

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES BIOLOGIQUES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
Département d'Ecologie et Environnement**



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Ecologie et Environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

Thème

**Etude de l'efficacité de quelques plantes
ornementales dans la phytoremédiation
d'un sol pollué aux carburants**

Présenté par :

BILEK Rebiha

AMOKRANE Fatma

Devant le jury composé de :

Présidente : M^{me} ALI AHMED D

Professeur

U.M.M.T.O

Promotrice : M^{me} CHIBANE G

M.A.A

U.M.M.T. O

Co-promotrice: M^{me} ALI AHMED S

M.C.B

U.M.M.T.O

Examineur: M^r SADOU S

M.C.B

U.M..M.T.O

2024 / 2025

Remerciement

*Nous remercions tout d'abord **Dieu** le Tout Puissant pour nous avoir données la santé, la force, le courage et la volonté pour mener à terme ce travail. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice,*

***M^{me} CHIBANE G.** ainsi notre Co-promotrice*

***M^{me} ALLI AHMED S.,** pour leur encadrement scientifique, leur précieuses orientations, leur soutien et encouragements et leur souci de mener à bien ce travail. Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury ; la présidente et l'examineur qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail. **M^{me} MANSOUR M** pour son aide dans sa disponibilité pour l'identification et sa gentillesse. Nous n'oublions pas nos enseignants qui nous ont ouvert les portes du savoir tout au long de notre cursus universitaire et contribué à notre réussite.*

Enfin, nous adressons un grand merci à nos familles et à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail et à tous ceux qui nous ont apporté leur aide.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes parents mon très chère père malgré son absence mais c'est la source de ma force à chaque fois que je la ressens A ma très chère mère pour son amour, ça patience, son soutien, ses encouragements tout au long de mon parcours.

A mon cher frère ; Ramdane A mes chers sœurs Djoudjou, Hassina, Samira, Noria, Rezika source de force de courage qui m'a aidée à faire ce travail malgré beaucoup d'obstacles ainsi qu'à leurs enfants, Malicia, Anaëlle, Massyl, Sylyan, Nayla source de joie et de bonheur.

A ma famille, cousines copines source d'espoir et de motivation.

Je dédie mon travail à mon super chat minoche

Je dédie ce travail à ma binome Fafa (fatma) qui m'a aidée et donnée de courage et de motivation pour arriver à notre objectif de réussir notre parcours universitaire

A nos honorables enseignants. A tous nos amis. A tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail A mes parents mon très chère père et ma très chère mère pour leur amour, leur patience, leur soutien, leurs encouragements tout au long de mon parcours.

A mes chers frères; Said, Kamel, Boudjemaa, Sofiane

A mes chers sœurs Karima, Naima source de force de courage qui m'a aidée à faire ce travail malgré beaucoup obstacle ainsi qu'à leurs enfants, Aris, Eline, Dalia source de joie et de bonheur.

A ma famille, cousines copines source d'espoir et de motivation.

A A.H ma source de force et de motivation

Je dédie ce travail à ma binome BILEK (biha) qui m'a aidée et donnée de courage de motivation pour arriver à notre objectif de réussir notre parcours universitaire

A nos honorables enseignants. A tous nos amis. A tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

Table de matière

Liste des tableaux

Listes des figures

Listes des abréviations

Introduction.....	01
1. Pollution du sol par les hydrocarbures	03
1.1 Définition les hydrocarbures.....	03
1.2 Classification des hydrocarbures	03
1.3 Source de pollution du sol par les hydrocarbures.....	04
1.3.1 Sources naturelles	04
1.3.2 Sources anthropiques	04
1.4 Devenir des hydrocarbures dans le sol	04
1.4.1 Dégradation.....	05
1.4.1.1 Dégradation abiotique	05
1.4.1.2 Dégradation biotique.....	05
1.5 Impacts des hydrocarbures	06
2 Techniques de décontaminations du sol	06
2.1 Traitement abiotique	06
2.2 Traitements biologiques.....	07
2.2.1 Phytoremédiation	07
2.2.2 Mécanismes de la phytoremédiation	07
3 Généralités sur les plantes ornementales	09
3.1 Utilisation des plantes ornementales dans la phytoremédiation	09
3.2 Classification de quelques espèces d'intérêt écologique.....	09
3.3 Quelques travaux sur la phytoremédiation par les plantes ornementales	11
1 Présentation et situation géographique de la station-service de Fréha.....	12
2 Matériel	13
2.1 Sol.....	13
2.2. Matériel végétal.....	13
2.3. Les vers de terre	13
3 Méthodes	13
3.1 Echantillonnage du sol	13
3.2 Mise en place de l'essai.....	14
3.3 Analyse microbiologique du sol.....	15
3.3.1 Préparation de milieu pour les bactéries (gélose nutritive)	15
3.3.2 Préparation de l'eau physiologique	15
3.3.3 Préparation de milieu PDA (Potato Dextrose Agar).....	15
3.3.4 Préparation de la solution mère	15
3.3.4.1 Préparation des suspensions dilutions	15
3.3.4.2L'ensemencement sur un milieu solidifié en boîte de Pétri.....	16
3.3.4.3Dénombrement des colonies bactériennes	17
3.3.4.4 Identification des champignons	17
3.4 Evaluation de paramètres physiologiques.....	17
3.4.1 Nombre de feuille	17

3.4.2	Biomasse végétale	17
3.4.3	RWC (Relative water content) ou teneur relative en eau	17
3.5	Evaluation de la dégradation et l'efficacité de la décontamination du sol	18
3.5.1.	Activité biologique globale	18
3.5.2	Activité de catalase (CAT).....	19
3.5.3	Extraction, dosage et caractérisation des hydrocarbures	20
3.5.3.1	Détermination de la quantité d'hydrocarbures	20
3.5.3.2	Analyse qualitative des hydrocarbures	21
3.5.4	Tests d'écotoxicité	21
3.5.5	Test de toxicité sur les vers de terre	21
3.6	Analyse statistique	21
1	Résultats.....	22
	Paramètres microbiologiques.....	22
1.1.1	Dénombrement des bactéries	22
1.1.2	Identification des champignons	22
1.2	Paramètres physiologiques	23
1.2.1	Nombre de feuilles.....	23
1.2.2	Biomasse végétale	24
1.2.3	teneur relative en eau (RWC)	24
	Dégradation des hydrocarbures	25
1.3.1	Activité biologique globale.....	25
1.3.2	Activité de la catalase	26
1.3.3	Analyse quantitative d'hydrocarbures	26
1.3.3.1	Dans les sols.....	26
1.3.3.2	Dans les plantes.....	27
1.3.4	Analyse qualitative d'hydrocarbures aromatiques.....	27
1.3.4.1	Dans le sol.....	28
1.3.4.2	Dans les plantes.....	29
1.4	Test de toxicité.....	29
1.4.1	Test de germination.....	29
1.4.2	Test de toxicité sur les vers de terre	30
	Discussion.....	30
	Conclusion	34

Référence bibliographique

Annexes

Liste des tableaux

Tableau 1 : classification des espèces ornementales	10
Tableau 2 : quelques plantes ornementales utilisées en phytoremédiation	11
Tableau 3 :la composition des hydrocarbures dans le sol	28
Tableau 4 :la composition des hydrocarbures dans les plantes des 4 espèces.	29

Liste des figures

Figure 1 : Devenir des polluants dans le sol (Maes et al., 2007)	05
Figure 2 : Mécanismes de la phytoremédiation au sein de la plante (Maes et al., 2007).	08
Figure 3 : Localisation du site d'étude (Google earth,2024)	12
Figure 4 : Méthode d'échantillonnage	14
Figure 5 : Dispositif expérimental de la culture en pots des plantes ornementales des quatre espèces.....	14
Figure 6 : Schéma récapitulatif de l'ensemencement et de l'incubation	16
Figure 7 : Boîtes Pétries ensemencées.....	17
Figure 8 : compteur de colonies	17
Figure 9 : protocole de mesure de la RWC.....	18
Figure 10 : Dispositif du test respirométrique	19
Figure 11 : Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol.....	19
Figure 12 : Protocole de l'Activité de catalase (CAT)	20
Figure 13 : protocole de l'extraction des hydrocarbures.	20
Figure 14 : Dénombrement des bactéries avant et après phytoremédiation	22
Figure 15 : Identification de quelques espèces de champignons sous microscopes grossissement (Gx40)	23
Figure 16 : Nombre des feuilles des quatre espèces végétales.	23
Figure 17 : biomasse aérienne et racinaire des quatre espèces	24
Figure 18 : Teneur relative en eau des quatre espèces végétales.....	25
Figure 19 : production cumulée de CO2 dans les différents sols	26
Figure 20 : L'activité de catalase.....	26
Figure 21 : Quantité d'HC totaux dans les sols cultivés et non cultivé	27
Figure 22 : Quantité des HC totaux dans les plantes des quatre espèces végétales.....	27
Figure 23 : taux de germination des graines de maïs dans différents sols	30
Figure 24 : taux de mortalité des vers de terre dans les différents sol.....	30

Liste des abréviations

HC : hydrocarbures

HA : hydrocarbures aromatiques

HAP : hydrocarbures aromatique polycyclique

AL : *Aloe vera*

CH: *Chlorophytum comosum*

KA: *Kalanchoe fedtschenkoi*

ZE : *Tradescantia Zebrina*

ST : sol témoin

SI : Sol initial

RWC : Relative water content

NF : Nombre de feuille

ABG : Activité biologique globale

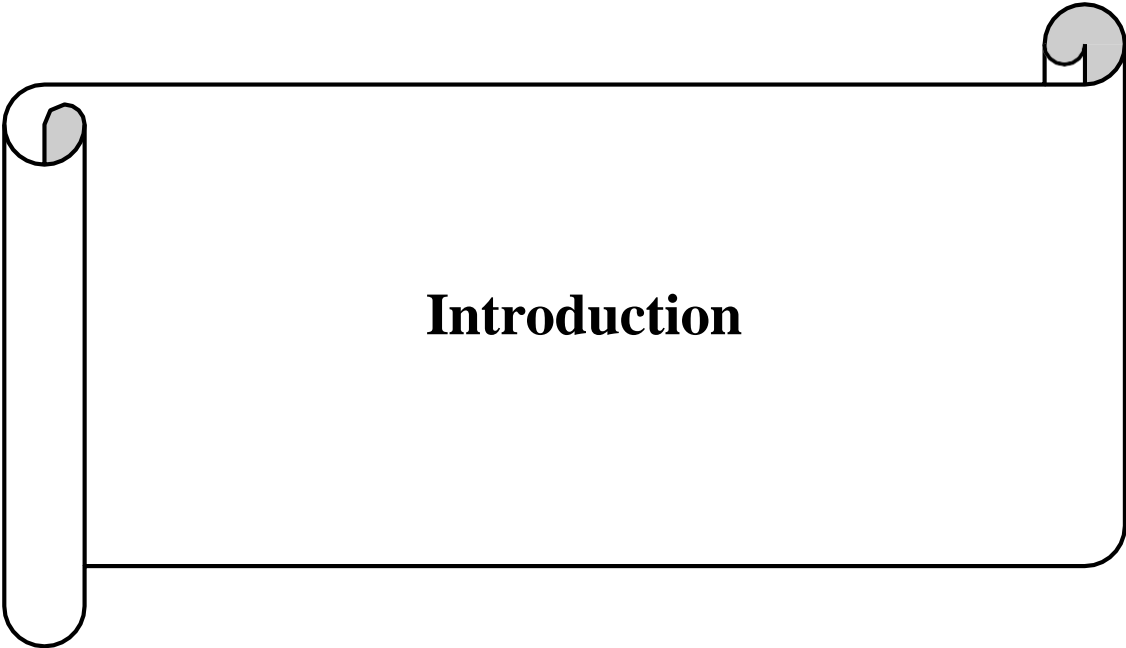
QC : Activité de catalase

BA : Biomasse aérienne

BR : Biomasse racinaire

TG : taux germination

TM : taux mortalité



Introduction

La pollution est une problématique majeure qui touche de nombreux pays en raison de ses multiples conséquences néfastes. Elle se définit comme les rejets d'origine humaine dans l'air, le sol et l'eau. Elle constitue une menace existentielle pour la santé humaine et l'environnement. La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollution touchant n'importe quel type de sol (agricole, forestier, urbain...). Un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, via l'eau, les envols de poussières et transfert de polluants par des organismes vivants (bactéries, champignons, plantes à leur tour mangés par des animaux). Il est une ressource très faiblement renouvelable au sens où, après sa dégradation, il lui faut plusieurs milliers d'années pour se former et se régénérer (BELLIR., 2013).

La pollution des sols peut être d'origine naturelle ou liée aux activités anthropique telles que l'industrie chimique et métallurgique, activité pétrolière, minière et agriculture. Les composés organiques, principalement apportés par l'homme, sont également retrouvés dans les sols, notamment les hydrocarbures (hydrocarbures aromatiques polycycliques), solvants halogénés comme le trichloréthylène, composés organiques volatiles (Anonyme, 2014). La présence de plusieurs stations-service est une source important de la pollution du sol, telles que (les fuites des installations ou de corrosion des réservoirs de stockage) (Colin, 2001). Les hydrocarbures entraînent une diminution des éléments nutritifs et altèrent la qualité du sol, ce qui rend les cultures plus sensibles et inhibe la germination (Dib, 2021).

De nombreuses techniques physiques, chimiques et thermiques ont montré leur efficacité dans la décontamination des surfaces polluées par les hydrocarbures. Certaines aboutissent même à la destruction de ces polluants, mais elles sont très coûteuses et ne préservent pas la qualité du sol, d'où l'intérêt de l'utilisation des techniques biologiques, qui sont peu coûteuses et protectrices de l'environnement (Koller, 2004). La phytoremédiation fait partie des techniques de base appliquées dans les procédés biologiques, car elle peut être appliquée *in situ*, ce qui constitue un avantage. Elle est également applicable sur une large surface (Bento et al., 2005). La phytoremédiation repose en grande partie sur les interactions entre les plantes et les microorganismes présents dans la rhizosphère. Divers microorganismes tels que les bactéries, les champignons et les levures dans la rhizosphère dégradent les hydrocarbures pétroliers. Ce processus, appelé rhizodégradation, permet une biodégradation efficace des polluants organiques. Certaines espèces de champignons possèdent une résistance et un pouvoir de bioaccumulation remarquables de certains polluants (Siciliano et al., 2003).

Plusieurs études ont mis en évidence l'efficacité des légumineuses comme la fève et le haricot dans la phytoremédiation des sols pollués (Belcacem et Rouas, 2012 ; Zerrouki et Ouhadda, 2013

; Bourkache et Boussenou, 2015 ; Slimani, 2015 ; Ben Kherfia, 2020 ; Labani et Kolli, 2021), Cependant, bien que les fruits et graines de ces espèces soient consommables, leur emploi dans la phytoremédiation des sols contaminés risque d'entraîner un transfert des hydrocarbures. L'utilisation d'autre espèces telles que les plantes ornementales qui pourraient être une solution à ce problème. Comme ces espèces ne sont pas destinées à la consommation, elles ne posent aucun danger de bioamplification des polluants, car elles ne font pas partie de la chaîne alimentaire (Rocha, et al, 2022).

Dans le cadre de ce mémoire, quatre espèces ornementales ont été étudiées *Aloe vera*, *Chlorophytum comosum*, *Kalanchoe fedtschenkoi* et *Tradescantia zebrina*. Ces plantes ont été sélectionnées afin d'évaluer leur comportement en situation de stress polluant, ainsi que leur aptitude à dépolluer le sol. Par ailleurs, l'étude a inclut le dénombrement des bactéries présentes dans la rhizosphère de chaque espèce, ainsi que l'identification des champignons associés, dans le but de mieux comprendre les interactions entre ces plantes et la microflore du sol.

Le mémoire se compose de trois chapitres.

Le premier est une synthèse bibliographique portant sur la pollution des sols par les hydrocarbures, les plantes ornementales et la phytoremédiation.

