

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



**Département de Génie de l'Environnement**

**Laboratoire Des Biotechnologies Environnementales Et Génie des Procédés**

**Mémoire de Master en Génie de l'Environnement**

**THEME :**

**DEPOLLUTION PAR  
PHYTOREMEDIATION**

**BRAHIMI Imene Fatima Zohra**

Soutenu publiquement le 01 Juillet 2017 devant le jury suivant :

<b>Président :</b>	<b>N.MAMERI</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>
<b>Promoteur :</b>	<b>N.ABDI</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>
<b>Examineur :</b>	<b>H.GRIB</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>

Ecole Nationale Polytechnique

10, Avenue Hacen Badi, El-Harrach, Alger.

**ENP 2017**



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE**



**Département de Génie de l'Environnement**

**Laboratoire Des Biotechnologies Environnementales Et Génie des Procédés**

**Mémoire de Master en Génie de l'Environnement**

**THEME :**

**DEPOLLUTION PAR  
PHYTOREMEDIATION**

**BRAHIMI Imene Fatima Zohra**

Soutenu publiquement le 01 Juillet 2017 devant le jury suivant :

<b>Président :</b>	<b>N.MAMERI</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>
<b>Promoteur :</b>	<b>N.ABDI</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>
<b>Examineur :</b>	<b>H.GRIB</b>	<b>Professeur</b>	<b>ENP</b>

Ecole Nationale Polytechnique

10, Avenue Hacen Badi, El-Harrach, Alger.

**ENP 2017**

## ملخص

هذه التقنية هي واحدة من الأساليب المبتكرة لمعالجة التربة، تستخدم بشكل كبير في بيئات ملوثة و تستند إلى طبيعة الملوثات المراد علاجها.

كجزء من هذا العمل، تم التأكيد على مبدأ التقنية، وآليات عملها وتطبيقاتها المختلفة في جميع أنحاء العالم. ورغم أن هذا الأسلوب له حدود، لكنه يعتبر جزء من التنمية المستدامة و تحويل المواقع الملوثة الى مساحات الخضراء.

كلمات البحث: علاج النبات، المعالجة البيولوجية، المعادن الثقيلة، المبيدات الحشرية، البيئة، التنمية المستدامة

## ABSTRACT

Phytoremediation is one of the innovative soil remediation methods that are increasingly used in complex environments depending on the nature of the pollutants to be treated. In this work, emphasis has been placed on the principle of technology, its mechanisms of action and its various applications in the world. Even if this method has limits, it is part of the sustainability, since the reconversion of a polluted site into green space generates on the one hand a green landscape and on the other hand a natural system of depollution of the land.

Keywords: phytoremediation, bioremediation, heavy metals, pesticides, environment, sustainable development

## Résumé

La phytoremédiation compte parmi les méthodes innovantes de dépollution des sols de plus en plus utilisées dans des milieux complexes en fonction de la nature des polluants à traiter.

Dans le cadre de ce travail, l'accent a été porté sur le principe de la technique, ses mécanismes d'action ainsi que ses différentes applications dans le monde. Même si cette méthode présente des limites, elle s'inscrit dans la durabilité, dans la mesure où la reconversion d'un site pollué en espace vert engendre d'une part un paysage verdoyant et d'autre part un système naturel de dépollution des terrains.

Mots clés : phytoremédiation, bioremédiation, métaux lourds, pesticides, environnement, développement durable

## *Dédicaces*

*A la mémoire de ma mère qui a tant souffert pour me donner le jour et qui m'a soutenu jusqu'à son dernier souffle.*

*A mon très cher papa qui m'a tout donné par sa présence, ses encouragements et ses énormes sacrifices.*

*A ma famille : Tema, Wassila, Imad, Bouchra, Yassine, Mustapha et Cherif*

*A mon binôme : Rima*

*A mes amies : Nacera, Khadidja, Lamia, Malika, Naima, Dihia, Safaa et Insaf*

*A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.*

## ***Remerciements***

*Je remercie tout d'abord ALLAH tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour arriver au bout de ce travail.*

*Mes remerciements les plus sincères ;*

*A mon père à qui je dois une reconnaissance infinie pour son soutien et sa patience.*

*A Mme ABDI d'avoir accepté d'être ma promotrice ainsi que pour son suivi durant la réalisation de mon master et sa rigueur dans le travail.*

*A Mr MAMERI et Mr GRIB pour leur encadrement et leurs conseils éclairés qu'ils m'ont offert durant mon projet.*

*A mon binôme qui a su m'épauler tout au long de ce travail.*

*A ma très chère Imene pour la bonne humeur qu'elle m'a procuré durant mes moments difficiles.*

*Enfin, que toute personne ayant participé à l'élaboration de ce travail puisse trouver l'expression de ma sincère gratitude.*

## Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....	12
1 Généralités sur la phytoremediation .....	14
1.1 Introduction .....	15
1.2 Définition de la phytoremédiation .....	15
1.3 Principe de la phytoremédiation .....	16
1.4 L'effet rhizosphérique .....	17
1.5 Les différentes formes de phytoremédiation .....	18
1.5.1 La phytoextraction.....	18
1.5.2 La phytodégradation et la rhizodégradation.....	21
1.5.3 La phytovolatilisation.....	22
1.5.4 La phytostabilisation .....	23
1.5.5 La phytorestauration.....	24
1.5.6 La phytofiltration (rhizofiltration).....	25
1.5.7 La phytostimulation.....	26
1.6 Hyperaccumulation et interactions biotiques .....	26

1.6.1	Protection .....	27
1.6.2	Interférences avec des plantes voisines d'espèces différentes .....	28
1.6.3	Mutualisme.....	29
1.6.4	Commensalisme .....	31
1.7	Conclusion.....	32
2	Applications de la phytoremediation .....	33
2.1	Introduction .....	34
2.2	Les contaminants ciblés.....	34
2.2.1	Les métaux lourds .....	34
2.2.2	Les hydrocarbures .....	34
2.3	Les végétaux utilisés.....	36
2.4	Facteurs affectant la phytoremédiation.....	37
2.5	Avantages de la phytoremediation .....	39
2.6	Limites de la phytoremediation .....	40
2.7	Régions pratiquant la phytoremediation.....	40
2.8	Quelques expériences en matière de phytoremédiation .....	41
2.8.1	La France.....	41
2.8.2	Le Gabon .....	43
2.9	Exemples de projets de phytoremediation.....	45
2.9.1	Parc d'entreprises de la Pointe-Saint-Charles .....	45



2.9.2	Traitement tertiaire des eaux usées à Saint-Roch-de-l'Achigan .....	47
2.10	La phytoremédiation pour un développement durable .....	48
2.11	Conclusion .....	49
	CONCLUSION GENERALE.....	50
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	51

## Liste des figures

Figure 1 : Principe de la phytoremediation .....	17
Figure 2 : Principe de la phytoextraction (exemple du plomb) .....	19
Figure 3 : Phytoextraction : proposition d'itinéraire technique simplifié pour la culture de plantes hyperaccumulatrices de métaux .....	20
Figure 4 : Mécanisme de la rhizodégradation .....	22
Figure 5 : Dynamique des polluants organiques et métalliques dans un système sol-plante, influence des différents facteurs impliqués .....	39
Figure 6 : Rizofiltration d'eau souterraine contaminée avec des saules à Pointe-Saint-Charles .....	45
Figure 7: Filtration des eaux usées épurées par des saules avant leur rejet dans une rivière à Saint-Roch-de-l'Achigan.....	47

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux contaminants cibles de la phytoremediation et avancement des technologies . 36

**Liste des abréviations**

<b>BPC</b>	Biphényles PolyChlorés
<b>BTEX</b>	Benzène Toluène Éthylbenzène Xylène
<b>cm</b>	Centimètre
<b>CNRS</b>	Centre national de la recherche scientifique
<b>Co</b>	Cobalt
<b>COPT1</b>	Copper transporter 1
<b>Cr</b>	Chrome
<b>Cs</b>	Césium
<b>DCIP</b>	2,6-Dichlorophenolindophenol
<b>E.coli</b>	Escherichia coli
<b>e.g</b>	Exemple
<b>EDTA</b>	Acide éthylène-diamine-tétraacétique
<b>ETM</b>	Eléments-traces métalliques
<b>Fe</b>	Fer
<b>FYP</b>	Five Year Plan
<b>Ha</b>	Hectare
<b>HAP</b>	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
<b>Hg</b>	Mercure
<b>km</b>	Kilomètre
<b>m</b>	Mètre
<b>methyl-Hg</b>	Méthylmercure
<b>mm</b>	Millimètre
<b>Ni</b>	Nickel

## Liste des abréviations

<b>PCP</b>	Phéncyclidine (1-phénylcyclohexyl-pipéridine)
<b>Sr</b>	Strontium
<b>ZNT1</b>	Zinc transporter 1

## INTRODUCTION GENERALE

La problématique de la pollution (de l'eau, de l'air ou du sol) est un fardeau environnemental qui touche plusieurs pays. Elle résulte entre autres des activités domestiques et agricoles et du développement industriel intense durant le dernier siècle dont les pratiques étaient dans bien des cas inadéquates.

Cette pollution provenant des activités humaines affecte tous les types d'organismes allant de la bactérie à l'être humain. Même les plus bas niveaux de contaminants dans l'environnement présentent un risque d'accumulation via un processus appelé bioamplification.

Jusqu'à présent, les techniques habituelles de décontamination des sols, des eaux et de l'air ( physico-chimiques, électrochimiques, membranaires ) consistaient simplement à déplacer la pollution en transportant des masses parfois considérables de déchets vers des lieux d'enfouissement. Aujourd'hui, il semble qu'une solution bien plus probante vient de la nature elle-même, c'est la phytoremédiation.

La phytoremédiation est une technique employée pour dépolluer naturellement par l'action des plantes (phyto-dépollution) différents milieux. Grâce à ce processus, on obtient :

- l'épuration des eaux usées ;
- l'assainissement de l'air ;
- la dépollution des sols.

Ainsi, la phytoremédiation est un processus de dépollution ou de décontamination qui diffère des autres techniques habituellement utilisées. Elle est considérée comme une solution d'avenir car :

- Elle permet de traiter sans aucun produit chimique des milieux pollués.
- Elle ne consiste pas en un simple déplacement des pollutions comme c'est le cas de la technique d'extraction de terre contaminée que l'on enfouit ensuite dans une autre zone.

