

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : Sciences.

DEPARTEMENT : Chimie.

N° :



DOMAINE : Sciences de la matière.

FILIERE : Chimie.

OPTION : Chimie de l'environnement.

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique.

Par : HAMRIT Inas et DJEMIAT Sakina

Intitulé :

Dépollution du sol par lavage

Soutenu le 27/06/2022 devant le jury composé de :

Dr. GUEMACHE Abderazak

Université de M'sila

Président

Dr. DJEHICHE Mokhtar

Université de M'sila

Rapporteur

Pr. REFFAS Abdelbaki

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2021 /2022

Remerciement

Avant Tout, nous remercions "Allah" le tout puissant de nous avoir Donné la santé, la force, le courage, la patience, la persistance et nous a permis d'exploiter les moyens disponibles à fin d'accomplir ce modeste travail. Merci de nous avoir éclairé le chemin de la réussite.

*Nous remercions tout d'abord vivement Monsieur docteur **Djehiche Mokhtar** de l'Université de M'sila nous tenons à vous adresser nos profonds Remerciements nous tenons à manifester notre Reconnaissance pour votre patience, votre gentillesse et votre écoute, pour avoir répondu à nos questions et requêtes si rapidement. Merci. Nos remerciements aux membres de jury monsieur **Reffas Abdelbaki** et monsieur **Guemche Abderazak** qui nous ont fait l'honneur d'accepter de juger nous travail. Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de département de chimie et merci le professeur **Benyahia Azzedine** nous avons vraiment reconnaissant pour vos conseils constants, et tous les ingénieurs de laboratoire surtout **Hamla Iman** et **Rizoug Samia** pour son aide et son soutien.*

*Nous exprimons nos plus sincères reconnaissances docteur **Hamrit Abd elatif** et aux doctorants : **Lahmar Nedjma** et **Larkat Karima**, Merci de vos efforts déployer pour nous aider et pour vos conseils.*

Nous adressons nos plus sincères remerciements à nos enseignants de leur patience, leurs conseils, leur disponibilité tout au long des années d'études, Et nous remercions nos parents et nos familles.

*Enfin, en remercions tous celles et ceux qui par un mot gentil ils nous ont rassuré dans les moments de découragement, surtout **nos mères** nous les remercions très fort*

Dédicace

JE dédie ce modeste travail à **mes très chers parents**

♡ À la personne la plus chère au monde à la personne qui m'a donné la vie, source de tendresse et symbole d'espoir tu n'as pas cessé de m'encourager et de me conseiller, aucune dédicace ne saurait exprimer ce que je mérite pour tous tes sacrifices, ta présence seule me suffit, et ton sourire seule me comble ma mère **ABI Mebarka** et mon père **HAMRIT Mamar** tu étais toujours avec moi dans toute ma carrière, tu étais notre lumière dans les chemins obscurs, à vous mes chère parents qui m'ont fournis au quotidien un soutien et une confiance sans limite, je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain, je vous souhaite une longue vie plein de bonheur et de santé, que Dieu le tout puissant vous protège et vous garde qui m'ont soutenu moralement durant toute la période de mes études.

♡ À mes frères : **Abd alaziz, Fayssal, Nadjib, Ayoub et Abd elatif.**

♡ À mes sœurs : **Hada, Ismhan, Wafa, Zina, Maryem.**

♡ À mes frères épouses : **Sohila et Basma.**

♡ À mes meilleures amies : **Manar, Marwa, Achwaq, Bouchra, Sabrina,**

Ilham, Oumaima, Amina et ma binôme Sakina

*À toute la famille : **HAMRIT et ABI***

Je dédie aussi ce travail à tous mes amis et camarades.

INAS HAMRIT
AMM HAMRIT

Dédicace

Je dédie ce travail ceux qui ont créé en moi un esprit de défi et qui ont insufflé dans mon cœur l'amour de la connaissance dès le plus jeune âge *mon père.* ♥

Au symbole du sacrifice et de la loyauté *ma mère.* ♥

À ces eux dont le l'encouragement et le soutien ont été pour moi une bougie qui a illumine mon chemin mes frères *Facine et Ahmed.*

A mes sœur *Samira, Ratiba, Mouna* et leurs maries *Adel Mouhamed et Rachid.*

A mes chères sœurs le plus proche de mon cœur *Sichem et Afaf* qui m'ont toujours soutenu et surtout qui m'ont supporté tout au long de mes études.

A mes petites princesses : *Sirine, Razan, yara et Sidra.*

A ma binôme et la meilleure aimée *Inas* pour sa patience et son dévouement ou travaille.

A mes copines : *Ravva, Iman, Ilham, Hanane, Marwa et Achraq.*

Je tiens à dédie tous mes amis de Ghimie de l'environnement qui m'ont aidé de loin ou de près dans la réalisation de ce travail. Mes sincères remerciements s'adressent à toute personne qui m'a aidé de loin ou de près pour réaliser ce travail.

sakina

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Sommaire	01
Liste des figures	04
Liste des tableaux	05
Liste d'abréviations	06
Introduction Générale	08
Chapitre I : le sol et la pollution du sol	10
I.1. Qu'est ce quel le sol	10
I.2. Les fractions de sol	10
I.2.1. La fraction solide	10
I.2.3. La fraction liquide	11
I.2.3. La fraction gazeuse	11
I.3. Les constituants du sol	11
I.3.1. Constituants minéraux du sol	11
I.3.2. Constituants organiques du sol	11
I.4. Caractéristiques du sol	12
I.4.1. Caractéristiques Physiques du sol	12
I.4.2. Caractéristiques chimiques du sol	12
I.4.2.1. La capacité d'échange	12
I.5. Structure des sols	13
I.5.1. Structure particulaire	13
I.5.2. Structure massive ou continue	13
I.5.3. Structures fragmentaires	13
I.6. La pollution du sol	13
I.6.1. Définition de la pollution	13
I.6.2. Définition d'un polluant	13
I.6.2.1. Les polluants naturels	13
I.6.2.2. Les polluants artificiels	13
I.6.3. La pollution de sol	14
I.7. Les polluants dans le sol	14

I.7.1. La solubilisation	14
I.7.2. La diffusion	14
I.7.3. La convection	15
I.7.4. L'adsorption	15
I.7.5. L'incorporation	15
I.7.6. La volatilisation	15
I.7.7. L'hydrolyse	16
I.7.8. La biodégradation	16
I.8. Les sources de pollution	16
I.8.1. Sources naturelles	16
I.8.2. Sources anthropique	16
I.9. Les grands types de polluants du sol	17
I.10. Les principes polluants dans le sol	17
I.10.1. Métaux lourds	17
I.10.2. Les sources des métaux lourds	18
I.11. Impact de la pollution	19
I.11.1. Effets sur la santé	19
I.11.2. Effets sur l'environnement	19
Chapitre II : La dépollution des sols	20
II.1. Qu'est-ce qu'un site pollué	20
II.2. Les Procédés de dépollution des sols par lieu de traitement	20
II.2.1. Traitement (ex situ) hors site et sur site	21
II.2.1.1. Traitement hors site	21
II.2.1.2. Traitement in situ	21
II.3. Les techniques de traitements de dépollution des sols	21
II.3.1. Leur choix	21
II.3.2.1. Les techniques physiques	22
II.3.2.2. Les techniques chimiques	23
II.3.2.3. Les techniques thermiques	24
II.3.2.4. Les techniques biologiques	25
II.3.2.5. Le confinement	25
II.4. Technique de lavage de sol	25

II.5. Limite d'application (lavage de sol)	25
Chapitre III : Matériels et Méthodes	26
III. Matériels et techniques expérimentales	26
III.1. Produits chimique utilisés	26
III.2. Préparation et lavage de l'échantillon	26
III.2.1. Préparation de l'échantillon	26
III.2.2 Préparation du sol polluée	26
III.2. Mesure des paramètres	27
III.2.1. Le pH	27
III.3. Méthode d'analyse	28
III.3.1. Spectromètre UV-visible	28
III.4. Procédé de décontamination en utilisant l'énergie solaire	29
III.5. Procédure de lavage	31
Chapitre IV : Résultats et discussion	34
IV.1. Extraction	34
IV.1.1. Spectres d'absorption	34
IV.1.2. Volume d'extraction	35
IV.2.3. Effet des débits d'extraction	36
IV.2.4. Effet de température	37
IV.2.5. Effet du pH	38
Conclusion générale	39
Références bibliographique	40
Résumé	

Liste des figures

Nom des figures	La page
Chapitre I	
Figure I.1. Schéma d'une coupe de sol.	10
Chapitre II	
Figure II.1. Schéma de principe du Pompage et traitement.	22
Figure II.2. Schéma de principe du lavage chimique des sols in situ.	23
Figure II.3. Schéma de principe de la vitrification thermique in situ.	24
Chapitre III	
Figure III.1. Le sol avant séchage.	27
Figure III.2. Le sol après le séchage.	27
Figure III.3. PH-mètre (HANNA instrument 210).	28
Figure III.4. Domaine spectral du rayonnement électromagnétique.	28
Figure III.5. L'appareil d'UV-Visible (SHIMADZU UV – 2401 PC).	29
Figure III.6. Schéma simplifié du système de décontamination.	30
Figure III.7. Le réservoir de décontamination.	31
Figure III.8. Le réservoir de décontamination vue par-dessus.	31
Figure III.9. Protocol d'extraction des polluants.	32
Figure III.10. L'appareil d'centrifugeuse (DM0412S 200-240V).	33
Figure III.11. Les échantillons d'extraction.	33
Chapitre IV	
Figure IV.1. Spectre d'absorption du nickel II.	34
Figure IV.2. Spectre d'absorption de rhodamine B.	35
Figure IV.3. Effet du volume d'extraction sur la masse extrait.	35
Figure IV.4. Effet des débits d'extraction sur le taux du polluant extrait a) Nickel, b) Rhodamine B.	36
Figure IV.5. Effet de la température sur le taux du polluant extrait a) Nickel, b) Rhodamine B.	38

Liste des tableaux

Nom des tableaux	La page
Chapitre I	
Tableau I.1. Caractères physico-chimiques des métaux.	18
Tableau I.2. Principaux effets des métaux lourds.	19
Chapitre III	
Tableau III.1. Les Produits chimiques utilisés.	26

Liste d'abréviations

Les unités

°C	Dégré Celsius
mm	Millimètre
mg	Milligramme
ml	Millilitre
nm	Nanomètre
µm	Micromètre
Kg	Kilogramme
Cm	Centimètre
L	Litre
g	gramme

Autres abréviations

CO₂	Dioxydes de charbon
NH₄⁺	L'ion d'ammonium
Fe³⁺	L'oxyde de fer (III) forme ions
H₃O⁺	Les ions hydroniums
H⁺	Hydrogène (forme ion)
HCl	Chlorhydrique
Rhb	Rhodamine B
H₂SO₄	Acide sulfurique
CuSO₄.5H₂O	Sulfate de cuivre
C₂₈H₃₁ClN₂O₃	Rhodamine B
N₂	Azote
As	Arsénique
Hg	Mercure
Fe	Fer

Ni	Nickel
Zn	Zinc
Na	Sodium
Cd	Cadium
Pb	Plomb
Cu	Cuivre
Mn	Manganèse
Cr	Chrome
Sn	L'étain
Al	Aluminium
HAP	Hydrocarbure polycyclique aromatique
C. E. C	La capacité d'échange de cations
B. E. C	Base Exchange Capacity (in english)
COV	Composés organiques volatils
PH	Potentiel hydrogène
MEDDE	Ministère de l'Environnement du développement Durable et de l'énergie
PCB	Polychlorobiphényle
DDT	di chloro di phényl tri chloro éthane
HPT	Les hydrocarbures pétroliers totaux

Introduction générale

Introduction générale

La pollution des sols par les métaux lourds est devenue un problème environnemental mondial qui a attiré une attention particulière de la part du public environnemental mondial. Principalement en raison de la préoccupation croissante pour la sécurité des produits agricoles. Les métaux lourds font référence à certains métaux et métalloïdes possédant des toxicité biologique, tels que le cadmium, le mercure, l'arsenic, le plomb et le chrome. Ces éléments pénètrent dans l'agroécosystème du sol par des processus naturels dérivés des matières premières et par des activités anthropiques. La pollution par les métaux lourds constitue une grande menace pour la santé et le bien-être des organismes et des êtres humains en raison du risque potentiel d'accumulation dans la chaîne alimentaire.

