

*REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE*

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université Mouloud MAMMARI de Tizi Ouzou**

Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques

Département de Biologie Animale et végétale



# *Mémoire de fin d'étude*

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en Biologie

Option : Protection de l'environnement

*Thème :*

***Essai de phytoremediation in-situ et ex-situ d'un sol pollué par les hydrocarbures.  
Cas des stations services.***

Présenté par :

M<sup>elle</sup> BOURKACHE R.

M<sup>r</sup> BOUSSENOU N.

Soutenu le 07/07/2015 devant le jury :

Présidente : M<sup>me</sup> SADOUDI D.

Professeur à l'UMMTO

Promotrice: M<sup>elle</sup> ALI AHMED S.

M.A.A à l'UMMTO

Examineurs: M<sup>me</sup> CHIBANE G.

Doctorante à l'UMMTO

M<sup>elle</sup> HANNACHI L.

M.C.A à l'UMMTO

# Remerciements

*Cette étude est réalisée au laboratoire de pathologie des écosystèmes de la faculté des Sciences Biologie et de Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou, sous l'égide de Mademoiselle ALI AHMED S.*

*Avant tous nous tenons à remercier le bon DIEU tout puissant de nous avoir donné santé, patience et courage pour mener à terme ce modeste travail.*

*Nous remercions vivement notre promotrice, Mademoiselle ALI AHMED S. de l'aide et du soutien qu'elle nous a apporté pour la réalisation de ce travail, nous saluons sa disponibilité, ses conseils à la fois éveilleurs et formateurs.*

*Nous tenons à remercier la contribution de l'ensemble des membres de jury représenté par :*

*-Mme SADOUDI D., Professeur à F.S.B.S.A pour nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*-Mme CHIBANE ., Doctorante à F.S.B.S.A pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*-Melle HANNACHI ., Maître Assistante à F.S.B.S.A pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.*

*Nous remercions aussi les ingénieurs des laboratoires communs de la faculté des sciences biologiques et sciences agronomiques pour leur disponibilité et de nous avoir facilité la tâche afin de réaliser nos analyses.*

*Nos remerciements s'adressent aussi à Monsieur AIT BEN AMARA Y. propriétaire de la station service Ait Ben Amara de Boukhalfa pour nous avoir laissé mener notre expérimentation au sein de son établissement.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail. Et nous remercions tous nos camarades de la promotion Master 2 protection de l'environnement et la promotion 5<sup>ème</sup> année écologie végétale et environnement des moments de convivialité qu'on a passé ensemble durant toute une année.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leurs soutiens moral et matériel tout au long de mes études, que Dieu les protège et leur accorde une longue vie pleine de bonheur et de santé.*

*A toute ma famille.*

*A RANA.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui me sont très chers et qui me portent dans leurs cœurs.*

*Spécialement au groupe infrarouge. Les Boualam, Bachir, Boussad, Bahia et Baya.*

*Nour B.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leur aide et leur soutien tout au long de mes études, que Dieu les protège et leur accorde une longue vie pleine de bonheur et de santé.*

*À mon très cher frère.*

*À mes très chères sœurs et tantes.*

*À tous mes amis(es)*

*À toute la promotion de protection de l'environnement.*

*Rezika B.*

## Sommaire

**Remerciements.**

**Dédicaces.**

**Liste des abréviations.**

**Liste des figures.**

**Liste des tableaux.**

**Introduction générale..... 1**

### *Chapitre I : Synthèse bibliographique*

|   |    |
|---|----|
| I-Pollution du sol par les hydrocarbures .....              | 3  |
| II-Généralités sur les hydrocarbures .....                  | 3  |
| II-1-Classification des hydrocarbures.....                  | 3  |
| II-1-1-les hydrocarbures aromatiques.....                   | 3  |
| II-1-2-Les hydrocarbures aliphatiques.....                  | 3  |
| II-1-3-Les hydrocarbures cycliques.....                     | 4  |
| II-2-Propriétés des hydrocarbures .....                     | 4  |
| II-3-Sources de pollution du sol par les hydrocarbures..... | 5  |
| II-4-Devenir des hydrocarbures dans le sol.....             | 6  |
| II-5-Effets de la pollution par les hydrocarbures.....      | 8  |
| II-5-1-Action sur les propriétés physiques du sol.....      | 8  |
| II-5-2- Action sur les propriétés chimiques du sol .....    | 8  |
| II-5-3- Action sur la flore .....                           | 8  |
| II-5-4-Action sur la microflore .....                       | 8  |
| II-5-5- Action sur l'homme .....                            | 9  |
| III-Procédés de décontamination.....                        | 9  |
| III-1-Traitements physiques .....                           | 9  |
| III-2-Traitements chimiques .....                           | 9  |
| III-3-Traitements thermiques.....                           | 9  |
| III-4-Traitements biologiques.....                          | 10 |
| IV-Phytoremediation .....                                   | 10 |
| IV-1-Principe .....   | 11 |
| IV-2-Différents mécanismes de phytoremediation .....        | 11 |
| IV-2-1-Phytoextraction.....                                 | 11 |
| IV-2-2-Phytostabilisation .....                             | 11 |
| IV-2-3-Phytodégradation.....                                | 12 |
| IV-2-4-Phytovolatilisation.....                             | 12 |

---

---

## *Chapitre II : Matériel et méthodes*

|   |    |
|---|----|
| I-Présentation du site d'étude .....  | 14 |
| I-1-Les données climatiques de la station .....                             | 14 |
| I-2-Synthèse climatique .....   | 15 |
| I-2-1-Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен .....                 | 15 |
| I-2-2-Détermination du bioclimat de la station d'étude .....                | 15 |
| I-2-3-Température.....  | 16 |
| I-2-4-Pluviométrie .....  | 17 |
| II-Matériel .....   | 17 |
| II-1-Sol .....  | 17 |
| II-2- Matériel végétal.....   | 18 |
| II-2-1- La fève.....  | 18 |
| II-2-2- La luzerne.....   | 18 |
| II-2-3- Le maïs .....   | 19 |
| II-2-4- Le blé.....   | 20 |
| III-Méthodes.....   | 20 |
| III-1-Dispositif expérimental.....  | 20 |
| III-1-1-Dispositif expérimental au laboratoire.....                         | 20 |
| III-1-2-Dispositif expérimental sur le terrain .....                        | 21 |
| III-2- Evaluation de l'effet des hydrocarbures sur les plantes.....         | 22 |
| III-2-1-Taux de levée .....   | 22 |
| III-2-2-Hauteur des plantes.....  | 22 |
| III-2-3- Biomasse aérienne .....  | 22 |
| III-2-4-Biomasse racinaire.....   | 22 |
| III-2-5-Volume racinaire .....  | 22 |
| III-3-Réalisations des bio-essais.....                                      | 22 |
| III-3-1-Test de germination .....   | 22 |
| III-3-2-Test de la longueur racinaire.....                                  | 23 |
| III-4-Effet des hydrocarbures sur quelques propriétés chimiques du sol..... | 23 |
| III-4-1-Potentiel d'Hydrogène (pH) .....                                    | 23 |
| III-4-2-Conductivité électrique.....  | 23 |
| III-4-3-Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR) .....                   | 23 |
| III-5-Méthode d'analyse statistique.....                                    | 24 |

---

---

## *Chapitre III : Résultats et discussion*

|   |           |
|---|-----------|
| I-Résultats   | 24        |
| I-1-Effets des hydrocarbures sur le végétal .....                     | 25        |
| I-1-1-Taux de levée.....  | 25        |
| I-1-2-Hauteur des plants .....  | 26        |
| I-1-3-Biomasse aérienne .....   | 27        |
| I-1-4-Biomasse racinaire .....  | 28        |
| I-1-5-Volume racinaire .....  | 29        |
| I-2-Bio-essais.....   | 30        |
| I-2-1-Test de germination .....                                       | 30        |
| I-2-2-Test de la longueur racinaire .....                             | 31        |
| I-3-Effet des hydrocarbures sur les propriétés chimiques du sol ..... | 32        |
| I-3-1-Potentiel d'Hydrogène (pH) .....                                | 32        |
| I-3-2-Conductivité électrique (CE).....                               | 33        |
| I-3-3-Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR) .....               | 35        |
| II-Discussion .....   | 36        |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                      | <b>39</b> |
| <b>Références bibliographiques</b>                                    |           |
| <b>Annexes</b>  |           |
| <b>Résumé</b>   |           |

## *Liste des abréviations*

**BTEX** : Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylènes.

**CE** : Conductivité électrique.

**FTIR** : spectroscopie Infra Rouge à Transformée de Fourier.

**INRF** : Institut National de la Recherche Forestière.

**KBr** : Bromate de potassium.

**KPa** : Kilo Pascal.

**ONM** : Office National de Météorologie.

**PCE** : Perchloréthylène.

**pH** : Potentiel d'Hydrogène.

**Pv** : Tension de vapeur.

**TCA** : Acide Trichloracétique.

**TCE** : Trichloréthylène.

**ITMAS** : Institut Technologique Moyen d'Agronomie.

---

*Listes des figures*

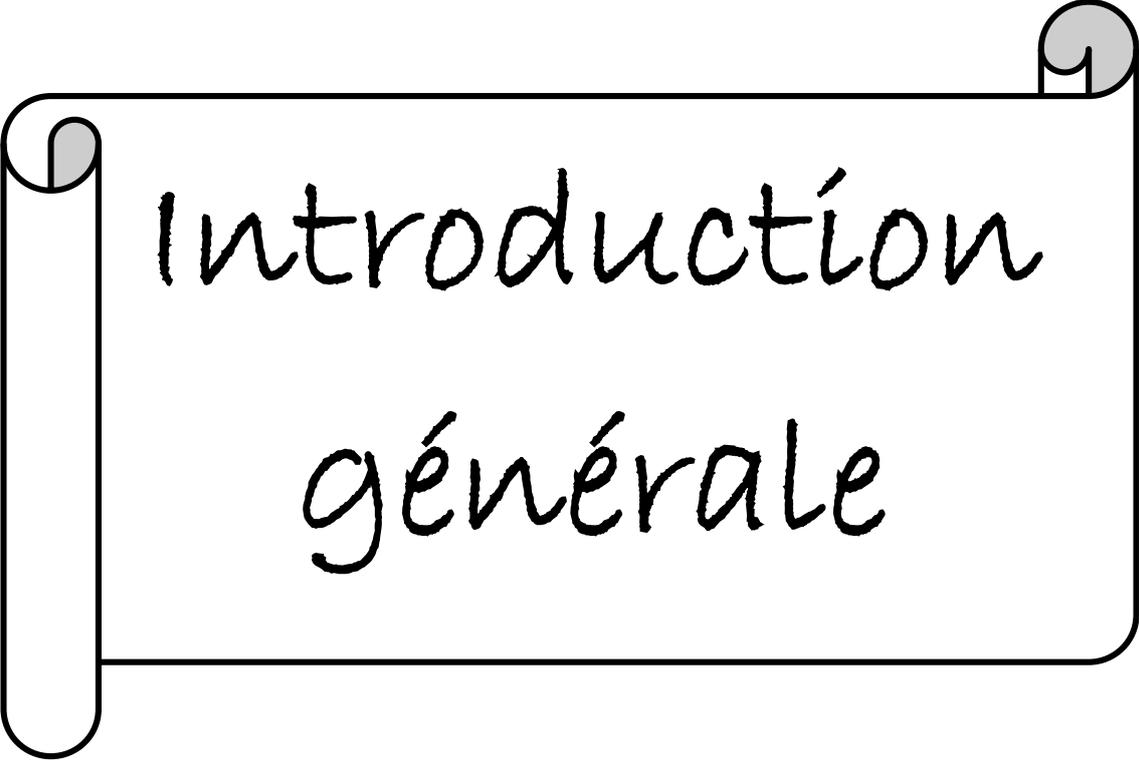
|  |    |
|--|----|
| <b>Figure 01:</b> photos satellitaire de la station service de Boukhalfa.....  | 14 |
| <b>Figure 02 :</b> Diagramme Ombrothermique de Bagnoul et Gausсен pour la station de Boukhalfa (2004-2014).....        | 15 |
| <b>Figure 03 :</b> Climagramme d'Emberger pour la commune de Tizi Ouzou.....   | 16 |
| <b>Figure 04 :</b> Températures moyennes de la région Boukhalfa durant la période d'étude .....                        | 16 |
| <b>Figure 05 :</b> dispositif expérimental au laboratoire.....   | 21 |
| <b>Figure 06 :</b> dispositif expérimental sur le terrain .....  | 21 |
| <b>Figure 07 :</b> Taux de levée des différentes espèces cultivées au laboratoire et sur le terrain .....              | 25 |
| <b>Figure 08 :</b> Hauteur des plants de différentes espèces végétales cultivées au laboratoire et sur le terrain..... | 26 |
| <b>Figure 09 :</b> Biomasse aérienne des plantes cultivées sur le terrain et au laboratoire .....                      | 27 |
| <b>Figure 10:</b> Biomasse racinaire des plantes cultivées au laboratoire et sur le terrain.....                       | 28 |
| <b>Figure 11:</b> volume racinaire des plantes cultivées sur le terrain et au laboratoire .....                        | 29 |
| <b>Figure 12 :</b> Taux de germination du blé dur dans les différents échantillons du sol.....                         | 30 |
| <b>Figure 13:</b> Longueur racinaire du blé dur dans le sol témoin et le sol cultivé par les différentes espèces.....  | 31 |
| <b>Figure 14:</b> pH du sol témoin et du sol cultivé par les différentes espèces .....                                 | 32 |
| <b>Figure 15:</b> Conductivité du sol témoin et du sol cultivé par les différentes espèces.....                        | 34 |
| <b>Figure 16:</b> Spectre FTIR du sol cultivé par la fève et du sol témoin (Laboratoire) .....                         | 35 |
| <b>Figure 17:</b> Spectre FTIR du sol cultivé par la fève et du sol témoin (Terrain) .....                             | 36 |

---

---

*Liste des tableaux*

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau I :</b> Typologie simplifiée des principaux agents de contamination .....                             | 6  |
| <b>Tableau II:</b> les caractéristiques chimiques du sol utilisé .....   | 16 |
| <b>Tableau III :</b> Résultats du test de Student pour le taux de levée .....                                    | 24 |
| <b>Tableau IV :</b> Résultats du test de Student pour la hauteur des plants.....                                 | 25 |
| <b>Tableau V :</b> Résultats du test de Student à un échantillon pour la biomasse aérienne .....                 | 26 |
| <b>Tableau VI :</b> Résultats du test de Student à un échantillon pour la biomasse racinaire .....               | 27 |
| <b>Tableau VII :</b> Résultats du test de Student pour le volume racinaire .....                                 | 28 |
| <b>Tableau VIII:</b> Analyse de la variance pour le taux de germination du blé dur .....                         | 29 |
| <b>Tableau IX :</b> Test de Newman et Keuls pour le taux de germination au laboratoire .....                     | 30 |
| <b>Tableau X :</b> Test de Newman et Keuls pour le taux de germination sur le terrain.....                       | 30 |
| <b>Tableau XI :</b> Analyse de la variance pour la longueur racinaire du blé dur .....                           | 31 |
| <b>Tableau XII :</b> Test de Newman et Keuls pour la longueur racinaire au laboratoire.....                      | 31 |
| <b>Tableau XIII :</b> Test de Newman et Keuls pour la longueur racinaire sur le terrain .....                    | 31 |
| <b>Tableau XIV :</b> Analyse de la variance pour les valeurs du pH.....  | 32 |
| <b>Tableau XV:</b> Test de Newman et Keuls pour les valeurs pH au laboratoire .....                              | 32 |
| <b>Tableau XVI:</b> Test de Newman et Keuls pour les valeurs pH sur le terrain .....                             | 32 |
| <b>Tableau XVII:</b> Analyse de la variance pour Les valeurs de la conductivité électrique.....                  | 33 |
| <b>Tableau XVIII:</b> Test de Newman et Keuls pour les valeurs de la conductivité électrique au laboratoire..... | 33 |
| <b>Tableau XIX:</b> Test de Newman et Keuls pour les valeurs de la conductivité électrique sur le terrain .....  | 34 |



Introduction  
générale

Depuis le siècle dernier et jusqu'à nos jours, l'importance de l'industrie pétrolière n'a cessé de croître et ceci grâce au rôle stratégique et politique que le pétrole joue sur la scène mondiale (Soltani, 2004).

L'Algérie est l'un des grands pays producteur de sources énergétiques fossiles (gaz et pétrole), l'exploitation de gisement du pétrole ne cesse d'augmenter d'une année à une autre. L'extraction, le transport et l'utilisation de cette source d'énergie entraînent des risques de pollution (accidentelle et/ou chronique) autour de toute installation (puits, raffinerie et stations-service). Ces dernières représentent une large proportion parmi les sources de pollution des sols qui est due au déversement des hydrocarbures lors du remplissage des cuves de la station et lors de la distribution des carburants.

D'après les données fournies par l'agence NAFTAL de Tizi Ouzou (2014), quatre vingt trois stations service sont implantées dans la wilaya, sept sont en cours de réalisation et quatorze en projet.

La pollution par les hydrocarbures occupe au sein des préoccupations environnementales une place particulière, qui est due à leur rémanence et leur toxicité. Cette pollution est susceptible d'une bioaccumulation dans les chaînes alimentaires, en présentant des toxicités pour le végétal, l'animal et des risques pour la santé humaine. La prise de conscience de ces risques conduit à la nécessité d'établir des diagnostics de pollution et de mettre en œuvre des moyens de remédiation (Lecomte, 1998).

Les procédés de décontamination faisant appel à différents techniques (thermiques, physiques et chimiques) ont été largement pratiqués. Cependant, les coûts engendrés par l'emploi de ces technologies ne répondent pas à un processus économiquement viable. Contrairement aux méthodes biologiques qui sont largement développées ces dernières années et sont moins chères et plus respectueuses de l'environnement, car elles permettent de sauvegarder les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et elles s'adressent à un grand nombre de polluants organiques et inorganiques (Koller, 2004).

La biodégradation par les plantes est un processus naturel important dans la dépollution, ce qui a été préconisé par plusieurs auteurs dont Chaineau (1997) et Duchauffour (2001).

Les travaux réalisés par Moula et Mahlal (2011) et ceux de Zerrouki et Ouhadda (2013) sur la phytoremediation des sols pollués aux hydrocarbures ont donné des résultats assez satisfaisants, mais il reste à tester l'efficacité de ces méthodes dans les conditions de terrain (*In-situ*).