Encore peu développées, les techniques de dépollution et d'épuration par les plantations forestières pourraient se développer dans les années à venir. Leur dimension environnementale et les avantages socio-économiques qu'elles sont censées apporter plaident en leur faveur et donc l'objectif général de la présente étude est de faire découvrir la phytoremédiation comme technique de remédiation à la contamination environnementale. En particulier, nous définiront le principe de la technique ainsi que les différents mécanismes d'action de la phytoremédiation.

Enfin, nous passerons en revue les facteurs, les performances, les avantages et les limites de la phytoremédiation avant de nous intéresser à diverses régions pratiquant cette technique.

# **CHAPITRE 1**

## **Généralités sur la phytoremediation**



## 1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous définirons la phytoremédiation comme technique de dépollution de l'eau, de l'air et du sol, nous nous étalerons sur le principe de la méthode et sur les différentes techniques utilisées et en dernier lieu nous parlerons des interactions régissant le processus.

## 1.2 Définition de la phytoremédiation

D'après P. Agnus, la phytoremédiation est définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques. C'est la dépollution des sols, l'épuration des eaux usées ou l'assainissement de l'air intérieur, utilisant des plantes vasculaires, des algues (phycoremédiation) ou des champignons (mycoremédiation), et par extension des écosystèmes qui supportent ces végétaux. Ainsi on élimine ou contrôle des contaminations. La dégradation de composés nocifs est accélérée par l'activité microbienne. L'étymologie provient du grec « phyton » = plante, et du latin « remedium » = rétablissement de l'équilibre, remédiation. La phytoremédiation n'est pas un concept nouveau puisqu'il y a 3000 ans les hommes utilisaient déjà les capacités épuratoires des plantes pour le traitement de l'eau. Depuis les années 1970 cette pratique a trouvé un regain d'intérêt notamment pour le traitement des pesticides et des métaux.

La phytoremédiation est un ensemble de technologies utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques polluants (naturels ou de synthèse) du sol, de l'eau ou de l'air provenant d'activités humaines. Cette technique permet également de traiter des pollutions inorganiques (éléments traces métalliques (ETM), radionucléides).

- **Sol** : Cette technique est utilisée pour décontaminer biologiquement les sols pollués par des métaux et métalloïdes, pesticides, solvants, explosifs, pétrole brut et ses dérivés, radionucléides et contaminants divers.
- **Eaux usées et effluents liquides** : La phytoremédiation sert également à la décontamination d'eaux chargées en matière organique ou en contaminants divers (métaux, hydrocarbures, organochlorés, pesticides). On considère alors les traitements sur sol en place (l'effluent est épandu) ou directement en milieu humide.

- **Air** : Il peut s'agir aussi de dépolluer l'air intérieur ou de recycler l'eau grâce aux plantes dépolluantes. Cet axe de recherche se développe de manière importante depuis quelques années. Le programme Phyt'air est un projet français qui réalise une étude de faisabilité pour la constitution d'un système simple de bioépuration de l'air intérieur.

### 1.3 Principe de la phytoremédiation

D'après L, Hénault-Ethier, la phytoremédiation est l'utilisation des plantes et des microorganismes qui leurs sont associés pour nettoyer l'environnement. C'est donc un ensemble de techniques in situ (pouvant être implantées directement sur le site contaminé) misant sur les plantes pour extraire, dégrader ou immobiliser les contaminants dans les sols, les sédiments, les boues ainsi que dans l'eau de surface ou souterraine et dans l'air.

Cette technologie a reçu une attention récente comme innovante, plus rentable et donc alternative aux méthodes de traitement plus établies. Il s'agit d'une technologie scientifiquement complexe ne se réduisant pas à l'ensemencement de graines.

Elle repose essentiellement sur les interactions entre les plantes, le sol et les micro-organismes. Le sol est une matrice complexe servant de support au développement des plantes et des micro-organismes qui se nourrissent des composés organiques ou inorganiques le composant. Lorsque certains de ces composés sont en excès par rapport à l'état initial du sol, ce dernier est qualifié de contaminé (cela s'applique aussi à l'eau et à l'air qui à la différence sont des fluides). Les composés en excès peuvent alors être utilisés comme source d'énergie par les plantes et les micro-organismes. Dans le système plante - sol - micro-organismes, la biodégradation bactérienne est souvent en amont de l'absorption racinaire. Plantes et micro-organismes ont coévolué pour disposer d'une stratégie à bénéfices mutuels pour gérer la phytotoxicité où les micro-organismes profitent des exsudats racinaires, lors même que la plante bénéficie des capacités de dégradation des micro-organismes pour réduire le stress dû à la phytotoxicité.

Des végétaux (supérieurs) spécifiques sont plantés sur la zone à traiter, soit directement dans un sol en place ou sur des dépôts de matériaux (sédiments curés, sols excavés ...) soit dans une unité spéciale par où va transiter un effluent ou une eau contaminée. Les familles de polluants concernés sont d'abord les métaux lourds et les hydrocarbures. Les plantes peuvent

agir de façon directe en absorbant le polluant ou de façon indirecte en activant sa dégradation dans la rhizosphère.

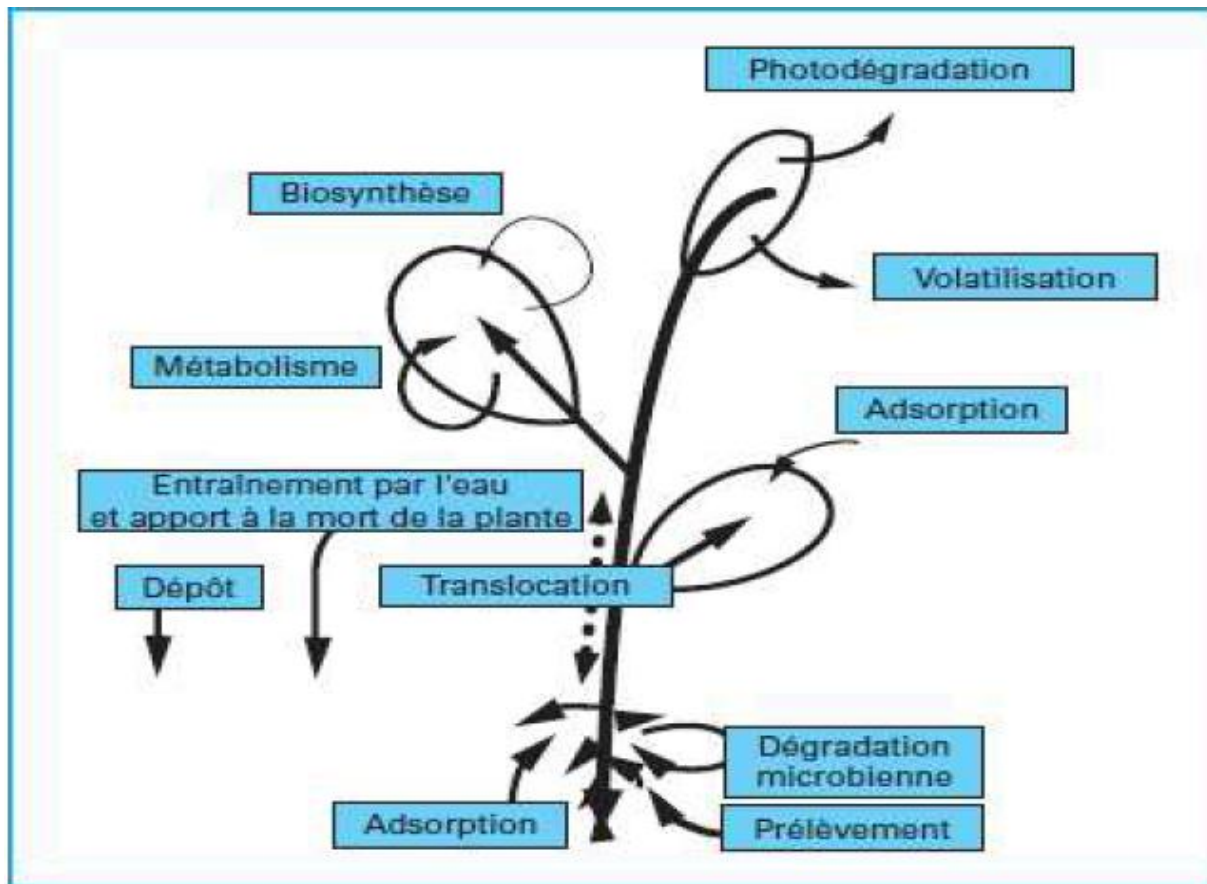


Figure 1 : Principe de la phytoremédiation [ M, Laribi., A, Zellagui ]

#### 1.4 L'effet rhizosphérique

La rhizosphère désigne le volume de sol soumis à l'influence de l'activité racinaire. Ce volume de sol est plus ou moins important et varie selon les plantes et le sol. Les processus qui se déroulent dans la rhizosphère sont essentiels pour la phytoremédiation. L'activité et la biomasse microbienne y sont beaucoup plus importantes que dans un sol sans racines. Les racines libèrent naturellement des substances dans le sol où elles se développent, par les exsudats racinaires. Ceux-ci favorisent et entretiennent le développement des colonies

microbiennes en fournissant de 10 à 20 % des sucres produits par l'activité photosynthétique de la plante (photosynthétats). De nombreux composés peuvent ainsi être libérés, par exemple, des hormones, des enzymes ainsi que de l'oxygène et de l'eau. Les micro-organismes rhizosphériques en retour favorisent la croissance de la plante (réduction des pathogènes, mise à disposition de nutriments...). En théorie, plus les racines sont abondantes plus elles fournissent une surface de développement importante pour la microfaune et microflore rhizosphériques. De fait, les exsudats racinaires favorisent la biodégradation des polluants organiques en stimulant l'activité microbienne. [Wikipédia]

### **1.5 Les différentes formes de phytoremédiation**

[ M, Laribi., A, Zellagui ]

Il existe diverses techniques de phytoremédiation, qui sont basées sur différents principes d'action (extraction, stabilisation, dégradation, volatilisation ou filtration). Même si ces processus ne sont pas mutuellement exclusifs et peuvent opérer simultanément, il convient de bien distinguer leur fonctionnement propre.

