

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté 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 du transfert des carburants dans les
plantes ornementales utilisées dans la
phytoremédiation d'un sol pollué**

Présenté par :

BENHAMMOU Souhila

BENHAMMOU Fatiha

Devant le jury composé de :

| | | | |
|-----------------------|------------------------------------|--------------|------------------|
| Présidente : | M^{me} LANDRI G. | M.A.A | U.M.M.T.O |
| Promotrice : | M^{me} ALI AHMED S. | M.C.B | U.M.M.T.O |
| Examinatrice : | M^{me} CHIBANE G. | M.A.A | U.M.M.T.O |

2023 / 2024

Remerciements

*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} ALLI AHMED S.**, maître de conférences B au département d'Ecologie et environnement, pour son encadrement scientifique, ses précieuses orientations, son soutien et ses encouragements et son souci de mener à bien ce travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury ; la présidente **M^{me} LANDRI G.** et l'examinatrice **M^{me} CHIBANE G.** qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*Nous remercions aussi très sincèrement la directrice de laboratoire **Mme SADOUDI-ALI AHMED D.** qui nous a permis d'accéder au laboratoire où nous avons réalisé la partie pratique de notre mémoire ainsi que **M^{me} ABROUS H.** pour son aide, sa disponibilité 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

On dédie ce modeste travail

*A nos parents notre très chère mère et notre très cher père, pour leur amour,
leur patience, leur soutien, leurs encouragements tout au long de notre
parcours.*

A notre cher frère ; Malik

A nos chers frères et sœurs et leurs enfants, source de joie et de bonheur.

A notre famille, source d'espoir et de motivation.

A nos honorables enseignants.

A tous nos amis.

A tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin.

Souhila et Fatiha

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Composition de l'essence (Marchal, Solano-Serena, et Vandecasteele, 2003)..... | 5 |
| Figure 2 : Composition de gasoil (Marchal, Solano-Serena, et Vandecasteele, 2003)..... | 6 |
| Figure 3 : Principaux mécanismes de phytoremédiation (Sterckeman et al., 2012)..... | 13 |
| Figure 4 : Localisation du site d'étude (Google earth, 2024)..... | 15 |
| Figure 5 : Plan d'échantillonnage du sol prélevé dans la station-service..... | 17 |
| Figure 6 : Dispositif expérimental de la culture en pots des plantes ornementales des quatre espèces..... | 18 |
| Figure 7 : Schéma du dispositif expérimental de la culture en pots..... | 18 |
| Figure 8 : Dispositif du test respirométrique..... | 20 |
| Figure 9 : Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol. | 21 |
| Figure 10 : Protocole de l'extraction des hydrocarbures. | 22 |
| Figure 11 : Protocole de détermination par spectrophotométrie UV. | 23 |
| Figure 12 : Hauteur moyenne des tiges chez les quatre espèces végétales. | 24 |
| Figure 13 : Nombre de feuilles des quatre espèces végétales. | 25 |
| Figure 14 : Morphologie des plants des quatre espèces à la récolte. | 26 |
| Figure 15 : Aspect de la partie racinaire des plantes des quatre espèces à la récolte..... | 26 |
| Figure 16 : Biomasse végétale des plantes des quatre espèces. | 27 |
| Figure 17 : Teneur relative en eau de quatre espèces végétales..... | 28 |
| Figure 18 : Production cumulée de CO ₂ dans les sols cultivés par les quatre espèces..... | 28 |
| Figure 19 : Quantité des HC totaux dans les sols cultivé et non cultivé (témoin). | 31 |
| Figure 20 : Quantité des HC totaux dans les plants des quatre espèces végétales..... | 32 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Principaux polluants retrouvés sur les sites pollués (Zmirou et al., 2003). | 3 |
| Tableau 2 : Classification générale des hydrocarbures (Guibet, 1997). | 4 |
| Tableau 3 : Les sources anthropiques de la pollution du sol par les hydrocarbures (Colin, 2000). | 8 |
| Tableau 4 : Quelques plantes ornementales utilisées en phytoremédiation. | 10 |
| Tableau 5 : Caractéristiques du sol provenant de la station-service. | 16 |
| Tableau 6 : La composition des HAP dans le sol cultivé par (<i>Crassula, Chlorophytum, Pothos, Syngonium</i>). | 29 |
| Tableau 7 : La composition des HAP dans les 4 espèces (<i>Crassula, Chlorophytum, Pothos, Syngonium</i>). | 30 |

Liste des abréviations

HC : hydrocarbures

MO : matière organique

HAP : hydrocarbure aromatique polycyclique

T : témoin

Cra : *Crassula ovata*

Chc : *Chlorophytum comosum*

Psp : *Pthos sp*

Ssp : *Syngonium sp*

Nmb : Nombre

BV : Biomasse végétale

Haut : Hauteur

RWC : Relative water content

Sommaire

| | |
|---------------------------|----------|
| Introduction | 1 |
|---------------------------|----------|

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique

| | |
|--|----|
| 1- Pollution du sol par les hydrocarbures | 3 |
| 1-1- Classification des hydrocarbures | 4 |
| 1-2- Produits de raffinage..... | 5 |
| 1-3- Sources de contamination du sol par les hydrocarbures | 7 |
| 1-4- Impact de la pollution du sol par les hydrocarbures | 8 |
| 2- Plantes ornementales et la phytoremédiation | 10 |
| 2-1- Généralités sur les plantes ornementales | 10 |
| 2-2- Circulation des hydrocarbures dans les plantes | 12 |
| 2-3- Mécanismes de la phytoremédiation des sols..... | 13 |

CHAPITRE II : Matériel et méthodes

| | |
|--|----|
| 1- Présentation du site d'échantillonnage..... | 15 |
| 2- Matériel | 15 |
| 2-1- Matériel végétal | 15 |
| 2-2- Sol..... | 16 |
| 3- Méthodes..... | 16 |
| 3-1- Echantillonnage du sol | 16 |
| 3-2- Préparation du sol et mise en place de l'essai | 17 |
| 3-3- Evaluation de la croissance des plantes | 19 |
| 3-4- RWC (Relative water content)..... | 19 |
| 3-5- Evaluation de l'efficacité de la décontamination du sol | 20 |
| 3-6- Analyse statistique..... | 22 |

Chapitre III : Résultats et discussion

| | |
|---|-----------|
| 1- Résultats | 24 |
| 1-1- Hauteur moyenne des plantes | 24 |
| 1-2- Nombre de feuilles | 25 |
| 1-3- Biomasse végétale | 26 |
| 1-4- RWC | 27 |
| 1-5- Activité biologique globale | 28 |
| 1-6- Analyse qualitative des hydrocarbures | 29 |
| 1-6-1- Analyse dans les sols | 29 |
| 1-6-2- Analyse dans les plantes | 30 |
| 1-7- Analyse quantitative des hydrocarbures | 30 |
| 1-7-1- Analyse dans les sols | 30 |
| 1-7-2- Analyse dans les plantes | 31 |
| 2- Discussion | 33 |
| Conclusion | 36 |
| Références bibliographiques | 38 |
| Annexes | |



Introduction

La problématique de la pollution du sol est un fardeau environnemental qui touche plusieurs pays, qui peut être due à l'exploitation minière, aux activités pétrolières, ou autres. Cette contamination, trop négligée jusqu'à une époque récente, est préoccupante par ses conséquences environnementales, sanitaires et socio-économiques (Colin, 2000).

La pollution du sol par les hydrocarbures a attiré d'avantage l'attention en tant que préoccupation mondiale. Environ 25 000 cas de contamination sont recensés chaque année à travers le monde (Mayer, 2019). Les émissions d'hydrocarbures dans les divers biotopes terrestres et aquatiques provoquent d'importantes modifications dans les apports aux trois compartiments de la biosphère en comparaison des flux naturels (Ramade, 1992). Ils constituent un risque sérieux sur la qualité des sols, la vie végétale et animale ainsi que la santé humaine (Van Der Perk, 2006).

La présence de plusieurs stations-services est une source importante de la pollution du sol (Patej, 2002). Elle peut être due à la corrosion des cuves de stockage, ou aux fuites de canalisation entre les citernes et les îlots de pompes et séparation des hydrocarbures (Colin, 2001). Les polluants des stations-services sont des substances, pour la plupart, mobiles qui peuvent même atteindre les eaux souterraines et superficielles (Piedrafita et Carnicer, 2007). Cette pollution peut avoir des effets sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol (Parvizi Mosaed et al., 2015). A des concentrations élevées, les hydrocarbures peuvent avoir des effets toxiques, négatifs plus importants sur la croissance et la germination des plantes (Tang et al., 2011). La prise de conscience de ce risque conduit à la nécessité d'établir des diagnostics de la pollution et de mettre en œuvre des moyens pour y remédier (Mortet, 2019).

Les techniques de décontamination utilisant diverses méthodes courantes (thermiques, physiques et chimiques). Toutefois, ces technologies peuvent être soit coûteuses, nécessiter des investissements considérables et des appareils avancés, soit ne permettre pas une destruction totale de la contamination (Varjani, 2017). À la différence des techniques biologiques qui sont largement développées et qui proviennent de la nature elle-même, y compris la phytoremédiation.

La phytoremédiation est une technologie verte prometteuse aux problèmes posés par la décontamination des sols pollués par des hydrocarbures. Elle consiste à utiliser la capacité des plantes à éliminer et /ou atténuer la contamination (Shirdan et al., 2008). Elle offre une réelle alternative, aussi bien écologique que paysagère et financière, et s'inscrit dans la durabilité.

Plusieurs auteurs ont effectué des travaux sur la phytoremédiation, montrant la capacité des légumineuses, telles que la fève et le haricot à tolérer la pollution (Belcaceem et Rouas, 2012 ; Zerrouki et Ouhadda, 2013 ; Bourkache et Boussenou, 2015 ; Slimani, 2015 ; Ben Kherfia, 2020 ; Labani et Kolli, 2021), mais les fruits et graines de ces espèces sont comestibles, leur utilisation dans la phytoremédiation des sols pollués représente un risque de transfert des hydrocarbures. L'utilisation d'autres espèces telles que les plantes ornementales qui pourraient être une solution à ce problème. Comme ces espèces ne sont pas destinées à la consommation animale ou humaine, elles ne présentent aucun risque de bioamplification des polluants puisqu'elles n'entrent pas dans la chaîne alimentaire (Rocha, et al, 2022). Elles sont généralement vivaces non combustibles, et constituent une vaste gamme de plantes qui donnent de la couleur aux massifs. Leur utilisation pour des applications environnementales peut ainsi contribuer à la diversification et à l'embellissement des paysages (Labrecque, 2021).

Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié le transfert éventuel des carburants dans les plantes ornementales lors de la phytoremédiation d'un sol pollué, en examinant les mécanismes d'action. Quatre espèces ont été utilisées afin de comparer leur comportement en situation de stress polluant et leur aptitude à dépolluer le sol.

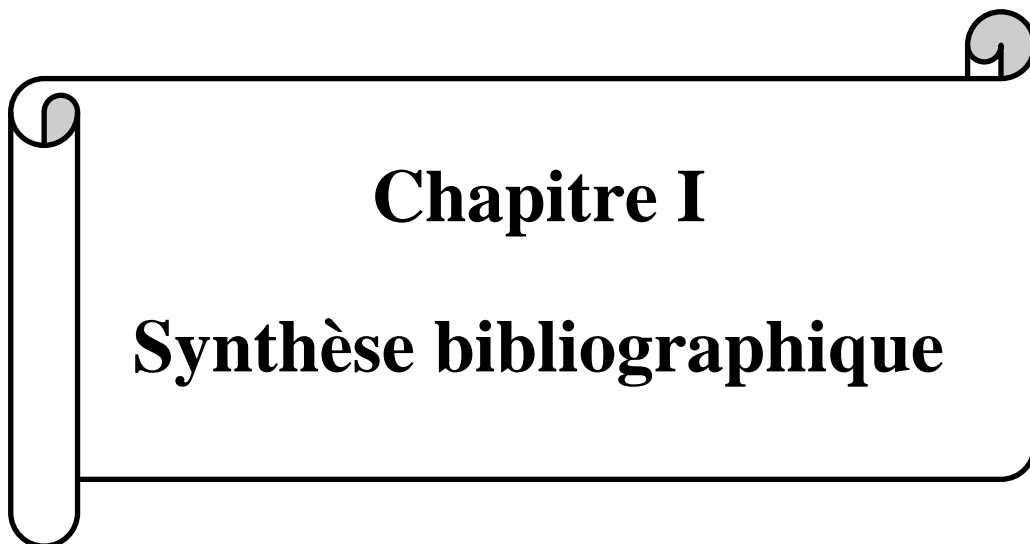
Le présent travail est structuré en 3 chapitres.

Le premier est une synthèse bibliographique portant sur la pollution des sols par les hydrocarbures, leur classification, leurs effets à différentes échelles, les plantes ornementales et la phytoremédiation.

Le deuxième chapitre consiste à présenter la station d'étude ainsi que le matériel utilisé, et les méthodes adoptées pour évaluer l'effet des hydrocarbures sur les plantes et sur quelques propriétés du sol, ainsi que 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.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale et des perspectives qui serviront à l'avancement de la recherche sur le sujet.



Chapitre I

Synthèse bibliographique

1- Pollution du sol par les hydrocarbures :

La pollution des sols est définie comme l'accumulation, dans les sols, de composés toxiques persistants, chimiques, de matières radioactives ou d'agents pathogènes, qui ont des effets néfastes sur les organismes vivants. En général, la contamination du sol résulte de l'application de pesticides, la percolation d'eaux de surface contaminées vers les strates souterraines, la lixiviation de déchets provenant des décharges, et le déversement du pétrole et des carburants qui sont parmi les produits chimiques les plus couramment impliqués (Havugimana et al., 2015).

Par leur abondance naturelle, les hydrocarbures font partie des produits chimiques les plus importants pour l'humanité et sont notamment utilisés comme source d'énergie primaire. Les hydrocarbures sont les principaux polluants dans le sol (tableau 1) avec un taux d'occurrence de 49 % (Zmirou et al., 2003).

Tableau 1 : Principaux polluants retrouvés sur les sites pollués (Zmirou et al., 2003).


| Polluants (756 cas étudiés) | % |
|---|----------|
| - Hydrocarbures | 49 |
| - Plomb | 20 |
| - Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) | 19 |
| - Solvants halogénés | 15 |
| - Chrome | 15 |
| - Zinc | 15 |
| - Cyanure | 12 |
| - Cuivre | 11 |
| - Arsenic | 10 |
| - Nickel | 8 |
| - Polychlorobiphényles (terphényles) | 7 |
| - Solvants non halogènes | 7 |
| - Cadmium | 7 |
| - Mercure | 6 |

1-1- Classification des hydrocarbures :

Les hydrocarbures (HC) ou huiles minérales regroupent différents produits pétroliers. Ce sont des composés organiques qui contiennent des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) et dont la formule brute est C_nH_m (Fattal, 2008).

Les hydrocarbures sont souvent classés selon leur nature. On distingue trois grandes familles, les hydrocarbures saturés (les alcanes), possédant une ou plusieurs insaturations (les alcènes, les alcynes) et les composés aromatiques (Guibet, 1997).

