

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

FACULTE : des sciences.

DEPARTEMENT : De 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 : ALILI Amel et LAITAR Ahlam

Intitulé:

Dépollution du sol par voie thermique

Soutenu le 23/06/2021 devant le jury composé de:

Dr. DEGHFEL Nadir

Université de M'sila

Président

Dr. DJEHICHE Mokhtar

Université de M'sila

Rapporteur

Dr. BENYAHIA Azzedine

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Toute louange et gloire à **Allah** ♥ qui nous donné la santé,
Le courage et la force pour réaliser ce travail.
Que **Allah** nous fortifie et nous augmente les connaissances
Dont nous avons besoin pour continuer. . .

Nos remerciements les plus vifs vont à notre encadreur monsieur
Djehiche Mokhtar pour son encadrement, sa disponibilité et son aide,
nous avons vraiment reconnaissant pour vos conseils constants, vos
précieux commentaires et pour avoir répondu à nos questions et requêtes
si rapidement.

Nos remerciements aux membres de jury monsieur Benyahia Azzedine
et monsieur Deghfel Nadir 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 Mr. N Ariouia, et tous les ingénieurs de laboratoire pour
son aide et son soutien.

Un grand merci à l'étudiant au doctorat Lahmar Nedjma pour l'aide
et pour ses précieux conseils et son orientation tout au long de notre
recherche.

Nos remerciements les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin pour
leur précieuse aide.

Nos remerciements enfin, nos familles et nos amies pour leur aide et les
encouragements qu'ils m'ont apportés.

♥ Alili Amel, Laitar Ahlam ♥

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ " وَقَدْ عَمَلُوا فَسِيرَى اللَّهِ عَمَلَكُمْ وَرَسُولَهُ وَالْمُؤْمِنِينَ "

إن أحق وأجدر الناس بالإهداء من قال فيحتم الرب جلا علاه " وَلَا تَقُلْ لَهُمَا أُفٌ وَلَا تَنْهَرَهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا "، إلى ملاكي في الحياة لمن انتظرتني تسعة أشهر وكابدت من أجلي كل عناء، لأعظم امرأة لأغلى الحبايب أمي ♥

(عيشوش)، إلى من أحمده بكل فخر الذي لولاه لما وصلت لهذه المراتب ضحي ومازال يضحى من أجلنا أبي ♥

العزيز (محمد) أطال الله في عمره وجعلك تاجا فوق رؤوسنا، لأمي الأخرى التي اعتبرت أن حضنها هو الملجأ الآمن الذي لا شك فيه خالتي وما أعظم هذه الكلمة وهذا النسب بنظري (أم الخير حزلي)، وإلى توأم روجي وأختي الوحيدة (حنان) التي كانت مثالا يحتذى به في الصبر على طلب العلم ونيله، إلى أخي الذي أتمنى له التوفيق والنجاح في شهادة البكالوريا (غانم)، وإلى برعم العائلة المدلل (علاء شمس الدين) وزوج أختي (خالد)، إلى عائلة (لعيطر) و (حزلي) كبيرها وصغيرها لمن أعترز بصداقتهم (سميرة وعبير) ولشركتي في المذاكرة (أمال)، لجميع طلبة علوم المادة وأختص طلبة الكيمياء بجميع فروعها، إلى كل من أود كرم قلبي ونسجهم قلبي لكل من وسعتم ذاكرتي ولم تسعهم مذكري أهدي عملي المتواضع هذا، فاللهم وفقني بإذنك يا رب.

أحلام لعيطر

Dédicace

Je dédie ce travail :

A 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 ♥ à toi chère maman ♥ à toi papa ♥ 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.

A ma chère sœur Rania, qui n'ai jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteins ce niveau et pour ces nombreux sacrifices consentis pour mon éducation et l'affection qui m'ont éclairé le chemin du succès, vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour.

A mes chers frères Oussama, Fayez, vous avez toujours été mon soutien et serez l'exemple d'un frère, je te souhaite la réussite, le bonheur et le succès.

A mes petits anges mes adorable filles Lamis, Nihel, que Dieu vous protège.

A mon meilleur amie, à L'âme forte et douce Hadji Maroua, qui a enseigné moi comment faire confiance à Allah, croire en moi et au travail acharné, tu es l'une des plus grands cadeaux que j'ai.

A ma chère binôme Laitar Ahlam, je te souhaite une vie en rose et d'atteindre tous tes rêves infini.



Table des Matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction général 1

Chapitre I

Le sol

I.1. Le sol	2
I.1.1. Qu'est-ce que le sol ?.....	2
I.1.2. Les constituants du sol	2
I.1.2.1. La matière minérale du sol.....	3
I.1.2.2. Matière organiques du sol.....	4
I.1.2.3. La Phase liquide	4
I.1.2.4. La phase gazeuse.....	5
I.1.3. Caractéristiques physique et chimique du sol.....	5
I.1.3.1. Matière organique	5
I.1.3.2. La texture d'un sol	5
I.1.3.3. La Porosité	6
I.1.3.4. Le pH	7
I.1.3.5. La conductivité électrique (CE).....	7
I.1.3.6. La capacité d'échange cationique (CEC).....	8
I.2. Pollution du sol	8
I.2.1. Définition de la pollution	8

I.2.1.1. Définition d'un site pollué	9
I.2.1.2. Définition de sol pollué.....	9
I.2.1.3. Définition d'un polluant.....	9
I.2.2. Formes de pollution des sols.....	9
I.2.2.1. Les pollutions diffuses	9
I.2.2.2. Les pollutions ponctuelles.....	9
I.2.3. Sources de pollution des sols	10
I.2.3.1. Sources naturelles	10
I.2.3.2. Source anthropique	10
I.2.4. Principaux polluants dans le sol.....	10
I.2.4.1. Les métaux lourds et métalloïdes.....	10
I.2.4.2. Pesticides :	11
I.2.4.3. Hydrocarbure polycyclique aromatique (HAP)	11
I.2.5. L'impact de pollution des sols sur la santé humaine	11
I.3. la dépollution des sols	12
I.3.1. Définition	12
I.3.2. Les Procédés de dépollution des sols par lieu de traitement.....	12
I.3.3. les techniques de traitements de dépollution des sols.....	13
I.3.3.1. Les technique physique.....	13
I.3.3.2. les techniques chimiques.....	15
I.3.3.3. Les techniques thermiques	17
I.3.3.4. les techniques biologique.....	18

Chapitre II

Traitement thermique

II.1. Traitement thermique	20
II.2. Principe de traitement thermique	20
II.3. Les techniques des traitements thermiques	20
II.3.1. L'incération	20
II.3.1.1. Définition	20
II.3.1.2. Principe	21
II.3.2. La pyrolyse	21

II.3.2.1. Définition	21
II.3.2.2. Principe	21
II.3.3. La vitrification	21
II.3.3.1. Définition	21
II.3.3.2. Principe	22
II.3.4. Désorption thermique	22
II.3.4.1. Définition	22
II.3.4.2. Principe	22
II.3.4.3. Application	23
II.3.4.4. Les avantages et les inconvénients	24

Chapitre III

Matériels et méthodes

III.1. Matériels et techniques expérimentales	25
III.1.1. produit chimique utilisé	25
III.1.2. Préparation et lavage de l'échantillon	25
III.1.2.1. Préparation de l'échantillon	25
III.1.2.2. Préparation du sol polluée	25
III.2. Mesure des paramètres	25
III.2.1. Le pH	25
III.2.2. La conductivité	26
III.3. Méthode d'analyse	27
III.3.1. Spectromètre UV-visible	27
III.4. Procédure de lavage	29

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV. Introduction	31
------------------------	----

IV.1. Conception du réacteur	31
IV.2. Courbe d'étalonnage des ions de cuivre II	32
IV.2.1. Effet du pH	32
IV.2.2. Valeur de la conductivité	33
IV.2.3. Effet de la température	33
Conclusion générale.....	35

Références bibliographique

Résumé

Liste des Tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Classification granulométrique	3
Tableau I.2. Répartition des classes des PH des sols	7
Tableau I.3. Echelle de Salinité du sol	7

Chapitre II

Tableau II.1. Avantages et inconvénients de la désorption thermique	24
--	----

Chapitre III

Tableau III.1. Les Produits chimiques utilisés.	25
---	----

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1. Schéma d'une coupe de sol	2
Figure I.2. Diagramme de classification détaillé de texture.....	6
Figure I.3. capacité d'échange cationique (CEC).	8
Figure I.4. Famille de technique de dépollution des sols par lieu de traitement	13
Figure I.5. Schéma de principe de la réduction on site	17

Chapitre II

Figure II.1. Schéma de principe de la désorption thermique ex situ ou on site	23
--	----

Chapitre III

Figure III.1. pH-mètre (HANNA instrument 211).	26
Figure III.2. Conductimètre électronique.	26
Figure III.3. Domaine spectral du rayonnement électromagnétique.	27
Figure III.4. L'appareil d'UV-Visible (SHIMADZU UV – 2401 PC).....	28
Figure III.5. Protocol d'extraction des polluants	29
Figure III.6. Les échantillons d'extraction	30

Chapitre IV

Figure IV.1. Schéma explicatif du réacteur.....	30
Figure IV.2. Courbe d'étalonnage des ions de cuivre II	30
Figure IV.3. Courbe présenté l'effet de la temperature	30

Liste des Abréviations

Unités

°C	Dégré Celsius
mm	Millimètre
mg	Milligramme
ml	Millilitre
nm	Nanomètre
µm	Micromètre
Kg	Kilogramme
ms	Millisiemens
Cm	Centimètre
l	Litre

Autre abréviations

ASTM	American Society for Testing and Materials
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
AFNOR	Association française de normalisation
USA	United state American
PH	Potentiel hydrogène
CE	Conductivité électrique
CEC	Capacité d'échange cationique
ETM	Eléments traces métalliques
HAP	Hydrocarbure polycyclique aromatique
POP	polluant organique persistant
PCB	Polychlorobiphényle
COV	Composé organique volatile
SCOV	Composé organique semi volatile
MO	Matière organique
O ₂	Oxygène
CO ₂	Dioxydes de carbone
COH	Hydroxyde de carbone
OH	Hydroxyde
H ₂ O	Eau
HCl	Chlorhydrique
N ₂	Azote
H ₂ O ₂	Eau oxygéné
O ₃	Ozone
H+	Hydrogène (forme ion)
Li+	Lithium (forme ion)

Na ou Na ⁺	Sodium (forme ion).
K ⁺	Potassium (forme ion).
Mg ²⁺	Magnésium (forme ion).
Ca ²⁺	Calcium (forme ion).
Al ³⁺	Aluminium (forme ion).
NH ₄	Ammonium
As	Arsénique
Hg	Mercure
Ni	Nickel
Zn	Zinc
Cd	Cadium
Pb	plomb
Cu	Cuivre
Mn	Manganèse
Cr	Chrome

Introduction

Générale

Introduction Générale

Le sol est la couche superficielle meuble de la croûte terrestre qui stabilise les plantes et leur fournit des nutriments et de l'eau. Il est également considéré comme le moyen approprié pour l'activité des organismes vivants, en plus de s'appuyer sur lui dans la construction d'installations. Le sol est mélangé aux produits de la matière en décomposition, aux minéraux, aux gaz, aux liquides et aux restes d'organismes vitaux. Ces organismes contribuent d'une manière ou d'une autre à l'amélioration du sol et de sa qualité, la présence de produits chimiques dans le sol à des concentrations suffisamment élevées pour le menacer et ainsi affecter négativement la richesse végétale et animale et ainsi menacer l'homme et la santé et ainsi conduire à un déséquilibre écologique.