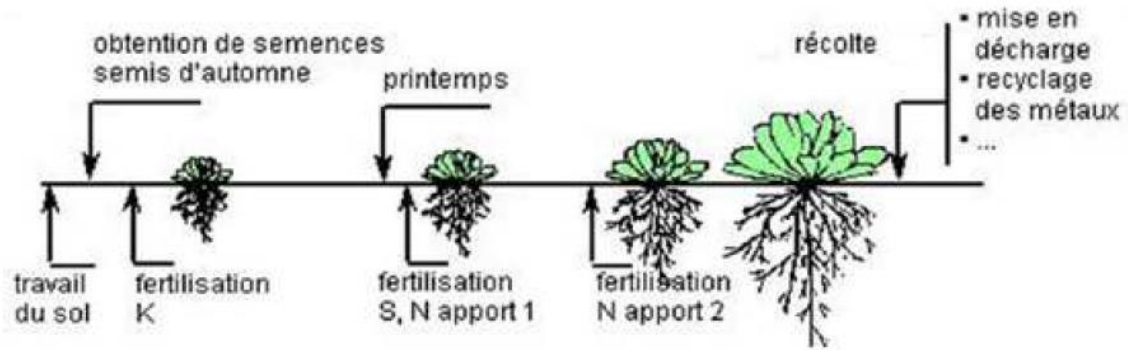
#### **1.5.1 La phytoextraction**

La Phytoextraction est l'absorption de contaminants par les racines des plantes et leur translocation dans les plantes. Cette technologie est utilisée pour les métaux lourds qui sont littéralement pompés par les plantes (qui doivent être choisies parmi les espèces qui sont capables de pousser sur des sols contaminés) et transférés ainsi du sol (à condition qu'ils soient accumulables en quantités suffisantes par les plantes sans devenir toxiques).



**Figure 2 : Principe de la phytoextraction (exemple du plomb) [ M, Laribi., A, Zellagui ]**

La phytoextraction utilise des espèces végétales sauvages *hypertolérantes* et/ou *hyperaccumulatrices* capables de prélever des métaux toxiques dans les horizons de surface des sols et de les accumuler dans leurs parties aériennes et les tissus des racines. Ces plantes hyperaccumulatrices sont endémiques de sites métallifères et ont la capacité d'accumuler des métaux à des concentrations pouvant atteindre et dans certains cas dépasser 2 % de la matière sèche des parties aériennes. Après culture, la biomasse serait récoltée et incinérée afin de réduire les volumes à traiter et de concentrer les métaux dans les cendres. Celles-ci pourraient par exemple être mises en décharge ou recyclées en métallurgie.



**Figure 3 : Phytoextraction : proposition d'itinéraire technique simplifié pour la culture de plantes hyperaccumulatrices de métaux**

[ M, Laribi., A, Zellagui ]

On dénombre actuellement plus de 400 espèces de plantes pouvant hyperaccumuler plusieurs métaux et la plupart des plantes peuvent hyperaccumuler un métal spécifique. Une plante hyperaccumulatrice peut accumuler plus de 1% d'un métal dans sa masse sèche, par exemple *Berkheya coddii* est capable d'accumuler 3,7% de Nickel dans sa masse sèche.

Les mécanismes d'hyperaccumulation reposent sur la surexpression de gènes régulant les transporteurs membranaires, on peut citer les transporteurs de cuivre COPT1 ou de zinc ZNT1. L'hyperaccumulation est principalement limitée par une faible croissance et production de biomasse, bien que des plantes hyperaccumulatrices à croissance rapide soient actuellement à l'étude. L'association des plantes à des microorganismes doit également être prise en compte, les mycorhizes à arbuscules permettant une croissance accélérée. Cependant, les rôles de ces mycorhizes dans l'accumulation est métal spécifique et extrêmement variable en fonction des espèces de mycorhizes et de plantes.

La phytoextraction peut être améliorée par l'ajout de chélateurs (par exemple l'EDTA) dans le sol pour faciliter l'absorption des contaminants ou bien être plus naturelle (dépendante uniquement des capacités physiologiques ou génétiques des plantes). Pour solubiliser les éléments-traces métalliques, les plantes peuvent acidifier la rhizosphère ou encore sécréter des ligands capables de chélater les ions métalliques. Parfois, les champignons mycorhiziens forment des symbioses avec les racines des plantes et aident à l'absorption des métaux quand les concentrations dans le sol sont faibles, et à l'inverse, peuvent aider les plantes à résister à des niveaux phytotoxiques. Par exemple, des mycorhizes sont impliquées directement dans la

séquestration et l'absorption du zinc (élément essentiel) et du cadmium (élément non essentiel) par des plantes exposées à des concentrations toxiques, augmentant ainsi le potentiel de phytoremédiation.

### 1.5.2 La phytodégradation et la rhizodégradation

Comme la phytoextraction, la phytodégradation implique l'absorption de contaminants, mais les contaminants sont ensuite dégradés par des processus métaboliques au sein de la plante.

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.

La phytodégradation est applicable à des contaminants organiques par exemple le peuplier (*Populus* spp.) est très utilisé pour la dégradation des composés organiques. Leur absorption est affectée par leur hydrophobicité, leur solubilité, et leur polarité. Les composés modérément hydrophobes et polaires sont plus susceptibles d'être "pompés" après être absorbés par les racines des plantes. Parmi les contaminants ayant un potentiel pour la phytodégradation : les solvants chlorés, herbicides, insecticides, PCP, BPC, et des munitions.

La Rhizodégradation, parfois appelée phytostimulation, biodégradation de la rhizosphère, ou bioremédiation assistée par les plantes / dégradation, est la ventilation renforcée d'un contaminant, en augmentant la bioactivité utilisant l'environnement immédiat des racines des plantes "la rhizosphère" pour stimuler les populations microbiennes.

Elle 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.

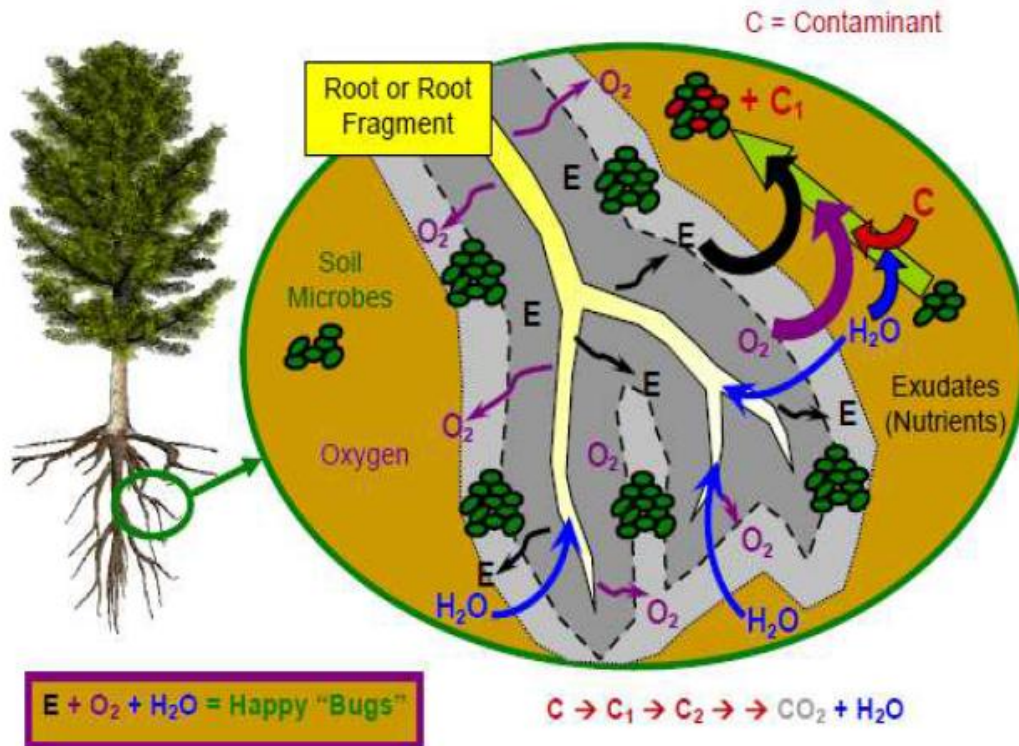


Figure 4 : Mécanisme de la rhizodégradation

[ M, Laribi., A, Zellagui ]

Cette technologie est utilisée pour augmenter la dégradation des contaminants organiques (tels que les hydrocarbures pétroliers, des HAP, pesticides, BTEX, solvants chlorés, PCP, BPC, et des surfactants) dans le sol. Le terme vient de «rhizosphère», qui est la zone de sol influencée par les racines des plantes. Cette zone s'étend d'environ 1 mm de chaque racine.

### 1.5.3 La phytovolatilisation

Les plantes absorbent l'eau de la lithosphère contenant des contaminants organiques et autres produits toxiques, transforment ceux-ci en éléments volatils, et les relâchent dans



l'atmosphère via leurs feuilles. Elles peuvent aussi dans certains cas transformer des contaminants organiques en éléments volatils avant de les transférer dans l'atmosphère - toujours via les feuilles.

On peut citer l'exemple de la volatilisation du trichloréthylène par conversion en chlorure d'acétates et en dioxyde de carbone par des peupliers hybrides.

Les métaux tels que le sélénium (Se) peuvent être volatilisés par transformation en dimethylselenide [Se(CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>].

Les capacités de volatiliser des contaminants peuvent également être induites par ingénierie génétique, par exemple la capacité de volatilisation du methyl-Hg du tulipier (*Liriodendron tulipifera*) dans l'atmosphère sous forme d'Hg par introduction du gène codant l'enzyme merA (mercuric ion reductase) d'*E.coli*.

La phytovolatilisation n'est pas toujours satisfaisante, car si elle décontamine les sols elle libère parfois des substances toxiques dans l'atmosphère. Dans d'autres cas plus satisfaisants, les polluants sont dégradés en composants moins - ou non-toxiques avant d'être libérés.

### 1.5.4 La phytostabilisation

Dans la phytostabilisation, les plantes réduisent la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol ou la rhizosphère, par immobilisation chimique (précipitation, stabilisation, absorption ou piégeage) ou prévention des mouvements latéraux ou en profondeur via l'érosion ou le lessivage.

Elle a pour but de retenir les contaminants et d'éviter leur dispersion, ceux-ci sont ainsi stabilisés dans les racines ou dans la rhizosphère. Cette technique est relativement courante pour les anciennes mines grâce à des variétés de plantes résistantes aux métaux telles que *Agrostis tenuis* cv, *Festuca rubra* cv, *Goginan* cv ou *Parys*. Ces résistances souvent augmentées grâce à une symbiose, colonisant les racines comme les mycorhizes à arbuscules via séquestration des métaux dans les hyphes fongiques. Les mycorhizes à arbuscules peuvent

également excréter des glycoprotéines, les glomulines via les hyphes, complexant les métaux contenus dans le sol.