Le deuxième chapitre consiste à présenter la station d'étude ainsi que le matériel utilisé, et les protocoles mis en œuvre pour réaliser ce travail.

Le troisième est consacré à la présentation des résultats obtenus et à leur interprétation et discussion.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et des perspectives de recherche.



Chapitre I
Synthèse Bibliographique

1. Pollution du sol par les hydrocarbures

Dans les zones d'exploitation pétrolière, le sol fait souvent l'objet de contaminations par les hydrocarbures (Boufiane, 2015).

La pollution par les hydrocarbures (pétrole, essence, gasoil, huiles pour moteurs, etc.) est très importante. Elle est majoritairement accidentelle ou d'origine industrielle, due à des rejets volontaires ou non de produits pétroliers. Elle relève à la fois de la pollution chimique et de la pollution organiques (Koller, 2004).

1.1 Définition les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques qu'on trouve dans les ressources fossiles en très grande quantité (pétrole, gaz naturel). Ils servent à la production d'une vaste gamme de produits industriels (les carburants, solvant, alcool, etc.) et constituent un groupe de produits chimiques organiques de structure très variée. Ils sont constitués uniquement de carbone et d'hydrogène. Les hydrocarbures ou les huiles minérales regroupant différents produits pétroliers allant du pétrole brut aux produits raffinés comme le kérosène, les essences, les fuels, les lubrifiants et les huiles de moteur. On peut les trouver sous forme d'énergie fossile, ce qui fait d'eux une ressource énergétique assez importante pour l'économie des pays, notamment pour alimenter certaines industries et certains secteurs professionnels (Picot et Montando, 2013).

1.2 Classification des hydrocarbures

Selon la nature des hydrocarbures, on distingue les hydrocarbures aliphatiques, des hydrocarbures aromatiques et cycliques et alicycliques (Colombano et *al.*, 2010).

1.2.1 Hydrocarbures aliphatiques

La famille des hydrocarbures aliphatiques comprend des composés saturés ou non.

Les alcanes, également appelés hydrocarbures saturés, se distinguent par l'existence de liaisons simples entre les atomes de carbone. Il existe deux catégories d'hydrocarbures non saturés, les alcènes et les alcynes, qui se distinguent par la présence d'au moins d'une liaison double ou triple entre deux atomes de carbone, respectivement (Milton, 2007).

1.2.2 Hydrocarbures aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques sont des polluants organiques persistants dont les sources sont diverses. Ils présentent une faible capacité de dissolution. On retrouve plusieurs familles d'hydrocarbures aromatiques dans les huiles brutes. De manière générale, les hydrocarbures aromatiques sont moins présents que les alcanes et ne composent que 10 à 30 % du total des hydrocarbures dans un brut pétrolier (Soltani, 2004)

1.2.3 Hydrocarbures alicycliques et cycliques

Il s'agit de composés possédant une structure cyclique au niveau de leur chaîne carbonée.

Les hydrocarbures alicycliques peuvent aussi être saturés ou présenter une ou plusieurs liaisons doubles. Toutefois, la configuration cyclique ne s'accorde pas avec les triples liaisons en raison de leur forme linéaire, sauf si la molécule comprend au moins 8 atomes de carbone (cyclines) (Arnaud, 2004).

1.3 Source de pollution du sol par les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont émis dans le sol par des processus naturels ou anthropiques.

1.3.1 Sources naturelles

Les sources les plus importantes sont les prairies et les feux de forêt. Il existe d'autres sources telles que les volcans, l'érosion des roches, les fuites des réservoirs naturels ainsi que la production d'hydrocarbures par les végétaux supérieurs ou par les algues (Gerard, 2005).

1.3.2 Sources anthropiques

Les hydrocarbures présents dans le sol sont le résultat de la pollution liée au pétrole (extraction, raffinage, transport), de l'industrie pétrochimique, des usines gazières, ainsi que de certaines industries chimiques ou mécaniques. Les stations-services, notamment, sont une source importante de pollution du sol en raison des fuites d'hydrocarbures qui peuvent survenir lors du remplissage des cuves de stockage ou lors de la distribution du carburant. Ces déversements peuvent se produire suite à une rupture dans les réservoirs ou les conduites reliant les citernes aux pompes. Il s'agit d'une pollution occasionnelle (Colin, 2000).

1.4 Devenir des hydrocarbures dans le sol

Le devenir et le transport d'un contaminant (fig.1) est contrôlé par les propriétés physico-chimiques du composé lui-même, mais également par la nature et la composition du milieu dans lequel le composé est en migration (Saada et *al.*, 2005)

1.4.1 Volatilisation

Elle correspond au transfert des composés volatils plus légers vers l'atmosphère (Neff et *al.*, 2000). Cette évaporation dépend des conditions climatiques et du type d'hydrocarbures. En général, plus la vitesse du vent et la température ambiante sont élevées, plus volatilisation est rapide, ce qui permet de diminuer la concentration des contaminants dans le milieu. Néanmoins, la volatilisation n'est jamais destructive (Saada et *al.*, 2005)

1.4.2 Solubilisation :

Les hydrocarbures sont des composés insolubles dans l'eau, les plus légers d'entre eux sont plus solubles par rapport aux lourds. Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles

Sont parmi les plus dangereux pour l'environnement ; ils sont difficiles à éliminer et sont absorbés par la faune et la flore (Soltani, 2004).

1.4.3 Sorption

Les polluants restant en phase gazeuse ou en solution après leur pénétration dans le sol et en fonction de leurs solubilités, leur structure moléculaire ainsi que leur groupe fonctionnel seront fixés par la phase solide du sol (Koller, 2009).

1.4.4 Dégradation

La biodégradation est le processus naturel le plus important dans la dépollution de l'environnement (Soltani, 2004). Les microorganismes utilisent les hydrocarbures comme source de carbone pour produire de l'énergie. La biodégradation microbienne complète des hydrocarbures produit du dioxyde de carbone, de l'eau, et de l'énergie pour la construction de la biomasse (Ali Ahmed, 2011).

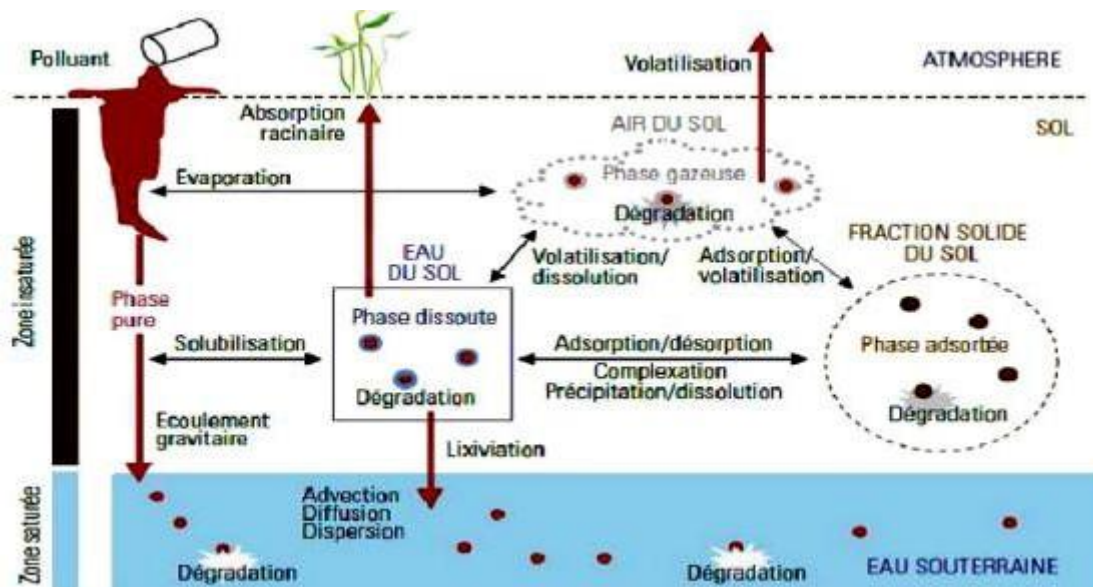


Figure 1 : Devenir des polluants dans le sol (Maes et al., 2007).

1.4.4.1 Dégradation abiotique

La dégradation abiotique des hydrocarbures se fait par divers phénomènes physiques et chimiques comme la photolyse qui est dégradation par lumière et l'hydrolyse, une réaction entre l'eau et les hydrocarbures. Dans ce processus, les microorganismes n'interviennent pas.

1.4.4.2 Dégradation biotique

La biodégradation des hydrocarbures se réalise dans des environnements aérobies et anaérobies grâce à l'action des micro-organismes, principalement des bactéries et/ou des champignons qui décomposent les constituants du pétrole pour se nourrir (Savadogo et al., 1999)

1.5 Impacts des hydrocarbures

La présence des hydrocarbures dans l'environnement a des effets néfastes sur le sol et la végétation ainsi que sur la santé humaine.

1.5.1 Impacts sur le sol

La contamination du sol par les hydrocarbures a des effets sur ses caractéristiques biologiques, chimiques et physiques et entraîne une diminution des éléments nutritifs, de la productivité et production végétale du sol. Ainsi, des produits pétroliers comme le diesel, par exemple, peuvent provoquer une modification des propriétés du sol (humidité, pH, CEC, rapport C/N et teneur en azote et en soufre) altérant de cette façon la qualité du sol (Dib, 2021).

Les populations microbiennes sont inhibées, même si certains microorganismes peuvent augmenter leur activité métabolique dans de telles conditions. Les effets dépendent de plusieurs facteurs, tels que les propriétés du sol et le type de contaminant (Dib, 2021).

1.5.2 Impacts sur la végétation

Les hydrocarbures ont un impact direct sur la végétation rendant les cultures plus sensibles et perturbant le métabolisme des plantes (Doumont et Libion, 2006).

Cette pollution provoque une inhibition de la germination des graines et/ou de la croissance végétative qui a un impact négatif sur le rendement (Koller, 2004).

1.5.3 Impacts sur la santé

Les hydrocarbures sont susceptibles d'induire l'apparition des maladies, telles que les cancers des poumons et de la peau qui peut être développé par différentes voies d'exposition (inhalation, ingestion ou par contact) (Ramade, 1992).

2 Techniques de décontaminations du sol

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. Ils peuvent être physiques, chimiques, thermiques et biologiques (Cadiere, 2006).

2.1 Traitement abiotique

Le traitement abiotique des sols pollués par les hydrocarbures comprend des méthodes non biologiques pour éliminer ou réduire les hydrocarbures. Sont présentés comme suite :

Les Méthodes physiques sont des techniques qui sont mises en œuvre, transfèrent les polluants sans les modifier ni les détruire. Les procédés les plus couramment utilisés est l'extraction, lavage (Colin, 2000) par ailleurs, les méthodes chimiques visent à détruire les polluants ou à les transformer en une forme moins nocive pour l'environnement en les faisant réagir

Chimiquement avec des réactifs ajoutés. Enfin, le traitement thermique souvent utilisé pour la purification ex-situ des sols contaminés par des matières organiques facilement oxydables (Colin, 2000).

2.2 Traitements biologiques

Ce sont des traitements qui consistent à utiliser des organismes supérieurs ou des micro-organismes du sol (champignons, bactéries, algues, 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 est une opération qui permet de détruire ou de rendre moins toxique le polluant, en utilisant l'activité biologique naturelle. (Abdelly, 2006).

2.2.1 Phytoremédiation

La phytoremédiation est une technique qui utilise les plantes et les microorganismes qui sont associés pour traiter la pollution environnementale. Il s'agit d'un ensemble de techniques *in situ* qui exploitent les propriétés de certaines espèces végétales (herbes, arbustes, arbres, algues) afin d'extraire, dégrader ou immobiliser les contaminants présents dans les sols, les sédiments, les boues, les eaux de surface ou souterraines, ainsi que dans l'air (Pilon-Smits, 2005). La phytoremédiation est une alternative écologique, paysagère et financièrement intéressante aux méthodes traditionnelles de dépollution. Cette technique constitue une véritable biotechnique végétale fondée sur la capacité des plantes à bloquer ou extraire les polluants, favorisant ainsi la réhabilitation des terrains contaminés (Origo, 2012).

2.2.2 Mécanismes de la phytoremédiation

Plusieurs mécanismes sont utilisés par les plantes dans le but de faciliter la décontamination des sols pollués (fig.2).

2.2.2.1 Phytostabilisation

Elle se définit par l'usage de la végétation pour contenir les contaminants du sol *in situ*, avec la modification des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol. Cette technique de remédiation est particulièrement indiquée dans des zones vastes contaminées caractérisées par une forte phytotoxicité (Bolan, 2011).

Le but de cette technique est de piéger les éléments toxiques dans les plantes en augmentant leur bioaccumulation, cela est possible car les plantes développent la capacité de stocker les éléments polluants dans des cellules racinaires, au niveau de la zone de contact avec le sol.

2.2.2.2 Phytoextraction (phytoaccumulation)

La phytoextraction diffère de la phytostabilisation car les polluants ne sont pas stockés dans les racines, mais dans d'autres parties de la plante (feuilles, tige et bois). Il est à préciser que les

Végétaux ne stockent pas tous les polluants dans ces organes. Certaines les stockent dans les feuilles ou/et dans leur bois. Pour que cette technique soit efficace, il faut que le polluant soit disponible pour les racines et que celles-ci puissent le tolérer et l'absorber (Koller, 2004).

2.2.2.3 Phytovolatilisation

Cette technique est basée sur l'utilisation des plantes ayant la capacité d'extraire les polluants du sol. Les plantes ne stockent pas les polluants dans leurs tissus, mais elles les renvoient dans l'environnement par évapotranspiration via les stomates des feuilles (Vanobberghen, 2010).

2.2.2.4 Phytodégradation (phytotransformation)

La **phytodégradation** est un **processus de phytoremédiation** dans lequel les plantes utilisées ne pas la capacité de stocker les polluants dans leurs organismes, mais sont capables de dégrader les polluants organiques à l'intérieur des cellules de leurs appareils aérienne et racinaire. Grâce à la phytodégradation, les plantes employées absorbent les molécules nocives et les dégradent en composés moins toxiques (Ouvrard et *al.*, 2012)

2.2.2.5 Rhizodégradation

La rhizodégradation désigne la dégradation des contaminants, pour la plupart organiques, sous l'action des racines et des micro-organismes associés. L'efficacité de cette méthode repose donc sur l'activité microbienne présente au niveau de l'appareil racinaire et dont but est de dégrader les polluants en substances moins toxiques afin de les réintégrer dans les cycles naturels (Sterckeman et *al.*, 2011).

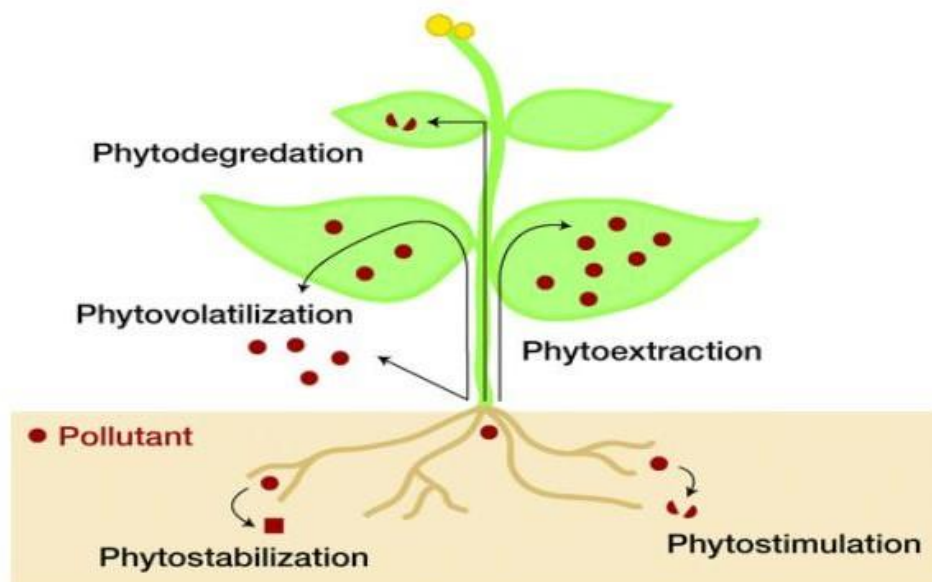


Figure 2 : Mécanismes de la phytoremédiation au sein de la plante (Maes et *al.*, 2007).