Aujourd'hui, la boue industrielle, les installations pétrochimiques et les zones d'exploration pétrolière (pétrole et gaz de schiste) nécessitant un traitement pour protéger l'environnement, notamment les cours d'eau et les nappes phréatiques. En outre, les décharges brutes des déchets réparties dans tout le pays, d'après le rapport de AND (2021), sont une vraie plaie pour l'environnement et la santé publique. Le coût élevé de la dépollution est à l'origine de l'abandonnement des sites pollués.

Diverses techniques in situ et ex-situ ont été utilisées pour l'assainissement du sol : l'immobilisation, la phyto-remédiation, le lavage, l'électro-rémédiation, la dégradation à l'eau oxygénée et l'oxydation chimique in situ. Le rendement du traitement et le coût d'utilisation contrôlent l'utilisation de ces techniques de dépollution, donc Il est important d'utiliser des techniques de dépollution moins chères, efficaces et écologiques.

L'objectif de notre travail se focalise sur l'étude de la dépollution du sol par lavage, dont l'effet de débit et l'effet du chauffage, le pH et le type de polluant seront étudiés.

Ce manuscrit est divisé en deux parties, la première partie contenant une étude bibliographique divisée en deux chapitres. Le premier chapitre contient une définition complète du sol et de ses caractéristiques, ainsi que la définition de la pollution et ses genres, La deuxième chapitre contient une définition des techniques de traitement de dépollution de sol.

Introduction générale

La deuxième partie était divisée en deux chapitres, le premier chapitre comprenait une description complète des matériels et des méthodes utilisées pour la décontamination par lavage et désorption thermique. Les résultats ont été présentés et discutés dans le deuxième chapitre.

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

I.1. Qu'est ce quel le sol

Le sol est le produit de l'altération, du remaniement et de l'organisation des couches supérieures de la croûte terrestre sous l'action de la vie, de l'atmosphère et des échanges d'énergie qui s'y manifestent [1]. Le sol est ainsi la résultante de la transformation de la roche mère sous l'action des agressions physico-chimiques, mécaniques, climatiques et de la vie apportée par l'énergie solaire. Les végétaux transforment l'énergie solaire en énergie chimique (synthèse chlorophyllienne) ainsi qu'en matière organique. Cette matière organique végétale est ensuite lentement dégradée à la surface conduisant à une forme transitoire assez stable, l'humus. L'humus se dégrade ensuite lentement (environ 1 % en masse par an) en CO_2 , NH_4^+ , et autres composés chimiques simples.

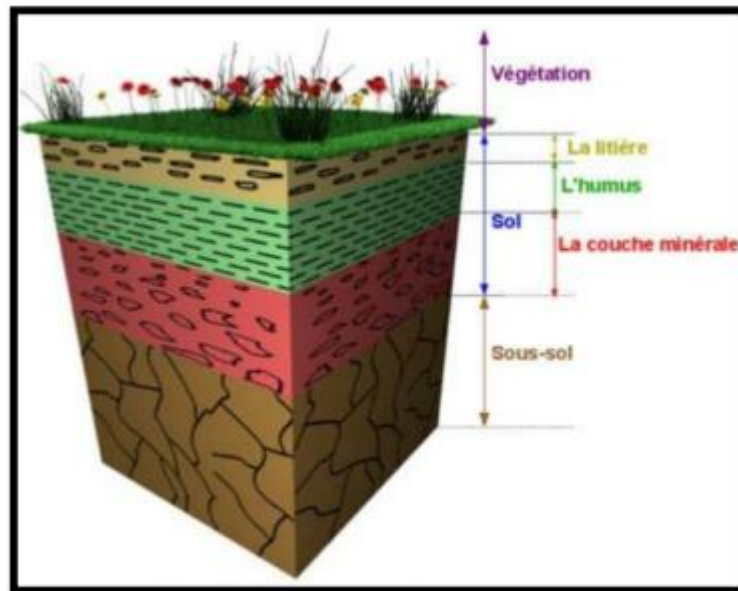


Figure I.1. Schéma d'une coupe de sol.

I.2. Les fractions de sol

I.2.1. La fraction solide

Constituée d'une partie minérale (sables, limons, argiles, oxydes et hydroxydes métalliques : 38 % volume, 95 % masse) et d'une partie organique (organismes vivants, débris végétaux et animaux, humus : 12 % volume, 5 % masse).

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

I.2.3. La fraction liquide

Représente 15 à 35 % v l'eau du sol, dans laquelle sont dissous les sels et certaines matières organiques.

I.2.3. La fraction gazeuse

Représente 15 à 35 % v de composition très proche de celle de l'atmosphère terrestre mais généralement enrichie en CO₂ par l'activité respiratoire des micro-organismes du sol [2].

I.3. Les constituants du sol

I.3.1. Constituants minéraux du sol

Le sol est principalement constitué de minéraux provenant directement de la roche mère ou indirectement après une altération et peut être en partie caractérisé par son analyse granulométrique, généralement réalisée après tamisage sur la fraction inférieure à 2 mm La classification de ces fractions fines est généralement la suivante :

- **Sables** (2 mm – 50 µm) : il s'agit des minéraux hérités de la roche mère (quartz, micas, feldspaths ou pour les sols calcaires, la calcite). Cette fraction intervient peu dans la fixation des polluants organiques, et contient de la matière organique non transformée (débris végétaux).
- **Limons** (50 µm – 2µm) : cette fraction est quasiment identique aux sables, mais peut contenir de la matière organique transformée principalement sous l'action biologique (<20 µm).
- **Argiles** (<2 µm) : dans cette catégorie on retrouve des minéraux microdivisés comme le quartz et le feldspath, et de l'argile proprement dite, les phyllosilicates, qui possèdent une structure en feuillets avec pour constituant principal la silice.

I.3.2. Constituants organiques du sol

Deux types de matières organiques doivent être distingués parmi les constituants du sol. La matière organique « fraîche », c'est-à-dire non transformée, de taille grossière (>20 µm), constituée en majeure partie de débris végétaux, et donc de polymères type cellulose, lignine, etc. La matière organique transformée est appelée humus, et est composée de polymères complexes et moins bien définis. Les matières humiques proviennent de la décomposition et de la réorganisation des matières organiques contenues dans les sols [3]. Les trois grandes catégories de substances humiques sont :

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

- L'humine, de forte masse moléculaire (environ 10^5 à 10^6 g.mol⁻¹), insoluble dans les acides et bases fortes.
- Les acides humiques de masse moléculaire compris entre 10^4 et 10^5 , seulement solubles dans les bases.
- Les acides fulviques de masse molaire comprise entre 10^4 et 10^3 g.mol⁻¹ solubles dans les acides minéraux et les bases.

Les acides humiques et fulviques sont des macromolécules avec des structures moléculaires tridimensionnelles très complexes comprenant des sites hydrophobes et hydrophiles [4]. Les principales propriétés adsorbantes de la matière organique des sols sont essentiellement liées à leur nature colloïdale et à la présence de nombreux groupements fonctionnels (carboxyles, carbonyles, hydroxyles, amines, amides, groupements sulfoniques, ...) [3]. De plus, la matière organique des sols contient des chaînes aliphatiques dont le rôle est non négligeable, surtout, pour les interactions hydrophobes [5]. La matière organique des sols se caractérise, comme les argiles, par sa grande surface spécifique et par son pouvoir gonflant permettant la pénétration de l'eau et la diffusion de molécules de petite taille qui peuvent ainsi se lier avec les substances humiques [3], [5], [6].

I.4. Caractéristiques du sol

I.4.1. Caractéristiques Physiques du sol

- a) la nature et la proportion des divers constituants, en d'autres termes de la texture.
- b) l'agencement spatial de ces divers constituants, donc de la structure.
- c) la quantité et l'état de l'eau occupant en partie ou en totalité les vides existants entre les unités structurales du sol.

I.4.2. Caractéristiques chimiques du sol

I.4.2.1. La capacité d'échange

Le sol présente la propriété d'échanger de manière réversible soit des cations, soit des anions.

L'échange des cations est certainement le plus important. La capacité d'échange de cations d'un sol (en abrégé C. E. C. ; dans les publications de langue anglaise Base Exchange Capacity ou B. E. C.) est la somme de cations qu'il est capable de fixer. On la désigne couramment par la lettre T. La somme de cations autres que l'aluminium et S l'hydrogène est désignée par S. Le degré de saturation V est le rapport $\frac{S}{T} \times 100$. S et T sont exprimés en milliéquivalents pour 100 g de sol [7].

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

I.5. Structure des sols

Les particules élémentaires constituant le sol ne sont pas normalement individualisées, mais associées en agrégats. La structure du sol est définie par l'agencement des éléments les uns par rapport aux autres. Elle englobe la forme et la dimension des mottes, ou éléments structuraux. Et leur disposition relative dans un horizon déterminé. La sous-structure correspond à la forme et à la dimension des unités structurales dont la juxtaposition forme des éléments structuraux plus volumineux. Les éléments structuraux peuvent être classés par taille, mais aussi en fonction de leur forme. Selon ce dernier critère. Trois classes de structures peuvent être distinguées :

I.5.1. Structure particulière : Le sol est alors constitué par des éléments du squelette, non agrégés. Exemple : structures cendreuse, fibreuse, feuilletée.

I.5.2. Structure massive ou continue : Le sol forme alors un bloc unique. Sous-classes : types ciment, grès, poudingue.

I.5.3. Structures fragmentaires : Les constituants élémentaires sont associés en agrégats ou en mottes [7].

I.6. La pollution du sol

I.6.1. Définition de la pollution

C'est l'ensemble des rejets de composés toxiques libérés par l'homme dans le milieu récepteur (continental, océanique et atmosphérique). Certaines substances libérées sont d'origine naturelle mais présentent un danger pour les organismes et perturbent l'équilibre général de l'environnement.

I.6.2. Définition d'un polluant

Un polluant est un élément physique, chimique ou biologique qui provoque une gêne ou une nuisance dans une communauté biologique ou dans un milieu. Produit responsable d'une pollution. Est un produit contaminant qui, à une certaine concentration, dégradera les fonctions physiques, chimiques ou biologiques de l'environnement; comprend les agents pathogènes, métaux lourds.

Parmi les polluants, on différencie en principe deux groupes :

I.6.2.1. les polluants naturels : tels que la poussière de roche, les mycotoxines (toxines fongiques) et divers composés chimiques.

I.6.2.2. Les polluants artificiels : d'origine anthropique, c'est-à-dire causés ou libérés par l'homme.

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

I.6.3. La pollution de sol

Un sol est pollué lorsqu'il contient une concentration anormale de composés chimiques potentiellement dangereux la santé, les plants ou des animaux, la contamination fait alors soit par voie digestive (l'eau polluée), ou par voie respiratoire (poussières des sols pollués dans l'atmosphère).

