

**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 de Biologie Animale et Végétale**



Mémoire

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

Spécialité : Biodiversité et environnement.

Thème

**Essai de phytoremédiation d'un sol
pollué aux hydrocarbures en utilisant
la fève, le haricot et le trèfle.**

Présenté par :

LABANI Yasmina

KOLLI Zineb

Devant le jury :

Présidente : Mme LARDJANE N.

M.C.A

UMMTO

Promotrice : Mme CHIBANE G.

M.A.A

UMMTO

Copromotrice : Mme SADOUDI-ALI AHMED D. Professeur

UMMTO

Examineurs : Mme SAHMOUNE F.

M.A.A

UMMTO

2020/2021

Remerciements

Nous remercions tout d'abord le bon Dieu qui nous a aidé et donné la volonté pour la réalisation de ce travail ;

Nos vifs remerciements et notre profond respect s'adressent à notre promotrice Madame Chibane., Maitre assistante à l'U.M.M.T.O et Madame Sadoudi, professeur à U.M.M.T.O. de nous avoir proposé cette thématique originale et d'actualité, et pour leur suivi et leurs engagements tout au long de l'élaboration de ce travail. Nous les remercions pour leurs orientations et conseils qui nous ont été bénéfiques.

Nous remercions vivement la présidente du jury Mme Lardjane maitre de conférence A à U.M.M.T.O et Mme Sahmoune maître de assistante A à U.M.M.T.O. qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail ;

Nous remercions toutes les personnes qui travaillent au laboratoire commun et laboratoire de pédologie qui nous ont aidées dans notre travail. Nous remercions aussi l'ingénieur du laboratoire Madame Abrous H. qui a toujours été là pour nous, ainsi que le chef de service de l'Institut national de recherche forestière de Bâinem, Monsieur Himrane Hocine, pour avoir accepté de nous faire les analyses physico-chimiques de nos échantillons.

Nous tenons à remercier le responsable de la station-service d'Azeffoun, Monsieur Itbikene, d'avoir accepté de récupérer des échantillons de sol de la station. Nous remercierons aussi toutes les personnes qui travaillent dans la station.

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

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents ;

A mon cher et unique frère Kamel;

A mes chers oncles et mes tantes et leurs enfants:

A mes chères grand-mères;

A mon binôme Yasmine;

*A toute la promotion de biodiversité et environnement de
2021 ;*

Et à tous ceux qui m'aiment.

Zineb

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents ;

A ma chère grand-mère ;

A mon cher et unique frère Rayane;

A mes chères sœurs :Sadia et Sihem ;

A mes oncles et mes cousines ;

A mon binôme Zineb;

A mes chers amis ;

*A toute la promotion de biodiversité et environnement de
2021;*

Et à tous ceux qui m'aiment.

Yasmine

Introduction générale1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-1- Sol.....3

I-1-1 Définition du sol3

I-1-2- Constitution du sol.....3

I-1-3- Propriétés du sol.....3

I-1-4- Pollution du sol.....5

I-2- Hydrocarbures.....5

I-2-1- Définition des hydrocarbures.....5

I-2-2- Classification des hydrocarbures.....6

I-2-3- Origine et sources des hydrocarbures.....7

I-2-4- Devenirs des hydrocarbures.....8

I-2-5- Impacts des hydrocarbures.....9

I-3- Moyens de décontaminations.....10

I-3-1- Traitements biologiques.....11

Chapitre II : Matériels et méthodes

II-1- Présentation de la zone d'étude.....15

II-2- Matériel.....16

II-2-1- Matériel végétal.....16

II-2-1-1- Classification botanique des espèces étudiées.....16

II-2-2- Sol.....20

II-2-3- Pots.....21

II-3- Méthodes.....21

II-3-1- Préparation du sol.....	21
II-3-2- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les plantes.....	23
II-3-3- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les propriétés biologique du sol...	24
II-3-4- Effet des hydrocarbures sur quelque propriété du sol.....	25
II-4- Analyses statistiques des données.....	28

Chapitre III : Résultats et discussions

III-1- Résultats des analyses.....	29
III-1-1- Effet des hydrocarbures sur le végétal	29
III-1-1-1- Taux de levée	29
III-1-1-2- Hauteur des plants.....	29
III-1-1-3- Biomasse aérienne.....	31
III-1-1-4- Biomasse racinaire.....	32
III-1-1-5- Longueur de la racine principale.....	33
III-1-2- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les propriétés biologique du sol.....	34
III-1-2-1- Tests de germination.....	34
III-1-3- Effet des hydrocarbures sur le sol	35
III-1-3-1- Potentiel d'Hydrogène.....	35
III-1-3-2- Conductivité électrique.....	36
III-1-3-3- Carbone organique.....	37
III-1-3-4- Teneur en hydrocarbures totaux.....	38
III-2- Discussion.....	39
Conclusion.....	43
Références bibliographiques.....	

Anexxe.....

CE : Conductivité électrique.

Corg : Carbone organique.

HP : Hydrocarbure pétrolier.

HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques.

MO : Matière organique.

CF : Cultivé fève.

CH : Cultivé haricots.

CF : Cultivé trèfle.

CCF : Contaminé cultivé fève.

CCH : Contaminé cultivé haricots.

CCT : Contaminé cultivé trèfle.

CNC : Contaminé non cultivé.

SCCF : Sol Contaminé cultivé fève.

SCCH : Sol Contaminé cultivé haricots.

SCCT : Sol Contaminé cultivé trèfle.

SCNC : Sol Contaminé non cultivé.

Figure 1 : Classification par nature des hydrocarbures.	6
Figure 2 : Cycle des polluants dans le système sol-plante, par différentes voies de transformation	9
Figure 3 : Illustration descriptive des techniques de phytoremédiation	12
Figure 4 : Image satellitaire de la station-service d’Azeffoun	15
Figure 5 : Fève (<i>Vicia faba</i> L.)	17
Figure 6 : Haricot (<i>Vigna unguiculata</i> L.)	18
Figure 7 : Trèfle (<i>Trifolium resupinum</i> L.)	19
Figure 8 : Blé (<i>Triticum durum</i>)	20
Figure 9 : Dispositif expérimental de l’essai au laboratoire	22
Figure 10 : Dispositif expérimental du test de germination du blé (<i>T. durum</i>)	24
Figure 11 : pH mètre HI2210	25
Figure 12 : Conductimètre cond 1970i	26
Figure 13 : Mesure du carbone par la méthode de Anne	27
Figure 14 : Agitation magnétique et l’extraction des hydrocarbures	28
Figure 15 : Taux de levée de la fève, du haricot et du trèfle cultivés sur un sol contaminé et non contaminé	29
Figure 16 : Evolution de la hauteur de la fève, du haricot et du trèfle cultivés sur le sol contaminé et non contaminé	30
Figure 17 : Biomasse aérienne de la fève, du haricot et du trèfle cultivés sur un sol contaminé et non contaminé	31
Figure 18 : Biomasse racinaire de la fève, du haricot et du trèfle cultivé sur un sol contaminé et non contaminé	32
Figure 19 : Longueur des racines principales de la fève, du haricot et du trèfle cultivés sur les sols contaminé et non contaminé.	33
Figure 20 : Taux de germination des graines du blé dans les différents sols contaminés cultivé et dans le sol contaminé non cultivé.	34
Figure 21 : Valeurs de pH des sols traités	35
Figure 22 : Valeurs de CE des sols traités	36
Figure 23 : Teneurs du carbone organique des sols traités	37

Figure 24 : Teneurs des hydrocarbures des sols traités38

Tableau I : Principales sources de contamination du sol.....	8
Tableau II : Avantages et Limites de la phytoremédiation.....	13
Tableau III : Caractères physico-chimiques des échantillons du sol.....	20

Introduction

Compte tenu de l'accroissement de la population mondiale qui compterait plus de 9 milliards d'habitants en 2050, notre sécurité alimentaire actuelle et future dépend de notre capacité à accroître les rendements et à améliorer la qualité des aliments en exploitant les mêmes sols que ceux que nous utilisons aujourd'hui. La pollution des sols a des répercussions négatives sur chacun d'entre nous, et a été identifiée comme l'une des principales menaces pour les fonctions du sol dans le monde entier (Anonyme, 2021).

Les sols sains sont une matière première précieuse, non renouvelable et de plus en plus menacées par les comportements destructifs de l'être humain. Nous sommes responsables des sols qui nous procurent des denrées alimentaires, de l'eau et de l'air (Anonyme, 2021).

La pollution des sols par les hydrocarbures est due, entre autres, aux stations services (fuites des cuves de stockage, points de remplissages, les ilots de pompes, etc.) qui sont une source importante et répandue dans l'espace (Colin, 2000).

Les hydrocarbures pétroliers (HP) sont les contaminants du sol les plus répandus au monde. La gestion des lieux contaminés varie considérablement d'un site à l'autre et souffre, en général, d'un manque de performance des techniques de traitement biologique. En effet, les entreprises dans le domaine ont de la difficulté à obtenir de meilleurs taux de rendement de traitement quand il s'agit des HP récalcitrants. Parmi ces derniers, les HAP lourds, à cause de leurs caractéristiques physicochimiques, sont les moins biodégradables et les plus toxiques pour l'environnement et la santé humaine. Le besoin de remédier a mené au développement d'un nombre important de technologies (Fokou Mbogne, 2017).

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

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail qui consiste à évaluer l'efficacité de la phytoremédiation dans le traitement d'un sol pollué par les hydrocarbures, cas d'une station service polluée par les rejets d'essence et de gasoil.

L'objectif principal de notre travail est d'essayer de réhabiliter un sol pollué par les carburants (essence et gasoil), et de déterminer l'impact des rejets générés par les stations-services sur les propriétés physico-chimiques du sol, ceci par la technique de phytoremédiation en utilisant trois différentes espèces : la fève (*Vicia faba* L.), le haricot (*Vigna unguiculata*) et le trèfle (*Trifolium resupinum* L.).

Le présent mémoire est scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre présente un aperçu bibliographique sur les propriétés physico-chimiques des sols et des généralités sur les hydrocarbures ;
- Le deuxième chapitre récapitule les caractéristiques générales de la région étudiée et aborde les différentes approches adoptées et les protocoles d'analyses utilisés ;
- Le troisième chapitre est consacré aux résultats des différentes analyses ainsi que leurs discussions ;

Nous terminons par une conclusion assortie de quelques perspectives de recherches.

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I-1- Sol

I-1-1- Définition du sol

Selon Ben et Allison (2010), le sol est la couche la plus externe de la croûte terrestre résultant de l'interaction entre la lithosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère, dégradée et enrichie en apports organiques par les processus vivants de pédogenèse. Hors des milieux marins et aquatiques d'eau douce, il est ainsi à la fois le support et le produit du vivant.

Le sol recèle un trésor vivant insoupçonné qui représente 50 % de la biodiversité spécifique sur la terre (Michel-Claude et *al.*, 2011).

I-1-2- Constitution du sol

I-1-2-1- Fraction organique

Les composés carbonés organiques dans le sol, se retrouvent agrégés dans la MO du sol. Celle-ci contient du carbone organique à hauteur de 58% en fonction des conditions édaphiques (CRA-LR, 2011; Trigalet et *al.*, 2017). Cette molécule de carbone organique peut se trouver à différent stade de décomposition et sous différentes formes (débris végétaux, fumier) rendant la matière organique complexe (Craswell et *al.*, 2001 ; Chenu et *al.*, 2014).

I-1-2-2- Fraction minérale

Les constituants minéraux du sol sont primaires, hérités directement de la roche mère, ou secondaire, issus de la transformation chimique des précédents et réunis alors dans le complexe d'altération. Celui-ci comporte des sels ou des silicates (Gobat et *al.*, 2010).

I-1-2-3- Organismes vivants

Les organismes vivants du sol sont des bactéries, des champignons, des algues, les parties souterraines des plantes ainsi que des animaux très variés, des protozoaires aux mammifères (Gobat et *al.*, 2012).

I-1-3- Propriétés du sol

Les constituants du sol interagissent pour lui conférer ses propriétés. Leur proportion, leur variabilité spatio-temporelle, la vitesse des flux qui les relient influencent le fonctionnement du système (Gobat et *al.*, 2010).

I-1-3-1- Propriétés physiques**I-1-3-1-1- Texture**

La granulométrie, ou texture, correspond à la répartition des minéraux par catégories de grosseur, indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux (Duchaufour, 1998).

I-1-3-1-2- Structure

La structure d'un sol est l'arrangement spatial des particules minérales et leur éventuelle liaison par la matière organique, à un moment donné de la vie du sol (Mathieu et Pieltain, 1998).

I-1-3-1-3- Perméabilité

On appelle la perméabilité du sol, sa capacité à laisser passer l'eau vers les couches inférieures ; elle dépend de la texture et la structure (Koller, 2004).

I-1-3-2- Propriétés chimiques**I-1-3-2-1- Potentiel d'Hydrogène**

L'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ . L'acidité du sol est définie par la concentration en ions H^+ . Le pH du sol dépend également du complexe argilo-humique. (Mathieu et Pieltain, 2003).

I-1-3-2-2- Azote total

Par la méthode Kjeldahl, l'azote ammoniacal et l'azote organique sont dosés simultanément. Ces deux formes d'azote sont présentes dans les détritiques organiques soumis aux processus biologiques naturels.

I-1-3-2-3- Matière organique

Les débris végétaux de toute nature, feuilles, rameaux morts qui tombent sur le sol, constituent la source essentielle de la matière organique : dès leur arrivée au sol, ils sont plus ou moins rapidement décomposés par l'activité biologique. La matière organique est ainsi peu à peu transformée et cela donne naissance, d'une part, à des éléments solubles ou gazeux comme l'ammoniac, l'acide nitreux et le gaz carbonique, et d'autre

part à des complexes humiques (l'humus) qui se décomposeront puis se minéraliseront très lentement et très progressivement (Mathieu et Pieltain, 2003).

I-1-3-2-4- Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice des teneurs des sels solubles dans ce sol. Elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon c'est-à-dire son degré de salinité (Koller, 2004).

I-1-3-2-5- Calcaire

Le calcaire peut se trouver dans le sol à l'état de fragments de dimensions quelconques depuis les blocs et les graviers jusqu'à la taille des colloïdes argileux. Généralement, les fragments sont des parties de la roche mère qui ont subsisté, pour des raisons diverses et notamment grâce à une plus grande résistance, aux agents de l'altération (Mathieu et Pieltain, 2003).