La phytostabilisation empêche ainsi la dispersion des contaminants dans les eaux de surface et souterraines. Une couverture terrestre végétale minimise l'érosion éolienne ou aqueuse, ainsi que le contact direct entre les animaux et les polluants. Les plantes peuvent minimiser la formation de lixiviat contaminé et limiter la migration d'un panache (ou masse) de contaminants dissous dans l'eau souterraine. Pour éviter que les contaminants ne soient éventuellement relargués dans l'environnement, la phytostabilisation exige un suivi à long terme. Durant la phytostabilisation, il peut y avoir conversion des polluants sous des formes moins biodisponibles, par exemple, lorsque ceux-ci précipitent dans la rhizosphère.

Les microorganismes du sol peuvent diminuer les effets toxiques des contaminants. Par exemple, des exsudats peptidiques chez la bactérie *Pseudomonas putida* diminuent la toxicité de Cadmium pour les plantes. Des processus de conversion en une forme moins toxique peuvent entrer en jeu : par exemple la conversion du Chrome Cr(III) en Chrome Cr(VI) par des acides organiques contenus dans le sol. On peut également diminuer la disponibilité de ces contaminants notamment via des agents chélateurs excrétés par les racines et complexant les métaux contenus dans la rhizosphère. Un mécanisme équivalent pour les plantes aquatiques consiste en l'excrétion d'oxygène par l'aérenchyme racinaire qui a pour effet de précipiter les ions fer sous forme de plaque métallique, agissant comme réservoir de Fe<sup>2+</sup> pour l'exemple du fer.

Les plantes peuvent également excréter des biosurfactants augmentant l'import en contaminants dans la plante, permettant une décontamination plus rapide des sols.

### **1.5.5 La phytorestauration**

Cette technique implique la restauration complète de sols pollués vers un état proche du fonctionnement d'un sol naturel. Cette subdivision de la phytoremédiation utilise des plantes indigènes de la région où sont effectués les travaux de phytorestauration. Ceci dans le but d'atteindre la réhabilitation entière de l'écosystème naturel originel, du sol aux communautés végétales. Comme le souligne Peer *et al.* (2005), en comparaison des autres techniques de phytoremédiation, la phytorestauration met en lumière la question du niveau de

décontamination nécessaire et suffisant. Il existe une grande différence entre décontaminer un sol pour atteindre un niveau légalement satisfaisant pour qu'il soit à nouveau exploitable et restaurer totalement un espace pour qu'il revienne à des conditions de pré-contamination. Lorsque l'on fait référence à la phytorestoration des eaux usées, on parle d'un procédé récent ayant trait à l'utilisation des propriétés naturelles d'autoépuration des végétaux (Dabouineau *et al.*, 2005). Utilisé dans ce sens, la phytorestoration devient synonyme du terme phytoépuration. Ce type de procédé intègre notamment l'épuration des eaux par les macrophytes. Dans ce cas, ce sont les bactéries vivant dans la zone racinaire des macrophytes qui sont garantes de la dépollution, les plantes servent là simplement de substrat de croissance pour les microorganismes.

### **1.5.6 La phytofiltration (rhizofiltration)**

La rhizofiltration ou rhizoépuration (pour l'épuration de l'eau) permet de traiter les eaux usées municipales ou industrielles, le ruissellement de surface ou l'eau qui s'infiltré dans le sol en zone agricole, le lixiviat des mines et des sites d'enfouissement, ou encore la contamination de l'eau souterraine. Les contaminants visés incluent les éléments-traces métalliques, les radionucléides, le sélénium, les nutriments, certains composés organiques comme les pesticides, ou encore le drainage minier acide. La rhizofiltration peut utiliser des plantes aquatiques ou des plantes terrestres, et parfois une combinaison d'espèces ayant des propriétés complémentaires.

La rhizofiltration repose souvent sur des systèmes en réacteur (flow-through) qui maximisent le contact entre l'eau et les racines, et minimisent ainsi la durée du traitement. La rhizofiltration peut prendre la forme d'un étang artificiel ou d'un système hydroponique.

Les systèmes intérieurs sont souvent plus coûteux alors leur utilisation est restreinte à des applications ayant de faibles volumes à traiter ou encore à des applications bien ciblées, comme l'enlèvement des éléments radioactifs. La rhizofiltration peut aussi limiter la diffusion horizontale des contaminants dans l'eau souterraine si l'on positionne les plantes pour faire une barrière hydraulique, afin que les plantes succionnent l'eau du sol et limitent le mouvement des polluants dans l'eau. La rhizofiltration peut être exploitée par exemple dans des systèmes de bandes riveraines.

### **1.5.7 La phytostimulation**

Localisée essentiellement dans la rhizosphère, c'est la stimulation par les plantes des activités microbiennes favorables à la dégradation des polluants. Cet aspect, quand il a été étudié, a été constaté chez tous les hyperaccumulateurs.

### **1.6 Hyperaccumulation et interactions biotiques**

Les plantes sélectionnées en phytoextraction sont choisies pour leur capacité à extraire des volumes importants de polluants. Elles sont appelées plantes hyper-accumulatrices, ou hyperaccumulateurs. Les caractéristiques communes aux hyperaccumulateurs sont souvent : une pousse rapide ; des végétaux résistants, faciles à planter et à maintenir ; une grande capacité pour l'évapotranspiration (évaporation de l'eau par les feuilles) ; et la capacité de transformer les contaminants concernés en des produits non toxiques ou moins toxiques. Parmi les plantes les plus utilisées, on trouve les peupliers, qui réunissent rapidité de croissance, grande adaptation climatique, et capacité à absorber de grandes quantités d'eau (relativement à d'autres espèces). Cette dernière qualité leur permet de traiter de plus grandes quantités de polluants dissous, ainsi que de limiter la quantité d'eau passant au-delà de la zone contaminée limitant donc aussi la propagation de la contamination.

En 1999 Reeves et al listent 320 espèces accumulatrices provenant de 43 familles. Leur nombre est beaucoup plus élevé: par exemple, à ce jour on connaît environ 300 hyperaccumulateurs de nickel. Des centres de diversité se présentent à Cuba (climat subtropical) et Nouvelle-Calédonie (climat tropical). De nombreuses espèces étudiées pour leur accumulation de métaux sont des Brassicaceae (climat tempéré et froid, hémisphère nord).

L'équipe de recherche d'Abdelhak El Amrani sur le mécanisme à l'origine de la biodiversité, de l'université de Rennes, a travaillé sur plusieurs polluants, en particulier sur l'herbicide atrazine. Ces chercheurs ont découvert un mécanisme dans les plantes qui permet à celles-ci de se développer même quand la concentration de pollution de leur sol est normalement létale pour une plante non traitée. C'est la présence de certains composés

naturels biodégradables simples comme des polyamines exogènes, qui permet aux plantes de tolérer des concentrations de polluants 500 fois supérieures par rapport aux plantes témoins, mais aussi d'absorber davantage de polluants. Ce traitement amène des changements dans l'expression génétique des plantes, impliquant des gènes connus dans le processus de résistance au stress environnemental. La technique génétique a été brevetée par l'université de Rennes.

Une plante est dite hyperaccumulatrice si elle peut concentrer le ou les polluants selon un pourcentage minimum variant selon le polluant concerné par exemple : plus de 1 mg/g de matière sèche pour le nickel, cuivre, cobalt, chrome ou plomb; ou plus de 10 mg/g pour le zinc ou le manganèse. La plupart des 215 hyperaccumulateurs cités par Baker et Brooks concernent le nickel. Ils ont listé 145 hyperaccumulateurs de nickel, 26 de cobalt, 24 de cuivre, 14 de zinc, quatre de plomb, et deux de chrome. Cette capacité d'accumulation est due à l'hypertolérance, ou phytotolérance : résultat de l'évolution adaptative des plantes à des environnements hostiles au cours de multiples générations. Boyd et Martens listent 4 interactions biotiques pouvant être affectées par l'hyperaccumulation de métal.

### 1.6.1 Protection

Des résultats d'expériences indiquent que les métaux dans les hyperaccumulateurs ont un rôle de protection au moins partiel pour les plantes envers un certain nombre d'organismes (bactéries, fungi, insectes).

La défense contre les virus n'est pas toujours améliorée par la présence de métaux. Davis *et al* ont comparé deux espèces voisines *S. polygaloides* Gray (hyperaccumulateur de nickel) et *S. insignis* Jepson (non-accumulateur), les inoculant avec le virus Turnip mosaic. Ils ont ainsi démontré que la présence de nickel affaiblit la réponse des plantes au virus. Les défenses élémentaires des plantes sont circonvenues par leurs prédateurs de trois façons :

- a. Nourrissement sélectif sur des tissus à concentration en métaux peu élevée
- b. Régime varié pour diluer le métal (vraisemblable pour les herbivores de grande taille relativement aux plantes)
- c. Tolérance de hautes concentrations de métal

- **Régime alimentaire sélectif**

Les aphides du pois (*Acyrtosiphon pisum* (Harris); *Homoptera: Aphididae*) se nourrissant du phloème de *Streptanthus polygaloides* Gray (*Brassicaceae*) et ont des taux de survie et de reproduction égaux sur des plantes contenant environ 5 000 mg/kg de nickel amendé avec NiCl<sub>2</sub> (Chlorure de nickel), et sur celles contenant environ 40 mg/kg de nickel. Ainsi, soit le phloème est pauvre en nickel même chez les hyperaccumulateurs de nickel, ou bien les aphides tolèrent de hautes doses de nickel.

- **Tolérance pour le métal**

Hopkin (1989) et Klerks (1990) l'ont démontrée pour les espèces animales ; Brown & Hall pour les espèces fongales; et Schlegel & al. (1992) et Stoppel & Schlegel (1995) pour les espèces bactériales.

*Streptanthus polygaloides* (*Brassicaceae*) peut être parasité par *Cuscuta californica* var. *breviflora* Engelm. (*Cuscutaceae*). Les plantes de *Cuscuta* ainsi découvertes contenaient entre 540 et 1 220 mg de Ni/kg de poids sec, soit (un maximum de) 73 fois le contenu en nickel des plantes de *Cuscuta* parasitant des plantes d'une autre espèce locale non-accumulatrice. Boyd & Martens estiment ceci comme la première instance documentée de transfert des défenses élémentales d'un hôte hyperaccumulateur à une plante parasitante.