3 Généralités sur les plantes ornementales

Les plantes ornementales sont des végétaux d'agrément cultivés qui enrichissent la qualité de la vie humaine et jouent un rôle important dans l'industrie ornementale. Elles sont commercialisées à des fins décoratives pour leurs caractéristiques esthétiques. Ces plantes sont également appelées plantes de jardin car on les trouve dans les jardins et les aménagements paysagers, intérieurs ou extérieurs (Site web 01).

3.1 Utilisation des plantes ornementales dans la phytoremédiation

Les plantes ornementales sont des solutions de traitement moins coûteuses des eaux et des sols que les infrastructures traditionnelles. Certaines plantes utilisées en phytoremédiation sont efficaces pour éliminer les contaminants du sol et des masses d'eau de façon rétroactive. Ces espèces parviennent à éliminer rapidement les contaminants en raison de leur court cycle de croissance (Rocha et *al.*, 2022).

L'accès à l'eau et aux nutriments minéraux est indispensable pour la croissance des plantes. L'absorption de l'eau se fait par le système racinaire. Contrairement à la culture sous serre. (Ouvrard et *al.*, 2012).

Les plantes ornementales présentant un potentiel de phytoremédiation plus important peuvent être évaluées en fonction de leurs caractéristiques morphologiques. La morphologie des racines, des tiges et des feuilles joue un rôle essentiel dans le processus de phytoremédiation. La longueur, la densité et la surface des racines sont des caractéristiques importantes qui peuvent influencer directement l'absorption ou la dégradation des contaminants. La tolérance et l'accumulation des contaminants par ces plantes sont liées à la fois à la hauteur et au diamètre de la tige (Liu et *al.*, 2017).

3.2 Classification de quelques espèces d'intérêt écologique

La classification des plantes est basée sur des critères morphologiques, anatomiques, et chimiques. Cette méthode a permis de mieux comprendre les relations entre les différentes plantes dont cette classification facilite l'identification et l'usage raisonné pour la décontamination du sol pollué. Plusieurs de ces espèces peuvent être utilisées : le Tournesol, le Géranium, *Crassula*, ainsi que d'autres espèces moins connues (tableau 1) (Cronquist, 1981),.





Tableau 1 : classification des espèces ornementales selon Cronquist (1981),

Espèces	Règne	Sous-règne	Classe	Sous-classe	Ordre	Famille	Genre
Tournesol	Plantae		Magnoliopsida		Asterales	Asteraceae	Heliantheae
Geranium sanguineum lancastricense	Plantae		Magnoliopsida		Geraniales	Geraniaceae	Geranium
Crassula ovata	Plantae	Tracheobionta	Magnoliopsida		Rosales	Crassulaceae	Crassula
<i>Chlorophytum comosum</i>	Plantae	Tracheobionta	Liliopsida	Liliidae	Liliales	Liliaceae	<i>Chlorophytum</i>
<i>Aloe vera</i>	Plantae	Tracheobionta	Liliopsida	Liliidae	Liliales	Aloeaceae	<i>Aloe</i>
<i>Tradescantia Zebrina</i>	Plantae	Tracheobionta	Liliopsida	Commelinidae	Commelinales	Commelinaceae	<i>Tradescantia</i>
<i>Kalanchoe fedtschenkoi</i>	Plantae	Tracheobionta	Magnoliopsida	Rosidae	Rosales	Crassulaceae	<i>Kalanchoe</i>

3.3 Quelques travaux sur la phytoremédiation par les plantes ornementales

La phytoremédiation par les plantes ornementales représente une approche innovante et durable pour dépolluer les sols contaminés. Certaines espèces ornementales, ont montré leur capacité à absorber, dégrader ou stabiliser divers polluants (tableau 2).

Tableau 2 : quelques plantes ornementales utilisées en phytoremédiation.

Les espèces végétales	Famille	Caractéristiques	Source
<p><i>Chlorophytum comosum</i></p> 	Liliaceae	<ul style="list-style-type: none"> - Racines tubéreuses, nombreuse et grosses, capable de stocker l'eau, supporte beaucoup mieux la sécheresse que l'excès d'eau. - Plante vivace, médicinale, d'appartement. -A la capacité d'absorber les polluants -Plante à feuilles persistantes - Biomasse élevée, culture facile, capacité compétitive intense, tolérance élevée au stress - Avantages économiques élevés et accumulation polluants pas de transfère dans la chaîne alimentaire et réduit le risque, pour la santé humaine. 	Wang et <i>al</i> (2011).
<p><i>Aloe vera</i></p> 	Aloeaceae	<ul style="list-style-type: none"> -Plante vivace, succulente, arborescente, dépourvue de tronc. -La faculté de refermer ses stomates pour maintenir l'eau à l'intérieur de la plante et assurer une période de vie longue en condition de sécheresse. - Feuilles vertes charnues, pointues et épineuses. 	Dabouz, & Chihani, (2021).
<p><i>Tradescantia Zebrina</i></p> 	Commelinaceae	<ul style="list-style-type: none"> - Feuilles vertes sur le dessus avec de larges rayures longitudinales blanchâtres, un dessous violet avec des rayures et des fleurs violettes. - Plante médicinale. -A une activité antioxydante qui montre un bon potentiel en tant qu'éliminateur de radicaux libres. -A une activité antibactérienne contre les bactéries Gram-positives et Gram-négatives De plus, il présentait une teneur totale élevée grâce à sa richesse en phénols, flavonoïdes et tannins. Réduit des inflammations causées par les coups. 	Ramos-Arcos et <i>al</i> (2023).
<p><i>Kalanchoe fedtschenkoi</i></p> 	Crassulaceae	<ul style="list-style-type: none"> -Plante vivace, utilisée dans la médecine traditionnelle - Feuilles pouvant exercer une activité antioxydante - Adaptée à la sécheresse - Culture facile 	Mejía-Méndez et <i>al</i> (2023)



Chapitre II
Matériel et Méthodes

Notre travail a été réalisé au niveau de laboratoire de la faculté des sciences biologiques et sciences agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Il s'agit d'une culture en pots des plantes ornementales afin de décontaminer un sol provenant d'une station-service Fréha.

1 Présentation et situation géographique de la station-service de Fréha

Fréha est une commune de la wilaya de Tizi-Ouzou, elle appartient à la daïra d'Azazga. Elle est située à 7Km à l'ouest d'Azazga à 31Km 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 Mekla et de Tizi-Rached, et les communes de Ouagnoun et Tizi-Ouzou à l'Ouest et par la commune de Timizart au Nord-ouest. Fréha est une commune située à proximité de la bande côtière à 20 Km de la mer. Elle contient de point de vue hydrologique des oueds et cours d'eau (fig 3). la station-service Fréha est un point stratégique situé au cœur de la commune de Fréha est une station moderne bien équipée, cette station propose un service complet de distribution de carburants (essence super, sans plomb, gasoil) la station est également dotée d'un espace de lavage automobile offrant des services de nettoyage manuel et à haute pression, ainsi qu'un entretien de carrosserie (cirage, polissage).

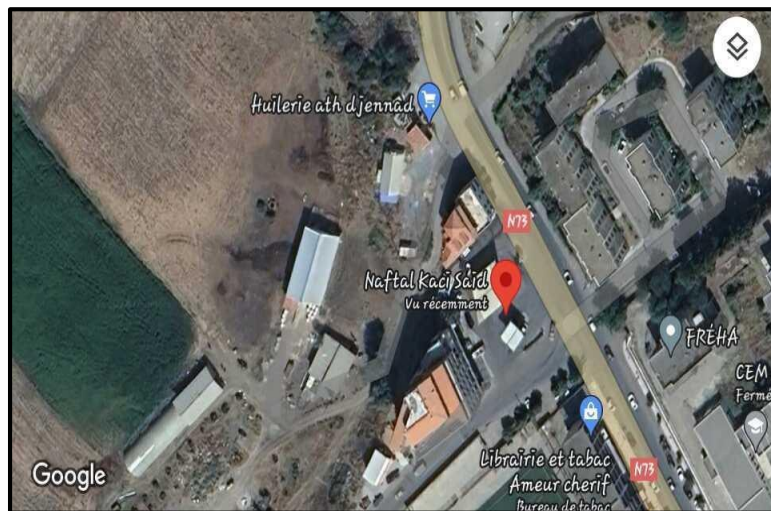


Figure 3 : Localisation du site d'étude (Google Earth,2024).

Notre échantillonnage a été réalisé dans la station de service Ailam de Fréha (fig 4) qui se trouve à environ 470 mètres de l'ouest Oued Sébaou, entouré par la RN12 et par des divers constructions commerciales, industrielles et habitations.

2 Matériel

2.1 Sol

Les principales sources de pollution du sol identifiées au niveau de la station-service sont les fuites chroniques et les déversements accidentels qui résultent de la corrosion des cuves et des canalisations enterrées, ce qui entraîne des infiltrations progressives de carburants dans le sol.

2.2. Matériel végétal

Pour dépolluer un sol contaminé par des carburants, quatre espèces végétales ont été utilisées : *Chlorophytum comosum*, *Aloe vera*, *Tradescantia Zebrina* et *Kalanchoe fedtschenkoi*. Ce sont des plantes ornementales, adaptées à l'intérieur ou l'extérieur et jouent un rôle dans la décontamination des sols.

Le maïs dont le nom scientifique est *Zea mays* L ; est une plante tropicale herbacée annuelle de la famille des Graminées (Poacées).

Cette plante a été choisie pour sa capacité de germer rapidement permettant ainsi d'obtenir des résultats en peu de temps. C'est, aussi l'une des espèces les plus sensibles à la pollution par les hydrocarbures (Chaineau et al., 1997). Elle est souvent utilisée dans l'évaluation de l'efficacité de la décontamination des sols (Schnoor et al., 2003).

2.3. Les vers de terre

Dans le but de l'évaluation de l'efficacité de la phytoremédiation, un test d'écotoxicité sur vers de terre a été mené. L'espèce de ver de terre utilisée, dans notre expérience est *Eisenia fetida* appelée aussi ver rouge. Elle est très sensible à de nombreux polluants présents dans les sols. (Belaid, & Chabi, 2023). Plusieurs travaux universitaires ont également eu recours à cette approche, notamment ceux de Gherbi et Meziane (2019), Abiche et Lekadir (2021), ainsi que Laoubi (2021), qui ont étudié l'impact de la pollution par les carburants dans différentes stations-service de la région de Tizi-Ouzou, en utilisant des bio-essais comme indicateurs de toxicité

3 Méthodes

3.1 Echantillonnage du sol

Les échantillons de sol pollué ont été prélevés le 22 janvier 2025. La méthode choisie pour l'échantillonnage repose sur cinq points disposés en double diagonale. Les échantillons sont prélevés sur une placette de terrain mesurant 2,24 m de longueur et 2,28 m de largeur, avec une profondeur d'échantillonnage fixée à 15 cm (fig. 4). Par la suite, le sol a été mis dans des sachets en plastique avant d'être transporté au laboratoire.



Figure 4 : Méthode d'échantillonnage

3.2 Mise en place de l'essai

Le sol a été tamisé avec une maille de 5 mm afin d'obtenir des mottes homogènes. Le sol a été réparti sur 15 pots dont le fond a été percé au préalable. Parmi ces pots, 12 pots ont été destinés à la culture des espèces végétales et 3 ont servi de témoins non cultivés. Chaque pot a été rempli avec 2 kg de sol, surmontant une couche de 2 cm de gravier au fond afin de garantir un bon drainage.



Figure 5 : Dispositif expérimental de la culture en pots des plantes ornementales des quatre espèces.

Quatre différentes espèces issues de boutures sont cultivées comme suit : trois pots par *Chlorophytum comosum* qui est d'origine d'Afrique du Sud avec une longueur moyenne de 15,21 cm, trois pots par *Aloe vera* d'origine d'Afrique du Nord, avec un poids moyen de 32,61 g, trois pots par *Tradescantia Zebrina* d'originaire d'Amérique centrale avec une longueur moyenne de 2,7 cm et trois pots, ont été cultivés par *Kalanchoe fedtschenkoi* est d'origine de Madagascar avec un poids moyen de 7,11 g (fig 5).

Nous avons procédé au dénombrement des bactéries et à l'identification des champignons du sol par la méthode des suspensions- dilution

3.3 Analyse microbiologique du sol

3.3.1 Préparation de milieu pour les bactéries (gélose nutritive)

La préparation de la solution consiste à peser 28 g de GN, les dissoudre dans 1000 ml d'eau Distillée, puis homogénéiser le mélange. La solution est ensuite chauffée au bain-marie pendant une heure avec agitation régulière toutes les 15 à 20 min. Après refroidissement, elle est répartie dans de petits flacons, étiquetée, puis stérilisée à l'autoclave (Baikeche & Boudjemai, 2023)

3.3.2 Préparation de l'eau physiologique

Pour préparer la solution de NaCl, peser 9 g de NaCl et ajouté 1000 ml d'eau distillée. Mélangez soigneusement à l'aide d'une spatule jusqu'à dissolution complète du sel. À l'aide d'une micropipette, répartissez 9 ml de la solution obtenue dans des tubes, fermez soigneusement chaque tube. Regroupez les tubes par lots, enveloppez chaque lot dans du papier aluminium, puis étiquetez-les. Enfin, placez tous les lots dans l'autoclave pour procéder à la stérilisation. (Baikeche & Boudjemai, 2023)

3.3.3 Préparation de milieu PDA (Potato Dextrose Agar)

Le milieu PDA est utilisé en microbiologie pour la culture des champignons et des levures.

La préparation de l'infusion de pomme de terre commence par la cuisson de 200 g de pommes de terre dans 1 L d'eau distillée pendant 20 à 30 minutes, jusqu'à ce que les pommes de terre deviennent tendres. Une fois la cuisson terminée, l'eau de cuisson est récupérée en filtrant le mélange, ce qui permet d'obtenir 400 ml d'infusion de pomme de terre. Ensuite, 20 g de glucose et 15 g d'agar-agar, sont ajoutés à l'infusion de pomme de terre. De l'eau distillée est ajoutée pour compléter à 1L. Le mélange est homogénéisé, chauffé au bain-marie pendant une heure avec agitation régulière, puis stérilisé à l'autoclave. Une fois refroidi, un demi-comprimé de Clamoxyl est ajouté pour finaliser le milieu de culture.

3.3.4 Préparation de la solution mère

Pour préparer la solution mère pour le sol témoin, commencez par prélever 1 g de sol dans chaque pot, on le mélange soigneusement pour obtenir une solution homogène. Ensuite, prélevez 1 g de ce mélange homogène et transférez-le dans un tube étiquetée contenant 9 ml d'eau physiologique stérile. Ce mélange constitue la solution mère. Mélangez le contenu du tube à l'aide d'un vortex pendant 5 minutes afin d'assurer une dispersion uniforme du sol dans l'eau physiologique.

3.3.4.1 Préparation des suspensions dilutions

Pour réaliser les dilutions, nous avons préparé six tubes d'eau physiologique stérile chacun contenant 9 ml et numérotés de 1 à 6. Dans le premier tube nous avons ajoutés 1ml de la solution mère, ce qui correspond à la dilution 10^{-1} . Ensuite, nous avons prélevé 1 ml de cette dilution

(10^{-1}) et l'avons versé dans le deuxième tube, réalisant ainsi la dilution 10^{-2} . Nous avons répété cette procédure pour chaque tube à essai, en transférant 1 ml de la dilution précédente dans le tube suivant, jusqu'à obtenir la dilution 10^{-6} pour chaque sol.