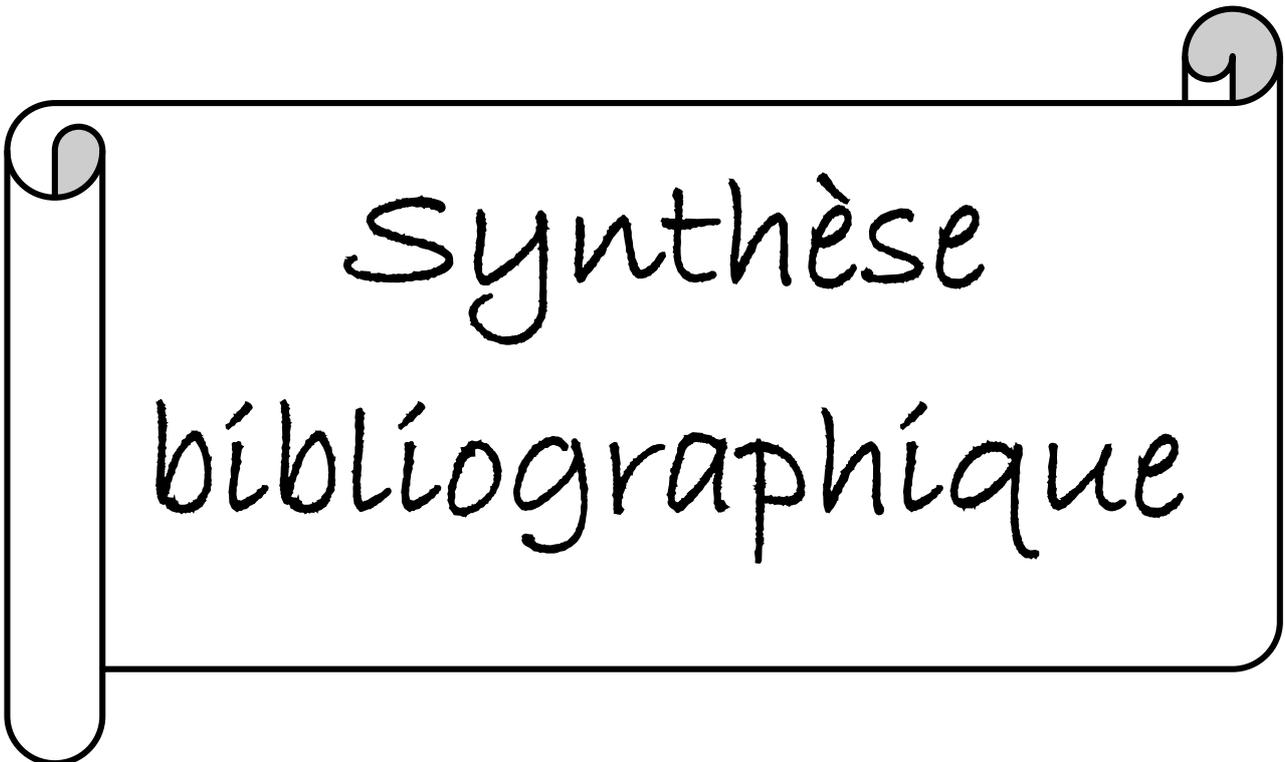
C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude dont l'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de trois espèces végétales à savoir la fève (*Vicia faba* L.), la luzerne (*Medicago sativa* L.) et le maïs (*Zea mays* L.) à remédier un sol pollué par les hydrocarbures. Ce travail a également pour but de comparer l'effet de la phytoremediation au laboratoire (*ex situ*) et sur le terrain (*in situ*) dans une station service sise à Boukhalfa. Et enfin, pour tester l'efficacité de la phytoremediation nous avons eu recours à l'utilisation d'une autre espèce végétale qui est le blé dur (*Triticum durum* L.) lors de deux bio-essais.

Ce travail comprend trois chapitres ; le premier consiste en un rappel bibliographique portant sur la pollution des sols par les hydrocarbures, leur classification, leur comportement dans le sol, leurs effets à différentes échelles, ainsi que les méthodes de décontamination.

Le deuxième chapitre présente l'ensemble du matériel utilisé ainsi que les méthodes adoptées pour évaluer l'effet des hydrocarbures sur les plantes et sur quelques propriétés du sol. Elle comporte aussi la présentation du site d'étude.

Dans le troisième chapitre seront exposés les résultats obtenus au cours de notre expérience et leur discussion.

Une conclusion générale termine ce travail, et donne quelques perspectives de recherche.



Synthèse  
bibliographique

## **I-Pollution du sol par les hydrocarbures**

La dégradation du sol peut être considérée comme une accumulation de plusieurs effets provoqués par les polluants anthropologiques sur les diverses transformations physiques, chimiques et biologiques se déroulant dans le sol. La tendance à la dégradation dépend de la résistance du sol, aussi bien que du type, de la qualité, de la longévité et de la bio-réactivité des polluants en question.

On peut considérer qu'il ya pollution par les hydrocarbures lorsque l'action de ceux-ci peut être considérée comme néfaste sur l'environnement.

Ces contaminants environnementaux constituent une classe de produits chimiques organiques dangereux, et lorsqu'ils sont du type essence ou solvants, peuvent engendrer des risques d'explosion ou d'incendie en cas d'accumulation. Comparativement à d'autres hydrocarbures, ces composés sont assez biodégradables à l'exception toute fois de certain d'entre eux (BTEX par exemple) qui peuvent se révéler toxiques pour la microflore autochtone (Koller, 2004).

## **II-Généralités sur les hydrocarbures**

D'après Koller (2004), les hydrocarbures constituent une ressource énergétique essentielle pour l'économie depuis la révolution industrielle. Il s'agit de ressources non renouvelables et considérées comme des polluants organiques majoritaires des sols, du fait de leur utilisation massive depuis une cinquantaine d'années.

Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués exclusivement d'atomes de carbone et d'hydrogène, leur formule brute est donc de la forme  $C_nH_m$  (Girard et *al.*, 2005). Ils peuvent être soit saturés lorsque la chaîne de carbone possède uniquement des liaisons simples ou insaturés lorsque la chaîne de carbone contient au moins une liaison double ou triple. Ils peuvent également avoir, soit un enchaînement linéaire, ramifié ou cyclique (Origo et *al.*, 2012).

### **II-1-Classification des hydrocarbures**

Les pétroles bruts sont constitués de différentes familles de composés dont la composition chimique varie énormément selon leur origine géographique et géologique (Tissot et Welte, 1984).

#### **II-1-1-les hydrocarbures aromatiques**

Ce sont des produits pétroliers spécifiques. Ils regroupent tous les composés renfermant un ou plusieurs cycles benzéniques (Ouahabi, 2012).

#### **II-1-2-Les hydrocarbures aliphatiques**

Ce sont des molécules linéaires ou ramifiés à longue chaîne, saturés (alcane) ou insaturés (alcènes ou alcynes), et substitués ou non (Arnaud, 2004).

### II-1-3-Les hydrocarbures cycliques

Ce sont des hydrocarbures dont la chaîne carbonée est cyclique et constituent les cycloalcanes (saturés), les cycloalcènes et les cycloalcynes (insaturés). Il existe une très grande diversité des structures cycliques (Arnaud, 2004).

### II-2-Propriétés des hydrocarbures

Selon la pollution puis la planification de l'intervention, il est recommandé de connaître les propriétés physico-chimiques des hydrocarbures déversés, à savoir leur densité, leur viscosité, les points d'écoulement, d'éclair et d'ébullition et la tension superficielle (Fattal, 2008).

#### ❖ Densité

Elle conditionne le comportement du produit en phase par rapport à l'eau de la nappe : plus dense que l'eau, il est susceptible de s'accumuler au contact du substratum de l'aquifère, et moins dense que l'eau, il peut former une galette flottant sur l'aquifère (Colin, 2000).

#### ❖ Viscosité

Elle influe directement sur la perméabilité (au sens darcy) du matériau poreux au produit pur et régit donc son écoulement en phase à travers les zones non saturées et saturées. Elle participe, avec la force de capacité et de gravité, à la structure du corps d'imprégnation du produit dans la zone non saturée (étalée pour un produit visqueux ou, au contraire sub-verticale pour un produit fluide) et aux conditions d'écoulement du produit pur en phase au toit de l'aquifère (Colin, 2000).

#### ❖ Solubilité dans l'eau

Elle détermine l'existence, l'extension et la composition des panaches de contamination dissoute (Colin, 2000).

#### ❖ Volatilité

Elle conditionne la répartition du produit entre une phase gazeuse et une phase liquide. Selon Colin (2000), elle est appréciée par trois paramètres :

- Le point d'ébullition.
- La tension de vapeur  $P_v$  : la frontière entre un composé volatil et un composé non volatil peut être établie de la façon suivante :

|                                  |                               |
|----------------------------------|-------------------------------|
| -composé très volatil            | $P_v > 1.5 \text{ KPa}$       |
| -composé volatil                 | $0.5 < P_v < 1.5 \text{ KPa}$ |
| -composé peu volatil             | $0.1 < P_v < 0.5 \text{ KPa}$ |
| -composé peu ou très peu volatil | $P_v < 0.1 \text{ KPa}$       |

- La constante d'Henry (H) qui relie la concentration d'un composé en solution aqueuse ( $C_s$ ) à sa concentration en phase gazeuse ( $C_g$ ) à l'équilibre :

$$C_g \text{ (atm)} = H \text{ (atm.m}^3/\text{mole)} \times C_s \text{ (mole / m}^3\text{)}.$$

Un composé est volatil lorsque  $H > 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ atm. m}^3 / \text{mole}$ .

#### ❖ Biodégradabilité intrinsèque

Elle traduit le comportement de la substance vis-à-vis des activités enzymatique du sol. On notera à ce sujet que cette notion peut être évolutive dans la mesure où l'observation sur le terrain a montré que des produits organiques de synthèse, considérés comme xénobiotiques et donc récalcitrants à toute dégradation, finissaient, parfois après des décennies d'usage industriel, à induire une adaptation de la microflore naturelle et commençaient à subir des biodégradations partielles puis totales (Colin, 2000).

#### ❖ Point d'écoulement

Le point d'écoulement est la plus basse température à laquelle le pétrole continue de couler. La majorité des hydrocarbures ont un point d'écoulement inférieur à  $0^\circ\text{C}$ . En dessous de ce seuil de température l'hydrocarbure se fige (Fattal, 2008).

#### ❖ Point éclair

Le point éclair est la plus basse température à laquelle les fractions d'hydrocarbures s'enflamment lorsqu'elles sont soumises à une étincelle. Certains essences ont des points d'éclair à  $-40^\circ\text{C}$ , alors que le mazout, que l'on trouve communément dans une chaudière, a un point d'éclair aux alentours de  $55^\circ\text{C}$  (Fattal, 2008)

### II-3-Sources de pollution du sol par les hydrocarbures

La contamination du sol par les hydrocarbures occupe une position particulière en raison de la toxicité et de l'effet cancérigène de certains d'entre eux, et des quantités importantes susceptibles d'être introduites dans le sol, un phénomène qui s'est accentué ces dernières années avec l'augmentation remarquable de la consommation des hydrocarbures.

Les hydrocarbures peuvent être libérés dans le sol par des phénomènes naturels. Toutefois, on considère que les activités anthropiques sont une source importante de rejet d'hydrocarbure dans l'environnement. Ce phénomène est logiquement accentué aux endroits où l'industrialisation et l'urbanisation sont les plus développées (Battaz, 2009).

Selon Colin (2000), la pollution localisée des sols par les hydrocarbures peut avoir des origines diverses :

- **Sources naturelles**

Les feux de forêts, les éruptions volcaniques et les fuites des réservoirs naturels ont un important potentiel de production de quantités massives d'hydrocarbures, mais aussi les

réactions biogènes dans les plantes et les bactéries, ainsi que les réactions géologiques associées à la production de fuel fossile et minéral.

- **Sources anthropiques**

Les sources anthropiques sont majoritaires et regroupent aussi bien les processus de combustion de fuel fossile que les processus de transformation tels que les raffineries de pétrole.

- Industrie pétrolière et du gaz naturel (extraction du pétrole, raffinage, pétrochimie)
- Industrie chimique de base et industrie mécanique.

Le tableau I résume les principales propriétés des hydrocarbures ainsi que leurs provenances :

**Tableau I :** Typologie simplifiée des principaux agents de contamination. (Fattal, 2008)

| Famille de polluants                 | Principales propriétés  | Exemples   | Activités généralisées   |
|--------------------------------------|---|--|--|
| Hydrocarbures courants               | -Plus légers que l'eau<br>-Biodégradables<br>-Solubilité variable<br>-Volatils<br>-Viscosité variable<br>-Adsorption variable   | -Essences<br>-Gazole<br>-Fioul domestique<br>-Carburants aviation<br>-Pétrole brut<br>-Naphta<br>-solvants | -Stations-service<br>-Dépôts de stockage<br>-Installations de transport (oléoducs, fer, route, voie maritime)<br>-Raffineries<br>-Transport (fer, route)<br>-Usines de peintures |
| Hydrocarbures lourds                 | -Densité variable (en général plus lourds que l'eau)<br>-Peu biodégradables<br>-Peu solubles<br>-Peu volatils<br>-Visqueux<br>-Adsorption forte<br>-Goudrons de houille | -Fiouls lourds<br>-Goudrons de pétrole<br>- Créosotes<br>-Certaines huiles de coupes                       | -Chaudières industrielles<br>-Centrales thermiques<br>-Usines à gaz<br>-Raffineries<br>-Traitement du bois<br>-Usinage des métaux  |
| Hydrocarbures halogènes aliphatiques | Denses<br>Peu biodégradables<br>Relativement solubles<br>Volatils<br>Fluides<br>Adsorption faible   | -Nombreuses formules dont les plus courantes sont :<br>TCE, TCA, PCE, chloroforme.                         | -Traitement de surface<br>-Ateliers mécaniques<br>-Industries<br>-Nettoyage à sec  |

#### II-4-Devenir des hydrocarbures dans le sol

C'est par des processus physiques, chimiques et biologiques qu'un hydrocarbure va pouvoir être déplacé, transformé ou éliminé, après avoir été répandu dans l'environnement.

Parmi les différentes altérations que peut subir un hydrocarbure, on citera les facteurs environnementaux qui sont :

❖ **Volatilisation**

La volatilisation est un phénomène qui touche les fractions de faible poids moléculaire et dépend des conditions atmosphériques (vent, température ...) (Mattei, 1995).

❖ **Solubilisation**

La solubilité des hydrocarbures dans l'eau est très faible. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée (Mattei, 1995).

❖ **Biodégradation**

La biodégradation est le processus naturel le plus important dans la dépollution de l'environnement. Les microorganismes en sont responsables, en particulier les bactéries (Vogel, 2001).

❖ **Sorption**

C'est la propriété de certains corps solides de pouvoir retenir les molécules d'autre corps (à l'état gazeux ou liquide) à leur surface, on distingue deux mécanismes de sorption : l'adsorption physique qui est due à des forces électrostatiques, et l'adsorption chimique qui met en jeu des liaisons chimiques entre le solide adsorbant (matière organique) et le fluide adsorbé (hydrocarbure) (Saada et *al.*, 2005).

❖ **Dégradation abiotique**

Selon Fattal (2008), les trois processus principaux de la dégradation abiotique des polluants sont : la photolyse, les réactions d'oxydo-réduction et l'hydrolyse chimique.

- La photolyse est la décomposition chimique (oxydation) des substances sous l'action de la lumière.

- Les réactions d'oxydo-réduction abiotiques mettent en jeu des couples redox sans intervention biologique.

- L'hydrolyse a lieu dans les phases aqueuses des milieux. Il s'agit de l'action de l'eau sur un polluant, consécutive à la dissociation ionique de l'eau (Saada et *al.*, 2005).

❖ **Dégradation biotique**

Elle caractérise la décomposition des molécules organiques par les micro-organismes présents dans le sol, elle dépend principalement de la présence suffisante de micro-organismes adaptés, de la température et de la quantité d'oxygène ou d'autres accepteurs d'électron tel que les nitrates qui sont présentes dans le sol.

La biodégradation se fait dans les milieux aérobies grâce à des micro-organismes principalement des bactéries et des champignons qui puisent dans le pétrole leur alimentation (Fattal, 2008).

## **II-5-Effets de la pollution par les hydrocarbures**

Les impacts de la pollution par les hydrocarbures sont multiples. Les aspects les plus évidents sont les grandes catastrophes très médiatisés (Soltani, 2004).

Les hydrocarbures sont des contaminants environnementaux omniprésents. Ils constituent une classe des produits chimiques organiques dangereux dont certains de leurs effets toxiques sont reconnus comme fortement cancérogènes, génotoxiques, immunotoxiques, mutagéniques ou tératogéniques. Ils représentent une menace pour la santé publique (Wang *et al.*, 2000 in Djerbaoui, 2011)

### **II-5-1-Action sur les propriétés physiques du sol**

Rouquerol *et al.* (1987) ont montré que les hydrocarbures enrobaient les particules minérales, et assuraient leur dispersion. Par ailleurs, la présence des hydrocarbures améliore la stabilité structurale du sol, accroissait sa rétention en eau et réduisait sa mouillabilité (Fezani et khider, 2007).

### **II-5-2- Action sur les propriétés chimiques du sol**

Quand le sol est pollué par les hydrocarbures, il y'a une légère acidification du sol (2 à 3 dixièmes) qui traduit sans doute l'apparition de faibles quantités d'acides résultant soit de l'oxydation des *n*-alcanes, soit de celle des composés qui proviennent de la rupture de noyaux aromatiques. Il faut noter toutefois une teneur en soufre légèrement plus importante dont la provenance peut être attribuée aux hydrocarbures (Bergue, 1986).

### **II-5-3- Action sur la flore**

Le transfert des hydrocarbures dans les plantes, à partir du sol se fait par absorption racinaire ou par diffusion gazeuse ; une troisième voie possible est le dépôt de particules atmosphériques d'origine locale ou lointaine (Rivière, 1998).

Le pétrole, surtout la fraction légère, peut pénétrer dans les plantes, traverser les membranes des cellules qui sont alors détruites. Les phénomènes de respiration et d'excrétion sont aussi bloqués, par obstruction des pores des plantes. Mais ces effets varient beaucoup avec l'espèce végétale atteinte et avec la nature des hydrocarbures, les fractions les plus volatiles étant les plus nocives (Dandonneau, 1978 in Ould Rabah, 2012).

### **II-5-4-Action sur la microflore**

L'aptitude des micro-organismes à utiliser les substrats les plus divers comme source de carbone est connue depuis longtemps.

De nombreux travaux ont porté tant sur la nature des micro-organismes actifs que sur les conditions de leur action.

Les travaux effectués ont montré que la quasi-totalité des hydrocarbures peut être métabolisée à plus ou moins long terme. Ces mécanismes biologiques dans le sol sont complexes et font appel à des micro-organismes très différents (Gattellier *et al.*, 1974).

Les hydrocarbures à faibles poids moléculaires sont considérés comme des composés toxiques pour les microorganismes à cause de leur grande solubilité et par conséquent leur

concentration très élevée dans les phases aqueuses (Colin, 2000). L'action toxique du polluant peut provoquer un ralentissement de l'activité de la microflore du sol (Girard et *al.*, 2005).

