

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et Agronomiques

Département de Biologie Animale et Végétale



Mémoire



De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master En biologie
Spécialité : Protection de l'environnement

Thème

*Essai de phytoremédiation d'un sol pollué
aux hydrocarbures en utilisant la fève, les
pois et l'orge*

Réalisé par :

Melle BERKOUICHE Houria.

Melle HADJADJ Hacina.

Devant le jury :

Présidente : M^{me} SADOUDI D.

Professeur à l'U.M.M.T.O

Promotrice: M^{elle} ALI AHMED S.

M A à l'U.M.M.T.O

Examineurs:

Mr MEDJBEUR D.

M A à l'U.M.M.T.O

M^{me} LEMEBROUK L.

D à l'U.M.M.T.O

Promotion 2014 / 2015

Remerciements

En premier, nous remercions ALLAH de nous avoir donné santé, patience et courage pour mener à terme ce modeste travail ;

Notre promotrice M^{elle} ALI AHMED S; maître assistante au département de biologie à L'UMMTO pour ses précieuses orientations, son aide et ses conseils judicieux, son soutien, ses encouragements et son souci de mener à terme ce travail.

Nous remercions aussi très sincèrement les membres de jury la présidente M^{me} SADOUDI D et les examinateurs M^{elle} et Mr MEDJBOUR d'avoir bien voulu accepté d'évaluer ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents que dieu tout puissant me les garde.

A tous mes amis(es) et à toute la promotion de protection de l'environnement ;

A Tous ceux et celles que j'aime et que me sont chers.

Houria

Liste des abréviations

pH : Potentiel d'hydrogène

CE : conductivité électrique

C_{org} : Carbone organique

FTIR : Technique d'analyse par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

N_{TOT} : Azote total

P : Phosphore

La liste des figures

Figure 1 : Mécanismes de transport des hydrocarbures après un déversement à la surface du sol	5
Figure 2 : Stratégies de la phytoremédiation.....	10
Figure 3 : La fève (<i>Vicia faba</i> . L).....	14
Figure 4 : les pois (<i>Pisum sativum</i> .L).....	15
Figure 5 : L'orge (<i>Hordium vulgare</i> L.da.).....	16
Figure 6 : Dispositif expérimental de l'essai au laboratoire.....	20
Figure 7 : Taux de levée de la fève, pois et l'orge dans les sols témoins et contaminés.....	24
Figure 8 : hauteur des plants de la fève dans le sol contaminé et témoin.....	27
Figure 9 : Hauteur des plants du pois dans les sols témoin et contaminé par les hydrocarbures.....	27
Figure 10: Hauteur des plants de l'orge dans le sol témoin et contaminé par les hydrocarbures.....	28
Figure 11 : la biomasse aérienne de la fève, du pois et de l'orge dans le sol témoin et contaminé.....	30
Figure 12 : la biomasse racinaire de la fève, du pois et de l'orge dans le sol témoin et contaminé.....	33
Figure 13 : le volume racinaire de la fève, du pois et de l'orge dans les sols témoin et contaminé.....	35
Figure 14 : la longueur de la racine principale de la fève, du pois et de l'orge dans les sols témoin et contaminé.....	37
Figure 15: Mesure du pH des sols contaminés cultivés par les trois espèces et le sol contaminé non cultivé.....	40
Figure 16: Mesure de la conductivité électrique des sols contaminés cultivés par les trois espèces et du sol contaminé non cultivé.....	42

Figure 17: Mesure de la longueur des racines du blé dans les différents sols cultivés et dans le sol non cultivé.....	43
Figure 18 : Taux de germination des graines du blé dans les différents sols contaminés cultivés et dans le sol contaminé non cultivé.....	45
Figure 19 : Spectre FTIR de sol contaminé non cultivé, contaminé cultivé par le pois et de sol contaminé cultivé par l'orge.....	47

Liste des tableaux

Tableau I : Différent traitements de bioremédiation

Tableau II : les principaux essais de phytoremédiation réalisés à l'UMMTO.

Tableau III : Caractéristiques chimiques de l'échantillon du sol

Tableau IV : Analyse de la variance pour la levée des trois espèces dans les sols contaminés et témoins.

Tableau V : Groupes homogènes de la levée des trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Tableau VI : Groupes homogènes de la levée dans les deux sols déterminée par le test de Newman et Keuls.

Tableau VII: Analyse de la variance pour la hauteur des trois espèces dans les sols contaminés et témoins.