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, au travers d'effets directs ou indirects.

La pollution des sols est un élément perturbateur pour de nombreux écosystèmes. Ses effets sont de plusieurs ordres, à savoir différés ou immédiats, mais aussi indirects ou directs.

Le degré de gravité de la pollution des sols est variable. Il dépend de plusieurs facteurs, comme :

- La nature du sol, qui peut impacter, selon les cas, sur la diffusion des métaux.
- Les risques de transmission d'éléments pathogènes suite au transport de terre.
- Le niveau de dégradabilité de chaque élément perturbateur/polluant.
- La capacité même du polluant à impacter de quelque façon que ce soit le fonctionnement de la biosphère ou d'un écosystème.

I.7. Les polluants dans le sol

Les principaux mécanismes contrôlant le devenir et la mobilité des polluants organiques dans les sols sont les suivants :

I.7.1. La solubilisation

En phase aqueuse, qui est notamment fonction de la structure chimique, de la polarité et de la taille des molécules organiques. Le partage du polluant entre la phase liquide organique et la phase aqueuse du sol est contrôlé par sa solubilité dans l'eau. Cette caractéristique a une grande influence sur la mobilité des polluants dans les sols [8].

I.7.2. La diffusion

En phase aqueuse, est un phénomène physique lié à l'agitation moléculaire. S'il y a un gradient de concentration, les molécules en mouvement se déplaceront de la zone la plus concentrée vers la zone moins concentrée. La diffusion est le mécanisme de transport le plus important dans les zones à faible perméabilité que ce soit à l'échelle macroscopique, dans le cas des argiles par exemple, ou à l'échelle microscopique, dans les agrégats poreux et au sein des particules. Les

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

zones à faible perméabilité qui ont accumulé des polluants organiques sur de longues périodes peuvent se comporter à long terme comme des sources secondaires de polluants [9].

I.7.3. La convection

Qui consiste en l'entraînement par la phase aqueuse mobile, des molécules organiques les plus facilement solubles. L'entraînement des polluants avec des particules fines est également possible [10]. Ce mécanisme dépend notamment des caractéristiques géotechniques du milieu filtrant [11].

I.7.4. L'adsorption

Qui se traduit par la rétention plus ou moins réversible du polluant sur les particules de sol. L'adsorption correspond à un phénomène dynamique de partition d'un soluté d'une phase liquide (généralement aqueuse dans les sols) vers une phase solide constituée par l'ensemble des particules solides du sol. Lorsque la teneur en matière organique dans les sols est supérieure à 1%, l'adsorption est très couramment décrite comme un simple équilibre de partage du composé organique entre la phase aqueuse et la matière organique du sol [12]–[15]. L'adsorption fait intervenir des phénomènes assez complexes aboutissant à plusieurs types de liaisons adsorbant/polluant [16]. La désorption correspond au phénomène inverse.

I.7.5. L'incorporation

Qui consiste en l'emprisonnement des molécules polluantes diffusant dans le sol et plus précisément au sein de la matière organique naturelle poreuse. Cette immobilisation peut avoir des causes physiques (inclusion dans du goudron par exemple) ou chimiques (création de liaisons chimiques avec la matière organique du sol). La diffusion au sein de la matière organique du sol est le second mécanisme qui influe sur le comportement des polluants organiques dans les sols au cours du temps [17].

I.7.6. La volatilisation

Concerne essentiellement les composés organiques volatils (COV). Elle dépend notamment de la constante de Henry, elle-même fonction de la température. Ainsi, à l'état pur chaque composé possède une pression de vapeur saturante, qui correspond à une température donnée à l'équilibre entre les phases de la matière.

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

I.7.7. L'hydrolyse

Est un processus de dégradation des molécules par l'action de l'eau, est fortement influencée par le pH, le potentiel redox et la température du sol.

I.7.8. La biodégradation

Caractérise la décomposition des molécules organiques par les micro-organismes présents dans le sol. Elle dépend notamment de la présence suffisante de micro-organismes adaptés, de la température, et de la quantité d'oxygène ou d'autres accepteurs d'électrons (nitrates, Fe^{3+}) dans le sol [18].

I.8. Les sources de pollution

- Production d'énergie
- Activités industrielles
- Diversification de l'industrie chimique
- Agriculture
- Pollutions anthropiques

I.8.1. Sources naturelles

Par le phénomène de l'altération et l'érosion de la roche. Dans certains cas les sols ainsi formés peuvent donc être fortement concentrés en métaux, au point que cette contamination naturelle soit problématique sur le plan écologique. Il existe d'autres sources de contamination naturelle des sols par les métaux, à titre d'exemple :

- Le cycle biogéochimique entre les sols et les plantes
- Processus d'accumulation, dans un horizon du sol, des métaux provenant d'un autre horizon (illuviation).
- Apport par lessivage du sol et érosion en surface.
- Apports lointains d'origine atmosphérique : volcans (émissions d'As, Hg, Ni, Zn), feux de forêt (émission de Zn), embruns marins (émissions de Hg, Na), poussières et aérosols transportés par les vents.

I.8.2. Source anthropique

Ces sources sont le fait de l'activité humaine. Cependant, la frontière entre les sources anthropiques et naturelles n'est pas toujours bien délimitée. La grande majorité de la pollution des sols est due aux activités humaines soit les activités [19].

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

- Industrielles telles que (les activités minières, la font, industrie agroalimentaire...)
- Urbaine (les ordures ménagères, usage domestiques, etc.)
- Agricole (les pesticides les engrais utilisé dans l'agriculture, etc.)

I.9. Les grands types de polluants du sol

- Polluants minéraux (azote, p, Cu, Pb Zn,)
- Polluants organique (HAP, COV, goudrons,)
- Polluants métalliques (Cd, Hg, Ni,)
- Autres types de polluants (acides, bases,)

I.10. Principaux polluants dans le sol

I.10.1. Métaux lourds

Le terme métaux lourds, « heavy metal », implique aussi une notion de toxicité. Le terme « éléments traces métalliques » est aussi utilisé pour décrire ces mêmes éléments, car ils se retrouvent souvent en très faible quantité dans l'environnement Dans ce contexte, nous utiliserons le terme « métaux lourds » dans le sens de l'impact toxique sur les humains et les environnements [20].

D'un point de vue purement chimique, les éléments de la classification périodique formant des cations en solution sont des métaux. D'un point de vue physique, le terme « métaux lourds » désigne les éléments métalliques naturels, métaux ou dans certains cas métalloïdes (environ 65 éléments), caractérisés par une forte masse volumique supérieure à 5 g.cm^3 [21].

D'un autre point de vue biologique, on en distingue deux types en fonction de leurs effets physiologiques et toxiques : métaux essentiels et métaux toxiques.

- ❖ Les métaux essentiels sont des éléments indispensables à l'état de trace pour de nombreux processus cellulaires et qui se trouvent en proportion très faible dans les tissus biologiques [22] Certains peuvent devenir toxiques lorsque la concentration dépasse un certain seuil. C'est le cas du cuivre (Cu), du nickel (Ni), du zinc (Zn), du fer (Fe). Par exemple, le zinc (Zn), à la concentration du milli molaire, est un oligo-élément qui intervient dans de nombreuses réactions enzymatiques (déshydrogénases, protéinase, peptidase) et joue un rôle important dans le métabolisme des protéines, des glucides et des lipides [23].
- ❖ Les métaux toxiques ont un caractère polluant avec des effets toxiques pour les organismes vivants même à faible concentration. Ils n'ont aucun effet bénéfique

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

connu pour la cellule. C'est le cas du plomb (Pb), du mercure (Hg), du cadmium (Cd).

Tableau I.1. Caractères physico-chimiques des métaux [24].

Elément (métaux)	Numéro atomique	Masse atomique	Densité	Température Fusion / ébullition (°C)
Chrome	24	51,996	7,19	1903 / 2480
Manganèse	25	54,938	7.43	1247 / 2030
Fer	26	55,847	7.87	1536 / 3000
Nickel	28	58,71	8.89	1453 / 2800
Cuivre	29	63,54	8.93	1083 / 2300
Zinc	30	65,38	7.133	420 / 907
Cadmium	48	112,41	8.65	321 / 766
Plomb	82	207.2	11.341	328 / 1744

Selon leur toxicité pour les organismes vivants, les métaux lourds peuvent être classés dans l'ordre suivant : Hg > Cu > Zn > Ni > Pb > Cd > Cr > Sn > Fe > Mn > Al [25,27].

I.10.2. Les sources des métaux lourds

La plupart des sources de métaux lourds dans le sol sont très complexes et aussi liées à l'activité humaine [28]:

- Stockage de déchets industriels et urbains (mines et fonderies de métaux non ferreux, décharges publiques).
- Pratiques agricoles (pratique de la fertilisation à l'aide de compost urbain, de déjections animales ou de boues de station d'épuration).
- Pollutions dues à des retombées atmosphériques (utilisation de combustibles fossiles, essence au plomb, poussières des industries métallurgiques, incinération des ordures ménagères.).
- Les applications de pesticides et d'engrais.
- Les dépôts atmosphériques liés aux émissions des véhicules et à la combustion du charbon.
- L'irrigation des eaux usées et l'exploitation minière.
- Rhénium (utilisé pour fabriquer des superalliages dans l'aéronautique).

Chapitre I : Le sol et la pollution du sol

I.11. Impact de la pollution

D'une manière générale, la discrimination entre sol « sain » et sol « pollué » s'effectue sur base du niveau de risque encouru par la santé ou l'environnement quel que soit l'usage auquel le sol est affecté. C'est pourquoi il est important d'analyser les effets des polluants sur la santé et l'environnement.

I.11.1. Effets sur la santé

Un polluant dans le sol est dangereux s'il devient mobile et s'il atteint sa cible (eaux souterraines ou superficielles, l'écosystème, les hommes.). Un sol pollué devient alors un problème de santé publique si le polluant atteint la nappe phréatique ou le cours d'eau avoisinant s'ils sont destinés à l'alimentation en eau potable.

Les enfants sont particulièrement vulnérables à l'imprégnation de la pollution par les sols, notamment en bas âge, du fait de leur comportement par contact mains-bouche plus fréquents et leur proximité du sol et du fait de la sensibilité en période de développement de leur organisme face à des toxiques comme les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium) ou les hydrocarbures (aliphatiques, polycycliques aromatiques) avec des effets sanitaires à court ou à long terme. Ils peuvent être ainsi exposés par inhalation, mais aussi par ingestion.

I.11.2. Effets sur l'environnement

Les métaux ne se dégradent pas mais ils sont présents dans l'environnement sous diverses formes chimiques. Certains peuvent atteindre la chaîne alimentaire, se concentrer, comme le mercure par exemple, et conduire à des voies de contamination par ingestion outre l'inhalation.

Tableau I.2. Principaux effets des métaux lourds [29].

L'éléments	L'effets
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommage sur la foi
Cr	Cancérigène sous forme de Cr
Cu	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aigue
Ni	Allergies de peau, maladie respiratoires possible cancérigène
Pb	Toxique
Se	Essentielle à faible doses, toxique à doses élevées
Zn	Toxique pour les végétaux à fortes teneurs

Chapitre II : La dépollution des sols

Chapitre II : La dépollution des sols

II.1. Qu'est-ce qu'un site pollué

Selon la Définition de Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie (MEDDE) ; Le site pollué est un site qui du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement ».

