

Le chapitre : phyto-remédiation

Introduction

La phytoremédiation est définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques.

Bien que les plantes soient utilisées depuis longtemps pour dépolluer les sols, d'importantes découvertes scientifiques réalisées au cours de ces dix dernières années ont contribué à améliorer le processus et à étendre son champ d'application.

Elle peut être utilisée aussi bien contre les polluants organiques que les polluants inorganiques présents dans les milieux solides (sols), liquides (eaux de surface et souterraines) et gazeux.

La phytoremédiation regroupe :

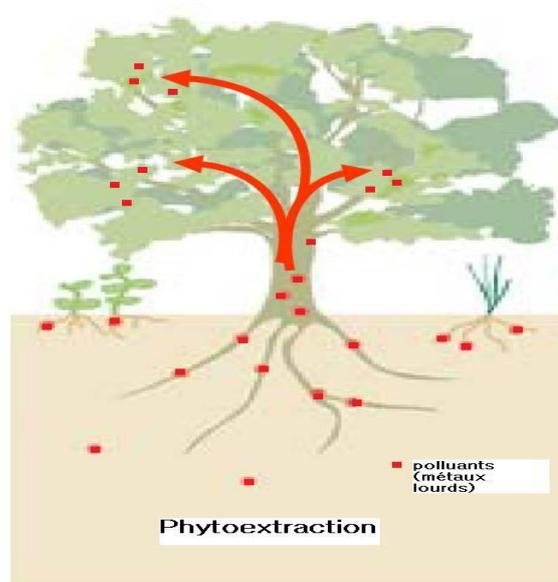
- (i) la phytoextraction : utilisation des plantes pour extraire du sol les polluants organiques et les métaux et les concentrer dans les organes de la plante destinés à la récolte,
- (ii) la rhizofiltration, correspond à l'utilisation des racines pour absorber et accumuler les polluants (métaux) des eaux usées, l
- (iii) la phytostabilisation ; utilisation des plantes pour limiter l'érosion et immobiliser les polluants dans les couches superficielles évitant en particulier leur migration vers les eaux de surface et souterraines,
- (iv) la phytovolatilisation : utilisation des plantes pour extraire les polluants du sol et les transformer en composés volatils
- (v) la phytodégradation : utilisation de l'association plantes/microorganismes pour dégrader les polluants organiques du sol.

A -La phytoextraction

la phytoextraction : utilisation des plantes pour extraire du sol les polluants organiques et les métaux et les concentrer dans les organes de la plante destinés à la récolte,

Parmi les différentes méthodes de phytoremédiation, la plus utilisée est la phytoextraction. Elle a été en particulier appliquée pour la dépollution des métaux.

La phytoextraction utilise des plantes capables de prélever les éléments traces toxiques et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées puis incinérées (Figure 1).



Deux stratégies sont actuellement développées dans la phytoextraction.

- Il y a la *phytoextraction assistée* par des chélateurs de métaux. Cette méthode est désignée également par la *phytoextraction induite*
- et d'autre part la *phytoextraction continue*.

Parmi ces deux procédés la phytoextraction assistée est la plus développée. Cependant, la phytoextraction continue commence à être appliquée pour la dépollution des métaux lourds (Zinc, Cadmium, nickel) et des métalloïdes (Sélénium, Arsenic).

A-1- la phytoextraction continue

Utilisation de plantes pouvant accumuler au sein même de leurs tissus des quantités importantes de métaux lourds (jusqu'à 1% de leur matière sèche)

Mécanisme : complexation des métaux avec des acides organiques ou des acides aminés synthétisés par la plante. Puis transport des racines vers les parties aériennes (tiges et feuilles)

Métaux susceptibles d'être accumulés : cobalt, cuivre, zinc

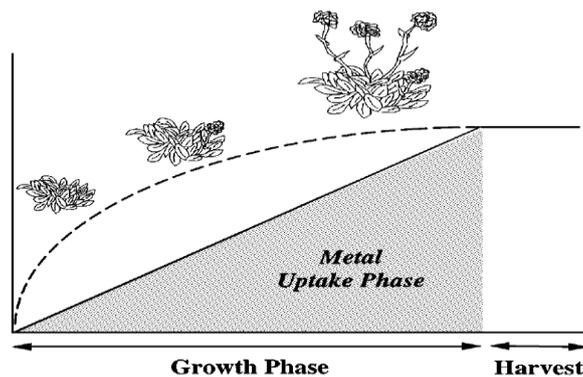


Figure 2 Schematic representation of continuous phytoextraction. Solid line represents metal concentration in shoot biomass; dashed line represents shoot biomass.

