

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحي-جيجل

Université Med-Seddik Benyahia-Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de l'Environnement
Et des Sciences Agronomiques



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم علوم المحيط و العلوم الفلاحية

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique**

Filière : Sciences biologiques

Option : Toxicologie Fondamentale et Appliquée

Thème

*Impact des décharges sauvages sur les sols et les
méthodes de remédiation*

Membres de jury:

Présidente : M^{me} Mekircha F.

Examinatrice : M^{me} Bencharif N.

Encadreur : M^{me} Benfridja L.

Présenté par :

Boutamine Samira

Boumelta Rima

Session : juillet 2019

Numéro d'ordre



Remerciement

En premier lieu, nous remercions Dieu, le tous puissant, pour nous avoir donné la patience, la volonté et la force nécessaire pour terminer ce travail.

Nous tenons d'abord à remercier notre promoteur M^{me} Benfridja L pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils et aussi pour son encouragement.

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres du jury qui nous fait l'honneur en acceptant de juger notre travail.

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation durant nos cinq ans d'étude.

En fin, nous remercions tous ceux qui ont participés de près ou de loin à réaliser ce travail.

Samira et Rima





Dédicace :

A celle qui a consacré sa vie et souffert pour veiller à mon bien être

A ma chère mère : Nachida

A Mon cher père : Mouhamed Larbi

A mes chères sœurs : Hanane, Siham, Razane

A mes chers frères : Tarek, Adel

Aux fils de ma sœur : Amine et Jojo

A mon cher fiancé Omar et sa famille

Et à toute ma famille

A tous mes chères amies

*Pour votre patience, votre soutien, pour tout les bons moments passés,
ceux qui restent à venir.....*

Samira





Dédicace :

Je dédie ce travail à :

Ceux qui ont consacré leur vie pour veiller à mon bien être, à la source de ma réussite à ma chère mère, et mon cher père pour leurs sacrifices.

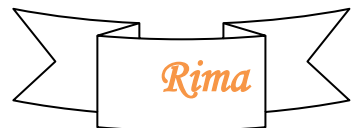
Mes chères sœurs : Chaima, Manar, Imane

Mes chers frères : Fouad, Abderazak, Salah adin, Larbi, Antar

Et à toute ma famille

Mes chères amies

Pour votre patience, votre soutien, pour tous les bons moments passés, ceux qui restent à venir.....



Sommaire

Liste des abréviations.....	v
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	x
Introduction.....	01

Chapitre I : Déchet, décharge et métaux lourds

I-1 La pollution.....	03
I-1-1 Définition.....	03
I-2 Les déchets.....	03
I-2-1 Définition.....	03
I-2-2 Classification des déchets.....	03
I-2-2-1 Déchets ménagers et assimilés.....	03
I-2-2-2 Déchets dangereux.....	04
I-2-2-3 Déchets non dangereux.....	04
I-2-2-4 Déchets dits « inertes ».....	04
I-2-2-5 Un déchet ultime.....	04
I-2-2-6 Déchets d'Activités de Soins (DAS).....	04
I-2-2-7 Déchets Industriels Dangereux (DID).....	04
I-2-3 Gestion des déchets.....	05

I-2-3 -1 La réduction des déchets produits.....	05
I-2-3- 2 La récupération et la valorisation.....	05
I-2-3- 3 L'incinération.....	06
I-2-3 4 Le recyclage.....	06
I-3 Les décharges.....	06
I-3-1 Définition.....	06
I-3-2 Classification des décharges.....	07
I-3-3 Type de décharge.....	08
I-3-3-1 Décharges contrôlées.....	08
I-3-3-2 Décharges non contrôlées.....	09
I-4 Phases d'évolution des déchets au sein d'une décharge.....	09
I-4-1 La phase de vieillissement.....	09
I-4-2 La phase de décomposition.....	09
I-4 -3 La phase de lessivage.....	09
I-5 Rejets d'une décharge et leur composition.....	09
I-5-1 Le lixiviat.....	09
I-5-1-1 Composition.....	10
I-5-1-2 Les processus et les étapes de formation du lixiviat.....	10
I-5-2 Le biogaz.....	11
I-5-2-1 Définition.....	11
I-5-2-2 Composition.....	11

I-5-2-3 Différentes phases d'évolution.....	11
I-6 Les métaux lourds ou éléments traces métalliques.....	12
I-6 -1 Généralités sur les métaux lourds.....	12
I-6-2 Les sources des métaux lourdes dans l'environnement.....	13
I-6-3 Les métaux lourds dans les déchets.....	13

Chapitre II : Le sol

II-1 Définition du sol.....	15
II-2 Le rôle du sol.....	15
II-3 Constituants et propriétés du sol.....	16
II-3-1 Constituants et propriétés physiques.....	16
II-3-1-1 La phase solide du sol.....	17
II-3-1-2 La phase liquide du sol.....	17
II-3-1-3 La phase gazeuse.....	18
II-3-2 Les propriétés chimiques.....	18
II-3-2-1 Les ions.....	18
II-3-2-2 Le complexe argilo-humique.....	19
II-3-2-3 La capacité d'échange cationique.....	19
II-3-2-4 Le pH.....	20
II-4 Les organismes vivants du sol.....	20
II-5 Origine des métaux lourds dans le sol.....	20
II-5-1 Mobilité et biodisponibilité des métaux lourds dans le sol.....	21

II-5-2 Les facteurs modifiant la mobilité des métaux lourds	22
---	----

Chapitre III : Impact des décharges sauvages sur le sol

III-1 L'impact des métaux lourds sur les micro-organismes du sol.....	25
III-2 L'impact des métaux lourds sur les plantes.....	26
III-3 L'impact des métaux lourds sur la santé.....	26
III-4 Résultats de quelques travaux portants sur l'impact des décharges sauvages sur le sol.....	27

Chapitre IV : Les méthodes de remédiation

IV- 1 Définition de la remédiation.....	30
IV- 2 Les techniques de remédiation.....	31
IV-2-1 La remédiation conventionnelle.....	31
IV-2-1-1 La stabilisation physico-chimique.....	31
IV-2-1-2 L'électrocinétique.....	31
IV-2-1-3 La désorption thermique.....	31
IV-2-2 Techniques de remédiation non conventionnelle.....	32
IV-2-2-1 La bioremédiation.....	32
IV-2-2-2 La phytoremédiation.....	32
IV-2-2-2-1 Définition de la phytoremédiation.....	32
IV-2-2-2-2 Les techniques de la phytoremédiation.....	32

IV-2-2-3 Avantages et inconvénients.....	36
IV-2-2-3-1 Avantages.....	36
IV-2-2-3-2 Inconvénients.....	37
IV-2-2-4 Les caractéristiques des plantes accumulatrices et hyper accumulatrices.....	37
IV-2-2-5 Résultats de quelques études en phytoremédiation	38
Conclusion.....	41
Références bibliographiques.....	42

Liste des abréviations

Al³⁺ : Aluminium.

As: Arsenic.

Ca²⁺: Calcium.

CAH : Le complexe argilo-humique.

Cd : Cadmium.

CEC : La capacité d'échange cationique.

CH₃Hg : Méthylmercure.

CH₄ : Méthane.

Cl⁻ : ion calcium.

Cm³: centimètre cube.

CO₂ : Dioxyde de Carbone.

Co: Cobalt.

Cr: Chrome.

Cu: Cuivre.

DAS : Déchets d'Activités de Soins.

DID : Déchets Industriels Dangereux.

DIS : Déchets Industriels Spéciaux.

DMA : Déchets Ménagères et Assimilées.

DSD : Déchets Spéciaux et Dangereux.

EDDS : Ethylene Diamine Disuccinate.

EDTA : Ethylène Diamine Tétra Aceticacid.

Eh : potentiel redox.

ETM : Elément Traces Métalliques.

FBC: facteurs de bioaccumulation.

FT : facteur de translocation

Fe²⁺ : ion fer.

g : Gramme.

H₂ : Hydrogène.

H₂O : monoxyde de dihydrogène

HCO₃⁻ : Bicarbonate.

Hg :Mercure.

K⁺ :Ion potassium.

K : coefficient de perméabilité.

Kg : Kilogramme.

Mg²⁺ :ion magnésium.

mm : Millimètre.

m s⁻¹ : mètre par seconde.

Mn : Manganèse.

Mg: Milligramme.

Ni : Nickel.

Na⁺: ion sodium.

NH₄⁺: Ammonium.

Na⁺: Sodium.

N₂: Di Azote.

NO: Monoxyde d'azote.

N₂O : Protoxyde d'azote.

NH₃ :Ammoniac.

OMA : Ordures Ménagères et Assimilées.

O₂ : Oxygène.

Pb : plomb.

pH : Potentiel d'hydrogène.

ppm : partie par million

FE : Facteur d'enrichissement.

SO₄²⁻ :Sulfate.

SH₂ :Hydrogène sulfuré.

S :Soufre.

Se : sélénium.

Sn: Etain.

Sb :L'antimoine.

t : tonnes

USDA: Département de l'Agriculture des États -Unis

Zn : Zinc

Liste des figures

Figure 01 : Fonction de quelques éléments dans l'organisme.....	13
Figure 02 : Constituants formant un sol et quelques exemples d'interactions entre les différents constituants	16
Figure 03 : Origine des métaux lourds dans le sol.....	20
Figure 04 : Mobilité des métaux dans le sol	22
Figure 05 : Classement des métaux lourds par ordre de toxicité.....	25
Figure 06 : Schéma représentant une phytoextraction induite par des chélateurs.....	34
Figure 07 : Schéma représentant une phytoextraction continue.....	34
Figure 08 : Schéma représentant la phytoremédiation.....	35

Liste des tableaux

Tableau 01 : Différents types de site de décharges.....	08
Tableau 02: Fonction des principaux ions (cations et anions) présents dans les sols.....	19
Tableau 03 : Les effets de certains métaux lourds sur la santé.....	27
Tableau 04 : Plantes ayant un potentiel pour la phytoextraction de divers métaux.....	37

Les accroissements démographiques, économiques et urbains sont souvent à l'origine d'une grande production de déchets dans le monde. Ces déchets ont des impacts néfastes sur la santé humaine et l'environnement.

La gestion des déchets urbains obéit à des normes que l'utilisateur doit respecter sous peine de s'exposer indirectement à la pollution qu'il engendre, notamment à la pollution par les métaux lourds. Ces métaux sont naturellement présents dans les sols, ils proviennent du fond géochimique. Cependant les teneurs les plus élevées dans les sols sont fortement liées à l'activité humaine à savoir les pratiques agricoles, pollution due aux retombées atmosphériques telles que les pratiques liées à l'incinération et le stockage des déchets urbains et industriels.

De grandes quantités de métaux sont enfouies lors du stockage des déchets. En effet les métaux sont présents dans la plupart des constituants des déchets sous diverses formes : peintures, produits de maintenance des véhicules, produits pharmaceutiques, piles et batteries [1]. Ils sont extrêmement persistants dans l'environnement; ils sont non biodégradables, non thermo dégradables et sont facilement dispersés dans l'atmosphère et les écosystèmes aquatiques et terrestres. Leur présence en traces provoque un impact négatif sur la faune et la flore [2]. Ils peuvent être accumulés dans les plantes à travers des dépôts atmosphériques ou par voie racinaire [3], conduisant à de sérieux problèmes de santé chez l'homme et les animaux [4].

Le sol est un milieu vivant, complexe et dynamique, en évolution constante sous l'effet de différents paramètres tels que le climat, la topographie, la végétation et l'action de l'homme. Il joue un rôle d'interface entre les phases liquides et gazeuses dans l'environnement où il intervient comme système source, système transformateur, et système de transfert des éléments en trace [5].

Le sol est donc un vecteur important du transfert des métaux de l'environnement vers l'organisme, pour cette raison, il est essentiel de disposer de moyens de mesure de la teneur en métaux lourds dans les sols.

La solution pour pallier à ce problème est de traiter les sols contaminés afin d'en retirer les éléments métalliques ou, au moins, de ramener leur concentration à des niveaux acceptables pour la viabilité de l'écosystème. Une de ces méthodes de traitement, apparue au début des années 1990, consiste en l'utilisation de plantes capables de croître sur des sols à forte teneur en métaux et susceptibles d'en mobiliser ou absorber une quantité appréciable. Cette technique, appelée phytoremediation, s'avère être prometteuse car elle est peu coûteuse et plus respectueuse de l'environnement contrairement à des méthodes faisant appel à des procédés physico-chimiques.

L'objectif de ce travail est donc d'étudier l'impact des décharges non contrôlées sur le sol et aussi de connaître les différentes méthodes de remédiation et essentiellement la phytoremédiation.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres :

Le premier chapitre consiste à présenter les différents types de déchets et décharges, ainsi que quelques généralités sur les métaux lourds.

Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur le sol ainsi qu'à la mobilité et la biodisponibilité des métaux lourds dans ce dernier.

Le troisième chapitre porte sur l'impact des décharges non contrôlées sur le sol ainsi que celui des métaux lourds sur, les micro-organismes du sol, les plantes et la santé humaine.

Le quatrième chapitre porte sur les méthodes de remédiations et essentiellement sur la phyto-remédiation.

Enfin, le travail sera clôturé par une conclusion.

A partir des années soixante-dix, le monde s'est retrouvé confronté au problème de la pollution de la planète par les déchets résultant des activités humaines : domestiques, médicales, agricoles ou industrielles. Ceci est dû à plusieurs facteurs dont principalement le développement des technologies et le changement de mode de vie qui engendrent une augmentation de la quantité des déchets.

I-1 La pollution

I-1-1 Définition

La pollution est toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement des concentrations des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans une biocénose naturelle[6].

I-2 Les déchets

L'activité humaine a, de tout temps, été génératrice de déchets et chaque époque a eu son mode de traitement et ses problèmes spécifiques.

I-2-1 Définition

Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériaux, produit ou, plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon [6].

I-2-2 Classification des déchets

Les déchets sont classés en différentes catégories, elles même associées à différents classes de décharges ou traitements :

I-2-2-1 Déchets ménagers et assimilés

Selon le Code de l'environnement, un « déchet ménager » est « un déchet dangereux ou non dangereux dont le producteur initial est un ménage » [7]. Si cette définition caractérise bien isolément les seuls déchets des ménages, il faut reconnaître qu'ils ne sont en pratique pas traités seuls, d'où la notion d'« ordures (ou déchets) ménagères et assimilées » (OMA ou DMA), qui comprennent les déchets produits par les ménages et certains déchets issus des activités économiques. (Exemples : papier, verre, plastiques, textiles, carton, bois...) [7].

I-2-2-2 Déchets dangereux

Un déchet dangereux est défini comme un déchet qui présente une ou plusieurs des propriétés de dangers énumérées [7]. Ce sont des déchets qui contiennent en quantités variables des éléments toxiques pour la santé humaine et/ou l'environnement. Cette qualité ne présume pas de leur origine, qui peut être domestique, industrielle ou agricole.

I-2-2-3 Déchets non dangereux

Les déchets non dangereux sont définis par défaut par rapport aux précédents comme étant ceux qui ne présentent aucune des propriétés qui rendent un déchet dangereux [7].

I-2-2-4 Déchets dits « inertes »

Les déchets dits « inertes » font partie des déchets non dangereux, mais sont classés séparément et définis par la négative : ne brûlent pas, ne se décomposent pas, ne produisent aucune réaction ni chimique ni physique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas les matières avec lesquelles ils entrent en contact d'une manière susceptible d'entraîner des atteintes à l'environnement ou à la santé humaine [7].

I-2-2-5 Un déchet ultime

Est « tout déchet, résultant ou non du traitement d'un déchet, qui n'est plus susceptible d'être traité dans les conditions techniques et économiques du moment, notamment par extraction de la part valorisable ou par réduction de son caractère polluant ou dangereux » [8].

I-2-2-6 Déchets d'Activités de Soins (DAS)

Ils sont issus des activités de suivi, traitement, recherche, enseignement et analyses dans les domaines de la médecine humaine et vétérinaire. (Exemples : bandes, pansements, seringues, aiguilles, gants, flacons, ...)[8].

I-2-2-7 Déchets Industriels Dangereux (DID)

Sont les déchets qui peuvent générer des nuisances pour l'environnement et pour l'homme en présentant un ou plusieurs dangers: explosif, inflammable, irritant, toxique, mutagène, cancérigène, infectieux, corrosif ... Par exemple : les huiles usagées, les hydrocarbures, les sels de trempe, les boues, les substances chimiques inorganique [8].

I-2-3 Gestion des déchets

Une gestion moderne des déchets repose sur quatre axes qui sont, dans l'ordre des priorités, la réduction des déchets produits, la récupération et la valorisation, l'incinération et le recyclage.

1-La réduction des déchets produits

Vise à maîtriser la source le flux des déchets. Il implique le développement de produits générant moins de déchets (notamment les emballages) ou des résidus plus facilement recyclables [9]. Il suppose aussi un infléchissement des comportements des acteurs industriels et du public (habitudes de consommation, de distribution, de gestion).

2-La récupération et la valorisation

La valorisation est définie comme toute opération et réutilisation, de recyclage ou de compostage des déchets. Elle consiste en une dégradation de la matière organique pour récupérer et valoriser sous forme de chaleur, d'électricité ou de carburant l'énergie obtenue lors du traitement des déchets[9].

Il existe deux types de valorisation :

a- La valorisation de matière

La matière peut être valorisée par deux procédés:

- ✓ Le compostage est une méthode biochimique de traitement des matières organiques qui consiste à décomposer les matières putrescibles, en présence d'oxygène, sous l'action des microorganismes, pour obtenir à la fin un matériel organique riche en humus appelé compost. La réaction de la transformation du compostage est résumée au bilan suivant :



- ✓ La méthanisation correspond à une biodégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène, conduisant à la formation de biogaz (CH_4 et CO_2). Le biogaz ainsi récupéré peut être utilisé comme carburant.

b-La valorisation énergétique

La valorisation peut être source d'énergie:

- Quand le procédé de méthanisation est mené jusqu'aux dernières étapes de brûlage du biogaz, il y a récupération d'énergie (production de chaleur).
- Le procédé d'incinération est une combustion des déchets à hautes températures (entre 850 et 1000 °C) en présence de l'oxygène de l'air dans des fours spéciaux adaptés aux caractéristiques des déchets (hétérogénéité, pouvoirs calorifiques variables).

3-L'incinération

L'incinération est une technique basée sur la décomposition thermique des déchets à haute température, en présence (combustion) ou en absence (pyrolyse) d'oxygène. Il résulte de l'incinération une décomposition d'environ 70 à 80 % des matières incinérées (composante organique des déchets), l'autre part (20 à 30 %) se retrouvant sous forme de cendres volantes (composante inorganique ou résidus de combustion incomplète de la matière organique) et de mâchefers. L'incinération peut être utilisée pour éliminer plusieurs types de déchets, notamment des résidus domestiques, biomédicaux, industriels (solvants industriels, huiles usées), des résidus ligneux et des boues provenant de systèmes d'épuration [9].

4-Le recyclage

C'est le procédé qui permet de réintroduire des matériaux composants un produit dans son cycle de production. Comme le réemploi, le recyclage des déchets vise à maintenir les matières dans le circuit économique le plus longtemps possible dans le but de réduire la consommation des matières premières [8].

I-3 Les décharges

I-3-1 Définition

La décharge est un très vaste réacteur biochimique où se trouvent mélangés des millions de composés chimiques, organiques et minéraux, interagissant les uns avec les autres sous l'influence d'agents naturels (pluie, micro-organisme). Ces réactions aboutissent à une transformation biologique, physique et chimique des déchets avec libération de liquides et de gaz [10].

I-3-2 Classification des décharges

La classification des décharges est basée sur la valeur du coefficient de perméabilité (K) du sol du site choisi pour accueillir une décharge. Ce coefficient définit la vitesse de percolation des eaux dans un sous-sol. Ainsi, on distingue trois classes de site et chaque classe est désignée à recevoir un type bien spécifique de déchet (Tableau 01). Les sites d'une classe peuvent recevoir les déchets de la classe inférieure [11].

❖ Sites classe I

Il s'agit de sites étanches implantés sur des terrains d'ardoise, grès, schistes, ... Ils peuvent recevoir en plus des déchets ménagers, les déchets industriels spéciaux (DIS) ainsi que les déchets d'activité de soin à risque infectieux [11].

❖ Sites classe II

Ce sont des sites semi-perméables comme les terrains sablo-argileux, les grès.... Ils ne peuvent recevoir que les déchets ménagers provenant de l'activité domestique ainsi que les déchets industriels et hospitaliers assimilables aux ordures ménagères [11].

❖ Sites classe III

Il s'agit de sites perméables qui se laissent facilement s'infiltrer par les lixiviats. Ils sont retenus uniquement pour les déchets ménagers et les déchets inertes qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique.

Tableau 01 : Différents types de site de décharges [11].

Catégorie du site	K (m.s-1)	Type de Déchets
Classe I : site imperméable	$K \leq 10^{-9}$	Déchets ménagers + Déchets industriels Spéciaux
Classe II : site semi-perméable	$10^{-9} \leq K \leq 10^{-6}$	Déchets ménagers + Déchets industriels Assimilables aux déchets Ménagers
Classe III : site perméable	$K \geq 10^{-6}$	Déchets ménagers + Déchets industriels Inertes

I-3-3 Type de décharge

La mise en décharge des déchets a toujours été la pratique la plus fréquente par la population pour se débarrasser de ses ordures. Ces dépôts constituent une réelle menace environnementale. On distingue deux types :

I-3-3-1 Décharges contrôlées

Selon les types de déchets déversés, les décharges contrôlées peuvent être classées en trois grandes classes [10] :

➤ **Décharges pour déchets industriels spéciaux (classe1)**

Sont situées sur des sites imperméables qui assurent un confinement performant des déchets et de lixiviats. Elles sont destinées à recevoir tout déchet contaminé par des métaux lourds ou radioactifs, lixiviable, des cancérogènes, des matières corrosives et infectieuses.

➤ **Décharges pour déchets ménagers et assimilés (Classe2)**

Ce type de décharges admettent les ordures ménagères ainsi que certains déchets industriels banals et peuvent être soumis sur des terrains semi perméables.

➤ **Décharges pour déchets inertes (Classe3)**

Sont placés sur des sites perméables qui assurent une migration relativement rapide de lixiviats. Aucune condition géologique particulière en matière d'étanchéité n'est préconisée. Ces sites ne peuvent donc recevoir que des déchets inertes tels que certains déchets de chantiers (pierres, béton, plâtre...)

I-3-3-2 Décharges non contrôlées

C'est un dépotoir sauvage à ciel ouvert, mal exploité, reçoit chaque jour des déchets mixtes et de différentes natures : agricoles, commerciales, industriels, domestiques et hospitaliers, et sans traitement préalable [10].

I-4 Évolution des déchets d'une décharge

Au fil du temps, l'évolution des déchets au sein d'une décharge passe globalement par trois phases principales[8] :

- **La phase de vieillissement** : la matière organique des déchets se transforme en humus et on remarque une réduction du volume et une solidification mécanique et la solubilité des éléments est réduite. La dégradation anaérobie des déchets est accompagnée de production de biogaz.
- **La phase de décomposition** : une dissolution chimique et une dégradation physique se produisent. Comme l'oxygène intervient, on a une dégradation aérobie.
- **La phase de lessivage** : ce phénomène à l'origine de la pollution des nappes phréatiques concerne les substances solubles qui peuvent être entraînées, par les eaux et l'humidité des déchets produisant ainsi le lixiviat

I-5 Rejets d'une décharge et leur composition

I-5-1 Le lixiviat

Suivant les conditions de porosité, la composition et l'épaisseur du tas de déchets, les eaux de pluie ainsi que l'humidité contenue dans les déchets traversent ces derniers avec une vitesse et un débit variable. Cet écoulement favorise la biodégradation des matières organiques fermentescibles et charge les eaux de microorganismes, de substances organiques et minérales. C'est ce « jus de déchet » que l'on appelle lixiviat [8].

I-5-1-1 Composition

Le lixiviat est caractérisé par quatre groupes de polluants :

- ✓ La matière organique dissoute ou en suspension, issue de la biomasse, (les substances humiques et fulviques...).
- ✓ Les micropolluants organiques (hydrocarbures, composés aromatiques...).
- ✓ Les composés minéraux majeurs sous forme ionique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , K^+ , NH_4^+ , Fe^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} ...) ainsi que d'autres composés tels que les borates.
- ✓ Les cations de métaux lourds à l'état de traces sous forme majoritairement complexée par des ligands minéraux (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) ou organiques (macromolécules de type humique et fluvique)[8].

I-5-1-2 Les processus et les étapes de formation du lixiviat :

Les mécanismes de la genèse des lixiviats sont très complexes et pour les comprendre, il est nécessaire de connaître la nature des déchets et les caractéristiques de la décharge (hauteur des déchets, surface exploitée, compactage, etc...) ainsi que les phénomènes intervenant lors de l'interaction entre l'eau et les déchets [8].