I-1-4- Pollution du sol

La pollution des sols est une pollution qui est due à une très vaste gamme de substances inorganiques comme les métaux lourds (Cd, Hg, Pb) et les métalloïdes ou organiques, incluant les pesticides, les hydrocarbures, les PCB, les BTEX et l'ensemble de leurs produits de dégradation. Toutes ces substances ont en commun des propriétés toxiques à faible dose qui menacent la santé des organismes et des écosystèmes (Morel, 2014). Selon la norme NF ISO11074-1 (1997), un site contaminé est un site où sont détectées des substances dangereuses et donc présentant au moins une « concentration d'une substance dangereuse » (Colin, 2000).

I-2- Hydrocarbures

I-2-1- Définition

Les hydrocarbures constituent un groupe de produits chimiques organiques de structure très variée. Ils sont constitués uniquement de carbone et d'hydrogène (Picot et Montando, 2013).

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. Les hydrocarbures ou les huiles minérales regroupant différents produits pétroliers allant du pétrole brut aux produits du pétrole raffiné

comme le kérosène, les essences, les fuels, les lubrifiants et les huiles moteur (Picot et Montando, 2013).

I-2-2- Classification des hydrocarbures

Les produits pétroliers peuvent être classés en fonction de leur nature ou de leur provenance.

I-2-2-1- Classification par nature : saturés et insaturés

L'hydrocarbure se divise en deux possibilités de classification. La première relève de la nature des hydrocarbures. Dans le premier cas, il s'agit de distinguer les hydrocarbures dits « saturés » des hydrocarbures dits « insaturés » (Fig.1) (Colombano et *al.*, 2010).

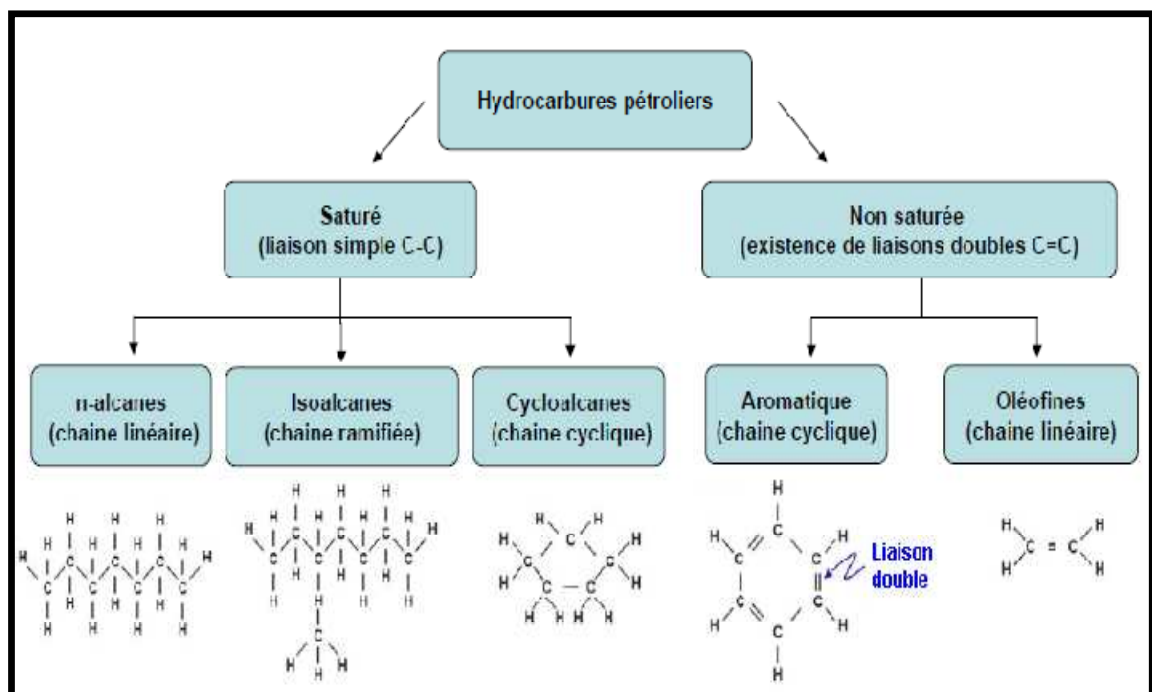


Figure 1 : Classification par nature des hydrocarbures (Colombano et *al.*, 2010)

I-2-2-1-1- Hydrocarbures saturés

Ce sont ceux qui ne contiennent que des atomes de carbone et d'hydrogène, reliés par des liaisons simples : on les appelle aussi les « alcanes » (Anonyme, 2021).

I-2-2-1-2- Hydrocarbures insaturés (non saturé)

Ils présentent une liaison double, voire triple. Les hydrocarbures insaturés sont plus riches en électrons qu'un hydrocarbure saturé. De cette classification, les chimistes émettent une

subdivision entre hydrocarbures acycliques et cycliques, qui relève purement de la considération moléculaire des énergies (Anonyme, 2021).

I-2-2-2- Classification par provenance conventionnel, non conventionnel et biogénique

La seconde classification relève de la provenance des hydrocarbures. Elle est plus simple pour le grand public que celle qui relève de la classification par nature. Cette classification est plus vaste, mais sans aucun doute plus claire (Anonyme, 2018).

I-2-2-2-1- Hydrocarbures conventionnels

Tels que le pétrole, les charbons issus d'extraction géologique, les gaz naturels. Ces derniers tendent à se raréfier en raison de leur surexploitation (Anonyme, 2018).

I-2-2-2-2- Hydrocarbures dits non conventionnels

Par exemple, le gaz de schiste, les sables bitumineux ou le gaz de houille (Anonyme, 2018).

I-2-2-2-3- Hydrocarbures biogéniques

Comme les gaz issus de la méthanisation naturelle (exploitation des vaches, par exemple) (Anonyme, 2018).

I-2-3- Origine et source des hydrocarbures

Les hydrocarbures peuvent être libérés dans l'environnement par des phénomènes naturels. Cependant la majorité des sources de pollution des sols par les hydrocarbures est d'origine anthropique. C'est le cas des stations services, qui sont parmi les principales causes de pollution du sol à cause des déversements des hydrocarbures lors du remplissage des cuves de stockage de la station ou de la distribution de carburants, lors d'une fuite dans les réservoirs ou dans les canalisations entre les citernes et les îlots de pompes (Colin, 2000).

Selon Ashraf et *al.* (2014), les principales sources de contamination des sols dans le monde sont présentées dans le tableau I.

Tableau I : Principales sources de contamination du sol (Ashraf et *al.*, 2014).

Pétrole et produit dérivés	Guerre chimique	Source urbaine	Produit agrochimique	Guerre biologiques
Exploration, production, raffinage, transport et consommation.	Contaminant toxiques, composés chimiques et armes. Contamination du sol provenant des opérations de guerre froide.	Production d'énergie et la pollution des sols par le transport et la contamination des sols par les résidus et les boues provenant du traitement des eaux usées.	Insecticides, fongicides herbicides et les diversement des carburants dans les fermes.	Bactéries, virus, champignons et toxines.

I-2-4- Devenirs des hydrocarbures dans le sol

C'est grâce à des processus physiques, chimiques et biologiques que les hydrocarbures vont pouvoir être transformés, déplacés ou éliminés après avoir été répandus dans le sol (Bouderhem, 2011).

I-2-2-1- Evaporation (Volatilisation)

Le passage d'un hydrocarbure fluide à sa forme gazeuse est plus ou moins long. Il dépend des conditions climatiques (vent et température), du type de pétrole et de l'épaisseur de la nappe (Fattal, 2008).

I-2-2-2- Dissolution

La dissolution est un processus de dissociation des molécules du pétrole dans l'eau. Plus la solubilité est grande, plus la substance sera susceptible de se dissoudre dans les eaux souterraines et de migrer loin de la zone source (Fattal, 2008).

I-2-2-3- Sorption (adsorption)

Les polluants restent en phase gazeuse ou en solution après avoir pénétré dans le sol. Puis, ils seront fixés par le sol en fonction de leur solubilité dans l'eau, de leur structure

moléculaire, de leur groupe fonctionnel et en fonction des caractéristiques du sol (Koller, 2009).

I-2-2-4- Dégradation

Il existe deux types de dégradation de polluants : dégradation abiotique et dégradation biotique.

I-2-2-4-1- Dégradation abiotique

Selon Fattal (2008), les pertes abiotiques des hydrocarbures sont dues à des phénomènes physiques et chimiques comme la photolyse qui se fait sous l'action de la lumière, l'hydrolyse sous l'action de l'eau et les réactions d'oxydoréductions abiotiques (sans l'intervention d'organismes vivants).

I-2-2-4-2- Dégradation biotique ou biodégradation

La dégradation des hydrocarbures se fait dans des conditions aérobies et anaérobies par des microorganismes, principalement des bactéries et /ou des champignons. En effet, les hydrocarbures constituent une source alimentaire pour les bactéries (Fattal, 2008).

La Figure 2 représente le cycle des polluants dans le système sol-plante, donnant une vue générale de leurs transformations avant d'atteindre des cibles telles que les eaux souterraines, les plantes, les eaux superficielles et, enfin, l'homme.

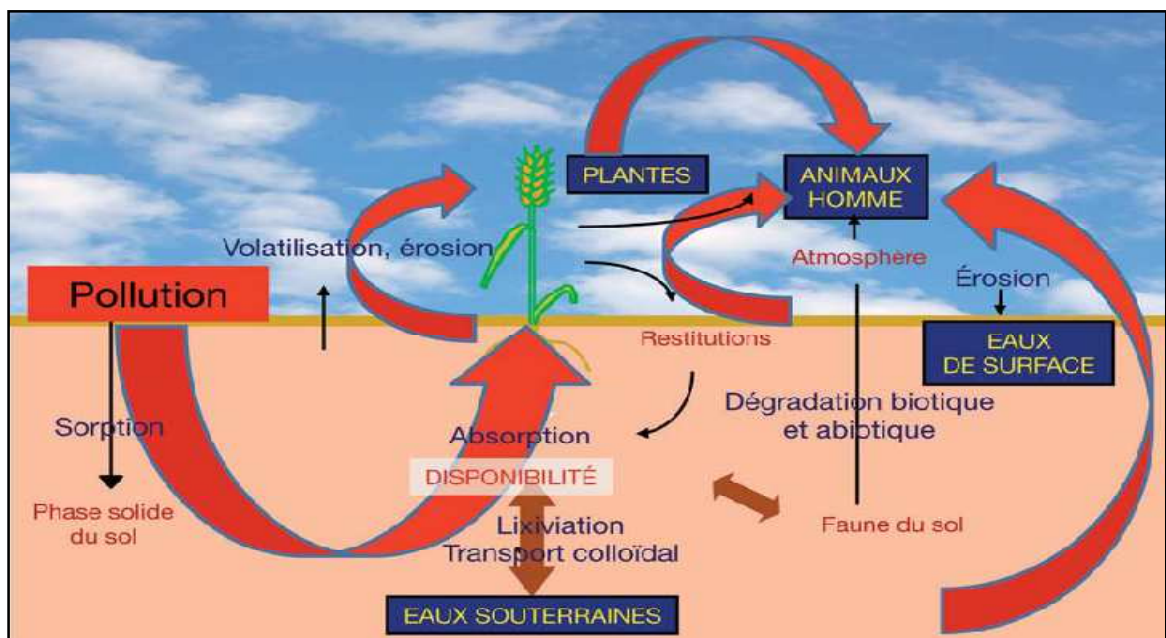


Figure 2 : Cycle des polluants dans le système sol-plante, par différentes voies de transformation (Morel, 2012).

I-2-5- Impacts des hydrocarbures

La présence d'un polluant dans le sol n'est pas en soit un danger. Le risque apparaît dès que ce polluant peut être mobilisé et agit sur l'environnement (faune, flore) ou sur l'homme (Dubey et Dwividi, 1988).

I-2-5-1- Impact sur le sol

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

- Physique (érosion, désertification, saturation en eau, tassement).
- Chimique (acidification, salinisation, contamination par des micropolluants)
- Biologique (altération de la minéralisation de l'humus, atteintes à la biodiversité).

I-2-5-2- Impact sur la santé

En 2003, les hydrocarbures ont été rajoutés aux produits visés par la convention de Stockholm sur les polluants organiques persistants : ils ont été classés comme produits très préoccupants pour la santé (Le corfec, 2011).

Un risque de développer un cancer de la peau, du scrotum après exposition à la suie, au goudron ou aux huiles minérales. De même, un cancer du poumon peut être développé après exposition au gaz (Doumont et Libion, 2006).

I-2-5-3- Impact sur la végétation

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

I-3- Moyens de décontaminations

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

I-3-1- Traitements biologiques

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

I-3-1-1- Bioremédiation

Le procédé de la bioremédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart des temps microscopiques (Bactéries, Microalgues, Champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau et le gaz Carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivés au laboratoire puis réintroduits dans le sol (Abdelly, 2006).

I-3-1-2- Phytoremediation

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

I-3-1-2-1- Techniques de phytoremédiation

Dans le cadre de la phytoremédiation, les plantes interagissent de différentes manières avec les contaminants (Fig.3) (Favas et *al.*, 2014).

