



(ID Modèle = 454913)

Ineris-19-180756-1814948-v1.0

18/12/2019

Applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des pollutions des sols

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 équivalents 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 : Karen PERRONNET - BERT VALERIE

Vérification : Nathalie VELLY- GAUCHER RODOLPHE

Approbation : RAMEL MARTINE - le 18/12/2019

Table des matières

1	Phytomanagement et phytotechnologies	5
1.1	Définition et approches disponibles.....	5
1.2	Phytotechnologies – descriptif, objectif et performance	6
1.3	Retour d’expérience en France et à l’étranger	7
2	Plan de gestion – applicabilité des phytotechnologies.....	8
2.1	Cadre du plan de gestion	8
2.2	Contexte du plan de gestion appliqué aux phytotechnologies– cas fictif.....	8
2.3	Schéma conceptuel – cas fictif.....	9
2.4	Plan de gestion – étape par étape	9
2.5	Plan de gestion appliqué aux phytotechnologies – identification des freins	17
2.6	Focus sur le bilan coût-avantage	18
2.7	Proposition de plan de surveillance associé aux phytotechnologies	24
3	Synthèse et Perspectives.....	25
3.1	Synthèse quant à l’applicabilité des phytotechnologies dans la gestion des sols pollués	25
3.2	Conclusion et perspectives	26

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 des 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.

Sur la base des connaissances développées depuis plus de 10 ans à travers ses projets de recherche consacrés aux phytotechnologies, des travaux ont été menés par l'Ineris dans le cadre de ses missions d'appui à la gestion des sites et sols pollués auprès du ministère chargé de l'environnement pour :

- Identifier et analyser les freins à la mise en œuvre des phytotechnologies dans le cadre des bonnes pratiques définies par les guides relatifs à la gestion des sites et sols pollués ;
- Aider à définir des prescriptions réglementaires encadrant les objectifs à atteindre, la surveillance des milieux et les filières de valorisation lors de la mise en œuvre des phytotechnologies.

Pour cela, un cas fictif de plan de gestion est déroulé dans lequel les phytotechnologies sont intégrées en tant que techniques alternatives, au même titre que les techniques conventionnelles telles que l'excavation, le lavage ou le confinement. Toutes les étapes du plan de gestion sont traitées en mettant en regard les pratiques et les limites techniques des phytotechnologies, ainsi que les freins à leur utilisation dans la gestion des sites et sols pollués.

Cet exercice a été appliqué au cadre de gestion des sols pollués des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) et des aménagements urbains/réhabilitations (hors cadre ICPE) présentant des pollutions métalliques et/ou organiques, pour lesquelles des plans de gestion peuvent être réalisés.

L'application des phytotechnologies à des terres excavées et évacuées hors site ou à des terres regroupées dans le périmètre d'un projet de réhabilitation méritera d'être étudiée ultérieurement en l'absence de cadre réglementaire spécifique à ces deux situations. Elle n'est pas développée dans la présente note.

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, Verneuil-en-Halatte : Ineris-19-180756-1814948-v1.018/12/2019.

Mots-clés :

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

1 Phytomanagement et phytotechnologies

1.1 Définition et approches disponibles

Le phytomanagement comprend d'une part la gestion des sols pollués par les espèces végétales, 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
- 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 biomasse non alimentaire).

Les **phytotechnologies** regroupent un ensemble de techniques qui utilisent *in situ* des **espèces végétales** pour contenir, extraire ou dégrader des **polluants** inorganiques ou organiques.

Jugées a priori plus conformes aux enjeux du développement durable que les techniques classiques de traitement sur site et hors site, elles ont pour objectif **d'améliorer** les fonctions et la structure du sol. Ces techniques constituent une **alternative** ou un complément aux techniques conventionnelles dans le cas notamment de surfaces polluées importantes. (Bert et al. 2017).