Le mode d'absorption des métaux est optimisé chez les plantes hyperaccumulatrices qui poussent sur des sols riches en métaux lourds et capables d'accumuler de grandes quantités de métaux dans leur partie aérienne

2- La phytoextraction induit ou phytoextraction assiste

Utilisation de plantes prélevant les métaux lourds seulement en présence de chélateurs

La phytoextraction assistée est basée sur deux principes :

- (i) augmenter la concentration du métal dans la solution du sol,
- (ii) augmenter l'absorption et le transport de ce métal vers la partie aérienne de la plante, qui est plus facile à récolter.

Les chélateurs sont appliqués une fois que la plante a atteint un niveau de biomasse optimal

Le prélèvement de métaux est dès lors intense mais réduit en durée

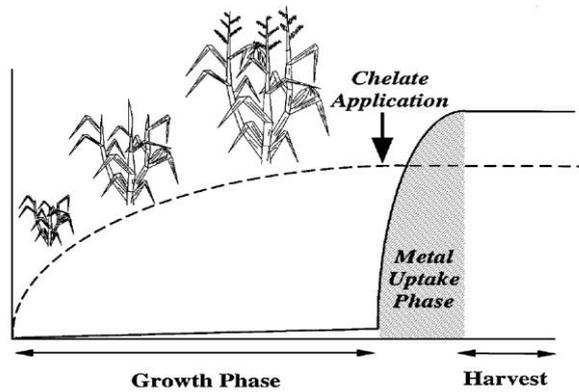


Figure 1 Schematic representation of chelate-assisted phytoremediation. Solid line represents metal concentration in shoot biomass; dashed line represents shoot biomass.

La notion d'hyperaccumulation

Une plante est dite hyperaccumulatrice à partir d'une concentration dépendant du métal : plus de 1 000 mg/g de [matière sèche](#) dans les feuilles pour le nickel, plus de 10 000 mg/g pour le zinc. Pour évaluer cette hyperaccumulation, on utilise le coefficient de transfert défini par :

Concentration du métal contenu dans les tissus aériens de la plante Concentration du métal contenu dans le sol

Plus ce coefficient est élevé plus l'accumulation des métaux est importante.

Trois types de comportements des plantes ont pu donc être déterminés dans un milieu contenant des métaux lourds:

- La première stratégie est un prélèvement faible des métaux. La plante contrôlerait leur non-absorption au niveau de la racine. Il existe une valeur maximale de tolérance au-delà de laquelle le végétal meurt.
- La seconde est un prélèvement proportionnel à la quantité en métaux présents dans le sol. La plante est alors qualifiée d'indicatrice puisqu'elle reflète les quantités présentes dans celui-ci.
- La dernière stratégie est l'hyperaccumulation des métaux dans les parties aériennes de la plante. Les mécanismes d'absorption sont actifs.

Les plantes hyperaccumulatrices

Environ 400 espèces de plantes sont reconnues comme étant hyperaccumulatrices de métaux lourds, la majeure partie d'entre elles (300 espèces) accumulant le Nickel.

On a vu que ces végétaux présentent la particularité d'accumuler une très grande quantité de métaux lourds toxiques, à des concentrations cent fois plus élevées que chez les autres.

On peut citer par exemple la moutarde brune (*Alysum bertolonii*), la pensée calaminaire (*Viola calaminaria*), le tabouret bleuâtre (*Thlaspi caerulescens*), le colza, le tournesol.

