les bénéfices	

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec L. THANNBERGER (Valgo, Directeur scientifique, 14 septembre 2021) :**

Valgo est une société de travaux spécialisée en dépollution des sols, avec une activité sur la réhabilitation des friches industrielles et anciennes friches. Elle propose solutions techniques innovantes à ses clients (nouvelles technologies ; nouveaux polluants) et adapte des techniques issues de la géotechnique (maîtrise des paramètres mécaniques et physico-chimiques des sols) et du traitement de l'eau au traitement de sol (polluants véhiculés par phase aqueuse).

La société a un retour d'expérience en phytoextraction assistée avec le géranium odorant (APP Eco industrie 2012/ ADEME DéplasseMétaux ; 2013-2016) : un essai a été effectué avec des pélagonium et de l'EDTA pour mobiliser les métaux et augmenter l'extraction par les plantes sur des terres polluées (Pb, Cu, Zn, Cd, As) confinées à l'aide d'un géotextile en extérieur puis en serre. Les métaux ont été lixiviés à 90% tandis que le pelargonium n'accumulait pas les polluants. A défaut d'avoir démontré que la phytoextraction assistée était possible dans ces conditions, le projet a démontré l'utilisation du pelargonium sur sol pollué pour produire des huiles essentielles (HE) dont le chimiotype est similaire à celui d'une HE commerciale.

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytoextraction** qui sont résumés dans le tableau 4.

Tableau 4. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)		Points négatifs (-)	
ATOUS		FAIBLESSES	
- Existence de très nombreuses espèces végétales et de microorganismes adaptées à la pollution métallique - Amélioration/préservation de la qualité du sol - Réduction de l'envol de poussière et du ruissellement. - Existence de pépinière (ex : multiplication d'espèces métallicoles) et d'expertise (ex : rectification des paramètres physico-chimiques des sols). - Techniques en adéquation avec le développement durable			
PHYTOSTABILISATION - Utilisation d'espèces excluant les polluants	PHYTOEXTRACTION - Non renseigné	PHYTOSTABILISATION - Souffre de l'amalgame avec la phytoextraction (mauvaise réputation en raison des durées estimées d'application) - Souffre de l'image de technique « bas de gamme » (peu technique et technologique) - Image comparable à celle d'un confinement (« polluants sous le tapis »)	PHYTOEXTRACTION - Cadre temporel non adapté (=trop long) - Mauvaise réputation (historique) - Pas de dépollution totale - Pas adapté pour un usage avec contraintes sanitaires (grille lecture risque sanitaire ; pas de valeur d'abattement)

		- Eviter l'effet dilutif des amendements (ex : >10%)	
OPPORTUNITES - Multiplier des cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience - Clients prêts à tester ces technologies dans le PG - Adapté aux sites sans pression foncière - Mise en œuvre temporaire possible - Applicable pour des usages de type espace vert (confinement végétal sur site) - Communiquer sur ces techniques biologiques (clients issus de la chimie et du bâtiment) - Tension sur le marché des terres végétales (levier pour une utilisation accrue des phytotechnologies) - Améliorer l'image auprès des industriels - Complémentarité avec les techniques conventionnelles et dans les aménagements (ex : zones avec phytotechnologies) - Inclure l'environnement dans la grille de lecture des techniques - Accroissement des compétences des pépiniéristes (ex : maîtrise plantation racines nues ; maîtrise du végétal) - Pas de surface minimale - Pas de difficulté à afficher des coûts (fourchette comme techniques conventionnelles) - Besoin de formation/d'éducation de tous les acteurs de la société dont riverains		Menaces à lever - Augmenter les retours d'expérience industriels (ex : projets non subventionnés par la recherche) - Comparer dans le rapport Ineris 2019 plus finement les techniques conventionnelles avec la phytostabilisation (aidée)/phytoextraction (ex : confinement sous plantes vs confinement sous membrane ; phytostabilisation vs stabilisation par liant hydraulique et réactifs de réduction) - Montée en compétence des acteurs - Nécessité de fixer des indicateurs de suivi des traitements - Définir des protocoles par phytotechnologie (espèce ; amendement ; valorisation) - Méconnaissance des DREAL, professionnels, acteurs SSP, gestionnaires, riverains de ces techniques. - Augmenter la confiance des clients par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Identifier et quantifier les bénéfices environnementaux - Proposer une autre grille de lecture que les risques sanitaires (ex : services écosystémiques) - Vivant non maîtrisé donc risqué (responsabilité – incertitude du vivant : comment traduire cela dans un contrat avec le client ?) - Définir des usages pour lesquels le temps n'est pas une contrainte (collectivité plus contrainte qu'industriel, cadre temporel des phytotechnologies supérieur à la durée des mandats) - Aller contre les habitudes des professionnels, basées sur la simplicité (ex : apport de terre végétale) - Augmenter les échanges avec des BE autres que dépollution pour construire l'interface sur végétal/sol/amendement (ex : collaboration, prestataire)	