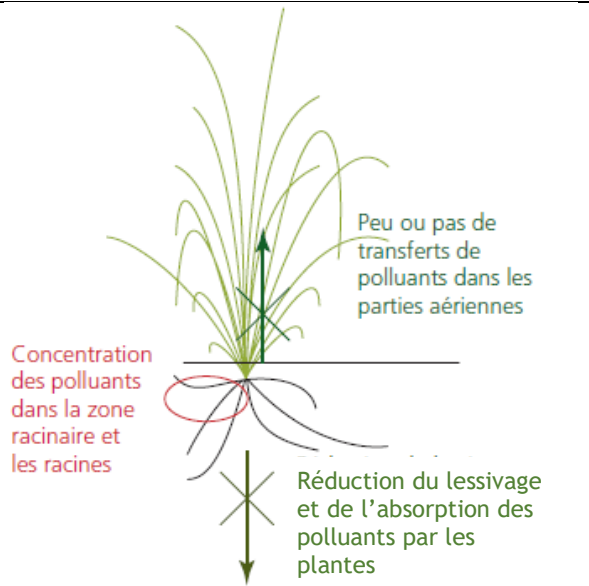
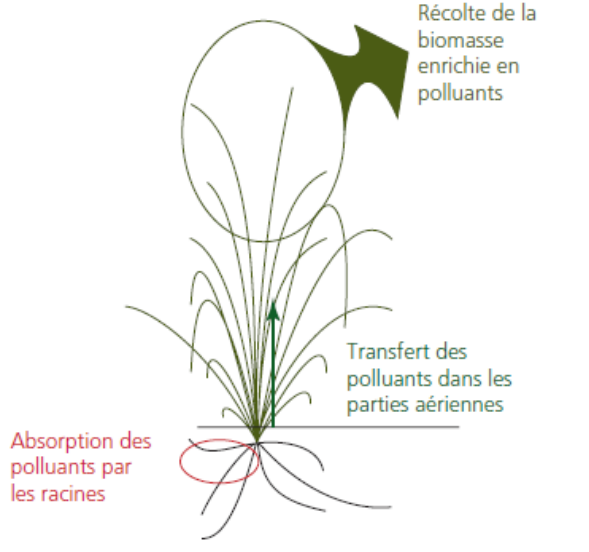
Les phytotechnologies sont perçues comme des techniques de réhabilitation « douces ».

Pour la gestion des terres 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 éléments traces métalliques 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 les éléments traces dans leurs parties aériennes récoltables, permettent de réduire les concentrations de polluant dans les sols, et ainsi contribuent à leur dépollution. Celle-ci n'est cependant que partielle car elle ne concerne que la fraction phytodisponible de polluant, c'est-à-dire la fraction de polluant susceptible d'être assimilée par les espèces végétales mises en œuvre.

Le phytomanagement apparaît pertinent pour gérer des pollutions résiduelles diffuses présentes sur de grandes superficies, dans les situations où les techniques conventionnelles affichent leurs limites technico-économiques.

1.2 Phytotechnologies – descriptif, objectif et performance

<p>Phytostabilisation (aidée) :</p> <p>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.</p> <p>La biomasse 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 biomasse soit récoltée et valorisée dans le cadre, par exemple, de la filière bois-énergie ou d'une filière industrielle non alimentaire.</p>	
<p>Objectifs de la technique : Maîtrise des impacts environnementaux et sanitaires</p>	
<p>Paramètres de performance mesurés :</p> <ul style="list-style-type: none"> - 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) 	
<p>Phytoextraction :</p> <p>La phytoextraction est une technique <i>in situ</i> de dépollution 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 et feuilles). La biomasse aérienne produite doit ensuite être récoltée afin de retirer définitivement du site les polluants ainsi extraits. Le traitement de cette biomasse enrichie en polluants fait l'objet de recherches (bioraffinerie, bioplastiques, huiles essentielles, éco-catalyseurs...).</p>	
<p>Objectifs de la technique : Maîtrise et réduction des sources de pollution ; maîtrise des impacts</p>	
<p>Paramètres de performance mesurés - La quantité d'éléments traces extraite annuellement par la plante par unité de surface (<i>en kg de métal /ha /an</i>)</p>	

1.3 Retour d'expérience en France et à l'étranger

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

- l'un, de nature plutôt fondamentale, vise à acquérir des connaissances sur les mécanismes de tolérance et d'accumulation des plantes candidates en phytotechnologies pour connaître, voire améliorer, leur capacité à tolérer, à immobiliser ou à extraire les polluants (phytoextraction);
- l'autre, plus appliqué, vise à mettre en œuvre et à optimiser les itinéraires techniques (du semis à la récolte) et les filières de valorisation de la biomasse collectée pour que la gestion des pollutions par les phytotechnologies soit un cycle vertueux complet.