#### **II-5-5- Action sur l'homme**

Les hydrocarbures sont susceptibles d'induire l'apparition de cancers chez les organismes qui leur sont exposés par inhalation, par ingestion ou par contact. Les principaux hydrocarbures cancérigènes sont représentés par les HAP dont les plus communs sont les benzo[a]anthracènes, les benzopyrènes et les fluoranthènes. La présence de substituant alkyles sur leurs molécules accroît leur pouvoir cancérigène, tandis que leur halogénéation augmente leur toxicité pour les espèces animales (Ramade, 1992).

La toxicité des composés aliphatiques est moindre que celle des aromatiques mais implique des effets sur la peau, les poumons et le système nerveux central. Les effets sont similaires pour les naphthalènes (Soltani, 2004).

### **III-Procédés de décontamination**

La pollution du sol par les hydrocarbures qu'elle soit chronique ou accidentelle, pose d'importants problèmes d'élimination en raison du choix de la méthode de dépollution qui dépend de certains paramètres comme le type de polluant et son comportement dans le sol (Girard et *al.*, 2005).

Pour traiter un sol pollué plusieurs techniques de dépollution ou du moins de stabilisation des polluants peuvent être utilisées.

#### **III-1-Traitements physiques**

D'après Koller (2004), le traitement physique consiste, soit à apporter de l'énergie par voie mécanique ou électrique pour les dégrader par la techniques de confinement et la technique de stabilisation et d'inertage, ou les extraire par plusieurs types de méthodes, avec notamment l'excavation des sols, l'extraction des polluants gazeux, pompage de l'eau...

#### **III-2-Traitements chimiques**

Leur principe est de mettre en jeu un réactif dans le but de dégrader ou transformer les polluants en produits moins toxiques (Koller, 2004).

Le groupe des méthodes de traitement par voie chimique fait appel à un principe réactionnel (action d'un solvant, d'un acide, d'une électrolyse) pour enlever ou transformer la contamination (Lecomte, 1998).

#### **III-3-Traitements thermiques**

Les procédés thermiques, efficaces pour une gamme très large des produits, représentent une option courante à ce jour dans les filières de décontamination. Ils sont caractérisés par une rapidité de traitement et un coût variant de modéré à élevé (Koller, 2004).

Le principe sera de porter le matériel pollué à haute température pour détruire le polluant, l'extraire ou l'immobiliser. Les méthodes de traitements thermiques peuvent être

appliquées sur site ou hors site : c'est le cas le plus fréquent, et on distingue trois types dans ce groupe: l'incinération, la désorption thermique et la pyrolyse (Lecomte, 1998)

Les terres les plus contaminées sont traitées par l'incinération; combustion des polluants organiques à 1000°C ou plus, ou par la désorption thermique qui utilise des températures plus basses : 250 à 500°C. Ces techniques sont lourdes à mettre en œuvre, leur coût est élevé et les terres traitées sont transformées en un résidu stérile (Gérard et *al.*, 2005).

### **III-4-Traitements biologiques**

Les voies d'élimination quelles soit physiques, chimiques ou thermiques, sont très consommatrices d'énergie (incinération, chaleur, transport...) et de matériel technique.

Pour la plupart, elles sont destructrices pour la biodiversité et laissent un sol mort, difficile à revégétaliser après traitement. Pour cette raison, des techniques biologiques curatives développées ou en développement, sont utilisées car elles permettent de maintenir les propriétés du sol (Origo et *al.*, 2012).

Les procédés biologiques exploitent les propriétés d'un organisme vivant pour réaliser l'opération de dépollution. Ce sont des procédés de décontamination se basant sur l'extraction ou la dégradation du contaminant (Girard et *al.*, 2005).

L'organisme utilisé peut être un micro-organisme (bactérie, champignon), un végétal (algue, plante, arbre, arbuste). Cet organisme agit sur le composé polluant par absorption, accumulation, digestion, transformation, dégradation, évapotranspiration..., pour le rendre moins toxique, l'extraire, l'immobiliser ou le diluer considérablement (Colin, 2000).

L'identification des techniques biologiques existantes ou émergentes et l'analyse des procédés impliqués mettent en évidence l'existence de deux catégories principales:

#### **-Les techniques de bioremediation**

Les techniques de bioremediation désignent l'ensemble de techniques qui permettent de décontaminer un site pollué par l'usage des micro-organismes, des végétaux supérieurs et d'invertébrés présent naturellement ou introduit intentionnellement dans le milieu concerné. Parmi ces techniques on retrouve la bio augmentation, bio stimulation, biorestauration, bioventing... (Koller, 2004).

#### **-Les techniques de phytoremediation**

La phytoremediation est un processus utilisant les plantes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques polluants du sol, provenant d'activités humaines, qui sont biodégradables. Cette technique permet également de traiter des polluants inorganiques, ces derniers peuvent seulement être dilués, concentrés ou déplacés et stabilisés, mais pas transformés en produits moins toxiques car ils ne sont pas biodégradables (Gérard et *al.*, 2005).

### **IV-Phytoremediation**

D'après la société "phytorestore" 800 espèces végétales recensées à ce jour sont utilisables comme plante de réduction de polluants et d'autres recherches sont en cours, à fin de trouver des plantes plus résistantes à des niveaux de pollution élevés (Origo et *al.*, 2012).

Les techniques de phytoremediation sont récentes et font l'objet de nombreux projets de recherche depuis les années 1990 (Girard et *al.*, 2005).

#### **IV-1-Principe**

La phytoremediation repose essentiellement sur les interactions entre les plantes, le sol et ses micro-organismes. Les plantes vont soit absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker, soit réduire voir empêcher la libération du contaminant dans d'autres compartiments de l'environnement. Certaines ont la capacité d'extraire les polluants du sol par les racines et les transférer et les concentrer dans d'autres endroits de la plante par exemple les tiges, les branches et les feuilles. Elles sont capables d'absorber différents types de polluants soit organiques ou inorganiques tels que les hydrocarbures, les métaux, les pesticides, les explosifs.

Les plantes peuvent également jouer un autre rôle, c'est d'empêcher la propagation de la pollution hors du site par le vent ou la pluie (Koller, 2009).

#### **IV-2-Différents mécanismes de phytoremediation:**

##### **IV-2-1-Phytoextraction:**

La phytoextraction utilise des espèces végétales tolérantes et hyper-accumulatrices capables de prélever des hydrocarbures présents dans le sol et de les accumuler dans leurs parties aériennes. Ces plantes hyper-accumulatrices sont endémiques de sites métallurgiques, et ont la capacité d'accumuler des métaux à des concentrations élevées.

Après culture, la biomasse est récoltée et incinérée afin de réduire les volumes à traiter et de concentrer les métaux dans les cendres. Celles-ci pourraient être recyclées en métallurgie (Koller, 2009)

La phytoextraction des métaux limite leur accumulation dans les sols, leur lessivage et leur transport par érosion de plus elle offre la possibilité de récupérer les métaux extraits. Le traitement peut concerner des sols industriels ou encore des sols agricoles ayant reçus des épandages de déchets urbains ou industriels (Origo et *al.*, 2012).

##### **IV-2-2-Phytostabilisation:**

Elle est aussi appelée immobilisation *in-situ*, elle consiste à l'installation d'un couvert végétal adapté pour réduire la concentration en éléments traces dans le sol et leur transfert vers d'autres compartiments de l'écosystème.

La phytostabilisation est une technique de phytoremediation qui n'a pas vocation à "nettoyer" les sols mais à immobiliser et séquestrer les contaminants dans un sol pollué grâce aux plantes. Les plantes utilisées pour le couvert végétal sont des plantes tolérantes ou hyper-tolérantes aux métaux, c'est à dire qu'elles ont la capacité de survivre et de se reproduire sur des sites toxiques. Les racines de ces plantes sont capables d'immobiliser les polluants et de les absorber, ensuite ils deviennent insolubles et moins toxiques.

Les plantes adaptées pour ce type de technique agissent en effet pour réduire les risques de transfert de pollution dans l'environnement (Origo et *al.*, 2012).

### **IV-2-3-Phytodégradation**

C'est l'accélération de la dégradation des composés organiques polluants en présence de plantes. Cette dégradation peut avoir lieu soit hors de la plante, grâce à l'activité des micro-organismes présents dans les racines, soit dans la plante après absorption du composé puis dégradation dans les cellules (Koller, 2009).

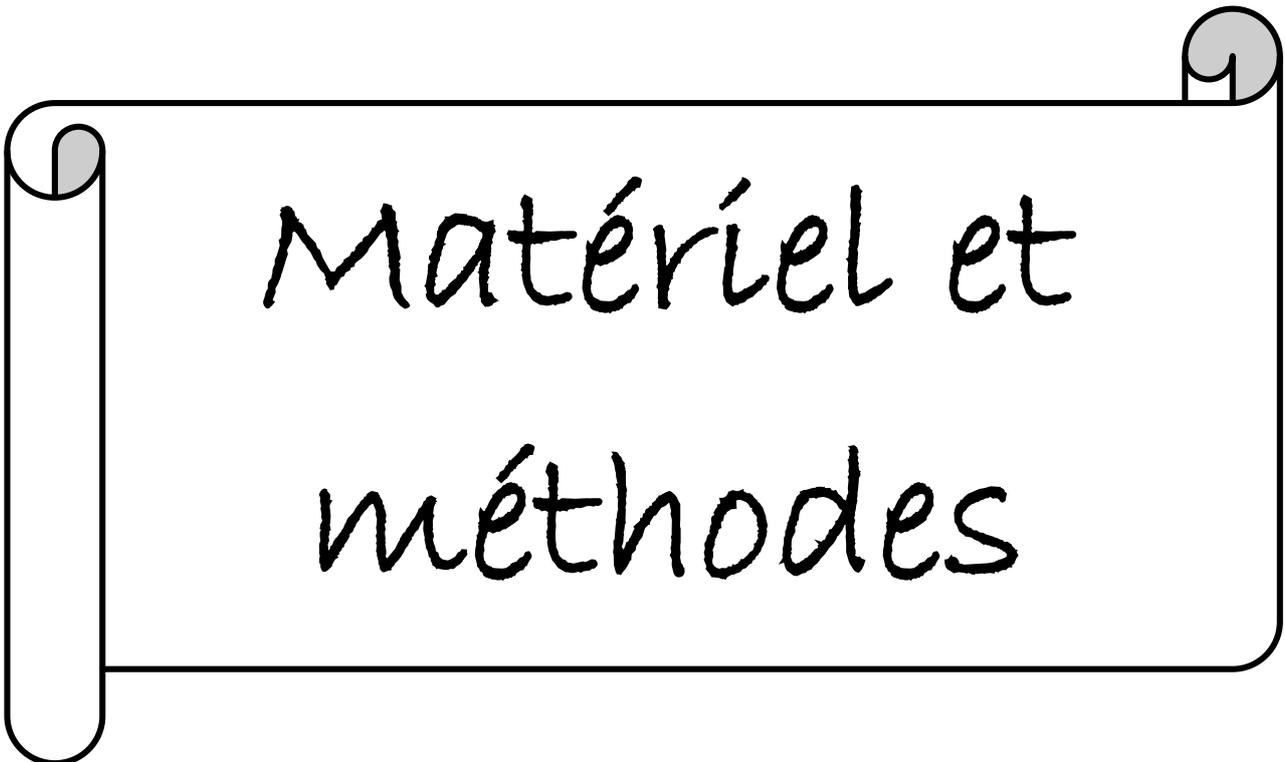
Cette technique est applicable par exemple pour les hydrocarbures, herbicides, insecticides, et autres polluants organiques toxiques versés dans le sol ou dans l'eau.

Comme pour la phytoextraction, la phytodégradation fonctionne avec l'absorption des polluants dans la plante, les polluants ne sont pas accumulés mais ils sont dégradés par le processus métabolique de la plante.

Alors, les polluants sont transformés en substance non toxiques, grâce aux réactions enzymatiques dans le sol ou dans la plante (Origo et *al.*, 2012).

### **IV-2-4-Phytovolatilisation**

Il s'agit d'une technique qui permet l'absorption des contaminants organiques par certaines plantes qui les transforment en éléments volatils et qui les évacuent par évapotranspiration par les feuilles de la plante. De cette manière, les polluants sont dégradés en composants moins ou non toxiques avant d'être libérés (Koller, 2009).



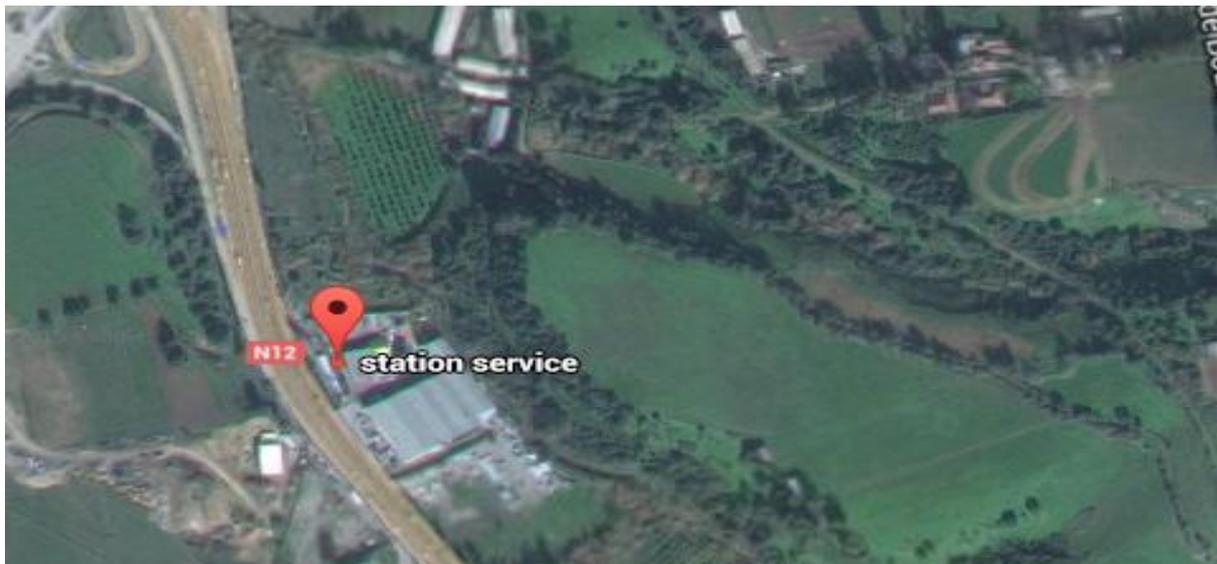
Matériel et  
méthodes

L'étude expérimentale consiste à une comparaison entre deux essais de phytoremediation, le premier est mené dans une parcelle d'une station service sise à Boukhalfa et qui subit une pollution chronique à l'essence et au gasoil suite aux rejets continus issus du trop plein du réservoir souterrain, l'autre s'est déroulée au sein du laboratoire de pathologie des écosystèmes de la faculté des sciences biologiques et sciences agronomiques de l'UMMTO.

### I-Présentation du site d'étude

La station service de Boukhalfa se situe à 5 Km à l'ouest du chef lieu de la commune Tizi Ouzou, sur la route nationale n°12, reliant Alger à Tizi Ouzou. La station a été créée en Février 2002. Elle s'étale sur une surface d'un Hectare et elle appartient à un réseau de point de vente agréé par NAFTAL, cette station est dotée d'une capacité de stockage qui est respectivement  $40 \text{ m}^3$  pour l'essence et  $400 \text{ m}^3$  pour le gasoil (NAFTAL, 2015) .

Comme la figure 01 l'indique, la station service se situe à proximité des terres agricoles traversées par un cours d'eau, ce qui pourra provoquer une infiltration des hydrocarbures vers les nappes phréatiques.



**Figure 01:** photos satellitaire de la station service de Boukhalfa (Google Earth, 2015).

#### I-1-Les données climatiques de la station

Le climat est un facteur déterminant considéré comme l'un des paramètres les plus importants qui ont une influence directe /ou indirecte sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols ; il joue également un rôle important dans la répartition des êtres vivants.

Pour déterminer les caractéristiques climatiques de la région d'étude, l'ONM (Office National de météorologie) de Tizi Ouzou nous a fourni des données climatiques pour la période (2003-2015) qui nous a permis de déterminer les conditions climatiques de la région pendant notre essai.

## I-2-Synthèse climatique

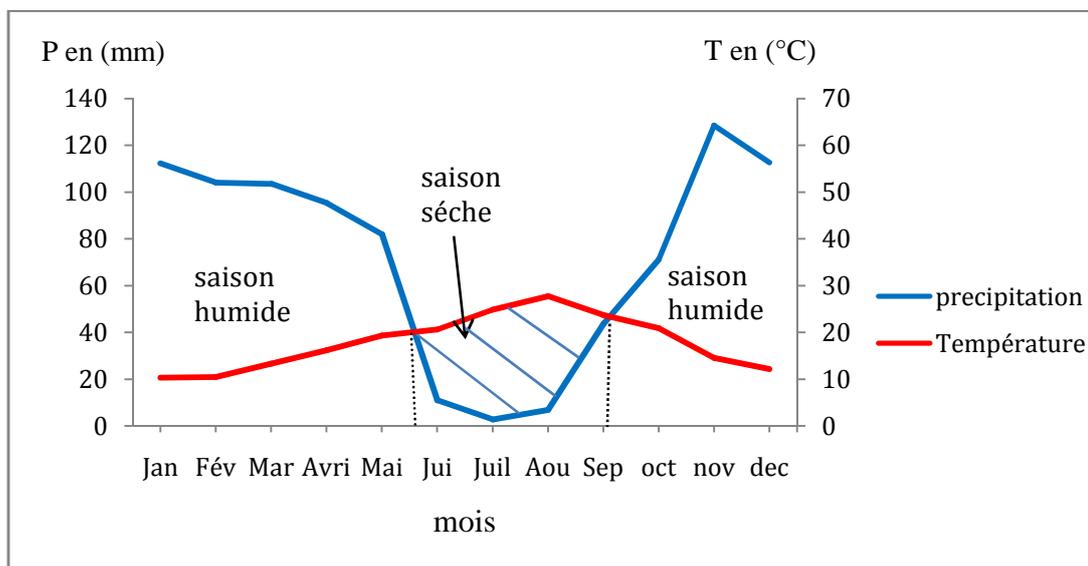
### I-2-1-Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1953) permet la mise en évidence des périodes sèches au cours d'une année hydrologique selon la relation :  $P < 2T$ .

**P** : précipitation moyennes mensuelles en mm

**T** : Températures moyennes mensuelles en °C

A partir des données, nous pouvons tracer le diagramme ombrothermique, qui est un graphique sur lequel la durée et l'intensité de la période sèche se trouvent matérialisées par la surface de croisement, ou la courbe thermique passe au dessus de la courbe ombrique (Figure 2).



**Figure 02** : Diagramme Ombrothermique de Bagnoul et Gaussen pour la station de Boukhalifa. (2004-2014).

Ce diagramme permet de distinguer globalement au sein d'une même année, deux périodes :

- Une période sèche, qui s'étale du début du mois de Juin au début du mois de Septembre.
- Une période humide qui s'étale du début du moi de Septembre au début du mois du Mai.