3.3.4.2 L'ensemencement sur un milieu solidifié en boîte de Pétri :

Pour chaque dilution un volume de 0,1 ml de suspension est prélevé à l'aide d'une micropipette et déposé sur la surface d'un milieu gélosé stérile contenu dans une boîte de Pétri. L'échantillon est ensuite étalé sur toute la surface du milieu à l'aide de pipettes Pasteur, permettant une répartition homogène des cellules pour former des colonies isolées. Les boîtes de Pétri sont incubées à une température de 28°C pendant une durée de 24 heures, favorisant le développement des colonies.

Cette procédure est répétée pour les boîtes de Pétri contenant le milieu PDA. Après étalement, les boîtes de Pétri sont incubées à une température de 28°C pendant une durée de 7 jours, favorisant le développement des champignons (fig 6).

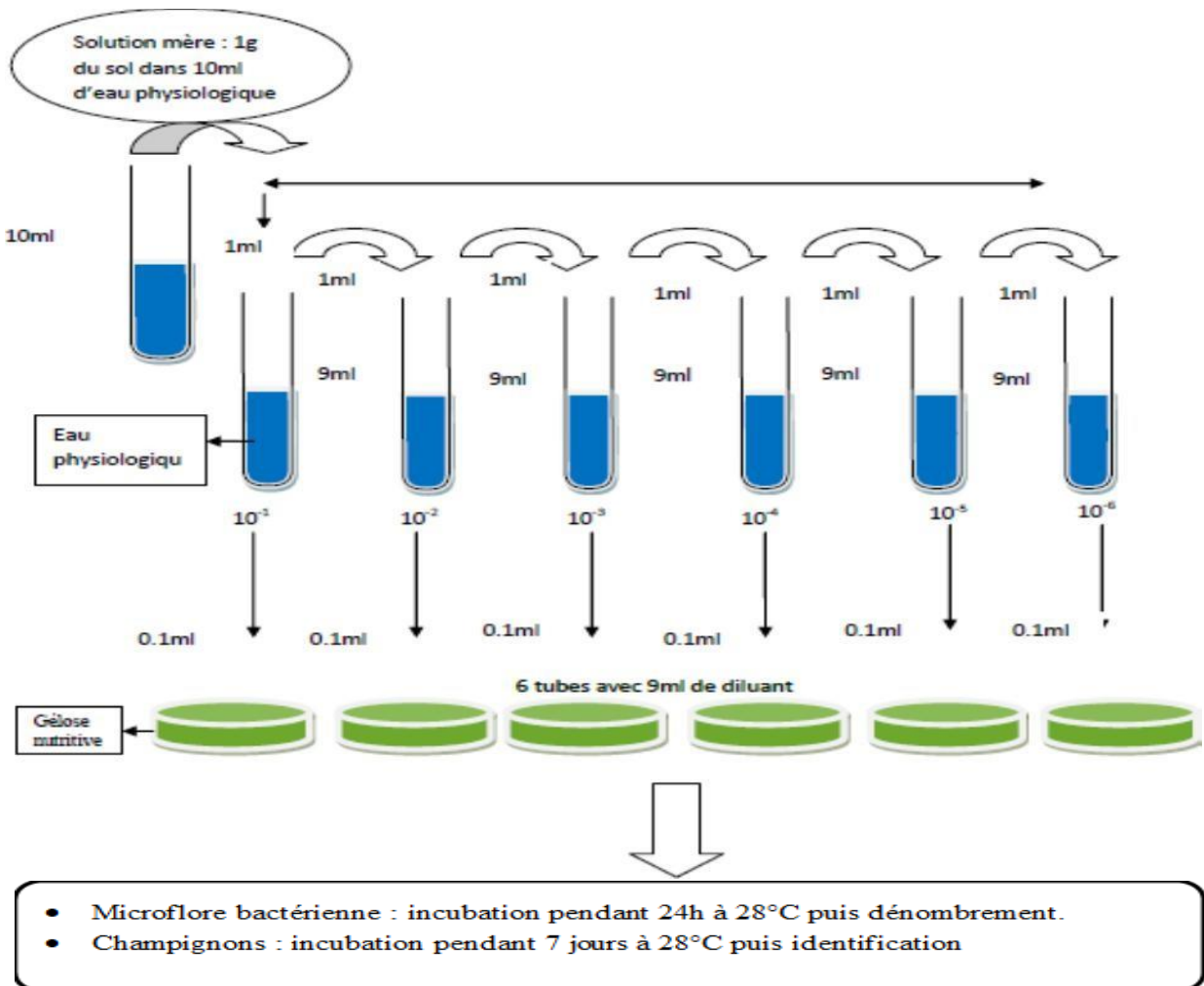


Figure 6 : Schéma récapitulatif de l'ensemencement et de l'incubation

3.3.4.3 Dénombrement des colonies bactériennes

Une fois l'incubation terminée, les boîtes de Pétri sont examinées pour observer les colonies bactériennes, qui se présentent sous forme de groupes visibles de cellules bactériennes. Ces colonies peuvent différer en taille, en couleur et en forme. Les colonies bactériennes sont comptées individuellement sur chaque boîte de Pétri (fig 7), et le nombre total est exprimé en unités de colonies formées (UFC). Pour faciliter le décompte, un compteur de colonies (fig 8) est souvent utilisé. Cette méthode permet d'évaluer la densité bactérienne dans chaque échantillon.



Figure 7 : Boîtes Pétries ensemencées



Figure 8 : compteur de colonies

3.3.4.4 Identification des champignons

Pour l'identification, une lame est préparée en y déposant une goutte d'eau. Le mycélium est ensuite prélevé à l'aide d'un scalpel, placé délicatement sur la lame à fin de l'observer au microscope qui permet de visualiser les structures fongiques (hyphes, spores), ce qui facilite l'identification du champignon.

3.4 Evaluation de paramètres physiologiques

La biomasse végétale et le nombre de feuille ont été déterminée avant et après la phytoremédiation pour les quatre espèces. La RWC, a également été déterminé après rinçage et nettoyage des plantes.

3.4.1 Nombre de feuille

A la fin de l'expérience, nous avons procédé au comptage du nombre des feuilles pour chaque plante.

3.4.2 Biomasse végétale

Nous avons mesuré le poids sec des parties aériennes et racinaires des quatre espèces à l'aide d'une balance de précision.

3.4.3 RWC (Relative water content) ou teneur relative en eau

Le RWC, est un indicateur physiologique clé pour évaluer l'état hydrique d'une plante. C'est une mesure de la capacité d'une plante à retenir l'eau dans ses tissus. Comme les plantes ont

été mise en conditions de stress polluant on a voulu voir est ce qu'elles répondaient toute de la même façon à ce stress polluant.

On commence par prélever les plantes du sol, puis on sépare la partie racinaire de la partie aérienne. Ensuite, on pèse les deux parties ce qui nous donne le poids frais (PF). Les plantes sont ensuite complètement immergées dans l'eau à l'obscurité, jusqu'à saturation, après on pèse à nouveau les plantes pour déterminer le poids turgescents (PT). Enfin, les plantes sont placées dans un incubateur à 80°C pendant 48h puis les pesées une dernière fois pour obtenir le poids sec (PS) (fig 9).

La formule du calcul de la RWC :

$$RWC (\%) = (PF - PS) * 100 / (PT - PS)$$

PF : poids frais

PS : poids sec

PT : poids turgescents

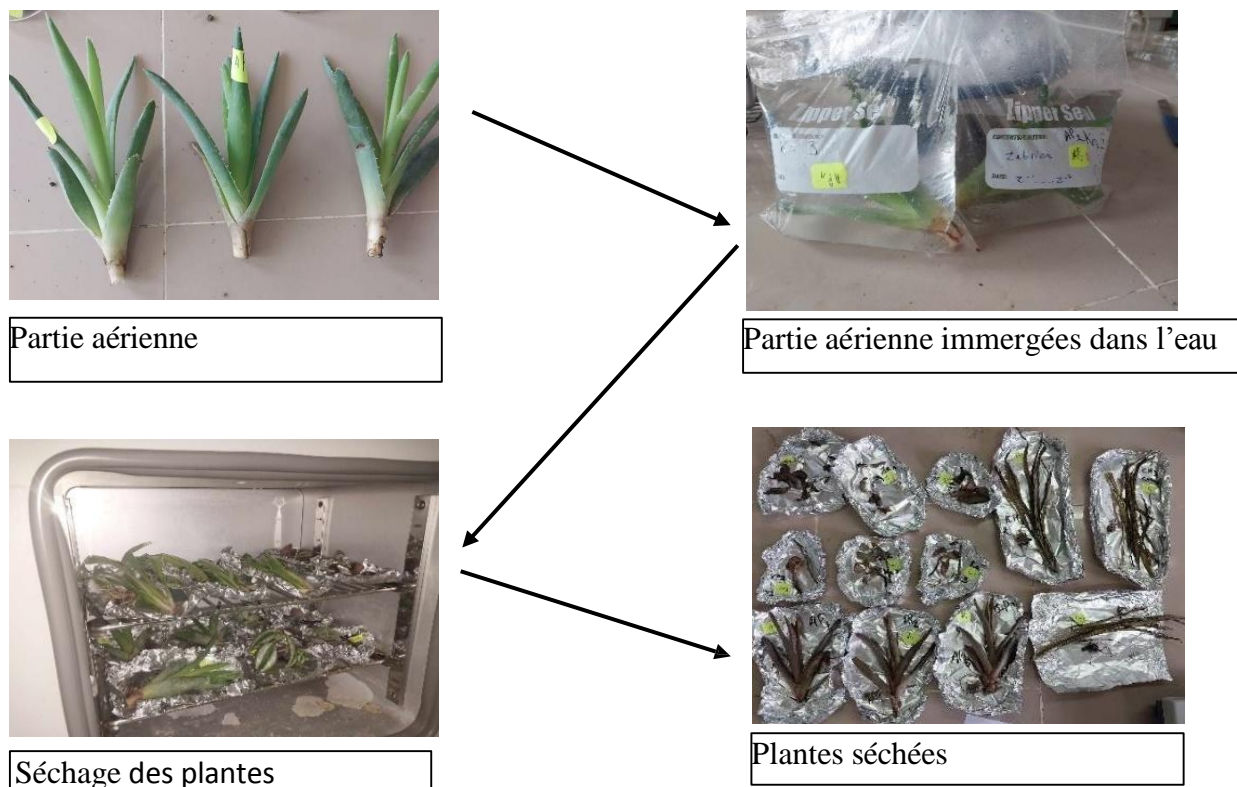


Figure 1 : protocole de mesure de la RWC.

3.5 Evaluation de la dégradation et l'efficacité de la décontamination du sol

3.5.1. Activité biologique globale

La respiration constitue l'indicateur indirect le plus courant et le plus ancien de l'activité microbienne dans les sols. Cette méthode permet d'évaluer le volume de CO₂ émis par le sol et capté par la solution de NaOH lors d'une période d'incubation aérobie pendant 7 jours à 28°C.

On pèse 50 g du sol pour chaque pot, que l'on place dans des flacons de 250 ml étiquetés. Dans chaque flacon, on introduit deux tubes également étiquetés : l'un contenant 5 ml de la solution de NaOH, et l'autre contenant 3 ml d'eau pour éviter le dessèchement du sol. Les flacons sont fermés hermétiquement pour empêcher la fixation du CO₂ atmosphérique, puis incubés à 28 °C pendant 7 jours. Trois témoins sans sol ont été placés dans les mêmes conditions (fig 10).



Figure 10 : Dispositif du test respirométrique.

Après 7 jours, on retire les tubes contenant la solution de NaOH, puis on y ajoute deux gouttes d'une solution de chlorure de baryum à 20 % (BaCl₂) ce qui entraîne la formation d'un précipité blanc au fond du tube. Les tubes sont refermés immédiatement. Deux gouttes de phénophtaléine sont ajoutées dans les tubes ce qui provoque l'apparition de la couleur rose violacée. La solution est ensuite versée dans un bécher et titrée avec l'acide chlorhydrique HCl à 0,25 M, jusqu'à la disparition complète de la couleur violacée, marquant la fin du titrage (fig 11).

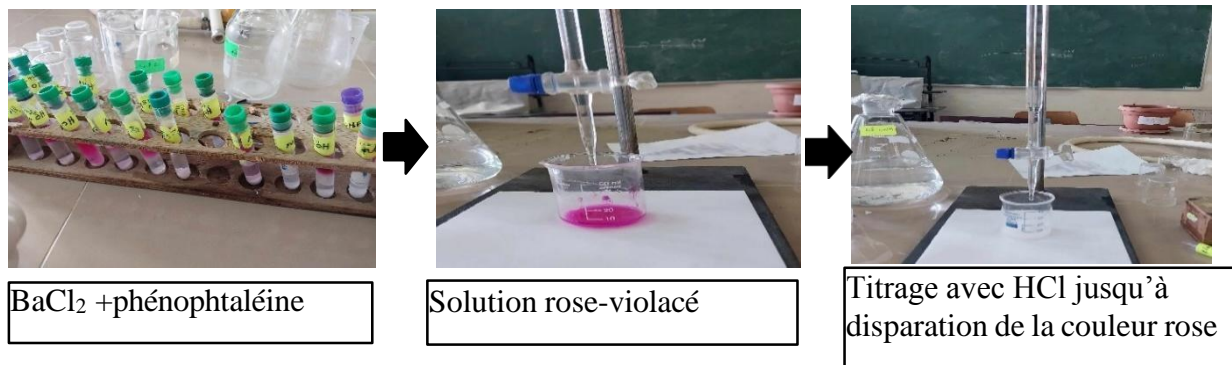


Figure 11 : Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol.

3.5.2 Activité de catalase (CAT) :

Dans des flacons, on mélange 5g de sol tamisé à 2 mm avec 2,5 ml d'eau oxygénée (H₂O₂) à 0,3% et 20ml de tampon phosphate à pH 7. Les flacons sont ensuite placés dans un incubateur à 25°C pendant 20 min. Au mélange réaction précédent on ajoute 1,5 ml d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 3mol/L pour arrêter la réaction. Le mélange est centrifugé à 2000 tours/min pendant 7 min, Puis titré avec une solution de permanganate de potassium (KMnO₄) à 0,02mol/l jusqu'à l'apparition d'une couleur rose clair (fig 12).

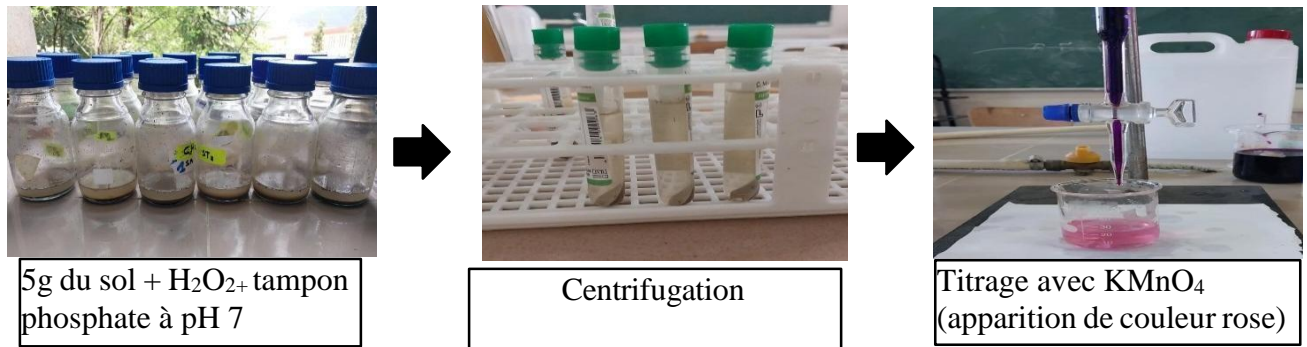


Figure 12 : Protocole de l'Activité de catalase (CAT).