Tableau 2 : Classification générale des hydrocarbures (Guibet, 1997).

| Famille | Désignation courante | Désignation officielle | Motif Structural | Formule Globale | Exemple |
|-------------|--|--------------------------------|---|---|---|
| Saturés | Paraffines : Hydrocarbures à chaînes linéaires ou ramifiés. | Alcanes | Liaisons simples à chaînes de carbones ouvertes | C_nH_{2n+2} | - Méthane (CH_4) - Propane (C_3H_8) - Butane (C_4H_{10}) |
| | Naphtènes : possédant des cycles à chaîne carbonée fermée. | Cyclanes | Cycle de 3 à 6 atomes de carbones | C_nH_{2n} | - Cyclopropane - Cyclobutane - Cyclopentane |
| Insaturés | Oléfines : sous forme de chaînes ou de cycles. | Alcènes | Liaison(s) double(s) | C_nH_{2n} | - Éthylène (C_2H_4) - Propène (C_3H_6) - Butène (C_4H_8) |
| | Acétyléniques : cycliques, appelé cyclènes, sont très rares. | Alcynes | Liaison(s) triple(s) | C_nH_{2n-2} | - Acétylène (C_2H_2) |
| Aromatiques | Aromatiques : contenant au moins un noyau benzénique. | Monocycliques Polycycliques | Présence de cycle(s) benzénique(s) |  | - Benzène (C_6H_6) - Toluène ($C_6H_5CH_3$) - Pyrène ($C_{16}H_{10}$) |

1-2- Produits de raffinage :

Le raffinage du pétrole est un procédé industriel qui permet de transformer le pétrole brut en différents produits finis tels que l'essence, le fioul lourd ou le naphta qui peuvent être utilisés pour le transport, les besoins industrielles, la fabrication de plastiques, de fibres, de caoutchoucs synthétiques, etc. (Favenec, 1998).

Le pétrole brut est un mélange hétérogène liquide d'hydrocarbures divers inutilisable en l'état. Il est formé en profondeur dans le sous-sol, au cours des siècles, par transformation de matières organiques emprisonnées dans des couches sédimentaires (Angelier, 1990). Ses composants doivent être séparés afin d'obtenir les produits finaux exploitables directement (Favenec, 1998). On distingue en général deux grands types :

- Les produits énergétiques, tels que l'essence, le diesel (gazole) ou le fioul ;
- Les produits non-énergétiques, tels que les lubrifiants, le bitume les naphas utilisés en pétrochimie.

1-2-1- Les carburants (et les combustibles) :

1-2-1-1- L'essence :

L'essence est un mélange de fractions d'hydrocarbures (fig. 1) qui désigne les carburants, les combustibles liquides et volatiles qui possèdent une grande densité d'énergie. Ils sont utilisés dans les moteurs à allumage par étincelle. Ils sont formés en mélangeant un certain nombre de fractions pétrolières (bases) issues des procédés de raffinage avec des quantités variables (Favenne, 1998).

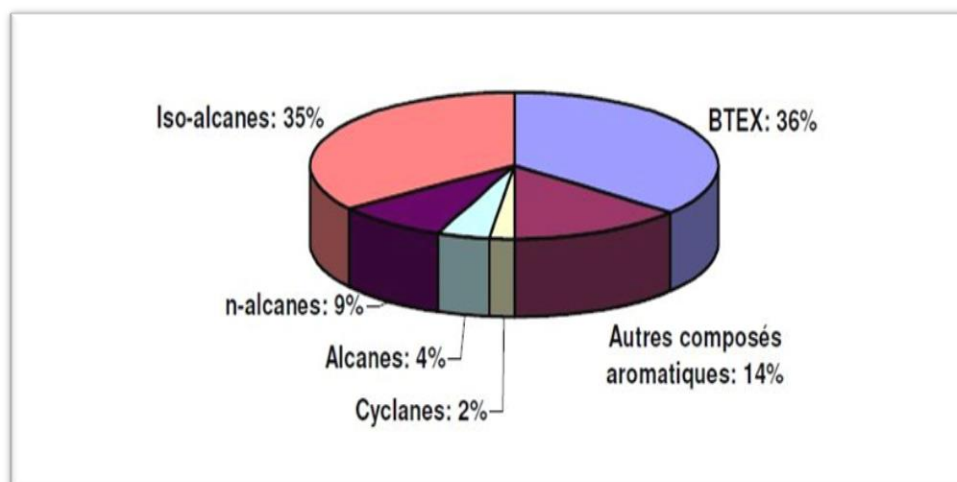


Figure 1 : Composition de l'essence (Marchal, Solano-Serena, et Vandecasteele, 2003).

1-2-1-2- Gasoil :

Le gasoil est une sorte de fioul léger, un carburant fabriqué à partir du pétrole raffiné. Il représente le produit le plus lourd de la distillation atmosphérique (Favenec, 1998).

Il est composé d'environ 75 % d'hydrocarbures saturés (fig. 2) principalement des alcanes, tels que les n-alcanes, iso-alcanes et cyclanes et de 25 % d'hydrocarbures aromatiques tels que les naphthalènes et les alkylbenzènes (David, 1995).

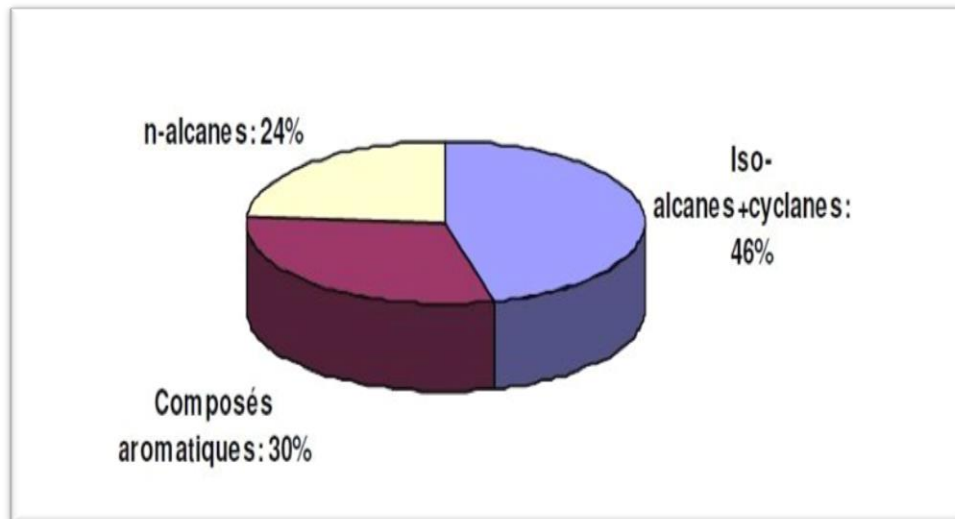


Figure 2 : Composition de gasoil (Marchal, Solano-Serena, et Vandecasteele, 2003).

1-2-1-3- Fioul :

Il existe le fioul lourd et le fioul domestique. Le fioul lourd est un produit issu d'une double distillation du pétrole brut qui va lui conférer une haute viscosité. C'est un combustible utilisé surtout pour la génération électrique et également comme carburant pour les moteurs des gros navires (pétroliers). Le fioul domestique issu de la même coupe que le gasoil, possède des caractéristiques très voisines de celle du gasoil, il a une plus faible viscosité. Il est utilisé principalement comme combustible de chauffage (Favenec, 1998).

1-2-1-4- Kérosène :

C'est un mélange d'hydrocarbures saturés de premier type ou alcane. Ce carburant est utilisé notamment dans le monde de l'aviation (carburateurs), permettant de faire fonctionner des turboréacteurs. Sa teneur en aromatiques est très élevée, avec une basse teneur en soufre pour limiter la corrosion (Favenec, 1998).

1-2-2- Autres produits spéciaux :**1-2-2-1- Les lubrifiants :**

Les lubrifiants ; une matière onctueuse liquide ou solide, d'origine minérale, sont un mélange d'huiles de base issues en majorité des raffineries et d'additifs destinés à ajuster leurs caractéristiques. Ces produits répondent à des utilisations particulières : huile pour les moteurs, les transmissions hydrauliques (Favenec, 1998).

1-2-2-2- Le bitume :

C'est le produit pétrolier le plus lourd, il peut se trouver à l'état liquide ou solide. Il a une couleur sombre, liquéfiable à chaud et adhère aux supports sur lesquels on l'applique. 90 % de la production sont destinés à la fabrication des revêtements routiers, de toitures, de canalisations (Favenec, 1998).

1-2-2-3- Les naphthas :

Le naphtha est une matière première de la pétrochimie tant pour la fabrication des oléfines (éthylène, propylène) que des aromatiques (benzène, toluène, xylène - dits BTX). Les utilisations des oléfines sont très nombreuses (matière plastique, PVC, néoprène, détergents) et génératrices d'importantes valeurs ajoutées (Favenec, 1998).

1-2-2-4- Les solvants :

Ce sont des produits provenant de coupes pétrolières relativement légères. Leurs domaines d'utilisation sont l'agriculture et l'industrie de peinture et de plastique.

1-3- Sources de contamination du sol par les hydrocarbures :

Certains de ces polluants sont présents de façon naturelle (tableau 3) et proviennent soit de la combustion de la matière organique, soit de l'altération de la roche mère du sous-sol. Cependant, les concentrations les plus importantes dans les sols sont d'origine anthropique (Lemière et al., 2008).

Les activités humaines sont à l'origine de nombreuses contaminations localisées ou diffuses au niveau des sols et sous-sols (Colin, 2000).

Tableau 3 : Les sources anthropiques de la pollution du sol par les hydrocarbures (Colin, 2000).

| | |
|---|--|
| <p>Les activités industrielles</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Déversement plus ou moins massifs lors d'accidents, de l'extraction, du stockage, et du transport de matières premières, ou lors de la distribution des produits dangereux. - Dépôts de déchets sur les sites en activité ou en dehors de ces sites. - Transferts de la pollution issus des rejets atmosphériques ou aqueux, vers les sols. - Démolition d'installations contenant des produits ou déchets dangereux. |
| <p>Les activités urbaines</p> | <ul style="list-style-type: none"> - En lien avec les activités artisanales ou commerciales, financières, touristiques, et culturelles utilisant ou engendrant des produits dangereux. - Epanchage inconsidéré de boues de stations d'épuration d'eaux usées en zone agricole ou maraîchère. - Retombées atmosphériques dans les villes ou à leur périphérie comme les usines d'incinération ou les véhicules motorisés (...). - Des dépôts de déchets domestiques dans des sites mal contrôlés. |
| <p>Les activités militaires</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Emissions dégagées par les aéronefs, les navires et les véhicules terrestres tactiques de l'armée. - Utilisations des solvants, des produits combustibles, carburants d'aviation. - Spécifiques de l'armement (laboratoires de recherche, gestion des munitions et des armes). |
| <p>Les activités agricoles</p> | <ul style="list-style-type: none"> - En lien avec certaines activités d'élevage. - Utilisation intensive de produits fertilisants ou phytosanitaires et d'amendements. - Epanchage de déchets ou de produits dérivés en agriculture. |

1-4- Impact de la pollution du sol par les hydrocarbures :

Les hydrocarbures légers sont plus toxiques que les hydrocarbures lourds (Fattal, 2008). La pollution par les HC pose d'importants problèmes dans l'environnement, vis-à-vis des microorganismes, des plantes, des animaux (Ali Ahmed, 2011). En raison de leur caractère liposoluble, ils peuvent s'accumuler dans la faune et la flore et tout au long de la chaîne trophique (Ramade, 2007). Ces polluants induisent des altérations écologiques, principalement la perte d'organismes clés d'une communauté et la prolifération d'espèces opportunistes au sein des habitats affectés (Itopf, 2013).

1-4-1- Impact sur les micro-organismes du sol :

Les effets des hydrocarbures sur l'activité biologique du sol dépendent de leur nature, de leur concentration dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu (Duchaufour, 1991). Les composés organiques contaminants peuvent inhiber la croissance des microorganismes et leur

métabolisme. Cette inhibition est liée à des interactions avec la membrane cellulaire de ces composés fortement hydrophobes et à la formation de métabolites toxiques (Loh et al., 2020).

Selon Jumbo (1991) cité par Duchaufour (2001), les hydrocarbures s'ils sont incorporés au sol en quantité limitée (moins de 2% de la couche 0-15cm) n'exercent pas d'action directe vis-à-vis des micro-organismes, mais ils exercent une action nocive indirecte. Les composés humiques enrichis en lipides, deviennent à leur tour hydrophobe et difficilement biodégradable. La perméabilité excessive du sol ne permet pas la constitution de réserves hydriques suffisantes.

L'imprégnation des sols en hydrocarbures a pour effet global une multiplication intense de la microflore, en particulier, des champignons, des bactéries et des levures (Rouquerol et al., 1987).

1-4-2- Impact sur la faune du sol :

Les organismes de la pédofaune (microfaune, mésofaune et macrofaune) jouent des rôles fondamentaux dans le fonctionnement des écosystèmes (Lavelle et Spain, 2001).

Mais malheureusement beaucoup de travaux ont démontré les effets négatifs des produits pétroliers sur la faune du sol. La contamination des sols par les hydrocarbures peut affecter la diversité et l'abondance du macrofaune du sol (Erstfeld et Snow-Ashbrook, 1999). Les communautés d'invertébrés du sol peuvent changer à cause de la pollution de ce sol pour diverses raisons. L'une des raisons évidentes est la sensibilité différentielle des espèces, le comportement spécifique de chaque espèce sous le stress causé par la pollution et sa capacité à la tolérer. La diversité des réponses aux contaminants est déterminée par des processus toxicologiques tels que l'absorption de la substance toxique, la séquestration, la biotransformation et l'excrétion.

1-4-3- Impact sur les plantes :

L'effet phytotoxique des hydrocarbures dans le sol engendre une diminution du taux de germination du végétal ainsi que les retards de sa croissance et la diminution du rendement (Chaineau et al., 1997).

Ces substances réduisent aussi le développement de certains végétaux et des déséquilibres biochimiques. Elles se manifestent par une inhibition de la germination des graines ou celle de la croissance végétative. Le contact entre le produit pétrolier et la surface foliaire des végétaux entraîne des dégâts causant des dommages immédiats sous forme de brûlures des parties aériennes, réduit les échanges entre la plante et l'atmosphère. La nutrition et le métabolisme des plantes sont perturbés. Certaines espèces végétales, non tolérantes, disparaissent (Mortet, 2019).

2- Plantes ornementales (et la phytoremédiation) :


2-1- Généralité sur les plantes ornementales :





Les plantes ornementales représentent des solutions de traitement des eaux et des sols moins coûteuses que les infrastructures traditionnelles, et donc idéales pour les régions disposant de ressources financières limitées (Calheiros, et al., 2015).


Certaines plantes ornementales utilisées en phytoremédiation (tableau 4) s'avèrent particulièrement efficaces pour éliminer les contaminants du sol et des masses d'eau de façon rétroactive, ce qui en fait des espèces tout indiquées pour l'assainissement de zones contaminées (Rocha et al., 2022), et le traitement des eaux usées dans des sites éloignés aux infrastructures médiocres (Calheiros, 2015). Ces espèces parviennent à éliminer rapidement les contaminants en raison de leur court cycle de croissance (Rocha et al., 2022).

Des recherches ont confirmé une capacité d'élimination du phosphore principalement chez les plantes à croissance rapide et chez celles qui possèdent un système racinaire plus développé en profondeur (Prodanovic et al., 2019). Une autre étude fait état d'une capacité d'absorption et d'accumulation de contaminants industriels (cadmium, zinc, cuivre et plomb) dans les feuilles d'arbres poussant dans des sols contaminés, y compris des sols urbains (Czaja, et al., 2020).