On distingue deux types de processus régissant ces mécanismes :

❖ Les processus biologiques

Qu'elles soient aérobies ou anaérobies, les réactions biologiques qui ont lieu dans un tas de déchets jouent un rôle prépondérant dans la genèse des lixiviats. En effet, la fraction organique fermentescible des déchets est dégradée par les microorganismes hétérotrophes (bactéries, levures, champignons) car elle leur sert de substrat. Cette activité microbiologique peut déclencher des phénomènes physico-chimiques secondaires tels que la modification des conditions du milieu (pH, température, potentiel d'oxydoréduction)

❖ Les processus physico-chimiques

Le lessivage des déchets met en œuvre plusieurs mécanismes physico-chimiques tels que la solubilisation, la complexation, l'oxydoréduction, l'adsorption, la neutralisation ainsi que le transfert de matière.

Ces réactions se traduisent par différents changements : salinité, potentiel d'oxydoréduction des solutions percolant à travers les déchets, évolution du pH, teneur en humidité des déchets, composition chimique des percolats.

I-5-2 Le biogaz

I-5-2-1 Définition

Le biogaz est un sous-produit d'un lieu d'enfouissement et il provient de la décomposition anaérobie des matières organiques par divers microorganismes (compostage) [12].

Les caractéristiques du biogaz peuvent se résumer de la manière suivante :

- Combustible : le méthane est le principal combustible contenu dans le biogaz, dont le pouvoir calorifique est fonction de sa teneur.
- Odorant : le biogaz contient des éléments malodorants présents sous forme de traces, comme les mercaptans ou le sulfure d'hydrogène.
- Explosif : lorsque la teneur en méthane est comprise entre 5 et 15 %, l'oxygène entre 15 et 20 %, avec un taux de dioxyde de carbone ne dépassant pas 25 %.
- Corrosif : les composés soufrés additionnés à l'humidité rendent le biogaz corrosif.

I-5-2-2 Composition

La composition du biogaz peut varier dans des limites assez larges suivant la nature des déchets traités. Pour une composition moyenne du biogaz, on peut retenir les chiffres suivants [12] :

- Méthane : 40 à 60%
- Gaz carbonique (CO₂) : 35 à 45%
- Azote (N₂) : 0 à 3%
- Hydrogène sulfuré (SH₂) : 0 à 1%
- Hydrogène (H₂) : 0 à 1%
- Oxygène (O₂) : 0 à 1%

I-5-2-3 Différentes phases d'évolution

Au départ, lors de la courte phase aérobie, l'oxygène et l'azote de l'air ainsi que le principal produit de dégradation de la matière organique fermentescible, le gaz carbonique (CO₂), sont les composants essentiels. Lors de la deuxième phase au cours de laquelle ont lieu l'hydrolyse, l'acidogénèse et l'acétogénèse, il y a production d'acides gras volatils, d'alcools, d'ammoniac, de CO₂ et d'H₂. Au cours de la troisième phase, la méthanogénèse démarre, parallèlement le taux de CO₂ diminue et les autres gaz ou produits volatils majeurs disparaissent. La quatrième étape est appelée phase méthanogène stable et dure plusieurs années au cours desquelles la production de

méthane atteint son maximum. Dans une dernière phase, la production de biogaz chute pour finalement cesser au profit d'un retour des conditions aérobies [12].

I-6 Les métaux lourds ou éléments traces métalliques

Durant ces dernières décennies, les sites de décharge constituent une source potentielle de contamination, qui peuvent provoquer un impact négatif sur l'environnement, due à l'accumulation des métaux lourds et des produits organiques transformés [13]. Les problèmes causés par les métaux lourds sont devenus de plus en plus préoccupants, ils sont pour la plupart très dangereux lorsque ceux-ci parviennent à contaminer les eaux de surface et les eaux souterraines [13]. Leur accumulation peut se répercuter sur la santé des animaux et des êtres humains.

I-6 -1 Généralités sur les métaux lourds

Les métaux sont les éléments du tableau de classification périodique situés à gauche de la diagonale. Parmi ces éléments, ceux que l'on désigne sous le terme de métaux lourds sont ceux dont la masse volumique est supérieure à 5-6 g/cm³. On appelle également parfois « métaux lourds » les métaux situés à partir de la quatrième ligne du tableau périodique. C'est-à-dire à partir du potassium [13].

Certains éléments sont nécessaires à la vie en très faible quantité : ce sont les oligo-éléments. À trop faible dose ils provoquent des carences dans l'organisme, mais ils deviennent toxiques à haute dose. Ils sont en particulier nécessaires à la synthèse de certaines protéines ou enzymes, comme le fer dans l'hémoglobine par exemple. Les oligo-éléments font partie du cercle plus large des micro-éléments, c'est-à-dire ceux que l'on trouve dans les organismes vivants à des concentrations inférieures à 0.01 % (par rapport à la matière sèche), par opposition aux macro-éléments, indispensables au fonctionnement du vivant en grande quantité. Ces éléments sont le calcium, le potassium, le sodium et le magnésium; ils sont présents dans l'organisme sous forme ionique en solution aqueuse et permettent la conduction de signaux électriques [13].

H																	He						
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne						
Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr						
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe						
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn						

éléments majeurs
 oligo-éléments
 macro-éléments
 éléments toxiques
 éléments peu toxiques

Figure01 : Fonction de quelques éléments dans l'organisme [13].

I-6-2 Les sources des métaux lourds dans l'environnement

Les sources des métaux lourds dans l'environnement sont naturelles ou anthropiques [14].

1-Origines naturelles :

Les métaux lourds contenus dans les roches constituent le fond géochimique du sol. Pendant plusieurs milliers d'années, ils ont été libérés lors de l'altération naturelle (effritement et érosion) de la roche mère

2 - Origines anthropiques :

Les principales sources anthropiques de pollution de l'environnement par les éléments traces métalliques sont:

- **La pollution industrielle** : La principale source anthropique de cette pollution provient des déchets miniers et des terrils industriels causant des contaminations considérables en zinc, plomb et cadmium
- **La pollution agricole** : certains produits destinés à améliorer les propriétés du sol sont plus riches en éléments métalliques que le sol lui-même, ainsi ils sont à l'origine de l'introduction de ces éléments dans le sol. Les produits les plus concernés par ce phénomène sont : le compost, les engrais phosphatés naturels et les boues de station d'épuration.
- **La pollution urbaine** : les foyers domestiques rejettent dans l'atmosphère des particules contenant des métaux (combustion, chauffage, incinération).

I-6-3 Les métaux lourds dans les déchets

Les décharges à ciel ouvert contiennent principalement des déchets ménagers, mais elles peuvent, toutefois, contenir des éléments dangereux. Ces déchets produits aussi bien par les

professionnels que par les ménages sont appelés « Déchets Dangereux à Quantité Dispersée ». Cette catégorie est composée principalement :

- matériels informatiques, appareils électriques et électroniques (ordinateurs, photocopieuses, téléphones, électroménager...).
- consommables (cartouches de toner, rubans d'imprimantes...)

Certains de ces équipements contiennent des composants toxiques (métaux, solvants,...). Ces éléments doivent donc être éliminés ou traités avant les opérations de valorisation [3].

Les métaux lourds dangereux présents dans cette catégorie sont le mercure contenu dans les piles, le cadmium provenant des piles, batteries et plastiques, le plomb issu des batteries, des ferrailles et du carton, ainsi que le zinc qui peut provenir du caoutchouc, des textiles, des restes de peintures et des détergents. En plus de toutes ces sources, la partie papier et carton des déchets peut aussi être source de Pb, Cu et Cr [9].

II-1 Définition du sol

Le sol est la couche externe de la croûte terrestre, caractérisée par sa structure solide et sa nature minérale, mais également par la présence de nombreux êtres vivants. La formation des sols est liée à la transformation de la roche mère sous l'effet des facteurs climatiques mais aussi sous l'effet des organismes vivants (microorganismes, plantes et animaux). Il est le siège d'un échange intense de matière et d'énergie entre l'air, l'eau et les roches [15].

Le sol est donc un écosystème complexe, un bioréacteur et un filtre indispensable à la vie sur terre. Il possède des propriétés physiques caractérisées par sa structure et sa texture.

La structure du sol est une caractéristique dynamique qui se réfère à l'arrangement des particules solides. Elle définit la porosité du sol, c'est à dire l'espace poral qui peut être rempli d'eau et d'air. Le volume poral varie dans l'espace et dans le temps en fonction des conditions agro-environnementales et des propriétés du sol [16].

La texture d'un sol correspond à la proportion des différents constituants minéraux solides d'un sol (argile, sable, limon...). Elle permet de caractériser un sol comme étant à dominance sableuse, argileuse, limoneuse. Elle représente la distribution des particules élémentaires en fonction de leur diamètre. Pour des particules de diamètre inférieur à 2 mm, trois types de particules sont distingués selon la classification de l'USDA : les sables (0.05-2 mm), les limons (0.002-0.05 mm) et les argiles (moins de 0.002 mm). Les particules de diamètre supérieur à 2 mm sont appelées les éléments grossiers [16].

II-2 Le rôle du sol

Le sol est un compartiment essentiel de tous les écosystèmes continentaux. Le sol constitue le support des racines des plantes et joue également un rôle primordial dans la fourniture d'eau et la nutrition des plantes. En effet, le sol est un compartiment moteur des grands cycles biogéochimiques du carbone, de l'azote, du phosphore, du soufre et de nombreux métaux. Le sol constitue donc, dans la biosphère continentale, un immense réservoir et lieu d'échanges d'éléments nutritifs (minéraux et organiques) indispensables à la croissance des végétaux qui composent en partie l'alimentation humaine. Les productions végétales sont aussi la base de l'alimentation des animaux, dont les animaux d'élevages, eux-mêmes source d'alimentation pour l'homme. D'autre part, le sol joue un rôle majeur dans le cycle de l'eau potable qui est indispensable à toute forme de vie. Il assure un rôle de filtre et contribue également au stockage de l'eau [15].

II-3 Constituants et propriétés du sol

II-3-1 Constituants et propriétés physiques

Le sol est un milieu composé de trois phases inertes respectivement solide (minérale et organique), liquide et gazeuse. Les proportions entre ces différentes phases peuvent varier dans le temps. Aux trois phases inertes s'ajoutent un compartiment vivant.

Ces 4 compartiments interagissent entre eux et sont le siège de nombreuses réactions biophysico-chimiques, dont quelques exemples sont cités dans la figure 2 [17].

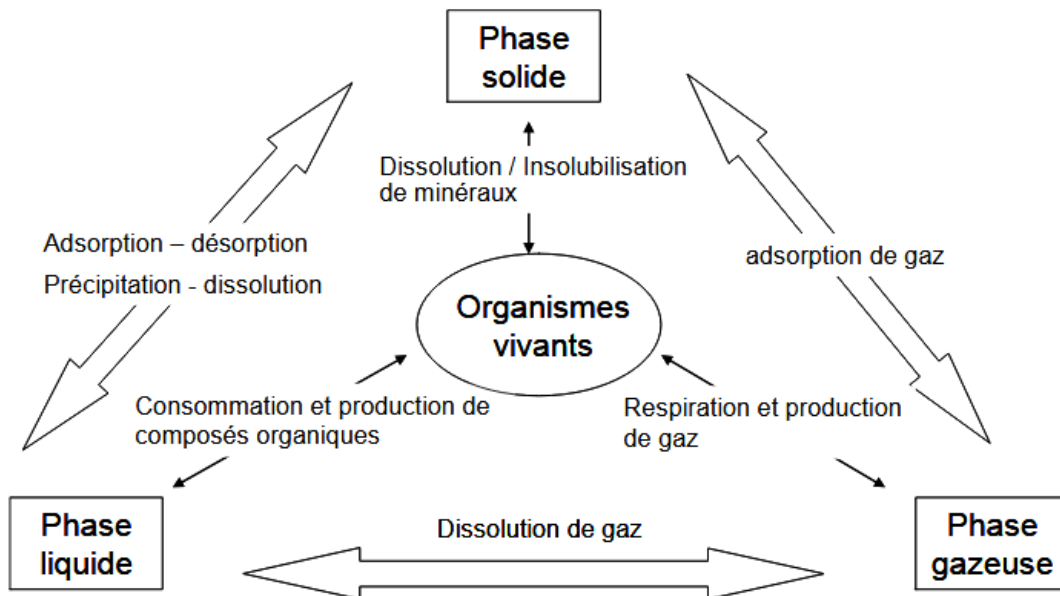


Figure 02 : Constituants formant un sol et quelques exemples d'interactions entre les différents constituants [17].