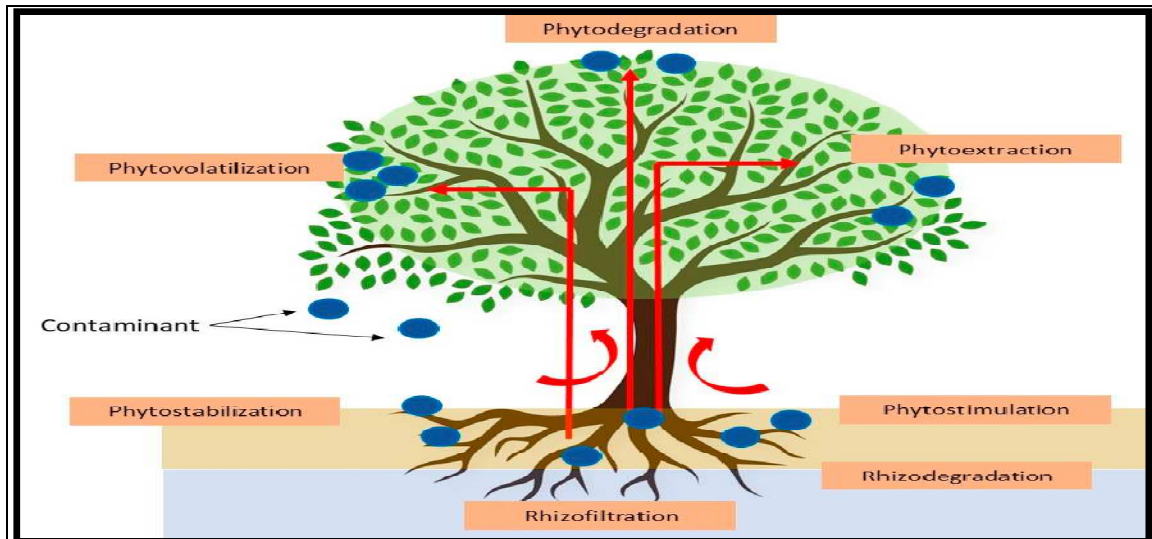


Figure 3 : Illustration descriptive des techniques de phytoremédiation (Favas et *al.*, 2014).

I-3-1-2-1-1- Phytoextraction

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

I-3-1-2-1-2- Phytotransformation ou Phytodégradation

Après l'absorption du contaminant par la plante, il est transformé en une forme moins toxique. Cette transformation peut également se produire à la surface de la plante (Park et *al.*, 2011).

I-3-1-2-1-3- Phytovolatilisation

Dans ce processus, la plante retire le polluant du sol et parvient, ensuite, à le transformer en un produit volatil, le libérant dans l'atmosphère (Bob Mueller, 2020).

I-3-1-2-1-4- Phytostimulation

Les racines des plantes libèrent des substances (exsudats) qui peuvent accélérer la dégradation de certains polluants. Lorsque des micro-organismes contribuent à la dégradation, l'ensemble du processus est appelé phytostimulation (Borriss, 2020).

I-3-1-2-1-5- Phytostabilisation

Ce processus consiste en l'immobilisation des polluants dans le sol, évitant ainsi les processus érosifs et permettant l'association avec l'humus et la lignine (Shackira et Puthur, 2019).

I-3-1-2-1-6- Rhizodégradation

L'activité métabolique des microorganismes de la rhizosphère (champignons, bactéries, et levures) est 10 à 100 fois plus importante que dans le sol, ce qui leur permet de dégrader efficacement les contaminants en même temps que les nutriments organiques naturels (Cristaldi, 2020)

I-3-1-2-1-2- Avantages et limites de la phytoremédiation

Selon Cadriere (2006), deux points attribuables (avantages et limites) à la phytoremédiation sont détaillés dans le tableau III.

Tableau III : Avantages et limites de phytoremédiation (Cadriere, 2006).

Avantages :
Intérêt économique : 10 à 100 fois moins coûteux que les techniques classiques
Intérêt technique : - extraction d'une gamme variée de polluants. - plus de 800 espèces végétales concernées.
Intérêt environnemental : technique « passive », le soleil est le seul apport énergétique
Intérêt paysager : réduction de la pollution visuelle.
Limites :
Durée du traitement : plusieurs années.
Faible profondeur d'intervention (enracinement des végétaux) : 0,5 à 1 m pour les herbacées, 2 à 4 m pour les arbres et arbustes.
Technologie encore jeune aux applications industrielles peu nombreuses.

Chapitre II : Matériels et méthodes

L'objectif de notre travail est de tenter de dépolluer un sol contaminé par les hydrocarbures qui sont le gasoil et l'essence super par le biais d'un procédé biologique qui est la phytoremédiation ex-situ (au niveau de laboratoire de pathologie des écosystèmes du département biologie de l'UMMTO) en utilisant la fève (*Vicia faba* L.), le haricot dolique et le trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.). Une comparaison entre l'efficacité de ces trois espèces à dépolluer ce sol est réalisée.

II-1- Présentation de la zone d'étude

II-1-1- Localisation et description

La commune d'Azeffoun est une circonscription administrative algérienne située dans la wilaya de Tizi Ouzou (Fig.4).

Azeffoun est une ville côtière de la wilaya de Tizi Ouzou, située à 70 km au nord-est de Tizi Ouzou et à 95 km à l'ouest de Bejaïa (Anonyme, 2021).

Le territoire de la daïra d'Azeffoun s'étend sur une superficie de 319,01 km² (Anonyme, 2021).

II-1-2- Caractéristiques climatiques

Azeffoun possède un climat méditerranéen chaud avec un été sec (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger. Sur l'année, la température moyenne à Azeffoun est de 18.5°C et les précipitations sont en moyenne de 720.1 mm (Anonyme, 2021).



Figure 4 : Image satellitaire de la station-service d'Azeffoun (Anonyme, 2021).

II-2- Matériel

II-2-1- Matériel végétal

Trois espèces végétales différentes ont été utilisées pour la phytoremediation, à savoir la fève, le haricot et le trèfle (Légumineuses). Duchaufour (1997) a préconisé l'utilisation des légumineuses pour réduire la pollution du sol par les hydrocarbures. 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.

II-2-1-1- Classification botanique des espèces étudiées

II-2-1-1-1- Fève

La fève est une plante herbacée annuelle dont la position systématique est la suivante (Cronquist, 1981):

- Règne.....Plantae
- Sous-règne.....Tracheobionta
- Division.....Magnoliophyta
- Classe.....Magnoliopsida
- Sous-classe.....Rosidae
- Ordre.....Fabales
- Famille.....Fabaceae
- Sous-famille.....Faboideae
- Genre.....*Vicia*
- Espèce.....*Vicia faba* L.

La fève se développe à partir d'une tige simple, dressée, creuse et de section quadrangulaire. Sa hauteur est généralement comprise entre 0,80 et 1,20 m. La plante forme des feuilles alternes et composées-pennées (Fig.5). Le système racinaire est à dominance pivotante, de vigueur moyenne et il peut s'enfoncer jusqu'à 80 cm (Chaux, 2003). La fève supporte les faibles gelées ne dépassant pas -3°C. Les fortes chaleurs (au-dessus de 22-25°C de moyenne journalière) lui sont néfastes. Les besoins en eau sont élevés. C'est une plante qui ne présente pas d'exigences spécifiques quand à la nature des sols pour peu que ceux-ci soient sains, suffisamment profonds et sans excès

de calcaire. Un pH neutre à légèrement alcalin est recherché (Mathon, 1985 in Zerrouki et Ouhadda, 2013).



Figure 5: *Vicia Faba* L. (Kolli et Labani, 2021).

II-2-1-1-2- Haricot dolique

Le haricot dolique est classé, selon Cronquist (1981), comme suit :

- Règne..... Plantae
- Sous-règne..... Tracheobionta
- Division..... Magnoliophyta
- Classe..... Magnoliopsida
- Sous classe..... Rosidea
- Ordre..... Fabales
- Famille..... Fabaceae
- Sous- famille..... Faboideae
- Tribu..... Phaseoleae
- Sous Tribu..... Phaseolinae
- Genre..... *Vigna*
- Espèce..... *Vigna unguiculata* L.

Selon Stanton (1970) et Chaux et Foury (1994), *V. unguiculata* est d'origine africaine. C'est une plante herbacée tolérante à la sécheresse, annuelle, grimpante, rampante ou plus ou moins érigée, cultivée comme annuelle. Les tiges pouvant atteindre 4 m de long, sont anguleuses ou presque cylindriques (Chaux et Foury, 2012 in Aiboud). Selon Chaux et Foury (1994), les graines sont oblongues à presque globuleuses (Fig.6), souvent comprimées latéralement, de 0,5 à 1 cm de long, noires, brunes, roses ou

blanches. Le système racinaire est très profond et dépassant 30cm en début de floraison.



Figure 6 : *Vigna unguiculata* L. (Kolli et labani, 2021).

II-2-1-1-3- Trèfle

D'après Cronquist (1981), la classification botanique du trèfle est comme suit :

- Règne..... Plantae
- Sous règne..... Tracheobionta
- Division..... Magnoliophyta
- Classe..... Magnoliopsida
- Sous classe..... Rosidae
- Ordre..... Fabales
- Famille..... Fabaceae
- Sous famille..... Papilionideae
- Tribu..... Trifolieae
- Genre..... *Trifolium*
- Espèce..... *Trifolium resupinum* L.

Le trèfle est caractérisé par une tige simple. Sa hauteur est comprise entre 40 et 80 cm (Fig.7). Les racines sont légèrement pivotantes. Son système racinaire est moins fasciculé plus profond que celui des graminées. Le trèfle résiste très bien au froid, mais mal à l'enneigement persistant. Il préfère les climats à degrés hygrométrique élevé. Il est plus exigeant en eau, s'adapte mieux à des sols variés. Il résiste à l'excès d'humidité hivernale (Soltner, 1990).



Figure 7: *Trifolium resupinum* L (Kolli et Labani, 2021).

II-2-1-1-4- Blé

Le blé dur est utilisé dans les bio-essais afin d'évaluer l'efficacité de phytoremédiation. Le choix de cette espèce (Fig.8) est justifié par sa sensibilité aux hydrocarbures. Selon Cronquist (1981), on peut classer le blé comme suit :

- Règne.....Plantae
- Sous-règne.....Tracheobionta
- Division.....Magnoliophyta
- Classe.....Liliopsida
- Sous-classe.....Commelinidae
- Ordre.....Cyperales
- Famille.....Poaceae
- Sous-famille.....Pooideae
- TribuTriticeae
- Genre.....*Triticum*
- Espèce.....*Triticum turgidum ssp durum* L.

Le blé est une plantes herbacée annuelle, monocotylédone, à feuilles alternes, formée d'un chaume portant un épi constitué de deux rangées d'épillets sessiles et aplatis. Les fleurs sont nombreuses (Fig.8), petites et peu visibles. Elles sont groupées en épis situés à l'extrémité des chaumes. L'embryon se développe lorsque les conditions d'humidité et de température sont réunies. Durant cette période de germination, les racines séminales se développent et les premières feuilles appariassent (Abib et Ali Ahmed, 1998). Le système racinaire du blé dur est assez développé et de type fasciculé. La température

conditionne à tout moment la physiologie du blé dur, une température supérieure à 0°C est exigée pour la germination des céréales (Soltner, 1990).



Figure 8 : *Triticum durum* (Kolli et Labani, 2021).

II-2-2- Sol

L'étude expérimentale a été réalisée sur un sol contaminé par des rejets continus d'une station service située à Azeffoun, et sur un sol non contaminé de la même station service. La méthode choisie est l'échantillonnage aléatoire ou les prélèvements ont été effectués à une profondeur de 0 à 20 cm dans deux (2) points, un sol pollué et un autre témoin.

Les analyses pédologiques effectuées en 2021 par BNEDER (Bureau National D'études Pour Le Développement Rural) indiquent que le sol de la station service est de texture limoneuse et de structure polyédrique sub-anguleuse à grumeleuse. Les caractéristiques physico-chimiques effectuées à l'IRNF sont résumées dans le tableau IV.

Tableau IV : Caractères physico-chimiques des échantillons du sol.

	Sol non pollué	Sol pollué
Calcaire total %	2.58	7.5
pH	8.12	7.81
CE ds/cm	0.81	1.13
Carbone total %	0.58	4
MO %	1	7
Azote N %	0.23	0.14
C/N	3	29
Quantité des hydrocarbures (g)	00	0.171
La structure	Structure polyédrique sub-anguleuse à grumeleuse.	Structure polyédrique sub-anguleuse à grumeleuse.

Le sol non pollué est peu calcaire avec un pH basique, non salé et pauvre en matière organique mais avec une bonne décomposition de la matière organique (C/N = 4) et une bonne minéralisation.

Le sol pollué est modérément calcaire avec un pH basique et très riche en matière organique cependant pour le deuxième échantillon en a besoin de plus d'azote pour une bonne décomposition de la matière organique (C/N= 17).

II-2-3- Pots

Le semis a été réalisé dans 21 pots de 11 cm de diamètre et 8.5 cm de profondeur contenant 400 g de sol dont chacun a reçu 5 graines de fève, 6 graines d'haricot et 8 graines de trèfle.

Un arrosage juste après le semis a été réalisé pour évacuer l'air compris entre les particules du sol et permettre une bonne germination des graines.

II-3- Méthode

II-3-1- Préparation du sol

Après L'échantillonnage sur le terrain le 14/03/2021, le sol à été séché l'air libre au niveau de laboratoire, puis tamisé à 2mm et homogénéisé pour être ensuite divisé en 7 lots.

Le sol pollué :

- Trois lots cultivés par la fève, le haricot et le trèfle.
- Un lot reste témoin non cultivé.

Le sol non pollué :

- Trois lots cultivés par la fève, le haricot et le trèfle.

II-3-1-1- Semis

Le semis à été réalisé le 04/04/2021.

Le sol contaminé est réparti sur douze pots à raison de 400g par pots :

- Le premier lot de trois pots, est constitué d'un sol contaminé cultivé par la fève.

- Le deuxième lot de trois pots, est constitué d'un sol contaminé cultivé par l'haricot.
- Le troisième lot de trois pots, est constitué d'un sol contaminé cultivé par le trèfle.
- Le quatrième lot de trois pots, est constitué d'un sol contaminé non cultivé.

Le sol non contaminé est réparti sur neuf pots à raison de 400g par pot :

- Le premier lot de trois pots, est constitué d'un sol non contaminé cultivé par la fève.
- Le deuxième lot de trois pots, est constitué d'un sol non contaminé cultivé par le haricot.
- Le troisième lot de trois pots, est constitué d'un sol non contaminé cultivé par le trèfle.

Pour évaluer l'effet des hydrocarbures sur les plantes et le sol, nous avons appliqué le dispositif expérimental illustré par la figure 9.