### 1.6.2 Interférences avec des plantes voisines d'espèces différentes

Baker & Brooks (1989) en ont mentionné la possibilité mais n'ont pas offert de mécanisme explicatif. Gabrielli *et al.* (1991), et Wilson & Agnew (1992), ont suggéré une baisse de compétition expérimentée par les hyperaccumulateurs de par la litière de leurs feuilles.

Ce mécanisme mimique l'allélopathie, bien que l'effet soit dû ici à une redistribution d'un élément dans le sol plutôt qu'à la plante manufacturant un composé organique.

Boyd et Martens appellent ceci allélopathie élémentale sans le problème d'autotoxicité démontré dans d'autres cas d'allélopathie (Newman 1978).

Le taux de métal dans les sols est clairement plus élevé aux alentours des hyperaccumulateurs. L'hypothèse d'allélopathie élémentaire nécessite de démontrer que ces taux élevés inhibent les autres espèces serpentine.

### 1.6.3 Mutualisme

Deux types de mutualisme sont considérés ici:

- associations mycorhizales ou mycorrhizae
- dispersion du pollen et des graines.

#### ❖ Associations mycorhizales ou mycorrhizae

Il y a deux types de champignons mycorhizaux : les ectomycorhizaux et les endomycorhizaux. Les champignons ectomycorhizaux forment des fourreaux autour des racines; les champignons endomycorhizaux pénètrent les cellules du cortex dans les racines.

Les associations mycorhizales sont les relations symbiotiques entre les fungi et les racines des plantes. Certains hyperaccumulateurs peuvent former des associations mycorhizales, et dans certains cas le champignon mycorrhizal peut jouer un rôle dans le traitement du métal. Dans les sols à taux en métaux bas, les mycorrhizae vésiculaires et arbusculaires augmentent l'absorption de métal des espèces non accumulatrices. D'un autre côté certaines mycorrhizae augmentent la tolérance aux métaux en diminuant l'absorption du métal chez certaines espèces non-accumulatrices. Ainsi l'association mycorhizale aide *Calluna* à éviter la toxicité du cuivre et du zinc. La plupart des racines nécessitent environ 100 fois plus de carbone que l'hyphae des fungi associés pour couvrir le même volume de sol. C'est pourquoi il est plus facile pour l'hyphae que pour les plantes d'acquérir des éléments à mobilité réduite, comme le césium-137 et le strontium-90.

Les champignons mycorhizaux dépendent des plantes hôtes pour leur carbone, tout en permettant aux plantes d'absorber les nutriments et l'eau plus efficacement. Le fungus facilite la prise de nutriments pour les plantes, tandis que celles-ci leur fournissent des composés organiques riches en énergie. Certaines espèces de plantes normalement symbiotiques avec des champignons micorhizaux peuvent exister sans l'association; mais le champignon améliore grandement la croissance de la plante. Du point de vue de l'énergie dépensée,

héberger des champignons est beaucoup plus effectif pour la plante que de produire des racines.

La famille des *Brassicaceae* formerait peu d'associations micorrhizales. Cependant, Hopkins (1987) note du mycorrhizae associé à *Streptanthus glandulosus* Hook. (*Brassicaceae*), un non-accumulateur. Les terres serpentines sont peuplées de champignons tolérant des taux de métaux généralement élevés dans ces sols. Certains de ces fungi sont micorhizaux.

L'absorption de radionucléides par les fungi dépend de leur mécanisme nutritionnel (mycorhizal ou saprophyte). *Pleurotus eryngii* absorbe mieux le Cs que le Sr et le Co, tandis que *Hebeloma cylindrosporum* favorise Co. Mais augmenter la quantité de K augmente l'absorption de Sr mais non celle de Cs. De plus, la teneur en Cs décroît avec *Pleurotus eryngii* (mycorhizal) et *Hebeloma cylindrosporum* (saprophyte) si la dose de Cs est augmentée, mais la teneur en Sr augmente si la dose de Cs est augmentée, ceci indiquerait que l'absorption est indépendante du mécanisme nutritionnel.

### ❖ Dispersion du pollen et des graines

Certains animaux obtiennent de la nourriture des plantes (nectar, pollen, ou pulpe de fruit - Howe & Westley 1988). Les animaux se nourrissant d'hyperaccumuleurs à concentration en métal élevée, doivent soit être tolérants soit en diluant la concentration de métal en mélangeant la nourriture avec d'autres sources à teneur en métal moindre. Alternativement, les hyperaccumulateurs peuvent dépendre pour la dispersion de leurs graines, de vecteurs abiotiques ou de vecteurs animaux non-mutualistes, mais nous manquons d'informations sur ces mécanismes de dispersion en ce qui concerne les hyperaccumulateurs.

Jaffré & Schmid 1974; Jaffré *et al.* 1976; Reeves *et al.* 1981; ont étudié le taux de métal dans les fruits et les fleurs entiers. Ils ont généralement trouvé des taux importants de métaux dans ceux-ci. Baker *et al.* (1992) ont trouvé une exception avec *Walsura monophylla* Elm. (*Meliaceae*), originaire des Philippines et montrant 7000 mg/kg Ni dans les feuilles mais seulement 54 mg/kg dans les fruits. Certaines plantes possèdent donc un mécanisme qui exclut les métaux ou autres contaminants de leurs structures reproductrices.



#### 1.6.4 Commensalisme

Le commensalisme est une interaction bénéfique à un organisme tout en ayant une valeur neutre pour un autre. La plus vraisemblable pour les hyperaccumulateurs est l'épiphytisme. Mais on trouve ce phénomène le plus couramment dans les forêts tropicales, et les études conduites dans de tels habitats n'ont porté que peu d'attention sur ce point. (e.g, Proctor *et al.* 1989; Baker *et al.* 1992). Proctor *et al.* (1988) ont étudié l'arbre *Shorea tenuiramulosa*, qui peut accumuler jusqu'à 1000 mg Ni /kg de poids sec dans ses feuilles. Ils ont estimé la couverture d'épiphytes en Malaisie, mais n'ont pas rapporté les valeurs pour les espèces individuelles. Boyd *et al.* (1999) ont étudié l'occurrence d'épiphytes sur les feuilles du buisson tropical hyperaccumulatif en Ni *Psychotria douarrei* (Beauvis.). La quantité d'épiphytes augmente considérablement avec l'âge de la feuille, jusqu'à 62 % pour les plus vieilles feuilles. Un exemplaire épiphytique de leafy liverworts venant d'une feuille de *P. douarrei*, contenait 400 mg Ni /kg poids sec. Des doses élevées de Ni n'empêchent donc pas la colonisation de *Psychotria douarrei* par les épiphytes.

Les composés chimiques qui interviennent dans les interactions hôte-épiphyte sont plus susceptibles d'être localisés dans les tissus les plus externes de l'hôte (Gustafsson & Eriksson 1995). De plus, la plupart du métal s'accumule dans les parois des cellules ou vacuoles épidermales ou subépidermales (Ernst & Weinert 1972; Vazquez *et al.* 1994; Mesjasz- Rzybylowicz *et al.* 1996; Gabrielli *et al.* 1997). Ceci suggère que les épiphytes subiraient des taux de concentration de métaux plus élevés lorsqu'ils poussent sur des feuilles d'hyperaccumulateurs. Mais Severne (1974) a mesuré l'évacuation de métal par les feuilles pour l'hyperaccumulateur de nickel *Hybanthus floribundus* (Lindl.) F. Muell. (*Violaceae*), originaire d'Australie occidentale; il conclut que les feuilles ne relâchent pas facilement le nickel.

En principe une autre interaction commensale pourrait exister si le taux élevé de métal dans le sol était nécessaire pour qu'une autre espèce de plantes puisse s'installer. Aucune évidence n'est jusqu'à présent allée dans ce sens.

## **1.7 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis d'acquérir des notions de base sur la phytoremediation et de mieux comprendre le principe de fonctionnement de la méthode pour pouvoir évoquer ses différentes applications dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE 2**

# **Applications de la phytoremediation**

### 2.1 Introduction

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

Dans ce chapitre nous évoquerons ces différentes applications, leurs avantages et limites ainsi que les régions pratiquant cette nouvelle technique de dépollution.

### 2.2 Les contaminants ciblés

Selon Environmental Protection Agency des Etats Unis les différents mécanismes de la phytoremédiation peuvent traiter une large gamme de contaminants, comprenant les métaux, les COV, les HAP, les hydrocarbures pétroliers, les radionucléides et les munitions, mais tous les mécanismes ne sont pas applicables à tous les contaminants

#### 2.2.1 Les métaux lourds

D'après l'article de FYP sur la phytoremédiation des métaux lourds il existe environ 400 espèces de plantes qui 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.

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.

#### 2.2.2 Les hydrocarbures

Des études ont montré que certaines plantes étaient capables d'absorber et de transformer des polluants organiques tels que les hydrocarbures. Cette technique est appelée

phytodégradation et s'applique principalement dans le cas des hydrocarbures. En plus de l'absorption et du métabolisme des hydrocarbures, les plantes secrètent aussi des exsudats racinaires qui stimulent la biorémediation appelée phytodégradation ex planta ou encore phytostimulation.

La plante a la capacité d'exporter l'hydrocarbure polluant vers ses parties aériennes, où celui-ci sera dégradé en substances moins toxiques ou non-toxiques et parfois utilisé dans la synthèse d'éléments nécessaires à la plante. Ces plantes prélèvent de forts taux de polluants de leurs milieux sans pour autant les utiliser dans la synthèse de leurs protéines. Ils les stockent donc parfois et les dégradent par la suite. Comme pour la phytoextraction, on installe donc un couvert végétal sur le site à traiter. Ces plantes peuvent rester longtemps sur le site sans renouvellement car, à la différence des métaux lourds, elles ne sont pas récoltées (le polluant est transformé). On peut aussi ajouter des chélateurs pour augmenter la capacité d'absorption des plantes. Cependant, contrairement aux métaux lourds, peu de résultats concernant la dépollution des hydrocarbures sont actuellement disponibles.