D'ailleurs plusieurs chercheurs américains travaillent aussi beaucoup sur des arbres comme le peuplier, capable d'extraire le métal du sol et des eaux.

Les plantes vont donc être choisies en fonction de la nature du polluant contaminant le sol (type de métal), car il faut que la plante utilisée soit capable d'extraire le métal, en fonction du climat, et également en fonction de sa biomasse, de façon à ce qu'elle puisse accumuler une quantité importante de polluants.

De plus, le sol est souvent contaminé par de nombreux métaux, ce qui nécessite une culture de différentes espèces de plantes.

Les familles les plus rencontrées dans l'accumulation du Zinc sont les Brassicacées, les Caryophyllacées, les Lamiacées et les Violacées.

En ce qui concerne le Plomb et le Cadmium il s'agit surtout des Brassicacées (ex: moutarde brune).

Les espèces hyperaccumulant le Cuivre et le Cobalt sont peu nombreuses (24). Elles sont originaires du Zaïre. Les familles concernées sont les Lamiacées, les Astéracées, les Cypéracées, les Scrofulariacées et les Amarantacées.

Le Nickel est quant à lui hyperaccumulé par les trois quarts des espèces connues. Elles appartiennent à des familles telles que les Brassicacées, les Scrophulariacées, les Euphorbiacées, les Saxifragacées et les Sapotacées.

Tableau :

Micropolluant	Certaines de leurs plantes hyper accumulatrices
As-Arsenic	<i>Pteris vittata</i>
Cd-Cadmium	<i>Vallisneria spiralis; Avena strigosa</i>
Cr-Chrome	<i>Pistia stratiotes; Dicoma niccolifera</i>
Ni-Nickel	<i>Alyssum masmenkaeum Boiss. (Brassica) Thlaspi cypricum</i>
Pb-Plomb	<i>Armeria maritima ; Thlaspi rotundifolium</i>
Cu-cuivre	<i>Bacopa monnieri ; Lemna minor</i>
Zn-Zinc	<i>Thlaspi caerulescens ; Armeria maritima ; Silene vulgaris</i>

Les mécanismes cellulaires de l'absorption et de l'accumulation des métaux lourds

L'absorption des métaux lourds se fait au niveau des racines.

les différentes parties composant une jeune racine et le système vasculaire de la plante dont le [xylème](#) qui est le principale acteur de la migration des métaux lourds vers les parties aériennes chez les végétaux supérieurs

D'abord pour être absorbés, les métaux lourds doivent être sous forme soluble dans la rhizosphère.

Ils sont donc soit

- libres mais le plus souvent,
- ou liés à d'autres molécules qui sont appelées des agents chélatants

Ces agents sont ajoutés aux sols artificiellement ou parfois libérés par les racines de certaines plantes à travers des composés organiques et minéraux appelés [exsudats](#) et facilitent ainsi le passage des métaux lourds dans la plante.

En effet, la chélation d'ions métalliques par des ligands spécifiques de forte affinité diminue la concentration en ions métalliques libres. Ainsi, leur [phytotoxicité](#) est réduite.

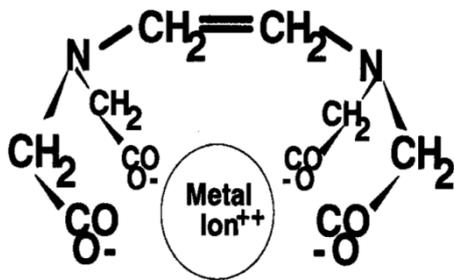
Deux classes majeures de peptides chélateurs des métaux lourds sont connues :

les [metallothionéines](#) et les [phytochélatines](#).

L'ajout de chélateurs dans le sol permet donc une meilleure absorption racinaire. Ce qui est une pratique courante dans les installations de phytoremédiation.