3.5.3 Extraction, dosage et caractérisation des hydrocarbures

3.5.3.1 Détermination de la quantité d'hydrocarbures

Dans le sol

On pèse 8 g du sol sec de chaque pots, après l'avoir tamisé à 2 mm, que l'on place dans des flacons. On y ajoute 40 ml d'hexane, puis on place les flacons dans une plaque d'agitation pendant 6 heures (fig 13). Le contenu des flacons est filtré et ensuite versé dans des boîtes de Pétri tarées pour peser une première fois (poids avant évaporation). Ces boîtes sont laissées exposées à l'air libre jusqu'à évaporation complète du solvant, puis pesées une deuxième fois (poids après évaporation).

La formule de calcul le poids d'hydrocarbures :

Poids HC = Poids avant évaporation - Poids après évaporation



Figure 13 : protocole de l'extraction des hydrocarbures.

Dans les plantes

Après séchage et broyage des plantes, celles-ci sont placées dans des flacon, aux quels ont été ajoutés 40ml d'hexane. Les flacons sont ensuite placés sur une plaque d'agitation pendant 6 heures. Le contenu des flacons est ensuite versé dans des boîtes de Pétri tarées pour peser une première fois. Ces boîtes sont laissées exposées à l'air libre jusqu'à évaporation complète du solvant, puis pesées une deuxième fois.

3.5.3.2 Analyse qualitative des hydrocarbures :

La composition des HA est déterminée par le spectrophotomètre UV. Le filtrat obtenu est versé dans une cuve afin d'être analysée par spectrophotométrie dans la gamme de longueurs d'onde de 200 jusqu'à 300 nm pour identifier les hydrocarbures dangereux.

3.5.4 Tests d'écotoxicité

On place 10 graines de maïs dans des boîtes de Pétri en verre étiquetées, puis on les couvre avec 100g de sol provenant de chaque pot. On arrose légèrement les sols pour humidification. Après 7 jours, on dénombre les graines qui ont germé pour obtenir le taux de germination (TG).

$$TG\% = (\text{nombre des graine germées} / \text{nombre total des graine}) \times 100$$

3.5.5 Test de toxicité sur les vers de terre :

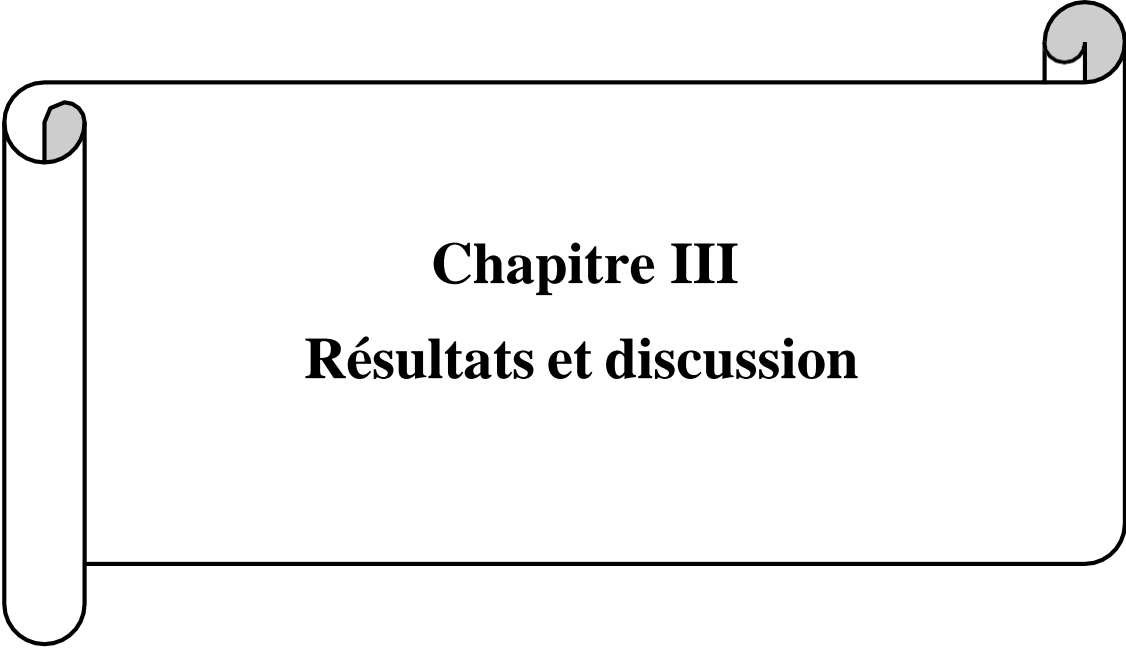
On commence d'abord par prélever 100 g du sol de chaque pot, que l'on place dans des petites boîtes en plastique munies d'un couvercle perforé étiquetées pour assurer une bonne aération. On met 5 vers dans chaque boîte contenant le sol. Les vers sont laissés pendant 14 jours. A la fin de cette durée, on dénombre les vers de terre morts.

Le taux de mortalité (TM) a été calculé par la formule :

$$TM (\%) = (\text{nombre de vers de terre morts} / \text{nombre total de verre de terre}) \times 100$$

3.6 Analyse statistique :

Elle a été effectuée à l'aide de logiciel R.4.4.2. Les moyennes et les écart-type ont été calculés. L'analyse de la variance ou le test de Kruskal-Wallis a été réalisé, selon les conditions de normalité et d'homogénéité des variances. Le test de Newman & Keuls ou le post-hoc de Kruskal-Wallis a été appliqué en cas de différences significatives pour établir les groupes homogènes.



Chapitre III
Résultats et discussion

1 Résultats

Ce travail vise à évaluer l'efficacité de plantes, en tenant compte notamment de l'interaction avec les microorganismes (bactéries, champignon), dans le processus de décontamination du sol pollué par les hydrocarbures. Quatre espèces ont été testées afin d'observer leur comportement face à la pollution et leur capacité à absorber ou transférer, accumuler les concentrations élevées dans rhizosphère.

1.1 Paramètres microbiologiques

Le dénombrement des bactéries et l'identification des champignons sont des paramètres fournissent des indications sur l'activité microbienne et la présence d'espèces potentiellement capable de dégrader les polluants dans un sol pollué.

1.1.1 Dénombrement des bactéries

La figure 14 représente le nombre de bactéries dans différents sols avant et après la phytoremédiation. Les résultats montrent que le nombre des bactéries est élevé avant la phytoremédiation pour les différentes espèces étudiées ainsi que pour le sol témoin pollué non cultivé cela se réfère à la mesure de la concentration de contaminants dans chaque sol comparé au compte post-phytoremédiation.

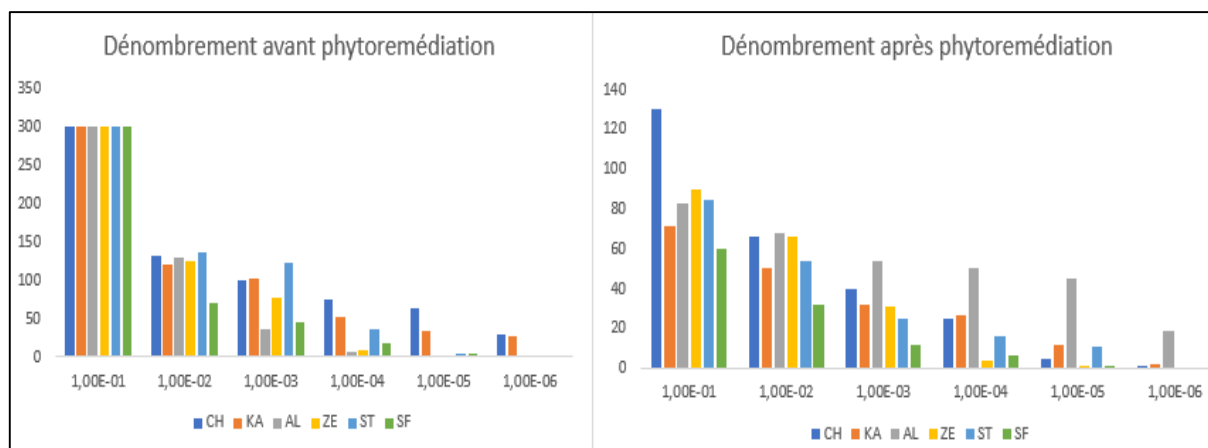


Figure 14 : Dénombrement des bactéries avant et après phytoremédiation.

1.1.2 Identification des champignons

Au cours de ce travail nous avons procédé à l'identification macroscopique et microscopique de quelques espèces de champignon. Cinq espèces ont été identifiées à savoir : *Aspergillus niger*, *Rhizopus nigricans*, *Penicillium sp*, *Mycelia sterilia* et *Fusarium spp* (fig 15).

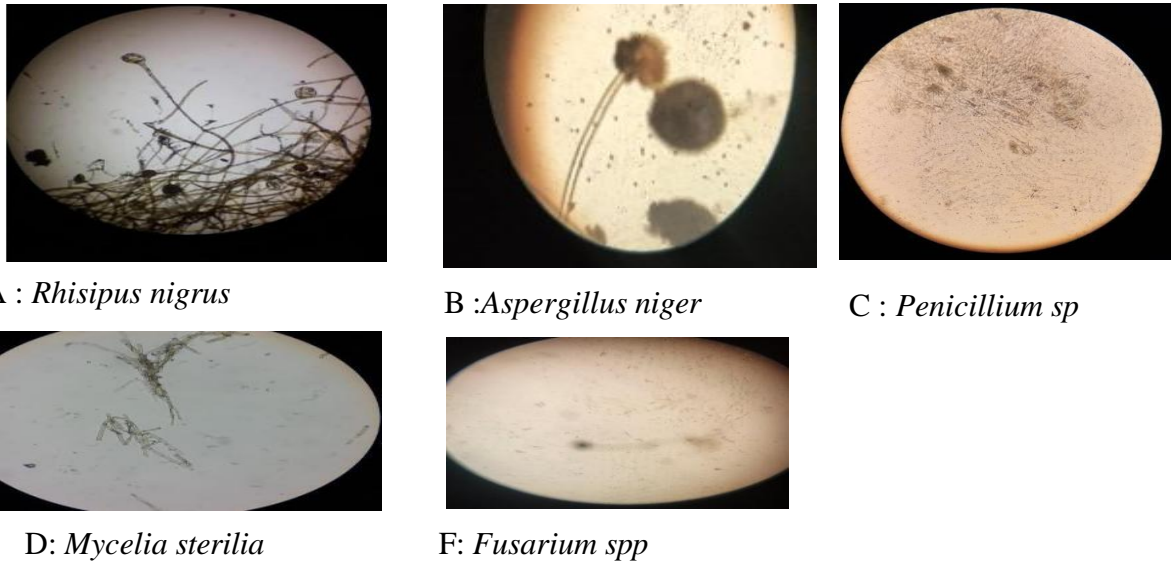


Figure 15 : Identification de quelques espèces de champignons sous microscopes grossissement (Gx40)

1.2 Paramètres physiologiques

1.2.1 Nombre de feuilles

La figure 16 illustre le nombre de feuilles des plantes des différentes espèces utilisées dans la phytoremédiation. Le nombre de feuilles le plus élevée a été observé chez les plantes *C.comosum* avec une moyenne de 15 feuilles /plante. Pour *K. fedtschenkoi*, nous avons obtenu une valeur moyenne de 12 ,66 feuille/plante. Cependant, *T. zebrina* et *A. vera* ont présenté le nombre de feuilles le plus faibles avec 9 et 7,66.

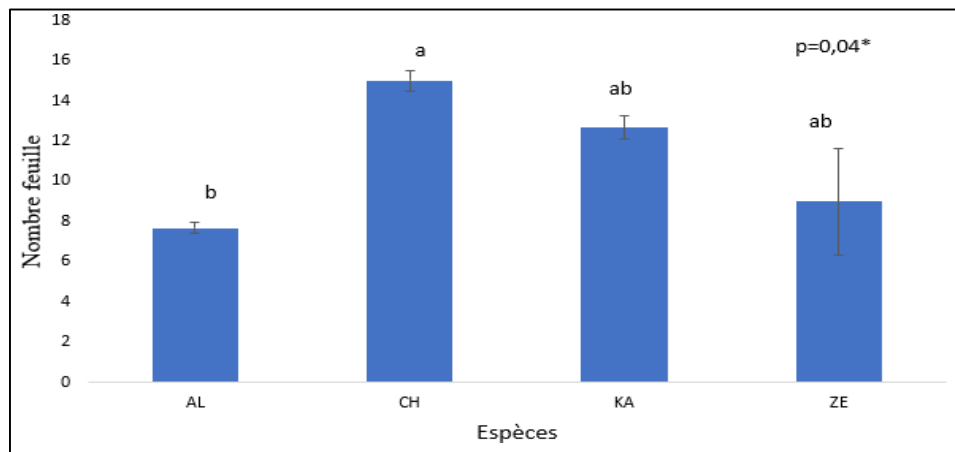


Figure 16 : Nombre des feuilles des quatre espèces végétales.

L'analyse de la variance a révélé une différence significative entre les moyennes des quatre espèces avec une probabilité de 0,04.

Le teste de Newman & Keuls a classé les espèces en trois groupes homogènes : *C. comosum* dans le groupe « a », *K. fedtschenkoi*, *T. zebrina* dans le groupe « ab », et *A. vera*, avec le nombre de feuilles le plus faible classé dans le groupe « b ».

1.2.2 Biomasse végétale

Nous avons observé que la valeur la plus élevée pour la biomasse aérienne est celle de *A. vera* avec une moyenne de 15,82g, suivie par *C. comosum* et *K. fedschenkoi* présentant des biomasses respectives de 0,90g et 0,34g. Concernant *T. zebrina*, nous avons observé une faible biomasse (0,18g) (fig17).

La biomasse racinaire la plus élevée a été obtenue chez *C. comosum* avec une moyenne de 0,33g suivie par *K. fedschenkoi* et *A. vera* avec des biomasses respectives de 0,22g et 0,14g. *T. Zebrina* a présenté le poids racinaire le plus faible (0,02g).

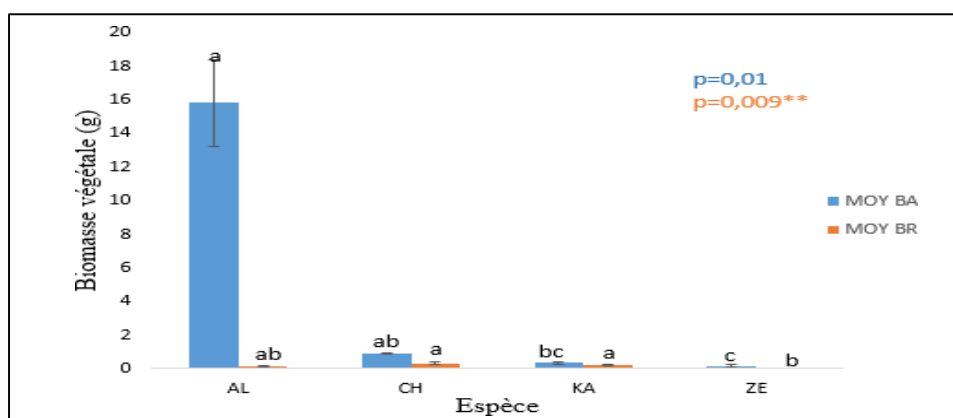


Figure 17 : biomasse aérienne et racinaire des quatre espèces

Le test de Kruskal –Wallis pour la biomasse aérienne montre une différence significative entre les espèces ($p= 0,01$).

Les biomasses végétales sont classées en quatre groupe *A. vera* dans le groupe « a » *C. comosum* dans le groupe « ab », *K. fedschenkoi* dans le groupe « bc » et *T. zebrina* dans le groupe « c ». Cela signifie que la biomasse aérienne de *Aloe vera* est significativement plus élevée par rapport aux autres espèces.

L’anova pour la biomasse racinaire a montré une différence hautement significative entre les quatre espèces $p=0,009^{**}$.