On distingue ainsi quatre grandes catégories de sites pollués :

- Les anciennes décharges réalisées sans respecter les règles techniques actuellement en vigueur et notamment celles situées sur des sous-sols fragiles et pour lesquels une pollution des eaux souterraines a été constatée.
- Les dépôts de déchets, tels qu'ils peuvent notamment être occasionnés par des faillites d'entreprises ou des pratiques frauduleuses d'élimination.
- Les sols pollués par des retombées, des infiltrations ou des déversements de substances polluantes, liés à l'activité d'une installation industrielle ou à un accident de transport.
- Les sites industriels abandonnés ou en activité, où s'observe une pollution qualifiée de multiple en raison de la diversité des sources de pollution des sols qui se rencontrent sur ce type de site.

II.2. Les Procédés de dépollution des sols par lieu de traitement

Les procédés de dépollution peuvent classés en fonction du lieu de traitement. On distingue les traitements suivants ;

- **Traitements hors site (ou ex situ)**

Dans ce cas, il faut transporter le matériel à dépolluer du milieu naturel vers un centre spécialisé ou il sera traité.

- **Traitements sur site (ou on site)**

Le principe consiste à enlever du milieu naturel le matériel à dépolluer et le traiter sur place.

- **Traitements in situ (ou en place)**

Dans ce cas, il faut travailler directement dans le milieu naturel pollué [30].

Chapitre II : La dépollution des sols

II.2.1. Traitement (ex situ) hors site et sur site

Les traitements hors site et sur site sont deux modes de mise en œuvre reposant sur l'excavation du sol et son traitement a posteriori. Les techniques employées sont souvent similaires, qu'elles soient réalisées dans un centre dédié ou sur le site pollué, à l'aide d'installations mobiles.

II.2.1.1. Traitement hors site

Dans les procédés ex-situ, la terre contaminée est d'abord décoffrée puis traitée sur place (on site) ou dans un autre lieu et réutilisée. Les procédés ex-situ sont plus coûteux que les procédés in-situ, particulièrement quand les polluants ont pénétré profondément dans le sol. Une méthode ex-situ d'assainissement d'un sol consiste à échanger le sol contaminé (échange de sol). Pour cela, le sol pollué est enlevé ; ce sol excavé est déposé sur une décharge pour déchets spéciaux et remplacé par un sol non pollué. Par ce procédé, le problème non désiré est seulement transféré ; de nos jours on ne pratique presque plus l'échange du sol car cette opération est trop coûteuse [31, 32].

Le lavage ex situ permet le transfert des polluants du sol vers la phase aqueuse qui sera ensuite traitée. Les machines à laver les sols existent sur le marché mais demeurent très coûteuses. Cependant, c'est un traitement moins onéreux que l'incinération qui trouve des applications pour certaines configurations de sol/polluants. Le lavage ex situ permet de traiter tout type de pollution [30].

II.2.1.2. Traitement in situ

Les techniques in situ sont directement effectuées dans le sol par des procédés qui permettent de traiter les polluants sans excavation. Certaines techniques consistent à injecter de l'air, des bactéries ou des nutriments pour décomposer biologiquement ou physiquement les polluants et les aspirer sans détruire le sol (venting ou bioventing). Le traitement s'effectue en général dans les 10 premiers mètres. Si ces procédés peuvent présenter un rendement de 80 à 90 %, ils sont souvent longs et s'avèrent donc moins adaptés aux projets de site immobilier à réaliser dans l'urgence [33].

II.3. Les techniques de traitements de dépollution des sols

II.3.1. Leur choix : dépend :

- De la taille du chantier.
- Du type de pollution.
- De la nature du sol.
- Des délais de décontamination.
- Des risques pour les opérateurs.

Chapitre II : La dépollution des sols

- Des coûts des traitements.

Les techniques de traitement des sols pollués sont classées en quatre grandes catégories :

II.3.2.1. Les techniques physiques

Le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser.

- **Barbotage in situ (ou injection et bullage d'air in situ)**

Cette méthode repose sur le même principe que le venting mais son application est réalisée dans la zone saturée et dans la frange capillaire. Aussi, l'air injecté dans la nappe (et non dans la zone non saturée comme dans le venting) va favoriser la volatilisation des polluants qui seront extraits et traités sur site.

- **Pompage et traitement**

Le pompage et traitement consiste à extraire les eaux souterraines polluées et à les traiter on site avant rejet (ou à les éliminer en centres agréés).

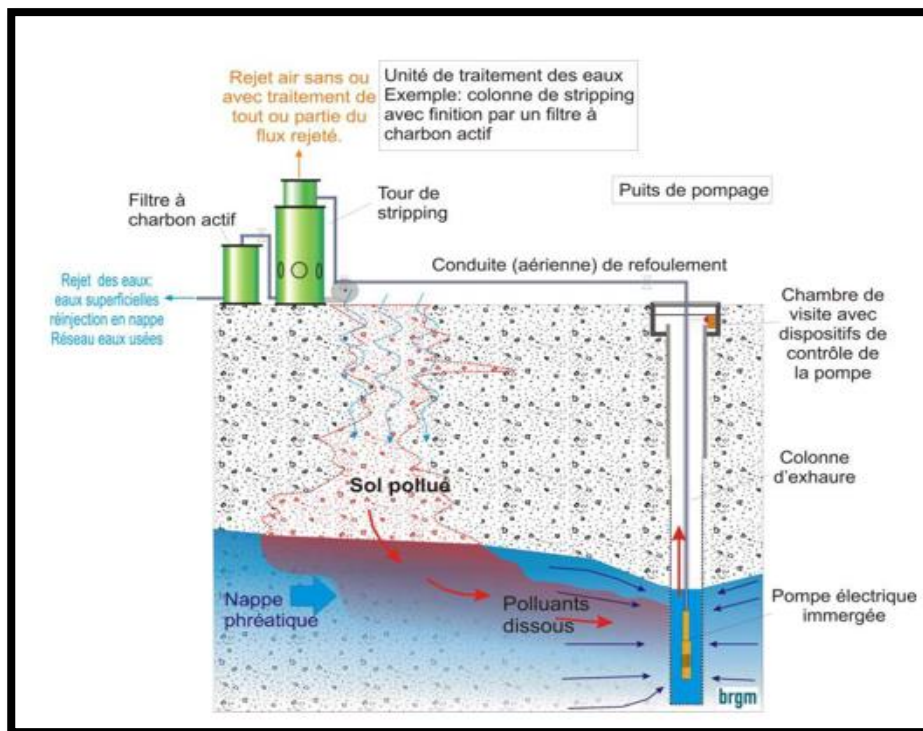


Figure II.1. Schéma de principe du Pompage et traitement.

Chapitre II : La dépollution des sols

II.3.2.2. Les techniques chimiques

Les procédés chimiques utilisent des réactifs chimiques pour détruire les polluants, les transformer en des composés moins toxiques et/ou plus facilement biodégradables ou modifier leurs caractéristiques (mobilité, toxicité...) [34].

➤ Lavage in situ

Ce procédé consiste à lessiver les sols sans excavation (zones saturée et non saturée par injection d'eau (et d'agents mobilisateurs en solution). Par la suite, les eaux polluées sont pompées, traitées en surface puis rejetées dans les réseaux d'eaux usées/eaux pluviales, les eaux superficielles ou dans certains cas réinjectés dans la nappe [35].

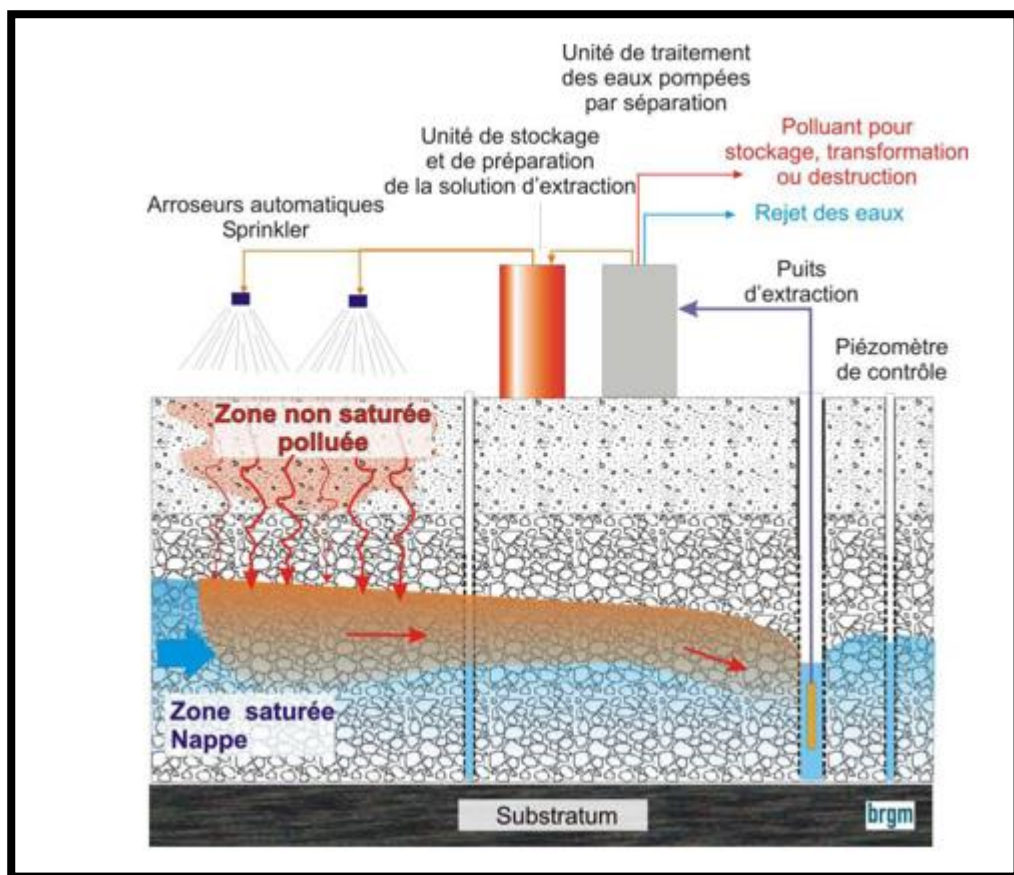


Figure II.2. Schéma de principe du lavage chimique des sols in situ.

➤ Oxydation chimique in situ

L'oxydation chimique in situ consiste à injecter un oxydant dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Cet oxydant va détruire totalement ou partiellement les polluants. Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la transformation en

Chapitre II : La dépollution des sols

eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables.

➤ Réduction chimique in situ

La réduction chimique in situ consiste à injecter un réducteur dans les sols (zones saturée et non saturée) sans excavation. Ce réducteur est utilisé dans le but :

- soit de détruire totalement ou partiellement des polluants organiques (aboutissant à la minéralisation totale des polluants ou à la formation de sous-produit de dégradation généralement plus biodégradables).
- soit de réduire les polluants inorganiques afin de les stabiliser ou les rendre moins toxiques.

II.3.2.3. Les techniques thermiques

➤ Désorption thermique in situ

La désorption thermique in situ, issue de l'amélioration de procédé de venting, consiste à appliquer de la chaleur pour extraire du sol par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils.

➤ Vitrification in situ

Ce procédé consiste à solidifier/stabiliser les sols par élévation de la température afin de le transformer en un matériau fondu qui se vitrifie en se refroidissant [36], [37].