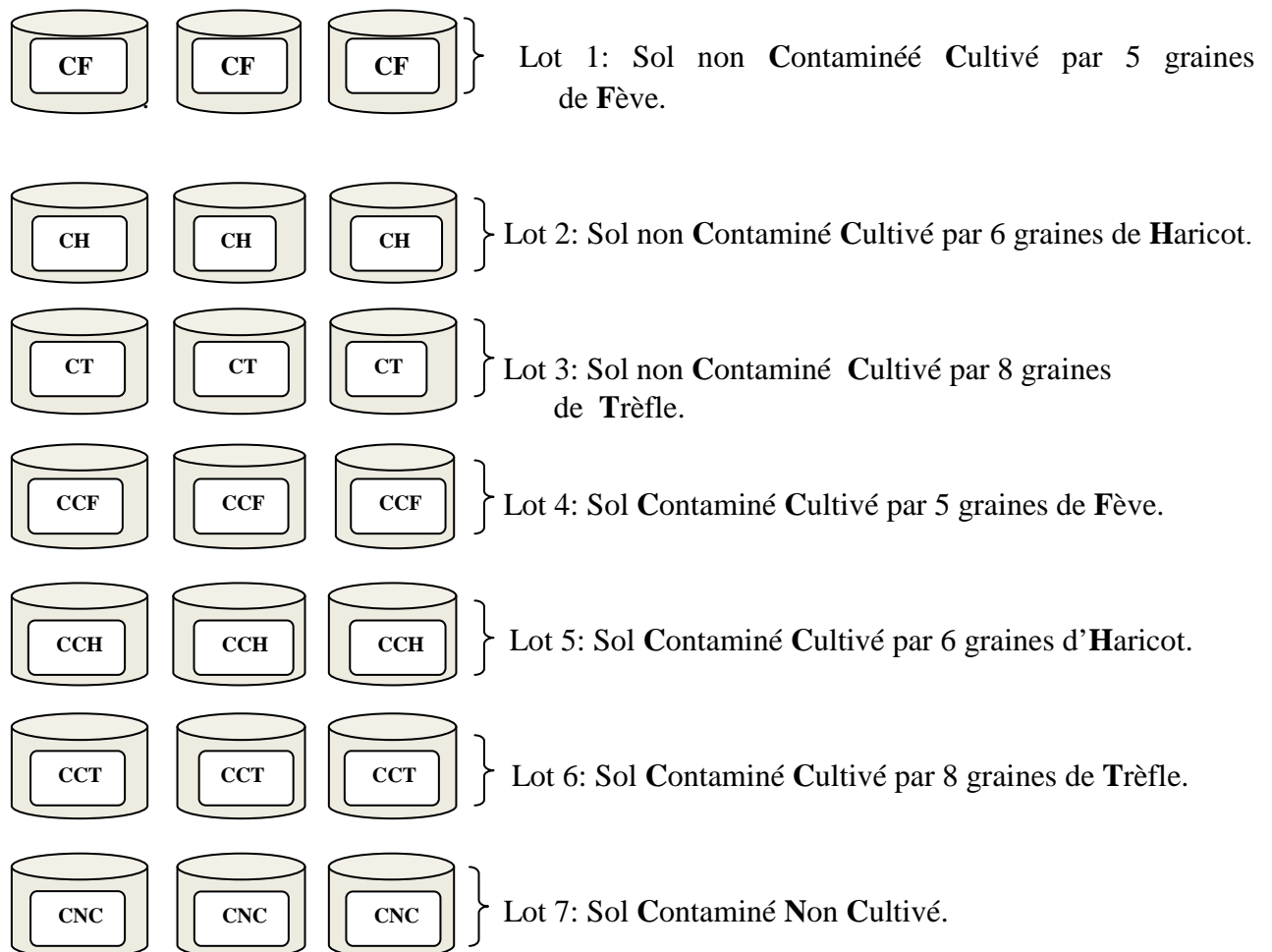


Figure 9 : Dispositif expérimental de l'essai au laboratoire.

II-3-1-2- Suivi des cultures

Le suivi des cultures a consisté en un arrosage régulier à l'eau de robinet durant toute l'expérimentation. L'eau infiltrée dans les assiettes est réutilisée pour l'arrosage pour maintenir la concentration des hydrocarbures dans le sol. Un désherbage est réalisé à chaque fois qu'on observe les mauvaises herbes dans les pots.

II-3-1-3- La récolte

La récolte a eu lieu le 04/06/2021, elle a été réalisée avant le stade de floraison des plants. La partie aérienne a été séparée de la partie racinaire. Les racines des plantes ont nettoyées et rincées à l'eau de robinet.

II-3-2- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les plantes

Afin d'évaluer l'effet des hydrocarbures sur les plantes nous avons procédé à la mesure de quelques indicateurs de croissance. Ces mesures sont réalisées sur tous les plants germés au niveau du laboratoire et consistent en l'estimation du taux de levée, la hauteur des plants, la biomasse et la longueur des racines.

II-3-2-1- Taux de levée

Il consiste à établir un pourcentage de levée dans chaque lot en dénombrant les plantes, par la formule suivante :

$$\text{Taux de levée} = (\text{nombre de plantes levées} / \text{nombre total de grains semées}) \times 100$$

II-3-2-2- Hauteur des plantes

Elle consiste à mesurer hebdomadairement, à l'aide d'une règle graduée, la croissance en longueur des plants.

II-3-2-3- Biomasse aérienne

Il s'agit de peser la partie aérienne des plantes de chaque lot à l'état sec. La partie aérienne est séparée de la partie racinaire nettoyée et séchée à l'étuve à 60°C pendant 48h.

II-3-2-4- Biomasse racinaire

Elle consiste à mesurer le poids des racines en suivant les mêmes étapes que pour la biomasse aérienne.

II-3-2-5- Longueur des racines

Elle consiste en la mesure de la croissance en longueur des racines pour les trois espèces. La mesure a porté sur la racine principale.

II-3-3- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les propriétés biologiques du sol

II-3-3-1- Test de germination

Après la récolte, nous avons réalisé un test de germination à base de blé, qui est connu comme une espèce polluo-sensible des hydrocarbures, il est utilisé dans ce travail pour tester la dépollution du sol. Le semis est réalisé en mettant dans chaque boîte de pétri 100g de sol et 10 graines de blé, puis nous les avons fait germer dans des conditions favorables avec un arrosage régulier dans les différents échantillons (Fig.10).

Le but de ce test est d'évaluer le degré de remédiation des sols dans les différents échantillons de sol.



Figure 10 : Dispositif expérimental du test de germination *Triticum durum* (Kolli et Labani, 2021).

Le taux de germination consiste à établir un pourcentage de germination dans chaque lot en démembrant les graines germées dans les sols contaminés et traités par la phytoremédiation sur le nombre total des graines semées.

II-3-3-2- Longueur racinaire

Après le dénombrement des graines germées, leurs longueurs racinaires sont mesurées avant de les remettre à nouveau dans le sol pour une autre semaine. La longueur racinaire est calculée comme suit :

$$\text{Longueur des racines} = \text{Longueur de la racine après la 2}^{\text{ème}} \text{ semaine} - \text{la longueur après la 1}^{\text{ère}} \text{ semaine}$$

II-3-4- Effet des hydrocarbures sur quelques propriétés du sol

Les effets des hydrocarbures sur les propriétés chimiques du sol consistent à mesurer les paramètres suivants :

II-3-4-1- Potentiel d'Hydrogène du sol

Le pH d'une solution dépend de la concentration relative des ions H^+ et OH^- ; si les ions H^+ sont majoritaires, la solution sera acide. Au contraire, si les OH^- l'emportent, la solution sera basique.

Le pH du sol a été déterminé sur une suspension aqueuse où le rapport sol /eau est de 2/5 dont 10 g de sol tamisé à l'aide d'un tamis à 2 mm pour lesquels on ajoute 25 ml d'eau distillée. Après agitation de la suspension pendant quelques minutes à l'aide d'une baguette en verre, suivie d'une décantation pendant 15 minutes, le pH est mesuré avec un pH mètre (HI2210) (Fig.11).



Figure 11: pH mètre HI2210 (Kolli et Labani, 2021).

II-3-4-2- Conductivité électrique

La conductivité électrique permet d'exprimer la salinité totale d'une solution, ou bien elle traduit la concentration en électrolytes d'une solution. Pour évaluer la conductivité électrique, la solution a été préparée selon le rapport 1/5. Dix grammes du sol tamisé à 2 mm ont été pesés et mis dans des béchers auxquels ont été ajoutées 50 ml d'eau distillée. Après agitation pendant 2 mn à l'aide d'un agitateur mécanique (Fig.12) et repos de 30 minutes, la CE est exprimé en microsiemens par centimètre ($\mu S/cm$). Elle est mesurée par un conductimètre de type WTW-cond 1970i.



Figure 12 : Conductimètre cond 1970i (Kolli ert Labani, 2021).

II-3-4-3- Carbone organique

La mesure du carbone total (COT) est un moyen indirect d'accéder à la quantité de matière organique dans le sol. Le dosage se fait par la méthode de «ANNE», dont le principe repose sur l'oxydation du carbone organique en CO_2 (Henin et al., 1969).

II-3-4-3-1- Réactifs utilisés

Bichromate de potassium à 8% (poudre), Diphénylamine (poudre), Sel de Mohr (poudre), Acide sulfurique (liquide), Fluorure de sodium (NaF).

II-3-4-3-2- Préparation des solutions

La préparation de la solution de bichromate de potassium consiste à dissoudre 49.04 g de BP dans une fiole de 1000 ml, agitez pendant quelques minutes complétez au volume d'eau distillée. La préparation de la solution de diphénylamine consiste à dissoudre 0.5 g de ce produit dans 100 ml d'acide sulfurique concentré auxquels sont ajoutez 20ml d'eau distillée. La préparation de la solution sel de Mohr consiste à dissoudre 78.5 g de sel pur dans 500 ml d'eau distillée, puis ajouter 20 ml d'acide sulfurique concentré, compléter à un litre et conserver cette solution à l'abri de l'air dans un flacon brun.

II-3-4-3-3- Protocole expérimental

Introduire 0.5g de sol tamisé à 2 mm dans un ballon de 250 ml, ajouter 10 ml de solution BP et 15 ml acide sulfurique (pur). Porter le ballon sur un chauffe ballon jusqu'à ébullition douce pendant 5 min (Fig.13).

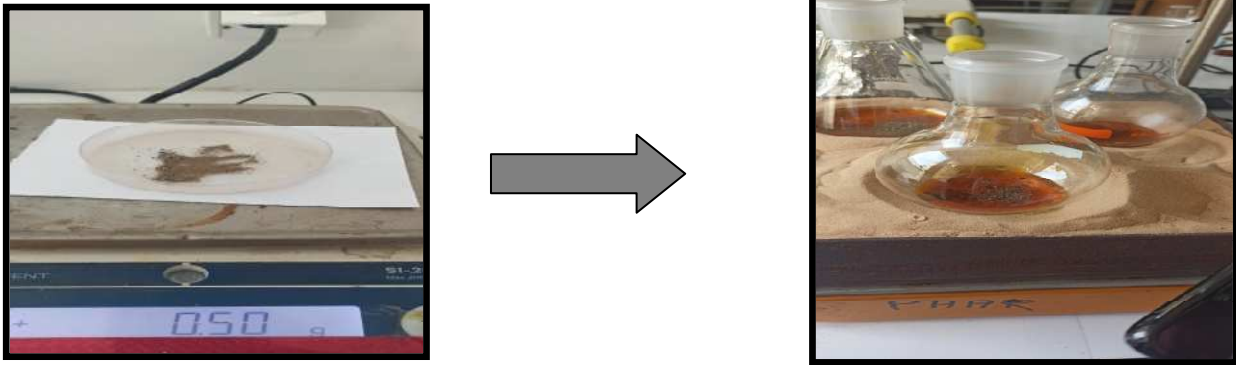


Figure 13 : Mesure du carbone par la méthode de ANNE (Kolli et Labani, 2021).

Après refroidissement, la solution est transvasée dans une fiole de 250 ml et ajustée avec de l'eau distillée, au très de jauge. Une aliquote de 20 ml a été prélevée et additionnée de 200 ml d'eau distillée et d'une pincée de Fluorure de sodium (NaF) et 4 à 5 gouttes de diphénylamine. Le bichromate en excès a été titré à froid à l'aide d'une solution réductrice de sel de Mohr. Le dosage du témoin donne un volume (V_t) de solution réduite (sel de Mohr). Le dosage de l'échantillon donne un volume de l'essai (V_e) de solution réduite (Sel de Mohr). La teneur en carbone organique pour 100 g de sol est donnée par la formule suivante :

$$C(\%) = \frac{(V_t - V_e) * 0.615 * 10 * 100}{P}$$

Avec :

$C(\%)$: Pourcentage de carbone organique (%).

V_t : Volume du témoin (ml).

V_e : Volume de l'essai (ml).

P : Prise d'essai (mg).

On admet que le carbone représente 58% de la matière organique totale, le taux de celle-ci est exprimé par la formule suivante :

$$MO(\%) = 1.72 * C(\%)$$

Avec :

$MO(\%)$: Taux de la matière organique du sol.

$C(\%)$: Taux de carbone organique.

II-3-4-4- Quantification de la quantité hydrocarbures dans le sol

L'évaluation de la quantité des hydrocarbures dans le sol s'effectue par l'extraction des HCT contenus dans le sol. Le but de cette extraction est d'évaluer la quantité des HC présente dans le sol avant et après traitement afin de déterminer l'efficacité de la phytoremédiation. Nous avons pesé 10 g de sol, auxquels nous avons ajouté 50 ml d'hexane puis laissé en agitation pendant 2h à l'aide d'un agitateur magnétique (MS400 MAGNETIC STIRRER). Une fois l'agitation terminée, on filtre la solution dans des boîtes qui ont été pesées à vide auparavant et laissée jusqu'à évaporation totale du solvant. Après évaporation, nous avons pesé les quantités d'HC extraites à l'aide d'une balance. Trois répétitions ont été effectuées pour chaque sol (Fig.14).

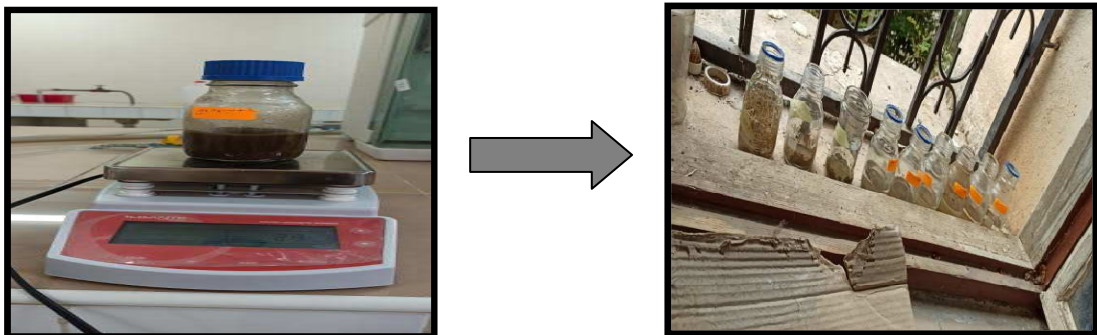


Figure 14 : Agitation magnétique et l'extraction des hydrocarbures (Kolli et Labani, 2021).