II-3-1-1 La phase solide du sol

➤ La fraction minérale

Les principaux constituants minéraux du sol sont l'argile, le limon et le sable. Ces trois éléments sont classés selon leur diamètre et arborent des propriétés physico-chimiques propres [15]. Le sable et le limon sont des constituants chimiquement inertes car ces grains portent peu de charges électriques. En comparaison au sable et au limon, l'argile est l'élément le plus fin mais aussi le plus réactif. Les argiles présentent 3 propriétés importantes qui varient selon leur structure minéralogique. Les argiles présentent une charge globale négative qui leur permet de fixer et relarguer les ions H^+ et les cations métalliques présents dans le sol. Le taux d'argile dans un sol va donc conditionner la capacité d'échange cationique et le pH du sol [15]. Les argiles sont hydrophiles et peuvent fixer les molécules d'eau ce qui intervient sur la réserve hydrique du sol. Enfin, les argiles sont des colloïdes et peuvent se présenter sous forme dispersée (suspension homogène des particules dans l'eau) ou floculée (regroupement des particules en petits agrégats). De par ces propriétés, les argiles jouent un rôle central dans le sol influençant sa structure, sa porosité ou sa capacité d'échange ionique.

➤ La fraction organique

Au sens strict, la fraction organique du sol regroupe ; la matière organique vivante, animale ou végétale, qui englobe la totalité de la biomasse en activité, les débris d'origine végétale et animale regroupés sous le nom de « matière organique fraîche », les composés organiques intermédiaires, appelés « matière organique transitoire », provenant de la transformation de la matière organique fraîche, et l'humus qui forme les horizons organiques superficiels et qui résulte de la décomposition des autres fractions de la matière organique [15].

II-3-1-2 La phase liquide

La phase liquide correspond à de l'eau infiltrée qui, par percolation, se charge en gaz dissous (O_2 , CO_2), en substances minérales dissoutes et en particules en suspensions (colloïdes). Elle véhicule les substances nutritives (Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , NO_3^- , Cl^- ..) nécessaires aux organismes vivants [15].

II-3-1-3 La phase gazeuse

La phase gazeuse, ou atmosphère du sol, occupe les pores du sol non envahis par la phase liquide. L'atmosphère du sol contient généralement de 18 à 20 % d'O₂, mais la teneur en O₂ peut chuter à 2 % voire 0 % au voisinage des racines, de résidus organiques en décomposition, au cœur d'agrégats ou de mottes saturées en eau, ou en profondeur dans le sol [17]. La teneur en CO₂ peut varier de 0,3 à 5 % et peut atteindre et dépasser les 20 % dans certains cas (voisinage de racines ou source importante de matière organique). L'atmosphère du sol contient aussi N₂, H₂O mais elle contient aussi très souvent d'autres gaz produits et/ou consommés biologiquement : NO, N₂O, NH₃, H₂ ou CH₄.

II-3-2 Les propriétés chimiques

Le sol est une matrice réactive qui est composée d'éléments chargés, minéraux et organiques. Ces éléments interagissent entre eux et confèrent au sol des propriétés chimiques qui interviennent, entre autres, dans la nutrition des plantes [15].

II-3-2-1 Les ions

Les ions présents dans les sols proviennent essentiellement des processus de dégradation de la roche mère et de minéralisation de la matière organique. Ils peuvent également être introduits par l'intermédiaire de fertilisants chimiques et d'amendements organiques. Le tableau 2 dresse une liste des principaux ions (cations et anions) ainsi que leurs fonctions dans les sols.

Tableau 02 : Fonction des principaux ions (cations et anions) présents dans les sols [15].

CATIONS (+)	ANIONS (-)
H^+ : mesure d'acidité du sol	NO_3^- : élément nutritif ; polluant
K^+ : élément nutritif et stabilité structurale	$H_2PO_4^-$: élément nutritif
NH_4^+ : élément nutritif	HPO_4^{2-} : élément nutritif
Na^+ : stabilité structurale du sol	PO_4^{3-} : élément nutritif
Ca^{2+} : stabilité structurale	SO_4^{2-} : élément nutritif
Mg^{2+} : stabilité structurale	OH^- : présent mais sans effet
Al^{3+} : stabilité structurale	
Fe^{3+} : stabilité structurale	

II-3-2-2 Le complexe argilo-humique

Le complexe argilo-humique (CAH), ou complexe adsorbant est le résultat de l'association de l'humus et des argiles. Ces deux substances s'associent par l'intermédiaire de ponts calciques, de ponts constitués d'hydroxydes de fer et d'aluminium et de ponts aluminium positionnés aux points de rupture des feuillets d'argile. Le CAH présente une charge globale négative qui lui permet de fixer des cations, et dans une moindre mesure des anions. Les ions sont retenus sous forme échangeable et sont en équilibre avec la solution du sol. Lorsque la concentration en ions est modifiée dans la solution du sol (prélèvement par les racines des plantes, par exemple), certains ions fixés sur le CAH passent en solution (désorption) et sont remplacés par d'autres ions présents auparavant dans la solution du sol (adsorption) [15].

II-3-2-3 La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC) est la quantité totale de cations qu'un poids déterminé de sol (habituellement 100 grammes) peut adsorber sur son complexe argilo-humique et échanger avec la solution du sol dans des conditions de pH données. Autrement dit, c'est la somme des charges négatives du sol disponibles pour la fixation des ions H^+ et Al^{3+} ainsi que les cations basiques Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ . La CEC dépend donc de la nature des colloïdes présentant un nombre variable et spécifique de sites négatifs et, bien sûr, du pH du sol [15].

II-3-2-4 Le pH

L'acidité, exprimée par le pH, est définie par la concentration d'ions H^+ qui sont fixés sur le CAH ou en mouvement dans la solution du sol. L'alcalinisation d'un sol se traduit généralement, pour les colloïdes négatifs, par une augmentation des charges négatives ce qui tend à accroître la CEC. Inversement, l'acidification du sol se traduit par une diminution de la CEC du sol [15].

II-4 Les organismes vivants du sol

Les organismes vivants du sol sont en excluant les racines et la méso-faune (proportion typique de biomasse entre parenthèse), les bactéries (25 %), les champignons (59 %), les algues (traces), les protozoaires (4 %) et la microfaune (12 %). Les bactéries représentent les microorganismes les plus abondants dans le sol en densité et en nombre, même si les champignons représentent une quantité de biomasse plus importante [17]. Les microorganismes du sol sont aujourd'hui reconnus comme étant un des facteurs clé dans l'évolution des sols.

II-5 Origine les métaux lourds dans le sol

Le problème principal avec les métaux lourds comme le plomb, le cadmium, le cuivre et le mercure est qu'ils ne peuvent pas être biodégradés, et donc persistent pendant de longues périodes dans des sols. Leur présence dans les sols peut être naturelle ou anthropogénique (Figure3).

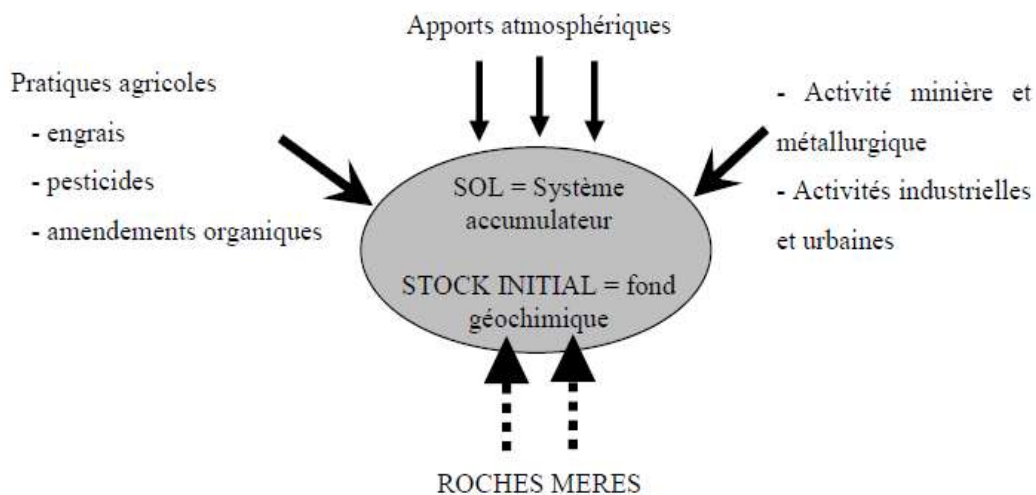


Figure 03 : Origine des métaux lourds dans le sol [41]

❖ Origine naturelle

Les métaux lourds sont présents naturellement dans les roches, ils sont libérés lors de l'altération de celles-ci pour constituer le fond géochimique [18]. La concentration naturelle de ces métaux lourds dans les sols varie selon la nature de la roche, sa localisation et son âge.

❖ Origine anthropique

Cependant, la source majeure de contamination est d'origine anthropique. Au cours des dernières décennies, l'apport de métaux lourds au sol dans le monde s'est étendu ; à l'heure actuelle on l'estime à 22000 tonnes de cadmium, 939000 t de cuivre, 783000 t de plomb, et 1350000 t de zinc.

Les principaux types de pollutions anthropiques responsables de l'augmentation des flux de métaux, sont la pollution atmosphérique (rejets urbains et industriels), la pollution liée aux activités agricoles et la pollution industrielle [10].

II-5-1 Mobilité et biodisponibilité des métaux lourds dans le sol

La toxicité d'un métal dépend de sa spéciation (forme chimique) et des facteurs environnementaux. Dans le sol, les métaux lourds peuvent exister sous forme d'ion libre ou sous forme liée à des particules de sol. Cependant, un métal n'est toxique pour les organismes vivants que s'il est sous forme libre; il est alors biodisponible. Comme tout élément chargé positivement, les cations métalliques peuvent interagir dans le sol avec toute particule organique ou minérale chargée négativement. De l'équilibre entre les formes libres et fixées de l'ion va dépendre de biodisponibilité, directement liée à sa toxicité [19].

Enfin, la biodisponibilité (Figure 04) des métaux lourds varie en fonction de plusieurs facteurs du sol, Parmi lesquels, la capacité d'échange de cationique (CEC), le pH, le potentiel redox (Eh), la teneur en phosphate disponible, la teneur en matière organique et les activités biologiques.

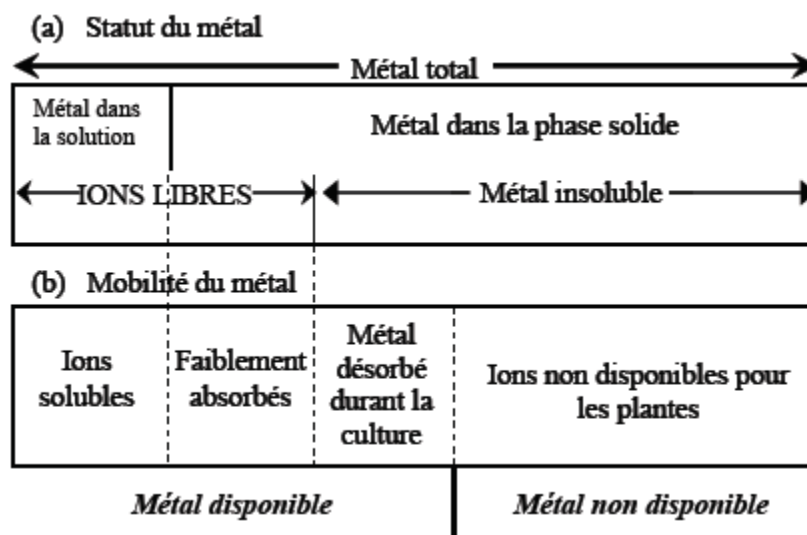


Figure 04 : Mobilité des métaux lourds dans le sol [19]

II-5-2 Les facteurs modifiant la mobilité des métaux lourds

❖ La teneur en argile

Les argiles, de par leurs propriétés physico-chimiques, jouent un rôle très important dans la disponibilité des métaux lourds. Des études ont montré que les métaux lourds peuvent être absorbés et immobilisés par les minéraux argileux ou également être complexés par la matière organique du sol en formant alors un complexe organométallique. En effet, la charge électronégative des argiles les rend aptes à contracter des liaisons électrostatiques avec toute entité chargée positivement, comme les cations métalliques [19]. Ces liaisons sont réversibles et les cations fixés sont échangeables : ils peuvent être remplacés par d'autres cations présents dans la phase aqueuse du sol. Cette capacité d'échange de cations (CEC) exprimée en milliéquivalents pour 100 g est une caractéristique importante de chaque argile qui conditionne grandement la biodisponibilité d'un métal dans le sol.