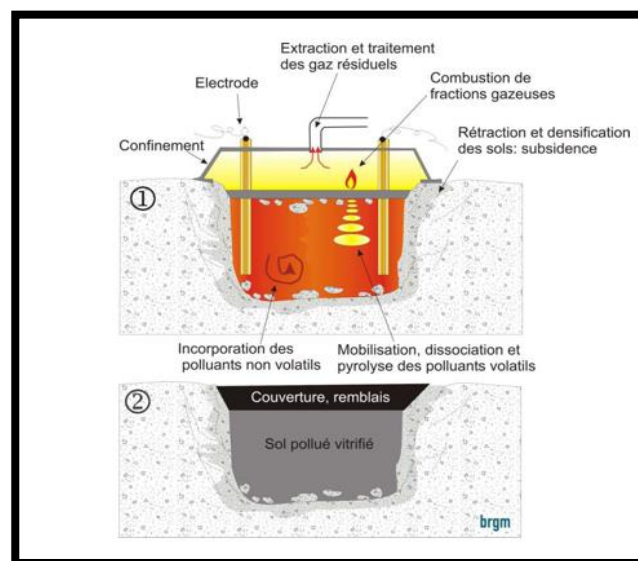


Figure II.3. Schéma de principe de la vitrification thermique in situ.

Chapitre II : La dépollution des sols

II.3.2.4. Les techniques biologiques

➤ Bioremédiation

C'est une technique biologique qui utilise les microorganismes (bactérie, champignon) pour consommer les contaminants des eaux ou des sols [38].

➤ Phytoremédiation

Utilisation des plantes pour extraire du sol les polluants organiques et les métaux et les concentrer dans les organes de la plante destinés à la récolte [39].

II.3.2.5. Le confinement

Isolation in situ, sur site ou hors site des sols pollués afin d'éviter la migration de la pollution.

Le confinement peut s'appliquer selon trois méthodologies :

- Le confinement de surface.
- Le confinement vertical.
- Le confinement horizontal profond [40].

II.4. Technique de lavage du sol

Le lavage des sols est la méthode de dépollution employée dans cette thèse. Elle est moins employée que le traitement biologique mais présente pour les cas de forte pollution de bien meilleurs résultats, et est beaucoup plus rapide. Elle peut avoir trois applications différentes selon le produit employé et la mise en œuvre choisie. Il s'agit d'un traitement in situ, qui s'effectue à l'échelle industrielle uniquement avec de l'eau en raison de l'impact sur le milieu naturel possible [2].

II.5. Limite d'application (lavage de sol)

Le lavage du sol peut être utilisé pour une large gamme de contaminants en raison d'un large éventail d'agents chimiques potentiellement utilisables pour l'accélérer. Le fait que cette pollution soit mobilisable naturellement (diffusée par les eaux souterraines par exemple) ou par de nouvelles activités humaines et donc susceptible d'affecter l'environnement [41].

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Chapitre III : Matériels et Méthodes

III. Matériels et techniques expérimentales

Cette étude a été menée dans le but de dépolluer un sol contaminé dans le laboratoire de matériaux inorganiques à l'université de Mohamed Boudiaf à M'sila.

III.1. Produits chimiques utilisés

Les produits utilisés dans cette étude ont été préparés à partir des réactifs purs introduits dans le tableau (III.1) :

Tableau III.1. Les Produits chimiques utilisés.

Produit	Formule brute	Masse molaire g/mole	Marque
Chlorure de nickel hexahydraté	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	129,5994	BIOCHEM
Acide sulfurique	H_2SO_4	98.79	BIOCHEM
Rhodamine B	$\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{ClN}_2\text{O}_3$	479.01	BIOCHEM

III.2. Préparation et lavage de l'échantillon

III.2.1. Préparation de l'échantillon

Notre travail consiste à prendre une quantité d'une terre quelconque et la polluée par des polluants, ensuite la dépolluer en utilisant notre technique. Le sol du pôle nord de l'université de M'sila a été choisi au hasard comme échantillon d'application. Chaque échantillon du sol (2 Kg) est tamisé à 0.2 mm pour éliminer les éléments grossiers et les débris organiques.

III.2.2 Préparation du sol polluée

On prépare une solution d'une concentration connue du polluant choisi, cette dernière va être ensuite ajoutée au sol préparé au préalable. Le sol mouillé est bien mélangé (Figure III.1) puis nous le remettons à l'étuve pour le séchage (Figure III.2). Après avoir séché le sol, il est broyé dans un mortier puis mélangé à nouveau

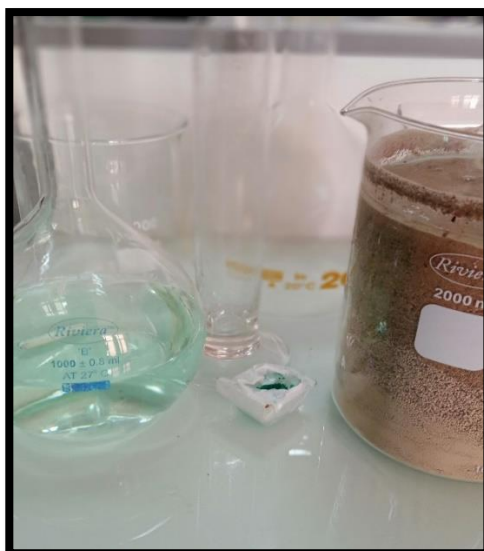


Figure III.1. Le sol avant séchage.

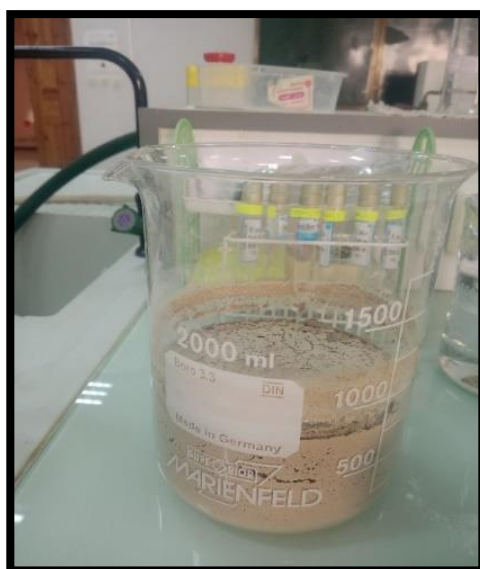


Figure III.2. Le sol après le séchage.

III.2. Mesure des paramètres

III.2.1. Le pH

C'est la mesure de l'acidité d'une suspension de terre dans l'eau, avec un rapport terre /eau normalisée (1/5). Il indique aussi la concentration en ions H^+ présents dans l'eau [42].

On introduit 20 g du sol pollué dans un bécher de 200 ml, puis nous complétons avec de l'eau distillée jusqu'au volume 5. Après agitation, la solution est ensuite laissée reposer pendant 15 minutes, ensuite nous réalisons la mesure du pH de la solution à l'aide d'un pH mètre.



Figure III.3. pH-mètre (HANNA instrument 210).

Le mesure de pH a été appliqué à tous les échantillons préalablement préparés avant et après l'ajout du polluant et après la dépollution.

III.3. Méthode d'analyse

III.3.1. Spectromètre UV-visible

La spectroscopie ultraviolet-visible ou spectrométrie ultraviolet-visible est une technique de spectroscopie mettant en jeu les photons dont les longueurs d'onde sont dans le domaine de l'ultraviolet (200 nm – 400 nm), du visible (400 nm – 750 nm) ou du proche infrarouge (750 nm -1 400 nm). Soumis à un rayonnement dans cette gamme de longueurs d'onde, les molécules, les ions ou les complexes sont susceptibles de subir une ou plusieurs transitions électroniques [43].

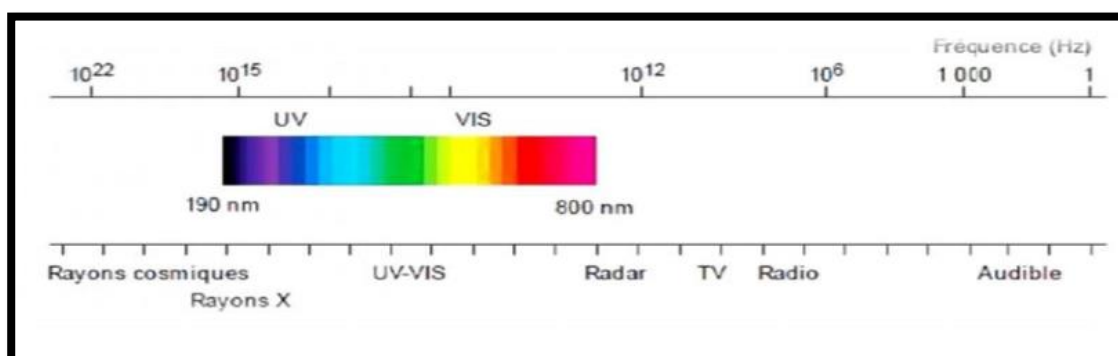


Figure III.4. Domaine spectral du rayonnement électromagnétique.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

- **Principe**

La spectroscopie UV-visible peut donc être utilisée pour déterminer cette concentration. Cette détermination se fait dans la pratique soit à partir d'une courbe d'étalonnage qui donne l'absorbance en fonction de la concentration, soit quand le coefficient d'extinction molaire est connu. La technique d'analyse est souvent utilisée dans un mode quantitatif pour déterminer la concentration d'une entité chimique en solution, en utilisant la Loi de Beer-Lambert.



Figure III.5. L'appareil d'UV-Visible (SHIMADZU UV – 2401 PC).

III.4. Procédé de décontamination en utilisant l'énergie solaire

Le procédé se compose de deux principaux organes : le capteur solaire et le réservoir de décontamination (Figure III.6). L'idée réside dans la production de l'eau distillée par le capteur solaire, qui va être envoyée dans le réservoir de décontamination. Après extraction de polluants l'eau va, à nouveau, dans le capteur solaire pour recommencer un nouveau cycle de dépollution du sol.

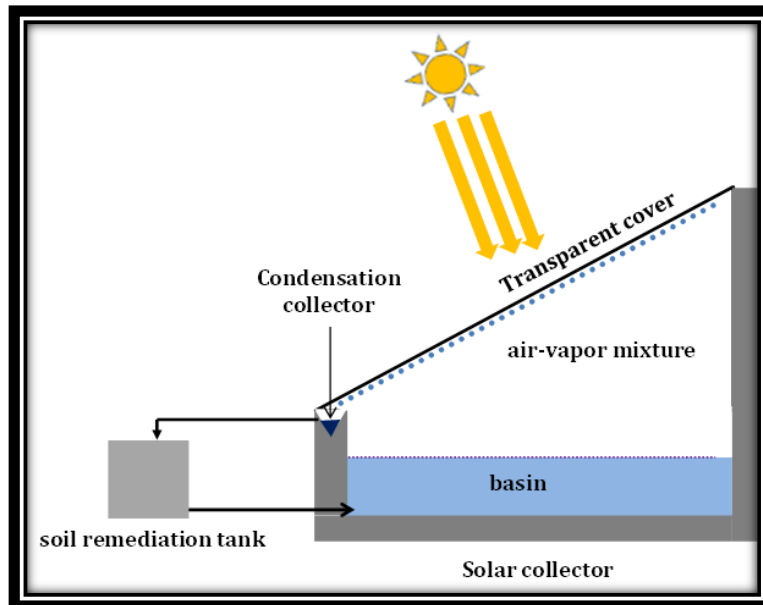


Figure III.6. Schéma simplifié du système de décontamination

1. Capteur solaire : Ces capteurs font partie des systèmes utilisant l'énergie solaire thermique, cette dernière désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz).