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec J. LAURETTE (TerraInnova, chargé R&D et innovation, transfert sol-plante contaminants et écotoxicologie, 16 septembre 2021) :**

TerraInnova est une entreprise de valorisation des terres excavées issues des chantiers en milieu agricole et aménagements paysagers (talus). Les terres utilisées sont majoritairement non polluées. Son activité sur la renaturation de sols et de friches (création de sols et itinéraire cultural) et de mise en œuvre des phytotechnologies est émergente. L'entreprise est sollicitée depuis 2020 sur des AO dans lesquels des travaux sur les phytotechnologies sont demandés (collectivités).

Elle œuvre en appui à des professionnels de dépollution (HPC Envirotec ; Suez) pour répondre à des AO sur les phytotechnologies car elle a des connaissances complémentaires et compétences transverses (agronomie – fertilité/environnement ; paysage ; transferts de contaminants sol-plante ; ingénieurs de travaux publics ; conseil en fertilité biologique et outillage agricole).

Son retour d'expérience sur les phytotechnologies est le suivant :

- Réponse à AO avec plateforme phytotechnologies sur terres rapportées faiblement contaminées (Pb, Zn, Cd ; HCT et HAP) (phytostabilisation pour merlon paysager esthétique autour du site et phytorhizodégradation). Espèces d'arbres (ex : saules ; pas de fruitier/comestible) et éléments d'itinéraires techniques imposées (ex : composts ; couverture végétale dense) dans le cadre d'un CCTP (cahier des clauses techniques particulières) fait par un BE SSP. Réflexion sur l'agronomie du substrat en plus de celle sur la pollution. Essais sur site dans le cadre du PCT (500-1000m³ ; 2 ans reproductibles 2 ans). Volonté du MO de tester ces techniques pour optimiser la gestion des terres et gérer une partie des terres sur site, tout en évitant leur envoi en ISD (Installation de stockage de déchets dangereux) ou ISDND (Installation de stockage de déchets non dangereux) et de ramener des terres végétales, et pour une question d'économie de coût. Suivi bisannuel pour la phytomasse et des essais sur 2 et 4 ans pour s'assurer de la suppression des voies d'exposition liées aux poussières via une couverture végétale suffisante.

- Réponse à une demande d'agriculteur pour gérer la pollution de terres d'apport issues d'une entreprise de BTP, avec si possible une solution qui évite leur envoi en ISD ou ISDND pour une question d'économie de coût (9000m³, 3ha). Pollution (Pb, Zn, Cu ; phosphates ; HCT et HAP). TerraInnova a proposé une culture non alimentaire à base de luzerne + graminée (travaux agricoles et suivi de la pollution dans les sols et la phytomasse végétale) sur les terres d'apport faiblement contaminées étalées sur la parcelle agricole et une valorisation en méthanisation si les résultats d'analyse sont conformes. La DRIEAT île de France a accepté la proposition. Après plusieurs cycles culturaux, une culture alimentaire pourra être réalisée sur le site agricole si les résultats d'analyse sont conformes aux normes alimentaires (DRAAF).