Tableau VIII : Groupes homogènes de la hauteur des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Tableau IX : Groupes homogènes de la hauteur des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Tableau X: Analyse de la variance pour la biomasse aérienne des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Tableau XI : Groupes homogènes de la biomasse aérienne des trois espèces déterminée par le test **Tableau XII :** Groupes homogènes de la biomasse aérienne dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Tableau XIII : Analyse de la variance pour la biomasse racinaire des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

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

Tableau XV: Groupes homogènes de la biomasse aérienne dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Tableau XVI : Analyse de la variance pour le volume racinaire des trois espèces dans les sols contaminés et les témoins.

Tableau XVII : Groupes homogènes de volume racinaire des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Tableau XVIII : Groupes homogènes de volume racinaire dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Tableau XIX : Analyse de la variance pour la longueur de la racine principale des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

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

Tableau XXI : Groupes homogènes de la longueur de la racine dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

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

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

Tableau XXIV : Analyse de la variance pour la longueur des racines des graines du blé dans le sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces.

Tableau XXV : Groupes homogènes de la longueur des racines des graines du blé dans les différents sols.

Tableau XXVI : Analyse de la variance pour la germination des graines du blé dans les différents sols.

Tableau XXVII : Groupes homogènes de la germination des graines du blé dans les différents sols.

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

Chapitre I : La bibliographie

I-Pollution du sol par les hydrocarbures.....	3
I-1-Définition des hydrocarbures	3
I-2-Classification des hydrocarbures.....	3
I -3-Source de pollution par les hydrocarbures.....	5
I-4-Devenir des polluants dans le sol.....	5
I-5-Impact des hydrocarbures.....	7
II-Moyens de décontamination.....	8
II-1-Méthodes physiques.....	8
II-2-Méthodes chimiques.....	8
II-3-Méthodes thermiques.....	9
II-Méthodes biologiques.....	9
III-Mécanismes de la phytoremédiation.....	10
IV-Quelques travaux réalisés en UMMTO sur la phytoremédiation.....	11

Chapitre II : Matériel et méthodes

1-Matériel.....	14
1-1-Matériel végétal.....	14
1-1-1-La fève.....	14
1-1-2-Les pois.....	15
1-1-3-L'orge.....	16
1-1-4-Le blé dur.....	17
1-2-Le sol.....	18

1-3- Les pots.....	18
2-Méthodes.....	19
2-1-Mise en place des cultures.....	19
2-2-Evaluation des effets des hydrocarbures sur la croissance des plantes.....	20
2-2-1-Le taux de levée.....	20
2.2.2. La hauteur des plants.....	21
2-2-3-Biomasse aérienne.....	21
2-2-4-Biomasse racinaire.....	21
2-2-5-Volume racinaire.....	21
2-2-6-Nombre de nodules	21
2-2-7-Longueur des racines	21
2-3-Effets des hydrocarbures sur les propriétés biologiques du sol	21
2-3-1- Test de germination	21
2-3-2- La longueur des racines.....	22
2-4-Effet des hydrocarbures sur le sol.....	22
2-4-1-Mesure du pH-eau	22
2-4-2- Mesure de la conductivité électrique (CE).....	22
2-4-3-L'analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)	23
2-5- Méthodes d'analyse statistiques	23

Chapitre III : Résultats et discussion

1-Effet des hydrocarbures sur le végétal	24
1-1-taux de levée	24
1-2- Hauteur des plants.....	27
1-3-Biomasse aérienne.....	30

1-4-Biomasse racinaire.....	33
1-5-volume racinaire.....	35
1-6-Longueur de la racine principale.....	37
2-Effet des hydrocarbures sur le sol	40
2-1-Effet sur le pH du sol.....	40
2-2- Conductivité électrique.....	42
2-3- Test de germination.....	43
3-Analyse par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	46
Conclusion.....	49

Les activités humaines, qu'elles soient industrielles, agricoles ou domestiques ont utilisés ou générés, depuis le début de développement industriel, des quantités croissantes de substances ou de déchets qui présentent des risques pour la santé de l'homme et qui peuvent dégrader son environnement (GIRARD, 2005).

La connaissance des risques environnementaux liés à la production des hydrocarbures est impérative pour faire face aux pollutions engendrées par ces derniers. Parmi les pollutions les plus spectaculaires générées par déversement des fluides pétroliers tels que le pétrole brut, le gasoil, le fuel, l'essence et le kérosène, il y'a la pollution du sol, donc certains polluants qui dérivent des activités pétrolières ont tendance à contaminer les sols dans les décharges ou les installations industrielles non contrôlées à l'occasion d'accidents de transport ou par le biais de rejets industriels (Lecomte, 1998).

Les produits pétroliers dont les stations-services sont parmi les principales causes des pollutions constatées par la corrosion des cuves de stockage, ou des fuites de canalisation entre les citernes et les ilots de pompes et séparation des hydrocarbures (Colin, 2001).