Comme c'est montré dans la figure III.6. Le capteur solaire (dite plan) se compose de :

- Un recouvrement transparent en verre ou parfois en plastique mis en pente.
- Un absorbeur de chaleur, est généralement en métal, le plus couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium.

Il existe de nombreuses variétés de capteurs solaires produisant des quantités importantes d'eau distillée. Ce type de capteur produit en moyenne entre 2 et 13 L/m²/ journée (surface de l'absorbeur (Figure III.6)).

2. Le réservoir de décontamination (Figure III.7 et III.8) est un récipient de forme cylindrique, se compose de :

- L'enceinte de décontamination est un cylindre (10 x 12.5 cm. Figure III.7) ouvert sur son extrémité haute (Figure III.8), possédant une ouverture (d=2 cm) à 9 cm de la base.
- Un tube (1.5 x 16 cm) ouvert sur les deux extrémités, fixé sur la base de l'enceinte de décontamination.

Parmi les problèmes rencontrés dans le lavage du sol, on peut citer le colmatage du sol et le fait que l'eau puisse faire des chemins préférentiels dans le sol, ce qui réduit l'efficacité du lavage.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Ces problèmes peuvent être résolus en lavant alternativement en mode ascendant et descendant puis en pompant la solution à la surface du sol [46]. Sachant qu'un débit de 1 ml/min conduit à une bonne décontamination du sol [47]. On peut commencer par des débits élevés (jusqu'à 10 ml/min) et selon le résultat obtenu, le débit de lavage est ajusté. Ces faibles débits permettent d'obtenir des surnageant clairs et une meilleure efficacité d'extraction des polluants [48].

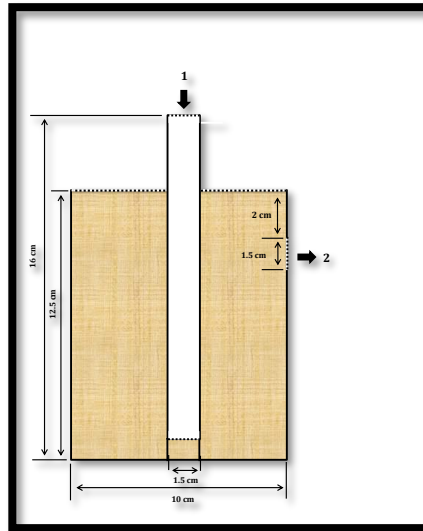


Figure III.7. Le réservoir de décontamination.

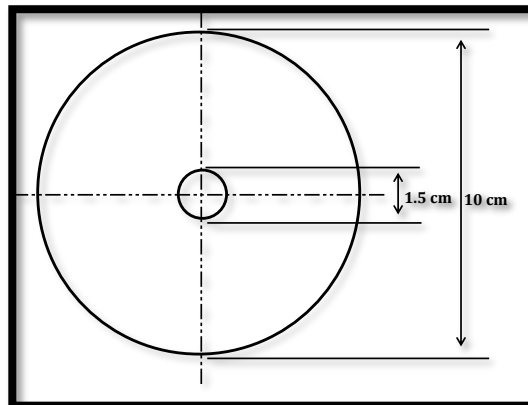


Figure III.8. Le réservoir de décontamination vue par-dessus.

III.5. Procédure de lavage

L'idée dans cette technique de lavage est de faire circuler l'eau à travers le sol par voie ascendante. D'un côté nous introduisons environ 200 g du sol pollué dans le réacteur (réservoir de décontamination), de l'autre on remplit à l'eau distillée de 2 L positionné au-dessus du réacteur (réservoir d'eau) qui ne tombe goutte à goutte dans le réservoir de décontamination.

Chapitre III : Matériels et Méthodes

Une fois le sol est submergé, nous prenons des volumes d'eau extrait et nous les plaçons dans des tubes à essai numérotés pour les analyses spectrophotométriques (Voir figure ci-dessous).

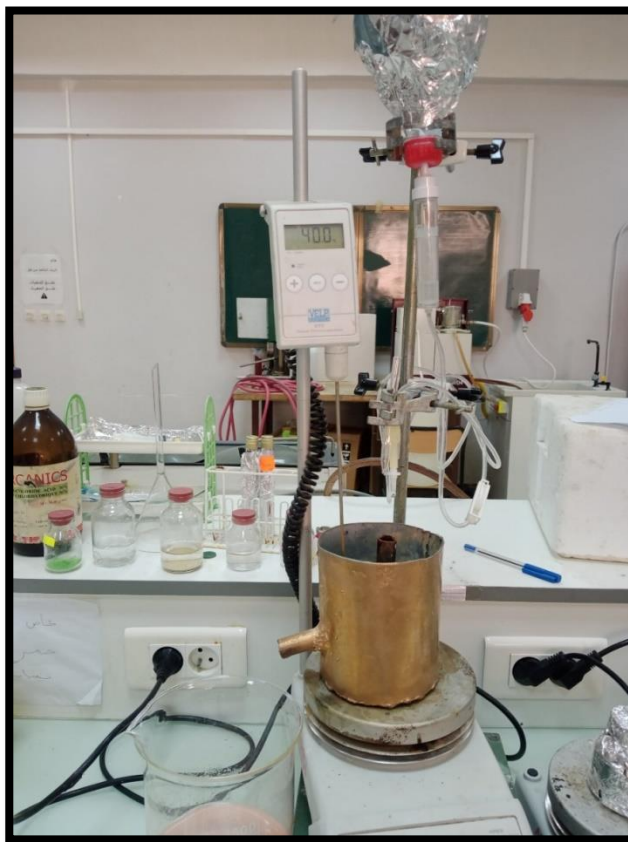


Figure III.9. Protocol d'extraction des polluants.

Souvent la solution collectée est opaque, due à la présence des particules du sol en suspension. Pour cette raison, les tubes à essai sont placés dans une centrifugeuse pour séparer les deux phases.



Figure III.10. L'appareil d'centrifugeuse (DM0412S 200-240V).



Figure III.11. Les échantillons d'extraction.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Chapitre IV : Résultats et discussion

Le quatrième chapitre est consacré à l'exploitation des résultats analytiques des différentes étapes de l'expérimentation conduites au laboratoire.

IV.1. Extraction

Dans ces expériences nous allons comparer l'extraction du nickel et de rhodamine B du sol, par un lavage à l'eau distillée.

IV.1.1. Spectres d'absorption

Dans les figures IV.1 et IV.2, sont présentés les spectres d'absorption du Nickel II et de rhodamine B, dont le λ_{max} est à 290 nm et 554 nm respectivement. Les deux courbes ont été mesurées dans le domaine spectrale entre 200 et 800 nm.

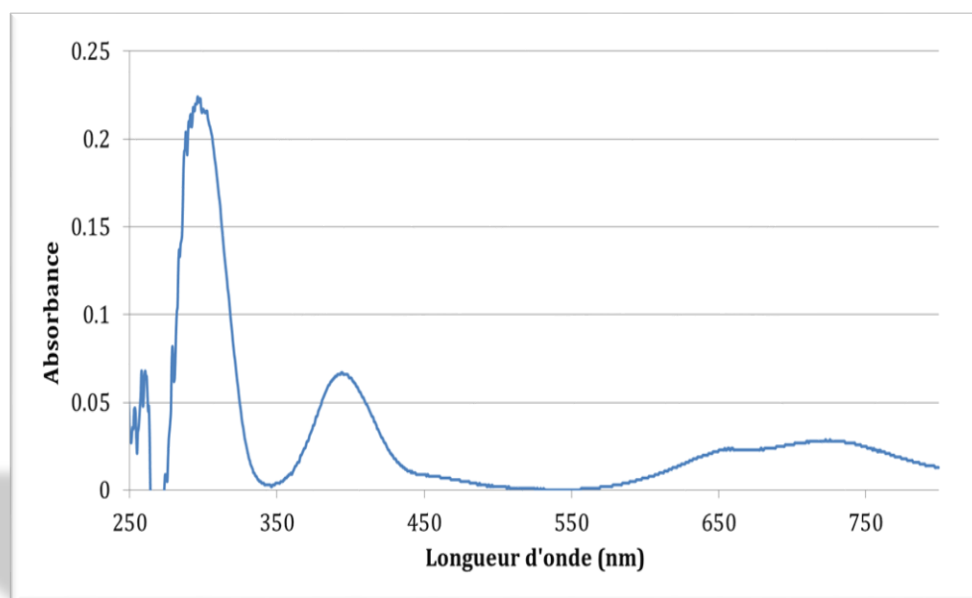


Figure IV.1. Spectres d'absorption du nickel II.

Chapitre IV : Résultats et discussion

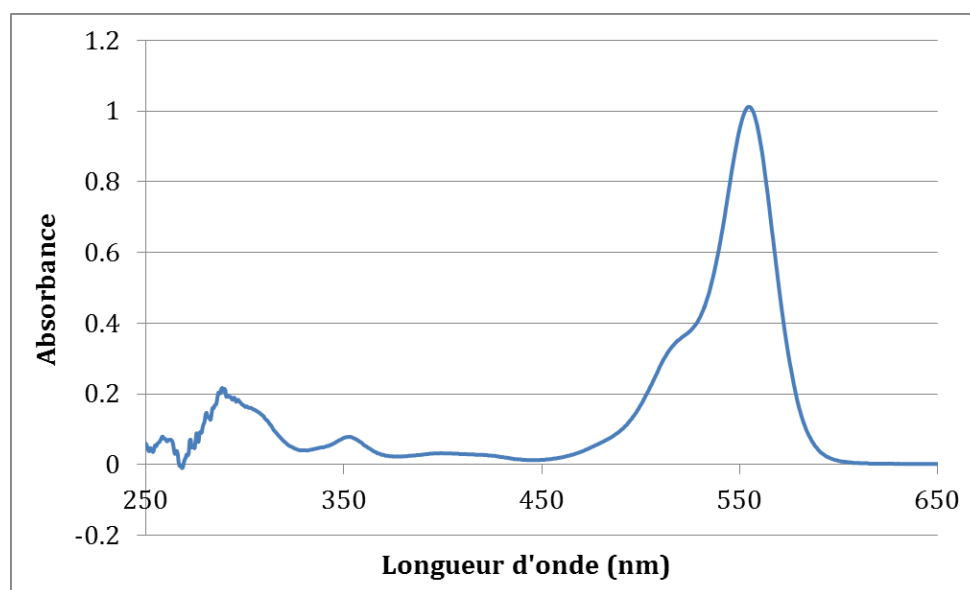


Figure IV.2. Spectres d'absorption de rhodamine B.

IV.1.2. Volume d'extraction

Dans cette expérience, nous cherchons le volume d'extraction adéquate pour extraire la totalité ou une partie du polluant adsorbé dans le sol. Dans la figure nous avons tracer la masse du nickel extrait en fonction du volume d'extraction. Il est clair que plus on augmente le volume d'extraction, plus la masse extrait est grande. Néanmoins, un litre extrait correspond à 25 %, de taux d'extraction et entre 6 et 8 heures de manipulation. Nous sommes limités à 1 litre d'extraction.