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytostabilisation aidée et de la phytoextraction** qui sont résumés dans le tableau 5.

Tableau 5. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)		Points négatifs (-)	
ATOUS - Existence de nombreuses espèces végétales adaptées à la pollution - Amélioration/préservation de la qualité du sol - Conservation d'un sol vivant - Utilisation de MO du site (pas d'export de la phytomasse) - Réduction de l'envol de poussière et du ruissellement. - Pas de recouvrement avec des terres d'apport - Création d'aménagement paysager - Technique de gestion des terres sur site - Adaptée aux pollutions non concentrées - Evite la mise en ISD /ISDND des terres - Pas de difficulté à afficher des coûts (mise en œuvre et suivi)		FAIBLESSES - Nécessite une surface minimale - Pas adaptée si pression foncière - Nécessite de prendre en compte la problématique ravageurs - Prévoir des essais sur une saison (1 an)	
PHYTOSTABILISATION - Utilisation d'espèces excluant les polluants	PHYTOEXTRACTION - Bonne image (technique attractive ; perception positive riverain et collectivité) - Co-culture plantes accumulatrices et potagères	PHYTOSTABILISATION - Eviter l'effet dilutif des amendements (ex : >10%)	PHYTOEXTRACTION - Pas opérationnelle - Complexe et technique - Limitation à quelques polluants - Suivi contraignant (long ; phytomasse)
OPPORTUNITES - Multiplier des cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience - Clients prêts à tester ces technologies - Adapté aux sites sans pression foncière - Nécessité de protocole d'échantillonnage des espèces végétales - Co-culture de végétaux (ex : alimentaire et non-alimentaire) - Nécessité de compétences transverses - Techniques innovantes - Valorisation de la phytomasse produite après analyse/comparaison aux normes existantes (compost ; méthanisation) - Réutilisation du produit fini sur site (compost) - Préserver/rétablir la biodiversité et les services écosystémiques - Adaptées pour gros volumes de terres faiblement contaminées (techniques conventionnelles non compétitives)		Menaces à lever - Difficulté à trouver des laboratoires privés faisant les mesures de mobilité dans le sol (ex : par défaut EDTA) et dans les végétaux en routine avec bonne précision et prix raisonnable - Nécessité de quantifier les avantages des phytotechnologies - Proposer une autre grille de lecture que le sanitaire (ex : services écosystémiques) - Définir des usages pour lesquels le temps n'est pas une contrainte (collectivité plus contrainte qu'industriel) - Nécessité de définir davantage de filières de valorisation de la phytomasse produite - Développer des retours d'expérience sur la phytostabilisation assistée avec des consortiums microbiens (bactéries, champignons) - Besoin de formation des acteurs (ex : pépiniériste, paysagiste)	

- **Compte-rendu de l'entretien avec G. Lemoine (EPF HDF, Référent biodiversité et ingénierie écologique, 21 septembre 2021 – en 2025, Chargé de développement foncier et référent biodiversité, groupe CET) :**

Mr Lemoine est botaniste et écologue généraliste, spécialiste des espèces végétales des pelouses métallicoles du Nord et du Pas-de-Calais. Il est à l'initiative du projet concernant le parc Péru (Auby, 59) (Photos ci-après). Il accompagne les programmes de R&D en mettant à disposition du foncier « pollué » pour des expérimentations (nombreux projets ADEME). Il est convaincu par l'intérêt d'utiliser les phytotechnologies.



Il a été co-animateur du projet MISCHAR (<https://expertises.ademe.fr/content/mischar-refonctionalisation-sols-multicontamines-moyen-dun-biochar-miscanthus-viabilite-ecologique-interet-socio-economique-modes-gestion-milieus-agricole-urbain>) et accompagne d'autres projets R&D (ex : Tripode; NewCLand; Phytopop/Proliphyt ; REECOL, etc.). Il est prêt à tester les phytotechnologies sur un foncier appartenant à l'EPF et à ECT, en fonction des opportunités (ex : friche polluée par les organiques en attente de projet ; ouverture du public envisagée ; jardin de démonstration des phytotechnologies). Il a réalisé des tests de cultures alimentaires et non alimentaires en appui à des entreprises du paysage. Il participe à la réflexion sur l'utilisation des phytotechnologies dans le GT Friches et à la restauration des sols et à la renaturation des friches (Lifti, Rnest, ...).