La dépollution du sol, d'un point de vue environnemental, est la réduction des concentrations de contaminants pour le rendre utilisable. Il existe différentes techniques, plus au moins efficace, pour la dépollution du sol, citant : dépollution par procédés thermiques, dépollution par tri granulométrique, extraction électrique et Lavage du sol. Cette dernière consiste à capturer les polluants dans une solution liquide.

L'objectif de notre travail se focalise l'étude de la dépollution du sol par lavage, dont 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 les moyens de l'éliminer, La deuxième chapitre contient une définition des techniques de traitement thermique.

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 désorption thermique. Les résultats ont été présentés et discutés dans le deuxième chapitre.

Chapitre I

Le sol

I.1 | Le sol

I.1.1 | Qu'est-ce que le sol ?

« Le sol est un corps naturel de constitution minérale et organique, différencié en horizons d'épaisseur variable, qui diffère du matériau sous-jacent par sa morphologie, ses propriétés physique et chimique, sa composition et ses caractéristiques biologiques. » [1].

Le caractère systémique du sol s'impose ainsi progressivement. Cela est un important pour sa description et la compréhension de son fonctionnement qui nécessite de prendre en compte l'existence de flux de matière et d'énergie entre les différents compartiments constituant ce que l'on peut appeler le « système sol » [1].

Le sol est composé de trois fonction, la fraction solide (constituants minéraux et organiques), la fraction liquide (solution du sol) et la fraction gazeuse ou atmosphère du sol (oxygène, azote et gaz carbonique) [2].

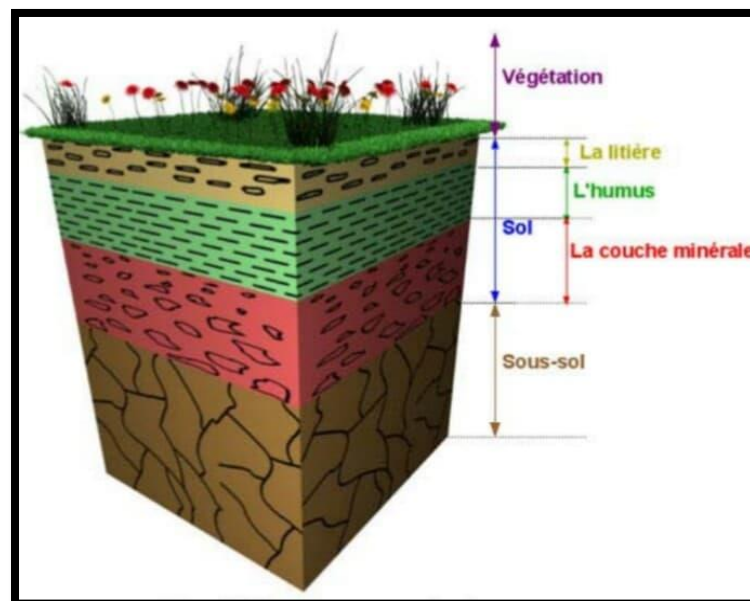


Figure I.1. Schéma d'une coupe de sol.

I.1.2 | Les constituants du sol :

Le sol est un milieu poreux dont la phase solide, constituée par des minéraux et des composés organiques, forme des assemblages plus ou moins volumineux et donne au sol sa structure. Cette phase solide n'est pas continue et délimite un espace poral de dimensions

variées et de géométrie complexe. Cette caractéristique explique la présence de phases fluides, liquide et gazeuse, susceptibles de se déplacer et donc donner lieu à des flux de matières [3].

On distingue, les constituants minéraux et les constituants organiques :

I.1.2.1 | La matière minérale du sol :

La phase solide est la phase qui contient des éléments minéraux de formes et de compositions différentes par exemple, gravier, sable, limons, argile [4, 5].

En général les sols sont classés par rapport à la distribution de la taille des particules qu'ils renferment. La société américaine ASTM (American Society for Testing and Materials) a développé un système unifié pour la classification des sols basée sur la taille des particules (tableau I.1).

Les pourcentages relatifs de chaque fraction du sol peuvent être déterminés et un caractère général du sol peut être déduit en utilisant le triangle de texture du sol [6].

Tableau I.1. Classification granulométrique. (Frevert et al, 1995)

Désignation	Diamètre des grains (mm)
Blocs erratiques	> 200
Cailloux	200-60
Graviers grossiers	60-20
Graviers moyen	20-06
Graviers fins	6-02
Sables grossiers	0.6-0.2
Sable fins	0.2-0.06
Silts grossiers	0.06-0.02
Silts moyens	0.02-0.006
Silts fins	0.006-0.002
Argiles	< 0.002

On distingue essentiellement :

- **Les argiles :**

Sont des substances naturelles complexes composées essentiellement de silicates plus ou moins hydratés, d'aluminium généralement, mais également de magnésium, de fer ou même de nickel qui les colorent différemment. D'après les fractions adoptées par l'Association Internationale de la Science du Sol, la dimension des particules est inférieure à 0,002 mm de diamètre [3].

Ces aluminosilicates sont caractérisés par leur grande surface spécifique qui leur donne une forte capacité de rétention d'eau [7].

- **Les sables et limons :**

Ils présentent une granulométrie plus grossière que les argiles (diamètre des grains variant de 0,002 à 2 mm). Les sables et les limons jouent un rôle important dans l'édification de la structure des sols dont ils constituent le « squelette ». Les sols riches en sable et en limon sont caractérisés par leur perméabilité à l'eau et à l'air. L'adsorption des composés organiques sur du sable de quartz peut être considérée comme négligeable dans des conditions humides d'adsorption [8].

I.1.2.2 | Matière organiques du sol :

En ce qui concerne la matière organique ou phase organique du sol, elle correspond à tout ce qui est constitué de carbone organique, qu'il soit vivant ou non vivant (insectes, plantes, humus, microorganismes...etc.).

L'humus est un terme qui regroupe l'ensemble de la matière organique non vivante du sol et qui peut être classé en deux catégories :

- **Substances non humiques :**

Correspondent à la fraction de matière organique dont les caractéristiques biophysico chimiques sont reconnaissables (exemple : les hydrates de carbone, les protéines, les acides aminés, les lipides,...etc.).

- **Substances humiques :**

Sont issues de la transformation chimique ou biologique (altération, polymérisation,...etc.) de la matière organique du sol [9].

I.1.2.3 | La Phase liquide :

La phase liquide est tout ce qui est liquide ; elle se trouve dans les espaces lacunaires entre les particules solides du sol. La phase liquide représente l'eau du sol laquelle contient toujours des substances dissoutes « la solution du sol » [10].

La solution du sol ou l'eau du sol contient des ions minéraux et des petites molécules organiques variant dans sa composition et sa mobilité et même sa fixation sur les particules solides. Cette solution remplit partiellement ou totalement les pores du sol [4].

I.1.2.4 | La phase gazeuse :

Elle est représentée par l'air qui se trouve dans les espaces vides du sol. Cette phase est composée d'après MOREL (1996) de tout ce qui est gaz (Oxygène, Azote, Dioxydes de carbone...etc [4].

SOLTNER (1986) définit la phase gazeuse par l'atmosphère du sol qui se compose des mêmes gaz que l'air (O₂, CO₂, N₂,...) et surtout les gazes qui résultent de la décomposition de la matière organique et de l'activité biologique dans le sol [11].

MERMOUD (2006) dans une étude comparative entre la composition de l'air du sol et de l'air atmosphérique montre que, dans le sol, la concentration en CO₂ est plus élevée et la teneur en O₂ est plus réduite que dans l'air atmosphérique [5].

I.1.3 | Caractéristiques physique et chimique du sol :

I.1.3.1 | Matière organique :

On décrit facilement la matière organique à partir de la nature des débris directement décelables dans la litière : feuilles, aiguilles, pailles, tiges, brindilles, écorce, fruits, mousse, etc. Lorsque les débris organique ne sont pas directement décelables, on peut essayer d'évaluer sa teneur à partir de la couleur et de la consistance (fibreuse), mais cela nécessite de s'étalonner pour les sols présents dans la région étudiée. Il est intéressant de définir l'intensité des liaisons entre la matière organique et les éléments minéraux ; la matière organique pouvant revêtir les éléments minéraux ou être juxtaposée. Cela permet en partie de définir les formes d'humus et les type d'horizons organique ou historique [12].

I.1.3.2 | La texture d'un sol :

On peut définir la textureur comme un facteur déterminant de la fertilité des sols puisqu'elle influence les propriétés physiques (économie en eau et en air, structure, perméabilité, résistance à l'érosion etc ...) et chimiques (capacité des échanges) des sols [13].

La texture d'un sol est l'ensemble des propriétés qui découlent de la composition granulométrique du sol (teneur en pourcentage de sables grossiers et fins, de limons, d'argile, d'humus et de calcaire), elle est déterminée par l'analyse granulométrique [13].

D'après (HELLER et al, 1993 ; DELAUNOIS et al, 2009), la texture est le diamètre moyen des particules du sol, ou la composition granulométrique [14, 15].

La granulométrie est la répartition de l'ensemble des particules du sol en classes de tailles allant des pierres et cailloux de diamètre supérieur à 2cm aux particules argileuses qui font moins de 2 microns [16].

La texture permet d'apprécier les propriétés d'un sol à partir de la proportion des différentes fractions granulométriques [17, 18].

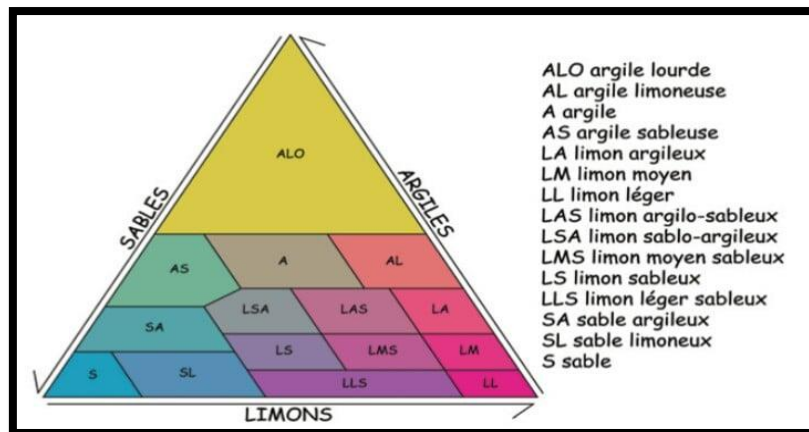


Figure I.2. Diagramme de classification détaillé de texture. (JAMAGNE, 1967)

I.1.3.3 | La Porosité :

Selon le degré d'humectation, les vides du sol sont occupés en majeure partie, soit par l'eau, soit par l'air.