Etant donné que le sol est le support indispensable aux animaux, aux végétaux terrestres et à l'homme, toute pollution du sol retentira sur la flore, la faune et sur l'homme lui-même (Lecomte, 1998) d'où la nécessité de rétablir cet équilibre perdu, grâce à plusieurs techniques. La plus moderne et la plus efficace est la technique de décontamination par voie biologique appelée la biodécontamination, qui est une technologie de dépollution réelle qui détruit les composés toxiques, au lieu de les transférer, car la transformation génère le CO₂ et H₂O comme sous-produits finaux (Lecomte, 1998).

Dans le but d'évaluer l'effet toxique des hydrocarbures sur le sol et les plantes ainsi que d'évaluer la capacité des trois espèces à savoir la fève (*Vicia faba* L.), le pois (*Pisum sativum* L.) et l'orge (*Hordium vulgare* L.) à décontaminer un sol pollué par les hydrocarbures, nous avons entrepris un essai de phytoremédiation.

La phytoremédiation qui fait l'objet de notre étude, est une technologie de dépollution qui semble efficace vis-à-vis d'un large spectre de polluants organiques et inorganiques. Elle peut être utilisée sur des substrats solides (sols pollués), liquides (eaux contaminées) ou gazeux (filtration d'air chargé en composés nocifs volatils (Pilon-smits, 2005 in Ould rabah, 2012).

Plusieurs auteurs ont effectué récemment des travaux sur la phytoremédiation (Ait taye et Titouche 2011 ; Belkacem et Rouas 2012 ;) et ont abouti à des résultats satisfaisants en laboratoire. Mais l'efficacité de cette technique n'a pas été testée sur un sol pollué naturellement.

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

C'est dans cette optique que s'inscrit notre travail dont l'objectif principal est d'essayer de réhabiliter un sol pollué par les carburants (essence et gasoil) en utilisant la technique de phytoremédiation. L'étude est réalisée aussi dans le but de comparer entre l'efficacité des graminées et des légumineuses.

Le présent travail se subdivise en trois parties : La première consiste en un rappel bibliographique sur les hydrocarbures, la pollution du sol par les hydrocarbures et la description de certaines techniques de réhabilitation des sols contaminés par les hydrocarbures.

La deuxième partie rapporte le matériel utilisé et les méthodes adoptées pour réaliser ce travail. Un essai d'évaluation de la toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de deux espèces végétales légumineuses à savoir la fève (*Vicia faba* L.), le pois (*Pisum sativum* L.) et l'orge (*Hordeum vulgare* L.) qui appartient à la famille des graminées. Dans la troisième partie nous exposons les résultats obtenus et nous discuterons les principales observations faites au cours de notre expérimentation notamment :

- L'étude de quelques paramètres des espèces végétales à savoir le taux de levée, la hauteur des plantes, la longueur de racine principale, la biomasse végétale et le volume racinaire.

- L'étude de quelques paramètres du sol à savoir le pH, la conductivité et le test de germination.

- L'évaluation de la composition chimique du sol par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).

La conclusion générale termine ce travail, synthétise l'ensemble des résultats obtenus dans notre étude et donne les principaux objectifs de recherche pour sa poursuite en vue de son application à d'autres échelles et milieux.

La pollution est une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, à travers d'effet direct ou indirect altérant les critères de répartitions des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physicochimiques du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes. Ces modifications peuvent affecter l'homme directement ou à travers des ressources agricoles en eau et autres produits biologiques (Ramade, 1992).

I-Pollution des sols par les hydrocarbures

La pollution par les hydrocarbures (pétrole, essence, gasoil, huiles pour les moteurs, etc.) est très importante. Elle intervient dans 80% des cas des pollutions du sol. Elle est majoritairement accidentelle ou d'origine industrielle, due à des rejets volontaires ou non de produits pétroliers. Elle relève à la fois de la pollution chimiques et de la pollution organiques (Koller, 2004).

I-1-Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés contenant des atomes de carbone et d'hydrogène, avec parfois quelques atomes d'oxygène ou d'azote qui ne forment pas de groupements fonctionnels.

Ils présentent une grande importance commerciale. Ils sont utilisés comme carburants, combustibles, huiles lubrifiantes et produits de base en synthèse pétrochimique (Fattal, 2008).

I-2-Classification des hydrocarbures.

Les hydrocarbures constituent la fraction la plus importante d'un brut pétrolier, ils représentent entre 65 et 95 % de la plupart des pétroles bruts.

Selon Soltani (2004), les composés pétroliers peuvent être classés en quatre famille principales qui sont présentés en proportion variable selon l'origine; les hydrocarbures saturés (30 à 70 %), les hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques (20 à 40 %), les composés polaires (5 à 25 %) et les asphaltènes (0 à 10 %).