Tableau 4 : Quelques plantes ornementales utilisées en phytoremédiation.

| Les espèces végétales | Famille | Caractéristiques | Polluant | Source |
|--|-------------|---|---|--|
| <p><i>Geranium sanguineum</i> <i>lancastrienne</i></p>  | Géraniacées | <ul style="list-style-type: none"> -Espèces herbacées, annuelles, bisannuelles ou vivaces parfois ligneuses à la base ; quelques-uns ont des tubercules. - Feuilles pétiolées, poilues glandulaires ou aglandulaires, les fleurs souvent roses ou violacées ou rose bleuâtre. -Racines charnues ou rhizomes, tubercules. | <ul style="list-style-type: none"> - Capable d'accumuler dans ses racines le plomb (Pb), cadmium (Cd), et nickel (Ni) à raison de 9 %, 27 %, 1,9 % de son poids sec, respectivement. (Pierre, 2018). | <p>Lis-Balchin M., 2002. Geranium and Pelargonium. Edition Taylor and Francis. 11p.</p> <p>Pierre, S. (2018). Le géranium : Une revue sur ses caractéristiques et ses applications. Journal of Botanical Research, 45(2), 123-135.</p> |

| | | | | |
|---|----------------------------|--|--|---|
| <p><i>Crassula ovata</i></p>  | <p>Crassulaceae</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Tiges très ramifiées, avec feuilles elliptiques de 2 à 4 cm de long, vert moyen, lustrées parfois bordées de rouge (Koenig, 2005). - Racines courtes et nombreuses | <ul style="list-style-type: none"> - Contribuent à améliorer la qualité de l'air en absorbant les substances nocives. | <p>Koenig O., 2005. Encyclopédie visuelle des plantes d'intérieur. Edition Artémis. 370p.</p> |
| <p><i>Chlorophytum comosum</i></p>  | <p>Iridacées</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Caractérisée par des racines fasciculées, nombreuse et grosses, gorgées d'eau qui leur permettent de résister à la sécheresse. - Plante vivace, médicinales, d'appartement. - Plante herbacée formant une rosette dense de longues feuilles, arquées, pointues à l'extrémité, vert franc et vernies. | <ul style="list-style-type: none"> - Efficace dans la dépollution de l'air intérieur grâce à ses feuilles dans le cas d'une pollution par le CO, le NO₂, les (COV) comme le méthanal, xylène, benzène. | <p>Mangin L., 1990. Nombreuses espèces de plantes aident à améliorer l'état des sols pollués : c'est la phytoremédiation. 82p.</p> |
| <p><i>Pothos sp</i></p>  | <p>Aracées</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Le pothos est une plante grimpante sempervirente avec des tiges verdâtres atteignant 10 à 12 mètres, des feuilles entières ou lobées allant jusqu'à 90 cm de longueur, et des fleurs produites dans des spathes de 15 cm. - Racines aériennes. | <ul style="list-style-type: none"> - Formaldéhyde, xylène, benzène, toluène, monoxyde de carbone. | <ul style="list-style-type: none"> - Jacques F., 2002. Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de martinique, Gondwana édition, Montpellier, Cirad, vol2, p1772. |
| <p><i>Syngonium sp</i></p>  | <p>Aracée</p> | <ul style="list-style-type: none"> - plante vivace caduque de 30 cm, avec des feuilles découpées de 2-3 cm et des fleurs en forme de saucière, jusqu'à 4 cm, de couleur blanche à rouge pourpre. | <ul style="list-style-type: none"> - Formaldéhyde, le benzène, le trichloréthylène, et le xylène. | <p>Lis-Balchin M., 2002. Geranium and Pelargonium. Edition Taylor and Francis. 15p.</p> |

| | | | | |
|--|--------------------------|---|--|---|
| <p style="text-align: center;"><i>Turnesol</i></p>  | <p>Asteracées</p> | <p>- Grande plante annuelle dont les fleurs sont groupées en capitules de grande dimension. -Tige très forte et peut ramifiée peuvent atteindre jusqu'à 4 mètre d'hauteur, avec des feuille simple cordées.</p> | <p>- Polluant métaux (cadmium, cuivre, zinc, or), radionucléides (césium, strontium, uranium).</p> | <p>Mizzotti C., Fambrini M., Caporali, E., Masiero S., & Pugliesi C., 2011. A CYCLOIDEA-like gene mutation in sunflower determines an unusual floret type able to produce filled achenes at the periphery of the pseudanthium. <i>Botany</i>, 89(3), 206-217. https://doi.org/10.1139/B11-004</p> |
|--|--------------------------|---|--|---|

2-2- Circulation des hydrocarbures dans les plantes :

Le transport des polluants dans la plante est un phénomène de translocation (diffusion des polluants et/ou de leurs métabolites dans la plante). Les polluants organiques tels que les hydrocarbures vont utiliser les systèmes de transport de la sève (du xylème et du phloème) afin d'être transférés au sein de la plante. Ils peuvent emprunter les vaisseaux du xylème qui transportent l'eau et les éléments minéraux depuis le sol jusqu'aux parties aériennes (INERIS, 2002).

Les composés du sol sont attirés par un effet aspirant qui consiste en la perte d'eau par évaporation (transpiration) par les parties aériennes (principalement les feuilles) de la plante suite à un gradient de concentration. La pression racinaire va également (surtout la nuit) attirer les composés du sol suite à un gradient de pression et provoquer l'ascension du liquide dans le xylème (Taiz et Zeiger, 2010).

Les hydrocarbures peuvent également être transférés par les tubes du phloème, qui transportent essentiellement des nutriments synthétisés, grâce à des différences de pression dans le phloème depuis les organes sources (producteurs) jusqu'aux organes cibles (Maerten et al., 2012). Ces polluants peuvent ensuite simplement se volatiliser ou être accumulés dans différentes parties de la plante où ils subissent des transformations pouvant les dégrader totalement ou partiellement sous forme de métabolites. Les hydrocarbures et leurs métabolites ainsi formés peuvent soit être intégrés dans de nouvelles structures cellulaires, soit être séquestrés dans les vacuoles ou encore intervenir au cours des cycles métaboliques de la

plante. Si ces processus de transformation visent à rendre les polluants moins toxiques, ils peuvent parfois au contraire engendrer des composés plus toxiques que le polluant de départ (Schnoor et McCutcheon, 2003).

2-3- Mécanismes de la phytoremédiation des sols :

Différents mécanismes (fig. 3) sont utilisés par les plantes afin de faciliter la décontamination des sols pollués (Macek et al., 2000 ; Susarla et al., 2002 ; Vaziri et al., 2013). Chacun de ces mécanismes a des effets sur le volume, la mobilité ou la toxicité des contaminants.

2-3-1- Phytoextraction (ou phytoaccumulation) :

Elle consiste à utiliser, sur les sols contaminés, des plantes accumulatrices pour extraire, transporter et concentrer les polluants de l'eau ou de sol dans les parties récoltables de la plante (la racine, la tige, ou la feuille). 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).

2-3-2- La phytostabilisation :

Dans la phytostabilisation, les plantes réduisent la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol ou la rhizosphère, par immobilisation chimique (précipitation, stabilisation, absorption ou piégeage) ou prévention des mouvements latéraux ou en profondeur via l'érosion ou le lessivage. Elle a pour but de retenir les contaminants et d'éviter leur dispersion, ceux-ci sont ainsi stabilisés dans les racines ou dans la rhizosphère (Vladimir et al., 2008).

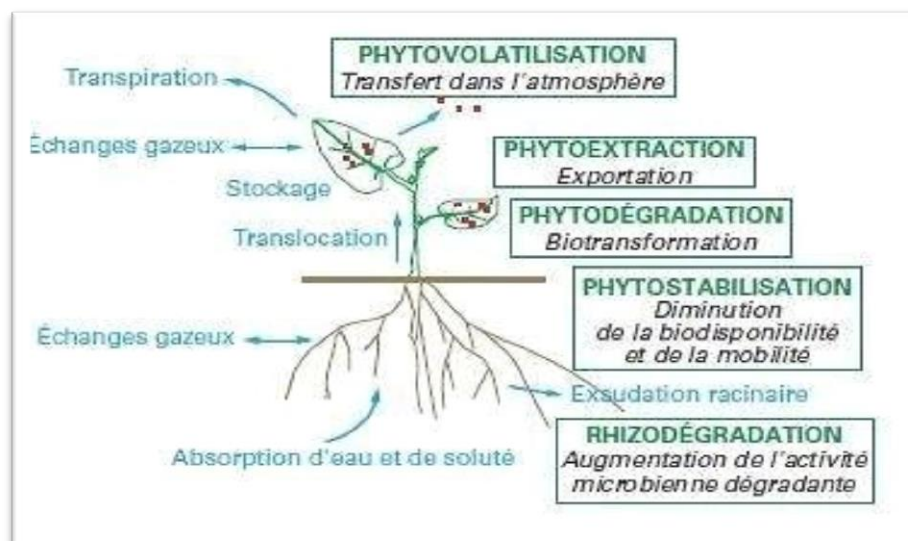


Figure 3 : Principaux mécanismes de phytoremédiation (Sterckeman et al., 2012).

2-3-3- Phytotransformation (ou phytodégradation) :

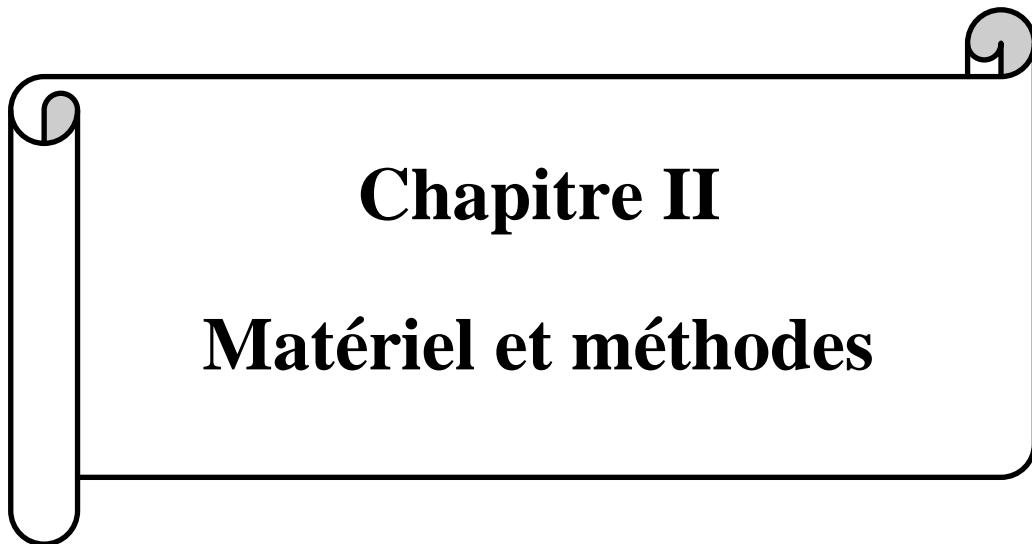
C'est la transformation des composés organiques du polluant au moyen de réaction biochimique engendré par les nombreux enzymes contenus dans les plantes. Elle favorise la dégradation des molécules organiques complexes en composés plus simples qui sont intégrés dans les tissus végétaux. Généralement elle concerne les polluants facilement biodégradables (Lecompte, 1998).

2-3-4- Phytovolatilisation :

Cette technique utilise les plantes pour extraire les polluants puis les éliminer par évapotranspiration via les stomates des feuilles ou les tiges. Une fois volatilisés, les polluants sont dégradés en composants moins ou non toxiques avant d'être libérés (Vanobberghen, 2010).

2-3-5- La phytostimulation (ou rhizodégradation) :

Consiste à stimuler l'activité de biodégradation des contaminants organiques au niveau de la rhizosphère notamment via l'augmentation de l'aération lors du développement du système racinaire (Siciliano et al., 2003).



Chapitre II

Matériel et méthodes

Notre travail a été réalisé au laboratoire PSEMRVC de faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Il s'agit d'une culture en pots de plantes ornementales afin décontaminer un sol provenant d'une station-service de Fréha. Ce travail tente aussi de mettre en évidence les mécanismes qui y sont impliqués.

1- Présentation du site d'échantillonnage :

L'échantillonnage du sol a été effectué dans une station-service privée située dans la commune de Fréha au bord de la route nationale N° 73 (fig. 4) qui est susceptible d'être à l'origine de la pollution ponctuelle du sol (la corrosion des cuves et des canalisations enterrées et le déversement d'hydrocarbures lors du remplissage des stockages de la station ou de la distribution de carburant). Les liquides contaminants typiques (carburants et lubrifiants), via les vecteurs (ruissellement, sols, eaux) peuvent atteindre certaines cibles et provoquer des effets néfastes.

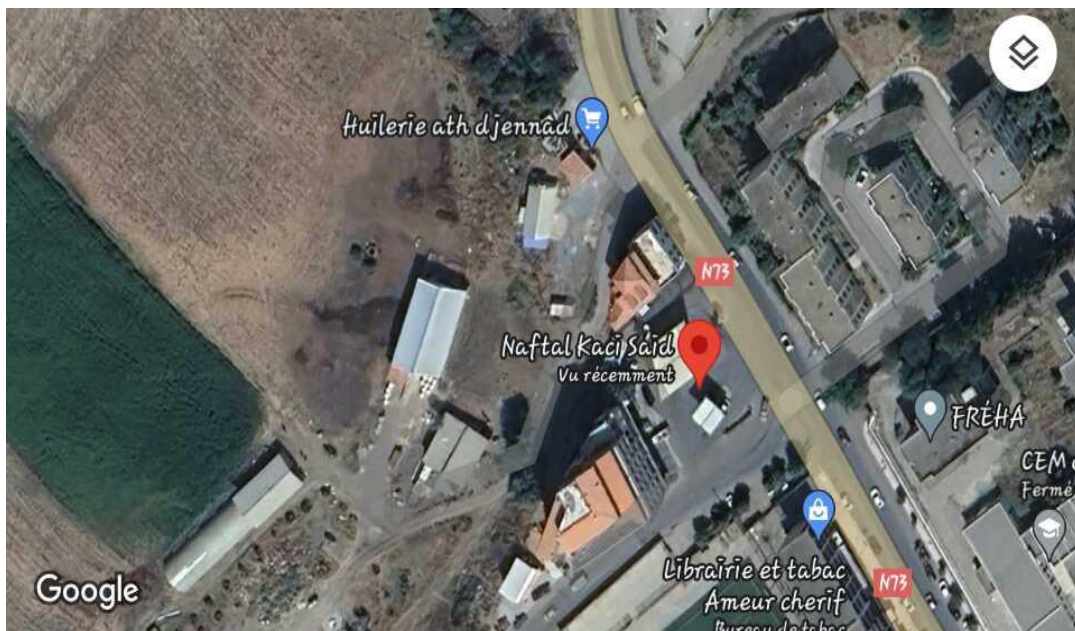


Figure 4 : Localisation du site d'étude (Google earth, 2024).

2- Matériel :

2-1- Matériel végétal :

Dans le but de décontaminer un sol pollué aux carburants, quatre espèces végétales ont été utilisées à savoir *Crassula ovata*, *Chlorophytum comosum*, *Pothos sp* et *Syngonium sp*. Ce sont des plantes ornementales d'intérieur et/ou d'extérieur. Elles jouent un rôle primordial

dans la dépollution grâce à leurs systèmes racinaires puissants qui procurent au sol une bonne aération et stimulent l'activité microbienne, accélérant, par conséquent les phénomènes de dégradation naturelle.

2-2- Sol :

La présente étude a été réalisée sur des échantillons de sol provenant d'une station-service située dans la commune de Fréha dont les caractéristiques sont présentées dans le (tableau 5). Il s'agit d'un sol contaminé par les carburants (essence et gasoil), qui sont déversés accidentellement, soit lors du transport, du stockage, du remplissage ou encore lors de la séparation des huiles minérales.

Tableau 5 : Caractéristiques du sol provenant de la station-service.

| | |
|------------------------|----------------|
| pH | 7,2 |
| MO % | 3,60 |
| Carbone total % | 2,09 |
| Azote total % | 0,20 |
| Granulométrie % | Argile 35,8 % |
| | Limon 45,816 % |
| | Sable 18,384 % |

D'après les analyses effectuées au laboratoire de pédologie de l'INRF indiquent que le sol utilisé dans notre essai est de pH neutre d'une texture limono-argilo riche en matière organique, carbone organique et faiblement pourvue en azote.

3- Méthodes :

3-1- Echantillonnage du sol :

Les échantillons de sol pollué ont été prélevés le 22/02/2024 en une seule journée, ce qui garantit l'homogénéité environnementale du prélèvement qui peut avoir un effet sur les résultats.

La méthode choisie est l'échantillonnage par transect en parallèle effectués à une profondeur de 0 à 15 cm dans trois points espacés et qui diffèrent par le degré de pollution au niveau de la station. Le sol a ensuite été transféré dans des sacs en plastique étiquette, puis acheminés au laboratoire.