### I-2-2-Détermination du bioclimat de la station d'étude

Pour caractériser un bioclimat, Emberger (1952) a établi un quotient représenté par le rapport entre les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes. Le quotient est exprimé selon la formule de Stewart (1996) :  $Q_2 = 3,43 (P/M-m)$ .

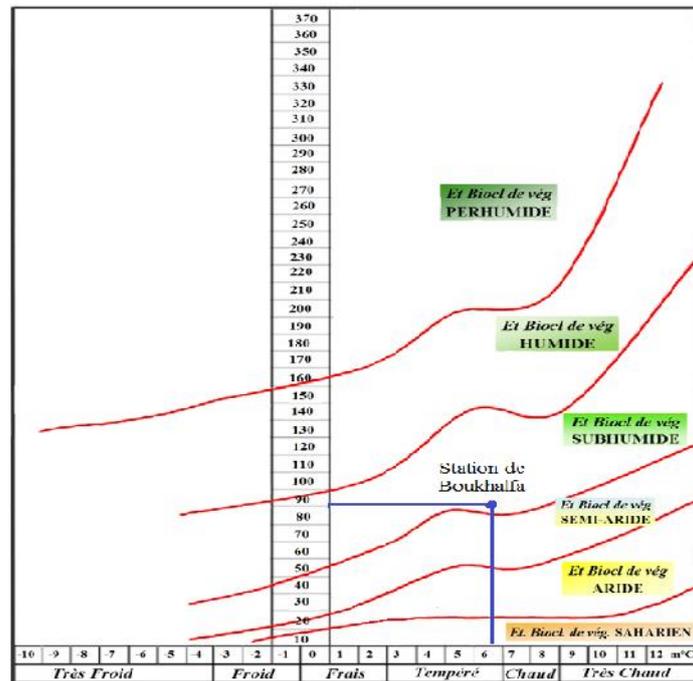
$Q_2$  : Le quotient pluviométrique d'Emberger.

P : Moyenne des précipitations des années prises en considération, exprimé en mm.

M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud, exprimé en °C.

m : Moyenne des températures minimales du mois le plus froid, exprimé en °C.

En nous référant au climagramme d'Emberger, la commune de Tizi-Ouzou est classée dans l'étage bioclimatique Subhumide à variance tempérée (figure3).



**Figure 03** : Climagramme d'Emberger pour la commune de Tizi Ouzou.

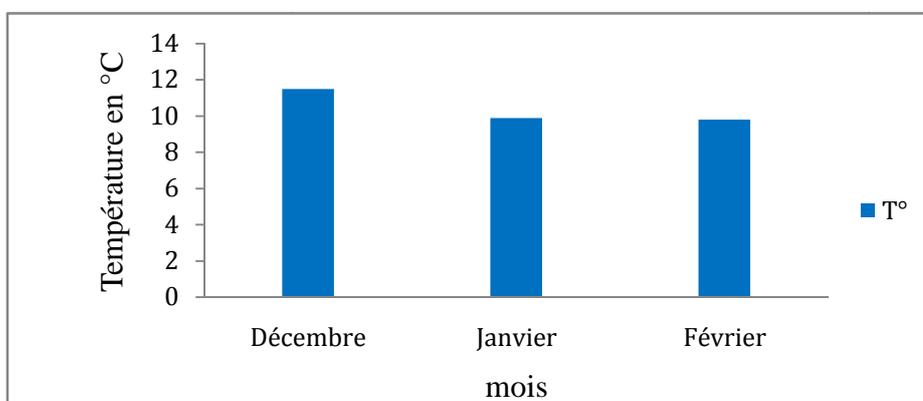
### I-2-3-Température

La température est un facteur très important en écologie, car elle intervient dans l'étude hydro-climatique d'une région (Lakroun, 1995).

Elle contrôle aussi l'ensemble des phénomènes métaboliques et conditionne la répartition des être vivants dans la biosphère (Ramade, 1992).

Les variations et les changements de température ont une influence sur les propriétés d'un sol et principalement sur le comportement et la biodiversité des microorganismes du sol (Davel, 1996).

La figure 04 montre que pour la région de Boukhalfa, les températures moyennes pour les trois mois de l'essai varient entre 9,8 et 11°C.



**Figure 04** : Températures moyennes de la région Boukhalfa durant la période d'étude.

### I-2-4-Pluviométrie

Les précipitations sont un facteur prépondérant pour la détermination d'un climat la vie sur terre est commandée par la présence d'eau. La quantité des précipitations sont respectivement 272,4 mm et 200,9mm pour les mois de Janvier et Février.

## II-Matériel

### II-1-Sol

L'étude expérimentale a été réalisée sur un sol contaminé par des rejets continus d'une station service située à Boukhalfa. Les prélèvements correspondent à la couche superficielle du sol (0-25cm).

Les analyses effectuées par l'INRF indiquent que ce sol est de texture limono-argileuse et présente les caractéristiques résumées dans le tableau suivant :

**Tableau III:** les caractéristiques chimiques du sol utilisé.

| Caractéristiques chimiques du sol          | Résultats  |
|--|--|
| Potentiel d'Hydrogène                      | pH=7,2   |
| Carbone                                    | 8,84%  |
| Azote                                      | 0,3%   |
| Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) | 5.46 ppm (mg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /kg de sol) |
| Salinité                                   | 0,74 mmhos/cm  |

Ces résultats montrent que le pH est neutre. Le sol n'est pas salé et riche en carbone, se qui permet le développement des micro-organismes par contre il est moyennement pourvu en azote et en phosphore (INRF).

Ce sol contient 24,35% d'argile, 46,13% de limon et 29,54% du sable. De ce fait, le sol utilisé est de texture limono-argileuse (INRF).

Ce sol est caractérisé par la présence de deux contaminants organiques qui sont l'essence super et le gasoil.

#### ➤ L'essence

Contient généralement environ 230 hydrocarbures différents, dont le nombre d'atomes se situe entre 4 et 10. Les essences sont composées de 5 classes principales d'hydrocarbures : les *n*-alcane, les isoalcane, les cycloalcane, les alcène et les aromatiques. Les aromatiques sont majoritairement présents (Saada et *al.*, 2005).

#### ➤ Le gasoil

Contient 2000 à 4000 hydrocarbures différents, dont le nombre d'atomes de carbone varie entre 11 et 25. Il est plus lourd que l'essence et est composé de produits moins volatils. Il est majoritairement constitué de *n*-alcane et de cycloalcane (Saada et *al.*, 2005).

## II-2- Matériel végétal

Trois espèces végétales différentes ont été utilisées pour la phytoremediation, à savoir la fève et la luzerne (légumineuses) et le maïs (graminée).

Duchauffour (2001) 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. Les graminées sont connues pour être sensible à la pollution par les hydrocarbures et le choix du maïs s'est fait dans le but de comparer entre les légumineuses et les graminées.

### II-2-1- La fève

La fève (*Vicia faba* L.), 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.....        | <i>Vicia</i>         |
| Espèce.....       | <i>Vicia faba</i> 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 à 1,20 m.

La plante forme des feuilles alternes et composées-pennées. 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.

La fève ne présente pas d'exigences spécifiques au regard de 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).

### II-2-2- La luzerne

La luzerne (*Medicago sativa* L.) est une plante qui possède un système racinaire vaste et ramifié offrant une grande surface de la racine à la croissance des populations microbiennes. Sa classification botanique, selon Cronquist (1981), est comme suit :

|                 |               |
|-----------------|---------------|
| Règne.....      | Plantae       |
| Sous-règne..... | Tracheobionta |
| Division.....   | Magnoliophyta |
| Classe.....     | Magnoliopsida |

|                   |                           |
|-------------------|---------------------------|
| Sous-classe.....  | Rosidae                   |
| Ordre.....        | Fabales                   |
| Famille.....      | Fabaceae                  |
| Sous-famille..... | Faboideae                 |
| Tribu .....       | Trifolieae                |
| Genre.....        | <i>Medicago</i>           |
| Espèce.....       | <i>Medicago sativa</i> L. |

La luzerne est une des plantes fourragères les plus répandues sur tous les continents. Elle appartient à la famille des légumineuses, caractérisée par sa capacité à fixer l'azote atmosphérique, grâce à une symbiose entre la plante et une bactérie qui se développe dans son système racinaire (Mathieu, 1994).

La luzerne peut s'adapter à de nombreux types de sol, mais tolère mal les sols acides (pH inférieur à 5), ou très humides. Sa préférence va aux sols sains et profonds qui lui permettent de développer son enracinement pivotant. C'est cet enracinement, qui peut descendre jusqu'à 10m de profondeur, qui lui donne une grande facilité d'adaptation en lui permettant de résister à la sécheresse (Mathieu, 1994).

### II-2-3- Le maïs

Le maïs est une plante tropicale herbacée annuelle de la famille des Poacées (Graminées), largement cultivée comme céréale pour ses grains riches en amidon, mais aussi comme plante fourragère (Nyabyenda, 2005). Selon Cronquist (1981), sa position systématique est la suivante :

|                   |                    |
|-------------------|--------------------|
| Règne.....        | Plantae            |
| Sous-règne.....   | Tracheobionta      |
| Division.....     | Magnoliophyta      |
| Classe.....       | Liliopsida         |
| Sous-classe.....  | Commelinidae       |
| Ordre.....        | Cyperales          |
| Famille.....      | Poaceae            |
| Sous-famille..... | Panicoideae        |
| Tribu.....        | Maydeae            |
| Genre .....       | <i>Zea</i>         |
| Espèce.....       | <i>Zea mays</i> L. |

Le maïs forme une seule tige principale pouvant atteindre 1 à 4m de hauteur sur laquelle se forment toutes les feuilles.

Le maïs forme de nombreuses racines fibreuses et vigoureuses qui se trouvent, pour la plupart, dans les premiers centimètres du sol. Dans certaines conditions, le maïs développe des racines adventives qui lui servent également de support.

Bien que le maïs puisse croître sur plusieurs types de sols, il se trouve le mieux sur des sols fertiles, riches en matière organique, bien drainés et aérés avec un pH 6 à 7. Le maïs est une plante indicatrice de la fertilité du sol (Nyabyenda, 2005).

Cependant, le maïs préfère les sols profonds et riches ; mais il peut s'accommoder à des conditions plus difficiles, comme les sols sableux et argileux (Soltner, 1990).

## II-2-4- Le blé

Le blé dur est utilisé dans les bio-essais afin d'évaluer l'efficacité de la phytoremediation. Le choix de cette espèce est justifié par sa sensibilité aux hydrocarbures.

Selon Cronquist (1981), on peut classer le blé dur de la façon suivante :

|                   |                                    |
|-------------------|------------------------------------|
| Règne.....        | Plantae                            |
| Sous-règne.....   | Tracheobionta                      |
| Division.....     | Magnoliophyta                      |
| Classe.....       | Liliopsida                         |
| Sous-classe.....  | Commelinidae                       |
| Ordre.....        | Cyperales                          |
| Famille.....      | Poaceae                            |
| Sous-famille..... | Pooideae                           |
| Tribu .....       | Triticeae                          |
| Genre.....        | <i>Triticum</i>                    |
| Espèce.....       | <i>Triticum turgidum ssp durum</i> |

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).

## III-Méthodes

L'étude consiste en une évaluation de l'effet des hydrocarbures (l'essence super et le gasoil), sur un sol.

Cette étude nous permet de voir la différence entre les trois espèces considérées en termes de résistance à la pollution par les hydrocarbures et d'évaluer la capacité de ces espèces à améliorer les caractéristiques physico-chimiques du sol dans deux essais de phytoremediation menés parallèlement sur le terrain et au laboratoire.

### III-1-Dispositif expérimental

#### III-1-1-Dispositif expérimental au laboratoire

Après échantillonnage et prélèvement du sol à une profondeur allant de 0 à 25 cm, ce sol est tamisé à 5mm et mélangé pour être homogénéisé, pour ensuite être réparti en quatre lots de 300g chacun.

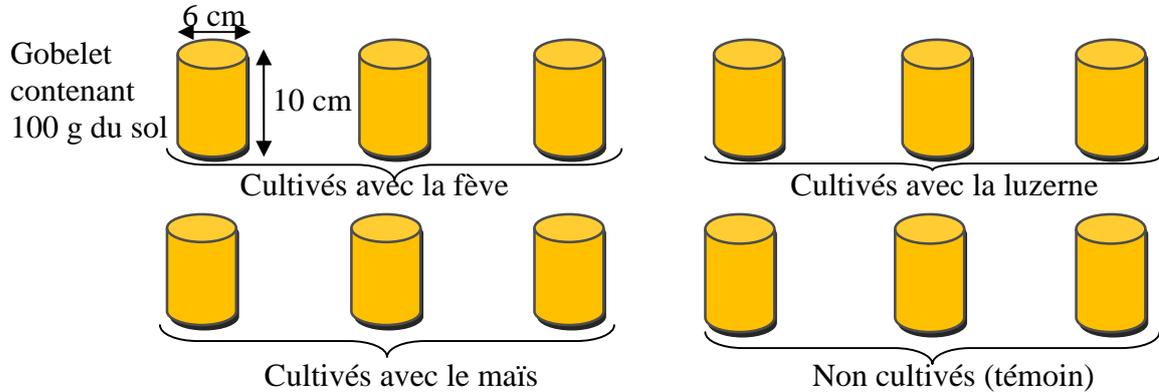
Le dispositif expérimental choisi pour l'étude est le dispositif complètement aléatoire à un facteur (différentes espèces végétales). Le dispositif est constitué de douze gobelets, 3 pour chaque espèce et 3 remplis de sol non cultivé (figure 05).

Le semis a été réalisé le 18/12/2014 pour les trois espèces de la façon suivante :

- 03 grains de fève pour 100 g du sol (03 répétition)
- 06 grains du maïs pour 100 g du sol (03 répétition)

- 10 grains de luzerne pour 100 g du sol (03 répétition)
- 100 g du sol non cultivé (03 répétition)

L'observation et le suivi de l'évolution de l'état des cultures sont quotidiens avec un arrosage régulier avec l'eau de robinet pendant 10 semaines, la mesure de la hauteur se fait une fois par semaine.

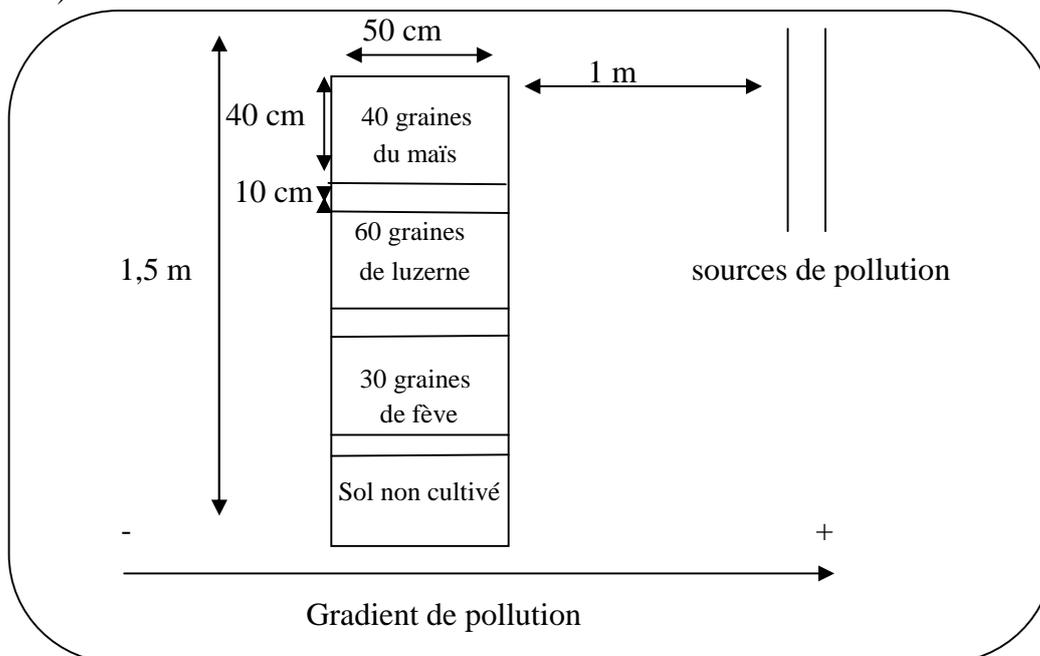


**Figure 05** : dispositif expérimental au laboratoire

### III-1-2-Dispositif expérimental sur le terrain

Nous avons choisi une parcelle de 1.5m de long et de 50 cm de large distante d'un mètre de la source de pollution.

Nous avons fait un maillage de quatre petites parcelles de surface de 40cm x 50cm tout en laissant une équidistance de 10cm entre une parcelle et une autre. Sachant qu'il n'y a pas de gradient de pollution au sens de la longueur, nous avons semé les différentes graines le 18/12/2014 d'une façon aléatoire tout en laissant une parcelle sans culture en guise de témoin (figure 06).



**Figure 06** : dispositif expérimental sur le terrain.

### **III-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 se sont portées sur tous les plants germés au niveau du laboratoire et 12 plants au niveau du terrain.

#### **III-2-1-Taux de levée**

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

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

#### **III-2-2-Hauteur des plantes**

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

#### **III-2-3- Biomasse aérienne**

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

#### **III-2-4-Biomasse racinaire**

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

#### **III-2-5-Volume racinaire**

Il consiste à mesurer le volume des racines de chaque plante. Les racines sont séparées de la partie aérienne de chaque plante puis elles sont mises dans des bécjers contenant de l'eau à un volume  $V_0$ , on obtient alors un volume  $V_1$ , puis on calcule le volume racinaire  $V$  par la formule suivante :

$$V = V_1 - V_0$$

### **III-3-Réalisation des bio-essais**

#### **III-3-1-Test de germination**

Après la récolte des trois espèces utilisées préalablement dans les essais de phytoremediation, nous avons procédé à un test de germination du blé dur dans les échantillons du sol utilisés dans l'expérience, ce test consiste à établir un taux de germination pour chaque répétition (100g du sol pour chaque répétition dans une boîte de Pétri dans laquelle on met 100 graines de blé dur). Après deux semaines, nous avons procédé au dénombrement des grains germés.

Le but de ce test est d'évaluer l'effet des différents traitements réalisés sur la toxicité des hydrocarbures contenus dans le sol sur la germination des graines du blé dur et d'évaluer le degré de remédiation susceptible d'être enregistré dans les différents échantillons.

### **III-3-2-Test de la longueur racinaire**

C'est un test qui suit directement le test de germination. Une semaine après le dénombrement des grains germés, nous avons pris 10 plantules parmi celles qui sont semées pour mesurer la longueur de leurs racinaires.

### **III-4-Effet des hydrocarbures sur quelques propriétés chimiques du sol**

#### **III-4-1-Potentiel d'Hydrogène (pH)**

La mesure de pH constitue le test le plus sensible aux modifications survenant dans l'évolution d'un sol (Clément et Pieltain, 2009).