L'Ineris a orienté son action selon ce second axe de recherche via la mise en place d'expérimentations *in situ* à l'échelle de la parcelle et du territoire. Les objectifs poursuivis sont :

- d'évaluer les enjeux associés au phytomanagement en termes de maîtrise des risques environnementaux et sanitaires marqués par la temporalité propre à ces projets (gestion sur le long terme);
- d'accompagner la levée des verrous technico-économiques et réglementaires.

Trois exemples de cas d'application des phytotechnologies au contexte français peuvent être cités :

- Intégration des phytotechnologies en milieu urbain et production de biomasse enrichie en zinc par phytoextraction pour l'écocatalyse (projets PHYTOAGGLO et EXTRA-Zn) : Ces deux projets, portés par l'Ineris en collaboration avec l'agglomération Creil Sud Oise (ACSO) et la ville de Montataire et soutenus par l'ADEME depuis 2013, visent à concilier renouvellement urbain, dans une démarche de ville durable, et valorisation des friches en redonnant une nouvelle vie 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 et la mise en décharge systématique des terres polluées.
- Etude de deux modalités de phytostabilisation aidée sur un terrain de gestion de sédiments pollués par les métaux (projets PHYTOSED 2, BIOFILTEREE et DEMOPHYTO) : Depuis 2011, l'Ineris étudie cette technique sur 2 ha en partenariat avec l'université de Franche-Comté et le concours de Voies Navigables de France (VNF), l'ADEME et l'Agence Nationale de la Recherche. L'objectif est d'améliorer les itinéraires techniques et 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 biomasse récoltée, la valorisation des sites anciens de gestion de sédiment étant un enjeu fort pour VNF.
- Production d'huiles essentielles : une filière éco-innovante de reconversion des sols historiquement pollués (projet PhytEO) : Depuis 2017, l'Ineris étudie la faisabilité du phytomanagement sur des sols agricoles pollués par les métaux à l'aide de plantes à parfum aromatiques et médicinales, dans le cadre de la production d'huiles essentielles. Ce projet coordonné par l'Université du Littoral et soutenu par l'ADEME vise à apporter des réponses quant à la maîtrise des polluants tout au long de la filière et à faire des recommandations concernant la sélection d'espèces pour cette valorisation.

Pour aller plus loin :

1 / Dossier thématique :

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

2/ Guide « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : nouveaux résultats de recherche et démonstration », 2017 :

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

3/ Guide « Les phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués : état de l'art et guide de mise en œuvre », 2012 :

<http://www.ineris.fr/propos-ineris/qui-sommes-nous/actualites/phytotechnologies-appliquees-aux-sites-sols-pollues/166063>

2 Plan de gestion – applicabilité des phytotechnologies

2.1 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 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.

La gestion d'un site à réhabiliter implique plusieurs acteurs tels que le donneur d'ordre (exploitant ICPE ou non, propriétaire ou aménageur du terrain), les prestataires assurant les études environnementales, les autorités (instruction du dossier par la préfecture, avis des services compétents), les populations, les élus et les associations de protection de l'environnement.

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

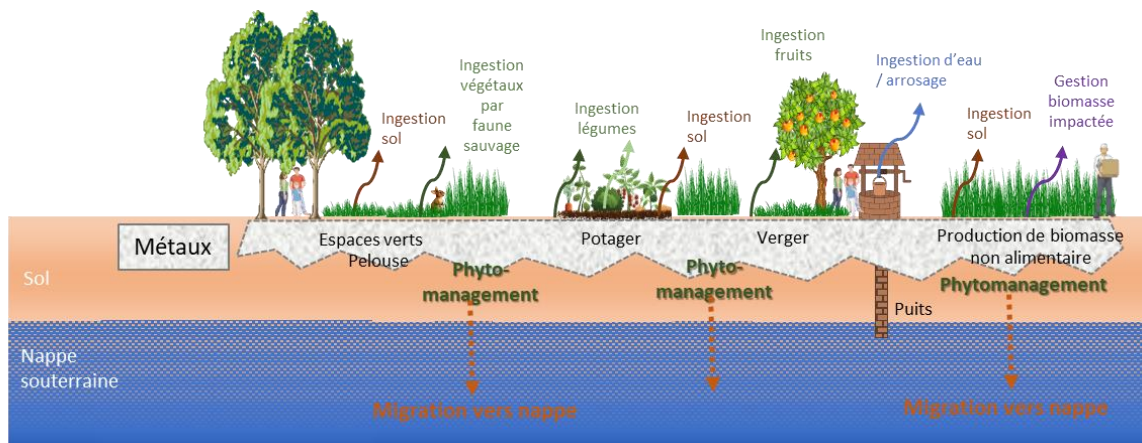
Il s'agit de considérer un plan de gestion fictif dans un contexte de pollution des sols superficiels par des métaux (pollution diffuse et concentrée) et d'évaluer les limites et les avantages des 2 phytotechnologies : phytoextraction et phytostabilisation aidée. L'épaisseur de sol superficiel « traitable » correspond à la profondeur d'enracinement des espèces végétales. Elle est variable selon les espèces et peut atteindre 30 cm, 50 cm voire 1 m pour les espèces herbacées. La profondeur atteinte par les arbres est 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 métallique constituant la situation la plus couramment rencontrée, c'est ce type de pollution qui est étudié dans le cas fictif considéré.