❖ Le pH

Le pH est un autre facteur important influençant la solubilité et la spéciation du métal et donc sa toxicité. Quand le pH diminue d'une unité, la concentration des cations métalliques libres augmente d'environ un facteur de 2 dans la solution de sol et par conséquent améliore la phytoextraction. Les organismes et les microorganismes eux-mêmes peuvent influencer la disponibilité des métaux lourds dans leur environnement proche par acidification locale lors d'une réaction métabolique ou par la production de composés complexant les métaux lourds [19].

❖ Le potentiel redox (Eh)

Le potentiel redox (Eh) permet de caractériser les échanges d'électrons entre les espèces chimiques. Ainsi, les faibles valeurs d'Eh favorisent la dissolution des hydroxydes et entraînent une augmentation de la concentration des métaux associés avec des composants [19].

De plus, la modification du degré d'oxydation des ligands ou des éléments se liant avec le métal influence indirectement la solubilité des métaux lourds. Par exemple, en conditions réductrices, les sulfates sont réduits en sulfure qui piègent volontiers les éléments métalliques tels que le Pb, le Cd et le Zn.

Bien que l'influence des conditions oxydo-réductrices du sol semble très importante au regard de la mobilité des éléments métalliques, il n'en demeure pas moins que ce facteur apparaît souvent comme secondaire par rapport au pH. En effet, pour un sol donné l'Eh varie en fonction inverse du pH, il augmente quand le pH diminue [19].

❖ L'activité biologique

La compréhension globale des phénomènes biologiques jouant sur la solubilité des métaux lourds dans les sols est rendue difficile par la multiplicité des actions et interactions à tous les niveaux. Parmi les microorganismes on retrouve de nombreuses populations bactériennes et fongiques dont les activités métaboliques influencent la mobilité des métaux lourds. Cependant, beaucoup de ces phénomènes sont également communs aux plantes [19]. Les principaux modes d'action sur la mobilité des polluants métalliques sont la solubilisation, l'insolubilisation et la volatilisation :

- La solubilisation provient de la production de composés acides tels que les acides carboxyliques, phénoliques, aliphatiques, nitrique et sulfurique. Certaines bactéries chimiolithotrophes (*Thiobacillus*, *Leptospirillum*, *Galionella*) oxydent les formes réduites du fer et du soufre contenues dans les sulfures et produisent de l'acide sulfurique, susceptible de dissoudre les silicates, les phosphates, les oxydes et les sulfures, libérant ainsi les métaux lourds. Les champignons et les racines des plantes excrètent eux aussi des acides afin d'augmenter leur absorption de nutriments, ou tout simplement comme déchets métaboliques [19]. Cette acidification favorise aussi la mobilité des autres éléments qui ne sont pas indispensables pour le métabolisme végétal.

D'autre part, plusieurs autres molécules organiques, capables de complexer spécifiquement certains éléments en solution, peuvent être également libérées en cas de carence nutritive.

- L'insolubilisation constitue le phénomène opposé. Bien que le phénomène de détoxification externe des métaux lourds par des exsudats racinaires n'ait jamais été démontré, certains acides organiques de faible masse moléculaire, comme les acides oxalique, citrique ou fumarique qui interviennent dans la complexation intracellulaire d'éléments nutritifs, peuvent être sécrétés dans le milieu extérieur. Ils limiteraient ainsi les transferts par des processus de complexation.
- La volatilisation repose sur l'action directe de certains microorganismes sur le degré d'oxydation de l'espèce métallique. C'est le cas du mercure, de l'arsenic et du sélénium (Se). La biométhylation permet le transfert de groupements méthyle directement aux atomes, Pb, Sn, As, Sb et Se, permettant leur volatilisation dans l'atmosphère [19].

Les décharges non contrôlées constituent des foyers de contamination chimique particulière notamment la pollution par les métaux lourds.

Les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), et le mercure (Hg) (figure5) ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités. En effet, l'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé de l'homme et de nombreux animaux et des végétaux [20].

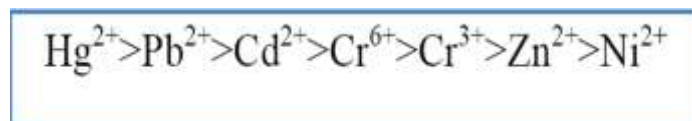


Figure 05 : Classement des métaux lourds par ordre de toxicité [21].

III-1 L'impact des métaux lourds sur les micro-organismes du sol

Une concentration excessive de métaux lourds dans le sol peut se traduire par des modifications quantitatives et qualitatives de la flore (bactéries, champignons ...) et la faune du sol (vers de terre, protozoaire...etc.).

Dans les cas extrêmes, des fonctions biologiques du sol peuvent être altérées et des effets phytotoxiques peuvent être observés, avec des conséquences sur le fonctionnement des cycles biochimiques.

Au plan quantitatif, les effets toxiques d'une concentration excessive de métaux lourds se manifestent par une chute plus au moins importante de l'abondance de micro-organismes ou du niveau de la biomasse microbienne, et une altération de la structure de cette communauté [22].

A l'origine de ces manifestations toxiques, se trouve principalement l'inactivation d'enzymes par fixation irréversible des métaux lourds sur des protéines à activité enzymatiques. Au plan qualitatif, les modifications de la faune et la flore du sol sous l'influence des métaux lourds résultent principalement de la sensibilité de différents genre et espèces [22].

III-2 L'impact des métaux lourds sur les plantes

La phytotoxicité des métaux lourds peut être occasionnée directement ou indirectement sur tous les processus physiologiques des végétaux [23]. Les effets toxiques préliminaires sur les plantes sont : la catalyse des enzymes, la dégradation de la membrane cellulaire et l'inhibition de la croissance des racines. Ces changements causent de nombreux effets secondaires comme l'inhibition de photosynthèse et d'absorption des éléments minéraux, le déséquilibre hormonal et certaines déformations structurales des plantes.

Les métaux comme le zinc, le cadmium, et le cuivre ont des caractéristiques électroniques similaires. Ils manifestent différentes propriétés chimiques avec les ligands biologiques et peuvent causer différents effets biologiques. Lorsqu'un métal est présent, sous forme assimilable, en quantité très importante, la plante s'enrichit de cet élément sans que la production de matière sèche augmente (il s'agit d'une consommation de luxe). Néanmoins, au-delà d'un certain taux, le métabolisme végétal est réduit, le rendement de la culture baisse et la mort de la plante [23].

III-3 L'impact des métaux lourds sur la santé

La plupart des métaux lourds, suite à une absorption importante, provoquent des troubles respiratoires et digestifs (diarrhées, vomissements, douleurs abdominales) pouvant être extrêmement graves, jusqu'à entraîner la mort. C'est le cas du chrome, ou des vapeurs de mercure. Les dysfonctionnements rénaux sont également fréquents. En cas d'intoxication chronique, le plomb et le mercure se distinguent par le fait que le système nerveux central est leur cible privilégiée, entraînant des troubles moteurs (coordination des mouvements, tremblements), du comportement, de la mémoire et une altération des capacités intellectuelles. Le plomb perturbe également la synthèse de l'hémoglobine, ce qui provoque l'anémie (défaut de globules rouges) [12].

Le cadmium s'attaque plutôt aux reins, mais entraîne également une ostéoporose due à une interférence avec le métabolisme du calcium ; le nickel et le chrome provoquent essentiellement des pathologies respiratoires. Certains métaux lourds sont clairement identifiés comme étant cancérigènes (arsenic, cadmium, chrome, nickel), d'autres sont suspectés de l'être ; le doute subsiste en raison du manque de données toxicologiques, ou de leur manque de fiabilité. Enfin, certains

métaux sont toxiques pour la reproduction, soit parce qu'ils engendrent des malformations ou des troubles chez les enfants, soit parce qu'ils sont responsables d'une diminution de la fertilité (cas du plomb) [12].

Le danger est encore plus grand pour les enfants car chez eux la barrière hémato-encéphalique n'est pas entièrement développée (intoxication au plomb possible). Le tableau 3 résume les effets de certains métaux lourds sur la santé [12].

Tableau 03: Les effets de certains métaux lourds sur la santé[12]

Métaux	Effets sur la santé
Aluminium	Neurotoxique, suspecté de jouer un rôle dans la maladie d'Alzheimer
Arsenic	Lésions cutanées, troubles digestifs, troubles de la reproduction, cancérigène avéré
Cadmium	Néphrotoxique, cancérigène avéré
Chrome (VI)	Troubles respiratoires, inflammations des muqueuses, ulcères, cancérigène avéré
Cuivre	Irritation des muqueuses respiratoires et oculaires, douleurs épigastriques, céphalées, nausées, étourdissements, vomissements, diarrhée, tachycardie, une insuffisance rénale
Mercur	Neurotoxique puissant, reprotoxique
Nickel	Atteinte du système respiratoire, cancérigène avéré
Plomb	Neurotoxique, responsable de saturnisme, troubles du développement cérébral, perturbations psychologiques et difficultés d'apprentissage scolaire chez les enfants, peut-être cancérigène.

Les organes cibles des métaux lourds sont multiples : les ions métalliques se fixent sur les globules rouges (Pb, Cd, CH₃Hg). Les métaux s'accumulent dans le foie et les reins (organes très vascularisés), les dents et les os accumulent le plomb. D'autre part, les métaux solubles dans les lipides comme le plomb, tétra-éthyle ou le méthylmercure peuvent pénétrer dans le système nerveux central [24].

III-4 Résultats de quelques travaux portants sur l'impact des décharges sauvages sur le sol

Les résultats de l'étude réalisée sur les sols de la décharge non contrôlée d'Ahfir-Saidia (Maroc oriental) ont mis en évidence la pollution générée par les lixiviats de la décharge, surtout par le Pb qui dépasse les normes recommandées. Aussi, les teneurs en métaux lourds varient avec les points de prélèvement dans la décharge et la profondeur du sol analysé. L'analyse des échantillons de sol de la décharge a montré une distribution spatiale importante de tous les métaux lourds analysés : Pb, Zn, Ni, Cr, As et Co. Les résultats de cette étude ont révélé que les sols de la décharge sont considérablement contaminés par de nombreux métaux dont les concentrations sont proches ou bien dépassent largement les valeurs seuils recommandées. [20].

Les résultats obtenus sur les sols de la décharge non contrôlées de la ville de Tanger ont révélé que ces derniers sont considérablement contaminés par de nombreux métaux (Pb, Zn, Cd, Cr et As) dont les concentrations sont proches ou bien dépassent largement les valeurs seuils recommandées. Dans cette décharge, le sol a pu être pollué par le Zinc dont l'origine est forte probablement anthropique. [25].

Une autre étude réalisée sur quelques décharges publiques non contrôlées à Mostaganem (décharge d'El Hchem, de Hassi Memeche et d'Essour) sur la contamination métallique du sol et de la végétation a montré que pour la plupart des éléments métalliques, les concentrations moyennes sont importantes dépassant ainsi les valeurs tolérables. Certaines valeurs des éléments Cr, Cu, Zn, Pb, Ni, Cd, Co et As enregistrées au niveau des trois sols excèdent en effet largement les seuils critiques fixés par l'OMS. Cette pollution varie selon le terrain. Il est à noter que le site à proximité de la décharge d'Essour est plus pollué que les autres sites.

Il a été difficile (faute de données sur le fond géochimique des sols algériens) de différencier avec certitude la quote-part de métaux de nature endogène de celle d'origine anthropique. Néanmoins, les fortes teneurs trouvées seraient certainement un argument en faveur d'apport anthropique causé par la présence des décharges non contrôlées [26].

L'analyse des concentrations en métaux lourds Cd, Cr, Cu, Pb, et As dans les sédiments et sols superficiels et profonds le long du Oued Sabeq et au sein de la décharge sauvage de Béni-Mellal a permis de retenir les résultats suivants:[27] .

- La distribution des teneurs en métaux dans les sols et les sédiments superficiels de l'oued de Sabeq montre que Cd, le Cu et le Cr sont des polluons les plus remarquables dans la zone d'étude.
- une augmentation de l'amont vers l'aval de ces métaux lourds, avec une forte évolution au sein de la décharge.
- les éléments métalliques se concentrent d'avantage dans les sols que dans les sédiments.

Une étude réalisée sur la décharge publique de Mazghitane (l'ancienne décharge publique de la ville de Jijel [28], a permis de tirer les conclusions suivantes :

- De fortes teneurs en Pb enregistrées dans les stations situées aux seins de la décharge, et plus précisément dans l'horizon de surface, à cause des déchets déposés en permanence.
- De fortes teneurs en Pb ont été aussi enregistrées en profondeur ce qui explique une origine gégène donc naturel.