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application des phytotechnologies qui sont résumés dans le tableau 6.

Tableau 6. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
ATOUS - Existence de nombreuses espèces végétales adaptées à la pollution - Amélioration/préservation de la qualité du sol - Conservation d'un sol vivant - Augmentation du cadre de vie des riverains - Technique de gestion des terres sur site - Réduction des risques - Valorisation de terres « impropres » - Valorisation temporaire (ex : en attente de projet immobilier) ou définitive des sols - Outils adaptés pour lutter contre la zéro artificialisation nette des sols - Création d'espaces naturels ou de production (phytomasse)	FAIBLESSES - Pas adaptée si pression foncière (ex : faible temporalité / disponibilité courte) - Nombre d'experts insuffisant - Souffre de l'image de technique « bas de gamme, trop facile et peu chère » - Cadre temporel non adapté au fonctionnement des collectivités qui préfèrent les dépenses d'«investissements» (temps courts). Le temps nécessaire est souvent supérieur à la durée des mandats ce qui peut générer des incertitudes budgétaires et de lignes de crédits. - Absence de certitude sur le maintien des équipes de gestion et de suivi dans le temps (ex : changement de propriétaire, maître d'œuvre et d'ouvrage ; réponse aux AO)
OPPORTUNITES - Multiplier les cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience - Adapté aux sites sans pression foncière - Possibilité de mettre autour des projets plus d'experts de nombreuses disciplines - Création de groupes d'échange entre acteurs (ex : experts, BE, aménageurs public et privés, collectivités, services de l'Etat et établissements publics) - Techniques innovantes - Préserver/rétablir la biodiversité, les fonctions écologiques et les services écosystémiques - Communication sur les opportunités et avantages des phytotechnologies par rapport aux techniques conventionnelles - Sélection d'espèces végétales pertinentes à partir d'espèces présentes sur site avant-projet (ex : garantie de succès)	Menaces à lever - Proposer une autre grille de lecture que le sanitaire (ex : services écosystémiques, fonctions écologiques) - Besoin de formation des acteurs (ex : pépiniériste, paysagistes) - Lever les freins culturels et sociétaux (accepter les « low » technologies) - Vivant non maîtrisé donc risqué (responsabilité – incertitude du vivant) - Augmenter la confiance des utilisateurs par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Besoin de garanties sur le long terme - Besoin d'accompagnement des politiques publiques - Besoin de communication entre acteurs (ex : groupe d'échanges)

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec L. Mansuelle (Serpoll-Serfim Dépollution BE SSP, Responsable Pôle technique, 24 septembre 2021- En 2025, Expert Technique SSP)**

Mr Mansuelle pilote la centralisation du retour d'expérience technique des agences de Serpol en France et à l'étranger et est impliqué dans la formation technique interne.

Le retour d'expérience de Serpol est 100% centré sur les organiques (phytorhizodégradation des hydrocarbures). Il intervient dans des projets R&D avec pollution mixte organique-métaux (ex : HAP-As ; phytorhizodégradation -mycoremédiation-stimulation électrique des microorganismes ; PCB ; phytorhizodégradation -mycoremédiation) et regarde l'effet des espèces végétales sur les métaux.