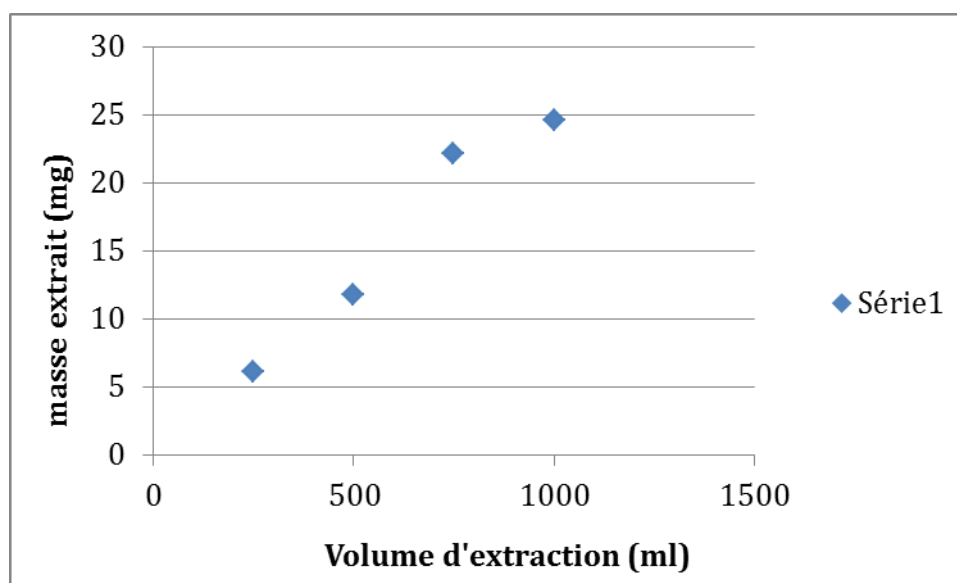


Figure IV.3. Effet du volume d'extraction sur la masse extrait.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1.3. Effet des débits d'extraction

Le débit d'extraction joue un rôle primordial dans la dépollution du sol par lavage, pour cette raison nous avons réalisé trois expériences d'extraction à différents débits pour chaque composé (2, 4 et 8 ml/min) Figure IV.4. a et b. Comme on peut le voir sur la figure a, l'extraction du nickel est disproportionnelle au débit d'extraction, donc plus on baisse le débit, plus on augmente le temps de contact entre le sol et la solution, en conséquence on améliore l'extraction. Dans le cas de rhodamine B l'extraction est faible et nous croyons que le résultat est erroné.

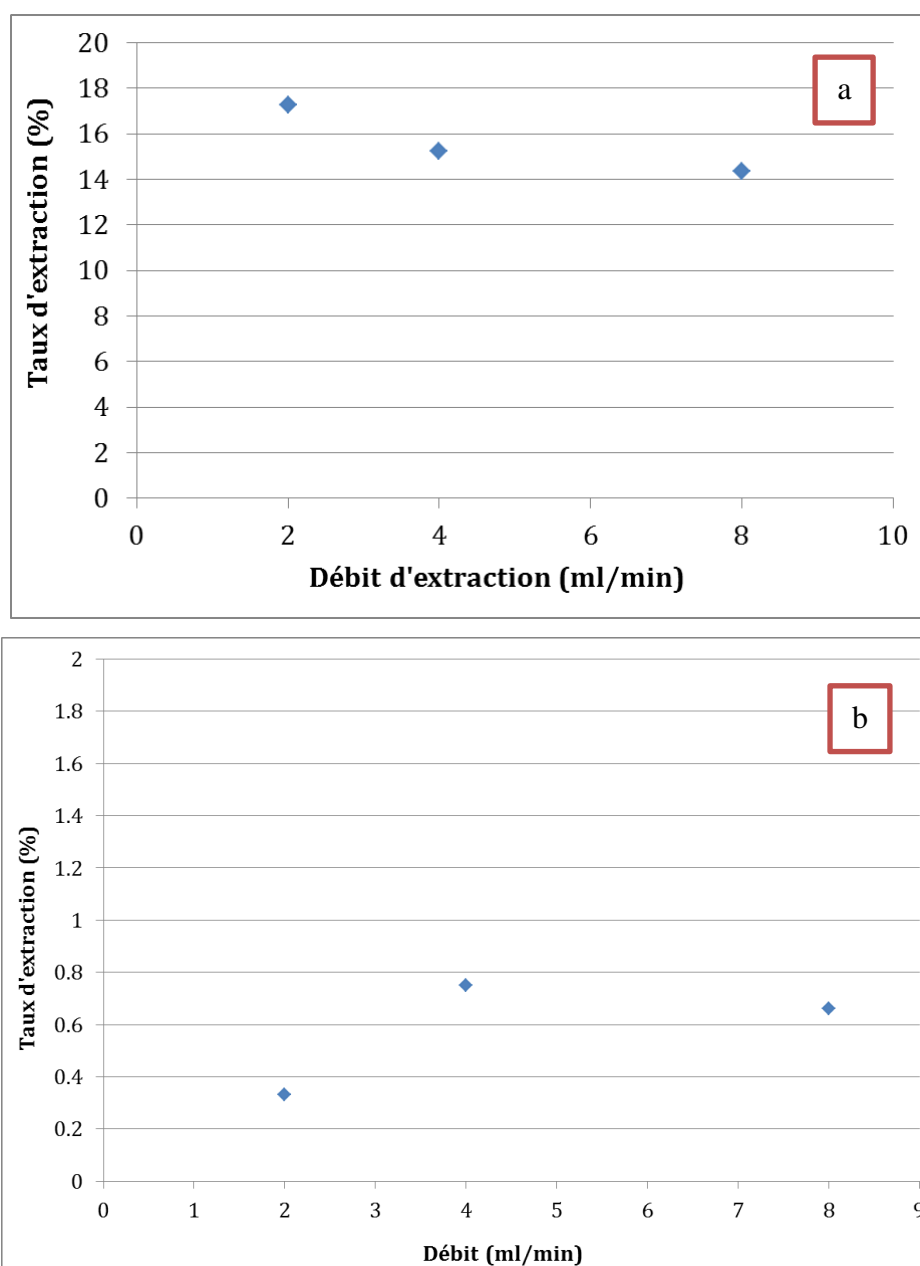


Figure IV.4. Effet des débits d'extraction sur le taux du polluant extrait a) Nickel, b) Rhodamine B.

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1.4. Effet de température

En général, la désorption thermique est un procédé de dépollution basant sur la désorption comme mécanisme d'élimination des contaminants. Elle convient au traitement de la plupart des contaminants volatils et semi-volatils, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), le dichlorodiphényltrichloroéthane (DDT), les hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) et le mercure, dans les sols [49].

En tant que méthode de traitement thermique, le principe de base de la dépollution thermique est d'éliminer les contaminants en chauffant le sol à des températures suffisantes [50].

Dans ces expériences nous avons réalisé le lavage du sol à différentes températures, dont le sol est chauffé à 25, 40 et 60 °C. Comme indiqué dans la (figure IV.5), on voit bien que la température joue un rôle très important dans la dépollution du sol : plus la température augmente le taux de polluant dans la solution augmente.

D'autre part nous avons étudié l'effet du chauffage sur la rhodamine B, on observe que à température ambiante la désorption de ce colorant est moins efficace que dans le cas du nickel. Cependant, le chauffage a amélioré l'élimination du colorant, en montant en température de 25 à 60 °C, 16 fois.

Chapitre IV : Résultats et discussion

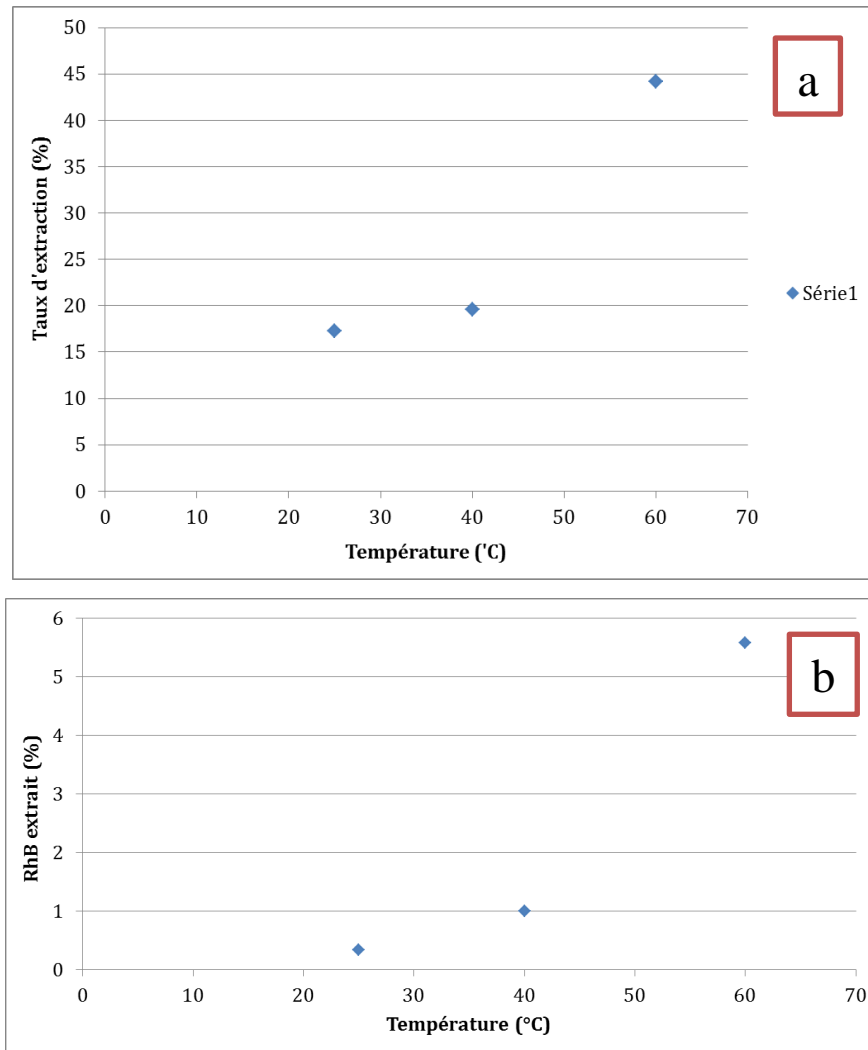


Figure IV.5. Effet de la température sur le taux de polluant extrait a) Nickel, b) Rhodamine B.

IV.1.5. Effet du pH

Dans ces expériences nous avons effectué la dépollution du sol à deux valeurs de pH 3 et 6. La quantité totale de rhodamine B extrait à pH 6 est 0.33 % tandis que celle de pH 3 est égale à 1.4 %. On peut conclure que la dépollution du sol à pH acide est plus efficace qu'à pH neutre ou alcalin.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux réalisés dans le cadre du projet de fin d'étude visent à améliorer les techniques de dépollution du sol.

Dans cette étude nous avons réalisé une nouvelle méthode de dépollution du sol en se basant sur le lavage, et en utilisant un système de dépollution spécial. Nous avons choisi deux éléments pour tester notre système de décontamination : le nickel et la rhodamine B.

Nous avons effectué plusieurs tests d'extraction pour trouver le système le plus pratique et le plus efficace. Ensuite nous avons étudié l'effet de la température de chauffage sur les sols contaminés, l'effet du pH et l'effet du volume extraction sur la masse extrait. Nous avons constaté que l'augmentation du chauffage du sol améliore l'extraction des polluants, tandis que l'augmentation de débit la réduit.