La mesure s'effectue sur une suspension de sol dans l'eau distillée à 2/5 (rapport masse/volume), en agitant pendant 2mn avec un agitateur magnétique. Après repos pendant 2 heures, l'électrode de pH-mètre (pH-mètre de type inolab) est plongé dans le liquide surnageant, et la valeur du pH est lue directement.

#### **III-4-2-Conductivité électrique**

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice des teneurs des sels solubles dans ce sol. La mesure s'effectue sur un extrait aqueux avec un rapport 1/5, en agitant pendant 4 mn à l'aide d'un agitateur magnétique. Après une ½ heure de repos, on infiltre le surnageant. La solution est laissée au repos pendant 24h dans un réfrigérateur. La lecture est faite à l'aide d'un conductimètre de type LF 42.

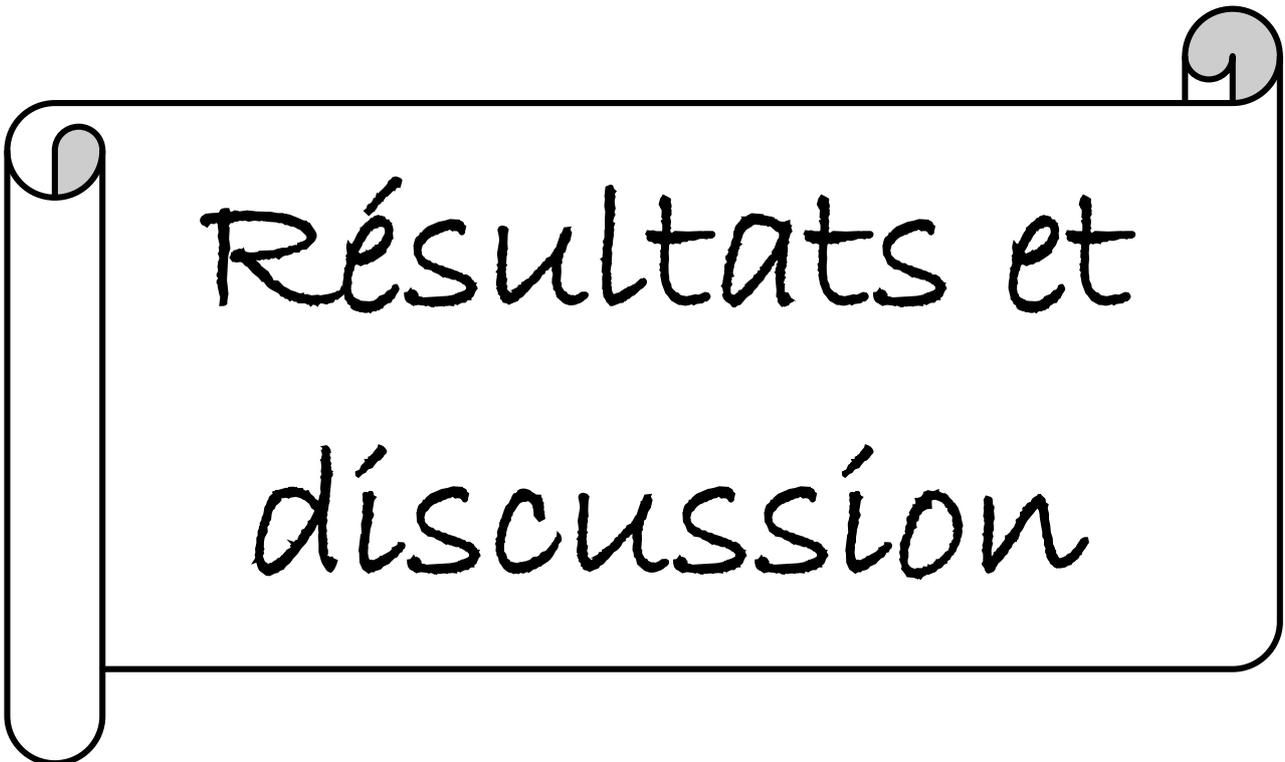
#### **III-4-3-Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR)**

La FTIR est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques d'identifier les fonctions chimiques présentes. Les mesures par transformée de Fourier des absorbances permet d'en effectuer le dosage à des teneurs et quantités de matière très faibles. On accède ainsi directement à la structure moléculaire des matériaux analysés. Les différents montages disponibles permettent d'analyser pratiquement tout type de matériaux.

Des échantillons du sol traités par la fève (sur le terrain et au laboratoire) ont été séchés, puis broyés et réduits en poudre, pour être utilisés sous forme de traces mélangées avec le KBr pour homogénéiser, puis ils sont placés dans un manomètre pour la compression de la poudre puis sont obtenues des pastilles qui seront analysées par la FTIR.

### **III-5-Méthode d'analyse statistique**

Le traitement des résultats a été réalisé avec le logiciel R.3.0.2, les résultats de l'effet des hydrocarbures sur les végétaux ont été soumis à une analyse avec le test de Student pour la comparaison d'une moyenne à un standard. Les moyennes obtenues sont comparés aux résultats obtenus dans des études antérieures ayant porté sur les même espèces cultivées sur un sol non contaminé. Concernant les résultats des propriétés du sol et des bio-essais, ils ont été soumis à une analyse de la variance. L'ANOVA est suivie du test de Newman et Keuls pour établir les groupes homogènes lorsque les différences entre les moyennes sont significatives.



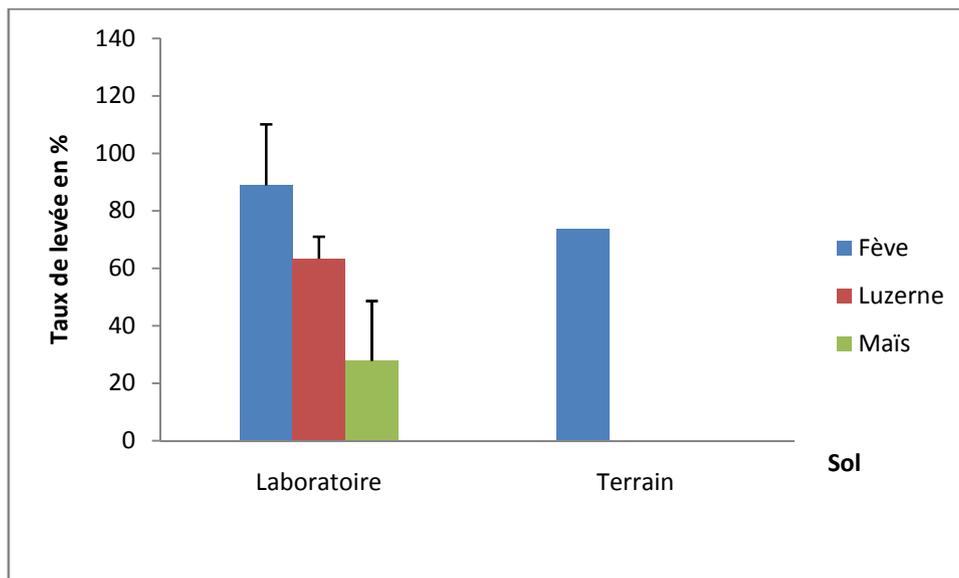
Résultats et  
discussion

## I-Résultats

### I-1-Effets des hydrocarbures sur le végétal

#### I-1-1-Taux de levée

La levée des graines de la fève et de la luzerne a été observée dès le troisième jour après le semis dans le laboratoire, quant aux graines du maïs, leur levée a été observée après une semaine. En ce qui concerne les graines semées sur le terrain, la levée des graines de la fève a été constatée au quatrième jour après le semis, la luzerne et le maïs semés n'ont pas levé comme l'illustre la figure 07.



**Figure 07** : Taux de levée des différentes espèces cultivées au laboratoire et sur le terrain.

En se référant aux résultats des taux de levée représentés dans la figure 07, nous pouvons dire que la levée des graines de la fève cultivée au laboratoire a atteint 88,88% et un taux de 73,88% sur terrain. Concernant les graines de la luzerne et du maïs, nous avons obtenu des taux de levée au laboratoire avec des valeurs respectives de 63,33% et 27,78%. La luzerne et la fève ont présenté un bon taux de levée malgré la contamination du sol.

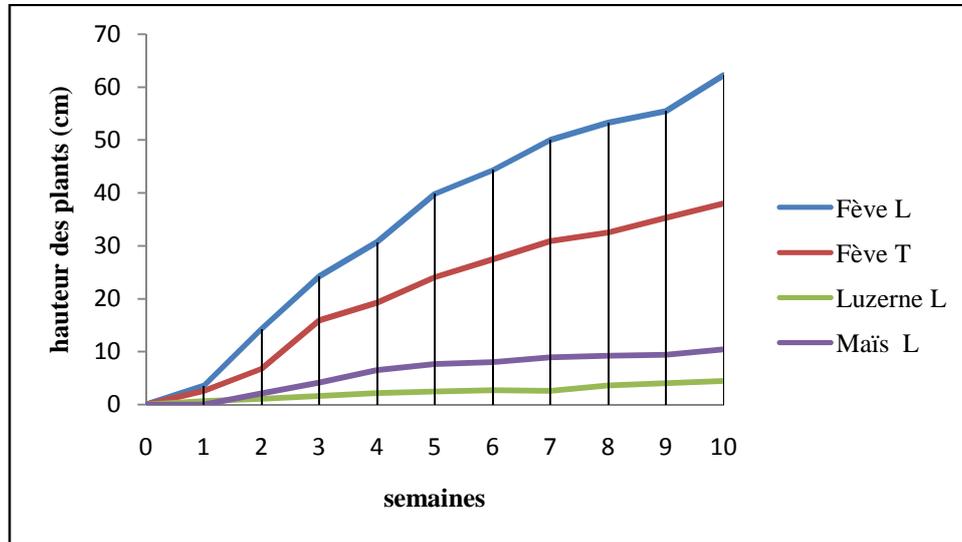
L'analyse de ces données par le test de Student pour un échantillon a révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre la levée de ces plants dans le sol contaminé et la levée déjà enregistrée par Zerrouki et Ouhadda (2013) (Tableau III).

**Tableau IV** : Résultats du test de Student à un échantillon pour le taux de levée.

|                     | Moyenne de référence mu | Moyenne de l'échantillon | t       | ddl | P. value |
|---------------------|-------------------------|--------------------------|---------|-----|----------|
| Luzerne laboratoire | 78                      | 63,33                    | -1,663  | 2   | 0,2382   |
| Maïs laboratoire    | 100                     | 27,78                    | -3,6053 | 2   | 0,06906  |
| Fève laboratoire    | 100                     | 88,88                    | -1,9367 | 2   | 0,1924   |
| Fève terrain        | 100                     | 73,33                    | -1      | 2   | 0,4226   |

### I-1-2-Hauteur des plants

La figure 08 représente l'évolution hebdomadaire des hauteurs, en centimètre, des plants des différentes espèces végétales (fève, luzerne et maïs).



**Figure 08 :** Hauteur des plants de différentes espèces végétales cultivées au laboratoire et sur le terrain.

Nous avons constaté d'après la figure 08 qu'il y avait une augmentation de la croissance hebdomadaire concernant la fève pendant toute la durée de la culture. Au bout de la dixième semaine de culture, les plants de la fève ont atteint une hauteur de 62,27cm au laboratoire et 38cm sur terrain. Par contre les plants de la luzerne et du maïs cultivés au laboratoire commencent à prendre hauteur à partir de la 2<sup>ème</sup> semaine et connaissent un ralentissement de la croissance à partir de la huitième semaine jusqu'à atteindre au bout de dix semaines respectivement 4,47cm et 10,70cm. Pour le maïs et la luzerne semés sur le terrain, puisque aucune graine n'a germé, la mesure de la hauteur était impossible.

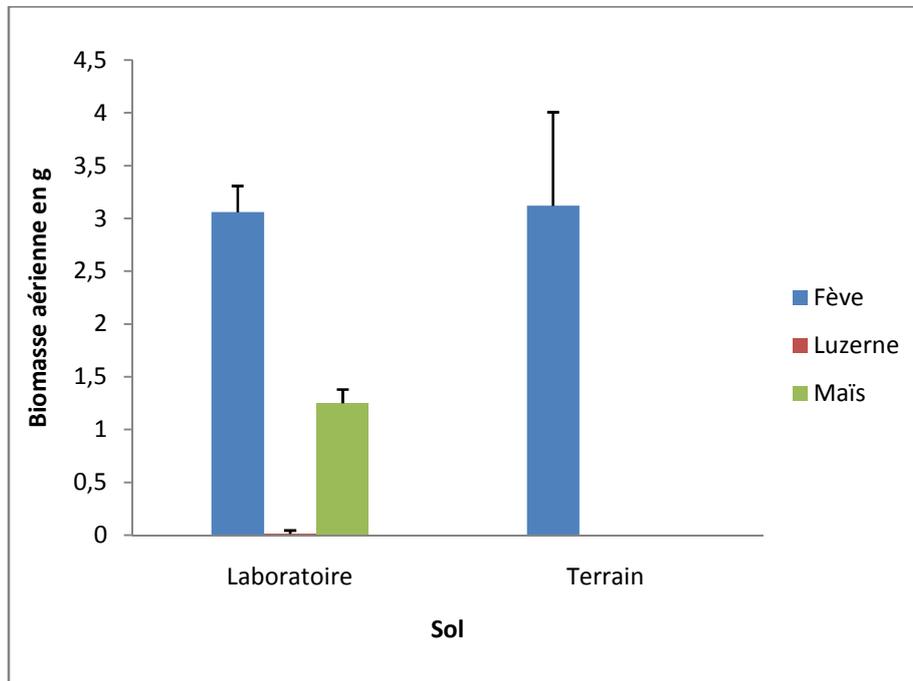
Les résultats du test de Student pour les hauteurs des plants des différentes espèces ont révélé qu'il n'y avait pas de différence significative pour la fève cultivée au laboratoire, par contre le test a montré qu'il y a des différences significatives pour la luzerne et une différence hautement significative pour le maïs du laboratoire. Concernant la fève du terrain, le test a révélé des différences significatives. Ces résultats sont illustrés dans le tableau IV.

**Tableau V :** Résultats du test de Student pour la hauteur des plants.

|                     | Moyenne de référence mu | Moyenne de De l'échantillon | t        | ddl | P. value |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|----------|-----|----------|
| Luzerne laboratoire | 5,88                    | 4,47                        | -7,4787  | 2   | 0,01701  |
| Maïs laboratoire    | 50,16                   | 10,70                       | -76,6117 | 1   | 0,008309 |
| Fève laboratoire    | 75,21                   | 62,26                       | -1,588   | 2   | 0,253    |
| Fève terrain        | 75,21                   | 38                          | -7,2123  | 2   | 0,01869  |

### I-1-3-Biomasse aérienne

La figure 09 montre les mesures de la biomasse aérienne effectuées sur les différents plants cultivés sur le terrain et au laboratoire.



**Figure 09 :** Biomasse aérienne des plantes cultivées sur le terrain et au laboratoire.

D’après cette figure nous remarquons que le poids le plus élevé est celui de la fève cultivée sur le terrain avec une valeur de 3,12 g, ensuite la fève et le maïs cultivés au laboratoire avec respectivement 3,06 et 1,25 g et enfin la luzerne cultivée au laboratoire avec 0,014 g. nos résultats ont montré que les trois espèces ont présenté un poids remarquable malgré la pollution.

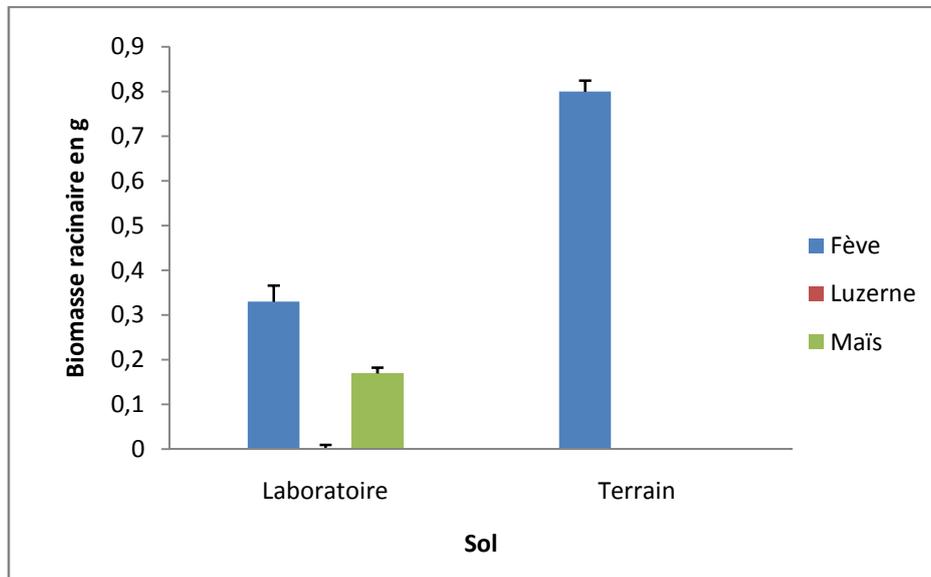
Les résultats du test de Student à un échantillon pour la biomasse aérienne des différentes espèces ont révélé qu’il n’y avait pas de différence significative (Tableau V).

**Tableau VI :** Résultats du test de Student à un échantillon pour la biomasse aérienne.

| Biomasse aérienne | Moyenne de référence mu | Moyenne de L'échantillon | t       | ddl | P, value |
|-------------------|-------------------------|--------------------------|---------|-----|----------|
| Luzerne           | 0,03                    | 0,014                    | -1,9215 | 2   | 0,1946   |
| Maïs              | 2,5                     | 1,25                     | -2,4019 | 2   | 0,1383   |
| Fève laboratoire  | 4,77                    | 3,06                     | -2,6784 | 2   | 0,1157   |
| Fève terrain      | 4,77                    | 3,12                     | -2,7803 | 2   | 0,1087   |

**I-1-4-Biomasse racinaire**

La figure 10 représente la biomasse racinaire des plants cultivés dans le laboratoire et sur le terrain.



**Figure 10:** Biomasse racinaire des plantes cultivées au laboratoire et sur le terrain.

Nous avons enregistré la plus grande valeur pour la fève cultivée sur le terrain avec une masse de 0,8 g suivi de la fève cultivée au laboratoire puis le maïs et enfin la luzerne cultivée avec 0,001g.