2.3 Schéma conceptuel – cas fictif

Il a été fait le choix de ne pas restreindre le cas fictif à un seul usage. Aussi, trois futurs usages sont retenus dans cet exemple pour les phytotechnologies, repris dans le schéma conceptuel, présentés en Figure 1 :

- Usage récréatif comprenant des espaces verts, pelouses, voies vertes ouverts au public (réhabilitation paysagère) ;
- Usage résidentiel comprenant des jardins potagers (co-culture de plantes potagères avec des espèces végétales sélectionnées) ;
- Usage tertiaire/agricole consistant en la production de biomasse non alimentaire.



Phytomanagement

Figure 1 : usages futurs considérés dans le plan de gestion fictif dans le cadre de l'application des phytotechnologies

Enfin, deux temporalités et deux finalités se dessinent dans le cas des phytotechnologies :

- situation 1 : les phytotechnologies sont une technique 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) ;
- situation 2 : les phytotechnologies constituent le **nouvel usage** en tant que tel (ex : réhabilitation paysagère).

2.4 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 2).

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

Le Tableau 1 présente les techniques conventionnelles retenues pour le plan de gestion fictif, auxquelles les phytotechnologies seront confrontées.

Tableau 1 : Techniques conventionnelles et phytotechnologies considérées dans le plan de gestion fictif

<p>Techniques conventionnelles (en jaune) :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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	<p>Phytotechnologies (en vert) :</p> <ul style="list-style-type: none">- phytoextraction- phytostabilisation aidée
--	--

Tableau 2 : 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	
<p>1. Délimitation spatiale des sources de pollution (pollutions concentrées et diffuses)</p> <p>= caractériser et cartographier horizontalement et verticalement les sources de pollution</p>	<p>Diagnostic SSP classique basé sur les concentrations totales</p> <p><u>Compléments en anticipation de l'étape 2</u> : paramètres agronomiques du sol à prévoir (pH, matières fertilisantes du sol) pour anticiper la culture de végétaux. Besoin de caractériser l'horizon occupé par les racines (a minima 0-1m)</p> <p><u>(Compléments d'analyses à prévoir pour les composés organiques*)</u></p>	<p>Diagnostic SSP classique basé sur les concentrations totales</p> <p><u>Compléments en anticipation de l'étape 2</u> : granulométrie, test de lixiviation.</p> <p>Les profondeurs à investiguer sont à adapter en fonction de la migration des polluants et des usages envisagés.</p>	<p>👍 Compléments de diagnostic ne nécessitant pas de techniques analytiques spécifiques pour les pollutions métalliques</p> <p>👍 Aucune nécessité d'étudier la mobilité des polluants métalliques du sol (via des extractions sélectives, par exemple)</p>	/	/
<p>2. Performances techniques de dépollution</p> <p>= identifier et choisir les techniques adaptées à la pollution</p>	<p>Citation dans l'outil SELECDEPOL (www.selecdepol.fr) de toutes les techniques. Actualisation à venir de la fiche relative aux phytotechnologies (action ADEME).</p> <p>⚠️ La pression foncière est classiquement un critère discriminant qui conduit à écarter <i>a priori</i> certaines techniques de dépollution. C'est particulièrement le cas pour 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).</p> <p>Existence de guides français pour la mise en œuvre 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 œuvre des phytotechnologies</p>		<p>👍 Technique permettant le traitement in-situ des pollutions diffuses, sur de grandes surfaces</p> <p>👍 Techniques de mise en œuvre éprouvées issues des professions agricoles, espaces verts, foresterie en termes de préparation des sols, de la plantation et de l'entretien.</p> <p>Préservation et/ou amélioration des fonctionnalités de la ressource sol</p> <p>👍 Préservation et/ou amélioration des fonctionnalités de la ressource sol</p> <p>👉 - Profondeur optimale entre 0 et 1 m, choix des espèces végétales plus restreint jusqu'à 5 m</p> <p>- Tous les métaux ne sont pas phytoextractibles</p> <p>- Gamme de pH optimale à respecter (impossibilité pour les pH extrêmes)</p> <p>- Choix limité des espèces végétales contraint par la nature des polluants à traiter et des filières de valorisation possible</p>	<p>👉 Techniques conventionnelles in-situ ou ex-site listées dans tableau 1 peu adaptées aux pollutions diffuses sur de grandes surfaces</p> <p>👉 Plusieurs approches possibles pour traiter les pollutions métalliques dans les sols</p> <p>👉 - Perte de la ressource sol (si excavation)</p> <p>- Destruction partielle ou totale des caractéristiques et des fonctionnalités du sol, du aux remaniement et au traitement du sol</p>	<p>Les phytotechnologies s'appuient sur des compétences existantes mais disséminées – besoin de transversalité pour constituer des équipes pluridisciplinaires (espaces verts, agriculture, foresterie et sites pollués)</p> <p>Difficulté d'afficher des objectifs de performance en termes de concentration résiduelle dans les sols</p> <p>Taux d'abattement de la pollution inférieur aux techniques conventionnelles in-situ</p> <p>Analyse économique peu consolidée (coût du déploiement versus valorisation)</p> <p>Pour les filières existantes : statut de la biomasse issue de sites pollués - sujet à discussion</p> <p>Pour les filières émergentes de valorisation des biomasses : projets de recherche en cours (huile essentielle, molécule plateforme pour la bioraffinerie,...)</p>