II-4- Analyse statistique des données

L'analyse statistique des résultats obtenus a été effectuée avec le logiciel R 3.0.2. La différence est considérée significative à $p < 0.05$. Les résultats ont été soumis au test de la variance à un facteur et à deux facteurs suivie du test de Newman et Keuls pour établir les groupes homogènes dans le cas où les différences sont significatives. Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé lorsque la normalité n'est pas vérifiée, suivi du classement des moyennes des rangs.

Chapitre III: Résultats et discussion

III-1- Résultats des analyses

D'après les résultats obtenus, les carburants présents dans le sol ont provoqué une perturbation des paramètres du sol.

III-1-1- Effet des hydrocarbures sur le végétal

Les trois plantes (la fève, le haricot et le trèfle) que nous avons semées ont été affectées par la présence des hydrocarbures dans le sol. En effet, des différences ont été observées au niveau des indicateurs de croissance que nous avons mesurés.

III-1-1-1- Taux de levée

La figure 15 représente le taux de levée de la fève, le haricot et le trèfle cultivé dans le sol contaminé et le sol non contaminé. La levée des graines a été observée à partir du 5^{ème} jour après le semis.

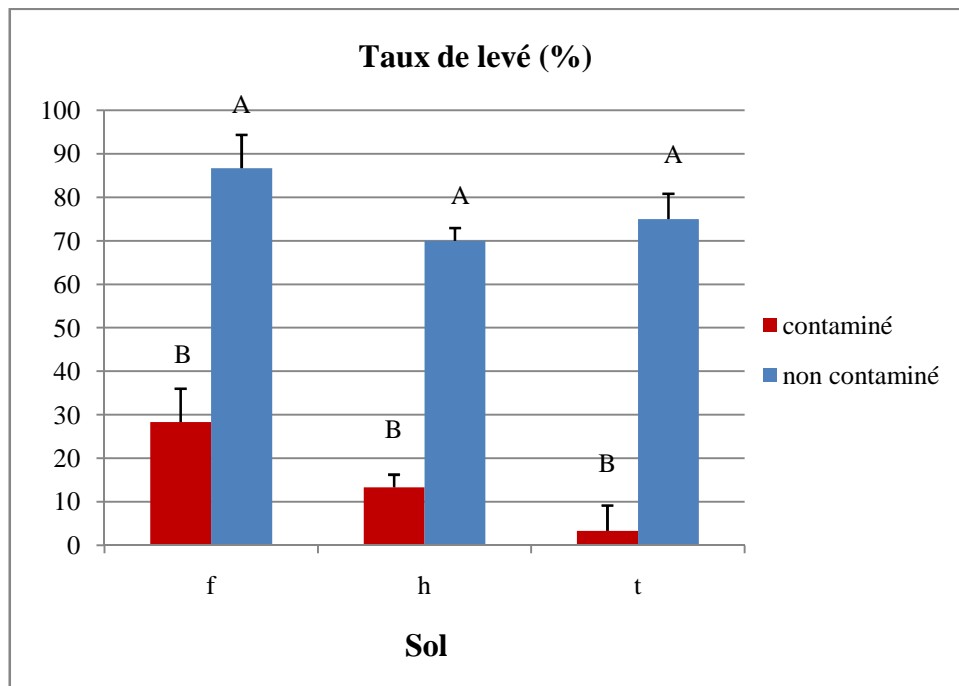


Figure 15 : Taux de levée de la fève (f), du haricot (h) et du trèfle (t) cultivés sur les sols contaminé et non contaminé.

La levée des graines de la fève a atteint 28% dans le sol contaminé et atteint une valeur de 86.67% dans le sol non contaminé.

La levée des graines du haricot dans le sol contaminé est de 13.33% et atteint 70% dans le sol témoin. Quant à la levée du trèfle dans le sol contaminé, nous avons enregistré une valeur de 3.33 %, qui est très faible comparativement à celle observée dans le sol non contaminé qui a atteint 70.83%. Il ressort de ces résultats que le pourcentage de levée des graines de la fève dans le sol contaminé est meilleur que celui obtenu avec le haricot et le trèfle. Cela peut être dû à la capacité des graines de la fève à tolérer la

pollution par les hydrocarbures. Nous avons remarqué un grand retard de levée et la pourriture de certaines graines, de la fève dans le sol contaminé, ce qui explique la diminution du pourcentage de levée par rapport au sol témoin.

L'analyse de la variance du taux de levée des trois espèces cultivées dans le sol contaminé et le sol non contaminé, a révélé une différence très hautement significative concernant le facteur sol ($p\text{-value} = 1.432 \times 10^{-07}$) et une différence significative pour le facteur espèce ($p\text{-value} = 0.0458$). Concernant l'interaction des deux facteurs, l'analyse a révélé qu'il y a pas de différence significative ($p\text{-value} = 0.521$). Le test de Newman et Keuls a révélé deux groupes homogènes les sols non contaminés cultivés par la fève, le haricot et le trèfle sont classés dans le groupe A, alors que les sols contaminés cultivés par les trois espèces sont classés dans le groupe B.

III-1-1-2- Hauteur des plants

La figure 16 illustre l'évolution hebdomadaire de la hauteur des plants de la fève, le haricot et le trèfle dans le sol contaminé et non contaminé.

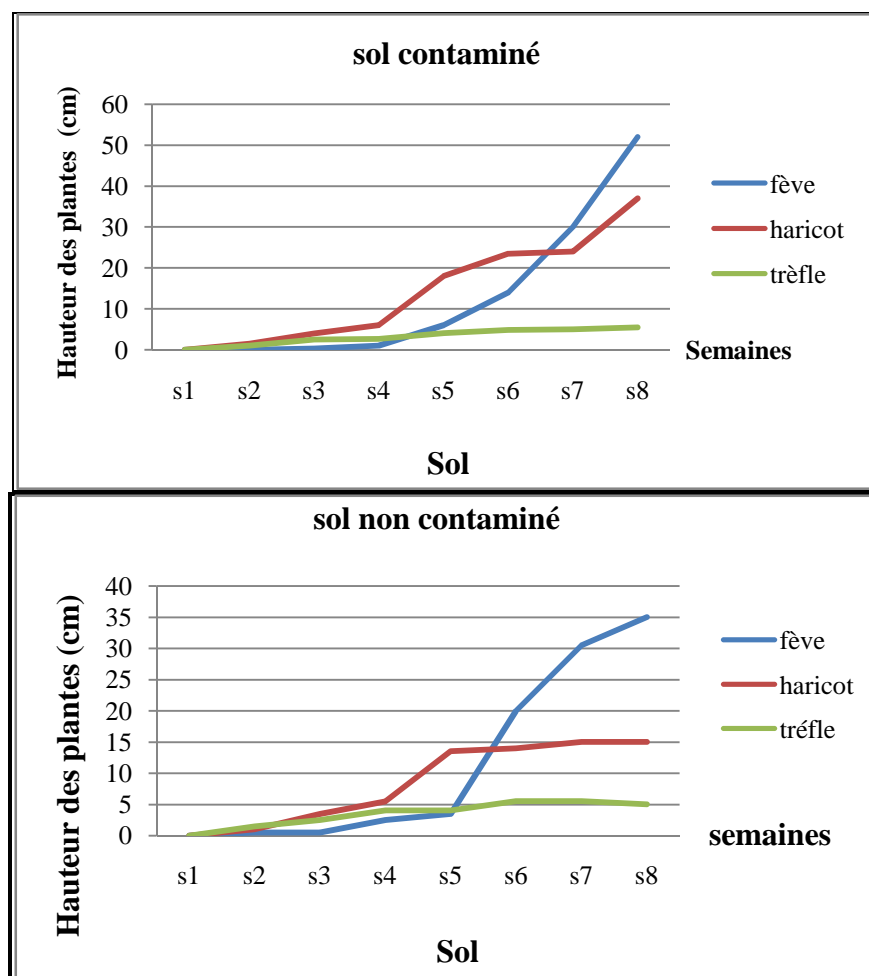


Figure 16 : Evolution de la hauteur de la fève, du haricot et du trèfle cultivés dans le sol contaminé et non contaminé.

La hauteur de la fève dans le sol contaminé et non contaminé, montre une augmentation à partir de la cinquième semaine, en fonction de l'augmentation du facteur temps pour arriver à un pic de 52cm dans le sol non contaminé et 35cm dans le contaminé au bout de la huitième semaine. Pour le haricot, nous avons enregistré une hauteur moyenne de 15cm dès la septième semaine puis elle reste stable. De même, dans le sol non contaminé, elle atteint 24cm dès la même semaine et augmente jusqu'à 37cm à la fin du suivi.

Concernant le trèfle, les résultats présentés dans la figure 16 montrent que les deux sols contaminé et témoin sont défavorables au développement des plants du trèfle.

Au bout de la cinquième semaine, nous avons remarqué que les plants du trèfle ont atteint une hauteur moyenne de 5cm qui s'est stabilisée jusqu'à la fin du suivi, en raison de la mort des plants.

III-1-1-3- Biomasse aérienne

La figure 17 représente la biomasse aérienne de la fève, du haricot et du trèfle sur le sol contaminé et non contaminé.

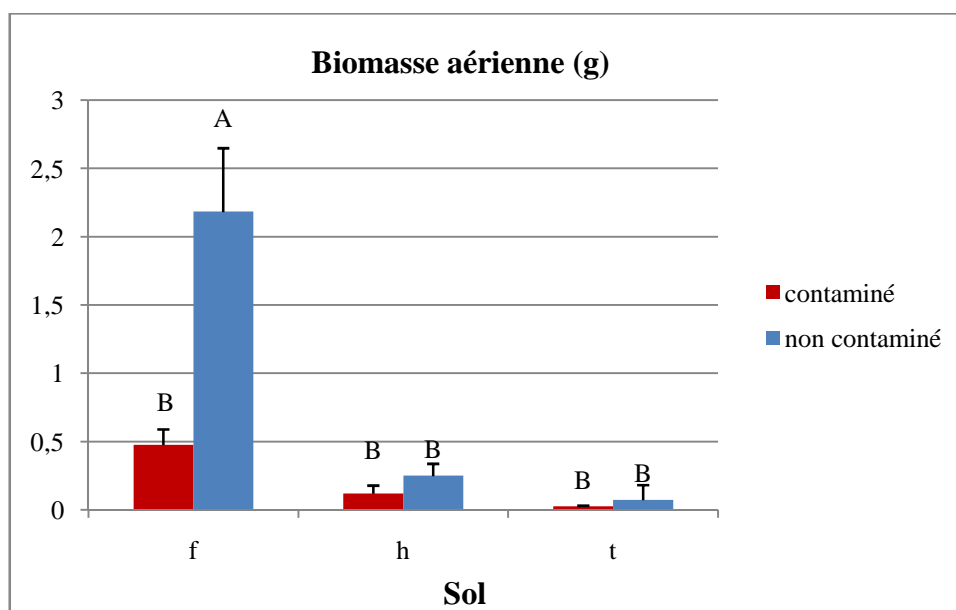


Figure 17 : La biomasse aérienne de la fève, du haricot et du trèfle sur un sol contaminé et non contaminé.

Pour la biomasse aérienne de la fève, nous avons enregistré une valeur de 0.48g dans le sol contaminé et une valeur élevée qui dépasse 2g dans le sol non contaminé. Concernant le haricot, nous avons enregistré une valeur de 0,12g dans le sol contaminé et une valeur de 0.25g dans le sol non contaminé. Quant à la biomasse aérienne du trèfle, nous avons enregistré une valeur de 0.03g dans le sol contaminé et une autre dans

le sol non contaminé qui a atteint 0.07g. Le trèfle est la plante qui a présenté la biomasse aérienne la plus faible en la comparant avec les deux autres espèces.

Pour la biomasse aérienne, le test de Kruskal-Wallis révèle qu'il n'y a pas de différence significative concernant le facteur sol (p -value = 0.3528). Par contre, pour le facteur espèce, les résultats révèlent qu'il y a une différence significative (p -value = 0.001179), L'interaction des deux facteurs, quant à elle, révèle une différence significative (p -value = 0.01188).

Le test Newman et Keuls, pour le facteur espèce, a fait ressortir deux groupes homogènes ; le groupe A contient la fève et le groupe B contient le haricot et le trèfle. On peut dire que la fève résiste aux hydrocarbures par alors que le haricot et le trèfle sont moins résistantes.

III-1-1-4- Biomasse racinaire

La figure 18 représente la biomasse racinaire de la fève, le haricot et le trèfle sur le sol contaminé et non contaminé.

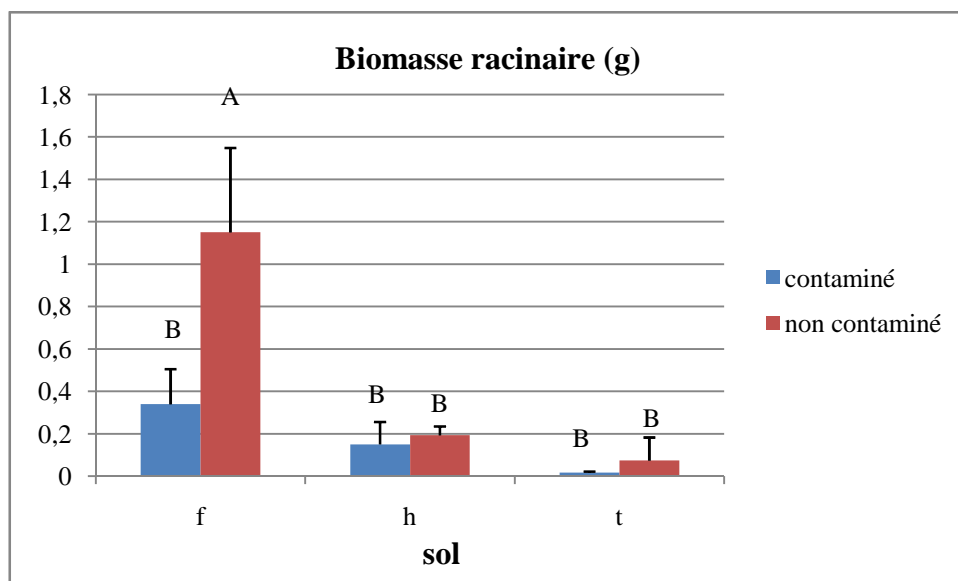


Figure 18 : Biomasse racinaire de la fève, du haricot et du trèfle cultivés sur des sols contaminé et non contaminé.