Ces espèces sont classés en trois groupes *C. comosum* et *K. fedschenkoi* dans le groupe « a », *A. vera* dans le groupe « ab », et *T. zebrina* dans le groupe « b ». La biomasse la plus élève est celle des espèces du groupe « a ».

1.2.3 Teneur relative en eau (RWC)

La figure 18 présente la teneur relative en eau (RWC) pour les quatre espèces. *A. vera* a montré la rétention en eau la plus élevée avec une moyenne de 92,95% suivie par *K. fedschenkoi* avec

une valeur de 91,63%, et *C. comosum* avec 80,57%. *T. zebrina* a présenté la rétention en eau la plus faible avec une valeur de 67,17%.

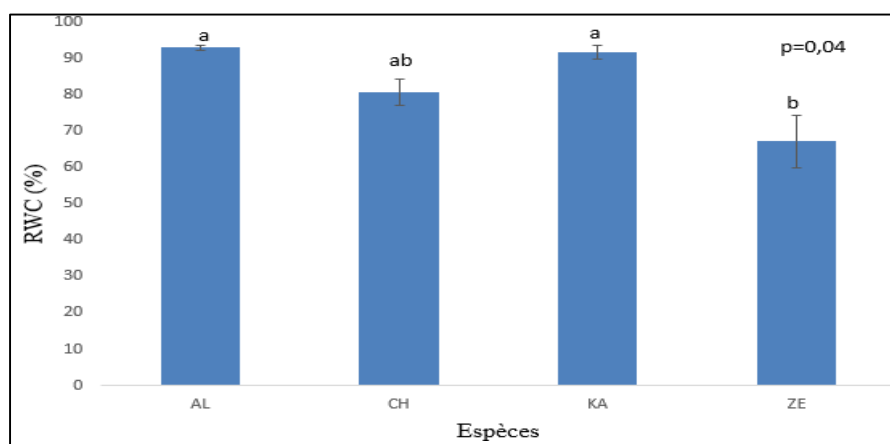


Figure 18 : Teneur relative en eau des quatre espèces végétales.

Le test de Kruskal-Wallis a révélé une différence significative entre les espèces avec une probabilité de 0,04.

Les espèces sont classées en trois groupes : *A. vera* et *K. fedschenkoi* appartiennent au groupe « a » avec la teneur la plus élevée, *C. comosum* a été classée dans le groupe « ab », et *T. zebrina* dans le groupe « b ».

1.3 Dégradation des hydrocarbures

1.3.1 Activité biologique globale

Les résultats du test respirométrique, exprimés en quantité de CO₂ dégagé par la respiration des microorganismes dans les différents sols sont illustrés par la figure 19. Nous constatons que la quantité de CO₂ dégagé dans les sols cultivés par *K. fedschenkoi* et *A. vera* est la plus élevée par rapport aux autres sols (0,30g/g de sol). La valeur la plus faible obtenu dans le sol avant la culture (état initial) était de 0,23CO₂/g sol.

L'anova a révéler une différence significative entre les quantités de CO₂ dégagées par les différents sols avec une probabilité de 0,02.

Le test de Newman & Keuls a classé les moyennes en 3 groupes : les sols cultivés par *A. vera* et *K. fedschenkoi* sont classés dans le même groupe « a » avec la quantité la plus élevée de CO₂ dégagé, suivis par le sol cultivé par *C. comosum*, et *T. zebrina* classés dans le même groupe «ab». Le sol témoin a été classé dans le groupe « b ».

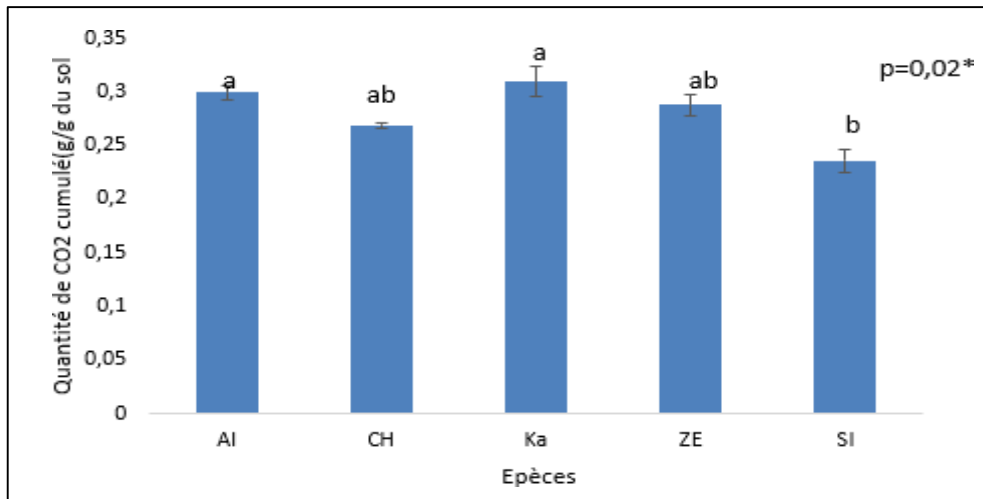


Figure 19 : production cumulée de CO₂ dans les différents sols

1.3.2 Activité de la catalase

La figure ci-dessous montre que la quantité la plus élevée de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) dégradée par l'enzyme catalase a été observée dans le sol cultivé par *T. zebrina* avec un volume de 0,43 ml suivi par le sol témoin et *A. vera* (0,4 ml), *K. fedtschenkoi* et sol non traité (état initial) ont donné des valeurs respectives de 0,36 ml et 0,35 ml. *C. comosum* a donné la quantité la plus faible avec 0,33 ml.

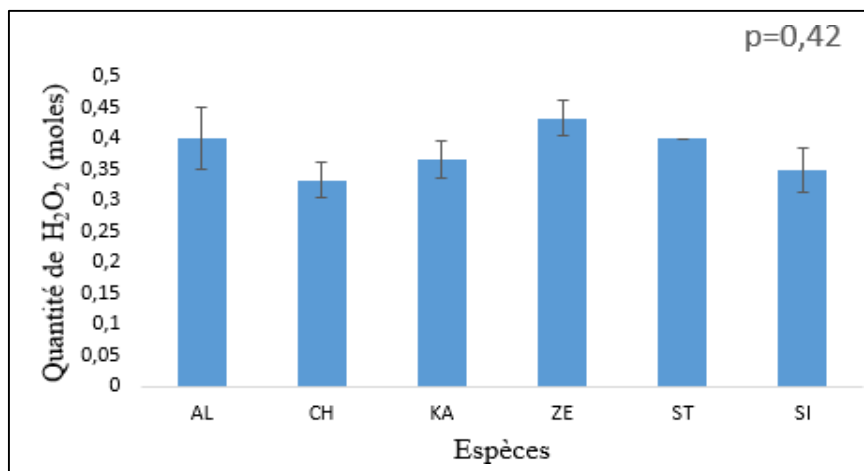


Figure 20 : L'activité de catalase

Le test Kruskal-Wallis n'a pas révélé de différences significatives entre les quantités de H₂O₂ dans les sols avec $p=0,42$.

1.3.3 Analyse quantitative d'hydrocarbures

1.3.3.1 Dans les sols

La figure 21 illustre la quantité d'hydrocarbures totaux qui sont restés dans les sols cultivés et non cultivés. Les résultats montrent que le sol contaminé contient une quantité d'hydrocarbures élevée avant la phytoremédiation avec une moyenne de 2,175 mg/g du sol contrairement aux

sols cultivés par les quatre espèces qui ont eu respectivement : 1,92, 1,305, 1,48 et 1,84 dans les sols de *A. vera*, *C. comosum*, *K. fedschenkoi* et *T. zebrina*.

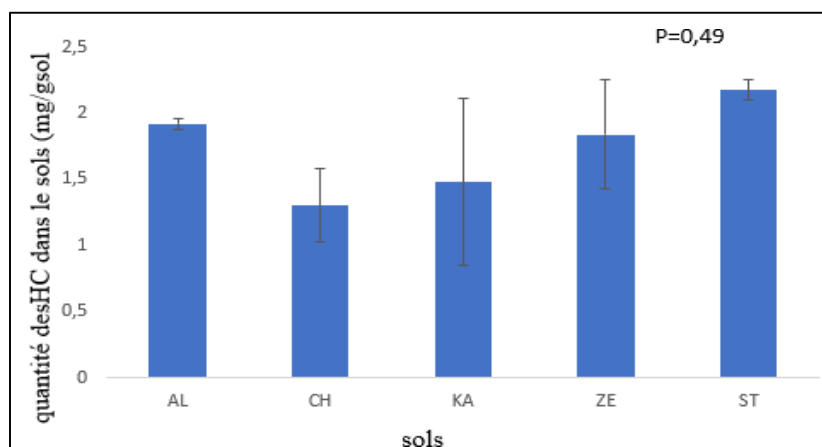


Figure 21 : Quantité d'HC totaux dans les sols cultivés et non cultivé

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il n'y a pas de différence significative $p=0,49$ entre les quantités d'hydrocarbures dans différents sols

1.3.3.2 Dans les plantes

Les quantités d'hydrocarbures extraits des plantes des quatre espèces sont présentés dans la figure 22. L'espèce d'*A. vera* contenait la plus grande quantité d'hydrocarbure (21,68), par rapport à *C. comosum* et *K. fedschenkoi* avec des valeurs de 16,82 et 15,71 ainsi que *T. zebrina* avec la valeur la plus faible qui est de 14,92.

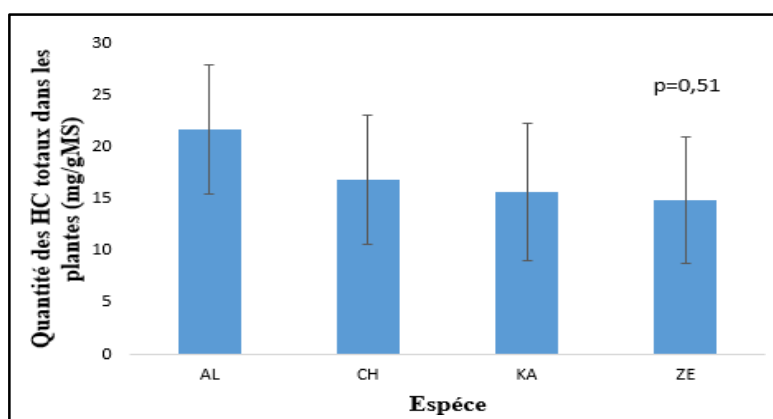


Figure 22 : Quantité des HC totaux dans les plantes des quatre espèces végétales.

Le test Kruskal-Wallis n'a pas révélé de différences significatives entre les quantités d'hydrocarbures dans les plantes avec $p=0,51$.

1.3.4 Analyse qualitative d'hydrocarbures aromatiques

Parmi les hydrocarbures qui sont présents seuls les HC aromatiques, plus dangereux, ont été identifiés par spectrophotomètre UV dans les plantes et le sol.

1.3.4.1 Dans le sol

Le tableau montre que les différents hydrocarbures aromatique présents dans le sol. Le sol non cultivé montre une valeur plus grande d'hydrocarbures contrairement au sol cultivé. Les hydrocarbures benzène,flourène, benzo(g-h-i)pérylène, fluoranthène benzo(k)flouranthène, benzo(b)fluorathène, chrysène, et benzo(a)anthracène se trouvent en faible quantité dans le sol cultivé par *T. zebrina*. En revanche, les valeurs les plus élevées ont été obtenues dans le sol cultivé par *Aloe vera*.

Tableau 3 : la composition des hydrocarbures dans le sol

HAP	LO (nm)	AL	CH	KA	ZE	ST
Benzène	200	1,112	0,879	1,012	0,756	1,750
Flourène	205	0,785	0,660	0,732	0,520	1,039
Benzo(g-h-i)pérylène	210	0,614	0,519	0,570	0,424	0,812
Naphtalène	220	0,583	0,390	0,515	0,406	0,900
Acénaphène	227	0,535	0,310	0,454	0,350	0,804
Acénaphtylène	229	0,511	0,294	0,434	0,333	0,703
Fluoranthène	236	0,347	0,256	0,332	0,259	0,306
Benzo(k)flouranthène	238	0,299	0,245	0,301	0,239	0,259
Pyrène	241	0,135	0,135	0,157	0,113	0,118
Phénathène	251	0,129	0,137	0,152	0,115	0,123
Benzo(b)fluorathène	256	0,135	0,139	0,155	0,118	0,130
Chrysène	268	0,114	0,125	0,128	0,102	0,130
Benzo(a)anthracène	286	0,083	0,098	0,095	0,082	0,100
Dibenzo(a,h)anthracène	297	0,068	0,085	0,078	0,070	0,076

1.3.4.2 Dans les plantes

Les grandes quantités des HA sont absorbées dans sol cultivées par *C. comosum* contrairement à *Aloe vera* qui contenait une faible quantité des HA.

Tableau 4 : la composition des hydrocarbures dans les plantes des 4 espèces.

HAP	LO (nm)	AL	CH	KA	ZE
Benzène	200	1,518	4	2,365	2,129
Flourène	205	1,095	4	2,548	1,800
Benzo(g-h-i)pérylène	210	0,741	4	1,852	1,150
Naphtalène	220	0,410	2,526	1,124	0,709
Acénaphène	227	0,306	1,845	0,966	0,640
Acénaphylène	229	0,272	1,796	0,898	0,612
Fluoranthène	236	0,190	1,637	0,571	0,471
Benzo(k)fluoranthène	238	0,180	1,590	0,466	0,428
Pyrène	241	0,128	1,459	0,323	0,334
Phénathrène	251	0,101	1,117	0,264	0,289
Benzo(b)fluorathène	256	0,093	1,060	0,270	0,292
Chrysène	268	0,091	1,096	0,269	0,309
Benzo(a)anthracène	286	0,097	0,920	0,216	0,249
Dibenzo(a,h)anthracène	297	0,084	0,765	0,172	0,191

1.4 Test de toxicité

1.4.1 Test de germination

La figure 23 représente le taux de germination du maïs dans les différents sols. Le taux le plus élevé est obtenu dans le sol cultivé par *K. fedschenkoi* (76,66%) suivi par le sol de *C. comosum* et le sol témoin avec une valeur de 73,33%. Vient ensuite le sol de *A. vera* avec un taux de germination de 70%, celui de *T. zebrina* avec une valeur de 66,66 et le sol initial avec un taux de germination le plus faible 60%.

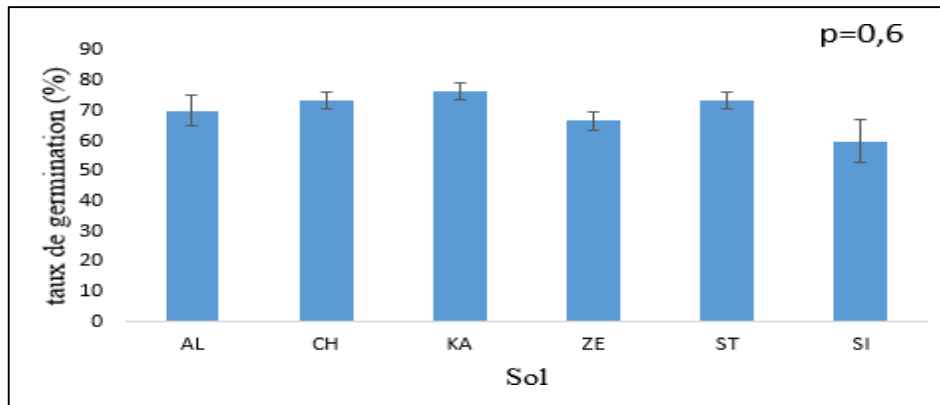


Figure 23 : taux de germination des graines de maïs dans différents sols

Le test de Kruskal-Wallis a révélé qu'il n'y avait pas une différence significative entre les différents sols p -value=0,6.

1.4.2 Test de toxicité sur les vers de terre

La figure 23 présente les résultats concernant le taux de mortalité des vers de terre. Le sol initial et le sol témoin présentent le taux de mortalité le plus élevé avec des moyennes 60% et 20%, suivie par le sol de *C. comosum* 13,33%. *K. fedschenkoi* *T. zebrina* avec un même taux de mortalité (6,66%). Le sol de *A. vera* a un taux de mortalité égal à 0.