3-2- Préparation du sol et mise en place de l'essai :

3-2-1- Préparation du sol :

Après échantillonnage sur le terrain, une partie du sol a été séchée à l'air libre et à température ambiante au laboratoire, puis broyée afin d'écraser les mottes et éliminer les éléments grossiers et les débris organiques pour obtenir des mélanges probablement homogènes, et tamisée à 2mm pour obtenir la terre fine (fig. 5).



Figure 5 : Plan d'échantillonnage du sol prélevé dans la station-service.

Sur la terre fine obtenue des analyses physico-chimiques (MO, COT et N total, pH, granulométrie) ont été réalisées au laboratoire de pédologie de l'Institut National de la Recherche Forestière (INRF) de Bainem.

L'autre partie du sol a été tamisée à 5 mm et a été utilisée à l'état frais pour la culture en pots.

3-2-2- Dispositif expérimental :

Le sol contaminé frais est réparti sur 12 pots de 14 cm de diamètre et 15 cm de profondeur (fig. 6) à raison de 1 k par pot, sur une couche de 2 cm de gravier pour assurer un bon drainage. Les pots ont été par la suite cultivés comme suit :

- Trois pots, ont été cultivés par *C. ovata*.
- Trois pots, ont été cultivés par le *Ch. comosum*.
- Trois pots, ont été cultivés par *P. sp.*
- Trois pots, ont été cultivés par *S. sp.*



Figure 6 : Dispositif expérimental de la culture en pots des plantes ornementales des quatre espèces.

Juste après la culture, un arrosage régulier à l’eau de robinet a été effectué durant toute la durée de l’expérimentation qui a été réalisée le 04/04/2024.













| Les espèces végétales | Sol contaminé cultivé | | | |
|-----------------------------|-----------------------|---|--|---|
| <i>Crassula ovata</i> | Lot 1 |  |  |  |
| <i>Chlorophytum comosum</i> | Lot 2 |  |  |  |
| <i>Pothos sp</i> | Lot 3 |  |  |  |
| <i>Syngonium sp</i> | Lot 4 |  |  |  |

Figure 7 : Schéma du dispositif expérimental de la culture en pots.

3-3- Evaluation de la croissance des plantes :

La hauteur des plantes et le nombre des feuilles ont été déterminés sur les plantes de quatre espèces avant la récolte, après la récolte qui a eu lieu 23/05/2024, ont été mesurées la biomasse végétale, et RWC, après nettoyage et rinçage des plantes.

3-3-1- Hauteur des plantes :

Elle consiste à mesurer, en centimètres (cm) à l'aide d'une règle graduée, la longueur des plantes.

3-3-2- Nombre des feuilles :

Après la culture, nous avons procédé au comptage du nombre de feuilles pour chaque plante.

3-3-3- Biomasse végétale :

Les plantes de chacune des espèces ont été séchées à l'étuve à 60°C jusqu'à poids constant, puis pesées avec une balance de précision.

3-4- RWC (Relative water content) :

Comme les plantes ont été mises en conditions de stress polluant on a voulu voir est-ce que elles répondaient toutes de la même façon à ce stress hydrique.

Il s'agit de peser les plantes de chaque lot avant et après séchage à l'étuve pour obtenir respectivement le poids frais (PF) et le poids sec (PS).

Les plantes avant d'être séchées ont été submergées dans de l'eau (sous saturation) pendant 12h à l'obscurité puis pesées pour obtenir le poids turgescent (PT).

- **La formule du calcul de la RWC :**

$$\text{RWC (\%)} = (\text{PF} - \text{PS}) \times 100 / (\text{PT} - \text{PS})$$

PF : Poids frais

PS : Poids sec

PT : Poids turgescent.

3-5- Evaluation de l'efficacité de la décontamination du sol :

3-5-1- L'activité biologique globale :

Selon Prosser (1997), la respiration est la mesure indirecte la plus fréquente et la plus ancienne de l'activité microbienne globale dans les sols. Elle permet de mesurer la quantité de CO₂ dégagée du sol qui est capté par une solution de NaOH lors d'une incubation aérobie pendant 7 jours à une température constante de 28°C à l'obscurité.

Dans des flacons de 250 ml ont été mis 100g de sol surmonté de deux tubes à hémolyse (fig. 8), l'un contenant 5ml de NaOH à 0,5 M et l'autre 3ml de l'eau pour éviter le dessèchement du sol. Les flacons sont fermés hermétiquement pour éviter la fixation de CO₂ de l'air, ils sont ensuite introduits dans l'incubateur. Un témoin sans sol a été placé dans les mêmes conditions.



Figure 8 : Dispositif du test respirométrique.

Après 7 jours, les tubes contenant du NaOH ont été retirés et fermés immédiatement après avoir ajouté 2 gouttes d'une solution de chlorure de barium à 20 %.

La soude a été ensuite versée dans un bécher et titrée par l'acide chlorhydrique HCl 0,25M après y avoir ajouté quelques gouttes de phénolphtaléine. La disparition de la couleur rose violacée marque la fin du titrage (fig. 9).

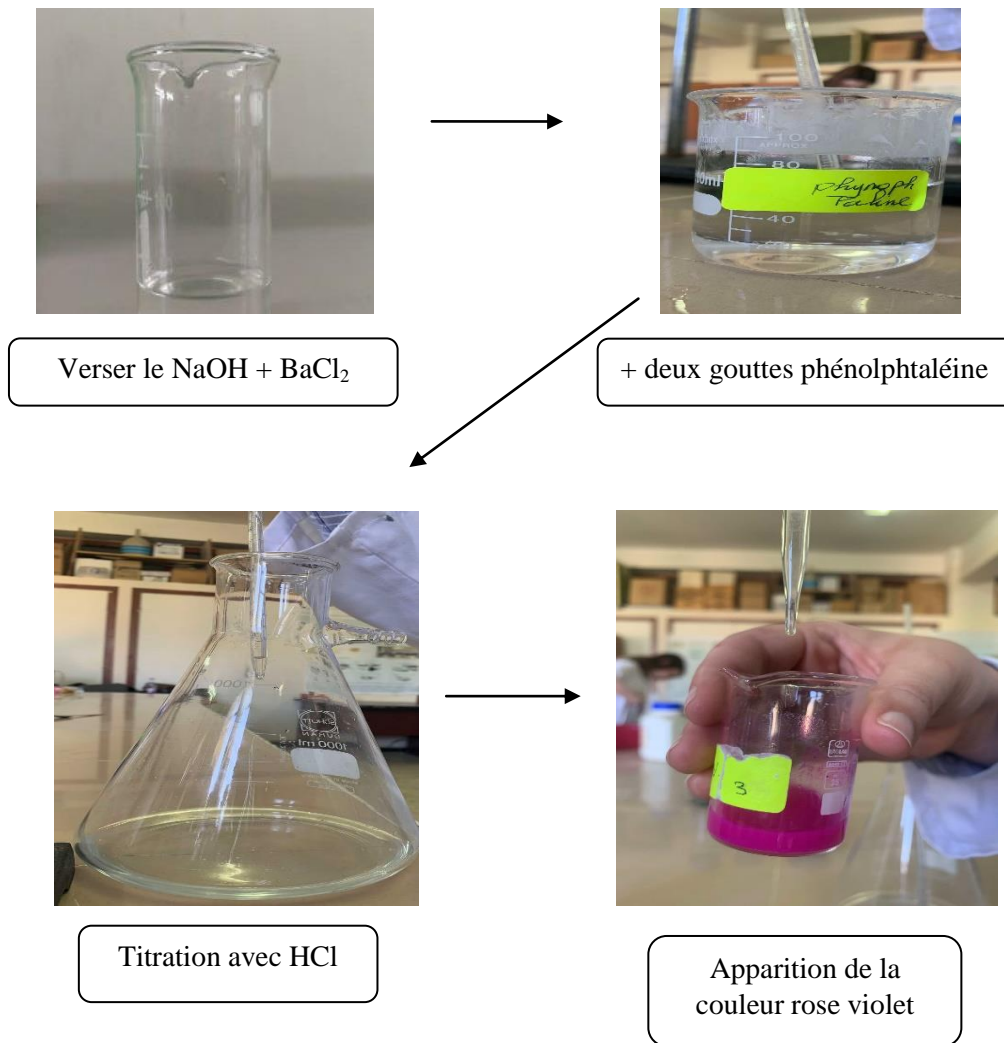


Figure 9 : Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol.

3-5-2- Détermination de la quantité des hydrocarbures :

- Dans les sols :

Les extraits ayant servi à l'analyse qualitative ont été versés dans des boîtes pré-pesés exposées à l'air libre jusqu'à évaporation totale du solvant.

Les boîtes sont ensuite pesées et la quantité d'hydrocarbures est obtenue par soustraction.

- Dans les plantes :

Après l'analyse spectrophotométrie le filtrat est versée dans des boîtes pré-pesés et exposées à l'air libre et laisse jusqu'à évaporation totale du solvant.

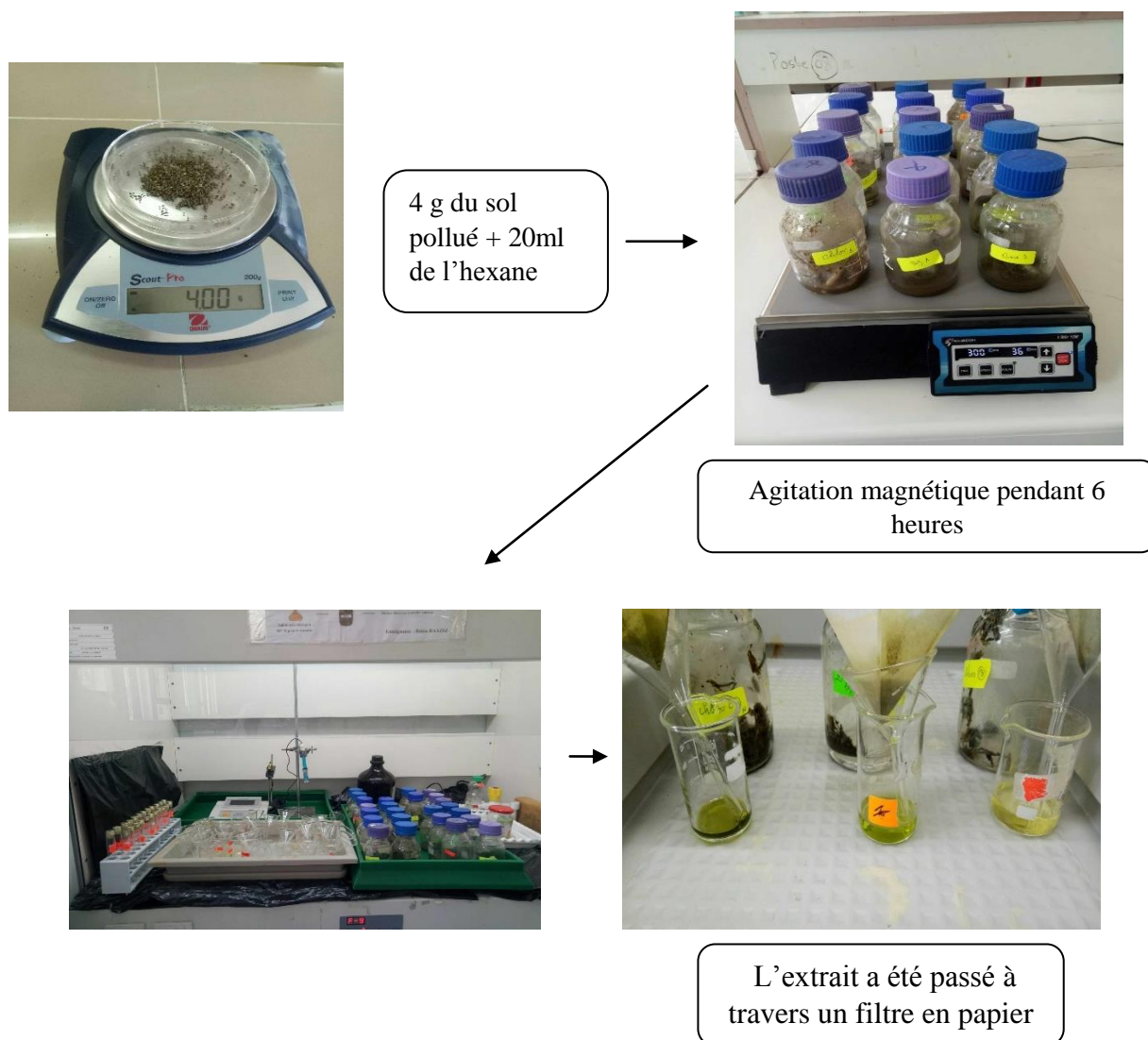


Figure 10 : Protocole de l'extraction des hydrocarbures.

3-5-3- L'analyse qualitative des hydrocarbures :

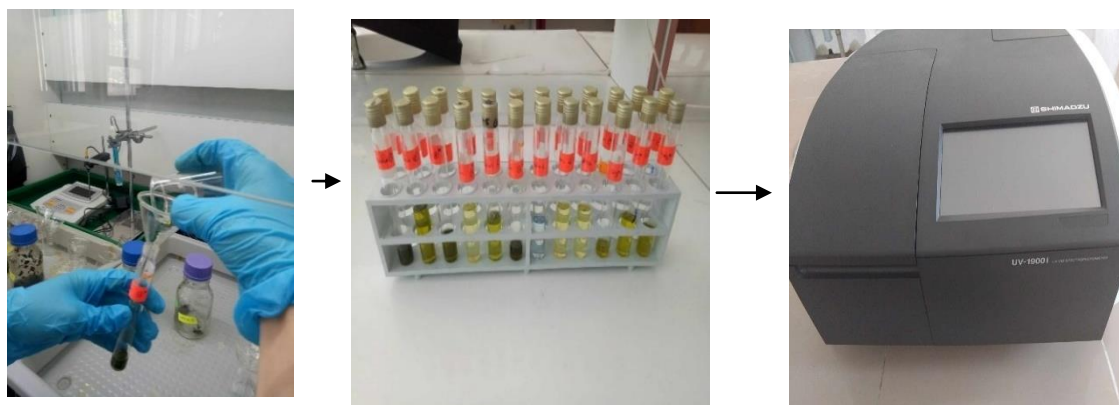
- Dans le sol :

L'analyse qualitative des hydrocarbures a été effectuée par spectrophotométrie UV.

L'extraction a été réalisée en mélangeant du sol séché tamisé au préalable à 2 mm et de l'hexane comme solvant d'extraction au rapport 1/5 (P/V). Le mélange a été agité pendant 6h à l'aide d'un agitateur magnétique puis filtré. La composition des HAP a été déterminée par spectrophotométrie UV dans la gamme de longueurs d'onde de 190 jusqu'à 300nm.

- Dans les plantes :

L'analyse est réalisée par l'extraction des hydrocarbures présents dans les plantes après séchage et broyage. Les plantes ont été mélangées avec de l'hexane à un rapport de 1/5 (P/V) en agitation pendant 6 heures, l'extrait a été passé à travers un filtre en papier, et la solution obtenue est versée dans une cuve destinée à être placée dans la spectrophotométrie UV afin de déterminer la composition des hydrocarbures.



L'extrait contenant le carbone extractible et recueilli dans des tubes à essai
Et déterminée par spectrophotométrie UV

Figure 11 : Protocole de détermination par spectrophotométrie UV.