Pour la biomasse racinaire de la fève, nous avons enregistré une valeur de 0.34g dans le sol contaminé et une valeur élevée qui dépasse 1.15g dans le sol non contaminé. Concernant le haricot, nous avons enregistré une valeur de 0,15g dans le sol contaminé et une valeur de 0.19g dans le sol non contaminé.

Quant à la biomasse racinaire du trèfle, nous avons enregistré une valeur de 0.016g dans le sol contaminé et une valeur de 0.07g dans le sol non contaminé. Le trèfle est la plante

qui a présenté la plus faible biomasse racinaire par rapport aux deux autres espèces. Nous remarquons que les biomasses racinaires du haricot et du trèfle sont classées dans le même groupe B, alors que la fève est classée dans le groupe A, ce qui signifie que la biomasse racinaire de la fève est plus importante que celles du haricot et du trèfle.

D'après le test de Kruskal-Wallis, concernant le facteur sol, les résultats montrent qu'il n'y a pas de différence significative (p -value = 0.4003) et concernant le facteur espèce, les résultats révèlent une différence significative (p -value = 0.003521). L'interaction des deux facteurs montre une différence significative (p -value = 0.02798).

Le test Newman et Keuls pour le facteur espèce a fait ressortir deux groupes homogènes le groupe A contient la fève et le groupe B contient le haricot et le trèfle.

III-1-1-5- Longueur de la racine principale

La figure 19 représente la longueur de la racine principale de la fève, du haricot et du trèfle cultivés dans les sols contaminé et non contaminé.

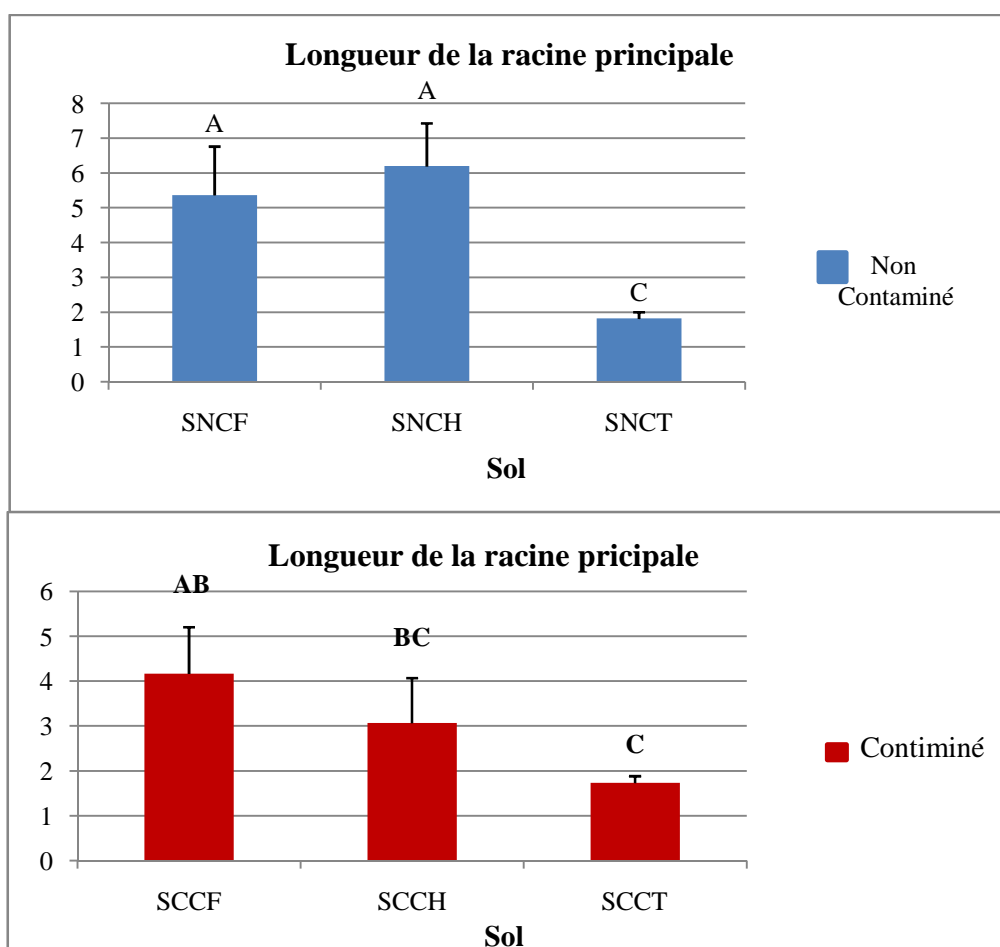


Figure 19 : Longueurs de la racine principale de la fève, du haricot et du trèfle dans les sols contaminé et non contaminé.

Pour la longueur racinaire de la plante de la fève dans le sol non contaminé, nous avons enregistré une valeur de 5.36 cm et une longueur de 4.16 cm dans le sol contaminé.

Pour le haricot, nous avons enregistré une valeur de 6.19 cm dans le sol contaminé et une valeur assez faible de 3.58 cm dans le sol contaminé.

Concernant le trèfle, dans le sol non contaminé nous avons enregistré une valeur de 1.83cm dans le sol contaminé et une valeur de 1.73 cm dans le contaminé.

D'après le test de Kruskal-Wallis, concernant le facteur sol, il n'y a pas de différence significative (p-value = 0.1575) et concernant le facteur espèce, les résultats révèlent une différence significative (p-value = 0.003952). L'interaction des deux facteurs aussi révèlent une différence significative (p-value = 0.0148).

Le test Newman et Keuls, pour l'interaction des deux facteurs (sol*espèce), fait ressortir quatre groupes homogènes ; le groupe A qui contient le SNCH et SNCF, le groupe AB contient le SCCF, le groupe BC contient le SCCH et, enfin, le groupe C contient le SNCT et SCCT.

III-1-2- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les propriétés biologiques du sol

III-1-2-1- Test de germination

Il sert à évaluer l'impact et l'effet de la concentration des hydrocarbures contenus dans le sol sur la germination et l'élongation racinaire des graines du blé dur.

➤ Taux de germination

La figure 20 représente l'élongation racinaire des graines du blé dans différents sols.

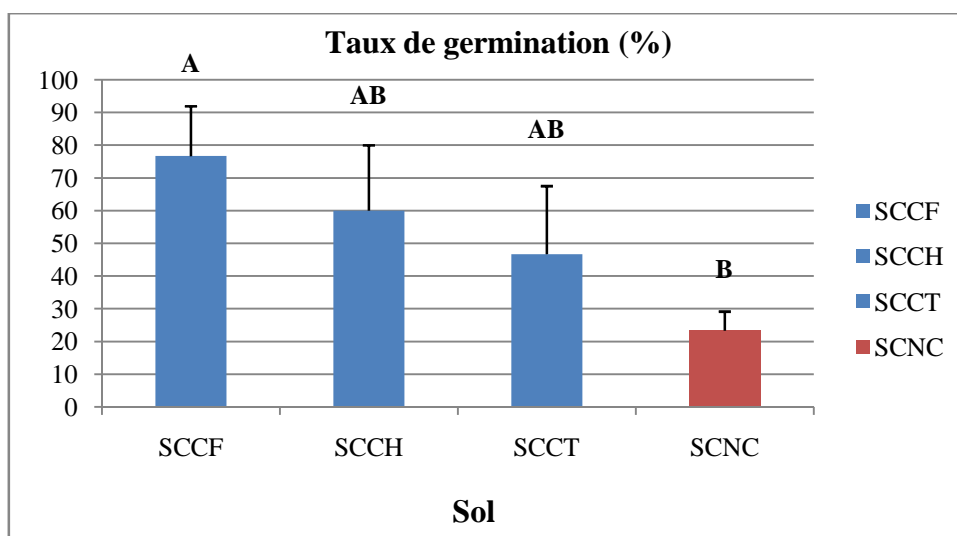


Figure 20 : Taux de germination des graines du blé dans les différents sols contaminé cultivés et contaminé non cultivé.

Le taux de germination du blé dans le sol cultivé par la fève dépasse 90%, et dans le sol cultivé par le haricot, il atteint une valeur de 60%. Concernant la germination des graines dans le sol cultivé par le trèfle, nous avons enregistré une valeur de 56.67% et dans le sol non cultivé elle est de 23.33%.

D'après les résultats obtenus, nous concluons que la capacité de la germination des graines du blé est importante dans les sols contaminés cultivés par les trois espèces par rapport au sol contaminé non cultivé.

L'analyse de la variance, pour le taux de germination du blé, a révélé l'effet significatif des hydrocarbures.

Le test Newman et Keuls pour le taux de germination a donné trois groupes homogènes ; le groupe A contient le sol contaminé cultivé par la fève, le groupe AB contient le sol contaminé cultivé par le haricot et le sol contaminé cultivé par le trèfle enfin, le groupe B contient le sol contaminé non cultivé.

III-1-3- Effet des hydrocarbures sur le sol

III-1-3-1- Potentiel d'Hydrogène

La figure 21 illustre la mesure du pH des différents sols contaminés et cultivés par les trois espèces et le contaminé non cultivé.

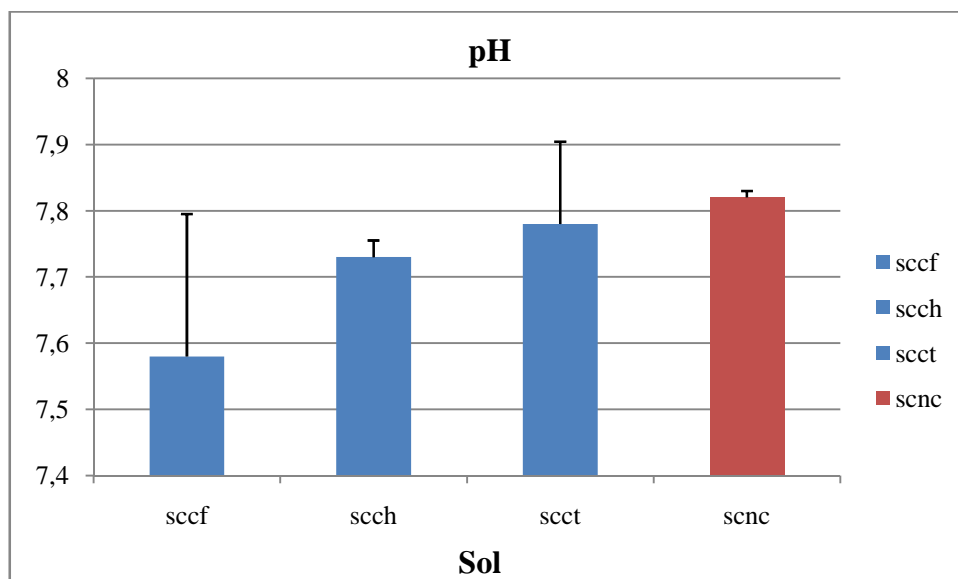


Figure 21 : Valeurs de pH des sols traités.

Le sol contaminé cultivé présente un pH de 7.79 pour la culture de la fève, 7.75 pour la culture du haricot et 7.71 pour la culture du trèfle. Dans le sol contaminé non cultivé, il est de 7.81.

Les résultats enregistrés indiquent que les hydrocarbures provoquent une légère diminution du pH au niveau des sols contaminés cultivés portant la fève le haricot et le trèfle par rapport au sol contaminé non cultivé.

Il ressort de ces résultats que le sol contaminé cultivé par la fève présente un pH inférieur par rapport à celui cultivé par le haricot et le trèfle. Cela peut être dû à son système racinaire développé, et à sa résistance aux hydrocarbures.

L'analyse de la variance pour la variable pH du sol contaminé portant la fève, le haricot et le trèfle et du sol contaminé non cultivé, a révélé que les hydrocarbures n'ont pas un effet significative pour cette variable (p-value = 0.8179).

III-1-3-2- Conductivité électrique

La figure 22 représente la conductivité électrique des différents sols.

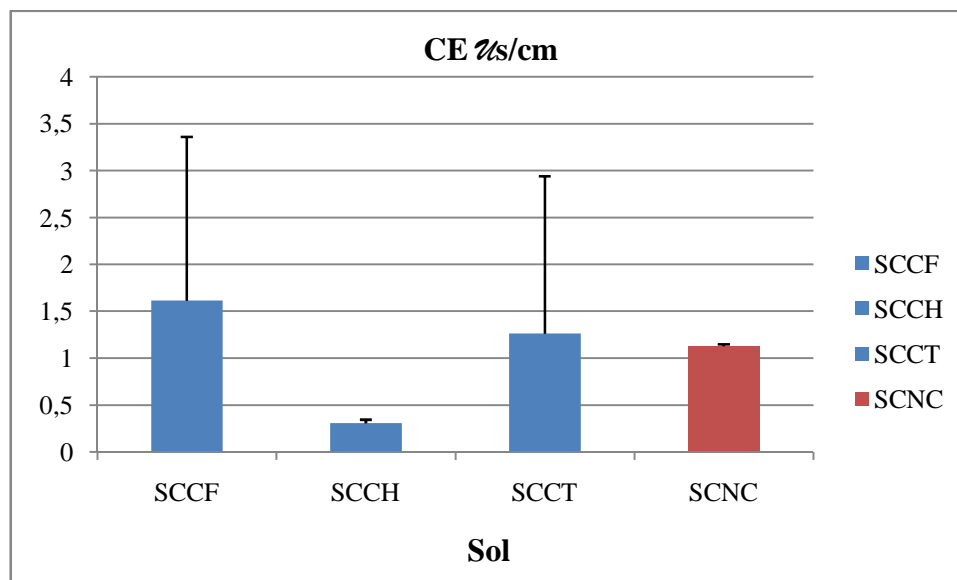


Figure 22 : Valeurs de CE des sols traités.