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytorhizodégradation** qui sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
ATOUTS - Techniques bas carbone, écologique - Pas de recouvrement avec des terres d'apport - Réduction de l'envol de poussière et du ruissellement. - Valorisation temporaire ou définitive des sols - Adapté aux pollutions non concentrées - Limitation de plante invasive - Valorisation possible des phytomasses (ex : combustible de substitution) et/ou du foncier (ex : synergie phytotechnologie et production d'énergie renouvelable) - Pas de difficulté à afficher des coûts (mise en œuvre et suivi)	FAIBLESSES - Recul pas suffisant - Retours d'expérience existants très récents - MO pas prêts à essayer ces techniques - Temps long (ex : durée d'acquisition des données et retour d'expérience ; essais PCT) - Pas d'engagement possible sur des délais et des niveaux d'abattement - Nécessité de maintenir en place une couverture végétale de 100% sur le long terme (ex : complexité quand hétérogénéité) - Efficacité non linéaire (ex : extrapolation des résultats de quelques mois à plusieurs années ?) - Pas adaptée si pression foncière
OPPORTUNITES - Multiplier les cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience et alimenter le bilan coût-avantage - Permet d'aller au-delà d'une dépollution (économie circulaire/valorisation) - Compenser le coût de gestion de la pollution par la valorisation - Techniques innovantes - Pour la phytorhizodégradation des polluants organiques de type carburant (HCT), engagement sur objectifs à atteindre en termes de concentrations résiduelles de fractions d'hydrocarbures et de durée	Menaces à lever - Besoin de formation des acteurs (ex : éviter l'amalgame phytostabilisation/phytoextraction) - Nécessité d'acquisition de connaissances (compréhension des mécanismes ; pourquoi et comment ça marche ?) - Vivant non maîtrisé donc risqué (responsabilité – incertitude du vivant) - Nécessité de fixer des indicateurs de suivi avec méthodologies pour quantifier la réduction des risques et garantir l'efficacité (ex : comment définir le recouvrement végétal à 100% et garantir que le 100% évite l'envol de poussière si enjeux à proximité du site ?) - Augmenter la confiance des utilisateurs par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Besoin de garanties sur le long terme - Nécessité de définir des contextes d'utilisation des phytotechnologies (ex : plus les enjeux sanitaires sont importants à proximité du site et moins les MO prendront le risque d'utiliser les phytotechnologies) - Définir les aléas (ex : climatique, élévation de nappe) et les conséquences - Besoin d'accompagnement des politiques publiques (ex : guide – notion de couverture végétale unique)

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec S. Kaskassian (Tauw France BE SSP, Expert sites pollués et responsable innovation technique, 27 septembre 2021)**

Mr Kaskassian a pour mission de faire émerger des projets innovants. Tauw France est un BE SSP avec des compétences agro-écologiques et souhaite être présent sur les enjeux environnementaux en synergie avec les SSP.

Tauw France a un retour d'expérience sur la phytorhizodégradation des hydrocarbures dont HCT et BTEX. Le BE a utilisé de la luzerne et du maïs avec des amendements (mycorhize, compost) en andains et a comparé avec des andains non végétalisés. La DREAL a été convaincue par les analyses effectuées sur les transferts de polluants lors du PCT (pas d'envol de poussière ; peu de transfert ; pas de lessivage vers la nappe). L'objectif était de rendre l'usage agricole (culture de maïs) au site après phytorhizodégradation, ce qui a nécessité des discussions avec la DREAL. Le BE a également un retour d'expérience avec des saules et des peupliers pour le traitement de panache d'hydrocarbures dans les eaux superficielles.

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytorhizodégradation** qui sont résumés dans le tableau 8.