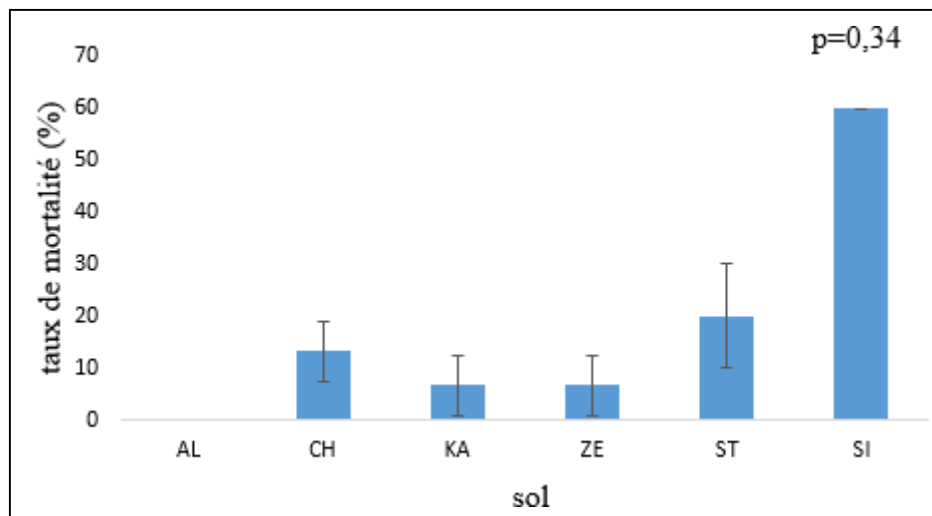


Figure 24 : taux de mortalité des vers de terre dans les différents sols

Le test de Kruskal-Wallis a révélé qu'il n'y avait pas une différence significative entre les différents sols (p -value=0,34)

2 Discussion

Nous résultats de l'évaluation d'efficacité des plantes ornementales a montré des différences significatives entre les espèces étudiées pour les paramètres physiologiques tel que le nombre de feuille, biomasse végétale et RWC. Pour l'activité microbienne le test de respirométrie à

montrer une différence significative par contre l'activité de la catalase, l'extraction des hydrocarbures et le test d'écotoxicité ne montrent pas une différence significative.

Après la phytoremédiation dans tous les sols la quantité d'hydrocarbures qui sont la source de carbone principale de certaines bactéries sont dégradés ce qui signifie la diminution de nombre des bactéries., au cours de la phytoremédiation les plantes modifient les propriétés du sol ce qui rend moins favorable à certaines bactéries qui étaient adaptées aux conditions initiales de la pollution. Notant que les bactéries vivant dans un environnement généralement riche et adapté à leur besoin (pH, nutriment, température) une fois prélevées ces conditions changent (T°, lumière, oxygène) alors les bactéries qui sont sensible meurent (Shen et *al.*, 2018).

L'analyse de la diversité fongique dans le sol pollué a révélé la présence de plusieurs espèces dominées par les genres *Aspergillus niger* et *Fusarium spp*, connus pour leur tolérance aux hydrocarbures, se qui suggère une adaptation écologique à la pollution.

Concernent le nombre de feuilles, *Chlorophytum comosum* présente un nombre élevé par rapport aux autres espèces, ce qui s'explique par plusieurs facteurs. En effet, cette plante herbacée à des feuilles persistantes, caractérisée par une croissance rapide elle stock l'eau et les nutriments ce qui montre une production de beaucoup de feuilles allongées. Cela permet à la plante une grande tolérance au stress polluant (Wang et *al* 2011).

Aloe vera montre une biomasse aérienne importante par rapport aux autres espèces, ce qui indiquerait qu'elle est bien adaptée aux conditions du stress du milieu. *Aloe vera* est une plante herbacée vivace avec des feuilles charnues recouvertes par une croute épaisse. Elle est caractérisée par la possibilité de stocker de grandes quantités d'eau dans ses tissus (Svjetlana et *al.*, 2020). Au contraire, *Tradescantia zebrina*, qui présente une biomasse faible, est une plante persistante. Ses tiges sont aériennes, rarement souterraines faible et fines, les feuilles sont fines aussi. Elle n'accumule pas d'eau dans ses tissus aériens, ce qui expliquerait sa biomasse aérienne est plus légère (Butnariu et *al.*, 2022).

La Biomasse racinaire la plus élevée a été observée chez *C. comosum*, ce qui serait dû à leur système racinaire tubéreux, formé de nombreuses et grosses racines charnues, qui permettent de stocker l'eau (Salmi & Salmi, 2017). Contrairement aux racines de *T. zebrina* qui sont fines et fibreuses (Butnariu et *al.*, 2022). Nos résultats sont les mêmes avec celle de Belhocine, H. (2016) qui dit que *chlorophytum* possède un système racinaire fasciculé qui présente des racines nombreuses et grosses, Les effets de ces polluants dépendent de l'espèce végétale et du stade physiologique de la végétation.

L'évaluation de la teneur en eau (RWC) des quatre espèces a révélé une différence significative, reflétant des capacités contrastées à maintenir l'hydratation des tissus en condition de stress. *A. vera* et *K. fedschenkoii* sont classés dans le même groupe homogène avec une forte teneur en eau, qui s'expliquerait par leur nature succulente caractérisée par la capacité de stocker l'eau dans leurs tissus, ce qui leur permet une meilleure tolérance aux sécheresses (Barr et Weatherley, 1962).

L'activité biologique globale du sol est liée à la dégradation des polluants. Les résultats reflètent que les sols cultivés par *A. vera* et *K. fedschenkoii* présentent les plus fortes productions de CO₂ une forte activité microbienne. Ceci crée un environnement rhizosphérique favorable à la prolifération et à l'activité des microorganismes, en libérant des exsudats racinaires stimulants ce qui indique qu'elles auraient agi par phytostimulation (sterckemen et al, 2011)

L'activité de la catalase n'a pas été différente d'un sol à un autre, ce qui indique que toutes les plantes ont réagi de la même façon au stress polluant. Aussi nos résultats de l'activité de la catalase concordent avec ceux de Mohsenzadeh et al. (2012). Ces auteurs ont lié la stabilité de l'activité de catalase à la sensibilité des micro-organismes ou indirectement à la détérioration des propriétés physiques du sol suite à une telle contamination.

L'analyse quantitative d'HC dans le sol non cultivé est plus élevée par rapport aux autres sol cultivé par les plantes. Cette différence est due à la phytoremédiation, les plantes jouant un rôle important dans la réduction de la pollution suit par absorption d'HC ou par stimulation d'activité microbienne.

L'analyse quantitative d'HC dans les plantes a révélé que *A. vera* a absorbé la plus grande quantité d'HC, et posséderait une forte capacité d'accumulation liée à ses caractéristiques morphologiques, ses tissus gélatineux. *A. vera* serait donc une espèce intéressante pour la phytoremédiation.

L'analyse qualitative des hydrocarbures aromatiques dans les sols réalisés par spectrophotomètres UV montre que le sol non cultivé contient les quantités d'HA les plus élevées ce qui serait due à l'absence de plante. À l'inverse, les sols cultivés présentent une diminution des concentrations en HA, ce qui confirme l'effet positif des plantes sur le sol. Parmi les plantes étudiées, *T. zebrina* s'est distinguée par la plus faible concentration de HA dans le sol, ce qui suggère qu'elle favorise efficacement la réduction de la contamination. Cette plante a une absorbance limitée mais elle peut dégrader ces polluant avant qu'ils s'accumulent (Zhang et al, 2023)

L'analyse qualitative des HC dans les plantes présentes dans les tissus a permis de comparer la capacité des plantes à absorber et accumuler les HA. Les résultats montrent que *Chlorophytum comosum* a la concentration la plus élevée d'HA dans ces tissus, ce qui indiquerait une forte capacité de phytoextraction, elle absorbe directement les hydrocarbures du sol et les transfère vers ses parties aériennes. Les résultats de Benhammou (2023) montrent que *Crassula ovata* est l'espèce la plus efficace dans la phytoextraction, elle accumule les HC dans ces parties aériennes. *A. vera* accumule certains aromatiques, elle dégrade les HC au niveau de son système racinaire en association avec l'activité microbienne qui a montré une diminution des contaminants après phytostimulation (Sterckeman et al, 2011).

Les résultats du taux de germination et le test de toxicité des vers de terre montrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les sols, ce qui signifie que les espèces réagissent de la même façon vis-à-vis de la contamination et qu'elles ont eu la même efficacité. Les vers de terre sont morts dans le sol témoin et le sol initial ce qui est dû à la quantité élevée de toxicité par rapport aux sols cultivés.

A decorative scroll graphic with a black outline and a light gray shadow. The scroll is unrolled in the middle, with the top and bottom edges curled up. The word "Conclusion" is written in a black, serif font in the center of the unrolled section.

Conclusion

Les plantes ornementales apportant une touche esthétique mais aussi jouent un rôle important dans l'environnement car elles peuvent avoir des fonctions écologiques ainsi, étude met en évidence l'efficacité de différentes espèces de plantes ornementales dans la phytoremédiation des sols pollués par les hydrocarbures, en prenant compte les réactions des espèces végétales examinées avec l'évolution des communautés microbiennes et la dégradation des polluants.

Aloe vera et *Chlorophytum comosum* ont montré un bon potentiel et une grande capacité de tolérance et d'accumulation des carburant.

Aloe vera s'est distingué par la biomasse aérienne la plus élevé, une forte rétention en eau indicatrice d'une bonne adaptation au stress hydrique et la toxicité d'hydrocarbures grâce à ses caractéristiques morphologiques et la présence de tissus gélatineux. Aussi, cette espèce a une activité microbienne élevée favorisée par ses exsudats racinaires et fait donc appel au mécanisme de phytostimulation.

En parallèle, *C. comosum* a montré une dépollution remarquable associée à des mécanismes de phytoextraction ce qui souligne sa capacité à d'absorber et stocker les contaminants dans ces parties aériennes.

D'autres espèces comme *K. fedschonkoi*, *T. zebrina* ont également contribué dans la dépollution du sol. *K. fedschenkoie* a favorisé l'activité biologique du sol, ce qui indique qu'elle aurait agi par phytostimulation avec une absorption moindre que *T. zebrina*.

Sur le plan microbiologique, la diminution du nombre des bactéries observées après la phytoremédiation, serait liée à la dégradation des hydrocarbures (source de carbone), la modification des conditions du sol par les plantes (Shen et al., 2018). L'identification fongique met en évidence la présence d'espèces tolérantes (*Aspergillus niger*, *Fusarium spp.*) qui jouent un rôle dans la dégradation des polluants.

Nos résultats indiquant que les plantes ornementales jouent un rôle dans la diminution des quantités d'hydrocarbures dans les sols représentant une approche respectueuse de l'environnement et écologique durable pour améliorer la qualité environnementale tout en valorisant les espaces verts.

Ce travail offre diverses perspectives de recherche, en particulier :

- L'utilisation de *A. vera* et *C. comosum* dans des processus de phytoremédiation pour environnement.
- Faire identifier avec précision les mécanismes mise en œuvre par les plantes ornementales.
- Utilisation des plantes ornementales pour la décontamination des boues issues des stations d'épuration ou entreprises.



Références
Bibliographiques

Reference

Abdelly, C. (2006). *Bioremédiation / phytoremediation*. Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue.

Ali Ahmed, S. (2011). *Essai de réhabilitation d'un sol contaminé par les hydrocarbures à l'aide de tensioactifs obtenus par voie biologique* (Thèse de magistère, École nationale supérieure agronomique).

Arnaud, P. (2004). *Chimie organique* (208 p.). Dunod.

Baikeche, A., & Boudjemai, A. (2023). *Étude de la microbiologie des sols contaminés par les hydrocarbures : Cas de la station-service de Fréha*.

Belaid, L., & Chabi, S. (2023). *Évaluation du risque de pollution du sol par les carburants : Le cas des stations-services de Tizi Ouzou et Freha* (Mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou).

Belhocine, H. (2016). *Étude de l'efficacité d'une plante ornementale (Chlorophytum comosum) dans la décontamination d'un sol pollué aux hydrocarbures*

BELLIR., K. (2013). *Caracterisation Et Etude De La Retention Des Polluants Organiques Et Inorganiques Par Des Argiles Locales : Application Dans L'imperméabilisation Des C.E.T.* Thèsed de doctorat en EN Sciences En Genie Des Procedes ; Universite De Constantine 3.

Barr H., et Weatherley P. E., 1962. A new method for the measurement of the water content of leaves. *Journal of Experimental Botany*, 13 (1), 9-17.

Bento, F. M. Camargo, F. A. O. Okeke, B. C. and Frankenberger, W. T. 2005. Comparative bioremediation of soils contaminated with diesel oil by natural attenuation, biostimulation and bioaugmentation. *Bioresource Technology*. 96: 1049–1055

Bolan, N. S., Hee, P. J., Robinson, B., Naidu, R., & Huh, K. Y. (2011). La phytostabilisation : une approche écologique du confinement des contaminants. *Progrès en agronomie*, 112, 145–204.

Boufiane, M. (2015). *Recherche de la performance de quelques souches bactériennes dans la réhabilitation de deux types du sol pollué par les hydrocarbures* (Mémoire de Magister en Biologie, Université Kasdi Merbah Ouargla).

- Butnariu , M et al 2022.** A Review on Tradescantia: Phytochemical Constituents, Biological Activities and Health-Promoting Effects. <http://doi.org/10.31083/j.fbl2706197>
- Cadière, F. (2006).** *Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation* (Thèse de doctorat, Université d'Angers).
- Chaineau, C. H., Morel, J. L., & Oudot, J. (1997).** Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *Journal of Environmental Quality*, 26, 1478–1483.
- Collin, F. (2000).** *Pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés*. TEC & DOC.
- Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Cristaldi, A., ... & Fiore, M. (2020).** Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environmental Research*, 185, Article 109437.
- Dabouz, M., & Chihani, S. (2021).** *Caractéristiques physico-chimiques et biologiques de la purée des feuilles d'Aloe vera* (Mémoire de master, Université de Ghardaïa).
- Delage, P., & Schrefler, B. (2005).** *Géomécanique environnementale : sols pollués et déchets* (249 p.). Lavoisier.
- Dib, D. (2021).** *Impact de la pollution du sol aux hydrocarbures sur la flore et la pédofaune dans quelques stations* (Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou). <https://exemple.url/these>
- Doumont, D., & Libion, F. (2006).** Impact sur la santé des différents polluants : quels effets à court, moyen et long terme ? *Bulletin*, 06–38, 10–30.
- Elhag, M., Al-Ghamdi, A. A. M., Galal, H. K., & Dahlan, A. (2018).** Evaluation of *Aloe vera* L. as phytoremediator of heavy metals contaminated soils in arid environments. *Applied Ecology and Environmental Research*, 16(5), 6033–6045.
- Girard, C. M., Walter, C. H., & Berthelin, J. (2005).** *Sols et environnement* (436 p.). Dunod.
- Koller, E. (2004).** *Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues*. Dunod.