La porosité donc reflète le volume des vides et renseigne sur les capacités hydriques ou atmosphériques (GOBAT et al, 2010), la porosité donne une bonne idée de l'état structurel. Selon la taille des pores, elle est subdivisée en macroporosité (vides > 50 µm, pouvant être remplies par l'eau de gravité, rapidement drainée et seront colonisées par les racines moyennes) en méso porosité ou porosité capillaire constituée des vides de 0,2 à 50 µm retenant l'eau utilisable par les plantes, et en microporosité dont les vides inférieures à 0,2 µm retiennent l'eau inutilisables (ARAGNOU et al, 2003). La mésoporosité dépend beaucoup de la texture, tandis que la macroporosité de la structure.

Selon l'origine, la porosité peut être classée ainsi :

- Porosité d'altération
- Porosité texturale
- Porosité structurale [19].

I.1.3.4 | Le pH :

Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions H⁺ libres en solution. Au niveau du sol, le pH est variable et il influe sur les propriétés du sol. Ces variations sont cependant limitées car si, en chimie, le pH varie de 0 à 14 (7 étant la neutralité), le pH des sols a pour extrêmes 4,5 à 5 pour les sols plus acides et 8 pour les terres très basiques [19].

Tableau I.2. Répartition des classes des PH des sols.

Classe du pH du sol	pH
Acide	<6
Faiblement acide	6-6.5
Neutre	6.5-7.3
Faiblement basique	7.3-7.8
Moyennement basique	7.8-8.5
Tendance alcalin	8.5-9
Très alcalin	>9

I.1.3.5 | La conductivité électrique (CE) :

La CE d'une solution de sol est un indice de sa teneur en sels solubles. Elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisés, cette propriété électrochimique est basée sur le fait que la conductance (inverse de la résistance électrique) d'une solution s'accroît au fur et à mesure que les concentrations en cation et anions porteurs des charges électriques augmentent [20].

Tableau I.3. Echelle de Salinité du sol (USSL, 1981)

Conductivité électrique (ms/cm)	Salure
0-0.6	Non salé
0.6-1.4	Peu salé
1.4-2.4	Salé
2.4-6	Très salés

I.1.3.6 | La capacité d'échange cationique (CEC) :

La capacité d'échange cationique (CFC) est la capacité à fixer de façon réversible les cations échangeables (Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Al^{3+}) [21].

Les cations sont liés aux feuillets d'argile par des forces de nature électrostatique et possèdent la propriété d'être échangeables. Ces cations échangeables se fixent à la surface des feuillets et assurent la liaison entre eux. L'intensité de ces liaisons dépend de la valence de ces cations, qui est probablement le facteur déterminant dans la capacité d'échange ou de remplacement des cations plus élevé qui peuvent remplacer facilement les cations de valeurs plus faibles [22].

Par ordre de capacité de remplacement croissante, les ions se classent comme suit :

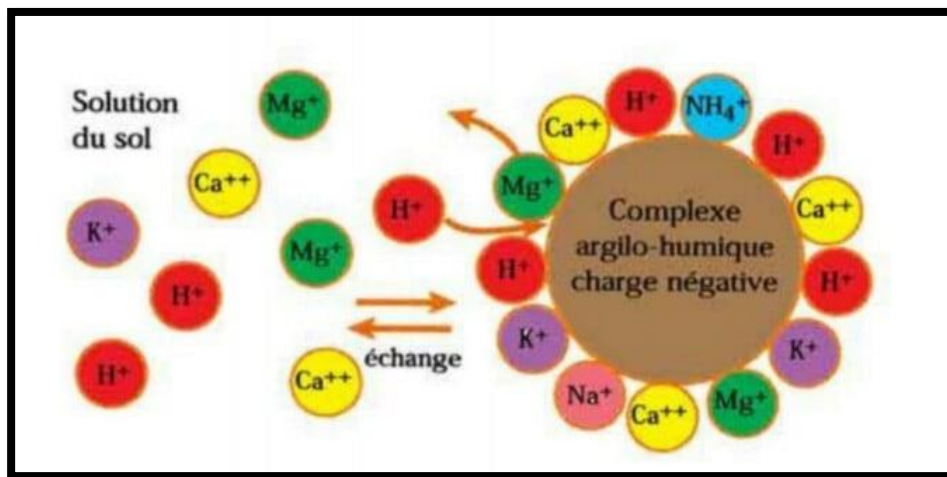
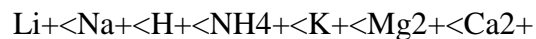


Figure I.3 capacité d'échange cationique (CEC).

I.2. | Pollution du sol :

I.2.1. | Définition de la pollution :

Il y a des nombreuses définitions qui ont été données par les experts. Parmi celles-ci nous retiendrons la suivante publiée dans un rapport rédigé par le comité scientifique de la maison blanche intitulé « Pour restaurer la qualité de notre environnement ». C'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 altérant les critères de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel.

et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles, en eau et autres produits biologiques. Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède, les possibilités du milieu ou encore en enlaidissant la nature [23].

La définition de pollution est donc très large et elle permet de comprendre aussi bien des polluants d'origine naturelle que des polluants liés à l'activité humaine (anthropique) [23].

I.2.1.1. | Définition d'un site pollué :

Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), c'est un site, qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement.

I.2.1.2. | Définition de sol pollué :

Un sol pollué est un sol qui présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement [24].

I.2.1.3. | Définition d'un polluant :

Les termes normalisés de l'AFNOR (Association française de normalisation) définissent le polluant comme un altéragène biologique, physique, ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général [24].

I.2.2. | Formes de pollution des sols :

On distingue deux types de pollution des sols :

I.2.2.1 | Les pollutions diffuses :

Elles se développent sur de grandes surfaces de sols, elles proviennent généralement d'épandages de produits solides ou liquides (emploi d'engrais ou de pesticides en agriculture) ou de retombées atmosphériques. La dispersion puis l'accumulation de substances dangereuses sur ces sols donne ainsi des « sites uniformément contaminés » [25].

I.2.2.2. | Les pollutions ponctuelles :

A l'inverse des pollutions diffuses, elles se distinguent par la présence ponctuelle dans les sols et sous-sols de substances dangereuses provenant généralement de déversements, de

fuites ou de dépôt de déchets. Non confinées et en fortes concentrations, ces substances donnent naissance à des « sites localement contaminés » [25].

I.2.3. | Sources de pollution des sols :

I.2.3.1. | 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 [26].

I.2.3.2. | Source anthropique :

La grande majorité de la pollution des sols est due aux activités humaines soit les activités industrielles telles que (les activités minières, la font, industrie agroalimentaire, etc), urbaine (les ordures ménagères, usage domestiques, etc.) ou agricole (les pesticides les engrais utilisés dans l'agriculture, etc.).

I.2.4. | Principaux polluants dans le sol :

I.2.4.1 | Les métaux lourds et métalloïdes :

L'expression « métal lourd » désigne des métaux de numéros atomiques élevés, de densité supérieure ou égale à 5 g.cm⁻³ et qui forment des sulfures insolubles. Ces éléments sont aussi de façon plus scientifique souvent appelés éléments traces métalliques (ETM). Le cadmium (Cd), le plomb (Pb), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le mercure (Hg), le nickel (Ni) et le zinc (Zn) sont des ETM très souvent rencontrés dans l'environnement, et plus particulièrement en milieux urbain [27, 28].

Le problème principal avec les ETM 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 [29, 30].

I.2.4.2. | Pesticides :

Couramment appelés produits phytosanitaires. Il s'agit généralement de produits de synthèse qui sont volontairement introduits par l'homme dans l'environnement soit pour protéger les récoltes et les denrées stockées, soit pour protéger les différents secteurs de l'agriculture intensive, soit encore pour lutter contre les vecteurs de maladies [31].

Dans le sol, la mobilité des pesticides dépend des phénomènes de rétention qui conditionnent la disponibilité des pesticides, assimilée à leur capacité à se trouver dans une phase fluide (en particulier la solution du sol), à être mobilisés dans le sol, mais aussi à être dégradés par la microflore ou absorbés par les plantes. L'étude de la mobilité est donc fondamentale dans l'évaluation des risques environnementaux des pesticides. La rétention est essentiellement due aux phénomènes physico-chimiques d'adsorption (accumulation des pesticides à l'interface solide-liquide) et de désorption (phénomène inverse conduisant au passage en solution des pesticides) [32].

I.2.4.3. | Hydrocarbure polycyclique aromatique (HAP) :

Les HAP proviennent principalement des processus de pyrolyse et en particulier de la combustion incomplète des matières organiques. Ils sont surtout d'origine anthropique mais ils peuvent aussi être présents dans l'environnement de façon naturelle par l'intermédiaire des feux de forêts ou des volcans par exemple [33].

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques s'accumulent dans les sols en raison de leur persistance et de leur hydrophobicité et ont tendance à être retenus dans le sol pendant de longues périodes de temps. Pour cette raison, la plupart des HAP sont des composants des POP et sont répandus dans l'air, l'eau, les sols et les sédiments [34].

I.2.5. | L'impact de pollution des sols sur la santé humaine :

Les sites contaminés ou sols pollués sont menaçant les humains et la population en les exposants à divers dangers, impacts et effets défavorable résultant de la pollution du sol.

La pollution des sols entraîne une pollution majeure des eaux souterraines, et donc la contamination de l'eau potable, car ces polluants atteignent les plants, puis le bétail et les humains après les avoir consommés, ce qui signifie qu'ils contribuent à la contamination de la chaîne alimentaire.

Quand on trouve que la santé de population a été affectée d'une manière ou d'une autre on peut dire qu'elle est proche de sites pollués, mais il est difficile de déterminer la cause principale de ces effets car le passage des polluants des sols à l'organisme est très mal connu.

I.3. | la dépollution des sols :

I.3.1. | Définition :

La dépollution des sols ou décontamination des sols consiste principalement à rendre le sol et le sous-sol d'une zone apte à un nouvel usage industriel ou un usage résidentiel, voire dans les cas extrêmes apte à un retour à la nature ou à un usage agricole, après qu'il eut été pollué par une activité ou un accident industriel [63].

Par ailleurs, même si le danger pour l'environnement lié à la pollution d'un site n'apparaît pas comme immédiat, on peut vouloir le dépolluer pour le valoriser (en zone constructible par exemple) en réduisant le risque qu'il fait courir aux futurs utilisateurs [63].

Il existe différentes méthodes permettant d'extraire les polluants présents dans le sol. Elles dépendent du type de polluant (hydrocarbures, métaux lourds, produits chimiques divers, etc.) et de la nature du terrain (perméable ou non, granuleux, présence d'eau, etc.) [63].

I.3.2. | 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) :** ils supposent l'excavation/extraction du milieu pollué (déchets, terre, eau) et son évacuation vers un centre de traitement adapté (incinérateur, centre d'enfouissement technique, etc.).
- **Traitements sur site (ou on site) :** ils consistent à excaver les terres ou les eaux polluées et à les traiter sur le site même.
- **Traitements in situ (ou en place) :** ils correspondent à un traitement sans excavation : le sol et les eaux souterraines sont laissés en place. Il s'agit alors soit d'extraire le polluant seul, soit de le dégrader ou de le fixer dans le sol [35].