Tableau 8. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
FORCE - Augmentation de la biodiversité - Pas de recouvrement avec des terres d'apport - Réduction de l'envol de poussière, du ruissellement et du contact direct. - Adapté aux sols très pollués, de grande surface, « historiques » - Valorisation possible des phytomasses (ex : combustible de substitution) et/ou du foncier (ex : synergie phytotechnologie et production d'énergie renouvelable) - Valorisation temporaire (ex : en attente de projet immobilier) ou définitive des sols - Pas de difficulté à afficher des coûts (mise en œuvre et suivi) - Création d'aménagement paysager - Techniques « modulables » adaptées pour diverses formes et superficies (ex : bandes de terre autour de bâtiments)	FAIBLESSE - Temps long (ex : durée d'acquisition des données et retour d'expérience ; essais PCT) - Pas adaptée si pression foncière - Manque de retour d'expérience - Apparaît complexe (traçabilité- responsabilité – effet levier superficie – coût/bénéfice ; contraintes vs gain)
OPPORTUNITE - Multiplier les cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience et alimenter le bilan coût-avantage (ex : pollution modérée, aménagement paysager) - Techniques innovantes - Dimensionnement de l'analyse économique en fonction des retours d'expérience à venir	Menaces à lever - Besoin de formation des acteurs (ex : promoteur, aménageur, architecte, paysagiste, BE, DREAL...) - Nécessité d'acquisition de connaissances (compréhension des mécanismes ; pourquoi et comment ça marche ? cinétiques ? profondeurs ? remobilisation des polluants ?) - Vivant non maîtrisé donc risqué (responsabilité – incertitude du vivant ; comment traduire cela dans un contrat avec le client ?) - Augmenter la confiance des utilisateurs par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Besoin de garanties sur le long terme (ex : transferts ?) - Nécessité de définir des contextes d'utilisation des phytotechnologies - Définir les aléas (ex : climatique, élévation de nappe) et les conséquences (ex : risques technique, économique et juridique) - Nécessité de consolider le bilan financier (ex : phytotechnologies vraiment moins chères que excavation/envoi en filière ?) - Besoin de définir les débouchés pour les plantes en fonction de leur statut (ex : déchet ?) - Définir des filières adaptées à un ensemble de sites (ex : gisement, rendement financier) - Adapter l'analyse des risques pour le phytomanagement (ex : adéquation des concentrations de polluants dans les phytomasses au regard de leur devenir) - Nécessité de retour d'expérience en cas d'apparition de plante invasive/protégée - Aller contre les habitudes des professionnels, basées sur la simplicité et la réduction des incertitudes (ex : apport de terre végétale)

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec M. Lecourt (FCBA, Chef de projet / Chargé de profession Fibres – Chimie du végétal, 27 septembre 2021)**

Mr Lecourt est en charge de la valorisation des ressources forestières (bois= matière valorisée) et de l'optimisation des procédés (ex : fabrication de pâtes et de panneaux process, transformation de fibres). Il est également chargé de profession sur la chimie du bois et l'exploitation des molécules présentes dans le bois (activité commerciale). Il a coordonné le projet Phytofiber (projet APR Graine ADEME) dans lequel il a testé la partie aval (options de valorisation des phytomasses). Il trouve les phytotechnologies très prometteuses.

Le FCBA a un retour d'expérience concernant la valorisation des phytomasses issues de sols pollués par les ETM via des projets R&D (ex : phytostabilisation aidée avec peupliers peu accumulateurs pour utilisation en panneaux et co-culture avec ortie pour fibre). Le projet Phytofiber a été le premier projet à avoir testé une valorisation autre qu'énergétique. L'intérêt d'une implication dans ces travaux s'inscrit dans le contexte de pénurie de matière et de recherche de nouveaux gisements sur de nouvelles surfaces. Les sols pollués, qui ne sont pas en compétition avec les surfaces agricoles, s'ils répondent aux critères de rentabilité des exploitants du bois, peuvent constituer une part de ces nouvelles surfaces (accessibles, plats, bords de route).

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytostabilisation aidée** qui sont résumés dans le tableau 9.