Etapes 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 phytotechnologies : 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 (phytoextraction) : abattre les concentrations totales dans les sols avec un taux fonction du temps d'exploitation	- <i>Excavation</i> : objectif défini en fonction de l'usage (concentrations maximales admissibles) - <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	👍	Maîtrise des plantes : a/ qui peuvent être choisies comme non comestibles pour l'Homme ou non appétantes pour la faune en fonction de l'usage envisagé, b/ qui sont de préférence indigènes non invasives	👍	- <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	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 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	
			👍	<i>Phytotechnologies</i> : 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. Assurer la pérennité de la couverture végétale. Surveillance de la qualité des eaux souterraines au cas par cas.	👉	<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	
			👉	Persistance des pollutions diffuses			
	<i>Phytotechnologies</i> : exposition acceptable au plan sanitaire (par réduction/suppression des voies d'exposition)	<i>Excavation</i> : 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	

Etapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
	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 la création de nouveaux sous-critères : valorisation biomasse ; services écosystémiques (biodiversité, support sol), ...	Absence de référentiel pour évaluer les services écosystémiques à l'issue de la mise en œuvre des phytotechnologies, par rapport aux techniques conventionnelles.
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 pollutions métalliques.				
	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-envoi 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
4.3 Restrictions d'usage = proposer les moyens garantissant la compatibilité des usages avec les pollutions résiduelles laissées en place	1. accès restreint possible à la zone traitée, ou fréquentation limitée pour les usagers (cas de la réhabilitation paysagère) 2. plantations à vocation alimentaire pouvant être interdites (jardin potager, verger) ou nécessité de plantation hors sol... 3. choix de la biomasse (logique de production) 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 retour d'expérience de la co-culture de végétaux comestibles avec les végétaux mis en œuvre dans le cadre des phytotechnologies	👉 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).
		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)
					Nombreux travaux de recherche en cours appliqués sur les usages non alimentaire 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 non limitation des performances des procédés et des produits). Peu de travaux de recherche à ce jour sur la co-culture à usage alimentaire. Besoin de poursuivre l'ensemble de ces travaux (alimentaires et non alimentaires)

Etapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👍 / 👎)		Freins à l'application des phytotechnologies
	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	Phytotechnologies	Techniques conventionnelles	
4.4 Validation sur le plan sanitaire = s'assurer de la validité de l'analyse des risques résiduelles	2 situations envisagées : - traitement temporaire (ex : valorisation biomasse) : l'analyse des risques résiduels (ARR) prédictive est menée par rapport à l'usage futur ; - traitement permanent, inclus dans le futur usage (ex : réhabilitation paysagère) : l'ARR prédictive est menée sur les concentrations totales initiales en métaux.		👍 Voies d'exposition potentielles considérées et maîtrisées : 1/ ingestion de sol 2/ inhalation de poussières 👎 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).		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
		Confinement : validation sanitaire - absence d'exposition pour l'homme à court terme car suppression des voies d'exposition		👎 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 amélioration de la ressource sol, 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 l'environnement (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, approche Triad, bioindicateurs d'accumulation et d'effet).