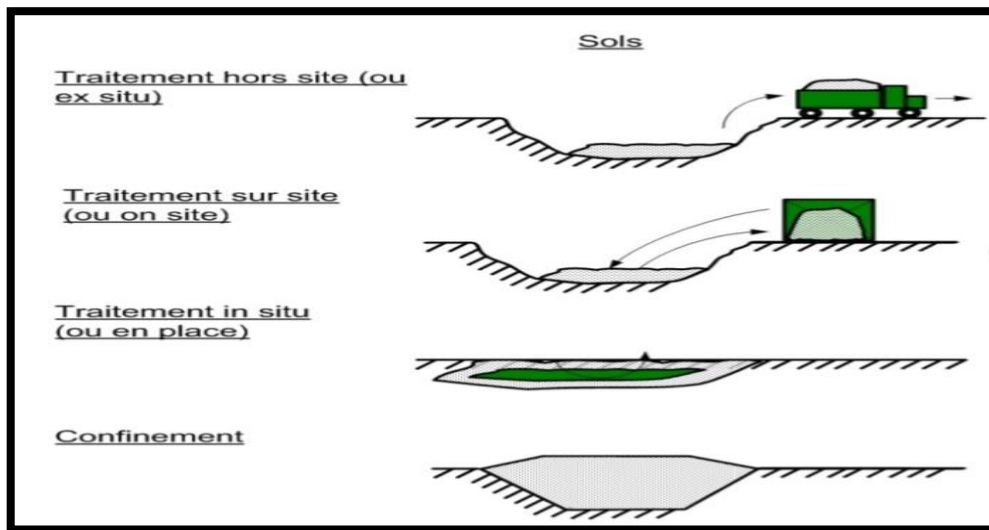


Figure I.4. Famille de technique de dépollution des sols par lieu de traitement (Colombano S et al, 2010).

I.3.3. | les techniques de traitements de dépollution des sols :

Il existe de nombreuses techniques de dépollution, plus ou moins efficaces selon la nature du contaminant (HAP, métaux, pesticides...), le type de processus utilisé (Volatilisation, adsorption...), le niveau et l'âge de la pollution, le type de sol concerné [36].

Le choix d'une technique par rapport à une autre est fonction du diagnostic de la pollution, des impacts sur l'environnement et la santé humaine, des usages auxquels le site est destiné et du coût de la dépollution.

A titre d'exemple, pour les sols contaminés par les HAP sur les friches d'anciennes usines à gaz, les techniques applicables vont du lavage du sol à son confinement, en passant par les techniques biologiques.

Parmi toutes ces techniques de traitements, le choix s'avère difficile mais est extrêmement important pour garantir le succès de la dépollution [37].

Ces traitements peuvent être combinés les uns avec les autres afin de réduire suffisamment les niveaux de contamination [38].

I.3.3.1 | Les technique physique :

- **Les procédés physiques de piégeage :**

Ce ne sont pas à proprement parler des techniques de dépollution puisqu'il s'agit simplement d'isoler et de stabiliser sur place la pollution. De plus, par la nature des travaux et des

surveillances nécessaires, elles sont relativement onéreuses. Deux méthodes sont fréquemment citées :

Confinement : Technique qui consiste à isoler la source de pollution venant ainsi empêcher la migration des substances polluantes. Cette technique est utilisée dans le cas où, pour des raisons techniques et économiques, il n'existe pas de solution conduisant à une véritable décontamination du site considéré. Ce peut être également une technique d'attente, en cas d'urgence, avant une dépollution ultérieure [39, 40].

Stabilisation et solidification : Technique qui consiste à fixer les substances polluantes sur le site dans une matrice créée par un mélange homogène des résidus, sols, eaux, matériaux contaminés avec des réactifs qui font prise et assurent la stabilité mécanique des produits traités. Cette technique s'applique généralement aux boues, résidus plus ou moins visqueux et aux sols contaminés par des substances minérales et éventuellement organiques [41, 37].

- **Les procédés par évacuation ou entraînement :**

Le principe consiste à utiliser des fluides présents dans le sol ou injectés comme vecteur de transport et d'extraction de la pollution [42, 39, 40, 41, 37].

Le pompage écrémage (skimming) : consiste à creuser des puits et/ou des tranchées pour pomper des produits organiques surnageant en surface de la nappe. Cette technique permet de récupérer une partie seulement des polluants : environ 50 %.

Le pompage suivi d'un traitement (pump and treat) : là encore il s'agit d'une méthode de dépollution spécifique des nappes. L'eau est pompée et traitée en surface selon le type de pollution, par les procédés classiques.

L'extraction sous vide (venting) : cette méthode ne s'applique qu'aux pollutions de produits volatils ou semi-volatils dont la constante de Henry est supérieure à 0,01 et dont la pression de vapeur excède 0,5 mm de mercure. Utilisable dans tous les sols non saturés, elle est particulièrement efficace dans les sols sableux perméables mais perd de son efficacité avec des sols argileux qui ont un fort pouvoir de rétention des solvants. Le principe repose sur la mise en dépression du sol contaminé par l'intermédiaire d'une pompe à vide, il y a alors aspiration de vapeurs polluées qui peuvent être traitées par oxydation catalytique, par condensation réfrigérée ou par adsorption sur charbon actif.

L'injection d'air (air sparging ou stripping) : Il s'agit d'une technique adaptée aux sols non saturés contaminés par des solvants chlorés ou par des produits organiques volatils.

Le « stripping » désigne le mécanisme de transfert d'un polluant d'une phase liquide ou solide vers une phase gazeuse [43].

Le principe consiste à injecter de l'air ou de la vapeur sous pression dans le sol grâce à des puits d'injection afin de vaporiser des composés volatils. Des puits d'extraction permettent de récupérer les vapeurs toxiques qui sont traitées par un filtre à charbon actif ou par un autre procédé.

Le traitement par flottation : Le sol doit être excavé, on le tamise, on lui rajoute de l'eau et des agents de surface tensioactifs. On injecte ensuite dans ce mélange des bulles d'air qui emprisonnent les polluants et remontent à la surface pour former une écume flottante qui est alors récupérée.

I.3.3.2 | les techniques chimiques :

Ils ont pour but de détruire le polluant sous de les transformer en une forme moins nocive pour l'environnement ; et ceci par l'intermédiaire de réaction chimiques se produisant entre le polluant et le réactif ajouté. Ils peuvent être applicables in situ ou après excavation des sols. La majorité des procédés exigent que les sols soient forme de boues ou que les contaminants soient mobilisés dans le milieu liquide [44].

- **Réactions chimiques :**

Elles permettent de transformer les polluants en des composés moins toxiques et de mobilité différente. Ce type de traitement est habituellement appliqué sur site. L'oxydation est la seule méthode applicable aux HAP car la réduction ne se fait que sur des produits halogénés [44].

En pratique ; peu d'oxydants peuvent être utilisés car ils sont très sensibles au PH, et la forme sous laquelle ils sont disponibles n'est pas nécessairement compatible avec un traitement à grande échelle. Les plus utilisés pour traiter les HAP sont l'ozone (O₃) et le peroxyde d'hydrogène(H₂O₂) .Dans tous les cas les oxydants n'ont pas une action spécifique. Et une partie sera consommée par des réactions avec la MO des sols, altérant ainsi ces derniers. Ces réactions induisent un coût supplémentaire [44].

L'ozone sert à traiter les effluents liquides mais peut être utilisée in situ .En effet [45], ont obtenu des rendements de plus de 95% d'élimination du phénanthrène pour une durée d'ozonation de 2,3 heures et un flux d'ozone de 250 mg-1. Des rendements plus faibles ont été obtenus avec l'anthracène (50%).Ces auteurs indiquent que cette technique était applicable car la demande en ozone (taux de dégradation) du sable étudié était faible.

L'eau oxygénée est utilisée pour dégrader directement les composés organiques complexes et réfractaires à la biodégradation. Son action peut être catalysée par l'action des rayons ultraviolets ou du fer ferreux (Réactif de Fenton), qui va activer la décomposition du peroxyde d'hydrogène en radicaux OH. Ces derniers réagissent avec les composés organiques et provoquent leur décomposition en produits inoffensifs comme H₂O et CO₂ [44].

L'utilisation commerciale de l'eau oxygénée permet de traiter les zones saturées [46], mais présente de nombreux inconvénients. En effet, ce processus, bien qu'efficace, n'est pas spécifique.

- **Lavage de terres :**

Le lavage est un procédé couramment employé. Les contaminants adsorbés sur les particules fines, préalablement séparés des particules grossières, sont transférés vers la phase aqueuse (ou la solution extractante).

Cette solution polluée est par la suite traitée. Afin d'augmenter les transferts des polluants des particules fines vers les eaux, il est couramment fait usage d'ajouts des agents chélatants, d'ajustement de pH, d'ajouts de surfactants (on parle alors d'extraction chimique) [35].

La technique du lavage de terres polluées consiste à mobiliser les polluants :

- par solubilisation à l'eau, aux solvants ou avec des acides bases.
- par la formation d'une émulsion avec des tensio-actifs (ou surfactants).
- par transformation chimique avec des oxydants ou des réducteurs (oxydation / réduction chimique).

Cette technique peut être utilisée pour des pollutions minérales ou organiques grâce à un large éventail d'agents qui sont sélectionnés selon la nature du sol et de la pollution. Le lavage de terres peut être mis en œuvre in situ, sur site ou hors site [64].

Deux principes de fonctionnement peuvent être appliqués à cette technique ; on excave le sol souillé qui sera lavé sur le site, ou on opère in situ, en entraînant la phase polluante par injection de liquide et en repompant l'ensemble liquide/polluant. Pour améliorer la récupération, deux systèmes sont possibles, soit en ajoute des détergents ou des surfactants à l'eau de lavage, soit on utilise de l'eau chaude, ou même de la vapeur [47].

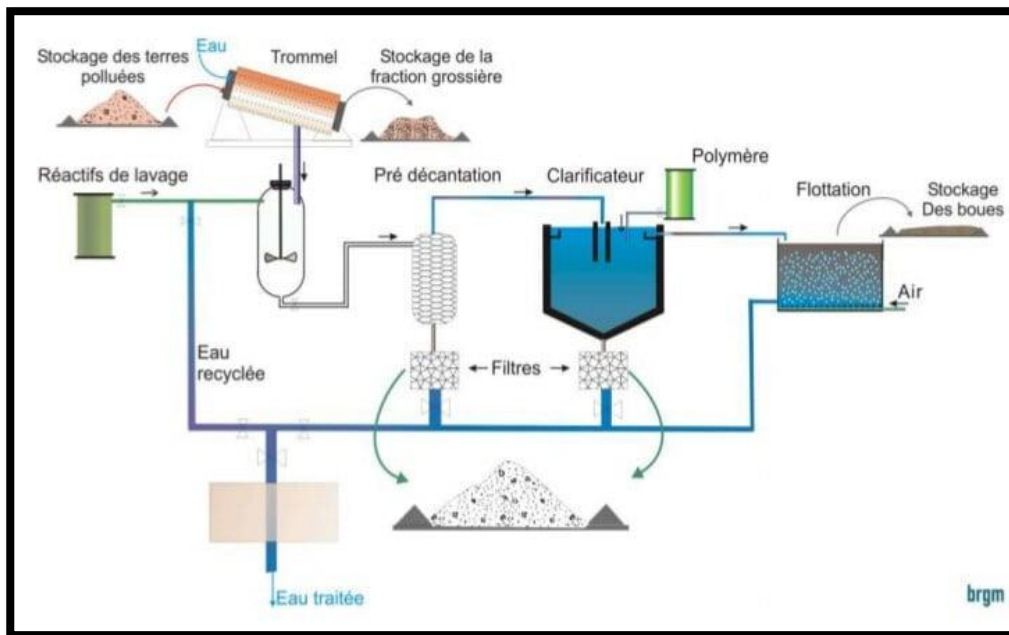


Figure I.5. Schéma de principe de la réduction on site (Colombano S et al, 2010).