Compte tenu de la grande diversité des polluants, nous n'avons pas pu mener suffisamment d'expériences pour confirmer les résultats observés, et pour voir l'impact d'autres paramètres sur plusieurs types de polluants.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Aubert G., Boulaïne J., 1972. La pédologie. Presses Universitaires de France, Collection Que sais-je ?
- [2] C. Viglianti and C. Viglianti, "Approche alternative du lavage de sols pollués par des hydrocarbures aromatiques polycycliques : utilisation des cyclodextrines avec procédés de recyclage To cite this version: HAL Id: tel-00784723 présentée par Spécialité : Sciences et Génie de l ' Environnement Approche alternative du lavage de sols pollués par des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques : Utilisation des cyclodextrines avec procédé de recyclage," 2013.
- [3] Aiken G.R., McKnight D.M., Wershaw R.L., McCarty P., 1985. Humic substances in soil, sediment & water: Geochemistry, Isolation & Characterization. Wiley-Interscience Publication ISBN : 0-471-88274-7, 682 p.
- [4] Wershaw R.L., 1993. Model for Humus. Environ. Sci. Technol., 27, 814-817.
- [5] Bollag J. M., Myers C. J., Minard. R. D., 1992. Biological and chemical interactions of pesticides with soil organic matter. Sci. Total Environ., 123, 205-217.
- [6] Chiou C.T., Shoup T.D., Porter P.E., 1985. Mechanistic roles of soil humus and minerals in the sorption of nonionic organic compounds from aqueous and organic solutions. Organic Geochemistry, 8, 9-14.
- [7] M. E. T. Biologiques, "L ' ETUDE DU SOL AU LABORATOIRE.
- [8] McCray, J.E., Bai, G., Brusseau, M.L, Miller, R. 2001. Biosurfactant-enhanced solubilization of NAPL mixtures. J. Contam. Hydrol., 48,45-68.
- [9] Lee L.S., Suresh P., Rao C., Okuda I., 1992b. Equilibrium partitioning of polycyclic aromatic hydrocarbons from coal tar into water. Environ. Sci. Technol., 26, 2110-2115.
- [10] Wilcke, W., 2000. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil – a review. Journal of plant nutrition and soil science, 163, 229-248.
- [11] McCray, J.E., Dugan, P.J., 2002. Nonideal equilibrium dissolution of trichloroethene from a decane-based NAPL mixture: Experimental and modeling investigation. Water Resources Research, 38, 22-29.
- [12] Karickhoff S.N., Brown D.S., Scott T.A., 1979. Sorption of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils. Wat. Res., 13, 241-248.

Références bibliographiques

- [13] McCarty P.L., Reinhard M., Rittman B.E., 1981. Trace organics in groundwater. *Environ. Sci. Technol.*, 15, 40- 51.
- [14] Northcott G.L., Jones, K.C, 2001a. Partitioning, extractability, and formation of nonextractable PAH residues in soil. 1. compound differences in aging and sequestration. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 1103-1110.
- [15] Northcott G.L., Jones, K.C, 2001b. Partitioning, extractability, and formation of nonextractable PAH residues in soil. 2. Effects on compound dissolution behavior. *Environ. Sci. Technol.*, 35, 1111-1117.
- [16] Calvet R., 1989. Adsorption of organic chemicals in soils. *Environmental Health Perspectives*, 83, 145-177.
- [17] Farrel J., Reinhard M., 1994. Desorption of halogenated organics from model solids, sediments and soils under unsaturated conditions : 2. Kinetics. *Environ Sci. Technol.*, 28, 63-72.
- [18] Stegmann R., Brunner G., Calmano W., Matz G., 2001. Treatment of contaminated soil, *Fundamentals Analysis Applications*. Berlin : Springer-Verlag, 658 p.
- [19] M. Nouri and A. Haddioui, 'Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds: une revue,' *Maghrebien J. Pure Appl. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 47–58, 2016.
- [20] Baker, A.J.M. and Walker, P.L. (1989). Ecophysiology of metal uptake by tolerant plants. In: *Heavy metal tolerance in plants - Evolutionary aspects*. Shaw, A. (Eds). CRC Press, 155-177.
- [21] Adriano, D.C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biochemistry, bioavailability and risks of metals*. Springer-Verlag, New York.
- [22] Loué, A. (1993). *Oligo-éléments en agriculture*. Ed. Nathan (ed), 45-177.
- [23] Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants*. CRC Press, London.
- [24] M. Di Benedetto, *Méthodes spectrométriques d'analyse et de caractérisation (les métaux lourds)*, 1997, p8-p9.
- [25] Wang, Q., Cui, Y., Liu, X., Dong, Y., & Christie, P. (2003). Soil contamination and plant uptake of heavy metals at polluted sites in China. *Journal of Environmental Science and Health*, 164 Page 8 of 9 *Water Air Soil Pollut* (2019) 230: 164Content courtes.

Références bibliographiques

- [26] Pueyo, M., Lopez-Sanchez, J. F., & Rauret, G. (2004). Assessment of CaCl_2 , NaNO_3 , and NH_4NO_3 extraction procedures for the study of Cd, Cu, Pb and Zn extractability in contaminated soils. *Analytica Chimica Acta*, 504,217–225.
- [27] Filipiak-Szok, A., Kurzawa, M., & Szlyk, E. (2015). Determination of toxic metals by ICP-MS in Asiatic and European medicinal plants and dietary supplements. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 30,54–58. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2015.05.001>.
- [28] SAHNOUNE Rachid, 'Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d'Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia).' p. 2, 2014.
- [29] Thi My Dung Huynh. Impact des métaux lourds sur les interactions plante/ver de terre/ microflore tellurique. 2010. Université Paris .
- [30] COLOMBANO, S., SAADA, A., GUERIN, V., BATAILLARD, P., BERANGR, S., HUBE, D., GIRARDEAU, L. (2010) : Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts bénéfices. 20- 499p.
- [31] Bliefert, Perraud, « Chimie de l'environnement Air, Eau, Sols, déchets » Ed. de boeck. 2011.
- [32] Emilian K., « Traitement des pollutions industrielles : Eau, air, déchets, sols, boues ».Ed. Dunod, 2009.
- [33] Dépollution in situ, sur site ou hors site . La gestion des sites et sols pollués .Actu-Environnement.com - Publié le 04/05/2010.
- [34] AKMOUCI-TOUMI, S. (2009) : Contribution à l'étude des boues de forage : Isolation et évaluation de la capacité de quelques souches microbiennes à dégrader le gasoil. Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.
- [35] LECOMTE, P. (1998) : Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. 2ème édition Lavoisier.
- [36] GOYER, S. (1995) : Techniques de restauration de sites contaminés par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : 1- procédés physiques, physico-chimiques et thermiques, Vecteur Environnement. 57-68pp.
- [37] KHAN, F. I., HUSAIN, T., and HEJAZI R. (2004) : An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of Environmental Management*. 71, 95-122p.
- [38] COLIN, F. (2000) : Pollution localisée des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés, Académie des sciences, rapport n° 44, Edition Tec & Doc. 417p.
- [39] LISTE, H., et ALEXANDER, M. (2000) : Plant-promoted pyrene degradation in soil. *Chemosphere*. 40:7-10p.

Références bibliographiques

- [40] HAMBY, D.M. (1996) : Site remediation techniques supporting environmental restoration activities, a review, *The Science of the Total Environment*. 203-224pp.
- [41] Principe et limites du traitement par lavage. Traitement physico-chimique : lavage des sols pollués . Bart VAN DER VELPEN, Thierry MINGUET. 10 oct. 2004.
- [42] MOREL, R. (1989) : Les sols cultivés. Lavoisier 2ème édition. Paris., 51-74.
- [43] M. Matsukata, Y. Takei, T. Aoki, K. Sanui, N. Ogata. Y. Sakurai and T. Okano, *J. Biochem.*, 116(1994) 682.
- [44] NAFTI, Y. (2008) : contribution à l'étude de la cinétique de libération d'un principe actif : oxacilline sodique encapsulé en vue de déterminer les conditions de conservation . Ingénieur d'état : biologie : contrôle de la qualité et analyses : université Z.
- [45] SKOOG., et. al., *Principles of Instrumental Analysis*, 6th ed, Thomson Brooks/Cole, 2007, 351.
- [46] A. Väisänen, A. Kiljunen, Ultrasound-assisted sequential extraction method for the evaluation of mobility of toxic elements in contaminated soils, *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 85 (2005) 1037–1049. <https://doi.org/10.1080/0>.
- [47] B.K. Klik, D. Kulikowska, Z.M. Gusiatin, Flushing of Soils Highly Contaminated with Cd Using Various Washing Agents Derived from Sewage Sludge, *Energies*. 15 (2022) 349. <https://doi.org/10.3390/en15010349>.
- [48] A. Petitgirard, M. Djehiche, J. Persello, P. Fievet, N. Fatin-Rouge, PAH contaminated soil remediation by reusing an aqueous solution of cyclodextrins, *Chemosphere*. 75 (2009) 714–718.
- [49] C. Zhao, Y. Dong, Y. Feng, Y. Li, et Y. Dong, « Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review », *Chemosphere*, vol. 221, p. 841-855, avr. 2019, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.01.079.
- [50] Lundin, L., Aurell, J., Marklund, S., 2011. The behavior of PCDD and PCDF during thermal treatment of waste incineration ash. *Chemosphere* 84 (3), 305e310.
- [51] Bulmau, C., Marculescu, C., Lu, S., Qi, Z., 2014. Analysis of thermal processing applied to contaminated soil for organic pollutants removal. *J. Geochem. Explor.* 147, 298e305. Chang, T.C., Yen.

Résumé

Le problème des sols pollués est la conséquence d'un passé, et trop souvent encore d'un présent industriel, peu soucieux des rejets d'éléments toxiques dans les sols. La contamination du sol par les polluants métalliques (métaux lourds) et organiques (colorants) peut présenter un risque important pour la santé humaine et l'environnement, rendant de nombreux sites potentiellement pollués et dangereux. Il existe plusieurs technologies de décontamination des sols contaminés. Une étude est donc nécessaire pour déterminer la meilleure technique pour les sols pollués.

Dans cette étude, nous avons mené un travail sur le lavage du sol pollué par le nickel et la rhodamine B, dont l'effet de température et de pH sur la désorption des polluants dans le sol ont été étudiés.

Mots clés : sol, pollution, technique de dépollution, traitement par lavage, nickel, rhodamine B

Abstract

The problem of polluted soils is the consequence of a past, and all too often still of a present-day industry, which is not very concerned about the discharge of toxic elements into the soil. Soil contamination by metallic (heavy metals) and organic (colorants) pollutants can present a significant risk to human health and the environment, making many sites potentially polluted and dangerous. There are several technologies available to decontaminate contaminated soils. A study is therefore needed to determine the best technique for polluted soils.

In this study, we conducted a work on the washing of soil polluted by nickel and Rhodamine B. The effect of temperature and pH on the desorption of pollutants in the soil was studied.

Keywords : soil, pollution, depollution technique, washing treatment, nickel, rhodamine B

ملخص

تعتبر مشكلة التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة كنتيجة تراكمية للماضي، ولا تزال الى الآن بسبب الحاضر صناعي، الذي لا يهتم كثيرا بالعناصر السامة في التربة. يمكن أن يشكل تلوث التربة بالمعادن الثقيلة خطرا كبيرا على صحة الإنسان والبيئة، مما يجعل العديد من الأماكن والمواقع ملوثة وخطيرة. هناك العديد من التقنيات لإزالة التلوث من التربة الملوثة بالمعادن الثقيلة، ومنه هناك حاجة إلى دراسة أفضل التقنيات لإزالة التلوث من التربة.

في هذه الدراسة أجرينا عملا على غسل التربة وهو تقنية بديلة وبيئية لإزالة التلوث، ومنه درسنا فعالية طرق الغسيل في معالجة التربة الملوثة، والتي تم فيها دراسة تأثير درجة الحرارة ودرجة الحموضة على امتصاص الملوثات في التربة.

الكلمات المفتاحية : التربة، التلوث، تقنية إزالة التلوث، المعالجة بالغسل.