

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

Faculté Des Sciences Biologiques Et Des Sciences Agronomiques

Département d'écologie.



Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de Master en écologie et environnement

Spécialité : Biodiversité et environnement

Thème

Effet de la phytoremédiation sur quelque propriété physico-chimique et biologique d'un sol polluée par les hydrocarbures

Présenté par : M^{elle} Attab Thanina & M^{elle} Zaidi Lydia

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} Sadoudi - Ali Ahmed D Professeur UMMTO

Promotrice : M^{me} CHIBANE G MAA UMMTO

Co-promoteur: M^r DIB DJ Doctorant UMMTO

Examinatrice: M^{elle} Ali Ahmed S MAA UMMTO

2022/2023

Remerciements

Je remercie tout d'abord le bon Dieu le tout puissant de m'avoir donné le Courage, la force et la patience pour réaliser ce travail.

On voudrait, dans un premier temps, remercier et chaleureusement notre Promotrice, Mme Chibane Gouraya, de nous avoir proposé ce passionnant sujet de mémoire, de nous avoir encadrés tout le long de notre travail, et d'avoir relu et corrigé notre mémoire. Ses conseils ont été très précieux pour la réussite de ce travail. On a beaucoup d'estime pour ses qualités professionnelles et la confiance qu'elle nous a accordée

*On tient à exprimer notre reconnaissance à notre **Co-promoteur Mr DIB Djaffer**, pour nous avoir orientés, pour sa disponibilité, sa patience, ses conseils et d'avoir partagé ses connaissances et son expérience professionnelle.*

*Nous remercions vivement la présidente du jury **M^{me} Sadoudi - Ali Ahmed D** Professeur de UMMTO et Melle Ali Ahmed S maitre d'assistante A à UMMTO qui nous fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail ;*

Nous remercions toutes les personnes qui travaillent au laboratoire de pédologie qui nous ont aidées dans notre travail. Nous remercions aussi l'ingénieur du laboratoire Madame Abrous H, qui a été toujours là pour ;

ainsi

que le responsable de la station de service Ailam Freha d'avoir accepté de

récupéré des échantillons de sol de la station ainsi que toutes les personnes qui travaillent dans cette station.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidés et ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A ma chère mère et mon père qui m'ont soutenu et encouragé durant toutes mes années d'étude que Dieu les protège.

A mon unique frère Lyes et ma sœur Lynda qui ont été présent avec moi dans tous les moments que Dieu les gardes.

A ma grand-mère Dahbia

A ma tante Djamila.

A mes oncles et mes tantes maternelles

A Cousins et cousines

A ma binôme Lydia

A tous mes amies.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents qui m'ont soutenus et encourager durant toutes mes années d'étude et mon bien que dieu vous garde et vous protège.

Ames chères Sœur Kahina .Hassina .Amira .

Ames chères frères : Abderraouf. Abdennour

A ma binôme Thanina

A mes amis

A toutes les personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes Côtés, et qui m'ont accompagnaient durant mon chemin d'études supérieures

Lydia

Liste des abréviations

T : témoin

H : haricot

L : luzerne

BPT : avant

APT-T : témoin prés traitement

APT-L : luzerne

APT-H : haricot dolique

Liste des figures

Figure 1 : Les différentes techniques de phytoremédiation	11
Figure 2 : localisation géographique de la commune freha	14
Figure 3 : localisation géographique de la station-service Ailam freha	15
Figure 4 : Schéma de la méthode d'échantillonnage.....	16
Figure 5 : haricot dolique	18
Figure 6 : graine de la Luzerne	19
Figure7 : pH mètre HI2210	20
Figure 8 : schéma expérimentale de la quantification des hydrocarbures.....	21
Figure 9 : protocole de mesure de la respiration microbienne du sol	22
Figure10 : Les résultats du nombre d'individus et de richesse en espèces	24
Figure11 : résultat de l'analyse de pH du sol	25
Figure 12 : résultat de l'analyse de l'humidité	26
Figure 13 : résultat de la quantité des hydrocarbures	27
Figure14 : résultat de l'activité biologique	28
Figure15 : les résultats du test de germination et de croissance pour le haricot dolique ...	29
Figure16 : Les résultats du test de germination et de croissance pour la luzerne	30

La liste des tableaux

Tableau 1 : Principaux constituants du sol	5
Tableau 2 : groupes homogènes de l'analyse de pH.....	26
Tableau 3 : groupes homogènes de l'analyse de l'humidité.....	27
Tableau 4 : groupes homogènes de la respiration microbienne.....	28
Tableau 5 : résultats du test de corrélation	30

Sommaire

Introduction générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre I : synthèse bibliographique

I. Généralité sur le sol	3
1. Définition	3
2. Constituants du sol	3
1. Phase solide	3
2. Phase liquide	3
3. Phase gazeuse	4
3. Propriétés du sol	5
1. Propriétés physique	5
2. Propriétés chimiques	6
3. Propriétés biologiques	7
4. Pollution du sol	7
II. Généralité sur les hydrocarbures	7
1. Définition des hydrocarbures	8
2. Classification des hydrocarbures	8
3. Devenir des hydrocarbures dans le sol	8
1. Solubilisation	8
2. Transformation	9
3. Evaporation (volatilisation)	9
4. Sorption	9
III. Impacts des hydrocarbures	9
1. Impact sur le sol	9
2. Impact sur la végétation	10
3. Impact sur la santé	10
IV. Moyens de décontaminations	10
1. Traitements biologiques	10

2. La bioremédiation	10
3. Phytoremédiation	11
1. Différentes techniques de la phytoremédiation.....	11
A. Phytodégradation	12
B. Phytoextraction	12
C. Phytostabilisation	12
D. Phytovolatilisation	12
E. Rhizofiltration	12

Chapitre II : matériels et méthodes

I. Présentation de la zone d'étude	13
1. Situation géographique de la région Freha	13
2. Climat	14
3. Présentation de la zone d'étude	15
4. échantillonnage.....	15
II. Inventaire de la végétation	16
III Matériels :	16
1 Matériels utilisés sur le terrain	16
2 Matériels utilisés au laboratoire	17
3. Matériel végétal	17
3.1 Haricot dolique	18
3.2. Luzerne	18
IV. Analyse du sol	19
1 Préparation du sol	19
2 Analyses physico-chimique et biologique	19
1 Potentiel d'Hydrogène du sol (pH).....	20
2 Humidité du sol	20
3. Quantification de la quantité des hydrocarbures dans le sol ...	21
4 Activité biologique	22
V. Test de phytoremédiation	23
1. Paramètres de suivi du test de phytoremédiation et de croissance .23	
1 Taux de levée.....	23
2. Longueur des tiges et des racines.	23
3. Nombre de feuilles	23

4. biomasse aérienne et racinaire.....	23
--	----

Chapitre III : résultats et discussions

I. Résultats	24
1. Inventaire de la végétation	24
2. Analyse physico-chimique	25
1. pH.....	25
2. humidité.....	26
3. Quantité des hydrocarbures.....	27
4. Activité biologique.....	28
3. Germination et croissance	29
1. Haricot dolique.....	29
2. luzerne.....	29
II. Discussions	31

Conclusion

Références bibliographiques

Résumé

Introduction générale

L'exploitation humaine des gisements de pétrole n'a cessé d'augmenter depuis le début du siècle dernier. L'extraction, le transport, et l'utilisation de cette source d'énergie entraînent des risques de pollution accidentelle et chronique pour l'environnement pouvant influencer l'équilibre écologique et parfois entraîner la destruction de l'écosystème **(Soltani, 2004)**.

Les stations-services sont parmi les principales causes des pollutions constatées par la corrosion des cuves de stockage ou des fuites de canalisation entre les citernes et les ilots de pompes et séparation des carburants **(Colin, 2000)**.

Parmi les éléments qui polluent les sols on peut citer les hydrocarbures (appelés « or noir »). Ces derniers ont audacieusement changé notre mode de vie au point où certaines de nos activités découlent de leur utilisation. Les hydrocarbures constituent généralement les principaux contaminants à la fois pour les écosystèmes aquatiques et terrestres. La contamination de la terre passe souvent inaperçue par rapport à celle qui se produit en mer à cause de l'aspect insolite des hydrocarbures et de la quantité répandue. Ce sont des polluants ubiquitaires. Ils sont hydrophobes et dont la persistance dans les écosystèmes est principalement due à leur faible solubilité aqueuse. En raison de leurs potentialités toxiques, mutagènes et cancérigènes, certains d'entre eux sont considérés comme des substances dangereuses **(Hassaine, 2016)**. Il est donc urgent de contrôler la pollution du sol afin de préserver sa fertilité, sa productivité **(Havugimana et al., 2017)**.

Parmi les techniques de traitement des sols contaminés par les hydrocarbures récalcitrants. La phytoremédiation représente une méthode de traitement et de réhabilitation des sols parmi les plus écologiques, mais également les moins coûteuse. Seulement, elle est loin d'être parfaite puisqu'elle présente des limites assujettis au temps de traitement qui est beaucoup plus long quand il s'agit notamment de l'élimination des molécules d'hydrocarbures pétroliers lourdes contrairement aux molécules légères **(FokouMbogne, 2017)**.

L'étude consiste en une évaluation de l'effet des hydrocarbures sur quelques propriétés physico-chimiques du sol, selon un gradient de pollution. Le cas que nous avons étudié concerne la station-service à Freha « AILAM ». Nous avons utilisé la technique de phytoremédiation en utilisant deux différentes espèces : l'haricot dolique, et la luzerne. Ainsi, notre travail est scindé en trois chapitres :

1. Le premier chapitre est consacré à une revue bibliographique relative au sol, aux hydrocarbures, à la pollution du sol, et l'impact sur le sol, la végétation et la santé

Introduction générale

par les hydrocarbures, et aussi le traitement du sol par la technique de la phytoremédiation.

2. Le deuxième chapitre est consacré à la description de la région d'étude, le matériel et les méthodes utilisés dans ce travail.

3. Dans le troisième chapitre sont présentés les résultats obtenus et leur discussion.

4. Le mémoire se termine par une conclusion générale qui synthétise l'ensemble des résultats obtenus dans notre étude et quelques perspectives.

I. Généralités sur le sol

I.1. Définition

Le sol est une unité naturelle, superficielle, et généralement meuble, composée de la transformation, la décomposition et l'altération de la roche mère en contact avec l'atmosphère, et les êtres vivants, sous l'action de l'eau et de l'air. Il provient généralement d'une roche sous-jacente et est influencé par des processus physiques, chimiques, et biologiques. C'est un intermédiaire biologiquement différencié en couches d'épaisseur variable. Les plantes, les animaux et les bactéries, par leurs actions, ont des effets bénéfiques sur le sol (**Deprince,2003**).

I.2. Constituants du sol

Selon Buttler (1992), un volume de sol donné est constitué d'éléments solides, liquides et gazeux.

I.2.1.Phase solide

Elle contient des éléments minéraux et organiques :

Les éléments minéraux sont produits directement à partir de la décomposition mécanique et chimique des roches sous-jacentes ou à partir de matériaux apportés, et sont donc distingués en sables (2mm-50um), limons (50um-20um) et argiles (<2um) (**Rolland,1988**).

Les proportions de ces derniers définissent la texture du sol, et l'assemblage de ces particules élémentaires en représente la structure.

La composante organique du sol est constituée de débris organiques : les débris animaux (Détritus, cire, ...), les débris végétaux (feuilles, branches, racines du tronc) constituent la masse la plus importante.

I.2.2. Phase liquide

Selon **Rolland (1988)**, c'est le volume qui remplit partiellement ou complètement les espaces libres (pores) entre les particules solides du sol. Il est constitué d'eau et de substances minérales ou organiques hydrosolubles. La présence d'eau dans le sol est importante pour plusieurs raisons. L'eau est un facteur essentiel pour la fertilité des sols. Sa présence provoque des réactions chimiques entre les différents composants du sol pour former de nouveaux minéraux et molécules organiques. L'eau est le seul solvant du sol et le seul vecteur de nombreuses substances. Seul le mouvement de l'eau provoque un réarrangement des matières dissoutes et en suspension.