I.3.3.3. | Les techniques thermiques :

Ces procédés consistent à oxyder les polluants organiques, facilement convertibles en CO₂ et H₂O, par chauffage.

La désorption thermique s'effectue généralement hors-site dans un four rotatif. Le sol excavé est porté à une température suffisamment élevée, 600 à 800 °C par chauffage indirect, pour désorber l'eau et les contaminants. Les produits désorbés sont alors brûlés dans une flamme. Il faut surveiller la dangerosité des gaz émis tels que le chlore, les oxydes de soufre et d'azote qui nécessitent un traitement spécifique.

L'incinération se fait toujours hors-site, elle s'adapte à tous les polluants organiques avec un excellent rendement. Elle est de ce fait très utilisée. Il existe plusieurs systèmes tels les fours à lits fluidisés, à circulation ou rotatif, les techniques infrarouge ou micro-ondes. La température de traitement de 1000 à 1100 °C est obtenue par chauffage direct du sol traité. Les gaz et les poussières produits doivent être traités impérativement.

La vitrification, utilisée in-situ dans des cas difficiles à traiter par d'autres méthodes, consiste à placer des électrodes en carbone dans le sol et à y appliquer une très forte différence de potentiel. La résistance du sol génère suffisamment de chaleur par effet joule pour, atteindre des températures de 1500 à 1600 °C. A ces températures le sol et son contenu sont fondus puis vitrifiés.

Le coût correspondant à ces trois méthodes est croissant, il est lié aux équipements nécessaires, aux travaux d'excavation pour les traitements hors-site et à la mise en œuvre d'énergies importantes. Le traitement des gaz est également un facteur de sur coût non négligeable. D'autant que, comme dans tout processus d'incinération le risque de production de dioxines est grand. Pour l'incinération, le prix se situe entre 110 à 340 \$ par tonneaux Etats-Unis et entre 275 et 450 euros en France (39, 40, 41, 37).

Nous en reparlerons plus en détail du traitement thermique dans le deuxième chapitre.

I.3.3.4. | les techniques biologique :

- **Bioremédiation :**

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action des organismes (bactéries, champignons, levures, plantes). Ils peuvent être utilisés seuls ou en complément d'une autre technique. La décontamination par voie biologique consiste donc à stimuler un phénomène naturel pour en augmenter le rendement afin de détruire le polluant organique qui sera utilisé comme source de carbone [48].

La bioremédiation des sols semble être une méthode d'intérêt d'un point de vue économique et écologique. Contrairement aux autres procédés (incinération, lessivage du sol...) où les polluants sont souvent transférés et non détruits, la biodégradation peut permettre la minéralisation du xénobiotique, et donc sa disparition. De plus, ces techniques sont particulièrement adaptées pour le traitement des hydrocarbures [49].

- **Phytoremédiation :**

Certaines plantes permettent de transformer (phytoremédiation) ou de stabiliser (phytostabilisation) les polluants dans les sols. En effet les racines de celles-ci sont étroitement associées à une microflore bactérienne et fongique qui va aider ou faciliter la dégradation des COH [50]. Longtemps, la phytoremédiation était restée essentiellement appliquée aux métaux lourds, mais de récentes études ont montré que cette technique est utilisable pour les HAP [51]. Cependant, les mécanismes mis en jeu sont encore mal connus [52].

La phytoremédiation peut être réalisée à l'aide de diverses espèces végétales comme l'avoine, le lupin, le colza [50, 52]. Dans la plupart des cas, la phytoremédiation a été étudiée sur des sols riches en argile. (BALLERINI, 1999) indique que le système fibreux racinaire de l'herbe facilite à la fois l'accessibilité des contaminants et le métabolisme microbien [51].

(BINET et al, 2000) ont observé une augmentation de la dissipation ou de la biotransformation de plusieurs HAP, incluant ceux de cinq et six noyaux aromatiques. Cependant, ces auteurs indiquent que les meilleurs taux d'élimination sont obtenus pour les HAP de trois cycles, comme le phénanthrène ou l'anthracène [52]. Par ailleurs, (LISTE et ALEXANDER, 2000) ont obtenu en 8 semaines ,74% 'élimination du pyrène sur un sol avec des plantes. Alors que les rendements chutent à moins de 40% pour un sol sans plantes [50].

Chapitre II

Traitement thermique

II.1 | Traitement thermique :

D'une utilisation courante à ce jour, les méthodes thermiques représentent une option majeure dans les filières de décontamination ; ainsi à l'USA, pour près d'un tiers des sites, l'incinération constitue la méthode choisie pour traiter les matériaux pollués. Ces techniques peuvent être appliquées sur site ou hors site ; c'est le cas le plus fréquent. Actuellement, des méthodes in situ sont développées à titre expérimental. On décrira successivement :

- L'incinération,
- La pyrolyse,
- La vitrification,
- La désorption thermique [47].

II.2 | Principe de traitement thermique :

Traitements thermiques qui peuvent être réalisés sur le site même «on-site» ou sur des sites appropriés «hors-site» comme une usine d'incinération. Cette technique est adaptée aux sols contaminés par des composés organiques facilement oxydables et convertibles en CO₂ et H₂O. Il est nécessaire de procéder à une excavation des sols, un broyage et un tamisage avant le traitement thermique.

Il existe deux méthodes de chauffage :

- Le chauffage direct où le sol est chauffé à 1000°C directement en introduisant de l'oxygène.
- Le chauffage indirect où le sol est dans un four étanche et n'est pas en contact avec la source de chaleur. La température avoisine les 800 °C et est suffisante pour extraire les polluants par l'intermédiaire des vapeurs se dégageant [53].

Ces deux méthodes sont très efficaces mais très coûteuses en énergie. Il existe à l'heure actuelle plusieurs types de fours [54, 55] .

II.3 | Les techniques des traitements thermiques :

II.3.1 | L'incinération :

II.3.1.1 | Définition :

La technique d'incinération est considérée comme l'une des techniques de traitement thermique les plus anciennes. Le traitement thermique atteint dans des fours de 870 à 1200 °C, moment auquel le polluant est éliminé et détruit. Cette technique s'est développée au fil des années et les polluants organiques sont principalement ciblés dans ce processus.

II.3.1.2 | Principe :

La combustion aérobie permet de détruire les polluants organiques en vapeur d'eau, gaz carbonique et résidus de combustion (cendres). Les métaux ne sont pas détruits et se retrouvent soit dans les effluents gazeux soit dans la fraction solide (cendres). Les métaux présents dans la fraction gazeuse peuvent faire l'objet d'une oxydation et d'une récupération spécifique.

Généralement, l'incinération se décompose en deux phases :

- une première chambre dans laquelle les polluants organiques sont désorbés et volatilisés (température > 400 °C),
- une seconde chambre de combustion dans laquelle les polluants organiques sont détruits (température > 1 000 °C).

Préalablement à l'incinération, les sols sont prétraités (tamisage, séchage ...) ; seules les particules de quelques centimètres sont acceptées dans le four.

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Le chlore, l'azote et le soufre (présents sous forme de HCl, NO_x, et SO_x) sont éliminés des rejets atmosphériques le plus souvent par neutralisation en solution alcaline [36].

II.3.2 | La pyrolyse :

II.3.2.1 | Définition :

La pyrolyse est l'application de chaleur en l'absence d'oxygène pour extraire du sol par volatilisation les polluants volatils et semi-volatils [65].

II.3.2.2 | Principe :

La technique consiste, une fois les terres contaminées excavées, à les introduire dans une unité de pyrolyse où elles seront chauffées en l'absence d'oxygène jusqu'à des températures comprises généralement entre 150 et 540 °C.

L'absence d'oxygène lors de l'élévation de température permet d'éviter la formation de sous-produits toxiques (par exemple, les dioxines) [65].

II.3.3 | La vitrification :

II.3.3.1 | Définition :

La vitrification consiste à transformer par élévation de température. Un sol contaminé en un matériau fondu inerte. C'est donc une méthode thermique in situ se rapprochant de la stabilisation. Cette méthode est utilisée sur des sites difficiles à traiter par d'autres méthodes [49, 50].

II.3.3.2 | Principe :

Ce procédé consiste à transformer par élévation de la température un sol contaminé en place en un matériau fondu inerte. Le sol est chauffé par des électrodes à une température de l'ordre de 2000°C et il est transformé par pyrolyse en un verre silicaté où tous les composés présents sont fondus ou vaporisés.

Pour collecter les gaz, un couvercle et une aspiration d'air sont placés au-dessus de la zone à vitrifier et traités séparément [33, 56].

II.3.4 | Désorption thermique :

II.3.4.1 | Définition :

La désorption thermique, qui fait présentement concurrence à l'incinération, est de plus en plus utilisée. Bien développée aux États-Unis, cette technique consiste en la dégradation des molécules des contaminants par l'effet de l'augmentation de la température. La technique de désorption thermique est appliquée par l'injection de chaleur dans les sols (in-situ) ou dans un four (ex-situ) afin d'en extraire les contaminants volatils et semi-volatils (principe de volatilisation) [57].

II.3.4.2 | Principe :

Ce principe de cette technique consiste à appliquer de façon ex-situ, une fois les sols contaminés excavés, et in-situ, directement dans la zone de sols contaminés [57].

Elle consiste, une fois les terres contaminées excavées, à les introduire dans une unité de désorption (communément appelée « four ») où elles seront chauffées jusqu'à des températures comprises généralement entre 150 et 540 C. Cette augmentation de température a deux buts :

- favoriser la désorption des contaminants fortement adsorbés sur les particules du sol,
- augmenter la tension de vapeur des composés peu volatils afin de pouvoir les volatiliser et les extraire en phase gazeuse [66].

Les composés gazeux et particulaires sont entraînés par un flux d'air et sont récupérés en vue d'un traitement. Les particules sont au préalable récupérées dans des filtres, des dépoussiéreurs humides ou des dépoussiéreurs électrostatiques ; par la suite, les composés organiques sont éliminés par destruction (brûlage, oxydation catalytique) ou fixation (charbon actif, condenseur).

Les rendements épuratoires sont élevés (plus de 95 à 98 % pour les hydrocarbures pétroliers) et les concentrations finales en polluants sont faibles (inférieures à 5 mg/kg). Ce

rendement dépend des conditions d'exploitation, des concentrations en polluants et des propriétés des sols (hétérogénéité du milieu, présence de matière organique et présence de polluants très peu volatils) [36].