I.1.1 Les hydrocarbures saturés :

A. Alcanes :

Hydrocarbures légers, aliphatiques, saturés son formule générale C_nH_{2n+2} (Arnaud, 1983).

➤ Alcanes linéaires : (*n*-alcanes) :

La longueur de la chaîne varie de 7 à 40 atomes de carbone et constituent une des classes les plus abondantes des hydrocarbures totaux du pétrole brut.

➤ Alcanes ramifiés :

Les plus abondants sont les *iso*-alcanes (groupement méthyle en position 2), les autres composés ramifiés antéiso (groupement méthyle en position 3) ou polyramifiés tels que les

isoprénoïdes (exemple: pristane, phytane) sont beaucoup moins nombreux. Ces composés se trouvent dans le pétrole brut dans des proportions sensiblement égales à celles des *n*-alcane (Soltani, 2004). Ils représentent 30% du pétrole brut (Fattal, 2008).

➤ **Cycloalcanes** (cycloparaffine) :

Ils renferment des composés cycliques (à 5 ou 6 atomes de carbone) saturés (Soltani, 2004). Les chaînes hydrocarbonées peuvent se fermer sur elles-mêmes en formant des cycles. Leur formule générale est $(CH_2)_n$ ou C_nH_{2n} (Arnaud, 1983).

I.1.2 Les hydrocarbures insaturés :

Selon Arnaud (1983), les hydrocarbures insaturés sont classés en trois catégories :

A. Alcènes :

Les alcènes présentent un déficit en hydrogène ; ils ne sont pas saturés. Les alcènes sont des hydrocarbures présentant une double liaison $C = C$ dans leur squelette carboné. Leur formule générale est donc C_nH_{2n} .

B. Cyclènes :

Il existe peu de représentants de ce type d'hydrocarbures, possédant une double liaison $C=C$. Leur formule générale est C_nH_{2n-2} .

C. Alcynes :

Ces hydrocarbures sont caractérisés par la présence dans leur molécule d'une triple liaison $C\equiv C$. La formule générale est C_nH_{2n-2} .

I.1.3 Les hydrocarbures aromatiques :

Plusieurs familles d'hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques dont le nombre de noyaux varie de 2 à 6 sont présentes dans les pétroles bruts. Ces composés sont dominés par des composés mono, di et tri-aromatiques. En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier (Soltani, 2004).

I.1.4 Les asphaltènes

Ce sont des composés stables à très haut poids moléculaire (Fattal, 2008), leur structure est mal connue du fait de leur composition chimique complexe à base de cycles aromatiques condensés et des métaux lourds à l'état de traces (Soltani, 2004).

I.1.5 Les composés polaires :

Cette fraction correspond à des molécules hétérocycliques, telles que:

- des composés oxygénés: phénols, acides carboxyliques, alcools, aldéhydes,...
- des composés soufrés: mercaptans, sulfures, disulfures,...
- des composés azotés: pyridines, quinoléines,...

Les dérivés soufrés sont, dans la plupart des cas plus abondants que les composés oxygénés ou azotés. (Soltani, 2004).

I-3-Source de pollution par les hydrocarbures

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

- **Sources naturelles**

Les plus importants sont les prairies et les feux de forêt, Il existe d'autre sources telles que les éruptions volcaniques, l'érosion des roches, les fuites des réservoirs naturels ainsi que la production d'hydrocarbure par les végétaux supérieurs ou par les algues (GERARD, 2005).

- **Sources anthropiques**

Deux sources anthropiques sont généralement distinguées : d'une part les sources pétrolières, correspondant à une pétrogenèse à basse température, et d'autre part les sources pyrolytique correspondant à des processus de combustion à haute température. La circulation automobile constitue l'une des principales sources d'hydrocarbures puisqu'elle combine les deux processus. Les véhicules émettent des gaz d'échappement provenant de la combustion incomplète des carburants (Fraser et al, 1997) et sont aussi à l'origine de déversement de produits variés tels que les carburants, les huiles lubrifiantes ou les débris pneumatiques (Takada et al., 1990 ; Bomboi et Hernandez, 1991 ; Hahn et Rudiger, 1994).

I-4-Devenir des hydrocarbures dans le sol :

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

Le comportement des hydrocarbures dans le sol est illustré par la figure 1.