Le problème des sols pollués par les métaux lourds est la conséquence d'un passé, et trop souvent encore d'un présent industriel, peu soucieux des rejets d'éléments toxiques dans les sols, rendant de nombreux sites potentiellement pollués et dangereux pour la santé publique et animale. Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés par les métaux lourds, néanmoins toutes ne sont pas applicables dans toutes les conditions. Une étude est donc nécessaire pour déterminer la meilleure technologie pour les sols pollués. Le contexte économique est à prendre en considération, dans ce cas, afin de trouver des solutions innovatrices à la problématique de la contamination des sols par les métaux lourds [29].

IV- 1 Définition de la remédiation

La remédiation ou réhabilitation vise à redonner au site une certaine qualité environnementale et à éliminer les risques que présente le site pour la santé publique. Elle doit donc toujours être précédée d'une étude de risque[30].

Il existe quatre grandes catégories de réhabilitation des sols contaminés par des polluants organiques et inorganiques : les processus biologiques, chimiques, physiques et thermiques. Ceux-ci ne sont pas exclusifs. Ils permettent d'éliminer les éléments traces métalliques du sol qui se sont accumulés[30].

Ces processus d'assainissement peuvent se faire[30] :

- **in situ** : le traitement est effectué sur et dans le sol du site concerné, sans excavation des terres. Les processus appliqués in situ sont souvent lents et d'efficacité limitée.
- **on site** : le traitement est effectué sur le site après l'excavation des terres. Les terres décontaminées servent au remblaiement.
- **off site** : le traitement est effectué après l'excavation et le transport des terres vers des installations fixes qui sont localisées à l'extérieur du site [30].

IV- 2 Les Techniques de remédiation

Il y a deux types de remédiation : conventionnelle et non conventionnelle

IV-2-1 Technique de remédiation conventionnelle

IV-2-1-1 La stabilisation physico-chimique

La stabilisation physico-chimique est également appelée technique d'inertage, de stabilisation/solidification ou encore d'immobilisation. Elle peut s'appliquer in situ ou ex situ. Cette méthode de remédiation reprend l'ensemble des techniques qui consistent à réduire le risque de dissémination des contaminants dans le milieu environnant, de manière stable et pérenne, en les immobilisant sous une forme moins soluble et/ou moins toxique à travers la mise en œuvre de mécanismes physico-chimiques. Cela peut être fait soit par action directe dans le sol (in situ), soit au moyen d'une installation mobile acheminée sur le site (on site), soit dans une installation dédiée (off site) [31].

IV-2-1- 2 L'électrocinétique

Après excavation, il est possible de traiter les terres via l'extraction électrique. Cette méthode est basée sur l'application d'un champ électrique dans le sol induisant le transport des polluants vers les électrodes où ils sont récupérés. Quatre mécanismes peuvent être appliqués :

- **l'électromigration** : déplacement des atomes, via un flux d'électrons, dans le sol.
- **l'électrophorèse** : génération d'un mouvement des particules dans la phase aqueuse du sol.
- **l'électroosmose** : production d'un mouvement de la solution aqueuse du sol de l'anode vers la cathode. Cette méthode peut être appliquée in situ également.
- **l'électrolyse** : déplacement des ions et des complexes dans la phase aqueuse du sol.

IV-2-1-3La désorption thermique

La désorption thermique s'applique uniquement ex situ. Cette technique consiste à extraire les composés volatils du sol pollué par chauffage, la température n'excédant pas les 650°C, soit dans une installation fixe, soit dans une unité de traitement mobile amenée sur le site contaminé. Avant leur introduction dans le désorbeur, les sols sont soumis à un prétraitement : broyage, tamisage, déferrailage et séchage. Dans le désorbeur, le réchauffement va augmenter les pressions de vapeur. Ainsi, les contaminants en phase liquide ou solide adsorbés sur la matrice vont passer en phase gazeuse puis ils seront récupérés ou immobilisés. Les gaz issus du désorbeur seront traités

avant leur rejet dans l'atmosphère et le sol dépollué sera refroidi et réhumidifié pour éviter les émissions de poussières[30].

IV-2-2 Techniques de remédiation non conventionnelle.

IV-2-2-1 La bioremédiation

Certains micro-organismes possèdent des propriétés leur permettant d'immobiliser ou de mobiliser les métaux lourds disséminés dans les sols via l'accumulation intracellulaire, la production d'agents chélatants, la réduction des métaux, etc. [30].

Dans le cas de la biosorption, les métaux lourds et d'autres ions sont adsorbés dans une solution aqueuse via l'utilisation des micro-organismes qui lient les métaux sur leur surface cellulaire. Cette technique permet d'immobiliser les métaux [30].

Les micro-organismes sont également capables d'oxyder ou de réduire les contaminants métalliques [30].

IV-2-2-2 La phytoremédiation

IV-2-2-2-1 Définition de la phytoremédiation

L'étymologie du mot phytoremédiation provient du grec « phyton » - plante, et du latin « remedium » - rétablissement de l'équilibre, remédiation. La phytoremédiation est définie comme l'utilisation de plantes pour extraire ou transformer les polluants organiques et aussi inorganiques (plus particulièrement les métaux lourds) [31].

La phytoremédiation ou la bioremédiation est une nouvelle technologie qui utilise les plantes vertes et/ou des microorganismes associés (ex. bactéries, champignons) pour le nettoyage d'un environnement pollué par les métaux lourds et les métalloïdes [32].

C'est une technique de réhabilitation environnementale qui utilise les capacités des plantes pour éliminer, contenir, ou rendre moins toxiques les polluants [31].

IV-2-2-2-2 Les techniques de la phytoremédiation

Les aspects technologiques d'efficacité, de coût du traitement et les aspects économiques sont abordés. Plus précisément, les types de stratégies de phytoremédiation, particulièrement utilisés dans la dépollution des métaux lourds (Figure08) [33].

(1) Phytostimulation

Les plantes sécrètent des exsudats racinaires qui peuvent être utilisés par les communautés microbiennes et promouvoir leur développement et leurs activités. Cette stimulation microbienne dans la rhizosphère modifie la bioaccumulation, oxydation/réduction biologique et biométhylation des métaux lourds [34].

(2) Phytostabilisation

Utilisation des plantes pour réduire la biodisponibilité des polluants par les écoulements (latéraux ou en profondeur) ou immobiliser les composés polluants en les liants chimiquement par précipitation, stabilisation, absorption ou piégeage de ceux-ci par la plante. Cette technique permet d'éviter la dispersion des polluants dans les eaux de surface et souterraines [34].

(3) Phytoextraction

Utilisation de plantes qui absorbent les métaux lourds dans les sols par les racines, puis transfèrent et accumulent ceux-ci dans leurs parties récoltables (feuilles, tiges et racines). Les métaux lourds vont se complexer avec des acides organiques ou des acides aminés synthétisés par la plante. Les métaux lourds sont ensuite récupérés en incinérant ou compostant la biomasse de plante[34].

La phytoextraction utilise des plantes capables de prélever les métaux lourds, de les transférer et de les accumuler dans les parties aériennes qui seront ensuite récoltées. Après récolte par des méthodes traditionnelles agricoles, les tissus végétaux ayant concentré les métaux lourds seront traités par séchage, incinération ou compost. Cette technique représente une alternative ou un complément aux traitements physico-chimiques des sols contaminés par les métaux lourds. Il existe deux stratégies de phytoextraction, la phytoextraction assistée (induite) et la phytoextraction continue [34].

✓ Phytoextraction induite

La phytoextraction induite se fait en présence de chélateurs et de plantes à forte biomasse et à croissance rapide. Lorsque la plante a atteint un certain niveau de croissance, les chélateurs de métaux sont appliqués au sol. Ceux-ci permettent d'induire l'accumulation de métaux lourds dans la plante par augmentation de la biodisponibilité de l'élément ciblé. Les chélateurs des métaux lourds comme EDTA (éthylène diamine tétra acetic) et EDDS (ethylene diamine disuccinate) pour le plomb connu pour améliorer la phytoextraction par l'augmentation de la biodisponibilité et de l'accumulation des métaux lourds [33].

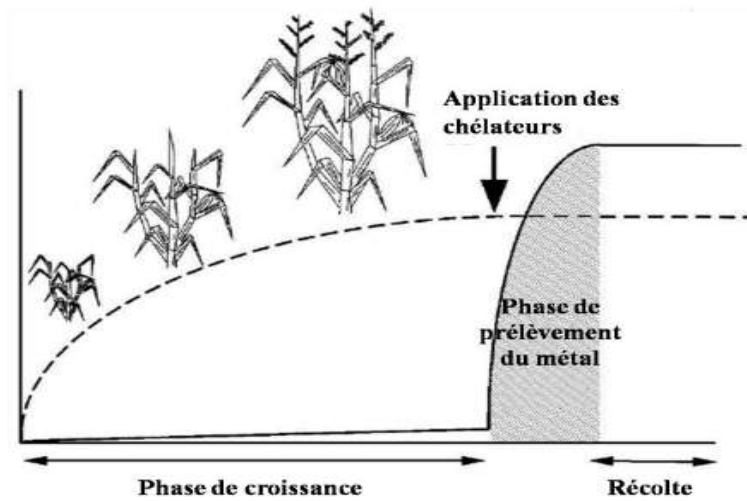


Figure 06: Schéma représentant une phytoextraction induite par des chélateurs [33].

✓ Phytoextraction continue

Contrairement à l'absorption induite par des chélateurs, la phytoextraction continue est basée sur les capacités génétiques et physiologiques des plantes spécialisées dans l'absorption, la translocation et la tolérance des métaux lourds. On parle de « plante hyperaccumulatrice ».

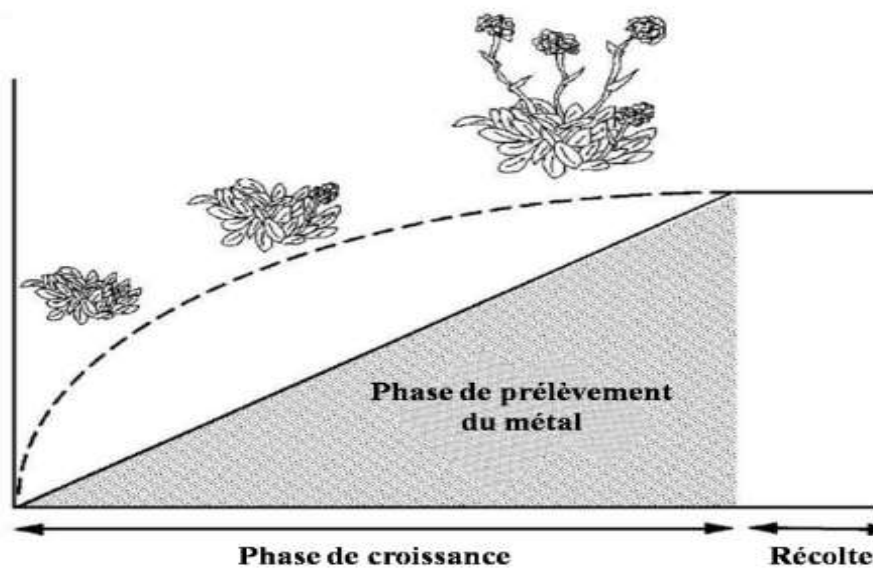


Figure 07 : Schéma représentant une phytoextraction continue[33].

(4) Phytovolatilisation

Utilisation de plantes qui absorbent des contaminants organiques et autres produits toxiques, transformant ceux-ci en éléments volatiles peu ou pas toxiques et les relâchant dans l'atmosphère via leurs feuilles[34].

(5) Phytodégradation

La phytodégradation (ou phytotransformation) consiste à convertir des polluants organiques en composés moins toxiques voire même être totalement minéralisés. Cette décomposition est réalisée grâce à des enzymes variées sécrétées par la plante[32].

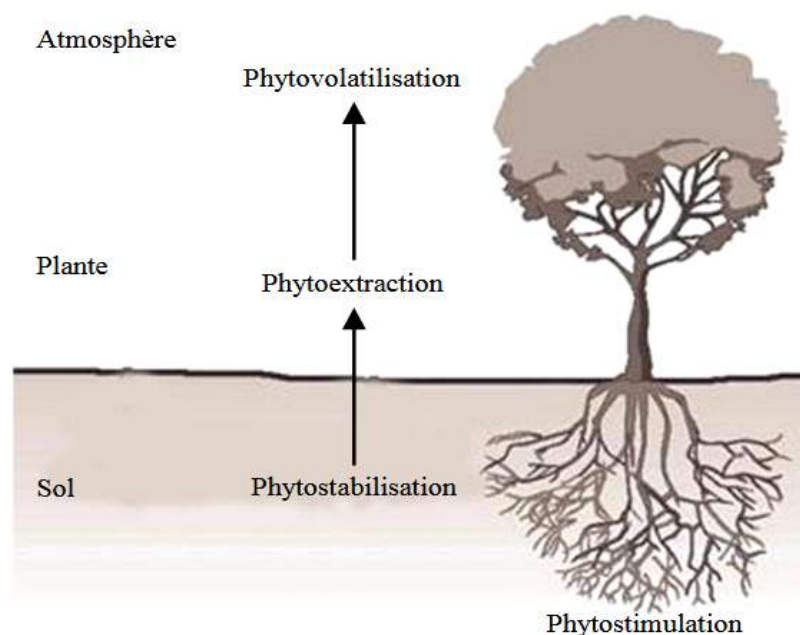


Figure 08 : Schéma représentant la phytoremédiation [33].