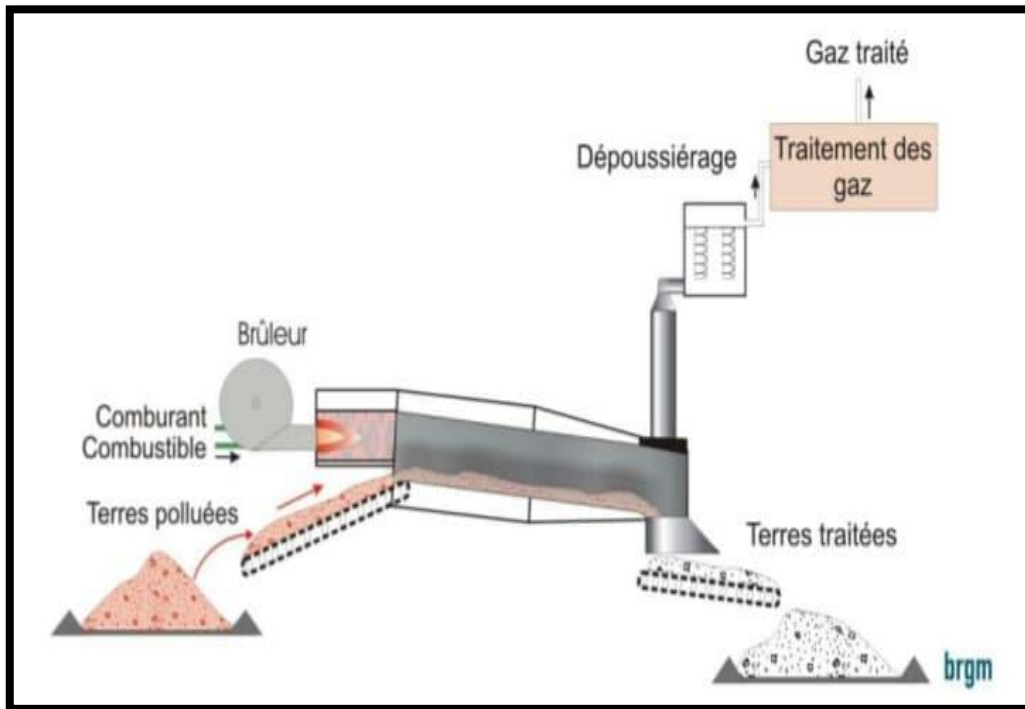


Figure II.1. Schéma de principe de la désorption thermique ex situ ou on site (Colombano et autres, 2010)

II.3.4.3 | Application :

La désorption thermique est utilisée pour de nombreux polluants organiques (volatils, semi-volatils voire peu volatils) : hydrocarbures pétroliers (essences, gasoils, kérosènes), fractions plus lourdes d'hydrocarbures, solvants chlorés, huiles, PCB, pesticides, dioxines/furanes, HAP.

Le temps de séjour, la turbulence et la température sont adaptés en fonction des concentrations initiales en polluants (et du Pouvoir Calorifique Inférieur) et des propriétés des sols (teneurs en matières organiques, teneur en eau) [36].

II.3.4.4 | Les avantages et les inconvénients :

Tableau II.1. Avantages et inconvénients de la désorption thermique (Colombano et autres, 2010 ; Khan et autres, 2004 ; FRTR, 2007 ; Environnement Canada, 2002).

Avantages	Inconvénients
Réutilisation possible des sols à la suite du traitement.	Ne détruit pas les contaminants, ne fait que les extraire de la matrice sol. D'autres procédés doivent être utilisés pour traiter les gaz.
Peut traiter tous les contaminants organiques du site à l'étude (PCP, dioxines et furanes, HAP).	Les rejets atmosphériques doivent être gérés.
Taux d'efficacité très élevé	Les composés récalcitrants sont peu volatils et donc nécessite des températures plus élevées ce qui engendre des coûts plus élevés.
Solution de décontamination rapide.	Les sols doivent respecter un diamètre maximum sans quoi ils doivent être réduits en plus fines particules. La manipulation des sols avant le traitement génère des coûts plus élevés.
Peut traiter des contaminants en concentration élevée.	La désorption thermique des sols humides doit être précédée d'une étape de chauffage pour réduire le taux d'humidité sans quoi l'efficacité du traitement diminue.
Peut traiter tous les types de sols	

Chapitre III

Matériels et Méthode

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

III.1. Matériels et techniques expérimentales :

III.1.1. 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
sulfate de cuivre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	249.69	BIOCHEM
Acide sulfurique	H_2SO_4	98.79	SIGMA-ALDAICH
Acide chlore hydrique	Hcl	36.46	ORGANICS

III.1.2. Préparation et lavage de l'échantillon :

III.1.2.1. Préparation de l'échantillon :

Notre travail consiste à prendre une quantité d'une terre quelconque et la polluée par des métaux, 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 (1 Kg) est tamisés à 0.1 mm puis 0.08 mm pour éliminer les éléments grossiers et les débris organiques. Ensuite ils sont lavés à l'eau distillée puis placés à l'étuve pour le séchage.

III.1.2.2. Préparation du sol polluée :

Dans une fiole jaugée de 250 ml, on dissout 0.2 g de sulfate de cuivre à l'eau distillée sous agitation magnétique. La solution de sulfate de cuivre est bien mélangée avec 1 Kg du sol, puis laissée sécher à l'étuve. L'échantillon est utilisé par la suite dans les expériences de dépollution du sol.

III.2. Mesure des paramètres :

III.2.1. Le pH :

C'est la mesure de l'acidité d'une suspension de terre dans de l'eau, avec un rapport terre /eau normalisée (1 /5). Il indique aussi la concentration en ions H^+ présents dans l'eau [58].

On introduit 20 g du sol pollué dans un bécher de 200 ml, puis nous complétons avec de l'eau distillée jusqu'à 5 volume. Après agitation, La solution est ensuite laissée reposer pendant 15 minutes, puis nous avons réalisés la mesure du pH de la solution à l'aide d'un pH mètre (**Figure III.1**).



Figure III.1. pH-mètre (HANNA instrument 211).

III.2.2. La conductivité :

La conductivité électrique est la mesure du degré de salinité du sol étudié. Avec un rapport terre /eau normalisée (1/5). La lecture se fait à l'aide d'un conductimètre [59], Le mode opératoire utilisé pour la mesure du pH est valable pour la mesure de la conductivité électrique (**Figure III.2**).



Figure III.2. Conductimètre électronique.

Les mesures de pH et de conductivité ont été appliquées 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 :

Le domaine spectral UV-visible est divisé en deux plages de longueur d'onde

- Proche UV (200-400 nm).
- Visible (400-800 nm).

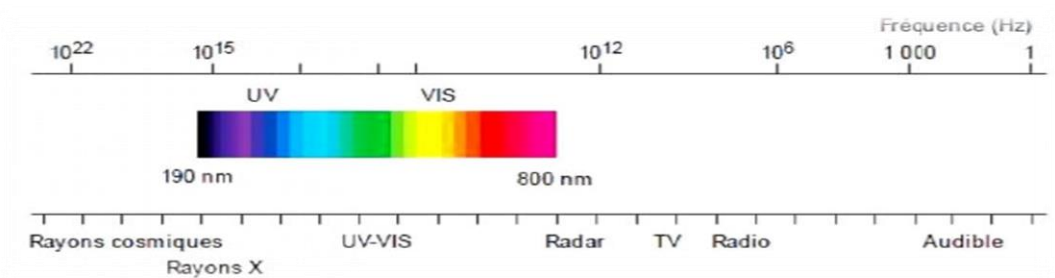


Figure III.3. Domaine spectral du rayonnement électromagnétique.

- **Principe :**

La spectrophotométrie d'absorption moléculaire dans le domaine ultraviolet (UV), de 200 à 400 nm environ et visible (VIS) de 400 à 800 nm environ est une technique courante de contrôle et d'analyse de composés chimique. Elle s'applique à des groupements d'atomes (Ex : molécules, ions, polymères) qui absorbent le rayonnement électromagnétique dans le domaine UV-VIS appelées chromophore [60].

L'absorption de la lumière UV-VIS par les molécules se produit, comme pour les atomes, du fait de transition électroniques entre différents niveaux d'énergie. Un électron à l'état fondamental absorbe des radiations d'une énergie E suffisante pour l'élever à un niveau d'énergie supérieur, l'état excité. Le retour au plus bas niveau d'énergie, l'état fondamental, se produit par perte d'énergie sous forme de rayonnement [60].



Figure III.4. L'appareil d'UV-Visible (SHIMADZU UV – 2401 PC).

- **Loi de Beer-Lambert :**

La loi de Beer-Lambert (III-1) indique que l'absorbance d'une solution est proportionnelle à sa concentration et à l'épaisseur l de l'échantillon. 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 [61].

$$A_{\lambda} = -\log \frac{I}{I_0} = \epsilon_{\lambda} \ell c$$

I/I_0 : est la transmittance de la solution (sans unité).

A_{λ} : est l'absorbance ou densité optique à une longueur d'onde λ .

ϵ_{λ} : est le coefficient d'extinction molaire (en $l \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$). Il dépend de la longueur d'onde, de la nature chimique de l'entité et de la température.

ℓ : est la longueur du trajet optique dans la solution traversée, elle correspond à l'épaisseur de la cuvette utilisée (en cm).

C : est la concentration molaire de la solution (en $mol \cdot l^{-1}$). Dans le cas d'un gaz, C peut être exprimée comme un volume inverse (unités de longueur réciproque au cube, cm^{-3}) [61].

III.4. Procédure de lavage :

L'idée dans cette technique de lavage est de faire circuler l'eau à travers le sol par voies descendante et ascendante, à température et pH différents dans un réacteur adéquat.

D'un côté nous introduisons environ 600 g du sol pollué dans le réacteur, de l'autre on remplit à l'eau distillée une ampoule à décanter de 500 ml positionnée au-dessus du réacteur pour favoriser la circulation de l'eau distillé qui tombe goutte à goutte. 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 spectrophotométrie (Voir figure ci-dessous). 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.5. Protocol d'extraction des polluants.



Figure III.6. Les échantillons d'extraction.

Chapitre IV

Résultats et Discussion

IV. Introduction :

Le quatrième chapitre est consacré à l'exploitation des résultats analytiques des différentes étapes de l'expérimentation conduites en laboratoire, à savoir l'élimination de la contamination du sol.

IV.1. Conception du réacteur :

Pour effectuer la dépollution du sol, nous nous sommes orientés vers un système qui prend en compte les éléments suivants :

- Pour éviter le colmatage du sol ainsi que les passages préférentiels du fluide dans le réacteur, son mouvement est ascendant.
- En absence d'une pompe péristaltique qui assure le flux ascendant, nous avons utilisé une ampoule à décanter, positionnée au-dessus du réacteur, dont les gouttes du fluide tombe dans tube soudé (les extrémités ouvertes) au milieu du réacteur. Le remplissage de ce tube par le fluide assure le flux ascendant.
- Lorsque le sol est saturé par le fluide, ce dernier s'accumule au-dessus puis arrive sur un deuxième tube, penché vers un bûcher, dans la lequel le fluide est collecté pour les mesures spectroscopiques.