Tableau 9. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
ATOUTS - Existence de nombreuses espèces végétales adaptées à la pollution - Utilisation d'espèces excluant les polluants ou non-accumulatrices (scenario protecteur) - Possibilité de faire de l'agro-écologie - Technique bas carbone, écologique - Réduction de l'envol de poussière, du ruissellement et du contact direct. - Valorisation possible des phytomasses (ex : combustible et matériaux) et/ou du foncier (ex : synergie phytotechnologie et production de bois énergie-matériaux) - Valorisation temporaire (ex : en attente de projet immobilier) ou définitive des sols - Existence de retour d'expérience technique sur filière matériaux et énergie (ex : en termes de concentrations des polluants et des performances des matériaux/combustibles) - Compatibilité avec contraintes sur matières premières et produits finis (ex : cartographie étape par étape des procédés) - Existence de retour d'expérience économique et ACV	FAIBLESSES - Gestion des stocks intermédiaires et conséquences financières (surcoûts) - Déplacement des contaminations avec machines roulantes (ex : sol, arbre, écorce)
OPPORTUNITES - Multiplier les cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience, alimenter le bilan coût-avantage et l'ACV - Valorisation des phytomasses en produits manufacturés (ex: matériaux de construction, d'isolement, d'ameublement) - Règlementation thermique dans les bâtiments neufs (RE 2020 avec seuils énergie/carbone) - Bénéfice en terme d'impact carbone si durée d'usage plus longue – matériaux vs combustion) - Prévoir des pratiques évitant les transferts de contamination (ex : sites de stockage sur site, lavage des stocks et des machines, écorçage) - Durée des phytotechnologies adaptée à l'usage d'exploitation forestière des sols avec des plantations d'arbres (ex : TCR avec coupe tous les 7 ans sur 21 ans et co-culture pour augmenter la rentabilité)	Menaces à lever - Augmenter la confiance des utilisateurs par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Besoin de garanties sur le long terme (ex : transferts ?) - Besoin de définir les débouchés pour les plantes (ex : usage produits manufacturés) - Besoin de définir le statut des phytomasses issues de sols pollués (déchet vs biomasse ?) - Besoin de définir les modalités d'achat et de vente de ces biomasses en fonction de leur statut (ex : un industriel ne peut acheter que du déchet à un autre industriel et pas du bois) - Besoin d'accompagnement des politiques publiques (ex : utilisation des ressources de sol pollué dans l'industrie du panneau ; menaces réglementaires et juridiques)

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec V. Huber (Ginger-Burgéap BE SSP, ingénieur projet R&D, 30 septembre 2021)**

Mr Huber est ingénieur SSP avec une compétence EQRS et une formation en maraîchage.

Ginger-Burgeap a participé au projet BioSaine (APR Graine de l'ADEME) dont l'objectif était le traitement des pollutions en ETM, HCT et HAP avec un TTCR pour une valorisation en combustion. Le BE a un retour d'expérience sur des systèmes plantés (lagunage) et est intéressé par les phytotechnologies pour répondre à la demande des collectivités et du monde agricole (agriculture urbaine, valorisation des fonctions du sol en contexte SSP, etc.).

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application des **phytotechnologies** qui sont résumés dans le tableau 10.

Tableau 10. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
ATOUTS - Réduction de l'envol de poussière, du ruissellement et du contact direct. - Amélioration/préservation de la qualité et des fonctions du sol - Création d'aménagement paysager	FAIBLESSES - Temps long (ex : durée d'acquisition des données et retour d'expérience ; essais PCT) - Pas adaptée si pression foncière - Manque de retour d'expérience
OPPORTUNITES - Essais réalisés dans le PCT pour diminuer les incertitudes - Objectif double de gestion de la pollution et de création d'aménagement paysager - Multiplier les cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience et alimenter le bilan coût-avantage (ex : aménagement paysager, agriculture urbaine) - Techniques innovantes	Menaces à lever - Besoin de formation des acteurs (ex : promoteur, aménageur, architecte, paysagiste, BE, DREAL...) - Nécessité d'acquisition de connaissances (compréhension des mécanismes ; pourquoi et comment ça marche ? cinétiques ? profondeurs ? remobilisation des polluants ? impact agronomique ?) - Vivant non maîtrisé donc risqué (responsabilité – incertitude du vivant ; comment traduire cela dans un contrat avec le client ?) - Nécessité de fixer des indicateurs de suivi avec méthodologies pour quantifier la réduction des risques et garantir l'efficacité (ex : comment définir le recouvrement végétal à 100% et garantir que le 100% évite l'envol de poussière si enjeux à proximité du site ?) - Besoin d'accompagnement des politiques publiques (ex : guide – notion de couverture végétale unique) - Nécessité de définir des contextes d'utilisation des phytotechnologies - Aller contre les habitudes des professionnels, basées sur la simplicité et la réduction des incertitudes (ex : techniques avérées car obligation de résultats) - Proposer une autre grille de lecture que le sanitaire (ex : services écosystémiques, fonctions écologiques)