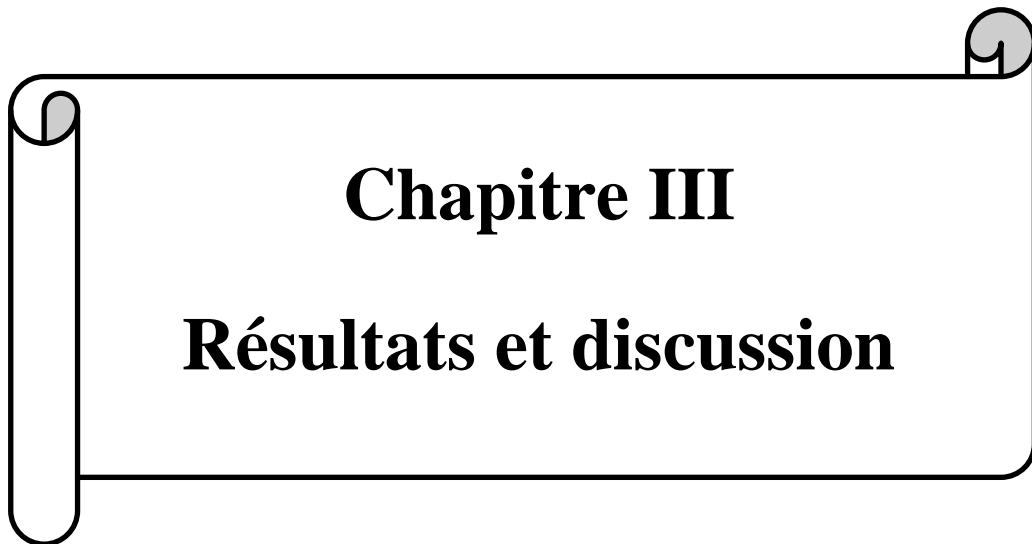
3-6- Analyse statistique :

L'analyse statistique descriptive a été réalisée à l'aide du logiciel EXCEL, et cette analyse comprend le calcul de la moyenne et de l'écart-type pour chacun des paramètres étudiés.

Les résultats des données ont été soumis à l'analyse de la variance lorsque la normalité et l'égalité des variances sont vérifiées ou au test de Kruskal-Wallis dans le cas contraire.

Le post-hoc de Kruskal-Wallis permet de la détermination des groupes homogènes lorsque les différences sont significatives.

Ces analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel R 4.4.0.



Chapitre III
Résultats et discussion

1- Résultats :

Dans notre travail nous avons comparé et testée l'efficacité des plantes ornementales dans la dépollution d'un sol pollué aux hydrocarbures, et tant de détecter le mécanisme exploitée certaines espèces pour accumuler, transférer et tolérer des concentrations élevées en contaminants dans la rhizosphère.

1-1- Hauteur moyenne des plantes :

La hauteur des plantes des différentes espèces testées dans le sol pollué est illustrée dans la figure 12. Selon cette représentation graphique, il apparait que la croissance des plantes, telles que la *Crassula ovata*, *Chlorophytum comosum*, et le *Syngonium sp* est assez faible avec des hauteurs moyennes respectives de 7,50 cm, 6,67 cm et 8,17 cm. Cependant, la hauteur moyenne de la tige de *Pothos sp* est la plus élevés elle atteint 17,17 cm parmi les quatre types de plantes.

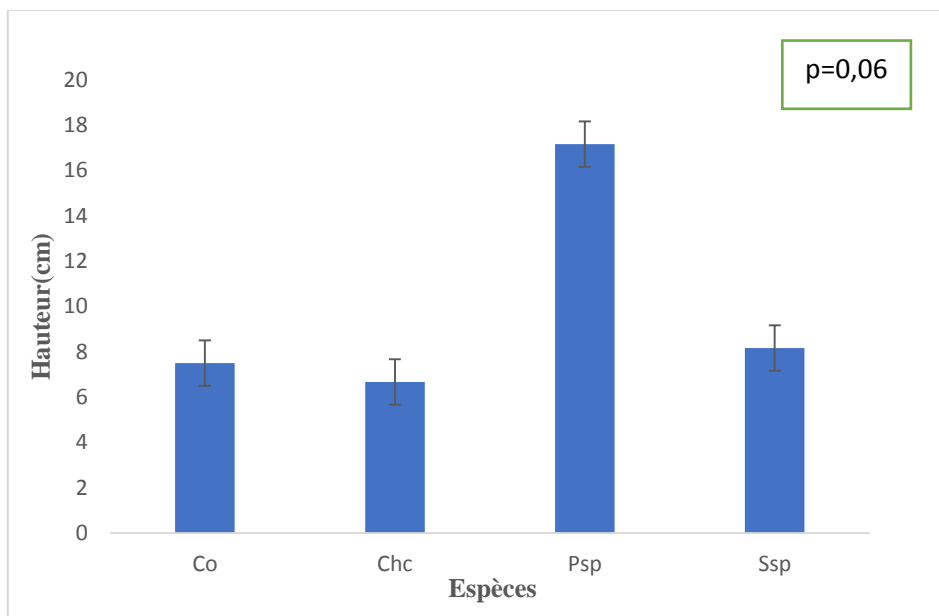


Figure 12 : Hauteur moyenne des tiges chez les quatre espèces végétales.

Les résultats du test de Kruskal-Wallis ont révélé qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les espèces ($p=0,06$). Cela signifie que le gasoil n'a pas d'effet négatif sur la hauteur des plantes, et que les moyennes des différentes espèces appartiennent au même groupe.

1-2- Nombre de feuilles :

La figure ci-dessous illustre le nombre de feuilles obtenues pour les différentes plantes à la fin de l'essai de phytoremédiation. *Crassula ovata* a enregistré le plus grand nombre de feuilles, avec une moyenne de 15,00 feuilles. Ensuite, *Chlorophytum comosum* a montré une valeur moyenne de 10,33 feuilles. En revanche, *Pothos sp.* et *Syngonium sp.* ont présenté des nombres de feuilles bien plus faibles, respectivement 2,33 et 4,00.

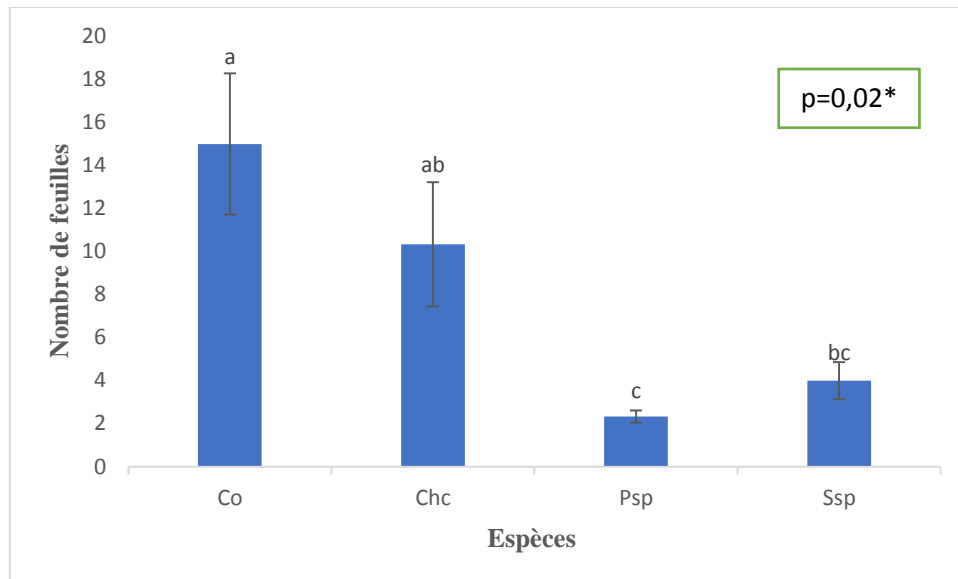


Figure 13 : Nombre de feuilles des quatre espèces végétales.

L'analyse de ces résultats par le test de Kruskal-Wallis a donné une p-value=0,02 ; donc pour le nombre des feuilles il y a une différence significative entre les 4 espèces végétales.

Les espèces ont été classées dans différents groupes : *Crassula ovata* dans le groupe « a », *Chlorophytum comosum* dans le groupe « ab », *Syngonium sp.* dans le groupe « bc », et *Pothos sp.* dans le groupe « c ».

La Figure 14 présente la morphologie des plants des quatre espèces à la récolte, montrant leurs caractéristiques distinctives. La Figure 15 illustre l'aspect de la partie racinaire des plantes, permettant d'évaluer les adaptations racinaires de chaque espèce. Ces deux figures mettent en lumière les différences de développement et d'efficacité potentielle dans le cadre de la phytoremédiation.



Figure 14 : Morphologie des plants des quatre espèces à la récolte.



Figure 15 : Aspect de la partie racinaire des plantes des quatre espèces à la récolte.

1-3- Biomasse végétale :

Les résultats obtenus après la mesure de la biomasse végétale effectuée sur les différentes plantes cultivées au laboratoire sont représentés dans la figure 16. Nous remarquons que le poids le plus élevé est celui de *Crassula* avec une valeur de 6,47 g, suivie par *Syngonium* et *Chlorophytum* présentant respectivement des biomasses de 2,63 g et 1,37 g. Concernant *Pothos sp.*, une faible biomasse végétale a été obtenue (0,63 g) comparée aux 3 autres espèces.

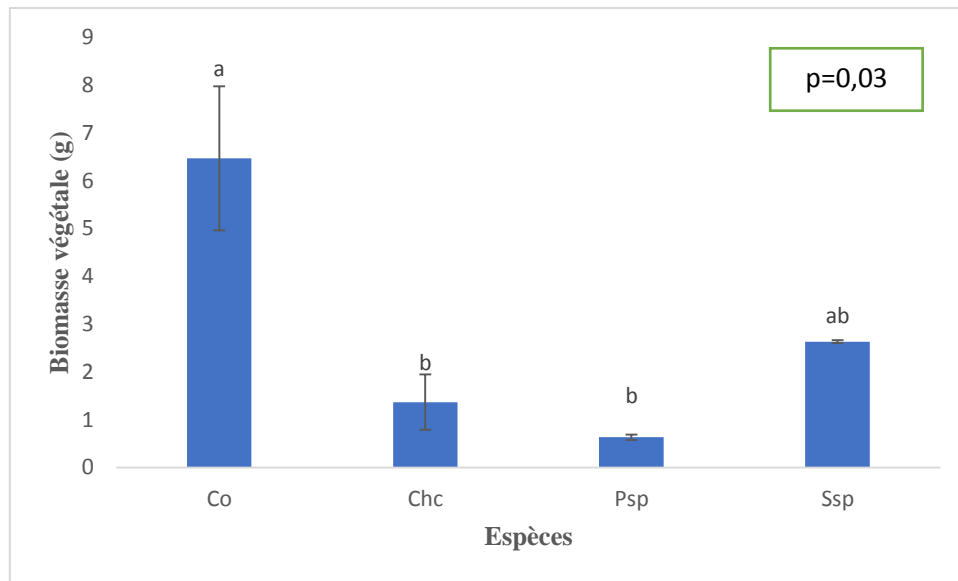


Figure 16 : Biomasse végétale des plantes des quatre espèces.

Le test de Kruskal-Wallis pour la biomasse végétale montre qu'il y a une différence significative entre les espèces.

Les biomasses végétales de *Chlorophytum* et de *Pothos* sont classées dans le même groupe «b», *Syngonium* dans le groupe « ab », alors que la *Crassula* est classée dans le groupe « a », ce qui signifie que la biomasse végétale de *Crassula* est la plus élevée.

1-4- RWC (Relative water content) :

La figure 17 présente les pourcentages de la teneur relative en eau (RWC) pour les différentes espèces.

Chlorophytum présente la rétention en eau la plus élevée (94,76 %), suivi de *Crassula* qui atteint 92,22 %, *Pothos* avec une RWC intermédiaire de 88,10 %, et enfin *Syngonium* avec la plus basse rétention se situant autour de 83,37 %.

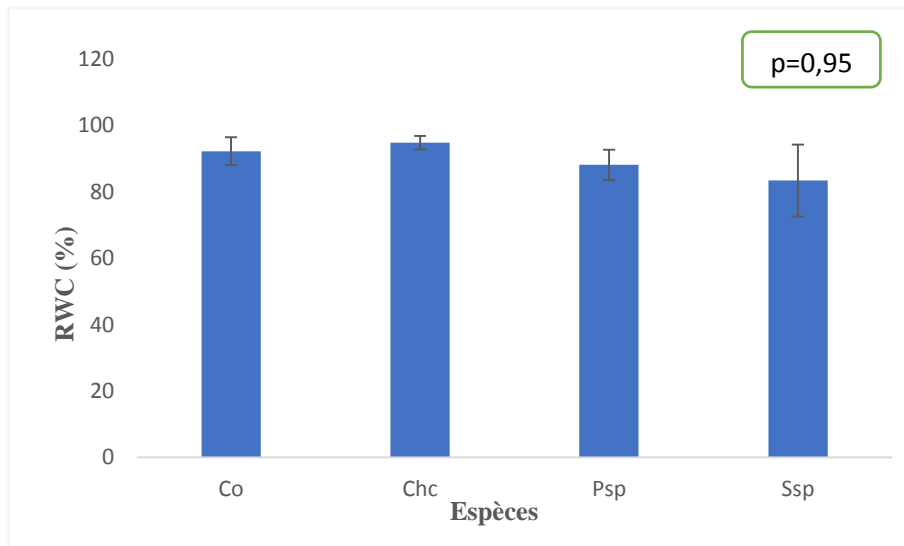


Figure 17 : Teneur relative en eau de quatre espèces végétales.

Le test de Kruskal-Wallis a révélé qu'il n'y avait pas de différence significative (p -value=0,95) entre les 4 espèces.

1-5 - L'activité biologique globale :

Les résultats de l'activité biologique globale du sol exprimée en quantité de CO_2 dégagé par la respiration microbienne du sol sont représentés dans la figure 18. Nous constatons que la quantité de CO_2 dégagée dans le sol traité par *Syngonium* (14,45mg/100g de sol) est la plus élevée que celle dégagée dans les sols traités par les 3 autres espèces. À l'inverse *Crassula ovata* montre l'activité la plus faible, avec une émission de 6.71 mg/ 100g de sol.

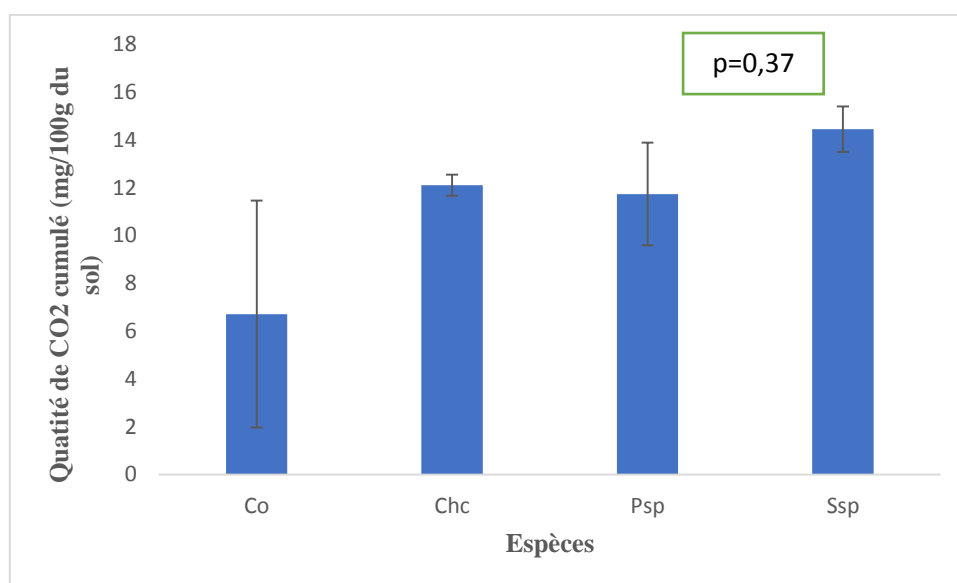


Figure 18 : Production cumulée de CO_2 dans les sols cultivés par les quatre espèces.

Le test de Kruskal-Wallis a montré qu'il n'y avait pas de différences significatives (p -value=0,37) pour l'activité biologique entre les sols cultivés.

1-6- Analyse qualitative des hydrocarbures :

L'analyse qualitative des hydrocarbures par spectrophotométrie UV a permis d'identifier les hydrocarbures présents dans les sols et dans les plantes.