Le tableau suivant indique les applications de la phytoremédiation et fournit la technologie de phytoremédiation appropriée pour les différents types de contaminants :

**Tableau 1 : Principaux contaminants cibles de la phytoremediation et avancement des technologies [ M, Laribi., A, Zellagui ]**

<b>Technologie/ contaminant</b>	Phytoextraction	Phytostabilisation	Rhizodégradation	Phytodégradation	Phytovolatilisation
Solvants Chlorés	<b>T</b>		<b>P</b>	<b>S</b>	<b>T</b>
Métaux	<b>P</b>	<b>P</b>			<b>T(Hg)</b>
Métalloïdes	<b>T</b>	<b>T</b>			<b>S</b>
Munitions			<b>S</b>	<b>S</b>	
Non- Métaux	<b>T</b>				
HAP			<b>P</b>		
PCB			<b>T</b>		
Pesticides			<b>P</b>	<b>P</b>	<b>T</b>
Hydrocarbures Pétroliers	<b>T</b>		<b>P</b>	<b>P</b>	<b>T</b>
Radionucléïdes	<b>S</b>	<b>S</b>			

Les lettres indiquent le stade d'avancement de chaque technologie :

**T** : La technologie est au stade de développement théorique.

**S** : Application dans des serres ou en laboratoire.

**P** : Application à l'échelle pilote ou à grande échelle.

### **2.3 Les végétaux utilisés**

Selon Labrecque, M si la phytoremédiation est la solution choisie, il faudra sélectionner des plantes qui ont des qualités exceptionnelles pour tolérer ou concentrer des polluants qui pourraient normalement être toxiques pour d'autres types de plantes. Le choix des plantes

dictera ensuite certains aspects liés à la préparation et à l'entretien du site durant la phytoremédiation.

Les plantes envisagées pour la dépollution doivent avoir une croissance rapide, une forte production de biomasse et être compétitives vis-à-vis des plantes endogènes du site. Elles doivent être aussi tolérantes à la pollution pour permettre une extraction optimale du polluant. Les plantes seront choisies en fonction de leurs propriétés (densité du couvert racinaire) en relation avec le type de mécanisme envisagé pour dépolluer.

Dans le cas d'une phytoextraction de métaux lourds, les plantes envisagées sont celles qui ont les niveaux d'absorption les plus forts, de translocation et d'accumulation dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées.

Pour les mécanismes de phytodépollution en général, les plantes ayant un système racinaire large et dense sont privilégiées car elles ont une plus grande capacité d'absorption et elles explorent une plus vaste zone de sol. Pour un mécanisme de phytodégradation, il est préférable que les plantes synthétisent de grandes quantités d'enzymes de dégradation.

Plusieurs espèces sont connues depuis longtemps, mais de nouvelles plantes adaptées spécifiquement à certains sites peuvent être trouvées en inventoriant les terrains contaminés.

### **2.4 Facteurs affectant la phytoremédiation**

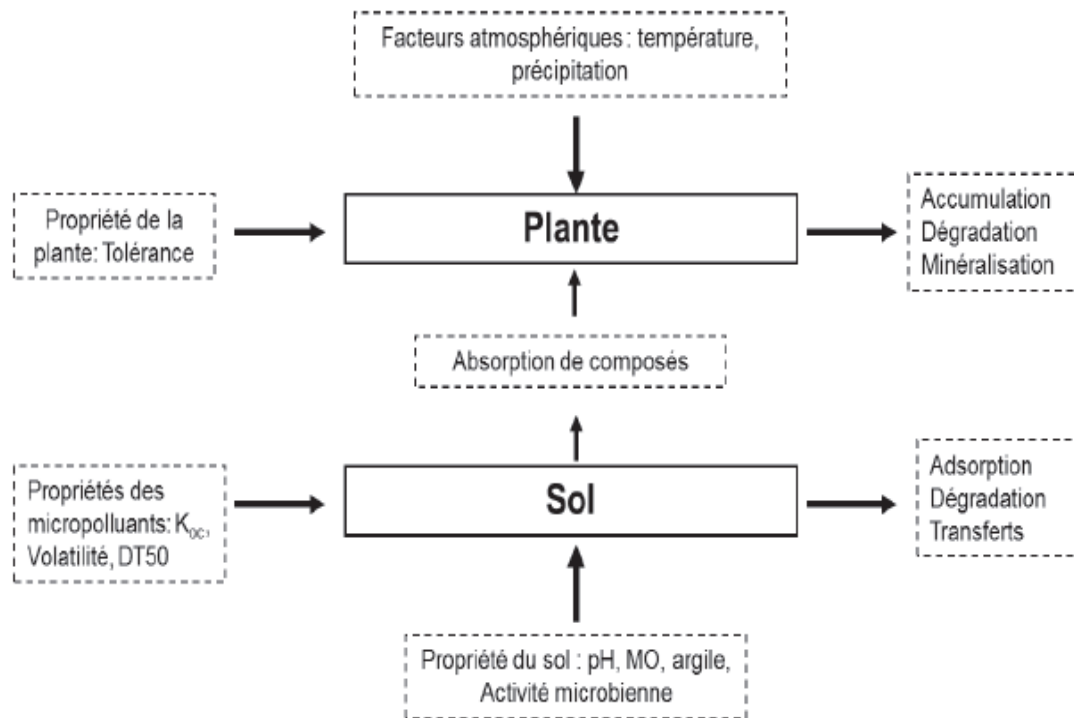
Pour pouvoir dépolluer des sols, les plantes et les micro-organismes qui leur sont associés doivent être en contact avec le polluant. Le devenir d'un polluant dans le système sol-plante est donc déterminé par sa biodisponibilité qui dépend d'un ensemble de caractéristiques physicochimiques de la molécule et d'interactions complexes de celle-ci avec le milieu et est définie comme suit : *"la biodisponibilité correspond au degré avec lequel un composé chimique présent dans le sol peut être absorbé et métabolisé par l'homme ou un récepteur écologique ou être disponible pour interagir avec des systèmes biologiques"* . Les caractéristiques environnementales couplées aux propriétés physico-chimiques du polluant et aux caractéristiques du récepteur écologique déterminent la biodisponibilité du polluant dans le sol. Les facteurs affectant l'adsorption des produits chimiques dans le sol, leur absorption et leur distribution dans la plante sont :

- **Les propriétés physico-chimiques du composé** comme la solubilité, la tension de vapeur, le poids moléculaire.
- **Les caractéristiques environnementales** comme la température, le pH, la matière organique et l'humidité du sol qui peuvent influencer la croissance de la plante et l'activité des microorganismes susceptibles de dégrader les micropolluants.
- **Les caractéristiques du végétal** telles que le type de système racinaire et les enzymes impliquées dans le processus de phytodépollution

Tous ces facteurs n'agissent pas au même niveau pour modifier la biodisponibilité. Ils peuvent avoir un rôle dans l'interaction sol-eau et/ou eau-plante et jouer un rôle important dans le devenir du polluant au cours d'un processus de phytodépollution.

Une plante serait intéressante pour la dépollution si elle est capable de stabiliser les ETM et sécréter les exsudats afin de stimuler les microorganismes qui vont dégrader les polluants organiques dans les sols. La plante doit aussi être capable d'absorber des concentrations élevées en polluants organiques et métalliques, de les transformer par activités enzymatiques. Pour la phytoextraction, la plante envisagée doit avoir un niveau élevé d'absorption, de translocation et d'accumulation dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées (Meagher et Heaton, 2005). Ces interactions sol-plante peuvent influencer la biodisponibilité des polluants organiques et/ou métalliques (figure 5).





**Figure 5 : Dynamique des polluants organiques et métalliques dans un système sol-plante, influence des différents facteurs impliqués**

## 2.5 Avantages de la phytoremédiation

- Coûts de traitement modérés par rapport aux autres technologies de traitement
- Traitement de contamination de grande superficie
- Technologie visuellement attractive
- plantes facilement surveillées
- Faible perturbation du milieu contaminé
- Bonne image auprès du public
- Exploitation des végétaux produits et récupération de métaux de valeur par des entreprises qui se spécialisent dans le « phytominage »
- C'est la méthode la moins destructrice car elle utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement (micro-organismes, animaux et structure du

sol) (contrairement à l'emploi de procédés chimiques, il n'y a pas d'impacts négatifs sur la fertilité des sols)

## 2.6 Limites de la phytoremediation

- La phytoremédiation est limitée à la surface et la profondeur occupées par les racines (noter que de nombreux polluants à base de métaux restent aussi dans la couche de sol supérieure)
- Croissance lente et biomasse faible demandent un investissement en temps assez important, ou/et parfois l'adjonction de chélateurs ou autres substances (pour les pollutions inorganiques comme les ETM)
- Procédé dépendant de la météorologie, des attaques des insectes, des microorganismes et substances phytopathogènes
- Superficie des sites suffisamment importante pour l'utilisation des techniques agricoles
- On ne peut pas, avec des systèmes de remédiation à base de plantes, totalement empêcher l'écoulement des contaminants dans la nappe phréatique (ceci n'est possible qu'au prix de l'enlèvement complet du sol, ce qui ne résout pas le problème de contamination du sol ni les problèmes afférents)
- Le niveau et le type de contamination influence la phytotoxicité des polluants. Dans certains cas, la croissance ou la survie des plantes peut être réduite
- Bioaccumulation possible de contaminants passant dans la chaîne alimentaire, du niveau des consommateurs primaires à ceux du niveau secondaire. Il est essentiel de disposer des plantes de façon responsable, et de ne pas consommer des plantes utilisées pour nettoyer un terrain

## 2.7 Régions pratiquant la phytoremediation

- Honfleur (France, Normandie) : technique des jardins filtrants dépolluant par phytolixiviation des métaux lourds dissous accumulés par phytofixation dans des casiers filtrants successifs.
- Bègles (France, Gironde)

- Rønne (Danemark)
- Suzhou (Chine, Jiangsu)
- Fuyang (Chine, Zhejiang)
- Wuhan (Chine, Hubei) : écoquartier « zéro rejet » dont les eaux usées sont réutilisées pour la consommation non-humaine (lavage des voitures, arrosage des jardins, etc.)

Il est également possible d'utiliser ces techniques dans un jardin à l'échelle individuelle pour les eaux usées, à condition d'avoir un comportement responsable en triant ses déchets, et de manger plutôt bio. Cette pratique est utilisée individuellement dans de nombreux pays dans des maisons autonomes. En France on peut citer la maison de démonstration dite *Earthship* (« vaisseau terrestre ») nouvellement construite en Normandie.