Chélateurs : choisis en fonction du métal à extraire :

Un exemple d'agent chélateur du plomb notamment est L'EDTA (l'acide éthylène diamine tétra acétique) pour le plomb, de formule chimique $C_{10}H_{16}N_2O_8$ représenté sur le



Après application d'EDTA, l'accumulation de plomb dans la plante est directement corrélée avec une accumulation d'EDTA . Ainsi, il est probable que le plomb soit transporté à l'intérieur de la plante sous forme de complexe Pb-EDTA. La présence de niveaux élevés d'EDTA dans les tissus de la plante devrait augmenter la concentration en plomb soluble dans la plante par formation du complexe soluble Pb-EDTA, permettant son mouvement des racines aux parties aériennes où le plomb s'accumulerait sous la forme Pb-EDTA.

Les éléments minéraux ainsi solubilisés dans la rhizosphère sont prélevés par les racines au niveau des [poils absorbants](#)..

Il existe deux chemins principaux d'absorption:

- Le premier se fait par l'apoplaste. Il s'agit de la zone délimitée par les parois des cellules. Cette absorption suit les mouvements d'eau ainsi que les gradients de concentrations et les potentiels chimiques.
- Le second est le chemin cytoplasmique. L'assimilation s'effectue au niveau des membranes des cellules des poils absorbants. Les mécanismes d'absorption sont passifs ou actifs. À ce niveau l'absorption est sélective et se fait aussi de manière passive ou active

Il existe deux chemins principaux d'absorption:

- Le premier se fait par l'apoplaste. Il s'agit de la zone délimitée par les parois des cellules. Cette absorption suit les mouvements d'eau ainsi que les gradients de concentrations et les potentiels chimiques.
- Le second est le chemin cytoplasmique. L'assimilation s'effectue au niveau des membranes des cellules des poils absorbants. Les mécanismes d'absorption sont passifs ou actifs. À ce niveau l'absorption est sélective et se fait aussi de manière passive ou active

la localisation et la forme absorbées de certains métaux lourds.

Métal	Localisation principale dans la plante	Formes absorbées
As	Racines et vieilles feuilles	Sels solubles de AsO_4^{3-} , As^{3+} et As^{5+}
Cd	Racines et feuilles	Complexé, chélaté, Cd^{2+}
Cr	Racines et feuilles(mais en faible quantité)	Facilement absorbé dans les sols acides, Cr(III), Cr(VI), CrO_4^{2-}
Co	Feuilles	?
Cu	Feuilles	Chélates organiques à 99 %
Fe	Retrouvé partout	Fe^{2+} , chélates et complexes organiques
Pb	Racines	Difficilement absorbé car adsorbé par les argiles
Ni	Sève et racines	Différents oxydes et chélates
Se	Graines et bourgeons notamment	Formes solubles (sélénate, sélénite)

Avantages et inconvénients de la phytoextraction

AVANTAGES

- L'activité biologique et la structure des sols sont maintenues après le traitement La technique est d'un coût relativement faible
- Le paysage reste (ou devient) agréable grâce à l'implantation de végétaux Les métaux extraits peuvent facilement être récupérés
- Permet de réduire la pénétration des contaminants dans l'environnement en empêchant leur déversement dans les réseaux d'eau souterraine.

INCONVENIENTS

- Nécessité d'un équipement pour la récolte des hyperaccumulateurs

- Rareté des plantes hyperaccumulatrices
- Risque de contamination lors de la gestion des produits de la récolte.
- Faible production de biomasse et croissance lente Limiter par la profondeur des racines en général de 1 à 1,80 m pour les plantes herbacées et de 3 à 4,5 m pour les arbres.
- Certaines plantes qui absorbent une grande quantité de composés toxiques pourraient mettre en danger la chaîne alimentaire si des animaux les mangent.

2- Phytodégradation

Pour les polluants organiques difficilement biodégradables tels que les hydrocarbures, les plantes peuvent être d'un grand secours.

La phytodégradation est une méthode de décontamination des sols, consistant en la dégradation de polluants par les plantes cultivées.

Les plantes peuvent croître sur un sol contaminé jusqu'à un certain seuil par des hydrocarbures. Une concentration de 7 tonnes par hectare permet une croissance normale de la plante et un rythme de dégradation élevé par les microorganismes se développant dans la rhizosphère* (Chaîneau et al., 1995).