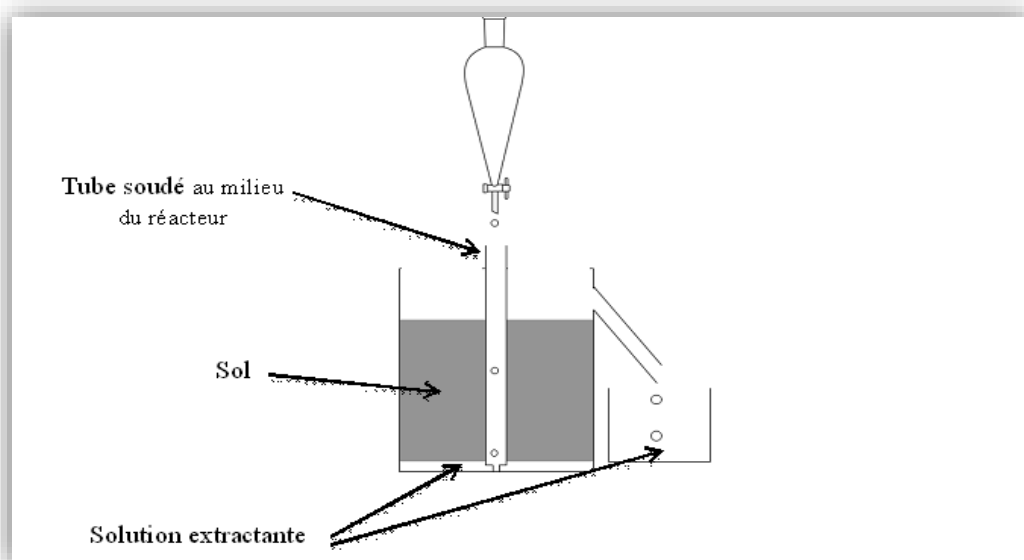


Figure IV.1. Schéma explicatif du réacteur.

IV.2. Courbe d'étalonnage des ions de cuivre II :

Afin de suivre la concentration des ions de cuivre pendant le lavage du sol, nous avons réalisé la courbe d'étalonnage des ions de cuivre à 725 nm [62].

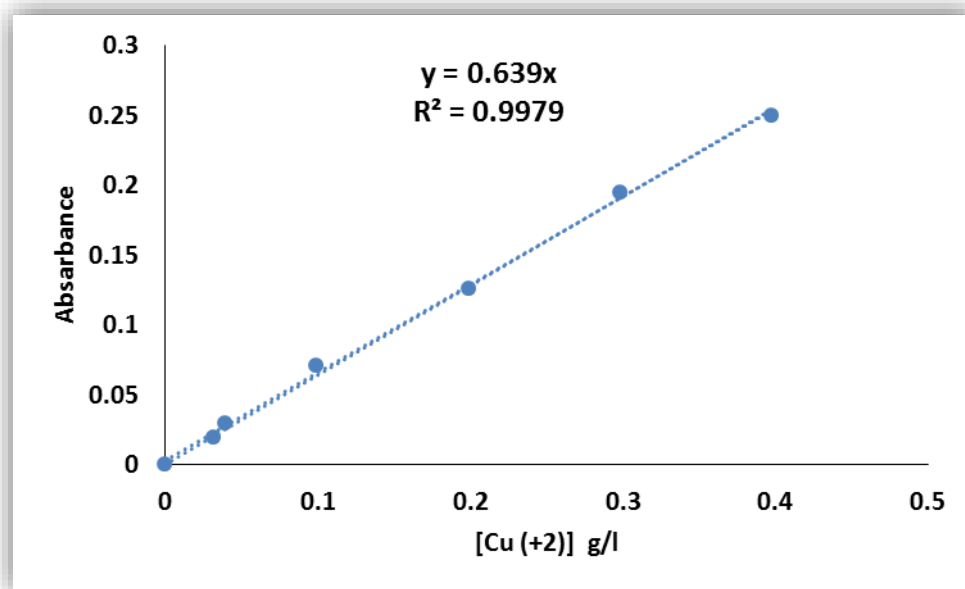


Figure IV.2. Courbe d'étalonnage des ions de cuivre II.

En partant de l'équation de Bèer-Lambert ($A=\epsilon LC$) et en traçant la courbe de l'absorbance en fonction de la concentration de Cu, on peut déterminer le coefficient d'extinction molaire des ions de cuivre. Comme indiqué dans la (figure IV.2) la courbe d'étalonnage affiche un coefficient de régression linéaire proche de 1 et donne un coefficient d'extinction molaire égale à.

IV.2.1. Effet du pH :

Le pH du sol est une mesure de l'acidité ou de la basicité (alcalinité) d'un sol, Le pH du sol est considéré comme une variable maîtresse dans les sols car il affecte de nombreux processus chimiques. Il affecte spécifiquement la disponibilité des nutriments des plantes en contrôlant les formes chimiques des différents nutriments et en influençant les réactions chimiques qu'ils subissent.

Les mesures du pH qu'on a effectué avant et après la dépollution du sol ont donné des valeurs très proches, en moyenne 8.4. Cela peut être expliqué par différentes raisons :

- Le sol est tamisé, nettoyé de tous débris et lavé à l'eau distillée pour minimiser les facteurs qui influencent le pH.
- La dépollution du sol implique l'extraction des ions du cuivre mais pas les ions hydronium (H_3O^+) qui sont à l'origine absent.

D'autre part nous avons effectué la dépollution du sol à deux valeurs de pH (2 et 8) et à 40 °C. La quantité totale de cuivre extrait à pH 2 est 15.5 % tandis que celle de pH 8 est égale à 11.5 %. On peut conclure que la dépollution du sol à pH acide est plus efficace qu'à pH neutre ou alcalin.

IV.2.2. Valeur de la conductivité :

La conductivité d'un sol ou un sédiment est une mesure de la quantité d'ions présents et qui pourraient se dissoudre en présence d'eau. Les mesures de conductivité avant et après la dépollution ont montré une diminution en conductivité, ce qui est normale car la dépollution implique l'expulsion des ions de cuivre qui participent à l'augmentation de la conductivité

IV.2.3. Effet de la température :

Afin d'évaluer l'efficacité de la désorption thermique du cuivre, sa quantité totale a été mesurée le long du circuit du lavage.

Dans ces expériences nous avons réalisé le lavage du sol à différentes température, dont le sol est chauffé à 40, 60 et 80°C. Comme indiqué dans la (**figure IV.3**), on voit bien que la température jeu un rôle très important dans la dépollution du sol : plus la température augmente le taux de cuivre dans la solution augmente. Il est important de savoir que le taux total du cuivre extrait est due à un volume de lavage total égale à 100 ml. On voit bien que la quantité totale extrait à 40, 60 et 80°C est égale à 11.5, 26 et 66 % respectivement.

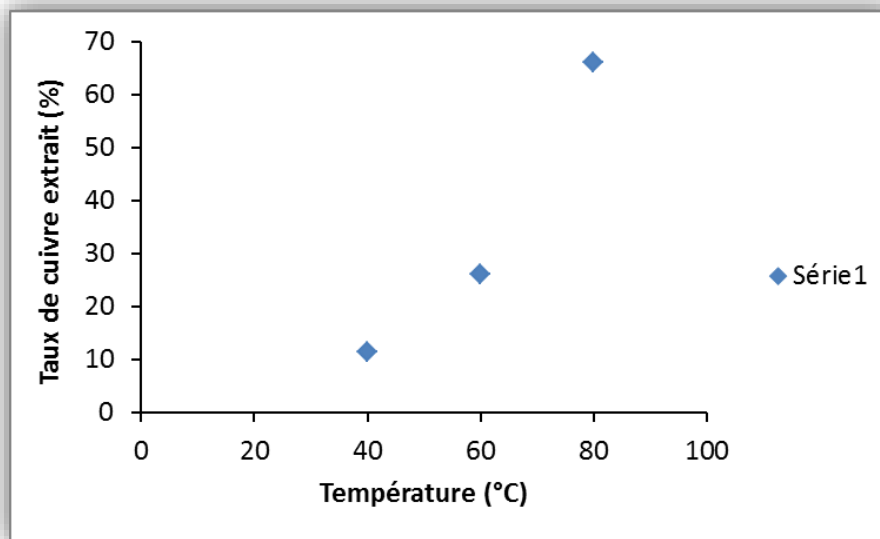


Figure IV.3. Courbe présentée l'effet de la température.

Conclusion

Générale

Conclusion Générale

Les travaux mis en œuvre à travers cette mémoire visent à améliorer l'efficacité de la dépollution du sol.

Dans cette étude nous avons étudié la dépollution du sol par voie thermique, en utilisant un système de dépollution spécial. Nous avons réalisé plusieurs tests d'extraction afin de trouver le système adéquate. Ensuite l'effet de chauffage, ($T= 40, 60$ et 80 °C) ainsi que le pH (2 et 8) sur l'extraction du polluant ont été étudiés. Nous avons constaté que l'augmentation du chauffage du sol améliore l'extraction du polluant tandis que l'augmentation du pH défavorise l'extraction. Vu les sur constances actuelles, nous n'avons pas pu réaliser assez d'expériences pour la confirmation et de voir l'effet d'autres paramètres sur de plusieurs types de polluants (métaux, HAP).

Références Bibliographique :

- [1]. Calvet, R. (2013) : Le sol 2^{ème} édition. 678p.
- [2]. SOLTNER, D. (1987) : Les bases de la production végétale. TOME 1 : Le sol, 15^{ème} Edition. 465p.
- [3]. Calvet, R. (2003) : Le sol propriétés et fonctions, Tome 1 : Constitution et structure, phénomènes aux interfaces, France agricole DUNOD. 455p.
- [4]. MOREL, R. (1996) : Les sols cultivés. 2^{eme} Edition : Lavoisier Tec et Doc .PARIS. 389p.
- [5]. MERMOUD, A. (2006) : Cours de physique du sol généralité école polytechnique fédérale de Lausanne. 12p.
- [6]. FREVERT, R.K., SCHWAB, G.O., EDMINSTER, T.W. and BARNES, K.K. (1995) : Soil and Water Conservation Engineering. John Wiley & Sons, New York.
- [7]. DUTHEIL, C. (2003) : Dépollution des sols par extraction sous pression réduite : étude de quelques paramètres. These de doctorate. Lyon, INSA de Lyon. 242p.
- [8]. FISHER, U., SCHULIN, R., KELLER, M., STAUFFER, F. (1996): Experimental and numerical investigation of soil vapor extraction, Water Resources Research, 32 (12), p. 3413-3427.
- [9]. PANUS, M. And GAUTHEYROU, J. (2001) : L'analyse Du Sol Minéralogique, Organique Et Minérale. Edition Springer.
- [10]. HILLEL, D. (1974) : L'eau et le sol, principes et processus physiques. Ed. VANDER. 256p.
- [11]. SOLTNER, D. (1986) : Les bases de la production végétale : le sol – le climat – la plante. Tome n° I, le sol. 14^{ème} édition. Collection scientifique et techniques agricole. Edition : VANDER. BRUXELLE. PARIS. 464p.
- [12]. MICHEL-CLAUDE. G., CHRISTIAN. S., BERNARD. J. (2011) : Etude des sols, 180-404p.
- [13]. HALITIM, A. (1988) : Les sols des régions arides d'Algérie. Ed. O. P. U, Alger. 384p.