Etapas du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
	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 : - 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 : - Analyses des polluants dans les végétaux et/ou sols (fraction extractible). Autres paramètres possibles à suivre en lien avec les services écosystémiques (indice de biodiversité...) et la fertilité du sol	<i>Excavation</i> : vérification des concentrations résiduelles au niveau des bords et fonds de fouille <i>Confinement</i> : vérification de l'efficacité du confinement via la surveillance des eaux souterraines, au cas par cas <i>Lavage in-situ</i> : 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.	👍 <i>Excavation</i> : aucun suivi nécessaire 👉 <i>Confinement</i> : suivi dans le temps (couverture, surveillance des eaux souterraines) et conservation de la mémoire <i>Lavage in-situ</i> : nécessité de s'assurer qu'il n'y a pas de lixiviation des métaux du sol vers l'aquifère pendant le traitement	Absence de guide sur les protocoles de suivi intégrant notamment le prélèvement des parties aériennes (feuille, tige, 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	Possibilité de réaliser des essais <i>in-situ</i> ou en laboratoire (enceinte de culture) pour s'assurer de la bonne croissance des espèces végétales pressenties (essais E2/E3) et acquérir des données sur les caractéristiques agronomiques de sols (essai E1).	<i>Excavation/confinement</i> : non concerné. <i>Lavage in-situ</i> : essai E2 pour s'assurer que la texture du sol est compatible avec ce type de traitement	👍 <i>Phytoextraction</i> : essais facilement mis en œuvre (essais pilote <i>in-situ</i> ou dans une enceinte de culture en laboratoire) permettant de tester différentes modalités 👉 <i>Phytoextraction</i> : durée des essais à adapter en fonction du cycle de culture, de 3 à 12 mois en fonction du végétal 👍 <i>Phytostabilisation aidée</i> : 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.	👍 <i>Lavage in-situ</i> : essai facilement mis en œuvre (essais E2/E3) et de courte durée (< 3 mois)	<i>Phytoextraction</i> : 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) Retour d'expérience limité sur des expérimentations de longue durée avec des amendements (> 8 ans)

Etapes du plan de gestion	Pratiques actuelles		Limites techniques / Avantages techniques (👉 / 👍)		Freins à l'application des phytotechnologies
	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 biomasse 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.	👍 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	Besoin de transversalité dans les compétences pour la mise en œuvre (espaces verts, agriculture, foresterie et sites pollués)

Légende :

👉	Limite technique	Case verte (techniques conventionnelles)
👍	Avantage technique	Case jaune (phytotechnologies)

*Concernant les polluants organiques, il conviendra d'adapter et d'affiner la caractérisation du site et notamment les sols en termes de microflore (présence et/ou activité des bactéries et des champignons dans la dégradation des substances organiques).

** Sauf si terres impropres à la croissance des plantes

*** 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, 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) ISO 19204 :2017, 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 MTES 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

2.5 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 ; nombreux travaux de recherche appliqués sur les usages non alimentaires sur les sites phytomanagés mais peu de travaux de recherche à ce jour sur la co-culture à usage alimentaire ;
- frein méthodologique : changement des pratiques classiques constituant à substituer par une couverture « végétale » le recouvrement des sols impactés avec des terres apportées ; absence de démarche ou de guide pour évaluer les services écosystémiques à l'issue de la mise en œuvre des phytotechnologies, par rapport aux techniques conventionnelles ; 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, 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 : absence d'étude économique sur le long terme consolidée pour la mise en place et l'entretien des phytotechnologies ; besoin de consolider à l'échelle nationale la pérennité de filières de valorisation des biomasses produites.

2.6 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-UPDS¹ 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 3 présente les 5 familles de critères dans le cadre de l'application des phytotechnologies, ainsi que les sous-critères dont certains ont été développés dans le cadre de la présente étude pour rendre compte des atouts spécifiques de la phytoextraction et de la phytostabilisation dans la gestion des sols pollués. Ces derniers apparaissent en orange dans le tableau.