### 2.8 Quelques expériences en matière de phytoremédiation

#### 2.8.1 La France

L'expérience française en matière de phytoremédiation reste essentiellement expérimentale, aussi bien les recherches en laboratoire que les applications sur le terrain. Quelques laboratoires, en majorité rattachés aux universités, travaillent sur le sujet et les applications sur le terrain ne concernent que quelques polluants, pour la plupart des métaux lourds. Il s'agit entre autres du *Laboratoire Sol et Environnement* de l'École Nationale Supérieure d'Agronomie et des Industries Alimentaires (ENSAIA) de Nancy, qui développe des recherches dont l'objectif est d'identifier des végétaux adaptés à la phytoremédiation et de décrire leur fonctionnement. D'autres structures comme le Laboratoire d'Ecologie Microbienne de l'Université de Lyon, le Laboratoire de Chimie de Coordination du CNRS et de l'Université de Toulouse, l'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) de Bordeaux, l'Institut Supérieur d'Agriculture (ISA) de Lille, l'École des Mines de Douai, la Direction Régionale de l'Industrie et de la Recherche Environnementale (DRIRE) du Nord-Pas-de-Calais (dont les activités sont reprises depuis 2010 par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement – DREAL) et le Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique de l'Université de Grenoble, développent aussi des projets de phytoremédiation en laboratoire et sur le terrain dans des parcelles expérimentales.

L'ISA de Lille s'investit plus spécifiquement dans la phytostabilisation des sols, et l'Université de Montpellier 2 dans la phytoremédiation pour la production de molécules à destination de l'industrie pharmaceutique.

Les autres acteurs, tels que le Centre National de Recherche sur les Sites et Sols Pollués (CNRSSP) dans la région du Nord-Pas-De-Calais, participent aussi activement au développement de la technique. En effet, le CNRSSP et d'autres acteurs régionaux articulent leurs recherches et expérimentations sur la phytostabilisation de sédiments de curage. La région Nord-Pas-De-Calais est à la pointe par rapport à d'autres régions françaises grâce aux efforts conjugués des acteurs publics et privés pour des recherches en matière de phytoremédiation. C'est ainsi que des entreprises spécialisées dans la dépollution, comme Apinor, développent un secteur Recherche et Développement en phytoremédiation et la Région soutient aussi à travers le Programme de Recherche Concertée (PRC) des projets liés à la phytoremédiation. Des associations comme Environnement et Développement Alternatif (EDA) expérimentent sur le site d'Auby dans le département du Pas-de-Calais la dépollution par phytoextraction. Cette ferme expérimentale créée à l'initiative de l'association est consacrée à la dépollution des sols sur le périmètre du Projet d'Intérêt Général (PIG) de Métaleurop. Elle est financée à 50 % par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et la Région et à 50 % par les fonds du programme d'initiative communautaire INTEREG, instrument de la politique régionale qui finance les projets. La ferme expérimentale permet aux chercheurs nationaux et régionaux de réaliser des expériences de dépollution, accueille des étudiants et constitue une véritable banque de données sur la pollution des sols.

Par ailleurs, d'autres acteurs privés tels que des entreprises développent en interne des méthodologies de dépollution par la phytoremédiation, à l'exemple des multinationales Veolia et Total. Veolia par sa filiale GRS VALTECH expérimente en partenariat avec le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) un procédé de phytoremédiation sur les sols pollués par des épandages de boues. Cette technique est déjà utilisée en France pour la végétalisation des pistes de ski (Hassid et al, 2007). Le groupe Total quant à lui, expérimente depuis six ans un traitement par phytoremédiation sur son site de Vendin-Le-Veil dans le département du Pas-De-Calais. Cette expérimentation fait suite aux résultats prometteurs des

analyses réalisées par le « Groupement de Recherche de Lacq » (GRL) Total-ARKEMA situé à Lacq dans le département des Pyrénées Atlantiques. [N, Origo., S, Wicherek., M, Hotyat].

### 2.8.2 Le Gabon

Aucune politique n'est mise en place au Gabon pour développer l'usage de la phytoremédiation dans le traitement des sites pollués. Cette technique reste essentiellement expérimentale et n'est utilisée que par des acteurs privés tels que Total Gabon pour la réhabilitation de ses sites pollués. Aucun programme universitaire ou coordonné par un organisme public n'existe. Les expérimentations isolées, notamment celle sur les borbiers de torchage de l'Île Mandji, prouvent que cette technique est prometteuse. L'Île Mandji, berceau de l'activité pétrolière au Gabon, enregistre un nombre croissant de sites pollués accompagnant la baisse de l'activité pétrolière. On note alors une timide mutation économique avec une reconversion vers les activités artisanales (pêche essentiellement) et agricoles (surtout maraîchères). Cette mutation économique, couplée à la proximité entre habitat humain et sites pollués, nécessite le développement d'une politique de dépollution qui allie respect de l'environnement, chaîne alimentaire et santé des populations. À ce titre, la phytoremédiation apparaît comme la technique appropriée pour accompagner les industriels dans leurs efforts de dépollution et de reconversion des sites. Une dépollution qui vise dans la mesure du possible à atteindre l'état initial des sites afin de favoriser l'implantation et le développement de l'agriculture périurbaine dans l'Île Mandji. [N, Origo., S, Wicherek., M, Hotyat].

### 2.8.3 L'Algérie

Pour le cas de l'Algérie et suite aux données fournies par le Ministère de l'Environnement (MATE), les Directions de l'Environnement des Wilayas (DEW) et le Centre National de Développement des Ressources Biologiques (CNDRB), le ratio national de la superficie des espaces verts est estimé à 0.7m<sup>2</sup>/hab., il est très faible et inférieur à la norme internationale fixée à 10 m<sup>2</sup>/hab., en plus, 47.52% des espaces verts sont à l'état moyen à dégradé. Concernant la typologie des espaces verts, on recense 48% de parcs urbains et périurbains, 19% d'alignements routiers, 2% de forêts urbaines, etc. Les espèces dominantes sont : Acacia 14%, Palmier 11%, Eucalyptus 10%, Laurier 9%, etc..

[GHERIB, A., BOUFENDI, M., TEMIME, A., & BEDOUH, Y].

En général, les plantes qui constituent les espaces verts restent tributaires de l'aspect esthétique et ornemental, elles ne répondent pas aux caractéristiques écologiques de chaque région et aux besoins de dépollution de l'environnement.

Cependant le procédé de phytoremédiation a été appliqué a maintes reprises à l'échelle laboratoire, nous citons comme exemples :

- La phytoremédiation du Zinc Zn (II) par les racines de *Calotropis Procera* au Laboratoire des Ressources Végétales et Sécurité Alimentaire des Zones Semi Arides du Sud Ouest Algérien, Université de Bechar,
- La phytoremédiation du Nickel Ni et du Cadmium Cd, appliquée durant cinq semaines à l'aide de l'EDTA et des solutions nutritives, a été étudié chez trois plantes (*Arundo donax* L., *Zea mays* L. et *Helianthus annus* L) à l'Université de Mascara.
- Contribution à l'évaluation du potentiel de phytoremédiation de *Rosmarinus officinalis* sur des terrains pollués par l'ETM émis par la circulation routière dans la ville de Sidi Bel-Abbès (Ouest de l'Algérie)

## 2.9 Exemples de projets de phytoremediation

[L, Hénault-Ethier]

### 2.9.1 Parc d'entreprises de la Pointe-Saint-Charles



**Figure 6 : Rizofiltration d'eau souterraine contaminée avec des saules à Pointe-Saint-Charles [ L, Hénault-Ethier ]**

#### ❖ Historique

Sur ce site anciennement appelé le Technoparc, plusieurs activités industrielles, incluant l'enfouissement de déchets industriels et domestiques, se sont déroulées durant un siècle. Le site a été également remblayé de matériaux hétérogènes pour servir de stationnement et d'héliport. Avec le temps, la pluie s'est infiltrée à travers les déchets enfouis, générant un lixiviat qui a ensuite contaminé la nappe phréatique. Dans l'eau souterraine, l'azote

ammoniacal qui diffuse vers le Saint-Laurent, pose un risque pour les poissons et les mammifères qui y habitent. Vu sa situation stratégique dans le Grand Montréal, ce site contaminé a aujourd'hui un potentiel de développement économique énorme.

### ❖ Plantation

Le sol de surface a été débarrassé des débris minéraux, de plastiques et de bois. Des tranchées (30 cm de largeur et de profondeur) ont été creusées avec un espacement entre les rangs de 1,80 m. Un terreau commercial a été ajouté dans les tranchées pour assurer un bon établissement des saules. Des boutures ont été plantées au printemps 2009, jusqu'à densité de plantation de 19 600 plantes/ha, et coupées à 5 cm du sol à l'automne (pour stimuler la production de tiges).

### ❖ Amendements

Pour limiter la croissance des mauvaises herbes, une couche de paillis de bois (10 cm) a été utilisée après la plantation, et un désherbage manuel a été effectué durant les saisons de croissance. En juillet, du fertilisant a été ajouté.

### ❖ Fonctionnement

À l'aide d'une pompe, l'eau souterraine a été dirigée vers les plantations de saules dans un système d'irrigation au compte-goutte entre 2010 et 2011. Le système était contrôlé par minuterie, mais aussi couplé à un pluviomètre pour couper l'irrigation dès que les précipitations atteignaient 5 mm, afin de limiter la lixiviation.

### ❖ Résultats

L'irrigation avec l'eau souterraine contaminée n'a pas entraîné de symptômes visuels de toxicité chez les saules, ni de mortalité importante (95 % de survie). La croissance des saules a même été favorisée par l'irrigation (augmentation de la grandeur, du diamètre des tiges et de la biomasse de bois). La plantation a permis de réduire d'environ 95 % les concentrations en  $\text{NH}_4\text{-N}$ . Les plantes irriguées ont aussi séquestré dans leurs feuilles certains éléments. Les teneurs en BPC ou en hydrocarbures pétroliers n'ont pas été significativement réduites.



### 2.9.2 Traitement tertiaire des eaux usées à Saint-Roch-de-l'Achigan



**Figure 7: Filtration des eaux usées épurées par des saules avant leur rejet dans une rivière à Saint-Roch-de-l'Achigan [ L, Hénault-Ethier ]**

#### ❖ Historique

L'eau traitée dans les usines d'épuration contient encore des nutriments (azote, phosphore). L'irrigation de plantation visant la production de biomasse permet de suppléer en nutriments nécessaires pour maintenir une forte productivité, malgré les récoltes effectuées toutes les 2 à 3 ans.