I.2.3. Phase gazeuse

Elle est localisée entre les particules solides du sol et occupe un espace libre non rempli par la phase liquide. La phase gazeuse se compose non seulement d'air, mais aussi de gaz tels que la vapeur d'eau, O₂, CO₂ et N₂ des gaz proviennent de l'altération des roches, de la décomposition de la matière organique et des apports humains (tableau n°01) (**Rolland, 1988**)

Tableau N° 1: Principaux constituants du sol (Buttler, 1992)

	Constituants solides		Constituants liquides (solution du sol)	Constituants gazeux (atmosphère du sol)
	Minéraux	Organiques		
Origine	Désagrégation physique et altération biochimique des roches	Décomposition des êtres vivants	Précipitation, nappe, ruissellement	Air hors sol, matières en décomposition, respiration
Critères de classement	Taille (granulométrie) Qualité (minéralogie)	Etat (vivants, morts) Qualité chimique (originelle, transformée)	Origine (météorique, phréatique) Etat physique (potentiel hydrique) Qualité chimique	Origine (air, organismes) Qualité chimique
Catégories	Selon granulométrie - Squelette (>2mm) - Terre fine (<2mm) Selon minéralogie : - Quartz	- Organismes vivants - Organismes morts - Matières organiques héritées : cellulose, lignine résines. - Matières	- Eau - Substances dissoutes : glucide, alcools, acides organiques	Gaz de l'air, N ₂ , O ₂ , CO ₂ - Gaz issus de la respiration et de la décomposition des organismes : CO ₂ , H ₂ , CH ₄ ,

-Minéraux silicatés	organiques	et minéraux	NH ₄ ...
-Minéraux carbonatés	-Humifiées : acides fulviques et humiques, humines.	- Cation et anion	

I.3. Propriétés du sol

I.3.1. Propriétés physique

- Texture : La texture du sol se traduit de manière globale par la composition granulométrique de la terre fine, dont la répartition est habituellement représentée par un graphique ternaire ou triangle de texture.
- Structure : reflète la taille des particules et leur disposition les unes par rapport aux autres. Elles peuvent se regrouper en agrégats de différentes tailles et formes. La stabilité structurale des sols exprime la cohésion plus ou moins forte des particules dans les agrégats. La structure du sol crée des pores de différentes tailles à travers lesquels l'air et l'eau peuvent circuler. Un sol bien structuré permet donc un équilibre entre le mouvement et le stockage de l'eau, les échanges gazeux entre l'atmosphère et les racines, et une bonne pénétration racinaire pour la recherche des nutriments (**Ponge et Robert,1996**).
- Température : c'est une grandeur physique liée à la notion immédiate de chaud et de froid. Sa mesure est superficielle pour la majorité des représentants de la faune et la flore du sol, et chaque espèce a sa température préférentielle (**Gobat et al.,2003**).
- L'Humidité : c'est la quantité d'eau contenue dans le sol. Cela dépend de la qualité du sol (texture, structure) et de sa capacité à stocker l'eau (**Dajoz,2000**).
- Perméabilité du sol : La perméabilité du sol fait référence à sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures (**Koller,2004**).
- Porosité du sol : C'est le volume de vides occupés par l'air ou l'eau, exprimé en pourcentage du volume total. La porosité détermine la fluidité et la capacité de rétention des substrats (**Duchaufour,2001**).

I.3.2. Propriétés chimiques

➤ Potentiel d'hydrogène (pH) : Selon **Bonneau et Souchier(1979)**, l'acidité du sol est définie par la concentration en ions H^+ . La concentration d'ions hydrogène dans le milieu chimique détermine sa réaction et le pH varie entre 0 et 14:

- pH de l'eau inférieur à 6,8:Acide
- pH de l'eau neutre entre 6,8 et 7, 2 :Neutre
- pH supérieurà7, 2 :Alcalin

➤ Conductivité électrique : La conductivité d'une solution est une mesure de la teneur en sel soluble dans le sol et représente le degré de salinité du sol (**Mathieu et Pieltain,2003**).

➤ Matière organique : Elle est constituée de toutes sortes de résidus végétaux (feuilles, branches mortes) qui tombent au sol et sont rapidement décomposés par l'activité biologique. La matière organique joue un rôle important dans la formation des agrégats et le développement de la structure du sol. L'insuffisance de matière organique déstabilise la structure du sol (**Clément,2003**).

➤ Calcaire : Les sols calcaires sont des sols qui contiennent du carbonate calcique (et éventuellement d'autres carbonates) en zones fines voire grossières. Il se produit dans le sol sous forme de débris de toutes tailles, des roches et du gravier aux tailles colloïdales d'argile (**Mathieu et Pieltain, 2003**).

➤ L'azote total : Il représente les réserves totales d'azote contenues dans l'humus, et son taux de transfert varie fortement selon le type d'humus (mull, moder, mor). L'azote total est un excellent indicateur de fertilité lorsqu'il est interprété en termes de rapport C/N (**Clément, 2003**).

➤ Capacité d'échange cationique (CEC): représente la capacité du sol à retenir les cations sous forme échangeable. La capacité d'échange cationique est une propriété utile et intéressante des sols. Ceci est utile car il permet la caractérisation du sol en termes de contrôle de la composition ionique de la solution du sol (**Calvet,2003**).

I.3.3. Propriétés biologiques

- Les communautés microbiennes du sol sont le dernier maillon de la chaîne trophique du sol où le carbone et les nutriments contenus dans la matière organique sont transportés avant d'être à nouveau disponibles pour les plantes. Par conséquent, elles remplissent une fonction essentielle dans le recyclage de la matière organique restituée au sol (**Chantigny, 2005**).
- Environ un quart de la biodiversité totale de la planète réside dans les sols, classés selon plusieurs échelles de taille allant des microbes aux macro-organismes. Bactéries, archées, algues, cryptogames, phanérogames, champignons, nématodes, rotifères, arthropodes, annélides, mollusques, etc. Ils sont tous connectés dans un réseau d'interactions et participent au flux énergétique écologique. Diverses propriétés de ces organismes (forme, stade de développement, mode de vie, régime alimentaire) affectent les fonctions physico-chimiques des sols à tous les niveaux (**Hedde et Zwick, 2020**).

I.4. Pollution du sol

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 (**Khellout, 2004**).

La pollution du sol est définie comme l'accumulation des composés toxiques persistants tels que les produits chimiques, les sels, les matières radioactives ou les agents pathogènes dans le sol qui ont des effets néfastes sur la croissance des plantes et la santé animale (**Okrent, 1999**).

Un polluant du sol est tout facteur qui détériore la qualité, la texture et la teneur en minéraux du sol qui perturbe l'équilibre biologique des organismes du sol (**Havugimana et al., 2017**), ces effets dépendent de la concentration du polluant et du type de pollution (**Atlas, 1975 in Kisić et al., 2010**).

II. Généralité sur les hydrocarbures

Les hydrocarbures font partie des polluants pouvant affecter les sols, ce sont des polluants omniprésents. Ils sont hydrophobes et leur persistance dans les écosystèmes est en grande partie due à leur faible solubilité dans l'eau, dont certains sont considérés comme dangereux en raison de leur potentiel toxique, mutagène et cancérigène (**Hassaine, 2016**).

II.1. Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures regroupent différents produits pétroliers (pétrole brut, pétrole raffinés, kérosène, essence, huiles lubrifiantes et huile à moteurs) (**Richard, 1984**). Ils sont émis dans l'environnement via des phénomènes naturels et via des activités anthropiques.

Selon **Battaz (2009)** les principales sources des hydrocarbures dans l'environnement sont :

- Le transport (89% des émissions des hydrocarbures).
- Le chauffage.
- l'exploitation des gisements.
- l'extraction.
- Les rejets telluriques d'origine terrestre apportés par les cours d'eau.
- Les sources naturelles (débris d'algues, résidus de la faune marines et le plancton atmosphériques).

II.2. Classification des hydrocarbures

Les hydrocarbures constituent l'essentiel du pétrole brut, représentant 65 à 95% de la plupart des pétroles bruts. Ces hydrocarbures sont des hydrocarbures saturés (30-70%), des hydrocarbures aromatiques et poly aromatiques (20-40%), des composés polaires (5-25%), et des asphaltènes en proportions variables selon leur origine (**Syakti, 2004**).

II.3. Devenir des hydrocarbures dans le sol

Grâce à des processus physiques, chimiques et biologiques, les hydrocarbures peuvent être transformés, transportés ou éliminés après épandage dans le sol (**Bouderhem, 2011**).

II.3.1. Solubilisation

Les hydrocarbures ont une très faible solubilité dans l'eau. Les hydrocarbures légers sont plus solubles par rapport aux hydrocarbures lourds. Il est important de garder à l'esprit que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus nocifs pour l'environnement. Ils sont difficiles à éliminer et sont adsorbés par les plantes et les animaux (**Soltani, 2004**).

II.3.2. La transformation

Il peut s'agir d'un phénomène biologique ou abiotique (hydrolyse, oxydation, réactions photochimiques) (Ali Ahmed., 2011).

Parmi ces phénomènes biologiques nous avons la biodégradation qui dégrade les polluants organiques par des micro-organismes (bactéries, champignons, algues). Les polluants sont convertis en dioxyde de carbone (une fois la biodégradation terminée), en eau et en énergie pour construire la biomasse (Rivière, 1998).

II.3.3. Evaporation (volatilisation)

C'est le passage de la matière à l'état gazeux, ce passage est plus ou moins long. Il dépend des conditions climatiques (vent et températures), du type de pétrole et de l'épaisseur de la nappe (Fattal, 2008).

II.3.4. Sorption

Les polluants restent en phase gazeuse ou en solution après avoir pénétré dans le sol. Puis, ils seront fixés par le sol en fonction de leur solubilité dans l'eau, de leur structure moléculaire, de leur groupe fonctionnel et en fonction des caractéristiques du sol (koller,2009).

III. Impacts des hydrocarbures

La présence des hydrocarbures dans l'environnement présente un grand danger sur le sol, la végétation et la santé.

III.1. Impact sur le sol

Pour près de la moitié des cas, les HAP sont les substances le plus fréquemment retrouvées dans les sols, viennent ensuite le plomb (20%), les hydrocarbures (20%), les solvants (15 %), le chrome (15%) et le zinc (15%) (Dumont et Libion, 2006). Ils peuvent donc affecter les composants, les propriétés ainsi que la fertilité du sol (Koller, 2004). Leur présence dans le sol modifie considérablement ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. (Dumont et Libion (2006), décrivent trois types de dégradation des propriétés du sol:

- Physique (érosion, désertification, saturation en eau, tassement).
- Chimique (acidification, salinisation, contamination par des micropolluants)

- Biologique (altération de la minéralisation de l'humus, atteintes à labiodiversité).

III.2. Impact sur la végétation

Selon **Doumont et Libion (2006)**, la pollution des sols par les hydrocarbures a un impact direct sur la végétation en perturbant le métabolisme des plantes, en réduisant le rendement des récoltes ou en rendant les cultures plus sensibles. Les polluants vont directement nuire aux organismes qui vivent dans le sol.

III.3. Impact sur la santé

En 2003, les hydrocarbures ont été rajoutés aux produits visés par la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants : ils ont été classés comme produits très préoccupants pour la santé (**Le corfec, 2011**). Un risque de développer un cancer de la peau, du scrotum après exposition à la suie, au goudron ou aux huiles minérales. De même, un cancer du poumon peut être développé après exposition au gaz (**Doumont et Libion, 2006**).

IV. Moyens de décontaminations

La dépollution des sites contaminés est une préoccupation majeure, en raison de l'impact de cette pollution sur l'environnement et la santé. Les traitements mis en œuvre pour dépolluer les sols sont nombreux ; traitement physique, traitement chimique, traitement thermique, et traitement biologique (**Cadiere, 2006**).

IV.1. Traitements biologiques

Ce sont des traitements qui consistent à utiliser des organismes supérieurs (végétaux) ou des micro-organismes du sol (les champignons, les bactéries, les actinomycètes, etc.) pour dégrader les polluants organiques. Ces derniers sont transformés en général en molécules de moins en moins polluantes (**Delage et Schrefler, 2005**).