La phytodégradation est l'accélération de la dégradation des composés organiques polluants (hydrocarbures, pesticides, explosifs...) en présence de plantes

Cette dégradation peut avoir lieu soit

- hors de la plante, grâce à l'activité des micro-organismes présents dans l'environnement des racines (rhizosphère),
- soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules.

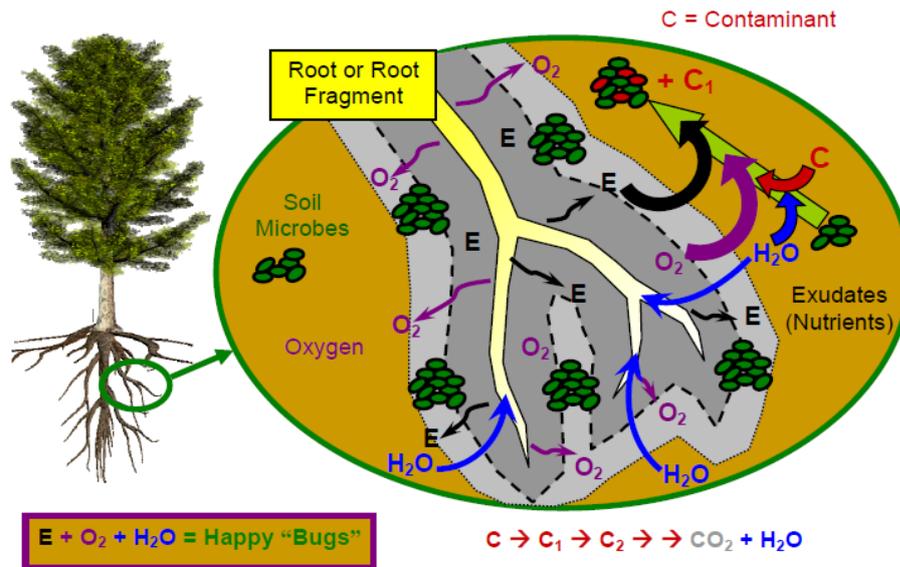
Absorption et décomposition des contaminants par la libération d'enzymes et par des processus d'oxydation et de réduction.

Les polluants dégradés, donc moins toxiques, sont ensuite incorporés dans la plante ou libérés de nouveau dans le sol.

La Rhizodégradation

La Rhizodégradation implique la transformation des contaminants en substances moins toxiques dans la rhizosphère puis leur dégradation par les communautés microbiennes, processus facilités par l'excrétion de molécules organiques soutenant ces communautés.

Une communauté spécifique peut ainsi être introduite afin de dégrader un composé.



Champignons		Bactéries
	Gram +	Gram -
Aspergillus	Pseudomonas	Micrococcus
Penicillium	Xanthomonas	Arthrobacter
Acremonium	Acinetobacter	
Trichoderma	Flavobacterium	Rhodococcus
Fusarium	Agrobacterium	

La phytodégradation comprend deux mécanismes distincts :

- La dégradation des contaminants par des enzymes excrétées dans le sol par les racines, par exemple, la dégradation du triphénylméthane par des laccases, veratryl alcohol oxidase et DCIP reductase produite par *Blumea Malcomii*.
- Ou grâce aux voies métaboliques de la plante par transformation en composés moins toxiques.

Exemples de [plantes](#) :

phragmites, saules, peupliers, aulnes, [Baldingère](#), [Iris des marais](#), [Massette](#),

Le scirpe est une plante capable d'absorber, puis de briser des composés chimiques polluants surtout les hydrocarbures, en molécules simples inoffensives.

La Phytodégradation est particulièrement efficace pour des contaminants organiques hydrophobes; par exemple le peuplier (*Populus* spp.) est très utilisé pour la dégradation des composés organiques.

3- Phyto-filtration ou phyto -épuration

Pollution de l'eau par les métaux lourds : problème environnemental majeur

Techniques décharges d'ions ou précipitations chimiques ou microbiologiques : efficacité variable selon les métaux...