¹ Elaboration des bilans coûts-avantages adaptés aux contextes de gestion des sites et sols pollués, ADEME-UPDS, 2017

Tableau 3 : 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 en fonction des objectifs de dépollution et des polluants à traiter (Meilleur retour d'expérience pour les pollutions métalliques par rapport aux pollutions organiques, notamment en termes de choix des plantes). Technique adaptée aux pollutions diffuses sur de grandes superficies.
	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 : 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). De l'ordre de l'année pour des cultures annuelles. Jusqu'à 20 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 biomasse 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	Valorisation possible du foncier par la production de biomasse : - Filière bois énergie : revente de la biomasse ; - Production de molécules à haute valeur ajoutée à partir de la biomasse (chimie verte, bioraffinerie, production d'huiles essentielles) pour les métaux tels que zinc, cadmium et nickel. Filière de méthanisation pour les co-produits, CIVE (culture intermédiaire à vocation énergétique).
	Autres éléments non monétisés	Pas de mécanisme de monétisation identifié à ce jour pour la réhabilitation des sites et sols pollués pour les services écosystémiques dont la séquestration du carbone.
Critères environnementaux	Augmentation du trafic	La valorisation locale (mise en place, suivi et valorisation) limite le trafic routier (versus excavation).
	Déchets générés	Faible production de déchets équivalente à celle concernant les espaces agricoles, forestiers, espaces verts.
	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 des 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 (installation de stockage) – concerne la phytoextraction (sans retour d'expérience sur le long-terme).
	Gestion de la biomasse produite pouvant être enrichie en composés métalliques	Enrichissement de la biomasse en composés métalliques recherché ou subi. Valorisation ou élimination de la biomasse produite : filières existantes (énergie) et émergentes (bioraffinerie), avec respect des normes en vigueur lorsqu'elles existent.

Famille de critères	Sous-critères	Phytotechnologies
Critères environnementaux	Services écosystémiques Aménités environnementales	<p>Dépollution</p> <p>Séquestration du carbone via la production de biomasse</p> <p>Régulation de la température (îlots de fraîcheur en particulier en milieu urbain) – non liée aux sols pollués mais aux espèces végétales</p> <p>Eau : épuration et diminution du lessivage (transferts verticaux)</p> <p>Amélioration du bien-être (esthétisme, aménités paysagères)</p> <p>Production de nouveaux matériaux, énergies (biomasse renouvelable)</p> <p>Amélioration, restauration de la fonctionnalité du sol</p> <p>Augmentation de la biodiversité (microflore, microfaune,...)</p> <p>Amélioration de la fertilité (matière organique, azote,...)</p>
	Consommation de ressources	<p>Non nécessité d'emploi de terres végétales en tant que ressource sol.</p> <p>Absence d'utilisation d'énergies fossiles ou d'électricité pour excaver, transporter des terres ou traiter des terres in-situ.</p> <p>Emploi potentiel d'amendements du sol.</p>
Critères socio-politiques	Nuisances au voisinage (bruit, poussières, odeurs)	<p>Aucune nuisance sonore,</p> <p>Aucun réenvol de poussières en raison du couvert végétal pérenne,</p> <p>Aucune odeur générée,</p> <p>...hormis lors de la mise en œuvre éventuellement et lors des récoltes de biomasse. Nuisances équivalentes à des travaux d'espaces verts/ agroforesterie.</p>
Critères juridiques et réglementaires	Contraintes résiduelles (restrictions d'usage, surveillances ultérieures...)	<p>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.</p> <p>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, mobilité des polluants).</p> <p>Responsabilité du propriétaire de site.</p> <p>Traçabilité nécessaire de la pollution laissée en place.</p>
Total	17	

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 dans 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 biomasse 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 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 ou une culture dédiée à la biomasse.
- des **éléments non monétisés** à ce jour en raison de l'absence de mécanismes de monétisation pour les services écosystémiques tels que la séquestration du carbone.