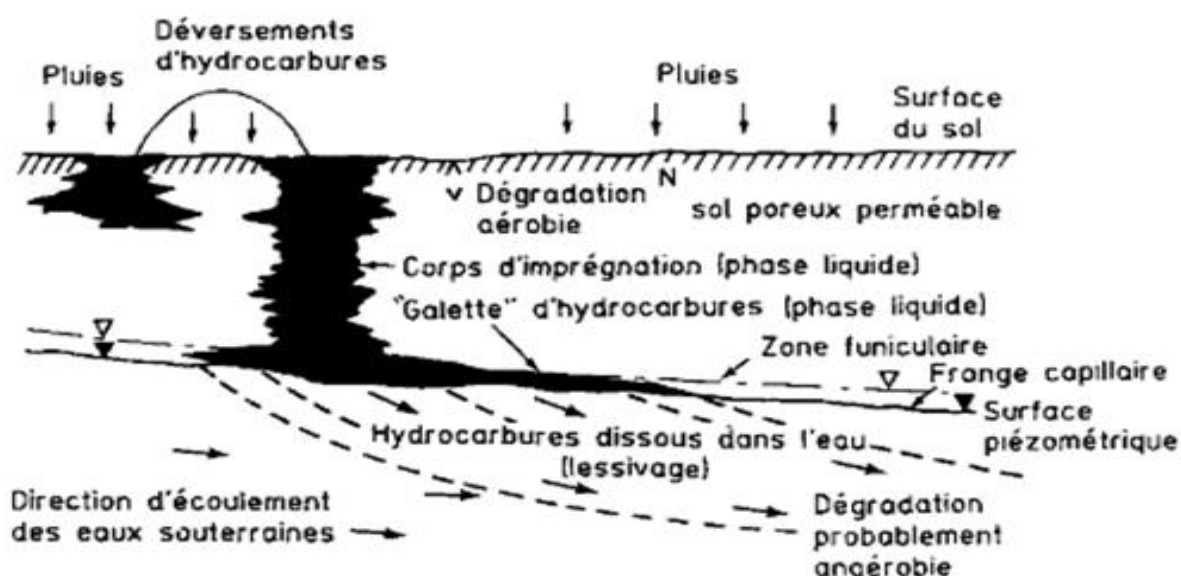


Figure1 : Mécanismes de transport des hydrocarbures après un déversement à la surface du sol

Selon Fattal (2008) les processus qui influent sur le devenir des hydrocarbures dans l'environnement sont l'adsorption, la volatilisation, la dégradation biotique et la dégradation abiotique.

I-4-1-Dégradation abiotique

I-4-1-1-Adsorption (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 d'adsorption : 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 (hydrocarbures) (Saada, et al 2005).

I-4-1-2-Volatilisation

Le passage d'un hydrocarbure fluide à sa forme gazeuse est plus au moins long, il dépend des conditions climatiques et du type de pétrole (Fattal, 2008).

La volatilisation permet de diminuer la concentration de contaminant dans le milieu mais n'est jamais destructive (transformation mais non disparition) (Saada et *al.*, 2005)

I-4-1-3- Solubilisation

Bien que les hydrocarbures soient des composés insolubles dans l'eau ; certains d'entre eux peuvent partiellement se dissoudre (hydrocarbures aromatiques et hydrocarbures à faible nombre de carbone) (Bertrand et Mille, 1989).

Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour l'environnement, ils sont difficiles à éliminer et sont absorbés par la faune et la flore (Chocat, 2004).

I -4-4-Dégradation biotique

La biodégradation des hydrocarbures se fait dans les milieux aérobies et anaérobies grâce à des microorganismes principalement des bactéries et /ou des champignons qui puisent dans le pétrole leur alimentation (Fattal, 2008).

Selon Das et Chandran (2010), les hydrocarbures sont classés des plus dégradables vers les moins dégradables comme suit : les alcanes linéaires, les alcanes ramifiés, les petits composés aromatiques puis les alcanes cyclyques. Certains composés tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques dont le poids moléculaire est élevé ne peuvent pas être dégradés du tout.

I-5-Impact des hydrocarbures

L'exploitation des hydrocarbures nécessite et engendre des opérations et des activités importantes qui perturbent notre environnement (Girard, 2005).

I-5-1-Effet 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 carcinogènes sont représentés par les HAP dont les plus communs sont le benzanthrène, les benzopyrènes et les fluoranthènes. Bien qu'ils ne soient pas de haute toxicité, ils présentent souvent une forte voir une très forte cancérogénicité. La présence de substituants alkylés sur leurs molécules accroît leur pouvoir cancérogène tandis que leur halogénéation augmente leur toxicité pour les espèces animales (Ramade, 1992).

I-5-2-Effet sur la végétation

Les effets des hydrocarbures sur les végétaux sont très divers selon les familles, ces effets peuvent également varier en fonction de la concentration (Colin, 2000). Elle se manifeste par une inhibition de la germination des graines et/ou celle de la croissance végétative qui a un impact négatif sur le rendement en matière sèche (Koller, 2004).