1-6-1- Analyse dans les sols :

Le tableau 6 révèle que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) légers ont disparu des sols cultivés avec les quatre espèces de plantes, à l'exception du benzo (g,h,i) pérylène, de l'acénaphène, et de l'acénaphthylène, qui sont présents en faibles quantités dans le sol cultivé par *Crassula ovata*. En revanche, les composés lourds comportant plus de quatre cycles n'ont pas disparu des sols cultivés avec les quatre espèces, avec des quantités légèrement plus élevées dans le sol cultivé avec *Chlorophytum comosum*. La dissipation des HAP a été la plus importante dans le sol cultivé avec *Pothos sp.*

Tableau 6 : La composition des HAP dans le sol cultivé par (*Crassula*, *Chlorophytum*, *Pothos*, *Syngonium*).

| HAP | LO (nm) | Co | Chc | Psp | Ssp |
|------------------------|---------|-------|------|------|------|
| Benzène | 200 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Fluorène | 205 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Benzo(g,h,i)pérylène | 210 | 0,07 | 0 | 0 | 0 |
| Naphtalène | 220 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Acénaphène | 227 | 0,056 | 0 | 0 | 0 |
| Acénaphthylène | 229 | 0,2 | 0 | 0 | 0 |
| Fluoranthène | 236 | 0 | 0 | 0 | 0,24 |
| Benzo(k)fluoranthène | 238 | 0,95 | 1,27 | 0,85 | 1,19 |
| Pyrène | 241 | 1,21 | 1,54 | 1,08 | 1,51 |
| Phénanthrène | 251 | 1,47 | 1,69 | 1,27 | 1,52 |
| Benzo(b)fluoranthène | 256 | 1,37 | 1,51 | 1,16 | 1,11 |
| Chrysène | 268 | 1,41 | 1,39 | 1,06 | 0,97 |
| Benzo(a)anthracène | 286 | 1,26 | 1,52 | 1,24 | 1,19 |
| Dibenzo(a,h)anthracène | 297 | 1,39 | 1,81 | 1,41 | 1,37 |

1-6-2- Analyse dans les plantes :

D'après les résultats obtenus, *Crassula ovata* a absorbé les plus grandes quantités de HAP. En comparaison, les concentrations de ces composés dans les plantes, *Chlorophytum*, *Pothos*, et *Syngonium* sont relativement faibles.

Nous avons observés aussi que *Crassula ovata* a absorbé les 16 HAP que nous avons retrouvés dans les parties récoltées.

Tableau 7 : La composition des HAP dans les 4 espèces (*Crassula*, *Chlorophytum*, *Pothos*, *Syngonium*).

| HAP | LO (nm) | Co | Chc | Psp | Ssp |
|------------------------|---------|------|------|------|------|
| <i>Benzène</i> | 200 | 4 | 0 | 0 | 1,02 |
| Fluorène | 205 | 1,52 | 1,23 | 0 | 2,49 |
| Benzo(g-h-i)pérylène | 210 | 3 | 0,85 | 0 | 2,64 |
| Naphtalène | 220 | 0,75 | 0 | 0 | 2,48 |
| Acénaphène | 227 | 0,92 | 0 | 0 | 0,54 |
| Acénaphthylène | 229 | 1,25 | 0 | 0 | 0,83 |
| Fluoranthène | 236 | 2,3 | 0,13 | 0 | 1,16 |
| Benzo(k)fluoranthène | 238 | 3,93 | 2,12 | 0,78 | 2,81 |
| Pyrène | 241 | 4 | 2,32 | 1,09 | 2,98 |
| Phénanthrène | 251 | 3,75 | 2,34 | 1,3 | 2,98 |
| Benzo(b)fluoranthène | 256 | 3,6 | 2,23 | 1,19 | 2,95 |
| Chrysène | 268 | 3,64 | 2,23 | 1,18 | 3,21 |
| Benzo(a)anthracène | 286 | 3,67 | 2,36 | 1,27 | 3,14 |
| Dibenzo(a,h)anthracène | 297 | 3,64 | 2,46 | 1,46 | 3,14 |

1-7- Analyse quantitative des hydrocarbures :

1-7-1- Analyse dans les sols :

La figure 19 représente la quantité d'hydrocarbures totaux présents dans les deux sols cultivés et non cultivés (témoin), les résultats montrent, toute somme logique, que le sol contaminé avant la phytoremédiation contient une quantité plus élevée d'hydrocarbures (12,26mg/ 4g du sol) par rapport au sol cultivé par *Crassula*, *Chlorophytum*, *Pothos*, et *Syngonium* qui ont eu respectivement (1,08mg/ g) ; (2,91mg/g) ; (0,75mg/g) ; (2,16mg/g).

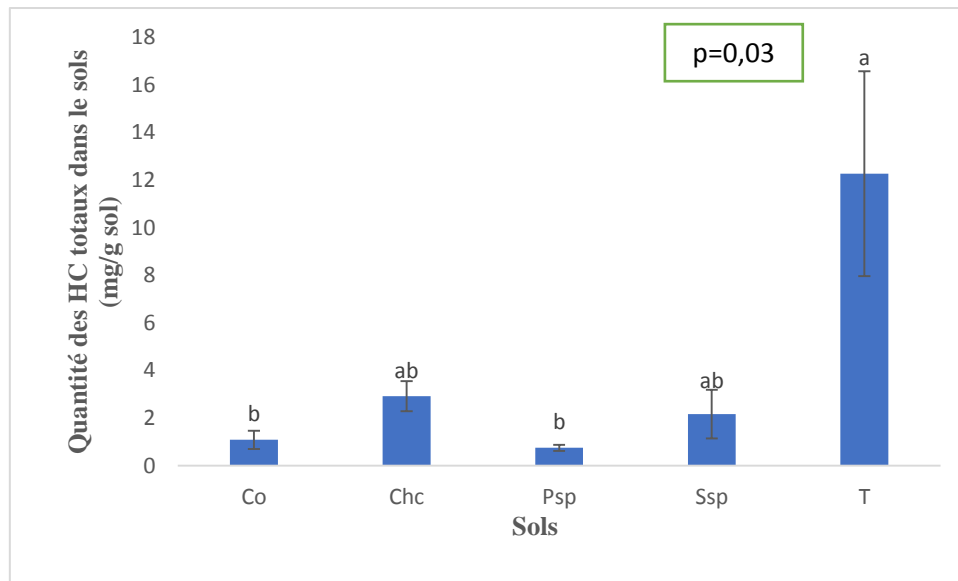


Figure 19 : Quantité des HC totaux dans les sols cultivé et non cultivé (témoin).

Le test de Kruskal-Wallis montre qu'il y a une différence significative ($p=0,03$) entre la quantité d'hydrocarbures contenus dans le sol cultivé et celle contenue dans le sol non cultivé.

Les espèces ont été classées dans différents groupes : *Chlorophytum comosum* et *Syngonium* dans le groupe « ab », *Crassula ovata* et *Pothos sp* dans le groupe « b ».

1-7-2- Analyse dans les plantes :

La figure ci-dessous illustre les quantités d'hydrocarbures extraites des plantes des 4 espèces végétales. Les plantes de *Chlorophytum* ont présenté la plus grande quantité d'hydrocarbures (9,36g) par rapport aux autres plantes qui ont eu 3,45g, 7,33g, 4,05g respectivement pour la *Crassula*, *Pothos* et *Syngonium*.

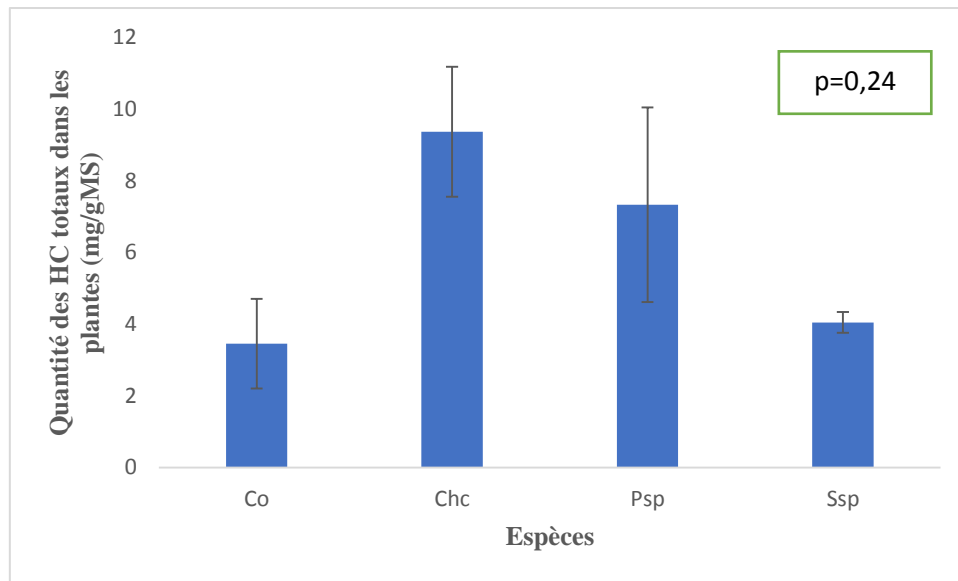


Figure 20 : Quantité des HC totaux dans les plants des quatre espèces végétales.

Le test Keuskal-Wallis n'a pas révélé de différences significatives entre les quantités d'hydrocarbures dans les plantes.

Discussion :

Pour l'analyse de la hauteur moyenne des plantes, c'est le *Pothos* qui a montré la hauteur la plus élevée suivi de la croissance des espèces telles que *Syngonium*, *Crassula ovata* et *Chlorophytum comosom*, comme le *Phothos* est une plante grimpante sempervirente selon Jacques (2002) cette espèce présente avec des tiges verdâtres atteignant 10 à 12 mètres, des feuilles entières ou lobées allant jusqu'à 90 cm de longueur, ainsi que des racines aériennes.

Concernant le nombre de feuilles, *Crassula ovata* présente un nombre élevé par rapport à d'autres espèces, ce qui s'explique par plusieurs facteurs. Cette plante possède des feuilles épaisses et charnues, spécialement adaptées pour conserver l'eau. Ainsi qu'une capacité à stocker non seulement de l'eau, mais aussi des nutriments. Cela permet à la plante de maintenir un métabolisme actif même en période de stress hydrique (Pilon et Figueiredo, 2019). Selon l'étude de Tölke et al. (2016), cette espèce peut avoir plusieurs dizaines de feuilles par plante, avec une densité foliaire qui favorise son efficacité photosynthétique.

De par son abondance de feuilles, *Crassula ovata* a naturellement développé une biomasse végétale plus importante. Grâce à sa photosynthèse efficace, elle est capable de produire davantage de biomasse, ce qui est essentiel pour sa croissance et sa capacité à se développer dans divers milieux, même ceux qui sont moins favorables.

La réaction des plantes au stress polluant créé par la présence des carburants dans le sol ne diffère pas d'une espèce à l'autre. En effet, aucune différence significative n'a été observée entre les moyennes des RWC. Ce n'est donc pas la nutrition hydrique de ces plantes qui est à l'origine des différences constatées.

Selon Barr et Weatherley (1962), la RWC peut fluctuer entre 98% dans les feuilles turgescents à 30-40% dans les feuilles fanées. Mais chez la plupart des espèces, elle est d'environ 60-70%.

Les résultats obtenus montrent que la capacité des plantes à maintenir leur teneur en eau n'est pas directement influencée par la présence de contaminants dans le sol, par rapport aux conditions de notre étude. Nos résultats concordent avec ceux de Ghosh et Singh (2005), qui ont noté que la tolérance au stress polluant créé par les hydrocarbures peut varier, mais souvent les différences dans la teneur en eau ne sont pas significatives entre les espèces exposées à ces contaminants. Aussi, Shahid et al. (2013), qui ont étudié les impacts des

polluants sur la croissance et le développement des plantes, affirment que la gestion de l'eau ne semble pas être affectée par la contamination du sol dans certaines conditions.

Concernant l'activité biologique du sol, elle est étroitement liée à la décontamination. *Syngonium*, *Chlorophytum* et *Pothos*, qui ont induit une réduction significative des hydrocarbures dans le sol, présentent également la plus haute activité biologique. Cette activité est associée à la dégradation, ce qui suggère que le mécanisme par lequel ces plantes agissent serait la phytostimulation, car certaines fractions de HAP ne sont pas présentes dans le sol de ces trois espèces. Elles ont dégradé les HAP légers dans le sol, témoignant ainsi de la phytostimulation.

L'observation selon laquelle les HAP légers ont disparu des sols cultivés avec les quatre espèces de plantes indique une réponse positive de ces espèces à la pollution, témoignant de leur potentiel pour la phytoremédiation. Les résultats obtenus dans le sol cultivé par *Crassula ovata* suggèrent que cette espèce, bien qu'efficace, pourrait rencontrer des limites dans l'élimination complète de tous les types de HAP. La morphologie des racines, avec leur texture et leur surface étendue, favorise l'absorption des hydrocarbures. Smith J., et Doe A., (2021).

Crassula ovata pourrait être capable d'absorber et de concentrer les hydrocarbures présents dans le sol, ce qui suggère qu'elle utilise le mécanisme de phytoextraction pour gérer les contaminants. Une fois absorbés, les hydrocarbures sont transportés vers les parties aériennes de *Crassula ovata* cela permet une concentration efficace des polluants dans les feuilles et les tiges, où ils sont stockés dans les tissus succulents.

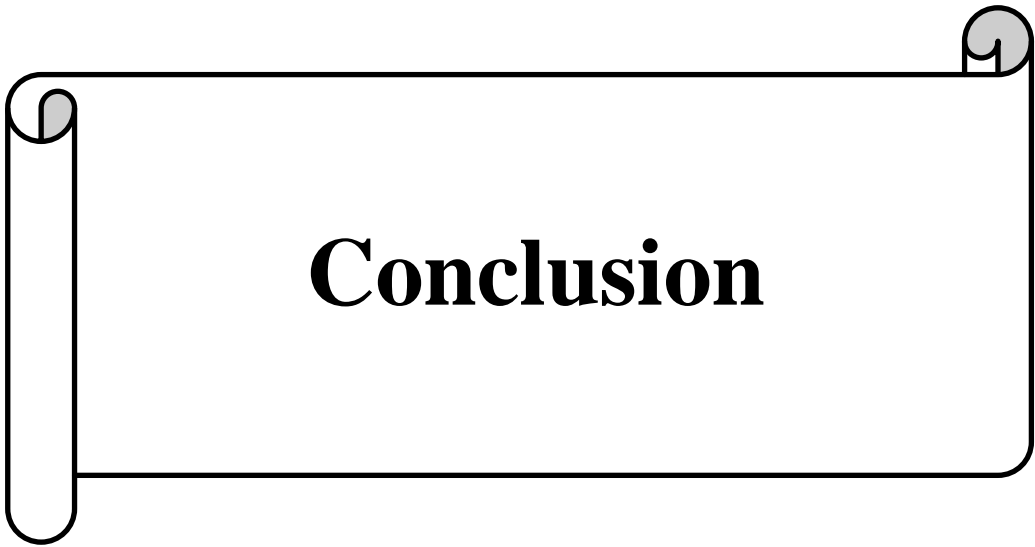
Comme *Crassula ovata* possède le plus nombre de feuille par rapport aux d'autres, les plantes peuvent absorber une infime quantité d'HC du sol et les transférer dans leurs différentes parties comme l'ont noté McCrady et al. (1987), Sheng et al. (2008). Certains HC peuvent être séquestrés dans les tissus racinaires, d'autres peuvent être transportés dans les pousses puis dans les feuilles où ils peuvent être stockés dans la vacuole.