IV-2-2-3 Avantages et inconvénients

IV-2-2-3-1 Avantages

- La phytoremédiation est une méthode naturelle, absorbant les gaz à effet de serre par photosynthèse, et qui entraîne peu de désagréments visuels ou sonores. Avec la phytoremédiation, l'activité biologique et la structure du sol sont préservées[33]. Cette technique s'inscrit donc dans une démarche de développement durable et est mieux perçue par le public que les techniques classiques.

- La phytoremédiation garantit un couvert végétal qui participe à la beauté du paysage et qui freine l'érosion du sol et le lessivage des particules du sol tout en assurant une augmentation des infiltrations.
- La phytoremédiation, la remédiation du sol se fait en minimisant les perturbations de l'environnement et permet même parfois de relancer le cycle de dégradation de la matière organique dans des zones où la végétation est limitée vu la présence de métaux lourds qui altèrent la pédoflore et la pédofaune.
- Le coût de la phytoremédiation est faible : celui-ci est estimé 10 à 100 fois moins coûteux que les techniques classiques.
- Les techniques de phytoremédiation peuvent être appliquées préventivement ou être utilisées complémentaires à d'autres techniques de remédiation [33].

IV-2-2-3-2 Inconvénients

- L'évaluation de la disponibilité se fait en appliquant sur des échantillons de sol des réactifs sélectifs et relativement peu agressifs
- la limitation de l'action des plantes en profondeur liée à une capacité d'enracinement comprise entre 0,5 à 1 mètre pour les herbacées et entre 2 à 4 mètres pour les arbres et arbustes ; et les racines ne sont pas perpétuellement en contact avec le sol contaminé, ce qui diminue la stabilisation ou le prélèvement de métaux [19].
- Le traitement par phytoremédiation se fait donc sur le long terme et nécessite, durant la période de traitement mais aussi après, un suivi attentif de la qualité du sol, des végétaux et des eaux de percolation [19].
- Les techniques de phytoremédiation sont moins efficaces et destructrices.

IV-2-2-4 Les caractéristiques des plantes accumulatrices et hyperaccumulatrices

Certaines études réalisées en 1989 (Baker et Brooks), définies les plantes hyper accumulatrices comme des plantes qui accumulent des concentrations $> 1.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Pb, Cu, Co, Cr ou Ni, et/ou $> 10.000 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Mn ou Zn, et/ou $> 100 \text{ mg.kg}^{-1}$ de Cd.

D'autre étude en 1998 (Shen et Liu) , défini une plante comme hyper accumulatrice : dans laquelle les concentrations en Pb dans les parties hors sol sont de 10 à 500 fois supérieures à celles des plantes issues de sites non contaminés, et avec un facteur d'enrichissement $R > 1$.

De plus, les deux facteurs de bioaccumulation (BCF) et de translocation (TF) peuvent être utilisés pour estimer le potentiel d'une plante vis-à-vis de la phytoremédiation. Les plantes présentant des valeurs de TF et en particulier de BCF inférieurs à 1, ne conviennent pas pour la phytoextraction. Mais les espèces tolérantes aux métaux lourds, présentant des valeurs de BCF élevées et des valeurs basses de TF, peuvent être utilisées pour la phytostabilisation d'un site contaminé, avec un couvert végétale. À l'heure actuelle, plus de quatre cent espèces de plantes sont connues comme hyperaccumulatrices de métaux, pouvant accumuler de fortes concentrations de métaux dans leur biomasse aérienne [19].

Les familles végétales qui dominent dans les accumulateurs et hyperaccumulateurs de métaux, sont : *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Caryophyllaceae*, *Cyperaceae*, *Cunouniaceae*, *Fabaceae*, *Flacourtiaceae*, *Lamiaceae*, *Poaceae*, *Violaceae* et *Euphobiaceae*.

Les hyperaccumulatrices de métaux que sont les *Brassicaceae* présentent plus de nombre de taxons.

D'autre part, plusieurs plantes ont été trouvées être tolérantes aux métaux, et sont appelées « exclueuses » et sont capables de restreindre l'absorption des métaux et/ou la translocation depuis les racines vers les parties aériennes et elles poussent sur des milieux présentant des concentrations élevées en métaux toxiques [19].

Tableau 04 : Plantes ayant un potentiel pour la phytoextraction de divers métaux [19].

Métal	Espèce végétale
Cd	<i>Brassicajuncea (L.) Czern</i>
Cr	<i>B. juncea</i>
Cu	<i>B. juncea</i>
Ni	<i>B. juncea</i>
Pb	<i>B. camptris L; B. carinataA.Br; B.juncea; B.napus L; B. nigra (L.) Koch.; Helianthusannuus L.; PisumsativumL.; Zeamays L</i>
Se	<i>B. napus L.; FestucaarundianaceaSchreb; Hibiscus cannabinus L.</i>
Zn	<i>Avenasativa; B.juncea; B. napus L. Hordeumvulgare, B.rapa</i>

IV-2-2-5 Résultats de quelques études en phytoremédiation

Les résultats obtenus par l'étude réalisée sur la phytoremédiation des boues contaminées au chrome par les plantes aquatiques à Dezful (Iran) montrent que les trois espèces de plantes étudiées : *Phragmites australis*, *Typha latifolia* et *Bulrushscirpus* possèdent une capacité importante à absorber et réduire la concentration en chrome des boues contaminées par ce métal dans la zone de culture. Les résultats obtenus ont montré aussi en ce qui concerne l'épuration du sol ou des boues contaminées par les métaux lourds, que les recherches peuvent être effectuées sur les plantes locales de différentes régions. Cependant, il faut poursuivre les recherches du point de vue temps, âge, température et autres éléments efficaces [35].

Le travail de recherche portant sur l'application du vermicompostage pour l'élimination des métaux lourds Zn, Cd, Cu, Ni et le Pb par le tournesol a montré que les faibles doses de métaux lourds appliquées stimulaient la racine et l'élongation des pousses de tournesol.

Les plus fortes concentrations, à savoir 40 et 50 ppm de Cd, Cu, Ni et Pb ont considérablement réduit la capacité de germination. Cependant, les plantes germent et se développent efficacement à toute concentration de Zn évaluée dans cette étude. L'étude a montré aussi que les métaux lourds étaient efficacement absorbés à toutes les concentrations par la biomasse produite d'*Helianthus annuus* cultivé en vermicompostage et que l'absorption augmente relativement avec les concentrations croissantes des métaux dans le sol [36].

Les résultats de l'étude réalisée sur l'accumulation du cadmium par quelques espèces végétales cultivées aux environs d'une usine d'engrais phosphatés à Sfax (Tunisie) montrent que les concentrations de cadmium diminuent avec la distance. Cette chute, proportionnelle à la distance, est tributaire des facteurs topographiques. En effet, la moindre protection naturelle ou artificielle se répercute immédiatement sur les quantités de cadmium accumulées.

À cela il faut ajouter l'effet de la hauteur des cheminées sur la dispersion des particules. La spécificité végétale joue dans l'accumulation du cadmium (comme dans celle d'autres éléments d'ailleurs) un rôle non négligeable. On distingue les espèces riches et les espèces pauvres, aussi bien sur sol contaminé que sur sol normal [37].

L'étude réalisée sur la tolérance et l'accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée de l'ancienne mine de Boudoukha, a démontré que pour l'ensemble des espèces, les teneurs des éléments traces métalliques dans les racines et les parties aériennes dépassent largement les seuils limites estimés naturels. D'après les résultats obtenus, les FBC du Cd, du Cu, du Pb et du Zn les plus élevés sont enregistrés au niveau des racines de la majorité des espèces étudiées.

Cependant, la capacité de translocation varie d'une plante à une autre. Une remarquable variabilité dans les FT entre les espèces a été constatée. Ainsi, l'étude a fait sortir pour le zinc que l'accumulation du métal est beaucoup plus importante dans les parties aériennes de *Verbascumsinuatum* que chez les autres espèces végétales étudiées.

Donc il ressort de cette étude que la présence d'une végétation spontanée à base de *Cynodondactylon L.*, *Cyperuslongus L.*, *Dittrichiaviscosa L.*, *MenthasuaveolensEhrh.*, *Trifolumdubiumsibth*, et *Verbascumsinuatum L.* serait très efficace pour la phytoremédiation des sols de cette zone d'étude, malgré le risque encouru pour la chaîne alimentaire et l'environnement une fois ce lieu est fréquenté par les animaux comestibles. Il est possible dès lors, de revégétaliser rapidement les zones encore dépourvues de végétation ainsi que de nouveaux sites pollués [38].

Les résultats de l'étude de l'accumulation du plomb par quelques espèces végétales cultivées au voisinage d'une fonderie de plomb à Sfax portant sur cinq espèces végétales cultivées, montrent une variation très importante de l'accumulation du plomb sur les feuilles. Au voisinage de la fonderie de plomb, l'olivier apparaît comme une espèce accumulatrice de ce métal.

La contribution du sol à l'accumulation du plomb dans les espèces végétales de la région d'étude paraît très faible.

Les concentrations en plomb les plus fortes sont déterminées dans les espèces végétales les plus proches de la fonderie .L'interaction des facteurs climatiques notamment les vents humides d'origine marine et la hauteur relativement faible de la cheminée de la fonderie favorisent le dépôt rapide des particules émises et contaminent par conséquent les zones les plus proches de la source d'émission [39].

Les expériences effectuées sur l'accumulation des métaux lourds par les plantes cultivées permettent d'envisager l'utilisation des végétaux supérieurs en bio décontamination des sols pollués par les éléments toxiques.

La sensibilité des plantes aux milieux pollués varie en fonction de l'espèce et de la concentration des éléments toxiques.

Les plantes testées tomate, carotte, et arroche (*Atriplexhastata*) montrent une tolérance évidente et elles croissent bien sur les milieux ayant 30% de boue contenant, 45 ppm Cd, 1218 ppm Ni, 23 ppm Cu, 6690 ppm Zn, 7500ppmCr et 18 240 ppm Fe.

L'absorption et l'accumulation des métaux lourds par les plantes dépendent à la fois de l'espèce végétale et de l'élément chimique considéré ou encore du rapport des concentrations entre certains métaux.

Ainsi, un niveau élevé en certains métaux dans le milieu entraîne une diminution de l'incorporation du fer. On a constaté que l'arroche (*Atriplexhastata*) est capable d'accumuler des quantités importantes de cadmium, de cuivre et de zinc, et la carotte peut absorber plus de chrome et de nickel

L'importance de la distribution dans les différentes parties des plantes est fonction de la nature de l'élément. En général, les teneurs des métaux toxiques sont plus élevées dans les racines que dans les tiges et les feuilles (exception pour la carotte) [40].

Actuellement, l'augmentation de la production des déchets va de pair avec le développement économique, l'essor démographique, l'urbanisation et l'amélioration du niveau de vie de chaque pays. C'est un problème mondialement connu.

Les décharges non contrôlées constituent des foyers de contamination chimique particulière notamment la pollution par les métaux lourds. En effet, lors du stockage et sous l'action conjuguée de l'eau de pluie et de la fermentation naturelle, les déchets produisent une fraction liquide appelée lixiviats, riche en polluants organiques et éléments métalliques ainsi que le gaz de combustion lors de l'incinération non contrôlée (à ciel ouvert), les résidus et les cendres contiennent de nombreux composants chimiques présentant des propriétés toxiques, les plus importants sont les métaux lourds.

Les métaux lourds tels que le plomb (Pb), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le zinc (Zn), et le chrome (Cr) ne peuvent pas être biodégradés et donc persistent dans l'environnement pendant de longues périodes. De plus, ils sont continuellement rajoutés dans les sols par diverses activités : en agriculture par l'application de boues d'épuration ou par voie de l'industrie métallurgique ou par divers déchets et sous-produits des activités humaines.

Ces activités induisent des modifications du sol et dans certains cas une production de sols fortement anthropisés. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement peut se répercuter sur la santé des végétaux, des animaux et des êtres humains.