- **La bioremédiation**

Le procédé de la bioremédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart du temps microscopiques (Bactéries, Microalgues, Champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau et le gaz carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou

exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivées au laboratoire puis réintroduits dans le sol (Abdelly, 2006).

- **Phytoremédiation**

Étymologiquement, le terme phytoremédiation vient du mot grec phyto, qui signifie plante, et du mot latin remedium, qui signifie « corriger les mauvaises actions » (Bert et Deram, 1999). La phytoremédiation est une méthode de réhabilitation *in situ* des sols, non-invasive, basée sur l'exploitation des capacités naturelles de l'environnement à se restaurer lui-même (Shimp et al., 1993 ; Khan et al., 2004 ; Girard et al., 2005).

Les techniques de phytoremédiation exploitent les propriétés de certaines espèces végétales (strates herbacées, arbustes, arbres, algues) à interagir avec des composés chimiques organiques ou minéraux pour dépolluer un terrain contaminé. La biomasse produite peut contenir le polluant (tiges, feuilles) et doit être traitée d'une façon adéquate, qui revient souvent à récolter les végétaux pour les incinérer (Cadiere, 2006).

La phytoremédiation offre une véritable alternative, à la fois écologique aux méthodes classiques de décontamination (Porrigo, 2012).

1. Différentes techniques de la phytoremédiation

Selon Bert et Deram (1999) et Mulligan et al., (2001), il existe de différentes techniques de phytoremédiation, telles que la phytodégradation, la phytoextraction, la phytostabilisation, la phytovolatilisation, et la rhizofiltration (figure 1).

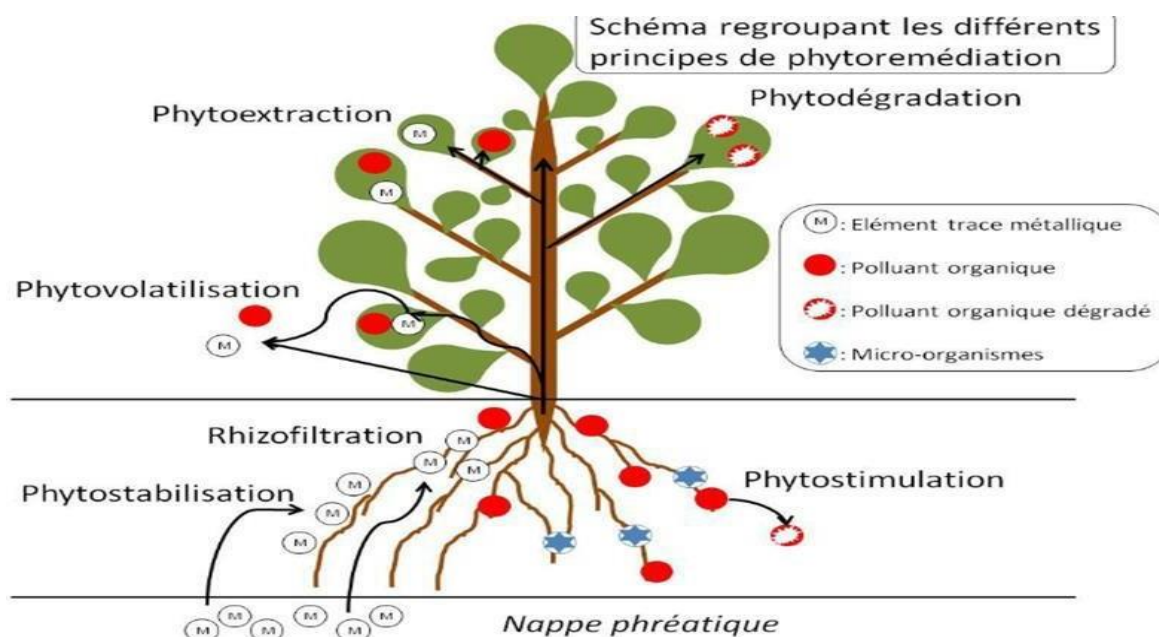


Figure 1 : Les différentes techniques de phytoremédiation (Sourzat, 2016)

a. Phytodégradation

La phytodégradation aussi appelée la phytotransformation, désigne la dégradation des polluants organiques dans la plante elle-même, à travers son activité métabolique au niveau des parties aériennes et/ou racinaires ou en dehors de la plante via la production d'enzymes extra racinaires (exsudats) liées à la dégradation dans la rhizosphère (**Criquet et al., 2000 ; Pilon-smits, 2005 ; Schwitzguebel et al., 2011**).

B. Phytoextraction

Ce mécanisme implique l'élimination du contaminant du sol et son accumulation dans une partie de la plante (par exemple : la racine, la tige ou la feuille) (Sâdhus et al., 2018)

C. Phytostabilisation

La phytostabilisation consiste à utiliser les plantes pour réduire la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol ou la rhizosphère par immobilisation chimique (précipitation, stabilisation, absorption ou piégeage) ou prévention des mouvements latéraux ou en profondeur via l'érosion ou le lessivage (**Vishnoi et Srivastava, 2008**). Selon **Mcgrath (1998)**, la phytostabilisation empêche la dispersion des contaminants dans les eaux de surface et les eaux souterraines.

D. Phytovolatilisation

Cette technologie utilise des plantes pour extraire et éliminer les polluants. Les polluants sont distribués dans l'atmosphère à des concentrations inhabituelles après volatilisation par évapotranspiration à travers les stomates des feuilles et des tiges. Ces concentrations normalement ne représentent plus un danger pour l'homme (**Vanobberghen, 2010**).

E. Rhizofiltration

Les racines des plantes sont utilisées pour absorber, concentrer ou précipiter les polluants des eaux usées liquides (**Koller, 2004**). Cette technique est couramment utilisée pour traiter les sites contaminés par des métaux lourds et des métaux radionucléaires tels que le plomb, le zinc, le cuivre et le nickel (**Hami ouche et Henadci., 2018**).

Introduction

Dans ce travail, nous voulons étudier l'efficacité de la phytoremédiation dans un sol pollué par les hydrocarbures. Ce travail a été mené au laboratoire de pédologie de la faculté des sciences biologiques et des sciences agronomiques de l'UMMTO.

Le choix de la station-service est justifié par le fait qu'il y a une fuite d'hydrocarbures lors de remplissage des réservoirs de stockage, ce qui conduit à la contamination du sol.

Cette partie présente les matériels et les méthodes utilisées, ainsi que le matériel expérimental utilisé.

I. Présentation de la zone d'étude

I.1 Situation géographique de la région Freha

D'après le service technique de la commune de Fréha 2013, Freha est une commune de la wilaya de Tizi-Ouzou, elle appartient à la daïra d'Azazga. Elle est située à 7 km à l'Ouest d'Azazga à 31 km à l'Est de Tizi-Ouzou, et à 130 Km d'Alger. Elle est limitée au Nord par la commune d'Aghribs, à l'Est par la commune d'Azazga, au Sud par les communes de Mekla et de Tizi Rached, à l'Ouest par les communes de Tizi-Ouzou et Ouagnoun et au Nord-Ouest par la commune de Timizart. Du point de vue hydrologie la commune de Freha compte sur son territoire des oueds et cours d'eaux dont le principal est l'Oued Sebaou. C'est une commune située à proximité de la bande côtière à 20 km de la mer (commune d'Azeffoun).

D'après les données présentées par le plan directeur d'aménagement et de l'urbanisme (PDAU) (2011), c'est une commune caractérisée par sa topographie qui alterne entre un relief de colline et de plaine. Freha est principalement une région agricole dont les productions végétales concernent les cultures fourragères les céréales et particulièrement le blé dur, les cultures maraîchères telles que la pomme de terre et l'arboriculture fruitière et particulièrement l'olivier. Quant à la production animale, elle concerne principalement l'élevage de bovin.

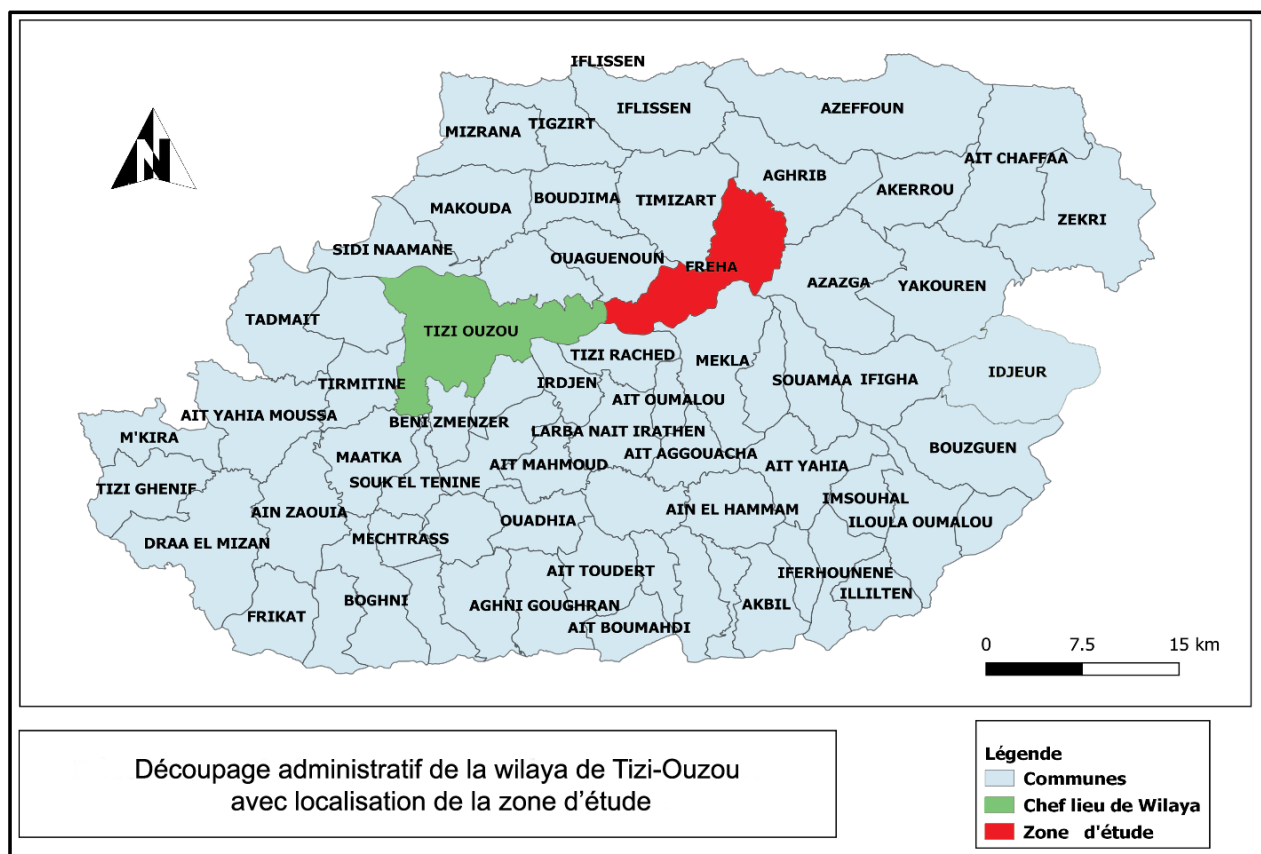


Figure 2 : localisation géographique de la commune freha dans la wilaya de Tizi-ouzou

I.2.Climat

Le climat est considéré comme l'un des paramètres les plus importants qui ont une influence directe et /ou indirecte sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols ; il joue un rôle important dans la répartition et la survie des êtres vivants. Le climat est un facteur déterminant car il influence directement l'atténuation ou l'augmentation d'une pollution et la disponibilité des eaux. La région d'étude est caractérisée par des étés très chauds et des hivers très froids.

Le climat de la commune est méditerranéen de type continental avec des hivers très froids et des étés très chauds.

- Température en hiver est inférieure à 10° et en été est supérieur à 35° .