2. Pour les critères environnementaux :

- la **gestion de la biomasse produite pouvant être enrichie en composés métalliques**. Cet enrichissement recherché (phytoextraction) ou subi (phytostabilisation) conduit à la valorisation ou à l'élimination de la biomasse au sein de filières existantes ou émergentes, dans le respect des normes en vigueur lorsqu'elles existent.
- les **« services écosystémiques »** considérant ici uniquement les aménités² environnementales. L'emploi d'espèces végétales en phytotechnologie pour gérer des pollutions métalliques contribue à apporter une multitude de services aux écosystèmes et par conséquent à l'Homme tels que la préservation de la ressource sol, l'amélioration des fonctions du sol, la séquestration du carbone, la participation à la régulation de la température de l'air en luttant en milieu urbain contre les îlots de chaleur dans le cadre de l'adaptation au changement climatique et de la réhabilitation des friches, et les aménités paysagères lorsque des espaces verts ou des voies vertes sont aménagés...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.
- 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

² 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. T<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

végétale est maintenue (phytostabilisation/phytoextraction). L'emploi d'amendements minéraux ou organiques peut être toutefois nécessaire dans le cadre de la phytostabilisation aidée en vue d'immobiliser les polluants.

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 la « renaturation » selon les usages/options envisagés.

2.7 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 4 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.

Tableau 4 : Paramètres à suivre pendant les travaux – surveillance

	Phytoextraction	Phytostabilisation (aidée)
Rappel des performances	La quantité d'éléments traces 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)
Surveillance pendant la mise en œuvre des traitements	<ul style="list-style-type: none"> - 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 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. 	<ul style="list-style-type: none"> - resemer/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 s'il y a une présomption de réduction d'efficacité de l'amendement - 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 (biomasse enrichie en polluants) et des adaptations nécessaires pour l'entretien/l'exploitation, au regard des services écosystémiques rendus et de l'évolution des plantations mises en place (notamment compétition avec les espèces végétales spontanées).	

3 Synthèse et Perspectives

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

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

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

- leurs **avantages techniques** telles que leur adéquation pour des pollutions diffuses sur de grandes superficies ; la transposition possible des techniques de mise en œuvre éprouvées en agro-foresterie et au niveau des espaces verts ; la préservation de la ressource sol et de ses fonctionnalités ; la maîtrise des plantes choisies ; la maîtrise des impacts au travers du maintien d'une couverture végétale pérenne ; la limitation du ré-envol de poussières et des transferts de polluants vers les compartiments « végétaux/ 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 ; la profondeur d'enracinement et les conditions optimales de développement des plantations (caractéristiques pédo-agronomiques des sols) ; la phytodisponibilité des polluants à traiter ; la persistance des polluants dans les sols ; un retour d'expérience limité sur la co-culture avec des végétaux comestibles ; des facteurs d'abattement de la pollution plus faibles que les techniques conventionnelles ; la nécessité d'assurer un entretien des plantations et de protection vis-à-vis de la sécheresse, des maladies et des ravageurs ; 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, techniques 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 ; l'absence d'étude économique consolidée ; l'absence de facteurs d'abattement de la pollution 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 limité sur certaines espèces végétales ou sur le long-terme pour certains aspects (amendements) ; l'absence de démarche pour évaluer les services écosystémiques ; l'absence d'évaluation des polluants résiduels pour l'environnement ; le nombre réduit de travaux sur les co-cultures à vocation alimentaire ; le besoin de consolider à l'échelle nationale la pérennité de filières de valorisation des biomasses produites ; la pratique ancrée telle que l'apport d'une couche de terre exogène pour supprimer le contact avec les sols pollués ; la garantie non assurée de débouchés économiques influant sur le choix de la biomasse à produire.
- 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 biomasse 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** du projet qui peut orienter vers un traitement temporaire par exemple sur un ou plusieurs cycles de culture et les **superficies concernées** ;
- 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.

3.2 Conclusion et 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 contamination diffuse des sols par des métaux sur une grande superficie. Aucune difficulté incontournable n'a été identifiée au cours de l'étude de cas fictive déroulée.

Un retour d'expérience auprès de correspondants des DREAL confrontés à ces techniques sur le terrain serait nécessaire pour conforter et compléter les avantages et les limites associées aux phytotechnologies rencontrés dans des contextes réels.

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

- L'intégration des phytotechnologies dans les fiches typologiques d'usage traitant des voies d'expositions potentielles, dans le cadre d'un traitement temporellement limité (espaces verts, espaces agricoles) ;
- La rédaction de protocoles harmonisés pour assurer le suivi des phytotechnologies en termes de prélèvement et de constitution d'échantillons ainsi qu'en termes d'optimisation (allègement/renforcement du suivi) en fonction de l'évolution du site.