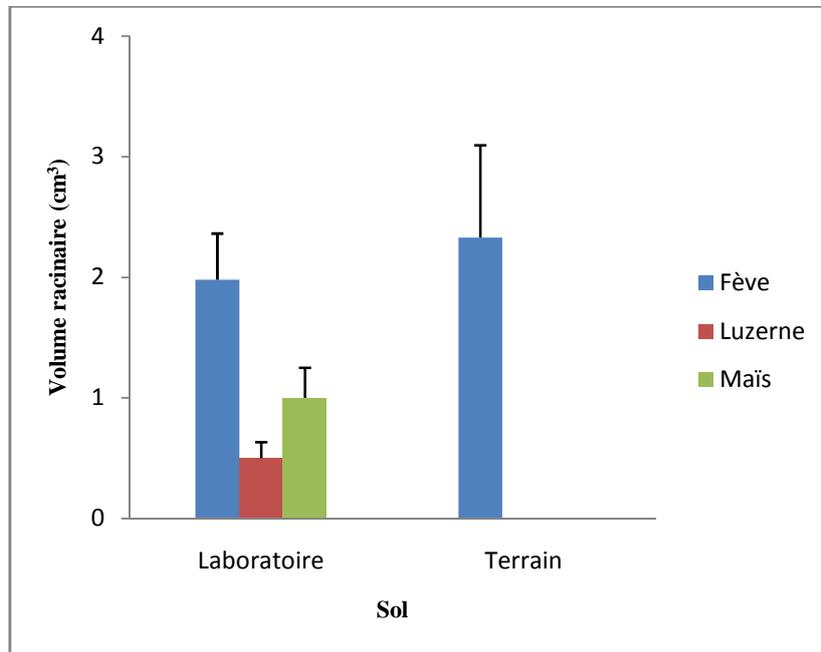
L’analyse de ces données par le test de Student à un échantillon a révélé qu’il n’y avait pas de différence entre les mesures de la biomasse aérienne pour la fève sur le terrain. Par contre, il y avait une différence significative pour la fève du laboratoire et une différence hautement significative pour le maïs par rapport à la moyenne déjà obtenue Moula et Mahlal (2011). Cette analyse a révélé également l’absence de différences significatives pour la luzerne. Les résultats sont mentionnés dans le tableau VI.

**Tableau VII :** Résultats du test de Student à un échantillon pour la biomasse racinaire.

| Biomasse racinaire | Moyenne de référence $\mu$ | Moyenne de l’échantillon | T       | ddl | P, value |
|--------------------|----------------------------|--------------------------|---------|-----|----------|
| Luzerne            | 0,002                      | 0,001                    | -2      | 2   | 0,1835   |
| Maïs               | 0,98                       | 0,17                     | -23,06  | 2   | 0,001875 |
| Fève laboratoire   | 1,6                        | 0,33                     | -8,4612 | 2   | 0,01368  |
| Fève terrain       | 1,6                        | 0,8                      | -3,95   | 2   | 0,05852  |

### I-1-5-Volume racinaire

La figure 11 montre les mesures faites sur le volume des racines des différents plants semés sur le terrain et dans le laboratoire.



**Figure 11:** volume racinaire des plantes cultivées sur le terrain et au laboratoire.

La valeur la plus élevée a été enregistrée pour la fève cultivée sur le terrain avec  $2,33\text{cm}^3$  suivi directement par la fève cultivée au laboratoire et enfin le maïs et la luzerne cultivés dans le laboratoire avec une valeur de  $0,5\text{cm}^3$  pour cette dernière. Pour le volume racinaire la fève sur le terrain et le maïs ont présenté un volume appréciable malgré la toxicité des hydrocarbures présents dans le sol.

Le test de Student pour un échantillon pour les valeurs du volume racinaire a révélé, concernant le maïs et la fève du terrain il n’y avait pas de différence significative entre nos résultats et ceux obtenus par Zerrouki et Ouhadda (2013) pour la fève et la luzerne et Moula et Mahlal (2011), mais qu’il y avait des différences significatives pour la luzerne et la fève au laboratoire (Tableau VII).

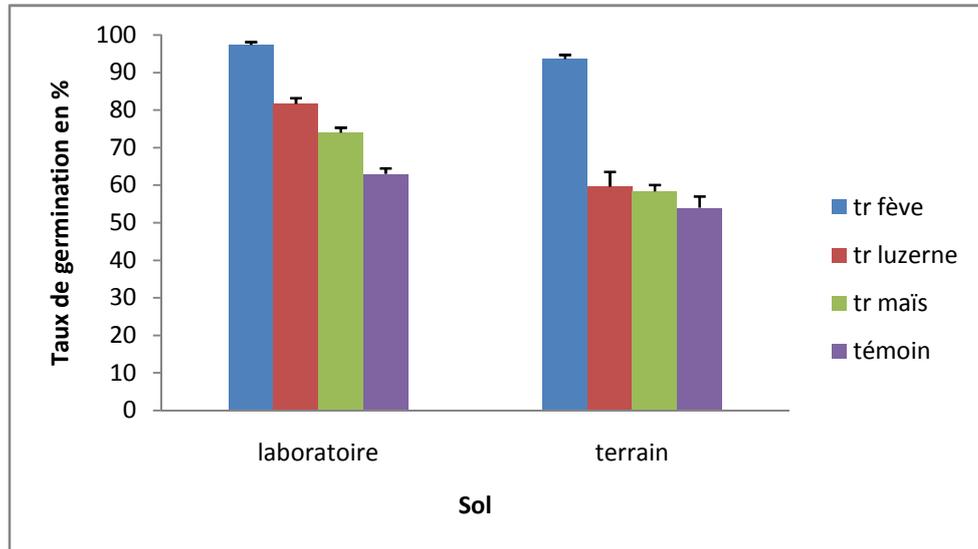
**Tableau VIII :** Résultats du test de Student pour le volume racinaire.

| Volume racinaire | Moyenne de référence $\mu$ | Moyenne de L'échantillon | t       | ddl | P-value |
|------------------|----------------------------|--------------------------|---------|-----|---------|
| Luzerne          | 0,8                        | 0,5                      | -6,0417 | 2   | 0,02632 |
| Maïs             | 1,77                       | 1                        | -3,699  | 2   | 0,06594 |
| Fève laboratoire | 3,46                       | 2,11                     | -6,5591 | 2   | 0,02206 |
| Fève terrain     | 3,46                       | 2,33                     | -3,147  | 2   | 0,08787 |

## I-2-Bio-essais

### I-2-1-Taux de germination

La figure 12 montre les résultats du taux de germination d'une espèce végétale (blé dur) dans les différents échantillons de sol traités auparavant par la fève, la luzerne et le maïs ainsi que dans le sol témoin.



**Figure 12 :** Taux de germination du blé dur dans les différents échantillons du sol.

Les résultats du test de germination ont montré un taux de germination très élevé pour le sol traité avec la fève au laboratoire et sur le terrain avec des taux respectifs de 97,33 et 93,66%.

Pour les autres échantillons de sol nous avons obtenu des valeurs allant de 58 à 81% et nous avons enregistré la plus petite valeur dans le sol témoin du terrain avec un taux de 54%.

L'analyse de la variance pour le taux de germination des graines du blé dur dans les différents échantillons du sol a révélé qu'il y avait des différences très hautement significatives pour le facteur sol et le facteur espèce (Tableau VIII).

**Tableau IX:** Analyse de la variance pour le taux de germination du blé dur.

|            | DDL | S.C.E  | C.M    | F. Observé | P-value    |
|------------|-----|--------|--------|------------|------------|
| Sol        | 1   | 950    | 950,04 | 54,0308    | 3,634 e-06 |
| Sp         | 3   | 4609,8 | 1536,6 | 87,3894    | 3,896 e-10 |
| résiduelle | 16  | 281,3  | 17,58  |            |            |

Le test de Newman et Keuls (tableau IX) a donné trois groupes homogènes au laboratoire. Le groupe A renferme la fève, B dans lequel nous retrouvons la luzerne et le maïs et enfin C qui renferme seulement le témoin ce qui montre qu'il y'a une différence entre les taux de germination dans les différents échantillons du sol Nous avons obtenu le même classement pour l'essai du terrain (tableau X).

**Tableau X :** Test de Newman et Keuls pour le taux de germination au laboratoire.

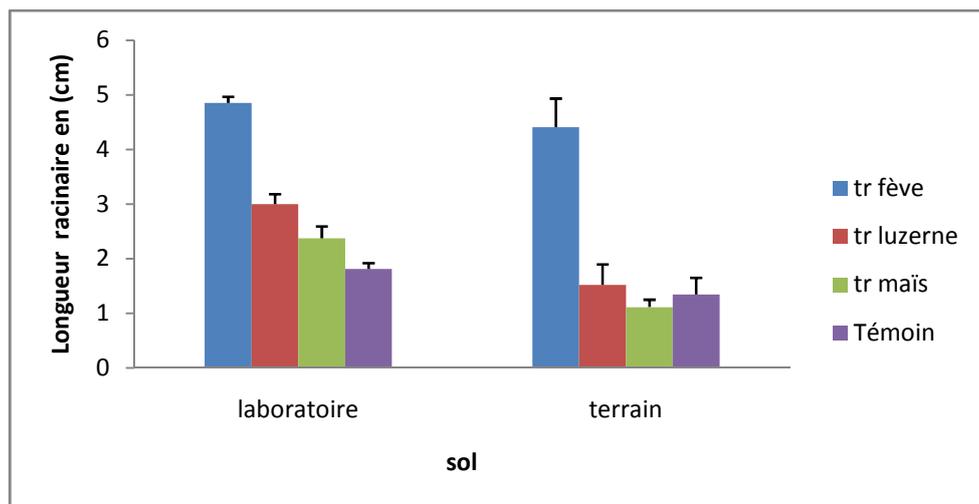
| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | fève     | 97,33    | A                 |
| 2           | Luzerne  | 81,66    | B                 |
| 3           | Maïs     | 74       | B                 |
| 4           | témoin   | 63       | C                 |

**Tableau XI :** Test de Newman et Keuls pour le taux de germination sur le terrain.

| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | fève     | 93,66    | A                 |
| 2           | Luzerne  | 59,66    | B                 |
| 3           | Maïs     | 58,33    | B                 |
| 4           | témoin   | 54       | C                 |

### I-2-2-Test de la longueur racinaire

La figure 13 illustre les résultats de la mesure de la longueur racinaire du blé dur cultivé sur les différents échantillons du sol.



**Figure 13:** Longueur racinaire du blé dur dans le sol témoin et le sol cultivé par les différentes espèces.

Si on se réfère aux résultats de la longueur racinaire, nous pouvons dire que la valeur la plus élevée est celle du sol traité au laboratoire avec la fève avec 4,85cm suivi du sol traité par la fève sur le terrain avec 4,4cm, ensuite les valeurs des sols traités au laboratoire avec le maïs et la luzerne avec 2,99 cm et enfin la plus petite valeur a été enregistrée dans le sol traité au terrain avec le maïs 1,11cm.

L'analyse de la variance pour la longueur racinaire du blé dur dans les différents échantillons de sol a révélé une différence hautement significative pour le facteur sol et très hautement significative pour le facteur espèce. Les résultats sont cités dans le tableau XI.

**Tableau XII :** Analyse de la variance pour la longueur racinaire du blé dur.

|            | DDL | S.C.E  | C.M     | F. Observé | P-value    |
|------------|-----|--------|---------|------------|------------|
| Sol        | 1   | 4,998  | 4,9976  | 16,0291    | 0,001024   |
| Sp         | 3   | 36,015 | 12,0051 | 38,5048    | 1,513 e-07 |
| résiduelle | 16  | 4,988  | 0,3118  |            |            |

Le test de Newman et Keuls (tableau XII) a donné trois groupes homogènes ; A renfermant la fève et B dans lequel se trouvent la luzerne et le maïs et enfin C qui contient le témoin ce qui montre qu'il y'a une différence entre les valeurs de la longueur racinaire dans les sols cultivés avec les différents espèces. Par contre, le test a donné deux groupes homogènes sur le terrain A qui renferme la fève et B dans lequel nous retrouvons la luzerne, le maïs et le témoin (tableau(XIII)).

**Tableau XIII :** Test de Newman et Keuls pour la longueur racinaire au laboratoire.

| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | fève     | 4,8516   | A                 |
| 2           | Luzerne  | 2,9975   | B                 |
| 3           | Maïs     | 2,3727   | B                 |
| 4           | témoin   | 1,8145   | C                 |

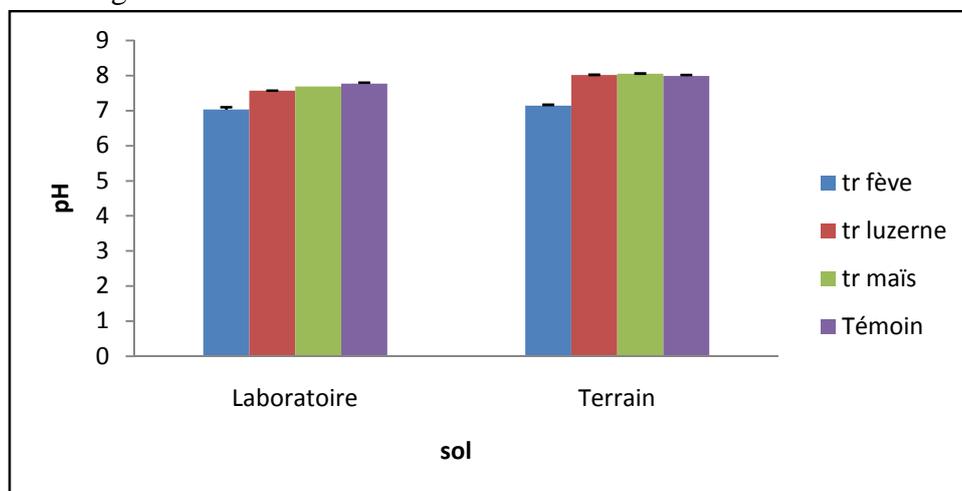
**Tableau XIV :** Test de Newman et Keuls pour la longueur racinaire sur le terrain.

| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | fève     | 4,4081   | A                 |
| 2           | Luzerne  | 1,5179   | B                 |
| 3           | Maïs     | 1,1139   | B                 |
| 4           | témoin   | 1,3459   | B                 |

### I-3-Effet des hydrocarbures sur les propriétés chimiques du sol

#### I-3-1-Potentiel d'Hydrogène (pH)

Les résultats des mesures du pH pour les échantillons du sol cultivés et sol témoin sont illustrés dans la figure 14.



**Figure 14:** pH du sol témoin et du sol cultivé par les différentes espèces.

D'après cette figure, nous constatons que la valeur la plus élevée est celle du sol cultivé avec le maïs sur le terrain avec un pH de 8,05, suivi de la luzerne sur le terrain et les deux témoins celui du terrain et celui du laboratoire ainsi que le maïs dans le laboratoire. Les petites valeurs enregistrées pour le pH sont enregistrées dans les sols cultivés avec la fève avec un pH de 7,14 pour la fève sur le terrain et 7,03 pour celle du laboratoire.

L'analyse de la variance des résultats du pH des échantillons de sol cultivés avec les différentes espèces a révélé qu'il y avait une différence significative pour le facteur sol et très hautement significative pour le facteur espèce (Tableau XIV).

**Tableau XV :** Analyse de la variance pour les valeurs du pH.

|            | DDL | S.C.E   | C.M     | F. Observé | P-value   |
|------------|-----|---------|---------|------------|-----------|
| Sol        | 1   | 0,49594 | 0,49594 | 5,8659     | 0,0276810 |
| Sp         | 3   | 2,66325 | 0,88775 | 10,5002    | 0,0004629 |
| résiduelle | 16  | 1,35273 | 0,08455 |            |           |

Le test de Newman et Keuls a donné deux groupes homogènes (tableau XV) ; A qui renferme le témoin, le maïs et la luzerne et B dans lequel on trouve seulement la fève. Le même classement est donné pour l'essai de terrain (tableau XVI), ce qui montre que les espèces végétales agissent différemment sur le pH du sol.

**Tableau XVI:** Test de Newman et Keuls pour les valeurs pH au laboratoire.

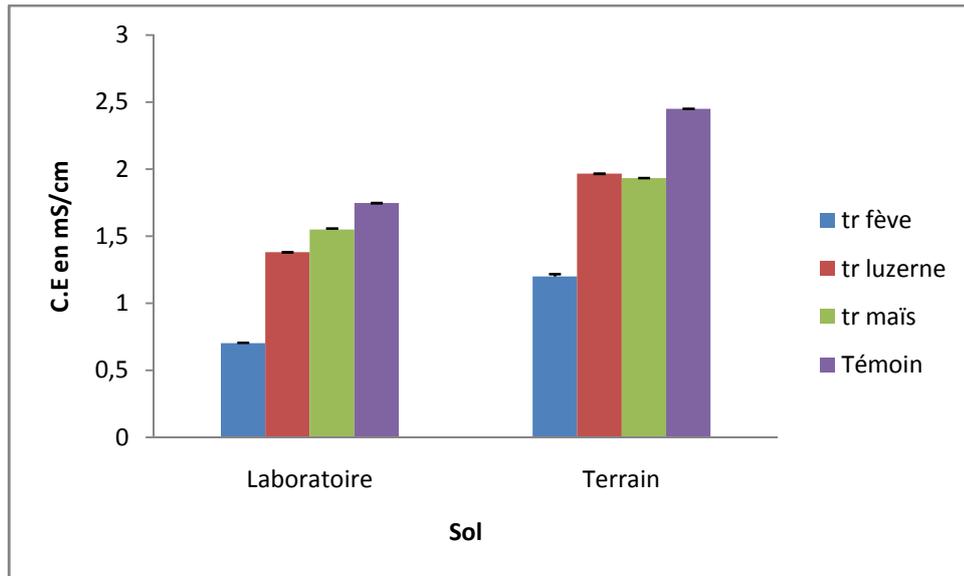
| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | Témoin   | 7,77     | A                 |
| 2           | Maïs     | 7,69     | A                 |
| 3           | Luzerne  | 7,57     | A                 |
| 4           | Fève     | 7,03     | B                 |

**Tableau XVII:** Test de Newman et Keuls pour les valeurs pH sur le terrain.

| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | Témoin   | 7,99     | A                 |
| 2           | Maïs     | 8,05     | A                 |
| 3           | Luzerne  | 8,02     | A                 |
| 4           | Fève     | 7,14     | B                 |

### I-3-2-Conductivité électrique (CE)

Les résultats des mesures de la conductivité électrique pour les échantillons du sol cultivés et sol témoin sont illustrés dans la figure 15.



**Figure 15:** Conductivité du sol témoin et du sol cultivé par les différentes espèces.

D’après cette figure, nous constatons que la valeur la plus élevée est celle du sol témoin sur le terrain avec une CE de  $2,45 \text{ mS/cm}^{-1}$ , suivi de la luzerne du maïs et du témoin du laboratoire. Les petites valeurs enregistrées pour la CE font référence aux sols cultivés avec la fève avec une valeur de  $1,2 \text{ mS/cm}^{-1}$  sur le terrain et  $0,7 \text{ mS/cm}^{-1}$  pour celle du laboratoire.

L’analyse de la variance des résultats de la mesure de la conductivité électrique des différents échantillons du sol cultivés avec les différentes espèces a révélé qu’il n’y avait pas de différences significatives ni pour le facteur sol ni pour le facteur espèce (Tableau XVII).