La pluviométrie est concentrée généralement sur la période hivernale. Les précipitations au niveau de la commune sont de l'ordre de 850 mm / an, ce qui est proche de la moyenne de la Wilaya.

Les précipitations sont un facteur essentiel afin de déterminer un climat. Elles accusent des irrégularités très nettes à l'échelle mensuelle et annuelle, tant au niveau de la répartition qu'au niveau des quantités reçues, ce qui est attribuée aux caractéristiques du climat méditerranéen.

D'après les données pluviométriques fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H) de Tizi-Ouzou, les précipitations les plus importantes sont celles qui débutent du mois d'octobre au mois d'Avril (plus de 90% du total), avec un maximum en décembre avec 162,1 millimètre.

I.3. Présentation de la zoned'étude

Notre échantillonnage à été réalisé dans la station de service Ailam Freha qui est entouré par la RN 12 à l'est, l'oued sébaou à l'ouest à environ 470mètres, des voies au nord et un chantier de construction au sud, avec diverses constructions commerciales, industrielles et habitations.

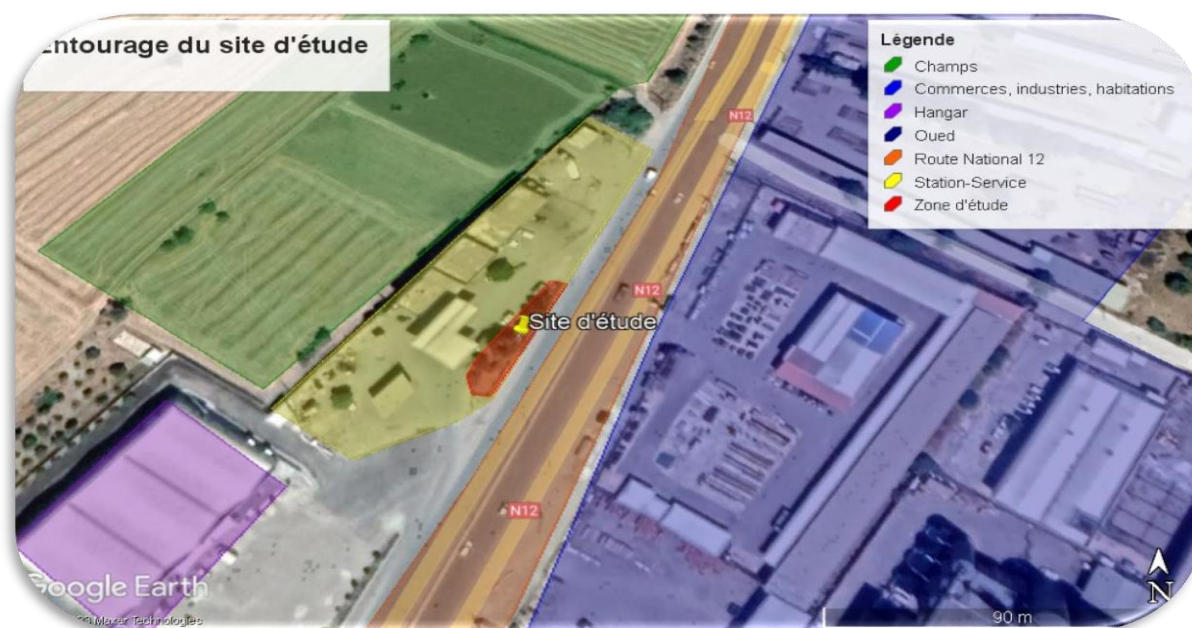
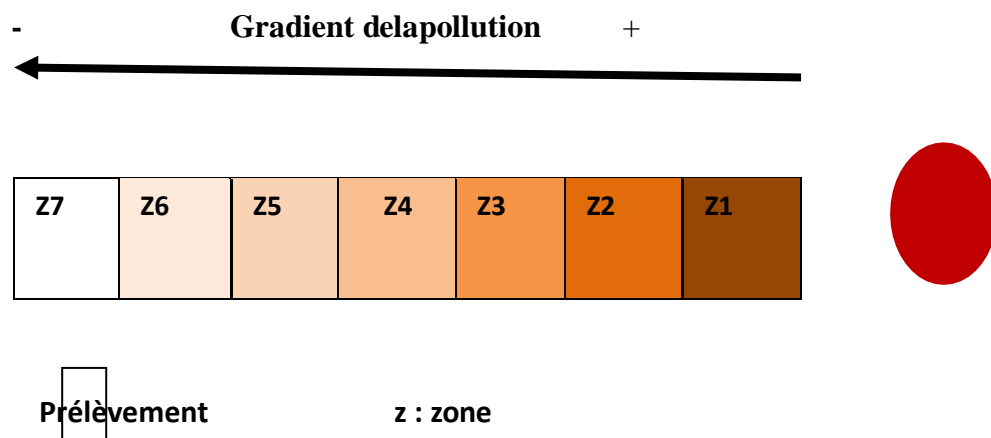


Figure 3: localisation géographique de la station-service Ailam de Freha (Google earth, 2023)

I.4. Echantillonnage

La méthode choisie pour l'étude est l'échantillonnage par transect selon un gradient de pollution (du plus vers le moins pollué). Grâce à ce transect, il est possible d'étudier les changements dans les propriétés du sol à travers le gradient de pollution. Un seul transect qui contient sept zones de 1 X 1 m chacune, le premier est juste au niveau de point de rejet. La

quantité du sol extraite est de 3Kg pour chaque prélèvement.



Point de rejet



Figure 4 : Schéma de la méthode d'échantillonnage (original).

II. Inventaire de la végétation

Nous avons fait un inventaire de la végétation avec le dénombrement des espèces au long de gradient de la pollution, et en identifiant les espèces présentes.

III. Matériels:

1. Matériels utilisés sur le terrain

- ❖ Pioche en fer pour creuser le sol;
- ❖ Des sacs de plastiques pour transporter le sol en laboratoire;
- ❖ Etiquettes;
- ❖ Marqueur;
- ❖ Une pelle;
- ❖ Une règle;
- ❖ Mètre ruban;

2. Matériels utilisés au laboratoire

- ❖ Agitateur;
- ❖ pH mètre;
- ❖ Pipettes en verre graduée;
- ❖ Fioles jaugées;
- ❖ Burette
- ❖ L'étuve
- ❖ Papier filtre
- ❖ Petits bicher;
- ❖ Boîtes de pétri;
- ❖ Marqueur ;
- ❖ Dessiccateur;
- ❖ Balance de précision ;
- ❖ Etiquettes
- ❖ Flacons en verre;
- ❖ Tubes en plastique;
- ❖ Baguette en verre;
- ❖ Une pince;
- ❖ Des gants;
- ❖ L'incubateur;
- ❖ Scotch ;
- ❖ Entonnoir en verre
- ❖ Réactifs (HCl, H₂O₂, phénolphtaléine, Hydroxyde de sodium NaOH, Acide sulfurique H₂SO₄, l'eau distillée, l'eau de robinet, hexane, KMnO₄)
- ❖ Tamis métallique à maille de 2mm et de 5mm de diamètre ;
- ❖ papier journal;
- ❖ Barreaux magnétiques;

3. Matériel végétal

Deux espèces végétales différentes ont été utilisées pour la phytoremédiation, le Haricot doliqne et la Luzerne.

3.1 Haricot dolique

Selon Stanton (1970), *Vigna unguiculata* est d'origine africaine. D'après, Chauv et Foury in Aiboud (2012), c'est une plante herbacée tolérante à la sécheresse, cultivée comme annuelle, grimpante, rampante ou plus ou moins érigée. Les tiges pouvant atteindre 4 m de long, sont anguleuses ou presque cylindriques, les graines sont oblongues à presque globuleuses, souvent comprimées latéralement, de 0,5 à 1 cm de long, noires, brunes, roses ou blanches. Le système racinaire est très profond et dépassant 30 cm en début de floraison.

➤ Classification botanique

Selon Cronquist (1981) le haricot est classé comme suit :

- Règne : Plantae
- Sous règne : Tracheobionta
- Division : Magnoliophyta
- Classe : Magnoliopsida
- Sous-classe : Rosidae
- Ordre : Fabales
- Famille : Fabaceae
- Sous-famille : Papilionidae
- Tribu : Trifolieae
- Genre : *Vigna*
- Espèce : *Vigna unguiculata*



Figure 5: Haricot dolique (original 2023)

3.2 Luzerne

La luzerne (*Medicago sativa* L.) est une légumineuse fourragère est dicotylédone

C'est une plante vivace aux petites fleurs violettes ou jaunes s'épanouissant en grappes et aux rhizomes ramifiés. Le système racinaire a une racine pivotante qui atteint des profondeurs de plus de 2 mètres (Colas, 2012).

Selon Melis (2017), la luzerne préfère les sols profonds et bien drainés et germe à des températures comprises entre 5 et 25°C et un pH compris entre 6 et 7,5. Connue pour son rôle dans l'amélioration de la structure du sol, l'augmentation de la fertilité des sols par la fixation d'azote et la réduction de l'érosion du sol.

➤ **Classification botanique**

D'après Quezel et Santa (1962) in (Benlakhadar ,2015) classification botanique de la luzerne est comme suit :

- Règne :Plantae
- Sous-règne :Tracheobionta
- Embranchement :Spermaphytes
- Sous-embranchement :Angiospermes
- Classe :Dicotylédones
- Sous-classe :Dialypétales
- Ordre :Rosales
- Famille :Légumineuses
- Sous-famille :Papilionacées
- Tribu :Trifolieae
- Genre :Medicago
- Espèce: *Medicagosativa*L

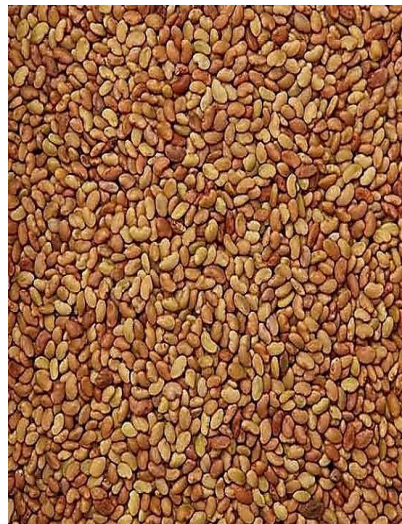


Figure6 : graine de la Luzerne(originale 2023)

IV. Analyses dusol

1. Préparation dusol

Le sol a été échantillonné sur le terrain le 25mars 2023, a été transporté dans des sacs en plastique au laboratoire, où il a été étalé sur les paillasse, et a été laissé sécher. Après le nettoyage, concassage, puis le tamisage à l'aide d'un tamis à maille à 2mm,les échantillons ont été étiquetés et stockés dans un endroit sec. La terre fine obtenue constitue la partie du sol sur laquelle est basée la série d'analyses.

Les analyses physico-chimiques sont réalisées au sein du laboratoire de Pédologie de l'université de Mouloud Mammeri.

2. Analyses physico-chimique etbiologique

Nous avons fait quelques analyses physico-chimiques du sol avant et après la phytoremédiation, pour évaluer l'efficacité et la capacité de ce traitement à soigner le sol.

2.1. Potentiel d'Hydrogène du sol (pH)

La mesure du pH du sol consiste à utiliser un pH mètre qui donne directement la valeur du pH quand on plonge des électrodes en verre dans une solution obtenue en mélangeant l'échantillon du sol avec de l'eau distillée.

Le pH de sol a été déterminé sur une suspension aqueuse où le rapport sol /eau est de 2/5. 10g de sol tamisé à l'aide d'un tamis à 2 mm pour lesquels on ajoute 25 ml d'eau distillée. Après l'agitation de la suspension pendant 10 minutes à l'aide d'une baguette en verre, suivie d'une décantation pendant 30 minutes, le pH mesuré avec un pHmètre.



Figure 7: pH mètre HI2210 (originale, 2023)

2.2. Humidité du sol

Lors de la préparation du sol pour les différentes analyses, il est généralement séché à l'air libre, jusqu'à ce qu'il devienne sec. Cependant, le sol contient encore une certaine quantité d'eau due à l'absorption de la vapeur d'eau contenue dans l'air par les particules du sol qui la retiennent solidement à leur surface.