➤ **Compte-rendu de l'entretien avec E. Dhainaut (EPFL de la Savoie, chargée de gestion patrimoine, 5 octobre 2021)**

Ingénieure en environnement, Mme Dhainaut a travaillé en BE SSP. L'EPFL est en en charge du portage foncier sur un temps court (8 ans maximum) et Mme Dhainaut au sein de l'EPFL est en charge du proto-aménagement (ex : dépollution des sols) pour la collectivité pour laquelle l'EPFL porte le terrain.

L'EPFL de la Savoie a réalisé avec succès la phytorhizodégradation avec la luzerne d'un site pollué à l'essence (station-service) à Chambéry (faible volume de terre, hydrocarbures légers <C18). Les andains avec une pollution modérée ont été végétalisés et suivis pendant 18 mois. Les terres dépolluées ont été utilisées pour les espaces verts autour du bâtiment. La luzerne non exportée a été compostée sur place. L'abattement visé a été atteint et est en compatibilité avec l'évaluation sanitaire pour les usages envisagés. L'aménagement prévoyait une crèche (étage), un parking (niveau sous-sol), des bureaux et logements [voir l'exemple 5 en page21 §2.2 Un retour d'expérience cumulé en France].

L'entretien a permis de formuler des points positifs et de négatifs pour l'application de la **phytorhizodégradation** qui sont résumés dans le tableau 11.

Tableau 11. Résumé des points positifs (atouts, opportunités) et des point négatifs (difficultés rencontrées, menaces à lever) pour l'applicabilité des phytotechnologies.

Points positifs (+)	Points négatifs (-)
ATOUS - Augmentation du bien-être des riverains et de l'image du chantier (ex : esthétique) - Technique de gestion des terres sur site - Technique écologique, bas carbone (ex : pas de camion) - Valorisation temporaire (ex : en attente de projet immobilier) ou définitive des sols - Pas de difficulté à afficher des coûts (mise en œuvre et suivi) - Création d'aménagement paysager - Existence de BE proposant les phytotechnologies - Techniques « modulables » adaptées pour diverses formes et superficies (ex : bandes de terre autour de bâtiments)	FAIBLESSES - Pas adaptée si pression foncière - Temps long (ex : durée d'acquisition des données et retour d'expérience ; essais PCT) - Manque de retour d'expérience - Technique dépendante de la saisonnalité (printemps vs hiver) - Apparaît complexe (traçabilité- responsabilité) - Nécessité d'accéder à un point d'eau (arrosage des végétaux)
OPPORTUNITES - Esthétique et bien-être des riverains (ex : facteur d'importance pour les élus) - Valorisation de sites lors de « temps morts » (ex : entre projets, changement de propriétaire, retard...) - Réutilisation des terres traitées sur un espace attenant - Communication/explication pour vulgariser ces techniques (ex : expliquer pour adhésion des riverains et des élus) - Multiplier les cas d'étude pour augmenter le retour d'expérience et alimenter le bilan coût-avantage (ex : pollution modérée, aménagement paysager) - Techniques innovantes - Construire (ex : logement) et gérer la pollution en parallèle (ex : espace vert)	Menaces à lever - Besoin de formation des acteurs (ex : promoteur, aménageur, architecte, paysagiste, BE, DREAL, ARS, élus...) - Vivant non maîtrisé (responsabilité – incertitude du vivant ; comment traduire cela dans un contrat avec le client ?) - Augmenter la confiance des utilisateurs par l'existence de retour d'expérience technico-économique - Définir les aléas (ex : climatique, élévation de nappe) et les conséquences (ex : risques technique, économique et juridique)