La conductivité électrique du sol contaminé cultivé par la fève est de 1.61dsm/cm, celle du sol contaminé cultivé par le haricot est de 0.30dms/cm. Le sol contaminé cultivé par le trèfle présente une valeur moyenne de 1.26dsm/cm. La conductivité du sol contaminé non cultivé est de 1,13 µs/cm.

L'analyse de la variance pour la conductivité électrique du sol contaminé portant la fève, le haricot et le trèfle et du sol contaminé non cultivé, a révélé que l'effet lié à la présence des hydrocarbures n'est pas significatif (p-value = 0.6089).

III-1-3-3- Carbone organique

La figure 23 représente les teneurs en carbone organique des différents sols contaminés cultivés par les trois différentes espèces et le sol contaminé non cultivé.

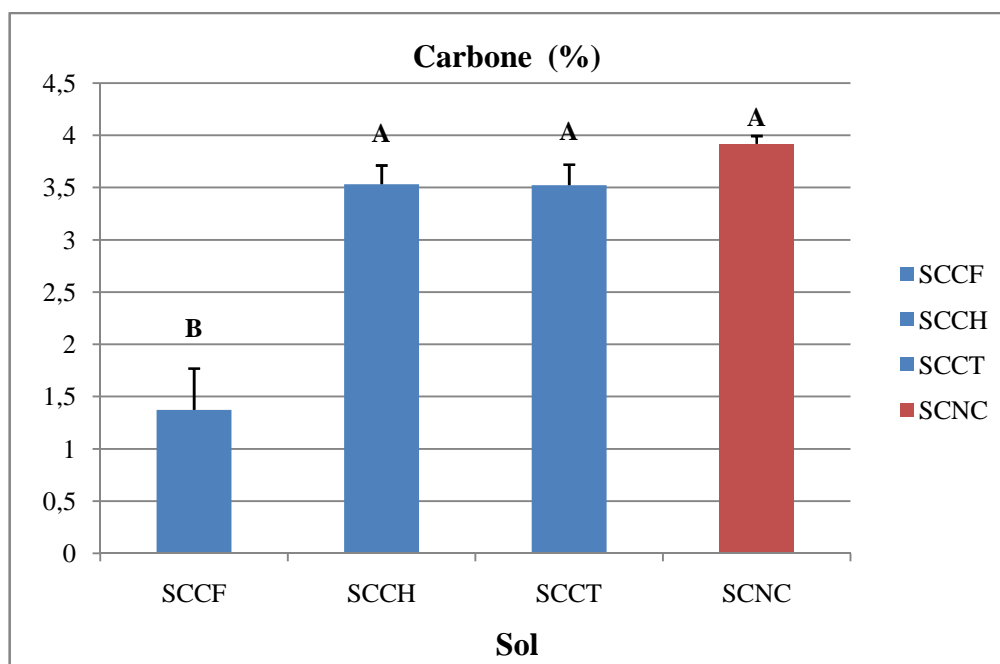


Figure 23 : Teneurs en carbone organique des sols traités.

La teneur en carbone organique du sol contaminé cultivé par la fève est de 1.37%. Le sol contaminé cultivé par le haricot renferme 3.53% de carbone. Le sol cultivé par le trèfle présente, quant à lui, une valeur moyenne de 3,52% et dans le sol contaminé non cultivé elle est de 4%.

La teneur du en carbone organique du sol contaminé non cultivé est supérieure à sa teneur dans les sols contaminés cultivé par les trois espèces.

Les hydrocarbures exercent un effet significatif sur la teneur en carbone ($p\text{-value} = 1.448^{e-005*}$). Les résultats du test de Newman et Keuls concernant le carbone organique du sol contaminé cultivé par les trois espèces et le sol contaminé non cultivé a donné deux groupes homogènes. Le groupe homogène A renferme le sol contaminé non cultivé, le sol contaminé cultivé par le haricot et le sol contaminé cultivé par le trèfle. Le groupe B contient le sol contaminé cultivé par la fève.

III-1-3-4- La teneur en hydrocarbures totaux

La figure 24 représente les teneurs en hydrocarbures des différents sols.

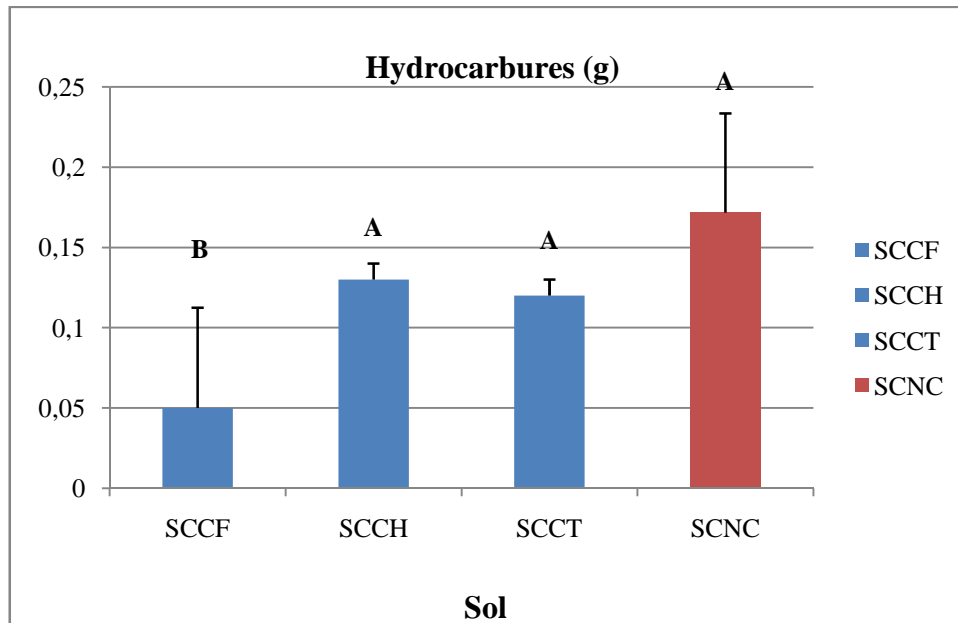


Figure 24 : Teneurs en hydrocarbures des sols traités.

La quantité des hydrocarbures dans le sol contaminé cultivé par la fève est de 0.075g, Le sol contaminé cultivé par le haricot renferme 0.13g d'hydrocarbures et le sol contaminé cultivé par le trèfle présente une valeur moyenne de 0.12g. Dans le sol contaminé non cultivé, nous avons enregistré 0.171g d'hydrocarbures.

D'après nos résultats (figure.24), nous remarquons que la teneur en hydrocarbures totaux dans les sols montre une décroissance dans le sol contaminé cultivé par la fève.

L'analyse de la variance pour la quantité des hydrocarbures du sol contaminé portant la fève, le haricot et le trèfle et du sol contaminé non cultivé, a révélé que l'effet lié à la présence des hydrocarbures dans le sol est hautement significatif (p-value =0.004 **).

Le test de Newman-Keuls au seuil de 5% fait apparaître 2 groupes homogènes dont le sol contaminé cultivé par le haricot, le sol contaminé cultivé par le trèfle et le sol contaminé non cultivé sont classés dans le groupe A. Le groupe B contient le sol contaminé cultivé par la fève.

III-2- Discussion

- D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les hydrocarbures ont un effet dépressif sur le taux de levée dans le sol contaminé peut être en raison des effets toxiques des hydrocarbures sur les propriétés du sol, qui vont se traduire par une inhibition de la germination des graines. Cela peut être dû aussi à l'effet que ces substances peuvent exercer sur les réactions métaboliques se déroulant dans les graines. En effet, Udo et Fayemi (1975) *in* Chaineau et al. (1997) notent que les hydrocarbures peuvent entrer dans la graine, altérer les réactions métaboliques ou bien tuer l'embryon au contact direct. Malgré cette diminution du taux de levée, les trois espèces ont montré une résistance à germer dans un sol fortement pollué par les carburants. En effet, Chaineau et al. (1997) ont montré que la majorité des légumineuses telles que la fève et le haricot ont la capacité de tolérer la pollution par les hydrocarbures.

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

- Nous constatons que la présence des hydrocarbures dans le sol induit une réduction de la croissance racinaire. Ces résultats montrent que le milieu favorable pour la croissance des racines est le sol non contaminé où nous avons remarqué la présence d'un système racinaire très développé avec de nombreuses ramifications tandis que les cultures des sols contaminés comportent une partie racinaire moins développée et moins ramifiée. L'atteinte des racines peut être due au changement des propriétés du sol et/ou à la diminution des éléments nutritifs qui sont essentiels pour leur développement. Chaineau et al. (1997) ont montré que la concentration élevée du pétrole brut a un effet sur la physiologie du végétal. D'après les résultats d'Ait tayeb et Titouche (2011), la teneur du sol contaminé en humidité est beaucoup plus importante dans le sol contaminé par les hydrocarbures par rapport au sol témoin du fait que les hydrocarbures sont des huiles visqueuses qui rendent difficile l'évapotranspiration du sol et augmentent sa rétention en eau. L'augmentation de l'humidité du sol provoque une asphyxie du végétal en remplissant les pores du sol en eau à la place de l'air.

- Il découle de nos résultats que le taux de germination est plus élevé dans le sol contaminé cultivé par la fève par rapport au sol contaminé cultivé par le haricot et le trèfle. Selon Chaineau (1997), la fraction légère des hydrocarbures induit une réduction assez significative de la germination. En outre, la germination est corrélée avec les propriétés hydrophobes des hydrocarbures qui empêchent et réduisent les échanges d'eau et de gaz. Selon Udo et Fayemi (1975) et Chaineau et al., (1997), les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, atteindre et altérer les réactions métaboliques et tuer l'embryon au contact direct.

- La comparaison du pH des sols contaminés cultivés par les trois espèces à celui du sol contaminé non cultivé fait sortir une légère diminution du pH dans ces derniers malgré que l'analyse statistique ne montre pas de différence significative. On peut corrélérer cette diminution à la dégradation des hydrocarbures. Selon Morel (2012), la diminution du pH est due à la dégradation des hydrocarbures, ceci s'explique par les réactions chimiques qui se déroulent dans la rhizosphère, complexes et encore mal connues. Par exemple, le pH du sol est modifié par la présence de racines vivantes. Ce changement dans l'acidité de la rhizosphère contribue à modifier les réactions chimiques (réactions d'échange, d'oxydo-réduction, de complexation, de solubilisation), et, par conséquent, la solubilité des éléments et leurs transferts vers les surfaces des racines. Ces variations de pH dépendent de la plante et de son environnement physico-chimique.

- D'après les résultats que nous avons obtenus, le sol contaminé cultivé par le haricot n'est pas salé, alors que le sol contaminé non cultivé ainsi que les deux sols contaminés cultivés par la fève et le trèfle sont très salés. Donc la conductivité électrique n'a pas été influencée par les hydrocarbures dans le sol contaminé cultivé par le haricot. Selon les travaux de Fayeulle (2013), il y'a une interdépendance complexe entre contamination en hydrocarbures et les teneurs en carbone organique dans les sols, c'est pourquoi la biodégradation des hydrocarbures a influencé la teneur en carbone organique dans le sol contaminé cultivé par la fève, le développement des microorganismes dans les sols est influencé par les ressources en nutriments et particulièrement par les sources de carbone et d'azote qui représentent les principaux constituants des molécules organiques.

- Selon les résultats obtenus, la teneur en hydrocarbures totaux est plus élevée dans le sol contaminé cultivé par les haricots et le sol contaminé non cultivé, ceci est expliqué par la présence des hydrocarbures.

Conclusion

Le but de notre travail consiste à étudier les effets des rejets des hydrocarbures d'une station service sur le sol et le végétal.

Ceci a été mis en évidence par le biais de la phytoremédiation qui est l'un des moyens biologiques qui permettent d'éliminer et/ou atténuer les effets de la contamination par les hydrocarbures en les transformant en formes moins dangereuses ou non dangereuses, tout en limitant l'utilisation excessive de produits chimiques et d'énergies dans les processus de remédiation, en faisant intervenir des espèces végétales.

Quelques paramètres de la végétation ainsi que des propriétés de sols contaminés par les hydrocarbures ont été examinés. Cela a été réalisé en comparant un sol témoin et un sol contaminé par les hydrocarbures, tout en essayant de mettre en évidence la capacité des trois légumineuses (la fève, le haricot et le trèfle) à remédier ce sol contaminé.

D'après les résultats obtenus au cours de notre travail, nous concluons que la fève supporte mieux la contamination par les hydrocarbures contrairement au haricot et au trèfle, dont les taux de levée et la croissance ont été faibles dans le sol cultivé par ces derniers.

A la fin de la culture, nous avons constaté la pourriture de quelques graines et leur mort quelques jours après leurs levées.

Au regard de ces résultats, nous apercevons que la toxicité par les hydrocarbures est différente d'une espèce à l'autre et que la fève a un fort pouvoir de tolérance, d'accumulation et une capacité de dépollution importante, grâce à son système racinaire bien développé par rapport au haricot et au trèfle et que la fève peut être utilisée comme moyen biologique de décontamination des sols pollués par les hydrocarbures.

A l'issue de ce travail et les différents résultats obtenus un ensemble de perspectives peuvent être proposées :

- Réaliser des essais de phytoremédiation sur terrain (in situ)
- La caractérisation des polluants du sol dans les stations-service peut aider à identifier l'origine de ces rejets et à éliminer la source de pollution.
- L'utilisation de plantes légumineuses telles que la fève pour dépolluer des sites qui sont touchés par les hydrocarbures.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

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

Abib L et Ali Ahmed S., 1998. Effet des cinq précédents culturels sur le rendement du blé en relation avec le désherbage chimique et la fertilisation azotée. 89 pp. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

Anonyme, 2014. In *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*; IntechOpen: London, UK, 2014; ISBN 978-953-51-1235-8.

Anonyme, 2018. Magazine 2018 GEO.fr : Hydrocarbure : définition, classification et utilisation.

Anonyme, 2020. Le programme des nations unies pour l'environnement (PNUE). *la pollution des sols un risque pour notre santé et notre sécurité alimentaire*. 04/12/2020, 18/06/2021 <<<https://www.unep.org/fr/actualites-et-recits/recit/la-pollution-des-sols-un-risque-pour-notre-sante-et-notre-securite>, 19/06/2021.