Nous avons pesé avec une balance de précision 100 g de sol tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm puis ces échantillons ont été placés dans des boîtes de pétri en verre ensuite les boîtes étaient placées dans une étuve à 100°C pendant 24 heures. Les échantillons ont été transférés dans un dessiccateur (pour éviter toute humidité), après nous avons pesé le sol et cette opération a été réalisée une deuxième fois pour permettre l'évaporation totale de l'humidité présente dans le sol. Ainsi nous avons obtenu la masse finale.

2.3. Quantification de la quantité des hydrocarbures dans lesol

Le but de cette extraction est d'évaluer la quantité des hydrocarbures présente dans le sol avant et après le traitement afin déterminer l'efficacité de la phytoremédiation. Nous avons pesé 10 g de sol tamisé à l'aide d'un tamis 2 mm, auxquels nous avons ajouté 50 ml d'hexane puis laissé dans l'agitation 6 heures (chaque 2 heures suivie par un temps de repos minimum 30 minutes) à l'aide d'un agitateur magnétique, l'échantillon est décanté pendant 30 minutes et filtré à travers un entonnoir muni d'un papier filtre, le filtrat est transvasé dans des boites de Petri pesées préalablement à vide, après l'évaporation totale du solvant, à l'aide d'une balance de précision nous avons pesé les boites de Petri afin de déterminer la quantité d'hydrocarbures extraites

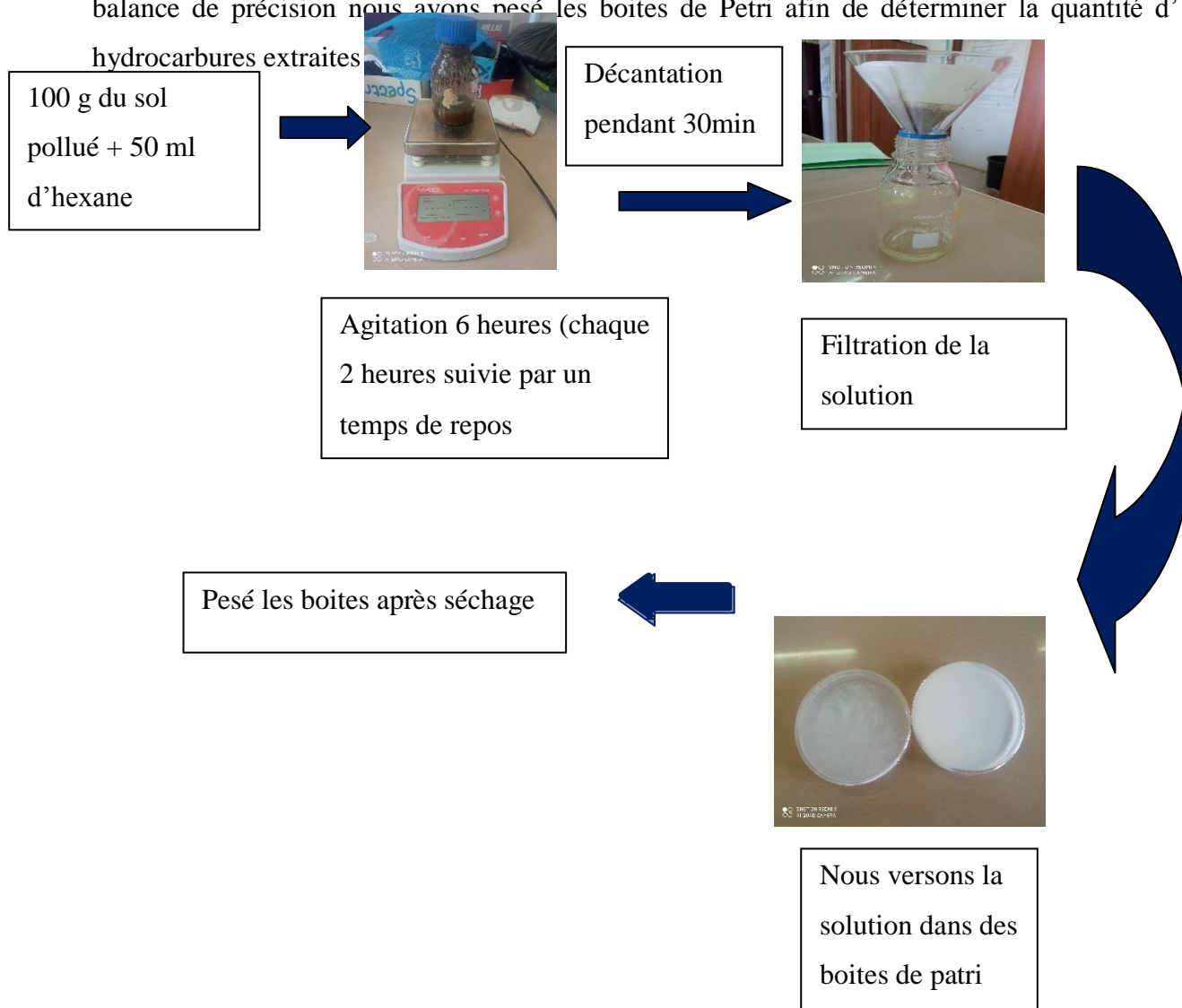


Figure 8 : schéma expérimentale de la quantification des hydrocarbures (originale,2023)

3.3 Activité biologique

Cette méthode consiste à une incubation des échantillons de sol durant une période de 7 jours à une température de 28°C. Nous avons pesé 100g de sol tamisé à l'aide d'un tamis de 2 mm dans des flacons puis nous avons introduit dans chaque flacon 2 tubes à hémolyse contenant, l'un 5 ml de la solution NaOH à 0.5N pour capter le CO₂ dégagé par les microorganismes et l'autre 3 ml d'eau de robinet pour humidifier le sol. Les flacons sont fermés hermétiquement pour éviter la fixation de CO₂ de l'air, ils sont ensuite introduits dans l'incubateur. Après 7 jours d'incubations, l'excès de NaOH dans les tubes dans chaque flacons on ajoute 2 gouttes de phénolphaléine puis la solution titré avec une solution HCl 0.25N. La disparition de la couleur rose violacée marque la fin de titrage

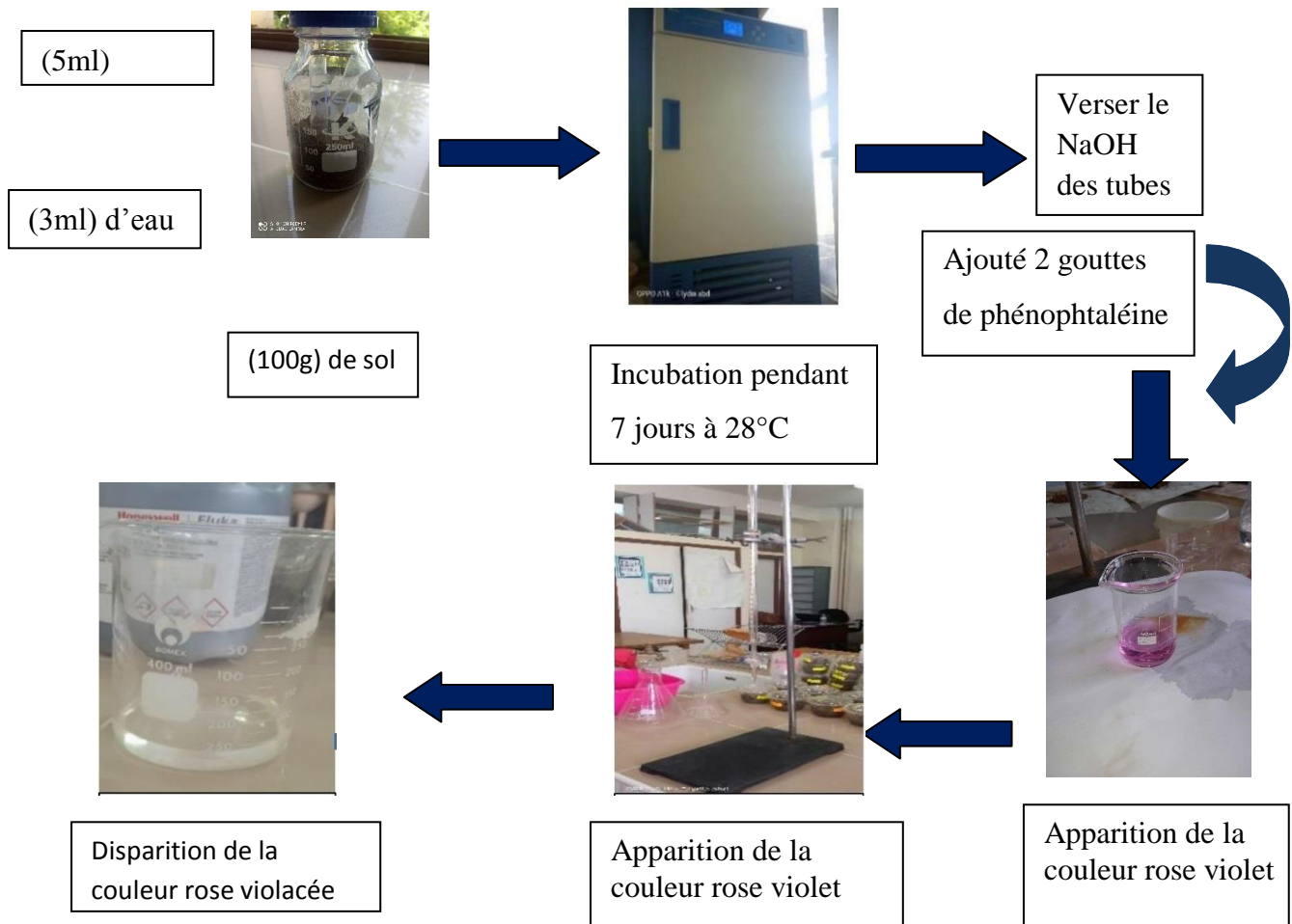


Figure 9 : protocole de mesure de la respiration microbienne du sol (originale, 2023)

V. Test de phyto-rémediation

Après le traitement au laboratoire et le tamisage du sol, nous avons rempli le sol dans des boîtes en plastiques trouées en bas (pour l'aération) en mettant dedans un gravier, par la suite on a rajouté 400g du sol, le nombre de boîtes utilisées est de 21 (7 pour chaque espèce et le témoinnotamment).

Les graines utilisées ont été lavé avec de l'eau et 2 gouttes de javel (pour la décontamination).

On a semé 12graines de luzerne et 5 de haricot, puis nous avons arrosé les pots chaque jour pendant 5 semaines. Ce test a été réalisé le 22/05/2023.

1. Paramètres de suivi du test de phyto-rémediation

1.1. Taux delevée

Consiste à calculer le nombre total des graines germé dans chaque pot.

1.2. Longueur des tiges et des racines

Elle consiste à mesurer hebdomadairement la longueur des tiges et les racines pour chaque espèce et chaque strate à l'aide d'une règle gradué.

1.3. Nombre de feuilles

Elle consiste à calculer le nombre total de feuilles sur chaque plante et ceci hebdomadairement.

1.4. Biomasses aérienne et racinaire

Cette partie est réalisée après la récolte, les plantes obtenues ont été lavé, on coupe ensuite les racines et les tiges avec une lame, et à l'aide d'une balance de précision on a mesuré le poids pour les racines et les tiges.

I. Résultats

1. Inventaire de la végétation

Les différentes espèces identifiées et leurs abondances respectives dans les différentes zones sont représentées dans La figure ci-dessous.