- Koller, E. (2009).** *Traitement des pollutions industrielles : eau, air, déchets, sols, boues* (2e éd., 569 p.). Dunod.
- Liu, J., Xin, X., & Zhou, Q. (2017).** Phytoremediation of contaminated soils using ornamental plants. *Environmental Reviews*, 25(4), 418–429. <https://doi.org/10.1139/er-2016-0082>
- Maes, E., Schadeck, S., & Brahy, V. (2007).** *Sol5 : la contamination locale des sols* (500 p.).
- Mejía-Méndez, J. L., Bach, H., Lorenzo-Leal, A. C., Navarro-López, D. E., López-Mena, E. R., Hernández, L. R., & Sánchez-Arreola, E. (2023).** Activités biologiques et profils chimiques des extraits de *Kalanchoe fedtschenkoi*. *Plants*, 12(10), 1943.
- Militon, C. (2007).** *Caractérisation des communautés procaryotiques impliquées dans la bioremédiation d'un sol pollué par des hydrocarbures et développement d'outils d'analyse à haut débit : biopuces ADN* (Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal).
- Neff, J. M., Stanley, O., Gardiner, W., & Stejskal, I. (2000).** Effects of weathering on the toxicity of three offshore Australian crude oils and a diesel fuel to marine animals. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19, 1809–1821.
- Observatoire régional de santé d'Île-de-France. (2014).** *La santé observée 9.5 – La pollution des sols en Seine-Saint-Denis : Contexte national*. Observatoire régional de santé d'Île-de-France.
- Origo, N. (2009).** *Approche socio-spatiale de la réhabilitation des sites industriels pollués* (Thèse de doctorat, Université Paris IV-Sorbonne).
- Origo, N., Wicherek, S., & Hotyat, M. (2012).** Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation. *Revue*, 12(2), 12 p.
- Ouvrard, S., Ripamonti-Chenot, E.-D., Masfarau, J.-F., & Schwartz, C. (2012).** Soils contaminated with PAH: a long-term natural attenuation assessment. [*Type de source à compléter*].
- Picot, A., & Montando, F. (2013).** *Écotoxicochimie appliquée aux hydrocarbures*. TEC & DOC.

- Pilon-Smits, E. (2005).** Phytoremediation. *Annual Review of Plant Biology*, 56, 15–39.
- Ramade, F. (1992).** *Précis d'écotoxicologie* (300 p.). Masson.
- Ramos-Arcos, S. A., López-Martínez, S., Velázquez-Martínez, J. R., Gómez-Aguirre, Y. A., Cabañas-García, E., Morales-Bautista, C. M., & Hernandez-Gallegos, M. A. (2023).** Phytochemicals and bioactivities of *Tradescantia zebrina* Bosse: A southern Mexican species with medicinal properties. *Journal of Food and Nutrition Research*, 11(9), 564–572. <https://doi.org/10.12691/jfnr-11-9-2>
- Rocha, C. S., Rocha, D. C., Kochi, L. Y., Carneiro, D. N. M., Dos Reis, M. V., & Gomes, M. P. (2022).** Phytoremediation by ornamental plants: A beautiful and ecological alternative. *Environmental Science and Pollution Research International*, 29(3), 3336–3354. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17307-7>
- Saada, A., Nowak, C., & Coquereau, N. (2005).** État des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures : Rapport intermédiaire – Résultats de la phase 1. *Rapport BRGM/RP-53739-FR*, 23–43.
- Salmi, S., & Salmi, F. (2017).** *Contribution à l'étude de l'efficacité de deux variétés de Chlorophytum comosum et de Vicia faba dans la décontamination de sol artificiellement pollué et l'influence de la pollution aux hydrocarbures sur leurs caractères phénoliques.*
- Savadogo, P. W., Ouaitara, C. A. T., Ouattara, A. S., & Traoré, A. S. (1999).** Biodégradation anaérobie d'un pyréthrénoïde et d'insecticides organophosphorés par des cultures bactériennes mixtes non définies. *Science et Technique, Sciences naturelles*, 23(2).
- Schnoor, J. L., McCutcheon, S. C., & Steven, C. (2003).** *Phytoremediation: Transformation and control of contaminants.* Wiley-Interscience.
- Shen, Y. Y., Ji, Y., Li, C., Luo, P., Wang, W., Zhang, Y., & Nover, D. (2018).** Effects of phytoremediation treatment on bacterial community structure and diversity in different petroleum-contaminated soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), 2168. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102168>

Siciliano S.D., Germida J.J., Banks K., Greer C.W., 2003. Changes in Microbial Community Composition and Function during a Polyaromatic Hydrocarbon Phytoremediation Field Trial. *Appl. Environ. Microbiol.* 69. 483-489. <https://doi.org/10.1128/AEM.69.1.483-489.2003>.

Soltani, M. (2004). *Distribution lipidique et voies de décontamination métabolique chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes* (Thèse de doctorat, Université de Paris).

Sterckeman, T., Ouvrard, S., & Leglize, P. (2011). Phytoremédiation des sols. *Techniques de l'Ingénieur, BIO5300*.

Svjetlana, Z., Parađiković, N., Davidović, J., Gidas, E., & Vujošević, A. (2020). The effect of water extract of *Aloe vera* (L.) Burm.f. on germination and growth of scarlet sage. *Proceedings of the XI International Scientific Agricultural Symposium "Agrosym 2020"*, 262–267.

The Lancet Planetary Health. (2022). Correction to "Pollution and health: A progress update." *The Lancet Planetary Health*, 6(6), e535–e547. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00133-2](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00133-2)

Vanobberghen, F. (2011). *La phytoremédiation en Wallonie : Évaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds* (Mémoire de master, Université libre de Bruxelles).

Wang, Y., Tao, J. et Dai, J. (2011). Tolérance au plomb et mécanisme de détoxification de *Chlorophytum comosum*. *Revue Africaine de Biotechnologie*, 10(65), 145

Zhang, Y., Chen, L., Liu, Y., & Wang, X. (2023). Mécanisme de transport et d'élimination du benzène par *Tradescantia zebrina* Bosse et *Epipremnum aureum* (Linden ex André) G.S. Bunting dans un système air-plante-solution. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(20), 58282–58294

Site web 01: <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/8173/plante-ornementale>






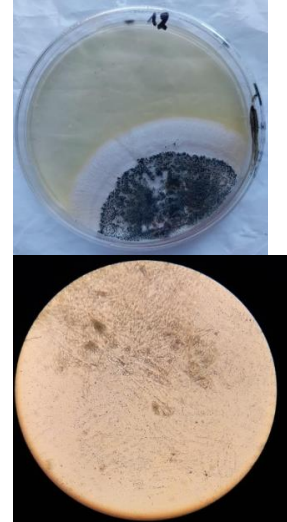
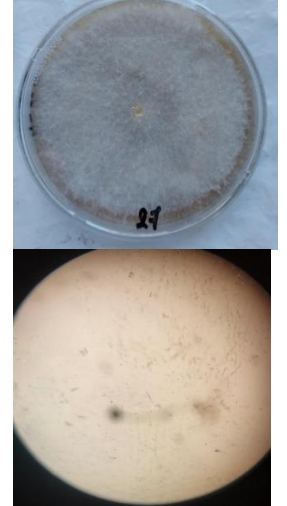
Annexes



Annexe 9 : dénombrement des bactéries

Dénombrement Bactérienne Avant la phytoremédiation						
Espèce /dilution	CH	KA	ZE	AL	ST	SF
10-1	>300	>300	>300	>300	>300	>300
10-2	132	120	130	125	137	70
10-3	101	102	37	76	122	46
10-4	74	52	7	9	37	18
10-5	63	34	1	2	3	4
10-6	30	26	0	0	1	1
Dénombrement bactérienne après la phytoremédiation						
10-1	130	71	83	90	85	60
10-2	66	50	68	66	54	32
10-3	40	32	54	31	25	12
10-4	25	27	50	4	16	6
10-5	5	12	45	1	11	1
10-6	1	2	19	0	0	0

Annexe 10 : Analyses macroscopique et microscopiques :

	Caractéristique microscopique	Caractéristiques macroscopiques
 	<p><i>Rhizopus niger</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forme des stolons sur lesquels apparaissent des rhizoïdes qui permettent au champignon de fixé sur boite pétri. • Termine par columelle contient spore dans le sporocyste 	<p>Couleur de colonies : marron</p> <p>Forme de colonies : envahissante</p> <p>Exsudats : présence des gouttelles d'eau sur le mycelium</p>

 <p>The top image shows a petri dish with several dark, fuzzy colonies of Aspergillus niger. The bottom image shows a circular agar plate with a single, large, dark, fuzzy colony.</p>	<p><i>Aspergillus niger</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Aspect conidiophore qui sont terminés par tête conidiennes bisériées radiées à plusieurs colonne noires, vésicules globuleuses • Spores formées en très longues chaînes nombreuse de couleur clair plus au moins colorés ou Nouâtre globuleuse à ovoïde 	<p>Couleur de colonies : noire Forme de colonies : Arrondies Exsudats : présence des gouttellettes d'eau sur le mycelium</p>
 <p>The top image shows a petri dish with a greenish, fuzzy colony of Penicillium sp. The bottom image shows a circular agar plate with a large, light-colored, fuzzy colony.</p>	<p><i>Penicillium sp</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Situé dans les tons verts bleutés • Conidies globuleuses,lisses <p>Conidiophores taille variable</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spore produite en longue chaine <p>Clair faiblement coloré ovale</p>	<p>Couleur colonies : Vert -grisâtre Forme de colonies irrégulière Exsudats : Présence des gouttelettes d'eau sur le mycélium</p>
 <p>The top image shows a petri dish with a white, fuzzy colony of Fusarium spp. The bottom image shows a circular agar plate with a large, white, fuzzy colony.</p>	<p><i>Fusarium spp</i> :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les conidiophores sont très ramifiées porte des spores d'aspect grassex. • A des microconidies court unicellulaire • Les macroconidies plus longue cloisonnées • Thalle à une croissance rapide, blanc à crème, jaune, rose, violet 	<p>Couleur de colonies : blanche Forme colonies : envahissante Exsudats : présence des gouttelettes d'eau sur le mycélium</p>

 	<p>- <i>Mycélia sterilia</i> Des filaments plus ou moins ramifiées</p>	<p>Couleur de colonies : jaune pale Forme colonies : circulaires bien délimité Exsudats : présence des gouttelettes d'eau sur le mycélium</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Annexes II : Résultats des analyses statistique. Analyse de la variance pour la biomasse végétale :

➤ **Analyse de la variance pour le nombre des feuilles :**

```
> reg.aov=lm(nmbrf~sp)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: nmbrf
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
sp      3 101.583  33.861  4.4167 0.04129 *
Residuals 8  61.333   7.667
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Classification en groupes homogènes de nombre de feuilles :

```
$groups
      nmbrf groups
sp2 15.000000      a
sp3 12.666667     ab
sp4  9.000000     ab
sp1  7.666667      b
```

➤ **Analyse de la variance pour la biomasse aérienne des plantes :**

```
> kruskal.test(BA~SP)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  BA by SP
Kruskal-Wallis chi-squared = 9.8421, df = 3, p-value = 0.01996
```

Classification en groupes homogènes

```
$groups
      BA groups
S1 11.0      a
S2  8.0     ab
S3  4.5     bc
S4  2.5      c
```

➤ **Analyse de la biomasse racinaire des plantes :**

```
> reg.aov1=lm(BR~SP)
> anova(reg.aov1)
Analysis of Variance Table

Response: BR
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
SP      3 0.155625 0.051875  7.6474 0.00979 **
Residuals 8 0.054267 0.006783
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Classification en groupes homogènes

```
$groups
      BR groups
S2 0.3300000    a
S3 0.2266667    a
S1 0.1400000   ab
S4 0.0200000    b
```

➤ **Analyse de la variance pour la RWC (Relative water content) :**

```
> kruskal.test(rwc~sp)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: rwc by sp
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 7.8718, df = 3, p-value = 0.04874
```

Classification en groupes homogènes :

```
$groups
      rwc groups
sp1 9.333333    a
sp3 9.333333    a
sp2 4.666667   ab
sp4 2.666667    b
```

➤ **Analyse de la variance de l'activité biologique globale :**

```
> reg.aov=lm(CO2~SP)
```

```
> anova(reg.aov)
```

```
Analysis of Variance Table
```

```
Response: CO2
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
SP	5	0.0088895	0.00177789	3.9956	0.02977 *
Residuals	10	0.0044496	0.00044496		

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Classification en groupe homogène :

```
$groups
      CO2 groups
s3 0.3094667    a
s1 0.2992000    a
s4 0.2874667   ab
s2 0.2684000   ab
s5 0.2640000   ab
s6 0.2354000    b
```

Analyse de la variance de l'activité de catalase :

```
> kruskal.test(CAT~SP)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: CAT by SP
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 4.8952, df = 5, p-value = 0.4288
```

➤ **Analyse de la variance de la quantité des hydrocarbures :**

- Dans le sol

```
> kruskal.test(hcsol~esp)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: hcsol by esp
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.375, df = 4, p-value = 0.4971
```

-Dans les plantes :

```
> kruskal.test(hcp~sp)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: hcp by sp
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 2.2821, df = 3, p-value = 0.516
```

➤ **Analyse de teste de germination :**

```
> kruskal.test(tg~sol)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: tg by sol
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 3.5793, df = 5, p-value = 0.611
```

Analyse de la variance pour test de toxicité sur les vers de terre

```
> kruskal.test(TM,sol)
```

```
Kruskal-Wallis rank sum test
```

```
data: TM and sol
```

```
Kruskal-Wallis chi-squared = 5.6332, df = 5, p-value = 0.3436
```

Résumé :

La phytoremédiation des sols pollués représente une technique écologique et une solution durable pour la gestion des contaminants.

Notre étude a tenté de mettre en évidence l'efficacité de différentes espèces de plantes ornementales dans la phytoremédiation des sols pollués aux carburants, en tenant compte des réactions vis-à-vis de la pollution de ces espèces ainsi que l'évolution des communautés microbiennes et la dégradation des polluants dans le sol. *A. vera* et *C. comosum* ont montré qu'elles possédaient une grande capacité de tolérance et d'accumulation des différents hydrocarbures. *A. vera* est l'espèce qui a présenté la biomasse aérienne la plus élevée ainsi que la plus forte rétention en eau. Par ailleurs, le sol cultivé par cette espèce a montré une activité microbienne élevée. Ces résultats expliqueraient le fait qu'elle ait accumulé certaines aromatiques et qu'elle aurait contribué à la dégradation des hydrocarbures dans le sol par phytostimulation. De son côté, *C. comosum* aurait agi plus par le mécanisme de phytoextraction ce qui souligne sa capacité à absorber et stocker les contaminants. Il s'agit d'une plante grimpante présentant une longue tige formant des feuilles sur toute sa longueur. Aussi, l'activité biologique dans le sol cultivé par cette espèce était plus faible que pour *A. vera*. Les autres espèces (*K. fedschenkoie* et *T. zebrina*) ont également contribué à la dépollution du sol. *K. fedschenkoie* a favorisé l'activité biologique du sol, ce qui indique qu'elle aurait agi par phytostimulation avec une absorption moindre que *C. comosum*. La respiration microbienne dans le sol cultivé par *T. zebrina* a été moindre, ce qui laisse supposer que le mécanisme dominant n'est pas la phytostimulation d'autant plus qu'elle accumulé des HA.

Abstract:

Phytoremediation of polluted soils represents an ecological technique and a sustainable solution for contaminant management.

Our study has attempted to demonstrate the effectiveness of different ornamental plant species in phytoremediating fuel-polluted soils, taking into account the reactions of these species to pollution, as well as the evolution of microbial communities and the degradation of pollutants in the soil. *A. vera* and *C. comosum* have been shown to have a high capacity for tolerance and accumulation of various hydrocarbons. *A. vera* was the species with the highest above-ground biomass and water retention. In addition, the soil cultivated with this species showed high microbial activity. These results may explain why it accumulated certain aromatics and contributed to the degradation of hydrocarbons in the soil through phytostimulation. *C. comosum*, on the other hand, would have acted more through the phytoextraction mechanism, underlining its capacity to absorb and store contaminants. *C. comosum* is a climbing plant with a long stem forming leaves along its entire length. As a result, biological activity in soil cultivated with this species was lower than for *A. vera*. The other species (*K. fedschenkoie* and *T. zebrina*) also contributed to soil decontamination. *K. fedschenkoie* promoted biological activity in the soil, indicating that it acted by phytostimulation, with less uptake than *C. comosum*. Microbial respiration in soil cultivated with *T. zebrina* was lower, suggesting that the dominant mechanism was not phytostimulation, especially as it accumulated H