I-5-3-Effet sur le sol

Les hydrocarbures sont des polluants très persistants, leur forte interaction avec les sols, principalement par adsorption sur la matière organique, ainsi que leur faible solubilité dans l'eau les rend peu biodisponibles et faiblement mobiles (Bordas, 2001). Donc ils peuvent affecter les composants, les propriétés ainsi que la fertilité du sol (Koller, 2004). Leur présence dans le sol modifie considérablement ses propriétés physiques, chimiques et biologiques.

✓ Effet sur les propriétés physiques

Les études réalisées dans le but de déterminer l'effet des hydrocarbures sur les propriétés physiques du sol sont très limitées, quelques observations intéressantes ont été faites par certains auteurs.

Rouquerol et ses collaborateurs (1987) ont montré que les hydrocarbures enrobent les particules minérales et assurent leurs dispersions.

Mettauer et ses collaborateurs (1987) in Fezani et Khider (2007), soutiennent quant à eux l'idée que la présence des hydrocarbures améliore la stabilité structurale du sol, accroît sa rétention en eau et réduit sa mouillabilité.

✓ Effet sur les propriétés chimiques

Selon Chaineau et ses collaborateurs (1996), les effets des hydrocarbures sur les propriétés chimiques du sol consistent généralement en :

- une augmentation de la concentration en éléments traces tels que Mn, Zn, Fe, Pb ;
- une élévation du pH du sol et de la teneur en potassium (K) et en calcium (Ca) ;
- une diminution de la teneur du sol en phosphore (P) et une augmentation en carbone organique total.
- une augmentation de la conductivité électrique (CE) entraînant l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence des sels.

✓ Effet sur les propriétés biologiques

Les effets des hydrocarbures sur l'activité biologique du sol dépendent de leurs natures, de leurs concentrations dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu (Duchaufour, 2001). Certains peuvent inhiber la croissance des micro-organismes et leurs métabolismes. Cette inhibition serait liée à des interactions avec la membrane cellulaire de ces composés fortement hydrophobes, et à la formation des métabolites toxiques (Girard, 2005).

II-Moyens de décontamination

La décontamination est un ensemble de procédés consistant à épurer ou tout au moins à isoler un milieu ayant été exposé à une pollution chronique ou récurrente qui l'a rendu inutilisable pour des activités domestiques, agricoles ou industrielles. Le traitement concerne des terres excavées ou des sols et nappes phréatiques encore en place (Koller, 2004).

II-1-1-Méthodes physiques

Les techniques physiques constituent la grande majorité des techniques mises en œuvre aujourd'hui ; elles consistent dans leurs principe à transférer et concentrer la pollution vers des points de récupération sans les modifier ou les détruire, en se servant pour leurs transports des fluides présents dans le sol ou injectés. Les procédés d'extraction, de lavage et de confinement sont les plus souvent utilisés (Colin, 2000).

II-1-2-Méthodes chimiques

Les techniques chimiques ont pour but de détruire les polluants ou de les transformer sous une forme moins nocive pour l'environnement, en provoquant des réactions chimiques entre les polluants contenus dans le sol et un réactif ajouté. (Colin, 2000).

Selon Lecompte(1998) les techniques les plus utilisées sont les méthodes de mobilisation et d'extraction, les méthodes destructives par réaction et les méthodes électrochimiques.

II-1-3-Méthodes thermiques

D'après Girard (2005), le principe des méthodes thermiques est de porter le matériel pollué à haute température pour détruire, en extraire les polluants ou les immobiliser. Elles sont adaptées aux polluants facilement convertibles en dioxyde de carbone et en eau.

D'après Colin (2000), les méthodes les plus utilisées sont l'incinération, la désorption thermique et la pyrolyse.

II-1-4-Méthodes biologiques

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

II-1-4-1- Bioremédiation

Le procédé de la bioremédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart du temps microscopiques (bactéries, micro algues, champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau et le gaz carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée), ou exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé, cultivées au laboratoire puis réintroduits dans le sol (bioaugmentation). La bioremédiation se déroule généralement en conditions d'aérobie. Cependant, l'application de systèmes de bioremédiation en condition d'anaérobie permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes. (Koller, 2004). Les différentes technologies utilisées dans la bioremédiation sont résumées dans le tableau I.

Tableau I : Différent traitements de bioremédiation (Vidali, 2001)

Techniques	Principe
Bioaugmentation	Addition d'une culture des bactéries dans le milieu contaminé. Utilisée couramment dans les bioréacteurs et le système <i>ex-situ</i> .
Biofiltration	Utilisation d'un bio filtre pour traiter les émissions gazeuses.
Biostimulation	Stimulation des populations de micro-organismes indigènes, présente dans le sol ou les eaux souterraine, elle peut être utilisée <i>in-situ</i> ou <i>ex-situ</i> .
Bioréacteurs	Déroulement de la biodégradation dans des réacteurs ou bassins.
Biolixiviation	Excavation de la couche à dépolluer, son emballage dans une membrane étanche, l'apport des nutriments indispensable aux microorganismes et sol ainsi traité. Utilisé pour la dépollution des métaux non dégradables.