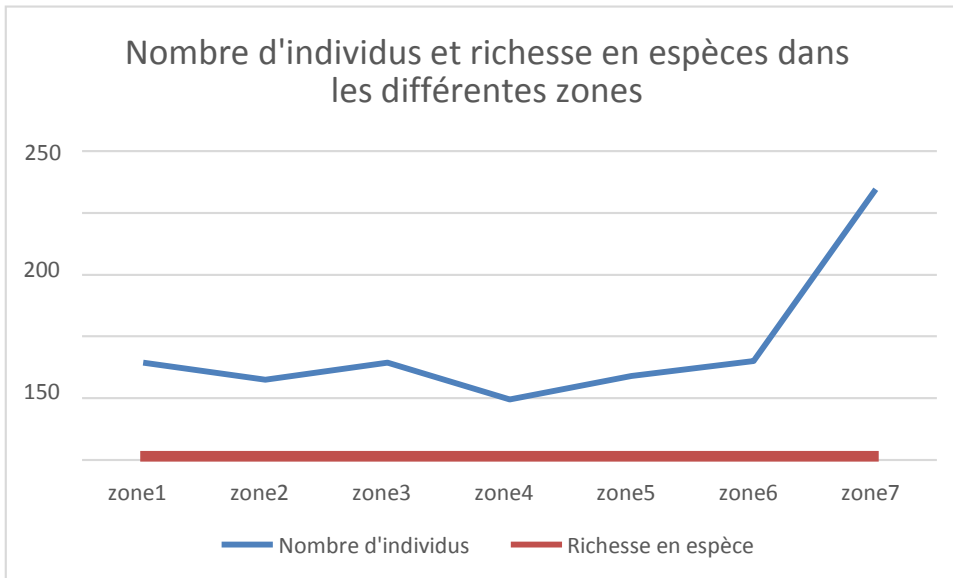


Figure10: Les résultats du nombre d'individus et de richesse en espèces

D'après les résultats, l'abondance totale des espèces dans chaque zone présente une tendance, montrant une augmentation du nombre d'individus de la zone 1 jusqu'à la zone 7. Cependant cette tendance n'est pas systématique. Concernant la richesse en espèces, nous n'avons pas observé une tendance particulière.

La zone 1 est généralement pauvre en espèces, ce qui peut s'expliquer par l'influence négative de la pollution et du changement des propriétés du sol. D'un autre côté, les zones non polluées présentent les abondances les plus importantes.

L'espèce la plus fréquente et la plus abondante à travers les différentes strates est *Oxalis pes-caprae L.* avec un total de 427 individus sur les 7 zones.

Les espèces les plus abondantes au niveau des zones les moins polluée sont : *Oxalis pes-caprae L.*, *Cymbopogon citratus*, et *Cymbopogon citratus* staff. D'un autre côté, les espèces les plus abondantes dans les zones les plus polluée sont : *Oxalis pes-caprae L.*, *Cirsium monspessulanum*, et *Cynodon dactylon*.

Certaines espèces ne sont présentes que dans les zones les plus polluées, ces espèces sont : *Senecio vulgaris L*, *Cirsium monspessulanum*, et *Cynodon dactylon*. Et d'autres espèces ne sont présentes que dans les zones les moins polluées, tel que : *Cymbopogon citratus (Dc) Stapf*, et *Lactuca virosa L*.

2. Analyses physico-chimique

Les résultats des différentes analyses physico-chimiques sont représentés dans la figure ci-dessous. Les paramètres analysés sont le pH, l'humidité, la quantité des hydrocarbures, et l'activité biologique. Les figures contiennent les valeurs pour les paramètres étudiés avant et après phytoremédiation.

2.1. pH

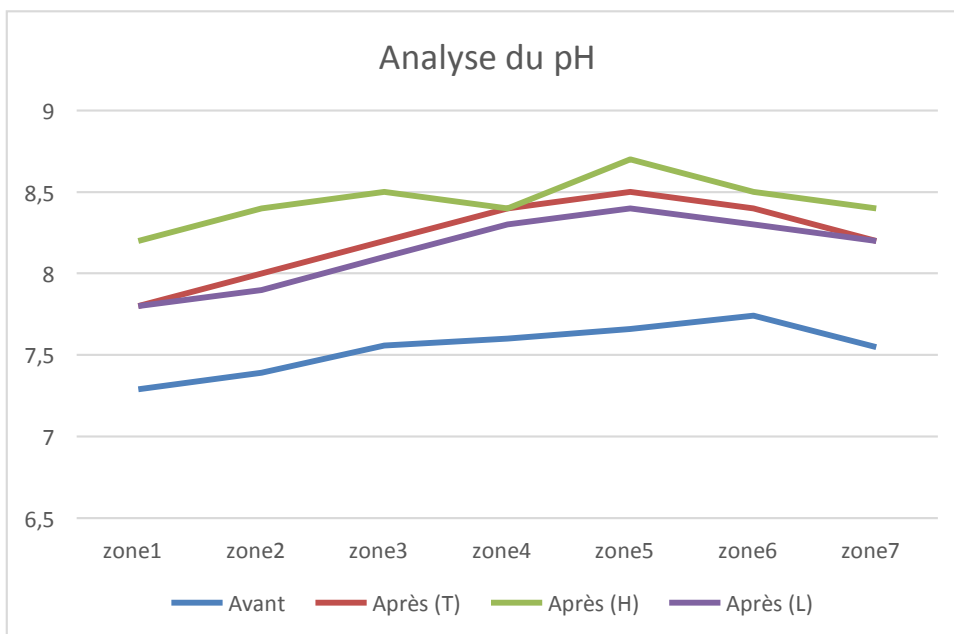


Figure11: résultat de l'analyse de pH sol

D'après les résultats obtenus, nous avons remarqués que la valeur minimale du pH a été enregistrée au niveau de la zone 1, et la valeur maximale est enregistrée dans la zone 5. Le sol au niveau de la luzerne présente un pH inférieur par rapport au haricot dolique. Les résultats obtenus indiquent que les hydrocarbures pourraient potentiellement provoquer une diminution du pH au niveau des sols contaminés.

Le test statistique révèle une P-value = 0,000000 donc significative. Il y'a 3 groupes homogènes : luzerne et témoin (groupe A) ; le sol avant traitement (groupe B) ; et le haricot (groupe C).

Le tableau ci-dessus représente les groupes homogènes

Tableau 2 : groupes homogènes de l'analyse de pH

	Traitement	pH	1	2	3
1	BPT	7,541429		****	
4	APT-L	8,142857	****		
2	APT-T	8,214286	****		
3	APT-H	8,442857			****

2.2.Humidité

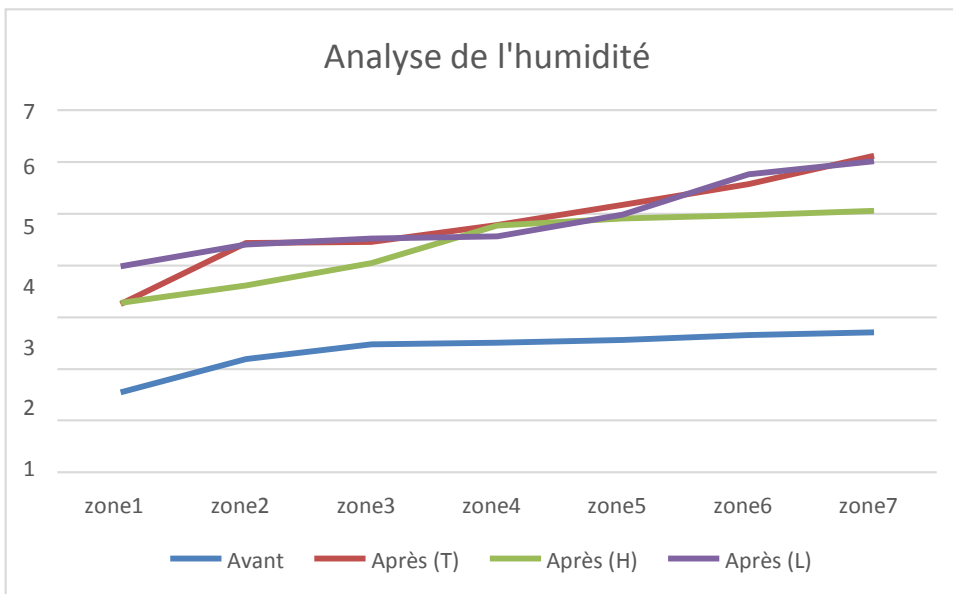


Figure 12: résultat de l'analyse de l'humidité

Le taux d'humidité augmente de la zone polluée jusqu'à la zone non polluée. Nous avons remarqué que les valeurs minimales ont été marquées dans la zone 1 et les valeurs maximales dans la zone 7. Le taux d'humidité du sol polluée avant la phytoremédiation est faible par rapport au sol après phytoremédiation.

Le test statistique révèle une P-value = 0,000002 donc significative. Il y'a 2 groupes homogènes : luzerne, témoin et haricot (groupe A) ; et avant traitement (groupe B)

Le tableau ci dessus représente les Groupes homogènes de l'analyse de l'humidité

Tableau 3 : groupes homogènes de l'analyse de l'humidité

	Traitement	Humidité	1	2
1	BPT	2,371429		****
3	APT-H	4,372857	****	
2	APT-T	4,822857	****	
4	APT-L	4,885714	****	

2.3. Quantité des hydrocarbures

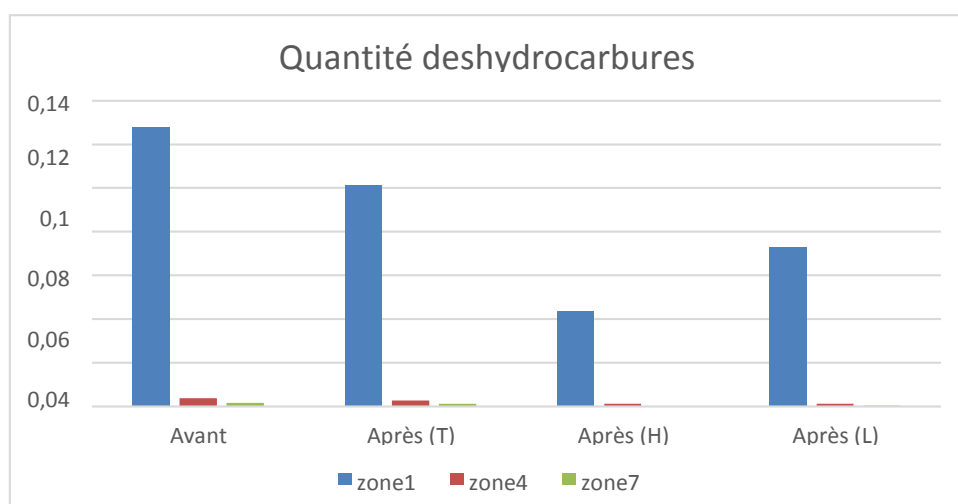


Figure 13: résultat de la quantité des hydrocarbures

D'après les résultats nous avons remarqué que la quantité des hydrocarbures dans les sols montre une décroissance de la zone 1 jusqu'à la zone 7. Les valeurs maximales des hydrocarbures ont été observées dans les zones du sol contaminé avant la phytoremédiation, après la phytoremédiation la quantité des hydrocarbures voient une diminution. La P-value = 0,90719 donc non significatives.

Nous remarquons que le haricot dolique permet une réduction plus importante des niveaux d'hydrocarbures par rapport à la luzerne. La phytoremédiation avec le haricot dolique serait de ce fait plus efficaces que la phytoremédiation par la luzerne.

2.4. Activité biologique

Les résultats du test de respiration exprimés en quantité de CO₂ dégagée dans les différents sols remédie et non remédie sont représentés dans la figure ci-dessous.