**Tableau XVIII:** Analyse de la variance pour Les valeurs de la conductivité électrique.

|            | DDL | S.C.E  | C.M     | F. Observé | P-value |
|------------|-----|--------|---------|------------|---------|
| Sol        | 1   | 1,7658 | 1,76584 | 3,1535     | 0,09478 |
| Sp         | 3   | 4,1584 | 1,38613 | 2,4754     | 0,09875 |
| résiduelle | 16  | 8,9593 | 0,55995 |            |         |

Le test de Newman et Keuls a donné un seul groupe homogène le A et dans le quel nous retrouvons la fève, la luzerne, le maïs et le témoin, au laboratoire et sur le terrain.

**Tableau XIX:** Test de Newman et Keuls pour les valeurs de la conductivité électrique au laboratoire.

| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | Témoin   | 1,74     | A                 |
| 2           | Maïs     | 1,55     | A                 |
| 3           | Luzerne  | 1,38     | A                 |
| 4           | Fève     | 0,7      | A                 |

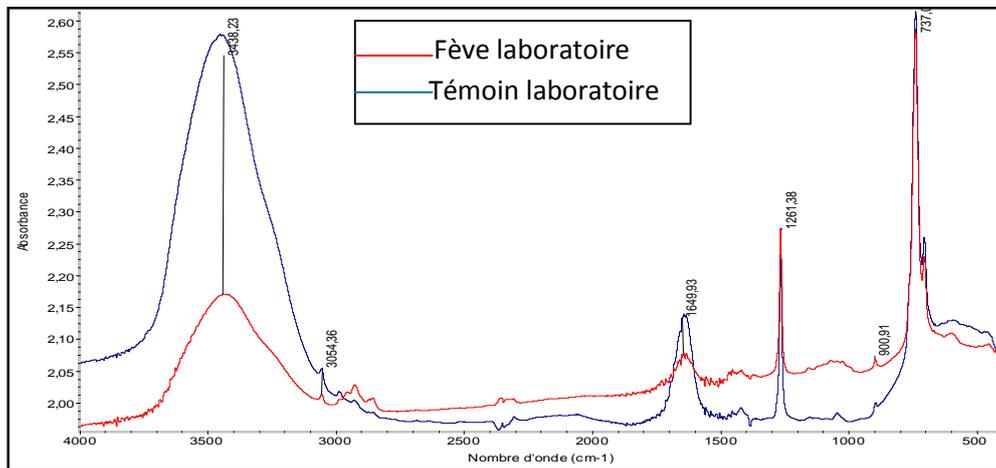
**Tableau XX:** Test de Newman et Keuls pour les valeurs de la conductivité électrique sur le terrain.

| Traitements | Libelles | Moyennes | Groupes homogènes |
|-------------|----------|----------|-------------------|
| 1           | Témoin   | 2,45     | A                 |
| 2           | Maïs     | 1,93     | A                 |
| 3           | Luzerne  | 1,96     | A                 |
| 4           | Fève     | 1,2      | A                 |

### I-3-3-Analyse par spectroscopie infrarouge (FTIR)

Cette méthode d'analyse étant basée sur les énergies de liaisons (vibration, rotation, élongation), toute modification au niveau des liaisons chimiques des carburants entraîne un changement dans le spectre.

Le spectre IR du sol traité avec la fève au laboratoire fait apparaître une série de pics qui sont représentés dans la figure 16.

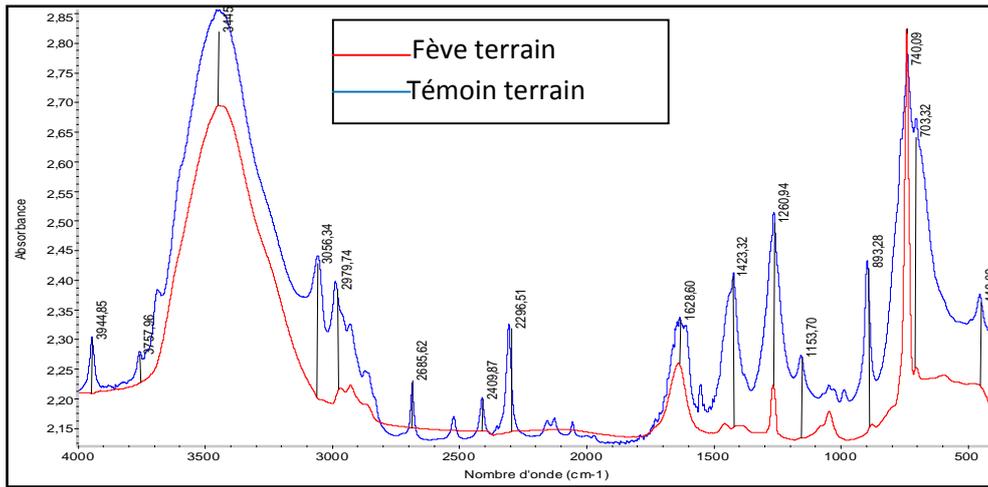


**Figure 16:** Spectre FTIR du sol cultivé par la fève et du sol témoin (Laboratoire).

Le spectre IR du sol traité avec la fève au laboratoire fait apparaître plusieurs pics dont le plus intense est à  $737.02\text{ cm}^{-1}$  correspondant au groupe chimique fonctionnel Alcènes. Le second à  $1261,38\text{ cm}^{-1}$  correspond au groupe chimique fonctionnel esters et la bande située à  $3438,23\text{ cm}^{-1}$  correspond au groupement OH de la fonction alcool lié.

Nous avons noté une diminution de l'intensité de la bande située à  $3438,23\text{ cm}^{-1}$  qui correspond au groupement OH de la fonction alcool lié, par rapport au sol témoin, ainsi qu'une diminution du pic correspondant au groupe fonctionnel alcènes à  $1649,93$ , et nous avons enregistré une apparition d'un pic avec une intensité de  $900,91$  qui correspond au groupement fonctionnel alcane.

Le spectre IR du sol traité avec la fève sur le terrain fait apparaître une série de pics qui sont représentés dans la figure 17.



**Figure 17:** Spectre FTIR du sol cultivé par la fève et du sol témoin (Terrain).

Le spectre IR du sol traité avec la fève sur le terrain fait apparaître plusieurs pics dont le plus intense est à  $740,09 \text{ cm}^{-1}$  correspondants au groupe chimique fonctionnel Alcènes. Le second à  $1260,94 \text{ cm}^{-1}$  correspond au groupe chimique fonctionnel éthers, et la bande située à  $3445,12 \text{ cm}^{-1}$  correspond au groupement OH de la fonction alcool lié.

Nous avons noté pour le spectre du sol traité par la fève sur le terrain une légère diminution de l'intensité de la bande située à  $3445,12 \text{ cm}^{-1}$  qui correspond au groupement OH de la fonction alcool lié par rapport au sol témoin et nous avons enregistré la disparition ou une grande diminution de quelques pics dont les plus importants sont à  $3056,34$  ;  $2979,74$  et  $2296,51$  qui correspondent respectivement aux groupements fonctionnels alcènes, alcanes et aldéhydes.

## II-Discussion

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 la luzerne et le maïs surtout sur le terrain où nous n'avons pas observé la levée de ces dernières. Cela peut être dû à la capacité des graines de la fève à tolérer la pollution par les hydrocarbures plus que celles de la luzerne ou encore celles du maïs et/ou à la pollution chronique que subit le site suite aux rejets continus issus du trop plein de réservoir.

D'après les résultats de Chaineau et ses collaborateurs (1997), les graines n'ont pas la même capacité de résistance à la contamination par les hydrocarbures, car ces derniers peuvent entrer dans les graines, empêcher les réactions métaboliques et tuer l'embryon par une toxicité aigüe directe.

D'après les résultats obtenus sur le terrain, il est probable qu'ils soient dus aux conditions climatiques (la luzerne et le maïs ne supporte pas les basses températures) et environnementales du site, ce qui a induit la diminution du taux de levée, contrairement aux études effectués au laboratoire dans des conditions plus au moins contrôlées et c'est ce qui est confirmé par les travaux de Vila (2006).

Concernant la hauteur des plants, nous avons remarqué une croissance rapide des plants de la fève par rapport à ceux de la luzerne et du maïs, l'effet des hydrocarbures a été observé à travers le ralentissement de croissance des plants de ces derniers.

D'après Duchauffour (1997), les hydrocarbures perturbent la croissance des végétaux et leur phytotoxicité dépend des espèces.

Chaineau et *al.* (1997) ont associé la réduction de la croissance des plantes lors d'une contamination par les hydrocarbures au déficit nutritif causé par la présence de ces polluants. La phytotoxicité des hydrocarbures inhibe pour une longue période le développement de la végétation. Ali Ahmed et Belkaid (2006) ont montré que la croissance des plantes telles que la luzerne était significativement réduite en présence des hydrocarbures.

Pour la biomasse végétale, nous avons enregistré la plus grande valeur pour la fève. Et les travaux réalisés par Zerrouki et Ouhadda (2013) sur la luzerne et la fève et ceux réalisés par Moula et Mahlal (2011) sur le maïs ont démontré que les hydrocarbures réduisaient le poids sec de la partie aérienne et de la partie racinaire de ces espèces.

Selon Chaineau et *al.* (1997), l'effet toxique des hydrocarbures sur les parties aériennes et racinaires s'exprime par un retard significatif de la croissance (diminution de la hauteur des plants, du nombre de feuilles, de la longueur des racines...), cette diminution se traduit par la réduction du poids sec.

Par ailleurs, nous avons observé un noircissement des plants de la fève. D'après les travaux de Schnoor et Cutcheon (2003), les plantes peuvent absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker.

Les résultats obtenus dans notre travail montrent qu'il y a une réduction de la partie racinaire surtout pour la luzerne et le maïs, ce qui explique la diminution du volume racinaire. Les travaux déjà par Zerrouki et Ouhadda (2013) sur le volume racinaire confirment que le milieu favorable pour la croissance des racines est un milieu sain (non contaminé) pour que la plante présente un système racinaire très développé. L'atteinte des racines peut être due au changement des propriétés du sol et/ou à la diminution des éléments nutritifs, qui sont corrélés aux propriétés des hydrocarbures.

Aussi, Njoku et *al.* (2009) ont noté que la pollution du sol par les hydrocarbures entraînait une faible perméabilité et une faible infiltration de l'eau dans le sol, qui affectent le développement des racines.

D'après Norini (2007), la diminution de la croissance racinaire peut être due aux propriétés hydrophobes des hydrocarbures qui peuvent limiter l'effet bénéfique de l'association plante-microorganismes. Cette atteinte des racines ne permet pas à la plante d'augmenter sa surface de contact avec son milieu de culture pour optimiser sa nutrition.

Vila (2006) note que les plantes ayant un système racinaire large et dense sont privilégiées car elles ont une plus grande capacité d'absorption et elles explorent une zone plus vaste dans le sol.

La comparaison de nos résultats à ceux obtenus dans des études réalisés préalablement par Ould Rabah (2012) et Zerrouki et Ouhadda (2013) sur la toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes, nous a permis de déduire que les légumineuses ont eu un rendement végétal plus important que les graminées, notamment la fève.

D'après les résultats du pH obtenus dans notre expérimentation, nous avons enregistré une meilleure valeur du pH (pH neutre) pour le sol traité par la fève dans le laboratoire et sur le terrain. Selon Abdelly (2007), les plantes sont capables d'absorber et de métaboliser les polluants organiques, et en plus elles sécrètent des exsudats racinaires qui stimulent la bioremediation microbienne au niveau de la rhizosphère, ces exsudats génèrent des acides organiques qui peuvent participer à la diminution du pH du sol.

Les travaux de Vila (2006) confirment que la composition chimique des exsudats racinaires et les taux d'exsudation varient considérablement selon les espèces et que la nature de l'exsudat conditionne son efficacité, ce qui explique la différence entre les valeurs du pH dans les sols traités par les différentes espèces végétales et les sols témoins.

Pour les résultats de la conductivité électrique, nous avons noté une diminution de celle-ci dans le sol traité avec la fève par rapport aux autres espèces utilisées. Selon les travaux réalisés par Khajehnouri (2011) cités par Amiri (2013) sur les propriétés électriques des sols contaminés par les hydrocarbures, la conductivité électrique du sol contaminé croît avec l'augmentation de la saturation en hydrocarbure. Donc, la diminution de la CE dans le sol cultivé par la fève nous laisse supposer que la quantité des hydrocarbures a diminué dans ce sol.

Concernant le taux de germination du blé dur, nous avons enregistré la plus grande valeur pour le sol cultivé par la fève et nous estimons que les faibles taux obtenus dans les sols témoins et ceux traités par le maïs et la luzerne sont dus à l'effet toxique des hydrocarbures exercé sur les graines du blé ou encore à ses effets sur les propriétés physico-chimiques des sols traités. Ceci signifierait que la quantité d'hydrocarbures était encore importante dans ces sols.

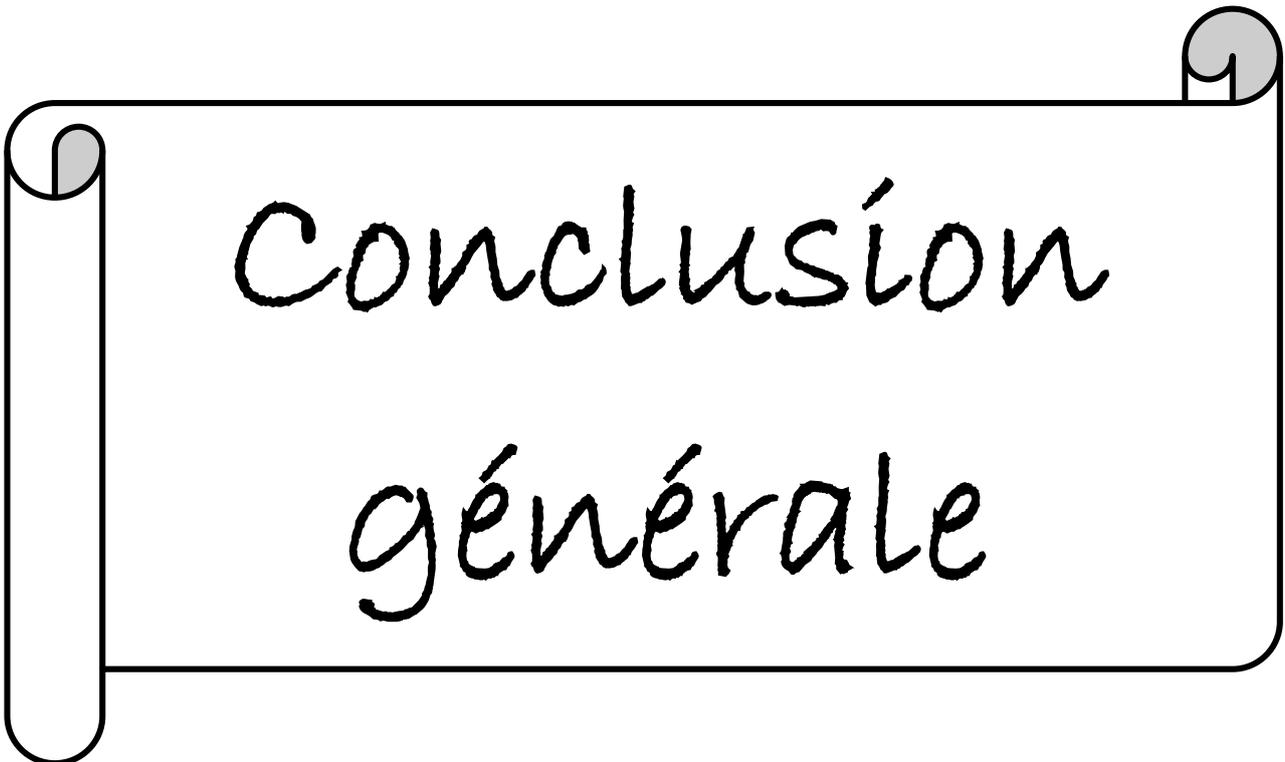
En effet, Chaineau *et al.* (1997) notent que les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, atteindre et altérer les réactions métaboliques et/ou tuer l'embryon au contact direct.

C'est essentiellement la fraction légère des hydrocarbures qui induit une réduction assez significative de la germination (Chaineau *et al.*, 1997).

En outre, la germination est corrélée avec les propriétés hydrophobes des hydrocarbures qui empêchent et/ou réduisent les échanges d'eau et de gaz (Amakiri et Onofeghara, 1984 ; Amadi *et al.*, 1992 ; Udo et Fayemi, 1975 in Chaineau *et al.*, 1997).

Les modifications des groupements fonctionnels caractéristiques des hydrocarbures confirment la biodégradation de ces derniers dans les sols traités par phytoremediation, ce qui renforce l'idée que la fève est très efficace dans la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures.

Les travaux de Schnoor et Cutcheon (2003) ont confirmé l'efficacité de dégradation des hydrocarbures dans la rhizosphère. Les mécanismes mis en jeu sont multiples : l'effet direct des enzymes végétales, l'aération due aux racines, la consommation d'eau, l'augmentation de l'activité des micro-organismes.



CONCLUSIÓN  
GÉNÉRAL

Au cours de ce travail, nous avons procédé à la réalisation d'un essai de phytoremediation au laboratoire et sur le terrain, d'un sol pollué aux carburants en utilisant deux légumineuses à savoir la fève (*Vicia faba* L.) et la luzerne (*Medicago sativa* L.) et d'une graminée ; le maïs (*Zea mays* L.) à remédier ces sols pollués.

D'après les résultats obtenus au cours de notre travail, nous pouvons conclure que l'action des hydrocarbures se traduit par une diminution du rendement végétal confirmée par le taux de levée, la hauteur des plants, le volume racinaire et la biomasse végétale. Cela a été observé en comparant un sol témoin à un sol contaminé par l'essence super et le gasoil. La fève a été l'espèce la plus résistante à la toxicité des hydrocarbures comparativement à la luzerne et maïs.