II-1-4-2- Phytoremédiation

Le concept de phytoremédiation définit les techniques d'assainissement des sols par des plantes annuelles herbacées ou ligneuses forestières qu'il s'agisse de stabilisation ou d'extraction. Les végétaux jouent un double rôle : ils limitent l'entraînement de l'eau dans la profondeur du sol (évapotranspiration) et leur récolte permet d'exporter une partie des éléments minéraux, apportés lors de l'épandage. Par ailleurs, il faut être bien conscient qu'un produit végétal (bois, feuilles, fruits) issu de plantes cultivées sur un sol contaminé ne peut pas être commercialisé ou utilisé et doit impérativement être éliminé de façon adéquate. De la même manière, la connaissance de ce qui se trouve dans le sol est également indispensable, afin de veiller à une affectation correcte de ce dernier. La phytoremédiation regroupe toutes les technologies utilisant les plantes pour transformer, dégrader, concentrer, stabiliser ou volatiliser des polluants (Koller, 2004).

II-1-4-2-1-Les avantages

D'après Lecomte (1998), la phytoremédiation est la méthode la moins destructrice car elle utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement contrairement à l'emploi de procédés chimiques, il n'y a donc pas d'impacts négatifs sur la fertilité des sols et les végétaux produits peuvent être exploités.

D'un point de vue économiques les coûts sont réduits : les techniques de la phytoremédiation sont en général de 10 à 100 fois moins coûteuses que les techniques physico-chimiques (Illovic et *al.*, 2012).

III-1-Les mécanismes de la phytoremediation

Plusieurs mécanismes permettent l'élimination des polluants par phytoremédiation (figure 2).

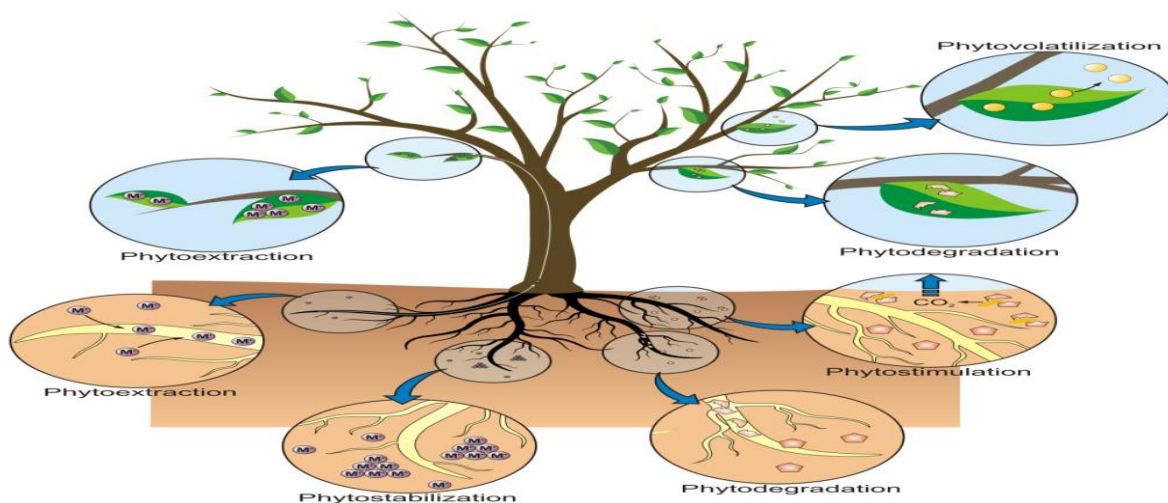


Figure2 : Stratégies de la phytoremediation (Paulo, 2014)**III-1-1-Rhizofiltration**

C'est l'utilisation des racines des plantes pour absorber, concentrer ou précipiter les polluants d'un effluent liquides (Koller, 2004).

III-1-2-Phytoextraction

Elle consiste à utiliser, sur un sol contaminé, des plantes accumulatrices pour extraire, transporter et concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables de la plante. Pour que cette technique soit efficace, il faut que le polluant soit disponible pour les racines et que celle-ci puissent le tolérer et l'absorber (Koller, 2004).

III-1-3-Phytostabilisation

Il s'agit de limiter la disponibilité des métaux lourds transitant au sein du sous-sol (notamment grâce au transfert via la nappe phréatique) en les piégeant dans un réseau racinaire où ils peuvent s'accumuler et être ainsi immobilisés (Lecompte, 1998).