- [14]. HELLER, R. ESNAULT R et TANCE C. (1993) : Physiologie végétale. 5e Ed. MASSON M, Paris. 294p.
- [15]. DELAUNOIS, A., FERRIE ,Y., BOUCHE M., COLIN, C et RIONDE, C. (2009) : Guide pour la description et l'évaluation de la fertilité des sols, Chambre d'agriculture. INRA. 37p.
- [16]. CHAUDE J et LECLE. RC. (1999) : Ecophysiologie végétale. 283p.
- [17]. REBBERGE, W. (1964) : Etude géo pédologique-partie générale-géologie, méthodologie. SIGALES. 123p.
- [18]. PREVOST, G. (2006) : La Pierre sculptée. 640p.
- [19]. BELBACHIR, I., LAKEHAL, S. (2017) : Caractérisation de quelques types de sols entourant la zone industrielle de l'Oued El Berdi (wilaya de Bouira), Université AKIL MOHAND OUIHADJ-BOUIRA. 4p.
- [20]. MATHIEU, C. & PIELTAIN, F. (2003) : Analyse chimique des sols : Méthodes choisies. Paris : Ed. Tec et Doc Lavoisier.
- [21]. BAISE, D. (2000) : Guide Des Analyses En Pédologie 2ème (Ed). I.N.R.F. Paris. 172p.
- [22]. CALVET, R. (2003) : Le sol, propriété et fonction, phénomène physique et chimique Tom 2.Ed. France. Agricole, 511p.
- [23]. KOLLER, E. (2004) : Traitement des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues.
- [24]. KHELLOUT, S. (2004-2010) : Impact de la pollution par le pétrole sur la stabilité structurelle d'un sol. 13p.
- [25]. JEANNOT, R., LEMIERE, B., CHIRON, S., AUGUSTIN, F., et DARMENDRAIL, D. (2000) : Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. France. 134p. Disponible en ISO : <http://www.iso.ch>.
- [26]. SAHNOUNE, R. (2014) : Analyse et Caractérisation physico-chimique des Sols d'Entreposage de la station de Pétrole (Bejaia). 10-57p.
- [27]. ALMASOUD, FI. USMAN, AR. Al-FARRAJ, AS. (2014) : Heavy metals in the soils of the Arabian Gulf coast affected by industrial activities: analysis and

assessment using enrichment factor and multivariate analysis. Arab J Geosci 1–13. Doi: 10.1007/s12517-014-1298-x.

[28]. MCBRIDE, MB., SHAYLER, HA., SPLIETHOFF, HM., et al. (2014) : Concentrations of lead, cadmium and barium in urban garden-grown vegetables: The impact of soil variables. Environ Pollut 194:254–261. Doi : 10.1016/j.envpol.2014.07.036

[29]. BAIZE, D. (1997) : Teneurs en éléments traces métalliques dans les sols (France). Paris: INRA. 401p.

[30]. BURAK, D.L., FONTES, M.P.F., SANTO, N.T., SOARES, MONTEIRO, L.V. (2010) : Geochemistry and spatial distribution of heavy metals in Oxisols in a mineralized region of the Brazilian Central Plateau. Geoderma. 160: 131-142p.

[31]. FDIL, F. (2004) : Etude de la biodégradation des herbicides chlorophenoxyalcanoïques par des procédés photochimiques et électrochimiques, applications environnementales. Thèse de Doctorat. Université de Marne-La-Vallée (France).

[32]. MAMY, L., BRRUES, E., & GABRIELLE., B. (2008) : Evaluer les risques environnementaux des pesticides. 126-143p.

[33] . COSTES, J. M., DRUELLE, B. (1997) : Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement : la réhabilitation des anciens sites industriels. Revue de l'Institut Français du Pétrole. Vol.52. N°4. 944-947pp.

[34]. RODRIGUEZ EUGENIO, N., MCLAUGHLIN, M., & PENNOCK, D. (2018) : Soil Pollution: a hidden reality 142p.

[35]. 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.

[36]. RISER-Roberts, E. (1998) : Remediation of Petroleum-Contaminated Soils: Biological, Physical, and Chemical Processes. Lewis Publishers, Boca Raton. 542p.

[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]. REDDY.K. R., ADMAS, J. F., and RICHARDSON, C. (1999) : Potential technologies for remediation of Brownfield. Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management. 3, 61-68p.

- [39]. 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.
- [40]. HAMBY, D.M. (1996) : Site remediation techniques supporting environmental restoration activities, a review, The Science of the Total Environment. 203-224pp.
- [41]. STEGMANN, R., BRUNNER, G., CALMANO, W., MATZ G. (Eds.). (2001) : Treatment of contaminated soil, Fundamentals Analysis Applications. Berlin Springer-Verlag. 658p.
- [42]. PALMER, C. D., FISH, W. (1992) : Chemical enhancements to pump and treat remediation, EPA/540/S-92/001, Office of research and Development. Washington D.C: U.S. Environmental Protection Agency.
- [43]. KHODADOUST, A., RAJESH BAGCHI, MAKRAM, T., SUIDAN, RICHARD C., BRENNERAND NEAL., G. SELLERS. (2004) : Effect of NAPL entrapment conditions on air sparging remediation efficiency, Journal of Hazardous Materials. 173-183pp.
- [44]. AKMOUCI-TOUMI, S. (2009) : Contribution à l'étude des boues de forage : Isolment et évaluation de la capacité de quelque souches microbiennes à dégrader le gasoil. Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.
- [45]. MASTEN, S. j., S.H.R.DAVIES, S.H.R. (1997) : Efficacy of in-situ ozonation for the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soils, J. Contam. Hydrol.28 :327-335pp.
- [46]. BALLERINE et VANDECASTEELE. (1999) : La restauration par voie microbiologique des sols contaminés par les polluants organiques. Biotechnologie, coordinateur R. Scriban, 5^{ème} édition, Edition Tech et Doc. 835-865pp.
- [47]. LECOMTE, P. (1998) : Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. 2^{ème} édition Lavoisier.
- [48]. 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.
- [49]. VERDIN, A., LOUNES-HADJ SAHRAOUI, A., DURANO, R. (2004) : Les agents de la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures polycycliques aromatiques .Revue francophone d'écologie industrielle. N° .36. 33-37pp.
- [50]. LISTE, H., et ALEXANDER, M. (2000) : Plant- promoted pyrene dégradation in soil. Chemosphere. 40:7-10p.

- [51]. BALLERINI et KANDECASTEELE. (1999) : Traitements biologique des sols .Technique de l'ingénieur, traité Environnement, G 2 620 : 1- 6p.
- [52]. BINET, P., PORTAL, J.M., et LEYVAL, C. (2000) : Dissipation of 3-6 ring polycyclique aromatic.
- [53] . SAMAKSAMAN, U., PENG, T.H., KUO, J.H., LU, C.H., WEY, M.Y. (2016) : Applied Thermal Engineering. 93, 131-138p.
- [54] . PERCHET.,G. (2008) : Thèse Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [55] . LIM, M.W., LAU, E.V., POH, P.E. (2016) : Marine Pollution Bulletin, (2016) in press.
- [56] . MOUGIN, C., CHPLAIN, V., GAILLARDON., P. (1996) : Le traitement biologique des sols pollués par des composés organiques. Intérêts des champignons filamenteux. Le courrier de l'Environnement n°28, Août 1996.
- [57] . ROUDIER, P. (2005) : Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués-Fiches de synthèse. In Pack : Génie civil. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base documentaire/constructionth3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-dessites-et-sols-pollues-c5582/desorption-thermique-in-situ-c5582niv10011.html> (Page consultée le 20 janvier 2013).
- [58]. MOREL, R. (1989) : Les sols cultivés. Lavoisier 2ème édition. Paris., 51-74.
- [59]. DELAUNOIS, A. (1976) : Travaux pratiques de pédologie générale. 2-86.
- [60]. 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 Ziane Achour de Djelfa, Algérie.
- [61]. SKOOG., et. al., Principles of Instrumental Analysis, 6th ed, Thomson Brooks/Cole, 2007,351.
- [62]. Synthesis, Characterization, and In-Vitro Anti-Microbial and Anti-Oxidant Activities of Co+2, Ni+2, Cu+2 and Zn+2 Complexes of 5-chloro-2-hydroxybenzaldehyde-N-(2-oxo-1,2-dihydro-3H-indol-3-ylidene) hydrazine Pakistan Journal of Chemistry • Pak. J. Chem. 5(3) : 143-149, 2015

Site web :

- [63]:http://www.depolluer.fr/fichier/4_pollution_depollution_des_sols_decontamination_des_sols_informations.php?id_rubrique=2. Consulté le 23/06/2012.
- [64] :<http://www2.ademe.fr/servlet/getBin?name=85AB89EC705B13319475B422D7>

1FAC831296206756007. pdf. Consulté le 18/07/2012.

[65] :<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/desorption-thermique-ex-situ-c5582niv10010.html#figure-sl4326410-web>. Consulté le 11/08/2012.

[66] :<http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-th3/les-travaux-souterrains-et-les-depollutions-42551210/techniques-de-rehabilitation-des-sites-et-sols-pollues-c5582/pyrolyse-c5582niv10023.html>. Consulté le 11/08/2012.

Résumé

Le sol est une ressource non renouvelable et sa perte n'est donc pas compensée, La présence de produits chimiques toxiques dans celui-ci à des concentrations élevées constitue une menace pour la santé des organismes vivants. L'étude présentée dans ce manuscrit vise à purifier les sols contaminés en utilisant des techniques thermiques afin de réduire la quantité de polluants et de réduire l'utilisation de certains produits chimiques qui causent de nombreux problèmes de santé et d'environnement. Dans ce travail, nous avons étudié l'efficacité des méthodes thermiques dans le traitement des sols contaminés, 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 thermique.

Abstract

Soil is a non-renewable resource and its loss is there fore not compensated for, and the presence of toxic chemicals in it at high concentrations poses a threat to the health of living organisms. The study presented in this manuscript aims to purify contaminated soils using thermal techniques in order to reduce the amount of pollutants and reduce the use of certain chemicals that cause many health and environmental problems. In this work, we studied the efficiency of thermal methods in the treatment of contaminated soils, Whose the effect of temperature and pH on the desorption of pollutants in the soil has been studied.

Keywords : Soil, pollution, décontamination technologie, traitement thermel.

ملخص

تعتبر التربة موردا غير متجدد وبالتالي فإن فقدانها لا يعوض، وجود المواد الكيميائية السامة فيها بتركيزات عالية تشكل خطرا يهدد صحة الكائنات الحية.

الدراسة المعروضة في هذه المذكرة تهدف إلى تنقية التربة الملوثة باستعمال التقنيات الحرارية من أجل التقليل من كمية الملوثات والحد من استعمال بعض المواد الكيميائية التي تسبب العديد من المشاكل الصحية والبيئية.

في هذا العمل قمنا بتحديد تأثير فعالية الطرق الحرارية في مجال معالجة التربة الملوثة بما في ذلك تأثير درجة الحرارة ودرجة الحموضة على امتصاص الملوثات في التربة.

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