Phytofiltration : racines de plantes supérieures utilisées pour accumuler des métaux lourds

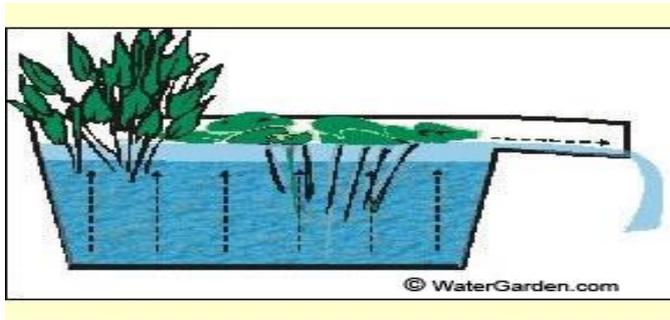
La rhizofiltration :

Méthode semblable à la phytoextraction, appliquée au traitement des eaux de surface et souterraines

Extraction directement dans la plante par les racines (absorption), soit indirectement par adsorption

Mécanismes :

Technique de dépollution des sols par l'utilisation de racines immergées de plantes qui captent les polluants. Ces racines sont récoltées une fois saturées en polluants

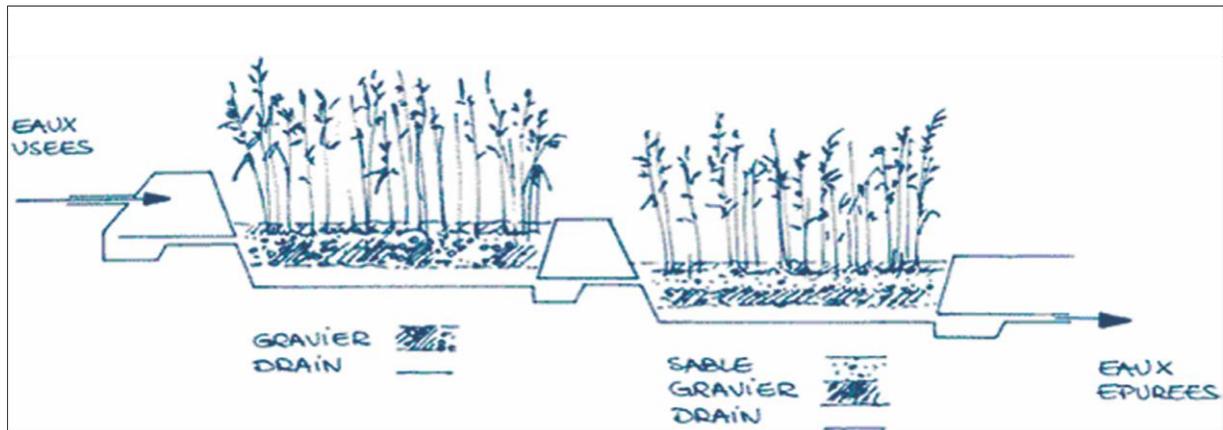


Principe de fonctionnement des filtres à macrophytes

phyto-épuration est réalisée grâce à des bassins successifs, étanches, remplis de graviers et plantés de diverses espèces aquatiques, appelés macrophytes, (roseaux, joncs, iris, phragmites, massette, salicaire).

Ces macrophytes ont un rôle de structuration et d'aération du massif, tout en servant de support aux bactéries qui font l'essentiel du travail.

Les graviers de granulométrie croissante en évoluant vers la profondeur (80 cm à 1m), permettent la filtration mécanique des eaux usées.



Les végétaux fixent les colonies de bactéries sur la base de leurs tiges et leurs rhizomes, ce qui améliore les performances des organismes épurateurs.

Par ailleurs, ils absorbent par leurs racines une partie (10 % environ) des sels minéraux – nitrates et phosphates – issus de la décomposition de la matière organique présente dans les eaux usées.

La plupart des macrophytes sont capable d'assimiler les métaux lourds, toujours présents dans les eaux usées et nocifs pour l'environnement

Exemples des plantes :