En revanche, d'après les résultats de l'analyse qualitative des HAP dans le sol cultivé par le *Pothos* et dans la plante elle-même, nous avons constaté que le sol a été dépollué par rapport aux autres espèces. Les fractions de polluants qui ont disparu du sol ne se retrouvent pas dans les tissus de la plante. Nous suggérons que le *Pothos* a également recours aux mécanismes de phytodégradation, de phytostimulation ou de phytovolatilisation. En effet, la dissipation des hydrocarbures pourrait se faire soit par volatilisation à partir des feuilles (McCrady et al., 1987 ; McFarlane, 1995 ; Reichenauer et Germida, 2008 et Sheng et al.,

2008) ou par dégradation dans la rhizosphère (Keckizi et al., 2007 ; Yi et Crowley, 2007 ; Vangronsveld et al., 2009 ; Tang et al., 2010).

Il est probable que *Syngonium* et *Chlorophytum* aient participé à la phytodégradation, étant donné qu'une fraction de HAP a disparu du sol sans se retrouver dans les plantes. Bien qu'ils n'aient pas décontaminé le sol de la même manière que *Crassula* et *Pothos*, ils ont tout de même contribué à la dépollution. De plus, *Chlorophytum*, avec ses racines tubéreuses, pourrait jouer un rôle clé dans ce processus. Il est généralement admis que pour nettoyer un sol contaminé par des HC, les plantes doivent avoir la capacité de tolérer des concentrations élevées de ces polluants et posséder un système racinaire étendu (Aprill et Sims, 1990 ; Tesar et al., 2002 ; Cofield et coll., 2008 ; Lee et coll., 2008 ; Rezek et coll., 2008 ; Yousaf et coll., 2011).

Concernant l'analyse des quantités d'hydrocarbures dans les sols, nous avons constaté que les concentrations d'hydrocarbures dans les sols cultivés avec des plantes sont inférieures à celles des sols non cultivés. Nous avons constaté aussi que les fractions d'hydrocarbures sont présentes dans la plupart des espèces végétales, ce qui suggère que les plantes ornementales sont efficaces dans la phytoremédiation de sols pollués aux carburants.



Conclusion

Conclusion :

Cette étude met en évidence l'efficacité de différentes espèces de plantes ornementales dans la phytoremédiation des sols contaminés par des hydrocarbures. *Crassula ovata*, avec son nombre élevé de feuilles et sa capacité à stocker l'eau et les nutriments, a montré un potentiel notable pour absorber et concentrer les polluants. Son mécanisme de phytoextraction permet de transporter les hydrocarbures vers les parties aériennes, où ils peuvent être séquestrés dans les tissus succulents.

En parallèle, le *Pothos* a démontré une capacité de dépollution remarquable, associée à des mécanismes de phytodégradation, phytostimulation et phytovolatilisation, ce qui souligne sa capacité à décomposer les contaminants dans la rhizosphère.

D'autres espèces comme *Syngonium* et *Chlorophytum* ont également contribué à la dépollution, bien qu'elles n'aient pas atteint les mêmes niveaux d'efficacité que *Crassula* et *Pothos*. Leurs mécanismes de dégradation suggèrent une collaboration entre les racines et les micro-organismes du sol, renforçant l'idée que la phytoremédiation est un processus complexe et synergique.

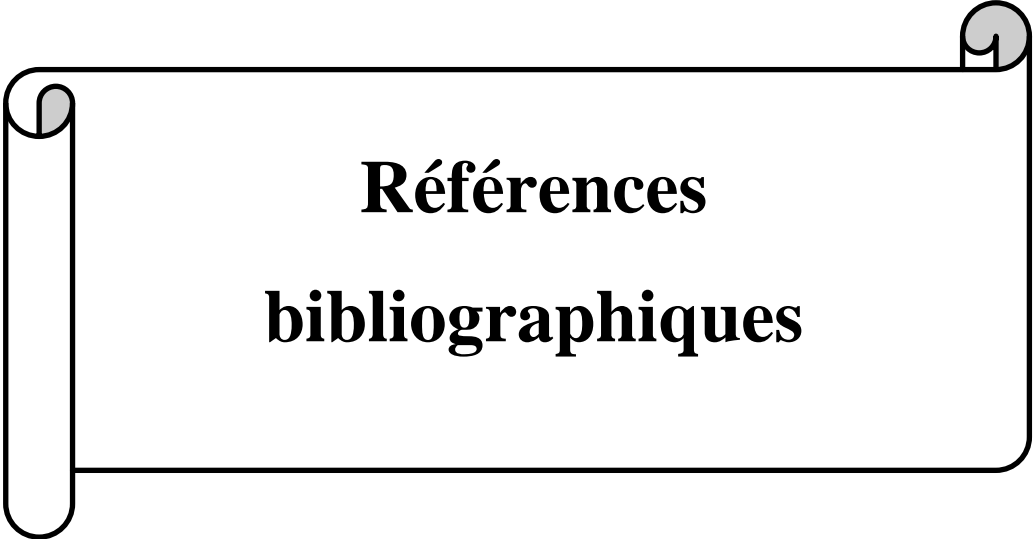
Cette étude a aussi mis en évidence le transfert des hydrocarbures dans les plantes des quatre espèces. Des différences ont été observées concernant les quantités et les fractions de HAP absorbées. C'est l'espèce *Crassula ovata* qui a absorbé les 16 HAP analysés et en plus grandes quantités, comparée aux trois autres espèces.

Les résultats indiquent que les plantes ornementales peuvent jouer un rôle crucial dans la réduction des concentrations d'hydrocarbures dans le sol, offrant une stratégie écologique et durable pour la décontamination des sols pollués. L'utilisation de ces espèces pourrait donc représenter une approche prometteuse pour améliorer la qualité environnementale tout en valorisant les espaces verts.

Ce travail ouvre plusieurs perspectives de recherche, notamment :

- L'utilisation de *Crassula ovata* et *Pothos* dans des programmes de phytoremédiation sur le terrain.
- Encourager des études approfondies sur les mécanismes de phytodégradation, phytostimulation et phytovolatilisation pour mieux comprendre leur efficacité.

- Étudier davantage l'interaction entre les racines des plantes et les micro-organismes du sol pour optimiser les stratégies de décontamination.
- Sensibiliser le public et les professionnels à l'importance des plantes ornementales dans la phytoremédiation pour encourager leur adoption.
- Explorer des techniques innovantes pour renforcer la capacité des plantes à dégrader les polluants, notamment par la sélection de variétés plus efficaces.



**Références
bibliographiques**

- **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, Ecole Nationale Supérieure Agronomique, 99 p.
- **Angelier, J.P. 1990.** Le pétrole. Éditions Économica. Paris. 9 p.
- **Aprill W., Sims R.C., 1990.** Evaluation of the use of prairie grasses for stimulating polycyclic aromatic hydrocarbon treatment in soil. *Chemosphere* 20, 253-265.
- **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.
- **Calheiros C. S. C., Bessa V.S., Mesquita R.B.R., Brix H., Rangel A.O.S.S., Castro P.M.L., 2015.** Constructed wetland with a polyculture of ornamental plants for wastewater treatment at a rural tourism facility. *Ecological Engineering*. 79. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.03.001>.
- **Chaineau C.H., Morel J.L., Oudot J., 1996.** Biodegradation of fuel oil hydrocarbons in the rhizosphere of maize. International phytoremediation conference, May 8-10, Arlington, VA. International business communication, Southborough, MA. 29(2).
- **Chaineau C.H., Morel J.L., Oudot J., 1997.** Phytotoxicity and plant Uptake of fuel oil hydrocarbons. *J. Environ. Qual.* 26. 1478-1483.
- **Chakraborty R., Coates JD., 2004.** Dégradation anaérobie des hydrocarbures monoaromatiques. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 64. 437-446.
- **Cofield N., Banks M.K., Schwab A.P., 2008.** Lability of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Chemosphere* 70, 1644-1652.
- **Colin F., 2000.** Pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Edition Tec et Doc, Paris, 417 p.
- **Czaja M., Kolton A., Muras P., 2020.** The Complex Issue of Urban Trees-Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities. *Forests*. 11 (9). 932. <https://doi.org/10.3390/f11090932>.
- **Duchaufour P., 1991.** Pédologie, sol, végétation et environnement. Ed. Masson, Paris. 289p.

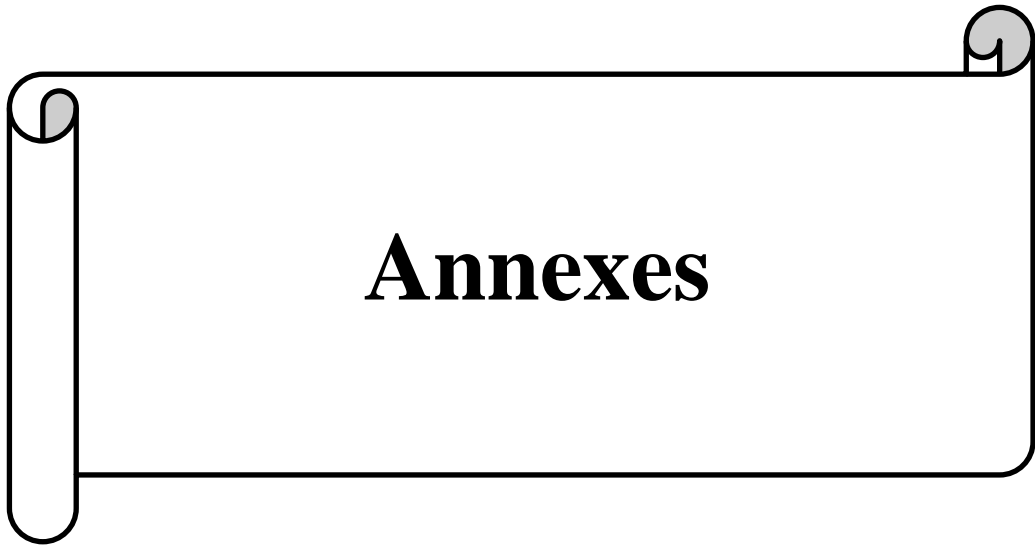
- **Duchaufour P., 2001.** Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. Edition de l'Abrégé de pédologie. Paris. 331p.
- **Erstfeld K.M and Snow-Ashbrook J., 1999.** Effects of chronic low-level PAH contamination of soil invertebrate communities. *Chemosphere*, 39(12). 2117–2139. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(98\)00421-4](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(98)00421-4)
- **Fattal P. 2008.** Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Renne. 395p.
- **Favennec J.P., 1998.** Le raffinage du pétrole. Exploitation et la gestion de raffineries. Publications de L'institut Français du Pétrole. Edition Technip, Paris. 42p.
- **Ghosh M., et Singh S. P., 2005.** "Impact of petroleum hydrocarbons on plants." *Environmental Pollution*, 133(2), 202-206. doi: 10.1016/j.envpol.2004.04.005
- **Girard C.M., Walter C., Berthelin J., 2005.** Sol et environnement. Edition DUNOD, Paris (France).436p.
- **Guibet J.C., 1997.** Carburants et moteurs, Technologies-Énergie-Environnement. Publications de L'institut Français du Pétrole. Tome 1. Edition Technip, Paris, 410 p.
- **Havugimana E., Bhople B.S., Kumar A., Byiringiro E., et Mugabo J.P., 2017.** Soil Pollution. Major Sources and Types of *Soil Pollutants*. *Environmental Sci. & Eng.*11 53-86.
- **INERIS, 2002.** Modèle de transfert sol-plante des polluants organiques. Tome 1 : Revue bibliographique <https://www.ineris.fr/fr/modeletransfert-sol-plante-polluants-organiques-tome-1-revue-bibliographique>.
- **ITOPF Ltd., 2013.** Effets de la pollution par les hydrocarbures sur l'environnement. Edition Oliver's Yard, London, Royaume-Uni, 11p.
- **Jacques F., 2002.** Flore illustrée des phanérogames de Guadeloupe et de martinique, Gondwana édition, Montpellier, Cirad, vol2, p1772.
- **Jost J.P., Jost-Tse Y.C., 2018.** Les plantes hyperaccumulatrices de métaux lourds. Une solution à la pollution des sols et de l'eau. Éditions Connaissances et Savoirs. France. 26p.

- **Kechavarzi C., Pettersson k., Leeds-Harrison P., Ritchie L., Ledin S., 2007.** Root establishment of perennial ryegrass (*L. perenne*) in diesel contaminated subsurface soil layers. *Environ. Pollut.* 145, 68-74.
- **Koenig O., 2005.** Encyclopédie visuelle des plantes d'intérieur. Edition Artémis. 370p.
- **Koller E., 2004 :** Traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchet, sol, boues). Edition Technique et ingénierie. Série Environnement et sécurité. Paris. 424p.
- **Labrecque M., 2021.** Les plantes comme solutions aux grands problèmes environnementaux. Editions université Montréal. 53p.
- **Lavelle P., Spain A.V., 2001.** Soil ecology. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. Boston, London. 654p.
- **Lecomte P., 1998.** Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. Edition Tec & Doc. Lavoisier. 204p.
- **Lee S.H., Lee W.S., Lee C.H., Kim J.G., 2008.** Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. *J. Hazard. Mater.* 153, 892-898.
- **Lemière B., Seguin J.J., Le Guern C., Guyonnet D., Baranger Ph., Saada, A., 2008.** Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes Applications dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines. Rapport du BRGM 300-Nouvelle édition, 16-25.
- **Lis-Balchin M., 2002.** Geranium and Pelargonium. Edition Taylor and Francis. 11p.
- **Loh Z.H., Ouwerkerk D., Klieve A.V., Hungerford N.L., Fletcher M.T., 2020.** Dégradation des toxines par les micro-organismes du rumen. *Revue bibliographique*, 12 (10), 664.
- **Macek T., Macková M., Kás J., 2000.** Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnol. Adv.* 18. 23-34.
- **Maerten N., Cuny D., 2012.** La phytoremédiation un moyen de lutter contre la pollution de l'air à l'intérieur des locaux. Thèse de Doctorat. Université du droit et de la santé (Lille). 174-183.

- **Mangin L., 1990.** Nombreuses espèces de plantes aident à améliorer l'état des sols pollués : c'est la phytoremédiation. 82p.
- **Marchal S., Solano-Serena F., & Vandecasteele C., 2003.** Phytostabilization: A sustainable approach for the remediation of contaminated sites. In: *Bioremediation of Contaminated Soils*. John Wiley & Sons, Ltd. 257-275.
- **McCrary J., McFarlane C., Lindstrom F., 1987.** The transport and affinity of substituted benzenes in soybeans stems. *J. Exp. Bot.* 38. 1875-1890.
- **Mizzotti C., Fambrini M., Caporali E., Masiero S., & Pugliesi C., 2011.** A CYCLOIDEA-like gene mutation in sunflower determines an unusual floret type able to produce filled achenes at the periphery of the pseudanthium. *Botany*, 89(3), 206-217. <https://doi.org/10.1139/B11-004>
- **Mortet A., 2019.** Etude du rôle de quelques plantes Graminées et Légumineuses dans la phytoremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Thèse de doctorat, université Abdelhamid Ben Badis Mostaganem. 177p.
- **Nemmer W., 2015.** Etudes pédologique et floristique de différents sols selon un gradient de pollution. Mémoire de magister. UMMTO. 95p.
- **Pierre S., 2018.** Le géranium : Une revue sur ses caractéristiques et ses applications. *Journal of Botanical Research*, 45(2), 123-135.
- **Pilon A. C., et Figueiredo A. R., 2019.** *Crassula ovata*: A Review of its Morphology, Physiology and Adaptations." *Journal of Plant Studies*, 8(2), 1-10. doi: 10.5539/jps.v8n2p1.
- **Prodanovic V., McCarthy D., Hatt B., Deletic A., 2019.** Designing green walls for greywater treatment: The role of plants and operational factors on nutrient removal. *Ecological Engineering*. 130. 184-195. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.02.019>.
- **Ramade F., 2007.** Introduction à l'écotoxicologie. Fondement et applications. Éditions Tec & Doc. Lavoisier. 618p.
- **Reichenauer T.G., Germida J.J., 2008.** Phytoremediation of organic pollutants in soil and groundwater. *ChemSuschem* 1, 708-719.