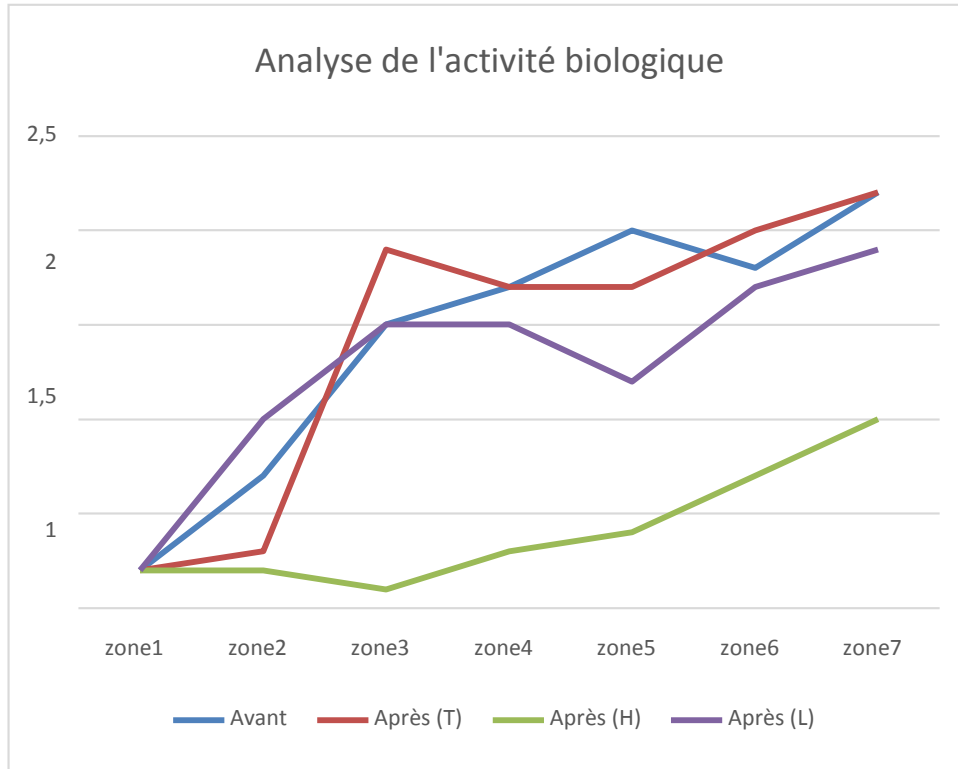


Figure14: résultat de l'activité biologique

Les résultats montrent que la quantité de dioxyde de carbone dégagé par le sol non remédie est plus élevée par rapport à celui remédie. Nous avons remarqué que les valeurs augmentent de la zone 1 jusqu'à la zone 7.

Le test statistique révèle une P-value = 0,0169 donc significative. Il y'a 2 groupes homogènes : luzerne, témoin et sol avant traitement (groupe A) et Haricot (groupe B).

Le tableau ci-dessous représente les Groupes homogènes de la respiration microbienne

Tableau 4 : groupes homogènes de la respiration microbienne

	Traitement	Acti-Biol	1	2
3	APT-H	0,414286		****
4	APT-L	1,285714	****	
2	APT-T	1,428571	****	
	BPT	1,442857	****	

3 .Germination et croissance

3.1 Haricot dolique

Les résultats du test de germination et de croissance pour le haricot dolique sont représentés dans la figure suivante. Les résultats sont exprimés pour différents paramètres, et ceci pour les différentes zones.

D’après les résultats, nous remarquons que les valeurs les plus basses ont été enregistré dans la zone1 pour tous les paramètres, avec une longueur aérienne de 9.75 cm, un poids racinaire de 0.47375 g, un poids aérien de 0.586g, une longueur racinaire de 1.78 cm, un nombre de feuille de 4, et un taux de germination de60%.

Les valeurs les plus élevés été marqué dans la zone 7 avec une longueur aérienne de 32 cm, un poids racinaire de 2.524g, une longueur racinaire de 5.18 cm, un nombre de feuille de 4.8, et un taux de germination de 100%.

Le graph ci-dessous représente les résultats du test de germination et de croissance pour le haricot dolique.

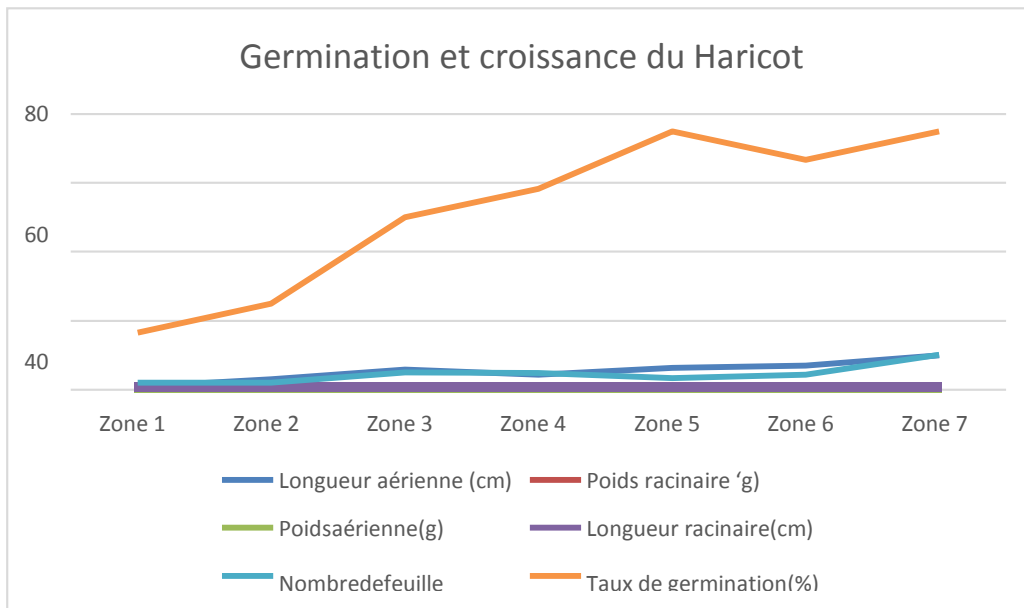


Figure15 : les résultats du test de germination et de croissance pour le haricot dolique

3.2. La luzerne

Les résultats du test de germination et de croissance pour la luzerne sont représentés dans la figure suivant. Les résultats sont exprimés pour différents paramètres, et ceci pour les différentes zones.

La figure ci-dessous représente les résultats du test de germination et de croissance pour la luzerne.

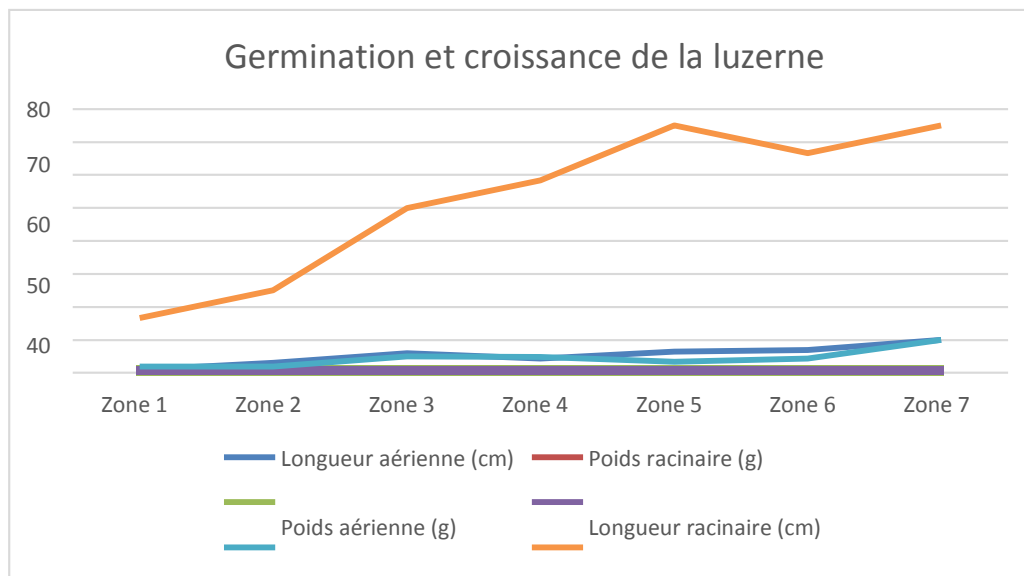


Figure16 : Les résultats du test de germination et de croissance pour la luzerne

Nous remarquons que les valeurs les plus basses ont été enregistrées dans la zone1 avec une longueur de 1 cm, un poids racinaire de 0.001g, un poids aérien de 0.007g, une longueur racinaire de 0.35 cm, un nombre de feuille de 2, et un taux de germination 16.66%.

Les valeurs les plus élevés ont été observé dans la zone 7 avec une longueur de 10.008 cm, un poids racinaire de 0.041g, un poids aérien de 0.82g, une longueur racinaire de 1.09 cm, un nombre de feuille de 10.08, et un taux de germination75%.

Le haricot dolique est plus tolérant à la contamination de sol par les hydrocarbures que la luzerne, en effet cette dernière est plus inhibé par la contamination que le haricot dolique.

Le test de corrélation révèle plusieurs corrélations significatives. Pour le haricot, une corrélation négative entre le taux d’hydrocarbures et la longueur aérienne et racinaire, et l’humidité, et une corrélation positive entre le taux d’hydrocarbure et le poids racinaire.

Pour la luzerne, une corrélation négative entre le taux d’hydrocarbure et la longueur racinaire et aérienne, le poids racinaire, la germination, la respiration, et le pH.

Tableau 5 : résultats du test de corrélation

	longueur aérienne (cm)	poids racinaire (g)	poids aérienne (g)	longueur racinaire (cm)	nombre feuilles	Germination (%)	Respiration	pH	humidité
hydrocarbure (haricot)	-0,88	0,83	-0,62	-0,83	-0,60	-0,31	-0,55	-0,71	-0,95
hydrocarbure (luzerne)	-0,82	-0,76	-0,49	-0,86	-0,58	-0,92	-0,92	-0,91	-0,70

Discussion

Le nombre total d'individus augmente en s'éloignant de la source de pollution, la zone 1 (la zone la plus proche de la source de pollution) étant plus pauvre en nombre d'individus. Des observations similaires ont été rapportées par d'autres travaux tels que Dazy et al (2009).

Plusieurs études telles que celles d'Adam et Duncan (2002) et Ogbo (2009) ont montré les effets négatifs de la contamination du sol par les hydrocarbures sur la croissance des espèces végétales.

La contamination a modifié la structure de la végétation dans toutes les zones ce qui correspond avec les résultats de Dib et al (2021). Plus en s'éloigne de la source de pollution, plus la densité de la végétation devient importante, le nombre d'individus total augmente avec l'éloignement de la source de pollution.

Chaîneau et al (1997) ont montré que la concentration élevée des hydrocarbures a un effet sur la physiologie de la végétation.

Concernant le pH, on distingue une légère acidification dans les premières zones, en s'approchant de la source de la pollution, qui sont marquées par le taux de pH le plus faible, cela a déjà été rapporté par les travaux de Chaîneau et al (1996), qui ont confirmé que parmi les effets des hydrocarbures sur le sol on constate une diminution du pH.

L'humidité augmente dans toutes les zones selon le gradient de pollution avec des valeurs différentes, contrairement aux résultats de **Bergue (1996)** qui a noté que le taux d'humidité augmente de 2% dans les sols pollués. Nos résultats convergent avec ceux de **Chikhaoui et Hettak (2019)** qui attestent que le taux d'humidité est plus important dans les zones non contaminées.

Nous avons remarqué qu'il y a une forte diminution du taux d'hydrocarbures après phytoremédiation. D'après **Morel (2002)**, la rhizosphère est un habitat favorable aux microorganismes capables de dégrader les composés organiques récalcitrants. Par effet direct, les exsudats augmentent les populations microbiennes et leur activité dégradante et induisent des processus de dégradation. Les plantes pourraient également déstocker le polluant en l'absorbant par les racines et en le transportant vers la partie aérienne. Les racines libèrent des enzymes, provoquant la fragmentation de certains agrégats qui sont alors plus facilement dégradés par les micro-organismes.

Concernant l'activité biologique nous avons remarqué une grande activité biologique dans les sols pollués par différentes concentrations, cela peut se traduire par le fait que les microorganismes indigènes se sont adaptés et sont capables de croître dans un tel sol pollué. Selon **Bauer et al (1991)**, **Boopathy (2000)**, **Labud et al, (2007)** in **Tejada et al (2008)**, une augmentation de la respiration du sol est probablement due au fait que les microorganismes du sol résistent à la toxicité des hydrocarbures et peuvent dégrader ces nouvelles substances.