Anonyme, 2021. Organisme des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture. Polluer nos sols c'est polluer notre avenir : 27/04/2018, 01/07/2021.

Ashraf M.A., Maah M.J. et Yuso, I., 2014. Soil contamination, risk assessment and remediation. In *environmental risk assessment of soil contamination*; IntechOpen: London, UK, 2014; chapter 1; pp : 1–56.

Awa S.H et Hadibarata T., 2020. Removal of heavy metals in contaminated soil by phytoremediation mechanism: A review. *Water, Air, Soil Pollut.* 2020, 231, e47.

Ben B.L et Allison T., 2010. Temperature-associated increases in the global soil respiration record *Nature* 464, 579-582, 2010, 6p.

Beranger S., Hube D., Blanc C., Zornig C., Girardeau L., 2010. Quelles techniques pour quels traitements-Analyses coûts-Bénéfices (Rapport final BRGM1RP-58-FR). Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM), 403P.

Borriss R., 2020. Phytostimulation and Biocontrol by the Plant-Associated *Bacillus amyloliquefaciens* FZB42: An Update. In *Phyto-Microbiome in Stress Regulation*; Springer: Singapore, 2020; Volume 1, pp: 1–20.

Références bibliographiques

Bouderhem C.H., 2011. Utilisation de souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodétection et la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Mémoire de Magister de l'université KASDI MERBAH de Ourgla. 91p.

Cadiere F., 2006. *Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation.* Sites et sols pollués. Thèse de doctorat. Angers : sites et sols pollués-direction déchets et sols, février 2006, 92p.

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

Chenu C., Klumpp K., Bispo A., Angers D., Colnenne C. et Metay A., 2014. Stocker du carbone dans les sols agricoles : évaluation de leviers d'action pour la France. *Innov.Agron.* 37, pp : 67-81.

Colin F., 2000. Pollution localisées des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Edition TEC et DOC . 417p.

Colombano S et Saada A et Guerin V et Bataillard P et Bellenfant G et Cristaldi A et Oliveri C.G et Cosentino S.L et Mauromicale G et Copat C et Grasso A et Zuccarello P et Fiore M et Restuccia C Ferrante M ., 2020. Phytoremediation potential of *Arundo donax* (Giant Reed) in contaminated soil by heavy metals. *Environ. Res.*, 185p.

Craswell E.T. et Lefroy R.D.B., 2001. The role and function of organic matter in tropical soil. *Nutr. Cycl. Agrecosystems* 61, pp : 1-5.

CRA-LR, 2011. Les matières organiques du sol. *In : Les produits organiques utilisables En Agriculture En Languedoc-Roussillon- Tome1*, pp : 17-88.

DELAGE P. et SCHREFLER B., 2005. Géomécanique environnementale : sols pollués et déchets. Lavoisier. 249p .

Doumont D et Libion F., 2006. Impact sur la santé des différents polluants : quels effets à court, moyen et long terme ? n°06-38, pp : 10-30.

Références bibliographiques

Dubey B.L. et Dwividi P., 1988. Projective value of somatic Inkb lot – series II in casestammering. *Journal of personality and clinical studies*. 8, pp :173-176.

Duchaufour P., 1997. Abrégé de pédologie : sol, végétation, environnement (éd. 5e). Paris : Masson.

Fattal P., 2008. Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Rennes. 398P.

Favas P.J.C et Pratas J et Varun M et D’Souza R et Paul M.S., 2014. Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: Potential of native flora.

Fayeulle A., 2013. Etude des mécanismes intervenant dans la biodégradation des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques par les champignons saprotrophes telluriques en vue d’applications en bioremédiation fongique de sols pollués. Thèse de doctorat , Ecole de doctorat 104 Science de la matière,du Rayonnement et de l’environnement ,204 p.

Fokou Mbogne P.M., 2017. Bioremédiation augmenté des sols contaminés aux hydrocarbures lourd par ajout de substrat organique. Mémoire de master .génie de l’environnement .université de Québec, 109 p.

Gobat J.M et Aragno M et Matthey W., 2013 . *Le sol vivant. Bases de pédologie. Biologie des sols. Troisième édition*, Lausanne, Presses_Polytechniques_et_Universitaires Romandes, 15 octobre 2013, 848p.

Koller E., 2004. Traitement des pollutions industrielles (éd. 2e). Paris : Dunod, 569p.

Koller E., 2009. Traitements des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues. Edition Dunod, Paris. 569p.

Le corfec Y., 2011. *Sites et sols pollués. Séries01*. Dunod. France. 424p.

Mathieu C et Pieltain, F., 1998. Analyse physique des sols. Paris : Tec&Doc, 292p.

Mathieu C et Pieltain, F., 2003. Analyse chimique des sols. Paris : Tec&Doc, 265p.

Références bibliographiques

- Mathon C.C., 1985.** Liste de plantes utiles avec indication de leur aire probable de primo domestication. Faculté des sciences de l'Université de Poitier. 17p.
- Morel J.L. , 2014.** Médiachimie.*phytoremédiation des sols contaminés*. Séries01. Sauramps medical. France. 82p.
- Mueller B., 2014.** *Create a better world*. England. PSE publishing. 142p.
- Park S et Kim K.S et Kim J.T et Kang D Sung, K. E., 2011.** Ects of humic acid on phytodegradation of petroleum hydrocarbons in soil simultaneously contaminated with heavy metals. J. Environ. SCI. pp : 2034–2041.
- Perrier S. , 2015.***Chapitre 4 : structure et fonctionnement des écosystèmes*.
- Picot A et Montando F., 2013.** *Ecotoxicochimie appliquée aux hydrocarbures*. Paris. Tec et doc. 668p
- Shackira A.M et Puthur J.T., 2019.** *Phytostabilization of Heavy Metals: Understanding of Principles and Practices In Plant-Metal Interactions*. Springer International Publishing: Cham, Switzerland, pp: 263–282.
- Sidhu G.P.S et Bali A.S et Singh H.P et Batish D.R et Kohli, R.K., 2018.** Ethylenediamine disuccinic acid enhanced Phytoextraction of nickel from contaminated soils using *Coronopus didymus* (L.) Sm. Chemosphere, pp: 234–243.
- Schrefler B et Delage P., 2005.** Géomecanique Environmental sols pollués et déchets.248p.
- Soltani M., 2004.** Distribution liquide et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat de l'université paris 6, spécialité chimie analytique. 284P.
- Stanton W.R., 1970.** Les légumineuses à graines en Afrique. Ed. Lavoisier. 453p.

Références bibliographiques

Trigalet S., Chartin C., Kruger I., Carnol M., Oost K. Van ET Van Wesemael B., 2017. Soil organique carbon fractionation for improving agricultural soil quality assessment - a case study in Southern Belgium (Wallonia). *Biotechnol. Agron. Soc. Env.* 21 (33), pp : 191-200.

Zerrouki R., 2013. Phytotoxicité des hydrocarbures vis-à-vis de luzerne, pois et de la féve. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie .UMMTO. 56P.

Autres références

The Interstate Technology and Regulatory Cooperation Work Group Phytoremediation Work Team: Phytoremediation Decision Tree. 1999. Available online: <https://clu-in.org/download/partner/phytotree.pdf> (Accessed on 5 September 2020).

Annexes

Annexes

Annexe I : Résultats de mesure

Tableau I : Résultats des analyses pédologiques (granulométrie en %) effectuées à BNEDER :

Granulométrie (%)	Résultats
Argile	19.03
Limon fin	21.22
Limon grossier	10.03
Sable fin	18.13
sable grossier	31.59

Tableau II: Normes d'interprétation du pH du sol selon le laboratoire agronomique d'INRF à Bainem :

Valeur de pH	Statut Acido-basique
$\text{pH} \leq 5.5$	Sol très acide
Basique $5,5 < \text{pH} \leq 6,0$	Sol acide
$6,0 < \text{pH} \leq 6,5$	Sol peu acide
$6,5 < \text{pH} \leq 7,0$	Sol neutre
$7,0 < \text{pH} \leq 7,5$	Sol peu alcalin (peu basique)
$\text{pH} > 7,5$	Sol alcalin (basique)

Tableau III : Normes d'interprétation de la conductivité électrique selon le laboratoire agronomique d'INRF à Bainem :

CE en $\mu\text{s/cm}$.	Qualité des sols
0 à 500	Non salé
500 à 1000	Légèrement salé
1000 à 2000	Salé
2000 à 4000	Très salé
Plus de 4000	Extrêmement salé

Annexes

Annexe II : Résultats des analyses statistiques

Tableau I : Analyse de la variance pour le taux de levé des trois espèces cultivé dans les sols contaminés et témoins.

	DDL	S.C.E	CM	F	P
Sol	1	17422.2	17422.2	118.339	1.432 ^{e-07***}
espèce	2	1186.1	593.1	4.028	0.0458 *
Sol : espèce	2	202.8	101.4	0.688	0.521
Résiduels	12	1766.7	147.2		
Total	17	20577.8	18263.9		

Tableau II : Groupes homogènes du taux de levé dans les deux sols déterminés par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Sol non contaminé	77.222	A
2	Sol contaminé	15.000	B

Tableau III : Groupes homogènes du taux de levé des trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	57.500	A
2	Haricot	41.666	
3	Trèfle	39.166	

Tableau IV : Groupes homogènes de la biomasse aérienne des trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	Fève	1.330	A
2	Haricot	0.185	B
3	Trèfle	0.050	

Annexes

Tableau V : Groupes homogènes de la biomasse aérienne pour l'interaction sol : espèce déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	Sol non contaminé cultivé fève	2.183	A
2	Sol contaminé cultivé fève	0.476	B
3	Sol non contaminé cultivé Haricot	0.250	
4	Sol contaminé Haricot	0.120	
5	Sol non contaminé trèfle	0.073	
6	Sol contaminé trèfle	0.026	

Tableau VI : Groupes homogènes de la biomasse racinaire des trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	Fève	0.745	A
2	Haricot	0.171	B
3	Trèfle	0.045	

Tableau VII : Groupes homogènes de la biomasse racinaire pour l'interaction sol : espèce déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	Sol non contaminé cultivé Fève	1.150	A
2	Sol contaminé cultivé Fève	0.340	B
3	Sol non contaminé cultivé Haricot	0.193	
4	Sol contaminé cultivé Haricot	0.150	
5	Sol non contaminé cultivé Trèfle	0.073	
6	Sol contaminé cultivé Trèfle	0.016	

Annexes

Tableau VIII : Groupes homogènes de la longueur de la racine principale des trois différentes espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	Fève	4.763	A
2	Haricot	4.630	
3	Trèfle	1.775	B

Tableau IX : Groupes homogènes de la longueur de la racine principale pour l'interaction sol : espèce déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	SNCH	6.193	A
2	SNCF	5.360	
3	SCCF	4.166	AB
4	SCCH	3.066	BC
5	SNCT	1.818	C
6	SCCT	1.733	

Tableau X : Analyses de la variance pour le Taux de germination du blé cultivé dans le sol contaminé non cultivé et le sol contaminé cultivé par les trois espèces et le sol non contaminé cultivé par les trois différentes espèces.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : Sols	3	4566.7	1522.2	5.5354	0.023 *
Résiduelle	8	2200.0	275.0		
Total	20	13923.8	4635.08		

Annexes

Tableau XI : Groupes homogènes du taux de germination du blé cultivé dans le sol contaminé non cultivé et le sol contaminé cultivé par les trois espèces et le sol non contaminé cultivé par les trois différentes espèces.

Cellules	Libellées	Moyennes	Groupes
1	SCCF	76.667	A
2	SCCH	60.000	AB
3	SCCT	46.666	
4	SCNC	23.333	B

Tableau XII : Analyses de la variance pour le pH de sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : Sols	3	0.014	0.004	0.3098	0.8179
Résiduelle	8	0.124	0.015		
Total	11	0.138	0.019		

Tableau XIII : Analyse de la variance pour la conductivité électrique du sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : Sols	3	2.969	0.989	0.6426	0.6089
Résiduelle	8	12.321	1.540		
Total	11	15.29	2.529		

Annexes

Tableau XIV : Analyse de la variance pour le carbone organique du sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : Sols	3	11.553	3.851	51.205	1.448 ^{e-005} *
Résiduelle	8	0.601	0.075		
Total	11	12.134	3.926		

Tableau XV : Groupes homogènes de la conductivité électrique du sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Sol contaminé non cultivé	3.813	A
2	Sol contaminé cultivé par le Haricot	3.533	
3	Sol contaminé cultivé par le Trèfle	3.523	
4	Sol contaminé cultivé par la Fève	1.373	B

Tableau XVI : Analyse de la variance pour la quantité des hydrocarbures du sol contaminé non cultivé et le sol contaminé cultivé par les trois espèces.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : Sols	3	0.033	0.011	9.652	0.004 **
Résiduelle	8	0.009	0.001		
Total	11	0.042	0.012		

Annexes

Tableau XVII : Groupes homogènes de la quantité des hydrocarbures du sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Sol contaminé non cultivé	0.171	A
2	Sol contaminé cultivé par les Haricots	0.130	
3	Sol contaminé cultivé par le Trèfle	0.120	
4	Sol contaminé cultivé par la Fève	0.026	B

Résumé :

L'objectif de notre travail est de tenter une dépollution d'un sol contaminé par les rejets d'une station service par le biais d'une phytoremédiation en utilisant la fève, le haricot et le trèfle. Après la phytoremédiation, nous avons réalisé un test de germination en utilisant le blé afin de vérifier l'efficacité de notre technique.

Les résultats obtenus ont montré que la fève et le haricot ont pu résister à la toxicité des hydrocarbures en présentant un taux de levé assez important dans les sols pollués. La fève est considérée donc comme une plante polluo-résistante et que l'essai de phytoremédiation, avec cette espèce, se révèle très efficace pour dépolluer l'environnement contaminé aux hydrocarbures.

Abstract:

The objective of our work is to attempt to clean up soil contaminated by discharges from a service station through phytoremediation using broad beans, beans and clover. After phytoremediation, we performed a germination test using wheat to verify the effectiveness of our technique.

The results obtained showed that the broad bean and the bean were able to resist the toxicity of hydrocarbons by showing a fairly high lifting rate in polluted soils, therefore the bean is considered to be a pollu-resistant plant and that the phytoremediation test with this species proves to be very effective in cleaning up the environment contaminated with hydrocarbons.