- **Rezek J., der Wiesche C., Mackova M., Zadrazil F., Macek T., 2008.** The effect of ryegrass (*Lolium prene*) on decrease of PAH content in long term contaminated soil. *Chemosphere* 70, 1603-1608.
- **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*. 2022. 29(3). 3336-3354. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17307-7>.
- **Rouquerol T., Amir H., Amir A., 1987.** Effet de l'épandage de résidus pétroliers de raffinerie sur l'évolution de la matière organique. L'activité de densité microbienne d'un sol agricole. *Revue d'écologie et de biologie du sol*. 156p.
- **Satcher D., 1995.** Toxicological profile for fuel oils. Georgia, Edition Agency for Toxic Substances and Disease Registry / ATSDR, Atlanta. 201p.
- **Schnoor J.L., McCutcheon S.C., 2003.** Phytoremediation- transformation and control of contaminants. Wiley- interscience, Inc, NJ, USA. 987p.
- **Shahid M., et al., 2013.** "Phytoremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons using plant species." *Journal of Environmental Management*, 120, 36-45. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.01.016
- **Sheng X., Chen X., He L., 2008.** Characteristics of an endophytic pyrene-degrading bacterium of *Enterobacter* sp. 12J1 from *allium macrostemon* Bunge. *Int. Biodeter. Biodegr.* 62. 88-95.
- **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>.
- **Susarla S., Medina V.F., McCutcheon S.C., 2002.** Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecol. Eng.* 18. 647-658. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00026-5)
- **Taiz L., et Zeiger E., 2010.** *Plant Physiology*. 5e édition, Sinauer Associates Inc., Sunderland, 782 p.

- **Tang J., Wang R., Niu X., Zhou Q., 2010.** Enhancement of soil petroleum remediation by using a combination of ryegrass (*Lolium perenne*) and different microorganisms. *Soil Till. Res.* 110, 87-93.
- **Tarayre C., 2012.** Bioremédiation de sols pollués aux hydrocarbures. Editions universitaires européennes. 116p.
- **Tesar M., Reichenauer T.G., Sessitsch A., 2002.** Bacterial rhizosphere populations of black poplar and herbal plants to be used for phytoremediation of diesel fuel. *Soil Biol. Biochem.* 34, 1883-1892.
- **Vangronsveld J., Herzig R., Weyens N., Boulet J., Adriaensen K., Ruttens A., Thewys T., Vassilev A., Meers E., Nehnevajova E., 2009.** Phytoremediation of contaminated soils and groundwater: lessons from the field. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 16, 765-794.
- **Vanobberghen F., 2011 :** la phytoremédiation en Wallonie : Evaluation du potentiel d'assainissement des sols contaminés en métaux lourds. Mémoire de Master en Sciences et Gestion de l'Environnement. Universitaire libre de Bruxelles. 48-53.
- **Vaziri A., Panahpour E., Beni M.H.M., 2013.** Phytoremediation, a Method for Treatment of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soils. *Int. J. Farming Allied Sci.* 2. 909-913.
- **Vladimir J. M. Calabrese., Thomas E. H. Majewski., and Robert M. Freeman., 2008.** Phytoremediation of Contaminated Soils and Water. Edited by Norman Terry and Gary Bañuelos. 377p.
- **Yi H., Crowley D.E., 2007.** Biostimulation of PAH degradation with plants containing high concentrations of linoleic acid. *Environ. Sci. Technol.* 41, 4382-4388.
- **Yousaf S., Afzal M., Reichenauer T.G., Brady C.L., Sessitsch A., 2011.** Hydrocarbon degradation, plant colonization and gene expression of alkane degradation genes by endophytic *Enterobacter ludwigii* strains. *Environ. Pollut.* 159, 2675-2683.
- **Zmirou D., Beausoleil de Coninck P., Déportes I., Dor F., Empereur Bissonet P., Hours M., Keck G., Lefebvre L. et Rouisse L., 2003.** Déchets et sols pollués. In : Environnement et santé publique - Fondements et pratiques. 397-440. Gérin M, Gosselin P, Cordier S, Viau C, Quénel P, Dewailly É, rédacteurs. Edisem / Tec & Doc, Acton Vale / Paris.



Annexes

1- Liste des annexes :

Annexe I : Les résultats bruts de tous les paramètres.

Annexe 1 : La hauteur des plantes des différentes espèces végétales cultivées.

| Espèces | Hauteur (cm) |
|------------------------|---------------------|
| Crassula ovata 1 | 8,5 |
| Crassula ovata 2 | 8 |
| Crassula ovata 3 | 6 |
| Chlorophytum comosum 1 | 6,5 |
| Chlorophytum comosum 2 | 6 |
| Chlorophytum comosum 3 | 7,5 |
| Pothos 1 | 13 |
| Pothos 2 | 19 |
| Pothos 3 | 19,5 |
| Syngonium 1 | 10 |
| Syngonium 2 | 6 |
| Syngonium 3 | 8,5 |

Annexe 2 : Le nombre de feuilles des différentes espèces végétales cultivées.

| Espèces | Nombre de feuilles |
|------------------------|---------------------------|
| Crassula ovata 1 | 16 |
| Crassula ovata 2 | 21 |
| Crassula ovata 3 | 8 |
| Chlorophytum comosum 1 | 17 |
| Chlorophytum comosum 2 | 7 |
| Chlorophytum comosum 3 | 7 |
| Pothos 1 | 2 |
| Pothos 2 | 3 |
| Pothos 3 | 2 en formation |
| Syngonium 1 | 3 |
| Syngonium 2 | 3 |
| Syngonium 3 | 6 |

Annexe 3 : Le poids frais, saturé, sec, de la partie aérienne et racinaire des plantes.

| Espèces | Poids | | | | | |
|---------|---------------|------------|-----|------------------|------------|-----|
| | Partie aérien | | | Partie racinaire | | |
| | Frais | Turgescant | Sec | Frais | Turgescant | Sec |
| Cra 1 | 32,13 | 32,33 | 6,8 | 3,36 | 3,95 | 1,7 |
| Cra 2 | 23,08 | 26,47 | 5,9 | 3,25 | 3,77 | 2 |
| Cra 3 | 14,43 | 14,53 | 2 | 1,88 | 2,19 | 1 |
| Chlor 1 | 21,35 | 21,83 | 2 | 12,24 | 12,66 | 0,7 |
| Chlor 2 | 4,46 | 4,82 | 0,3 | 2 | 2,28 | 0,3 |
| Chlor 3 | 3,84 | 3,86 | 0,5 | 2,07 | 2,21 | 0,3 |
| Po 1 | 3,49 | 3,99 | 0,4 | 0,60 | 0,88 | 0,1 |
| Po 2 | 5,04 | 5,30 | 0,6 | 0,58 | 0,91 | 0,1 |
| Po 3 | 4,62 | 5,17 | 0,5 | 0,63 | 0,98 | 0,2 |
| Syn 1 | 4,08 | 13,15 | 2,1 | 12,58 | 13,44 | 0,5 |
| Syn 2 | 12,64 | 12,66 | 2,2 | 2,45 | 3,45 | 0,4 |
| Syn 3 | 15,09 | 15,23 | 2,3 | 3,17 | 3,18 | 0,4 |

Annexe 4 : Le test respirométrique.

| Espèces | V acide ml | V HCl titré le NaOH+CO ₂ | CO ₂ g/100g du sol |
|---------|------------|--|-------------------------------|
| Cra 1 | 8,6 | 0 | 0 |
| Cra 2 | 2,5 | 6,1 | 13,42 |
| Chlor 1 | 3,5 | 5,1 | 11,22 |
| Chlor 2 | 2,7 | 5,9 | 12,98 |
| Chlor 3 | 3,1 | 5,5 | 12,1 |
| Po 1 | 2,4 | 6,2 | 13,64 |
| Po 2 | 5,5 | 3,1 | 6,82 |
| Po 3 | 1,9 | 6,7 | 14,74 |
| Syn 1 | 2,8 | 5,8 | 12,76 |
| Syn 2 | 1,1 | 7,5 | 16,5 |
| Syn 3 | 2,2 | 6,4 | 14,08 |

Annexe 5 : La quantité des hydrocarbures extraits dans le sol avant et après l'évaporation.

| Espèces | Avant | Après |
|----------------|--------------|--------------|
| Cra 1 | 7,834 | 0,001 |
| Cra 2 | 5,602 | 0,007 |
| Cra 3 | 6,056 | 0,005 |
| Chlor 1 | 5,94 | 0,007 |
| Chlor 2 | 4,243 | 0,017 |
| Chlor 3 | 6,165 | 0,011 |
| Po 1 | 6,475 | 0,004 |
| Po 2 | 6,885 | 0,002 |
| Po 3 | 6,864 | 0,003 |
| Syn 1 | 6,18 | 0,005 |
| Syn 2 | 4,945 | 0,003 |
| Syn 3 | 5,174 | 0,018 |

Annexes 6 : La quantité d'hydrocarbures extraits dans les plantes avant et après l'évaporation.

| Espèces | Avant | Après |
|----------------|--------------|--------------|
| Cra 1 | 2,589 | 0,016 |
| Cra 2 | 5,958 | 0,017 |
| Cra 3 | 1,393 | 0,019 |
| Chlor 1 | 1,034 | 0,014 |
| Chlor 2 | 2,953 | 0,007 |
| Chlor 3 | 5,753 | 0,009 |
| Po 1 | 5,92 | 0,001 |
| Po 2 | 5,722 | 0,009 |
| Po 3 | 4,19 | 0,005 |
| Syn 1 | 2,677 | 0,009 |
| Syn 2 | 4,239 | 0,012 |
| Syn 3 | 0,905 | 0,011 |

Annexes II : Résultats des analyses statistiques.

- **Analyse de la variance pour la hauteur des plantes :**

- Kruskal-Wallis rank sum test

data: Haut by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 7.0854, df = 3, p-value = 0.06922 pas de différences significatives de hauteur entre les 4 espèces.

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

- Kruskal-Wallis rank sum test

data: nbF by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 9.4548, df = 3, p-value = 0.02382 différences significatives du nbF entre les 4 espèces.

- Groupes homogènes de nombre de feuilles des 4 espèces déterminées par le test Kruskal-Wallis.

nbF groups

Co 10.333333 a

Chc 8.666667 ab

Ssp 4.666667 bc

Psp 2.333333 c

- **Analyse de la variance pour la biomasse végétale :**

Kruskal-Wallis rank sum test

data: BV by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 8.6678, df = 3, p-value = 0.03405 différences significatives de la BV entre les 4 espèces.

- Groupes homogènes de biomasse végétale.

BV groups

Co 11.000000 a

Ssp 7.166667 ab

Chc 5.166667 b

Psp 2.666667 b

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

Kruskal-Wallis rank sum test

data: RWC by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 0.33333, df = 3, p-value = 0.9536 pas de différences significatives de la

RWC entre les 4 espèces.

- **Analyse de la variance de la quantité d'hydrocarbures présents dans le sol cultivé et non cultivé (témoin) :**

Kruskal-Wallis rank sum test

data: HCs by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 10.129, df = 4, p-value = 0.03831 différences significatives de la quantité d'Hc dans les sols cultivés par les 4 espèces.

- Groupes homogènes pour la quantité d'hydrocarbure des sols.

HCs groups

T 14.000000 a

Chc 9.833333 ab

Ssp 7.333333 ab

Co 5.333333 b

Psp 3.500000 b

- **Analyse de la variance de la quantité d'hydrocarbures présents dans les plantes :**

Kruskal-Wallis rank sum test

data: HCp by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 4.1282, df = 3, p-value = 0.2479 pas de différences significatives de la quantité d'Hc dans les plantes des 4 espèces.

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

Kruskal-Wallis rank sum test

data: ABG by Sp

Kruskal-Wallis chi-squared = 3.0909, df = 3, p-value = 0.3778 pas de différences significatives de l'ABG entre les 4 espèces.

Annexes III : Calculs des paramètres étudiés effectuée par logiciel LEXCEL :

| Sp | Haut | nbF | BV | RWC | HCs | HCp | ABG |
|-----|------|-----|-----|-------|------|-------|-------|
| Co | 8,5 | 16 | 8,5 | 97,16 | 0,25 | 1,88 | 0 |
| Co | 8 | 21 | 7,9 | 82,5 | 1,75 | 2,15 | 13,42 |
| Co | 6 | 8 | 3 | 97,01 | 1,25 | 6,33 | / |
| Chc | 6,5 | 17 | 2,7 | 97,17 | 1,75 | 5,18 | 11,22 |
| Chc | 6 | 7 | 0,6 | 90,15 | 4,25 | 11,66 | 12,98 |
| Chc | 7,5 | 7 | 0,8 | 96,97 | 2,75 | 11,25 | 12,1 |
| Psp | 13 | 2 | 0,5 | 82,15 | 1 | 2 | 13,64 |
| Psp | 19 | 3 | 0,7 | 98,67 | 0,5 | 12,85 | 6,82 |
| Psp | 19,5 | 2 | 0,7 | 83,49 | 0,75 | 7,14 | 14,74 |
| Ssp | 10 | 3 | 2,6 | 58,61 | 1,25 | 3,46 | 12,76 |
| Ssp | 6 | 3 | 2,6 | 92,45 | 0,75 | 4,61 | 16,5 |
| Ssp | 8,5 | 6 | 2,7 | 99,05 | 4,5 | 4,07 | 14,06 |

- **Détermination du la biomasse végétale :**

$$BV = PS_a + PS_r$$

BA : biomasse végétale.

PS_a : poids sec de la partie aérienne.

PS_r : poids sec de la partie racinaire.

- **Détermination la moyenne des paramètres analysés :**

| Espèces | Haut | nbF | BV | RWC | HCs | HCp | ABG |
|----------------|-------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|
| Co | 7,50 | 15,00 | 6,47 | 92,22 | 1,08 | 3,45 | 6,71 |
| Chc | 6,67 | 10,33 | 1,37 | 94,76 | 2,92 | 9,36 | 12,1 |
| Psp | 17,17 | 2,33 | 0,63 | 88,10 | 0,75 | 7,33 | 11,73 |
| Ssp | 8,17 | 4,00 | 2,63 | 83,37 | 2,17 | 4,05 | 14,44 |

- La moyenne du sol non cultivé (témoin) est : 12,26

Résumé :

La pollution du sol, notamment par les hydrocarbures, est un problème environnemental majeur, causé par des activités telles que l'exploitation minière et les stations-service. Cette contamination affecte non seulement la qualité des sols, mais également la santé humaine et la biodiversité.

Les méthodes de décontamination traditionnelles, bien que efficaces, sont souvent coûteuses et peuvent ne pas éliminer totalement les polluants. En revanche, la phytoremédiation émerge comme une solution écologique prometteuse. Elle utilise la capacité des plantes à absorber et atténuer les contaminants. Bien que certaines légumineuses soient efficaces, leur consommation présente des risques de transfert de polluants. Des plantes ornementales, qui ne sont pas destinées à l'alimentation, pourraient être une alternative sans risque.

Ce travail se concentre sur l'étude du transfert potentiel des hydrocarbures dans ces plantes ornementales et évalue leur efficacité en phytoremédiation. Quatre espèces ont été testées pour comparer leur comportement face à la pollution et leur capacité à dépolluer le sol.

Mots clés : phytoremédiation, décontamination, hydrocarbures, sol pollué, plantes ornementales.

Abstract :

Soil pollution, particularly by hydrocarbons, is a major environmental issue caused by activities such as mining and gas stations. This contamination impacts soil quality, human health, and biodiversity.

Traditional decontamination methods, while effective, are often costly and may not fully eliminate pollutants. In contrast, phytoremediation offers a promising ecological solution, utilizing plants' abilities to absorb and mitigate contaminants. While some legumes show effectiveness, their consumption poses risks of pollutant transfer.

Ornamental plants, which are not intended for human or animal consumption, may serve as a safer alternative. This study focuses on the potential transfer of hydrocarbons in ornamental plants and evaluates their effectiveness in phytoremediation by testing four species to compare their responses to pollution and their ability to cleanse the soil.

Keys words : phytoremediation, decontamination, hydrocarbon, polluted soil, ornamental plants.