Le taux de germination est plus élevé dans le sol traité par l'haricot par rapport à celui traité par la luzerne, selon **Chaineau (1977)**, la fraction légère des hydrocarbures induit une réduction assez significative de la germination. En outre, la germination est corrélée avec les propriétés hydrophobes des hydrocarbures qui empêchent et réduisent les échanges d'eau et de gaz. D'après **Udo et Fayemi (1975)** et **Chaineau et al., (1997)**, les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, atteindre et altérer les réactions métaboliques et tuer l'embryon au contact direct.

L'effet néfaste des hydrocarbures sur la biomasse aérienne est probablement dû à la perturbation de la nutrition hydrominérale du végétal, ainsi qu'à l'inhibition de la croissance racinaire qui peut mener à une basse absorption de l'eau ce qui induit une diminution du développement du végétal. La biomasse aérienne étant un critère de mesure du rendement au niveau d'un sol contaminé par les hydrocarbures, l'effet toxique des hydrocarbures sur la partie aérienne s'exprime par un retard significatif de la croissance. Ce retard se traduit par la réduction du poids sec (**Chaineau et al., 1997**).

Nous constatons que la présence des hydrocarbures dans le sol induit une réduction de la croissance racinaire. Ces résultats montrent que le milieu favorable pour la croissance des racines est le sol non contaminé où nous avons remarqué la présence d'un système racinaire très développé avec de nombreuses ramifications tandis que les cultures des sols contaminés comportent une partie racinaire moins développée et moins ramifiée. L'atteinte des racines peut être due au changement des propriétés du sol et/ou à la diminution des éléments nutritifs qui sont essentiels pour leur développement. **Chaineau et al. (1997)** ont montré que la concentration élevée du pétrole brut a un effet sur la physiologie du végétal.

Conclusion

L'objectif de notre travail est de tester l'efficacité de la phytoremédiation de sols contaminés par les rejets d'une station-service avec l'utilisation de la luzerne et du haricot dolique. Et aussi, d'observer les effets de la contamination sur la végétation, et sur diverses propriétés physico-chimiques et biologiques du sol. Nous nous sommes basé notamment sur des comparaisons entre différentes zones sur les terrains (plus ou moins proches de la source de contamination), et différents sols correspondant à ces zones, ainsi qu'un sol témoin non contaminé.

D'après les résultats obtenus au cours de notre travail, nous pouvons conclure que l'action des hydrocarbures se traduit par :

Une diminution du rendement végétal confirmée par : le taux de levée, la hauteur des plantes, le poids racinaire, nombre de feuilles, et la biomasse végétale. On constate que le haricot a mieux supporté cette concentration des hydrocarbures contrairement à la luzerne, dont quelques plants ayant poussé sont morts après leur levée et la croissance est faible.

Plusieurs points importants se dégagent de cette étude :

- Le sol de la luzerne présente un pH inférieur par rapport à l'haricot dolique.
- Le taux d'humidité du sol pollué avant la phytoremédiation est faible par rapport au sol remédié.
- Les résultats de la quantification des hydrocarbures indiquent qu'il y a une forte diminution du taux d'hydrocarbures après phytoremédiation.
- Le test de respiration montre que la quantité de dioxyde de carbone dégagée par le sol non remédié est plus élevée par rapport au sol remédié.
- D'après les résultats nous pouvons dire que le haricot dolique est plus tolérant à la contamination du sol par les hydrocarbures par rapport à la luzerne.

Ce travail nous a permis de montrer l'efficacité d'un traitement biologique qui est la phytoremédiation par le haricot dolique. En effet, des plantes telles que les légumineuses, ont une capacité de dépollution importante, en dégradant les hydrocarbures, grâce à un système racinaire bien développé, ce dernier induit des

Conclusion

changements des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, permettant ainsi l'amélioration de l'environnement microbien et un développement normal de la végétation.

En guise de perspective, nous recommandant d'effectuer des tests de phytoremédiation *in situ*, au niveau d'un site contaminé à proximité d'une station-service par exemple, et ceci, en utilisant le haricot dolique notamment.

Références bibliographiques

Abdelly C., 2006. Bioremédiation / phytoremédiation, Institut supérieur de l'éducation et de la formation continuer : SN232, p-p.6-8.

Adam, Gillian, & Duncan, H. (2003). The Effect of Diesel Fuel on Common Vetch (*Vicia Sativa* L.) Plants. *Environmental Geochemistry and Health*, 25(1), 123–130.

Atlas R. M., Philp J. (2005). Applied Microbial Solutions for Real-World Environmental Cleanup. 1 ère Édition. Washington.ASM Press:366p.

Barriuso E., Calvet R., Schiavon M., & Soulas G. (1996). Les pesticides et les Polluants organiques des sols. *Etude et gestion des sols*, 3(4) : 279-296.

Bergue, J.-M., & Mérienne, D. (1986). La pollution des sols par les hydrocarbures. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 146, 57–66.

Bert v., Deram a. (1999), Guide des phytotechnologies : utilisation des plantes dans la dépollution et la réhabilitation des sites contaminés par les métaux lourds, France, Environnement et Développement alternatif.

Bonneau M. et Souchier B., 1979 : Pédologie. Constituants et propriétés du sol. Ed MASSON. Paris. 459 p.

Buttler, A., 1992. Hydrochimie de nappes des prairies humides de la rive sud de lac de Neuchâtel. *Bull.Ecol.*, t.23 (3-4) pp 415-421.

Calvet R., 2003. Le sol. Tome1. Propriétés et fonction ; constitution et structure, phénomène et interface. Edition France agricole. 95-365.

Calvet R., 2003 : Propriétés et fonctions (tome1), constituants et structure, phénomènes aux interfaces. Edition France agricole. 455 p.

Carnicer P., Victoria M. (2007). La pollution ponctuelle des sols : Le Cas Des Stations-service Dans La Région De Bruxelles -Capitale. *Gestion de l'environnement. Université Libres Bruxelles* : 153.

Chaineau C.H., Morel J.L. et Oudot J., 1997. Phytotoxicity and plant Uptake of Fuel Oil hydrocarbons. *J. Environ. Qual.* Vol 26, pp : 1478-1483.

Cheverier E., 2013 : la phytoremediation, une solution d'avenir pour la Quebec.Memoire en Vue de l'obtention du grade de maitre de l'environnement (M. Env), universitaire IHERBOOKE.P15-22.

Clément M., Pieltain F., (2003). Analyse chimique du sol. Edition TEC&DOC ,387p.

Références bibliographiques

- Dajoz R., 2000.** Précis d'écologie. Ed. DUNOD. Paris. 542p.
- Darmendrail, D., Conil, P., Bodéan, F., Fauconnier, D. and Hubé, D. (2001).** Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. BRGM éditions, 300, 132 p.
- Deprince A., (2003).** La faune du sol : diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives. Le courrier de l'environnement, n°49, juin 2003.
- Dizzy, M., Béraud, E., Cotelle, S., Grévillet, F., Férard, J.-F., & Masfarau, J.-F. (2009).** Changes in plant communities along soil pollution gradients: Responses of leaf antioxidant enzyme activities and phytochelatin contents. *Chemosphere*, 77(3), 376–383.
- Fattal P., 2008.** Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Rennes.498 p.
- Fokou Mbogne PM.,2017.** Bioremédiation augmenté des sols contaminés aux hydrocarbures lourd par ajout de substrat organique. Mémoire de master.génie de l'environnement. Université de Québec,109p.
- Ghosh M., Snigh S.2005.** A review on phytoremediation of heavy metals and Utilization of it's by products. *Asian Jenergy*.Vol.6. N°4,18p.
- Gobat j M., Aragono M. et Matthey W., 2003.** Le sol vivant Ed. LAUSANNE. 569p.
- Gobat j m, Aragno m et Matthey w, 2010.** Le sol vivant bases de pédologie–biologie des sols (3eme Ed.). Presses polytechniques et universitaires romandes, p 51 53 62.
- Gobat J.M et Aragno M et Matthey W., 2013.** *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Troisième édition*, Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 15 octobre 2013, 848p.
- Hassaine, A. (2016).** Biodégradation des Hydrocarbures (Pétrole brut et Kérosène) par la Microflore Microbienne des Eaux de la région de Skikda. Thèse de doctorat : Biologie végétale. Algérie : Université Badji Mokhtar – Annaba ,189 Paris. 284p.
- Koller E., 2004.** Traitement des pollutions industrielles. Edition DUNOD Paris. 277- 347-424p.569p
- Koller E., 2009.** Traitements des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues. Edition Dunod, Paris. 569p
- Kumar, A. (2017).** Soil pollution–major sources and types of soil

Références bibliographiques

polluants. Environmental science and engineering. Soil pollution and phytoremediation,11: 53-86.

Lemiere B., Jeannot R., et Chiron S., 2001. Guide méthodologie pour l'analyse des sols pollués. Edition BRGM. 12p.

Luhach, J., & Chaudhry, S. (2012). Effect of diesel fuel contamination on seed germination and growth of four agricultural crops. Universal Journal of Environmental Research and Technology, 2(4), 311–317.

Lumiere B. Seguin JJ. , Guyonet D., Branger ,2001 . . , guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes .BRGM / RP, P 99.

Okrent D. (1999). Une équité intergénérationnelle et son conflit avec l'équité Intergénérationnelle et sur la nécessité de politiques pour guider la réglementation de L'élimination des déchets et d'autres activités présentant des risques à très long

Pilon-smits.e.,2005.Phytoremediation. Annu.Rev. Plant Biol.Vol.56, 39p

Rolland, P., 1988.Le système des grandes tourbières équatoriales. Ann. Géographie N°97 (544). Pp 942-666.

Shimp j.f., tracy j.c., davis l.c., lee e., huang w., Erickson l.e., schnoor j.l.(1993). Beneficial effects of plants in the remediation of soil and groundwater contaminated with organic materials. Critical reviews in environmental science and technology.vol.23. N1, 77p.

Soltani M., 2004. Distribution liquide et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram Négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de Doctorat de l'université paris 6, spécialité chimie analytique. 284P

Vanobberghen., la phytoremediation en Wallonie : évaluation du potentiel D'assainissement du sol contaminé en métaux lourds. Mémoire de master en Science et Gestion de l'environnement. Universitaire de Bruxelles. P48-53.

Résumé

L'un des principaux problèmes environnementaux est la pollution du sol par les hydrocarbures. Ces derniers constituent une menace très sérieuse pour l'environnement.

Notre travail a pour objet de tester l'efficacité de la phytoremédiation sur la décontamination d'un sol polluée par les hydrocarbures, les échantillons sont prélevés dans la station-service « AILAM » dans la région Fréha Tizi Ouzou. Les paramètres étudiés sont : pH, humidité, la quantification des hydrocarbures, la catalase, l'activité biologique, et le test de la germination. Les résultats obtenus ont montré que les hydrocarbures ont un effet négligeable et un rôle important dans la modification des paramètres du sol qui est marqué par la diminution de certains tels que pH, et l'augmentation d'autres comme l'humidité.

Les résultats aussi ont montré que l'haricot dolique et la luzerne ont pu résister à la toxicité des hydrocarbures. Ces derniers sont très efficaces pour dépolluer l'environnement contaminé aux hydrocarbures.

Mots clés : hydrocarbures, phytoremédiation, pollution

Abstract

One of the main environmental problems is soil pollution by hydrocarbons. Hydrocarbons pose a serious threat to the environment. The aim of our work was to test the effectiveness of phytoremediation using cowpeas and alfalfa on hydrocarbon-polluted soil. Soil samples were taken from gas station in the Fréha region (Tizi-Ouzou). The soil was analyzed for pH, moisture, hydrocarbon quantification and biological activity. We also measured germination and growth parameters during the phytoremediation test. The results obtained showed that hydrocarbons play an important role in modifying soil parameters, marked by a decrease in the values of certain parameters such as PH, and an increase such as moisture.

The result also showed that cowpea and alfalfa were able resist hydrocarbon toxicity. The latter are effective in cleaning up hydrocarbon contaminated environments.

Key Words: hydrocarbons, phytoremediation, pollution.