#### ❖ Plantation

Un ancien champ de maïs a été tondu, puis ameubli au rotoculteur en surface (15 cm). Des boutures ont été plantées (16 000 tiges/ha) au printemps 2008, puis recépées à l'automne (pour favoriser la multiplication des tiges).

#### ❖ Amendements

Pour contrôler les mauvaises herbes, un herbicide avec un effet résiduel a été utilisé la première année, et ensuite l'espace entre les rangs a été désherbé mécaniquement.

### ❖ Fonctionnement

Les effluents de l'usine municipale d'épuration des eaux usées ont été filtrés (pour enlever les débris) avant d'être pompés vers une canalisation de 1,5 km reliant l'usine à la plantation. Un système de contrôle automatisé a permis de contrôler l'irrigation durant la saison de croissance.

### ❖ Résultats

Les saules ont éliminé 90 % de l'azote et 85 % du phosphore présent dans l'eau épurée. Jusqu'à 5,4 mm d'effluent par jour ont pu être traités par les saules, car ceux-ci ont un fort potentiel d'évapotranspiration et peuvent aussi tolérer des conditions de sol saturé pour des périodes prolongées. L'irrigation a augmenté la productivité de biomasse, avec des valeurs entre 14 et 20 tonnes/ha/an, selon l'intensité de l'irrigation.

## **2.10 La phytoremédiation pour un développement durable**

La phytoremédiation recouvre une large gamme de procédés agro-écologiques. Générée par l'énergie solaire et sans altération de la fertilité du sol, elle répond aux critères du développement durable. Elle peut donc s'appliquer à de très grandes surfaces et à des contaminations superficielles, et c'est une approche efficace pour abaisser les risques liés aux sols contaminés. Elle permet d'élaborer un tampon entre les zones polluées et la biosphère.

Au-delà de la dépollution, les procédés de phytoremédiation doivent permettre désormais la valorisation des milieux pollués ou naturellement très chargés en métaux. Ainsi, dans le cas de la phytoextraction, le procédé est maintenant intégré dans des filières à intérêt socio-économique telles que la production alimentaire, ou encore dans les cas où la production de biomasse comporte un intérêt industriel comme dans la phytomine, où l'on peut coupler la phytostabilisation des sols à la phytoextraction pour récupérer des métaux à haute valeur ajoutée. Cette métallurgie verte encore expérimentale reste pour le moment limitée aux métaux pour lesquels il existe des plantes hyperaccumulatrices, comme le cadmium, le nickel, l'arsenic et le zinc.

Les perspectives de développement de la phytoextraction sont, d'une part, d'augmenter la gamme d'éléments pouvant faire l'objet de la phytomine en s'appuyant sur les plantes accumulatrices à forte production de biomasse et, d'autre part, d'augmenter la biodisponibilité

des métaux par un contrôle des processus rhizosphériques et l'addition de composés appropriés, comme des agents complexants dans les sols. Dans le cas du nickel, nos travaux ont démontré que la phytomine constitue une filière offrant un rendement économique analogue à celui des cultures de céréales. Il y a là une perspective très encourageante pour les agriculteurs et pour le développement de procédés d'extraction minière innovants et répondant aux critères de développement durable. [J.L, Morel].

### **2.11 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de constater que l'utilisation des plantes pour l'accumulation des produits toxiques est une approche qui prend de l'importance et dont les applications deviennent de plus en plus nombreuses à travers le monde entier. Néanmoins les performances de la phytoremédiation dépendent des limites des plantes utilisées et plusieurs obstacles s'opposent encore à son développement.

## **CONCLUSION GENERALE**

La phytoremédiation est une biotechnologie végétale qui présente des atouts écologiques (fiabilité des traitements) et financiers (faibles coûts de dépollution), du moins pour les sites dont l'expérimentation a donné des résultats probants. Cela conforte également l'utilisation de plus en plus fréquente de cette méthodologie dans les terres de grande culture pour faire face à une pollution accrue par les métaux lourds et les produits phytosanitaires. Toutefois, il n'en demeure pas moins que la phytoremédiation présente des inconvénients tant au niveau de la durée des traitements, relativement longue, qu'à celui de l'élimination et de la revalorisation des résidus végétaux pollués. Par ailleurs, la phytoremédiation se révèle être un bon instrument d'aménagement paysager du territoire puisqu'elle permet d'occuper agréablement le terrain tout en le dépolluant.

Cette technique aux atouts prometteurs, en évolution récente, montre que les efforts conjugués des acteurs publics et privés vont lui donner une place non négligeable sur le marché international. Cette méthode de plus en plus utilisée doit être encouragée dans les pays confrontés aux problématiques de pollution industrielle. Sa technicité simple et son coût financier moindre sont des facteurs importants pour son adaptabilité. En somme, ce type de gestion de l'environnement participe à un développement raisonné des terres contaminées.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

Abaga, N. O. Z. 2012. Efficacité du vétiver (*Vetiveria zizanioides*) pour limiter la dispersion de trois micropolluants dans les sols cotonniers et maraichers du Burkina Faso : endosulfan, cuivre et cadmium. Sciences de l'environnement. Université Henri Poincaré - Nancy I.

ABDELLY, C. 2006. Bioremédiation / Phytoremédiation. *Cours de l'Université de Tunis. Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue. Département des sciences naturelles.*

Agnus, P. 2014, < La phytoremédiation, un moyen efficace de dépolluer les sols>, *Université de Bourgogne*, « indesciences.com ».

Allen, M. F. 1991. *The Ecology of Mycorrhizae* (Revue). New York : Cambridge University Press.

Baeza, A., Guillen, J., Hernandez, S., Salas, A., Bernedo, M., Manjon, J. L., Moreno, G. 2005. *Influence of the nutritional mechanism of fungi (mycorrhize/saprophyte) on the uptake of radionuclides by mycelium.* Radiochimica acta, vol. 93, no 4, pp. 233-238.

Baker, A. J. M., Brooks, R. R. 1989. *Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – A review of their distribution, ecology and phytochemistry.* Biorecovery, 1:81–126.

Boyd, R. S., Martens, S. N. 1998. “*The significance of metal hyperaccumulation for biotic interactions*”. Chemoecology 8 pp.1–7.

Bradley, R., Burt, A. J., Read, D. J. 1982. *The biology of mycorrhizal infection in the Ericaceae. VIII. The role of mycorrhizal infection in heavy metal tolerance.* New Phytol, 91:197–209.

Brown, M. T., Hall, I. R. 1990. *Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants.* Shaw AJ (ed.) *Heavy Metal Tolerance in Plants : Evolutionary Aspects.* Boca Raton : FL : CRC Press, pp. 95–104.

Davis, M. A., Murphy, J. F., Boyd, R. S. 2001. *Nickel Increases Susceptibility of a Nickel Hyperaccumulator to Turnip mosaic virus*. Environ. Qual., Vol. 30.

Desjardins, D., Nissim, W. G., Pitre, F. E., Naud, A., Labrecque, M. 2014. Distribution patterns of spontaneous vegetation and pollution at a former decantation basin in southern Québec, Canada. Ecological Engineering, 64, 385-390.

Entry, J. A., Watrud, L. S., Reeves, M. 1999. *Accumulation of cesium-137 and strontium-90 from contaminated soil by three grass species inoculated with mycorrhizal fungi*. Environmental Pollution, 104 : 449-457. Cité dans Westhoff99.

GHERIB, A., BOUFENDI, M., TEMIME, A., & BEDOUH, Y. (2016). ESPACES VERTS, PHYTOREMEDIATION ET BIOSURVEILLANCE DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE EN ALGERIE. *Algerian Journal of Arid Environment "AJAE"*, 6(1), 63-70.

Harley, J. L. 1989. *The significance of mycorrhizae*. Mycological Research. 92 : 129-134.

Hénault-Ethier, L, 2016, < Société québécoise de phytotechnologie >, « info@phytotechno.com ».

Hopkin, S. P. 1989. *Ecophysiology of Metals in Terrestrial Invertebrates*. GB-London : Elsevier Applied Science.

Houzelle, C. 2008. La phytoremédiation s'attaque aux sols gorgés de polluants. le journal "Les Echos", section "Environnement".

Kirk, G. J. D., Staunton, S. 1989. *On predicting the fate of radioactive caesium in soil beneath grassland*. Journal of Soil Science, 40 : 71-84.

Klerks, P. L. 1990. *Adaptation to metals in animals*. Shaw AJ (ed.) *Heavy Metal Tolerance in Plants : Evolutionary Aspects*. Boca Raton :FL : CRC Press, pp 313–321.

Labrecque, M., Pitre, F. 2014. Choisir la phytoremédiation. Une alternative végétale durable pour la décontamination des sols. Fiche technique produite pour le compte du Ministère de

l'Enseignement supérieur, de la Recherche, de la Science et de la Technologie. Projet 11-12-PSVT2-21940. Institut de Recherche en Biologie Végétale, Québec. p 2.

Laribi, M., Zellagu, Ai. 2016. Etude des techniques de dépollution des sols contaminés. *Projet de fin d'études. Ecole nationale polytechnique.*

Maas, J. L., Stuntz, D. E., Hopkins, N. A. 1987. *Mycorrhizae in a Californian serpentine grassland community.* Can Bot , 65 :484–487.

Morel, J. L. Phytoremédiation des sols contaminés.

Origo, N., Wicherek, S., Hotyat, M. 2012, < Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation >, « Revues.org ».

Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Borhidi, A., Beraza'n, R. 1999. *Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba.* Ann. Bot, 83 :29–38.

Rost, T. L., Barbour, M. G., Stocking, C. R., Murphy, T. M. 1998. *The root system.* Plant Biology, pp. 68-84. California : Wadsworth Publishing Company. Cité dans Westhoff99.

Sans éd, < Phytoremédiation >, « Wikipédia.fr ».

United States Environmental Protection Agency, 2006, < In situ treatment technologies for contaminated soil ; EPA 542/F-06/013, 35p >, « <http://www.epa.gov/tio/tsp> ».

VILA, M, 2006, < Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDX et le TNT : approches en laboratoire, Thèse de doctorat ; Institut National Polytechnique de Toulouse >, « [ethesis.inptoulouse.fr/archive/00000469/01/vila.pdf](http://ethesis.inptoulouse.fr/archive/00000469/01/vila.pdf) ».

VOGEL, T. M. 2001, < Bioremédiation des sols ; Techniques de l'ingénieur, J 3 982 >, « [www.techniques-ingenieur.fr/book/j3982/bioremediation-des-sols](http://www.techniques-ingenieur.fr/book/j3982/bioremediation-des-sols) ».