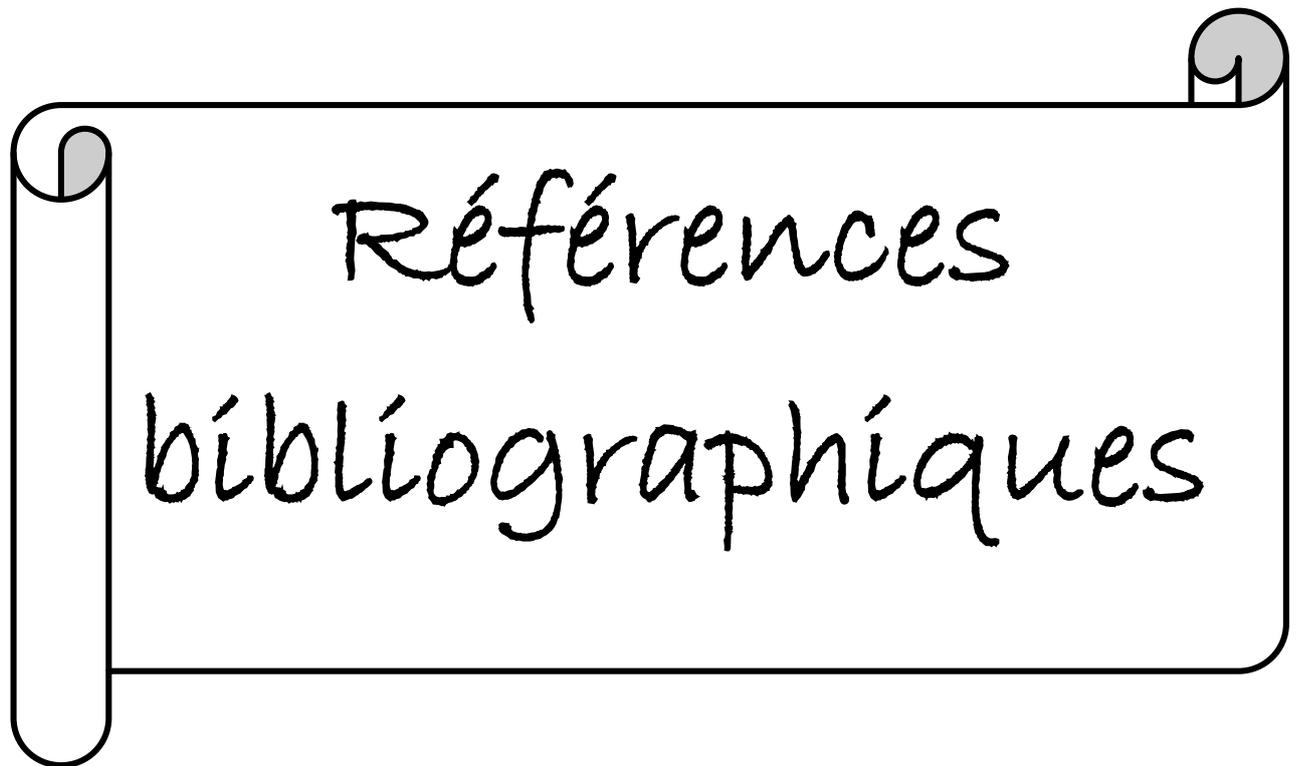
Nous avons aussi observé qu'il y'avait une biodégradation des hydrocarbures dans les sols traités (cultivés) qui s'est traduite par la diminution du pH et de la conductivité et l'élévation du taux de germination ainsi que la longueur racinaire du blé.

L'analyse par spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) a montré des modifications de quelques pics et quelques bandes caractéristiques des groupements fonctionnels relatifs aux hydrocarbures, ce qui est a confirmé leur dégradation.

Au vu de ces résultats, nous pouvons dire que cet essai de phytoremediation par la fève a été satisfaisant et a confirmé les bons résultats obtenus antérieurement avec cette espèce ; elle peut donc être utilisée dans la décontamination des sites pollués par les hydrocarbures.

Enfin, nous proposons quelques perspectives à savoir :

- Réaliser le semis sur différentes périodes de l'année pour voir si les facteurs climatiques n'influencent pas sur les résultats des expériences surtout pour le maïs et la luzerne.
- La réalisation d'une étude approfondie sur les microorganismes de la rhizosphère de la fève et de la luzerne pour comprendre les mécanismes de dégradation qui s'y déroulent.
- L'extraction des carburants à partir des plantes après un essai de phytoremediation pour élucider les mécanismes par lesquels ces plantes décontaminent le sol.
- La réalisation d'une étude sur les associations microbiennes des racines de la fève.
- La réalisation d'une étude sur la génétique de la fève pour comprendre la résistance de cette espèce à une certaine concentration des hydrocarbures dans le sol.



Références  
bibliographiques

**Abdelly C. 2007** : Bioremédiation, Phytoremediation. Université de Tunis. Institut Supérieur de l'Éducation et de la Formation Continue. Département des Sciences. Série N° 232.

**Abib L., Ali Ahmed S. 1998** : Effet des cinq précédent culturaux 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.

**Ali Ahmed H., Belkaid H. 2006** : Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes et micro-organismes du sol et essai de la phytoremediation. 87 pp. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Amiri N. 2013** : Ecotoxicité des hydrocarbures sur le sol et un essai de décontamination biologique. 48 pp. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Arnaud P. 2004** : Chimie organique. Edition DUNOD. Paris. 208 pp.

**Battaz S. 2009** : Etude comparative de la dégradation d'une terre polluée par les hydrocarbures lourds. 122 pp. Mémoire de magister. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Bergue J. 1986** : La pollution des sols par les hydrocarbures. Laboratoire régionale de Rouen : **3141** : 57-68.

**Chaîneau H., Morel J., Oudot J. 1997**: Phytotoxicité and plant uptake of fuel oil. HC.J.environ: **26**:1478 -1483.

**Chaux F. 2003** : productions légumières, légumineuses potagères, légumes fruits. CL. Foury. Tome3. 563 pp.

**Clément M., Pieltain F. 2009** : Analyse chimique des sols, méthodes choisies. Edition Tec et Doc. Paris. 317 pp.

**Colin F. 2000** : Pollution localisée des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Edition Tec et Doc. Paris. 417pp.

**Cronquist A. 1981**: an integrated system of classification of flowing plants. New York university press.

**Davet P. 1996** : la vie microbienne du sol et la production végétale. Edition INRA. 367pp.

**Djerbaoui A. 2011** : Utilisation de souches bactériennes autochtones dans la production de biosurfactant et la bioremediation des sols de Hassi Messaoud contaminé par les hydrocarbures. 62 pp. Thèse de magister. Université de Kasdi Merbah de Ouargla.

**Duchauffour P. 1997** : Abrégé de pédologie : Sol, végétation, environnement. 5<sup>e</sup> édition Masson. Paris. 291 pp.

**Duchauffour P. 2001** : Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6<sup>e</sup> édition Masson. Paris. 498pp.

**Fattal P. 2008** : Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Rennes. 498pp.

**Fezani S., Khider F. 2007** : Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes, leurs caractérisations et leurs effets sur la microflore du sol. 73pp. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Gattellier C., Gaudin C., Rogier Ph. 1974** : Conséquences d'un déversement d'hydrocarbures dans le sol et techniques applicables à une réhabilitation, XIIIe journées de l'hydraulique, Question VI, Rapport 2, Paris.

**Girard C., Walter C., Rémy J. C., Berthlin J., Morel J. 2005** : Sol et environnement. Edition DUNOD, Paris. 529 pp

**Koller E. 2004** : traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchet, sol, boues). Edition DUNOD. Paris. 424 pp.

**Koller E. 2009** : Traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchet, sol, boues). Edition DUNOD. 2<sup>ème</sup> Edition. Paris. 424 pp.

**Lakroun A. 1995** : Etude d'aménagement et d'entretien de la rivière de haut Sébaou, (grande Kabylie). 157pp. Thèse de magister en agronomie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Lecomte P. 1998** : Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. 2<sup>ème</sup> édition. Edition TEC et DOC. Paris. 204 pp.

**Mahlal M., Moula S. 2011** : Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de deux plantes (*Zea mays* L., *Sorghum bicolor* L.), et du sol: essai de phytoremediation. 88 pp. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Mathieu M. 1994** : la luzerne aujourd'hui. 1<sup>ère</sup> édition. Edition France agricole. 145 pp.

**Mattei G. 1995** : Biodégradation des hydrocarbures d'origine pétrolière : **02** : 22-24.

**Njoku N., Akinola O., Oboh B. 2008**: Phytoremediation of crude oil contaminated soil .Marslandpress: 80-85.

**Norini M., 2007** : Eco dynamique des hydrocarbures aromatiques polycyclique et des communautés microbiennes dans les sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique : influence de la rhizosphère et de la mycorhization. 243 pp. Thèse doctorat. Université Henri Poincaré, Nancy 1. France.

**Nyabyenda P. 2005 :** Les plantes cultivées en régions tropicales d'altitudes d'Afrique. Edition les presses agronomiques de Gembloux. 465 pp.

**Origo N., Wicherek S., HOYAT M., 2012 :** Réhabilitation des sites pollués par phytoremediation. Revue électronique en science de l'environnement *Vertige* : **12** : 9-13.

**Ouahabi A. 2012 :** Les trois grandes classes de procédés pétrochimiques. Master varenape. 185pp.

**Ould Rabah N. 2012 :** Essai de phytoremediation des sols contaminés par les hydrocarbures. 105pp. Mémoire de Magister en Biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

**Ramade F. 1992 :** précis d'écotoxicologie. Edition Massoun. Paris. 300pp.

**Riviere J. 1998 :** Evaluation des risques écologiques des sols pollués. Edition. Tec & DOC. 193 pp.

**Rouquerol T., Amir H. et Amir A. 1987 :** Effet de l'épandage de résidu pétrolier 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 : 104-108.

**Saada A., Nowak C., Coquereau N. 2005 :** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures, rapport intermédiaire, résultat de la phase 1.

**Schnoor J., Cutcheon S. 2003:** Phytoremediation- Transformation and control of contaminants. Dans Wiley-interscience, Inc, NJ, USA, 987.

**Soltani M. 2004 :** Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre souches Gram négatif hydrocarbonoclastes, variation en fonction de la source de carbone. 281pp. Thèse de doctorat de l'université de Paris.

**Soltner D. 1990:** La grande production végétale. 17<sup>ème</sup> édition. Edition collection sciences et techniques agricoles. France. 457pp.

**Tissot B., Welte D. 1984:** Petroleum formation and occurrence. Springer, Berlin. 368 pp.

**Vila M. 2006 :** Utilisation de plantes agronomiques et lacustres dans la dépollution des sols contaminés par le RDX et le TNT .Approche en laboratoire : **02** : 4-6.

**Vogel T. 2001 :** Biorestoration des sols et des aquifères contaminés par des hydrocarbures et des composés halogénés. *Bull.Soc.Fr.Microbiol* :**16** : 204- 209.

**Zerrouki R., Ouhadda M. 2013 :** Phytotoxicité des hydrocarbures vis-à-vis de la luzerne, du pois et de la fève. 56pp. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.



Annexes

**Annexe I : Résultats des tests de l'effet des hydrocarbures sur les plantes.**

**I-1 : Taux de levée des différentes espèces (fève, luzerne, maïs) cultivées dans le laboratoire et dans le terrain.**

| <b>Taux de levée</b> \ <b>Sol</b> | <b>Fève</b> | <b>Luzerne</b> | <b>Maïs</b> |
|-----------------------------------|-------------|----------------|-------------|
| <b>Laboratoire</b>                | 88,88       | 63,33          | 27,78       |
| <b>Terrain</b>                    | 73,33       | 0              | 0           |

**I-2 : Hauteur des plants des différentes espèces cultivées dans le laboratoire et dans le terrain.**

| <b>Durée</b> \ <b>Sol</b>  | <b>1<sup>ère</sup> semaine</b> | <b>2<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>3<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>4<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>5<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>6<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>7<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>8<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>9<sup>ème</sup> semaine</b> | <b>10<sup>ème</sup> semaine</b> |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>Fève laboratoire</b>    | 3,56                           | 14,31                          | 24,23                          | 30,72                          | 39,83                          | 44,31                          | 50,03                          | 53,28                          | 55,45                          | 62,27                           |
| <b>Fève terrain</b>        | 2,6                            | 6,77                           | 15,9                           | 19,26                          | 24,04                          | 27,47                          | 30,09                          | 32,5                           | 35,26                          | 38                              |
| <b>Maïs laboratoire</b>    | 0                              | 2,1                            | 4,18                           | 6,54                           | 7,66                           | 8,01                           | 8,97                           | 9,23                           | 9,4                            | 10,45                           |
| <b>Maïs terrain</b>        | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                               |
| <b>Luzerne laboratoire</b> | 0,66                           | 1,08                           | 1,66                           | 2,16                           | 2,5                            | 2,73                           | 2,57                           | 3,26                           | 4,03                           | 4,47                            |
| <b>Luzerne terrain</b>     | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                              | 0                               |

**I-3 : Biomasse végétale des différentes espèces cultivées dans le laboratoire et dans le terrain.**

| <b>Sol</b>                 | <b>Biomasse végétale (g)</b> | <b>Biomasse aérienne</b> | <b>Biomasse racinaire</b> |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| <b>Fève laboratoire</b>    |                              | 3,06                     | 0,33                      |
| <b>Fève terrain</b>        |                              | 3,12                     | 0,8                       |
| <b>Maïs laboratoire</b>    |                              | 1,25                     | 0,17                      |
| <b>Luzerne laboratoire</b> |                              | 0,014                    | 0,001                     |

**I-4** : Volume racinaire des différentes espèces cultivées dans le laboratoire et dans le terrain.

| Sol                          | Fève<br>laboratoire | Fève terrain | Maïs laboratoire | Luzerne<br>laboratoire |
|------------------------------|---------------------|--------------|------------------|------------------------|
| <b>Volume racinaire (ml)</b> | 2,11                | 2,33         | 1                | 0,5                    |

**Annexe II** : Résultats de l'effet des hydrocarbures sur les propriétés du sol

**II-1** : Mesure de pH du sol témoin et du sol cultivé par différentes espèces.

| <b>pH</b> / Sol    | Fève | Luzerne | Maïs | Témoin |
|--------------------|------|---------|------|--------|
| <b>Laboratoire</b> | 7,03 | 7,57    | 7,69 | 7,77   |
| <b>Terrain</b>     | 7,14 | 8,02    | 8,05 | 7,99   |

**II-2** : Mesure de C.E du sol témoin et du sol cultivé par différentes espèces.

| <b>C.E</b> / Sol<br>( $\text{ms/cm}^{-1}$ ) | Fève | Luzerne | Maïs | Témoin |
|---|------|---------|------|--------|
| <b>Laboratoire</b>                          | 0,7  | 1,38    | 1,55 | 1,74   |
| <b>Terrain</b>                              | 1,2  | 1,96    | 1,93 | 2,45   |

**II-3** : taux de germination du blé dur dans les échantillons du sol traités préalablement par la fève, la luzerne et le maïs ainsi que le sol témoin au laboratoire et sur le terrain.

| Expériences | Répétition | Taux de germination |
|-------------|------------|---------------------|
| Laboratoire | Fève       | 97,333333           |
|             | Luzerne    | 81,666667           |
|             | Maïs       | 74                  |
|             | Témoin     | 63                  |
| Terrain     | Fève       | 93,666667           |
|             | Luzerne    | 59,666667           |
|             | Maïs       | 58,333333           |
|             | Témoin     | 54                  |

**II-4:** taux de germination du blé dur dans les échantillons du sol traités préalablement par la fève, la luzerne et le maïs ainsi que le sol témoin au laboratoire et sur le terrain.

| Expériences | Répétition | Longueur des racines |
|-------------|------------|----------------------|
| Laboratoire | Fève       | 4,8516885            |
|             | Luzerne    | 2,9975454            |
|             | Maïs       | 2,3727414            |
|             | Témoin     | 1,814594             |
| Terrain     | Fève       | 4,4081463            |
|             | Luzerne    | 1,517972             |
|             | Maïs       | 1,1139412            |
|             | Témoin     | 1,3459082            |

**Annexe III :** Normes d'interprétation selon le mémento de l'agronome (1993).

**III-1 :** Normes d'interprétation du pH.

| Valeur de pH | Quantification         |
|--------------|------------------------|
| <4.5         | Extrêmement acide      |
| 4 à 5        | Très fortement acide   |
| 5.1 à 5.5    | Fortement acide        |
| 5.6 à 6.5    | Faiblement acide       |
| 6.6 à 7.3    | Neutre                 |
| 7.4 à 7.8    | Légèrement alcalin     |
| 7.9 à 8.4    | Moyennement alcalin    |
| 8.5 à 9      | Fortement alcalin      |
| >9.1         | Très fortement alcalin |

**III-2 :** Norme de la C.E en (ms/cm) :

| Valeur de C.E en (ms/cm) | Quantification   |
|--------------------------|------------------|
| <0.6                     | Non salé         |
| 0.6 à 1.6                | Peu salé         |
| 1.6 à 2.4                | Salé             |
| 2.4 à 6.0                | Très salé        |
| >6                       | Extrêmement salé |

**III-3** : Tableau de vibration d'élongations :

| <b>Groupe ment fonctionnel</b> | <b>Intervalle d'ondes</b> |
|--------------------------------|---------------------------|
| Acides carboxyliques (C=O)     | 2300-2750                 |
| Alcanes (C-H)                  | 1340-1470                 |
| Alcanes (C-H)                  | 900-950                   |
| Alcanes(C-H)                   | 2850-2980                 |
| Alcènes (C=C)                  | 1610-1680                 |
| Alcènes (C=C)                  | 675-900                   |
| Alcènes (C-C)                  | 3020-3100                 |
| Alcools (O-H)                  | 1100-2000                 |
| Alcools libres (O-H)           | 3580-3950                 |
| Alcools liés (O-H)             | 3200-3550                 |
| Aldéhydes (C-H)                | 2190-2340                 |
| Arènes (C-H)                   | 400-450                   |
| Esters                         | 1230-1300                 |

## **Résumé**

Bien que les sols soient contaminés par différents produits, il existe souvent des méthodes de dépollution et de réhabilitation des sites contaminés par les polluants organiques et inorganiques.

L'objectif de notre travail est de tenter de dépolluer un sol agricole contaminé par les hydrocarbures qui sont le gasoil et l'essence super par le biais d'un procédé biologique qui est la phytoremediation en utilisant la fève (*Vicia faba* L.), la luzerne (*Medicago sativa* L.) et le maïs (*Zea mays* L) dans deux essais *in-situ* et *ex-situ*. Et essayer de réaliser une comparaison entre la résistance de ces trois espèces à dépolluer ce sol et comparer entre les deux essais.

En effet, sur la base des résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'effet des hydrocarbures peut être observés au niveau du végétal qui se traduit par : une diminution du taux de levée, hauteur des plantes, biomasse végétale, le volume racinaire, ainsi qu'une modification de quelques propriétés chimique du sol comme le pH et la conductivité électrique. De plus on a constaté une diminution de la quantité des hydrocarbures après avoir évalué la quantité résiduelle de ces derniers.

Nous avons constaté que la fève résiste plus à la pollution est que le meilleur traitement a été enregistré sur le terrain.

## **Abstract**

Although the grounds are contaminated by various products, there exist often methods of depollution and rehabilitation of the sites contaminated by the organic and inorganic pollutants.

The objective of our work is to try to cleanse an agricultural ground contaminated by the hydrocarbons which are the gas oil and super gasoline by the means of a biological process which is the phytoremediation by using broad bean (*Vitiated faba* L.), the alfalfa (*Medicago sativa* L.) and the corn (*Zea mays* L) in two test *in-situ* and *ex-situ*. And to try to carry out a comparison enters the resistance of these three species to cleanse this ground and to compare between the two tests.

Indeed, on the basis of result obtained, we can conclude that the effect of hydrocarbons can be observed on the level of the plant which results in: a reduction in the rate of lifting, height of the plants, vegetable biomass, racinaire volume, as well as a modification of some properties chemical of the ground like the pH and electric conductivity. Moreover one noted a reduction in the quantity of hydrocarbons after having evaluated the residual quantity of the latter.

We noted that the broad bean resists pollution more is than the best treatment was recorded on the ground.