Donc, pour un monde qui devient de plus en plus averti des impacts que les pollutions peuvent engendrer (maladies, espèces menacées de disparition, changements climatiques...), le public porte désormais leurs exigences et leurs attentes sur les technologies qui génèrent le moins possible d'inconvénients pour eux et pour leur environnement. La phytoremédiation est sans nul doute une solution qui risque de devenir de plus en plus populaire dans l'avenir.

Nous estimons que beaucoup de plantes pourraient être étudiées dans la phytoremédiation et apporter à partir des essais et des suivis à long terme plus d'éclaircissements sur la remédiation par les plantes.

- [1] **Rousseau P., Navarro A., Vermande P., 1990.** Distribution des 7 principaux métaux lourds dans les constituants des ordures ménagères. Tribune de l'eau .p :17- 25.
- [2] **Lim H.S., Lee J.S., Chon H.T., Sager M., 2008.** Heavy metal contamination and health risk assessment in the vicinity of the abandoned Songcheon Au-Ag mine in Korea. Journal of Geochemical Exploration. p: 223-230.
- [3] **Long X.X., Yang X.E., Ni W.Z., Ye Z.Q., He Z.L., Calvert D.V., Stofella J.P., 2003.** Assessing zinc thresholds for phytotoxicity and potential dietary toxicity in selected vegetable crops. Communications in Soil Science and Plant Analysis. p: 1421-1434.
- [4] **Zheng N., Wang Q., Zheng D. 2007.** Health risk of Hg, Pb, Cd, Zn, and Cu to the inhabitants around Huludao zinc plant in China via consumption of vegetables. The Science of the Total Environment. p : 81-89.
- [5] **Berthelin J., Leyval C., 2000.** Contamination des milieux par les éléments en traces. Les conséquences sur les sols les eaux superficielles. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France 86. p : 25-37.
- [6] **Balet JM., 2016.** Gestion des déchets. 5^e édition .p : 10-11.
- [7] **Belabed S., 2018.** Contribution à l'Etude de la Pollution Métallique du Sol et de la Végétation au Niveau des Décharges publiques non Contrôlées à Mostaganem .Thèse de doctorat Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. p : 6-8
- [8] **Ouiza OA., 2018.** Impact des décharges à ciel ouvert sur la qualité environnementale de l'Oued Cheliff (Algérie). Thèse de doctorat. Université de Perpignan, Français. p : 14-19.
- [9] **Zmirou D., Beausoleil., de Coninck P., Déportes I., Dor F., Empereur-Bissonet P., Hours M., Keck G., Lefebvre L., Rouisse L., 2003.** Déchets et sols pollués. In : Environnement et santé publique - Fondements et pratiques. p : 401-404.
- [10] **Boubekri S., Affar F., 2014.** Localisation des décharges et dépotoirs sauvages, leur identification et leurs impacts sur l'environnement et la santé publique dans la commune de Bejaia. Mémoire de master Université Abderrahmane Mira de Bejaia. p : 9.
- [11] **Boucenna N., 2007.** Impact de la décharge publique sur la qualité des eaux souterraines cas de Zef –Zef (Skikda). Mémoire de Magister Université Badji Mokhtar-Annaba. p : 54-55.

- [12] **Sirven JB., 2006** .détection de métaux lourds dans les Sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (libs).Thèse de doctorat Université bordeaux 1. p : 30-42.
- [13]**Aranguren M S., 2008**. Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du Val de Milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers Approches géochimique, minéralogique et hydrochimique. Thèse de doctorat Université Paul Sabatier Toulouse III Français. P : 9-10.
- [14]**Aude L., 2013**. Prévalence de pathogènes humains dans les sols français, effet des facteurs pédoclimatiques, biologiques et du mode d'utilisation des sols. Thèse de doctorat .Université de bourgogne. p : 3-13.
- [15] **Mumen M., 2006**. Caractérisation du Fonctionnement Hydrique des Sols à l'aide d'un Modèle Mécaniste de Transferts d'Eau et de Chaleur Mis en Œuvre en Fonction des Informations Disponibles sur le Sol. Thèse de doctorat. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse .p : 6.
- [16] **Darcheville O., 2008**. Rôles des composantes géochimiques et microbiologiques d'un sol sur le comportement du sélénium en conditions oxiques et anoxiques. Thèse de doctorat Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse. p : 7-8.
- [17] **Dung H., 2009**. Impacts des métaux lourds sur l'interaction plante /ver de terre /microflore tellurique, Thèse de Doctorat Université paris Est .p : 6-18.
- [18] **Kebir T., 2011**. Étude de contamination.D'accumulation et mobilité de quelques métaux lourds dans des légumes, des fruits et des sols agricoles situés près d'une décharge industrielle de l'usine al zinc de la vile de ghzaouet .Thèse de doctorat. Université aboubekrbelkaid Tlemcen. p : 12-19.
- [19] **RemonE., 2006** .Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée des friches métallurgiques : vers de nouvelles méthodes de bio-dépollution. Thèse de doctorat Université jean monnet. p : 14-16.
- [20] **Nhari F., Sbaa M., Vasel J., Fekhaoui M., El MorhitM.,2014**. Contamination des sols d'une décharge non contrôlée par les métaux lourds : cas de la décharge Ahfir- Saidia (Maroc oriental) [Soil contamination of the landfill uncontrolled by heavy metals : case of the landfill of Ahfir-Saidia (Eastern Morocco)]. p: 1477-1484.
- [21] **Sposito G., 1981**. The Thermodynamics of Soil Solutions. Clarendon Press, Oxford. p :223.
- [22] **Girard MC., 2005** .sol et environnement, cours, exercices et étude des cas .paris .p :809.

- [23] **Behrouz EMN., 1995.** Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1 en Biologie des Organismes. p : 14-15.
- [24] **Yamina O., 2015.** Bioaccumulation de quelques métaux lourds (Pb, Zn et Cu) d'origine routière au moyen d'une mousse (*BryuargenteumHedw*) dans la ville de Tiaret(Algérie) : classes de pollution et cartographie. Thèse de doctorat .Université Djilali liables de sidi bel abbés .p:21.
- [25]**ChaerI., El Cadi A., LanjriFakih A., KhaddorM., Brigui J.2016.** Détermination du degré de contamination du site de la décharge, non contrôlée, de la ville de Tanger par quelques métaux lourds (Determination of the contamination degree of landfilluncontroledfromTangier by someheavymetals).p : 245-246.
- [26]**Belabed S., 2018 .**Contribution à l'Etude de la Pollution Métalliquedu Sol et de la Végétation au Niveau des Déchargespubliques non Contrôlées à Mostaganem. Thèse de Doctorat en Sciences .Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem. p : 54.
- [27] **El Baghdadi M., Oumeskou H., Barakat A., Nadem S., Rais J., 2015.** Effet de la Décharge publique de la ville de Béni-Mellal sur les Sédiments et les Sols au niveau d'Oued Sabeq. p3372-3380.
- [28]**Bouziane A.,Kaoula S.2005 .**Contribution à l'évaluation des teneurs totales en plomb des sols situent sur le site de la décharge publique de Mazghitane (impact de la décharge).mémoire de master. Université Med-Seddik Ben yahia-Jijel.p : 56.
- [29] **Nouri M., HaddiouiA., 2016.** Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds : une revue (The remediation techniques of heavy metals Contaminated soils: areview). p : 47.
- [30] **Vanobberghen F., 2010.** La phytoremédiation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds .mémoire de master Université Libre de Bruxelles : 40.
- [31] **Tatiana K., 2009.**Phytoremédiation par Jardins Filtrants d'un sol pollué par des métaux lourds : Approche de laphytoremédiation dans des casiers végétalisés par des plantesde milieux humides et étude des mécanismes de remobilisation/immobilisation du zinc et du cuivre. Thèse de doctorat Université Joseph-Fourier - Grenoble IS. p : 28.

- [32] **Biteur N., 2012** .Essais d'utilisation du radis (*Raphanussativus*) dans la phytoremédiation (bio dépollution) au niveau du sol contaminé par les métaux lourds (plomb) : Etude du stress oxydatif et quelques paramètres enzymatiques. Thèse de doctorat .Université d'Oran : 4.
- [33] **Martinez Choi CP., 2012**.réhabilitation des sols pollues par les éléments traces métalliques grâce aux bactéries du sol associées à la rhizosphère de *miscanthus x gigantaux*, thèse de doctorat Université de Lorraine : 25-59.
- [34]**Tremel X., 2005**. Phytoremédiation des sols d'un site de traitement du bois contaminés par le cuivre. Thèse de doctorat Université bordeaux .p :26.
- [35]**Goudarzi S., Afrous A. 2012**.Phytoremediation of the SludgeContaminatedwithChromium by Aquatic Plants in Dezful. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 1, 58-60.
- [36]**Jadia C D., Fuleka, M H. 2008**. Phytoremediation: The application of vermicompost to remove zinc, cadmium, copper, nickel and lead by sunflower plant. Environmental Engineering Management Journal (EEMJ).p: 60.
- [37]**Mezghani I., Boukhris M., Chaieb M. 2016**. Accumulation du cadmium par quelques espèces végétales cultivées aux environs d'une usine d'engrais phosphatés à Sfax (Tunisie).p : 2268-3798.
- [38]**Allouti I., Feltane S., 2016** .Tolérance et accumulation des métaux lourds par la végétation spontanée de l'ancienne mine de Boudoukha. Mémoire de master Université Med-Seddik Ben yahia-Jijel .p :61.
- [39] **Elloumi N., Ben abdallah F., Mezghani I., Boukhris M .2003** .Accumulation du plomb par quelques espèces végétales cultivées au voisinage d'une fonderie de plomb à Sfax. p : 2268-3798.
- [40] **Eshghi Malayeri B., 1995**. Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes. Thèse de doctorat Université Henri Poincaré, Nancy1 France en Biologie des organismes. p : 55.
- [41] **Robert M., Juste C .1999**.Enjeux environnementaux et industriels –dynamique des éléments traces dans l'écosystème sol. In, spéciation des métaux dans le sol .Les Cahiers de Club Crin. Paris p : 15.

Thème : Impact des décharges sauvages sur les sols et les méthodes de remédiation

Présenté par :

- Boutamine Samira
- Boumelta Rima

Date de soutenance : 14 juillet 2019

Résumé

Les décharges non contrôlées ont causé beaucoup de problèmes à l'environnement. Les métaux lourds (Cd, Cu, Pb, Cr, Ni et Zn) issus de ces décharges, sont pour la plupart très dangereux lorsque ceux-ci parviennent à contaminer le sol et les eaux souterraines, rendant de nombreux sites potentiellement pollués et dangereux pour la santé publique et animale.

Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés par les métaux lourds, essentiellement la phytoremédiation. Cette technique est basée sur l'utilisation de plantes pour extraire ou transformer les polluants (plus particulièrement les métaux lourds). Elle est naturelle, peu coûteuse et plus respectueuse de l'environnement, et s'inscrit dans une démarche de développement durable et est mieux perçue par le public que les techniques classiques.

Mots clés : décharges non contrôlées, métaux lourds, sol, phytoremédiation.

summary

Uncontrolled landfills have caused a lot of problems to the environment. The heavy metals (Cd, Cu, Pb, Cr, Ni and Zn) from these landfills are, for the most part, very dangerous when they are able to contaminate soil and groundwater, making many sites potentially polluted and dangerous. Public and animal health.

There are several technologies for soil decontamination contaminated by heavy metals, mainly phytoremediation. This technique is based on the use of plants to extract or transform pollutants (especially heavy metals). It is natural, inexpensive and more respectful of the environment, and is part of a sustainable development approach and is better perceived by the public than conventional techniques.

Key words: uncontrolled landfills, heavy metals, soil, phytoremediation.

ملخص

تسبب المفرغة غير الخاضعة للرقابة في العديد من المشاكل البيئية، حيث تعتبر المعادن الثقيلة (الكاديوم، النحاس الرصاص الكروم، النيكل، الزنك) من أبرز مخلفاتها. فهي خطيرة للغاية على التربة و المياه الجوفية. مما يجعل العديد من المواقع يحتمل ان تكون ملوثة وبذلك تكون خطيرة على الصحة العامة والحيوانية .

هناك العديد من التقنيات لتطهير التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة، أهمها المعالجة النباتية. تعتمد هذه التقنية على استخدام النباتات لاستخراج أو تحويل الملوثات خاصة (المعادن الثقيلة). فتعتبر طبيعية وغير مكلفة وأكثر احتراماً للبيئة، فهي جزء من نهج التنمية المستدامة ويصنفها الجمهور من أفضل التقنيات الحديثة.

الكلمات المفتاحية: المفرغة الغير خاضعة للرقابة، المعادن الثقيلة، التربة، المعالجة النباتية.