III-1-4-Phytotransformation

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

III-1-5-Phytovolatilisation

Elle sert à la stimulation de la volatilisation au moyen des plantes qui absorbent les polluants puis les éliminent par transpiration (Delage et Schrefler, 2005).

III-1-6-Phytostimulation

Elle consiste à l'utilisation des plantes pour la stimulation des microorganismes présents dans la rhizosphère, engendrant ainsi une activité biodégradatrice plus élevée (Delage et Schrefler 2005). Elle ne met pas vraiment en contacte les polluants et las végétaux. Elle s'agit enfin d'une stimulation de la dégradation microbienne et fongique par les enzymes libérés dans la rhizosphère racinaire (Lecompte, 1998).

IV- les travaux de recherche effectués sur la phytoremediation

IV-1- Les recherches effectuées dans le monde

Vers une recherche permanente de connaissances sur le pouvoir des plantes, selon Illovcic et al (2012), en France et en Europe, la phytoremédiation se situe à un stade expérimental avancé : sites pilotes, serres, etc.

Les chercheurs tentent d'améliorer les capacités accumulatrices des plantes, en les modifiant génétiquement. Différents centres de recherche dans le monde notamment aux Etats-Unis et au Canada, mais également en Europe comme en France, travaillent sur la modification et la recherche de plantes capables d'accumuler suffisamment de polluants pour dépolluer un site contaminé. De nombreux projets s'effectuent dans le monde et en France dans des laboratoires ou en grandeur nature dans des champs réalisés par des centres de recherches et des universités. Des recherches en biotechnologie sont également effectuées en laboratoire pour améliorer la capacité d'absorption en modifiant les racines. D'autres réflexions et expérimentation sont en cours et l'évolution dans le domaine permettra de compléter les utilisations rationnelles d'une plante vers une problématique identifiée. (Illovcic et al, 2012).

IV- 2- La recherche effectuée en Algérie

Les travaux de recherche en Algérie sont encore au stade expérimental. Au niveau de notre faculté quelques travaux ont été réalisés ces dernières années sur des sols contaminés par les hydrocarbures dont la synthèse est présentée dans le tableau II.

Tableau II : les principaux essais de phytoremédiation réalisés à l'UMMTO.

Les espèces utilisées	Le sol pollué	Résultats	Auteur et année
-Orge (<i>Horduem vulgaris</i> L.) -Luzerne (<i>Medicago Sativa.</i> L)	- sol CP à 2% et 5% provient de l'INA	-effet d'hydrocarbure sur le sol et les deux espèces (luzerne et l'orge) -Plus la concentration des hydrocarbures augmente plus leurs effets est importants -effet positif de Luzerne sur l'activité biologique du sol.	ALI AHMED H et BELKAID, (2006)

-Orge (<i>Horduem vulgare</i>. L.) -Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	-sol contaminé par le pétrole à 5% provient de l'ITMA	-L'essence plus biodégradable que le pétrole -L'essence est moins toxique que le pétrole brut. -Diminution du rendement végétal -Modification de la microflore bactérienne. -Les légumineuses sont plus efficaces dans la biodégradation d'hydrocarbures	FEZANI et KHIDER (2007).
-Le Pois, (<i>Pisum satinum</i> L.) -Le Pois chiche, (<i>Cicer arietinum</i> L.)	sol provient de l'ITMA	-Effet toxique des hydrocarbures sur les deux espèces et sur le sol. -Le pois est plus efficace dans la biodégradation des hydrocarbures que le pois chiche.	BENAMARA et MOHAMMADI (2010).
-Haricot, (<i>Phaseolus Vulgaris</i> L.) -Pois chiche, (<i>Cicer Arietinum</i> L.)	Sol provient de l'ITMA (Boukhalifa) contaminé par -Le pétrole. -L'essence	Sol provient de l'ITMA (Boukhalifa) contaminé par -Le pétrole. -L'essence	AIT TAYEB et TITOUCHE (2011)
-Fève (<i>Vicia faba</i>. L.) -Trèfle (<i>Trifolium alexandrium</i>. L.)	Sol provient de l'ITMA, contaminé par le pétrole à 5%.	la fève est plus résistant que le trèfle en vers le pétrole. -la présence des nodules dans la fève favorise la décontamination des sols	BELKACEM et ROUAS (2012)

Notre travail a été réalisé au laboratoire de pathologie des écosystèmes de la faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Dans le but de la mise en œuvre de dispositif expérimental et des techniques d'évaluation de l'effet éco toxicologique des hydrocarbures sur la végétation et le sol et pour évaluer l'efficacité de quelques Légumineuses (la fève, le pois) et les graminées (l'orge) à remédié un sol contaminé par les hydrocarbures.

Dans cette partie, nous allons présenter les matériels et les méthodes utilisées, ainsi que le dispositif expérimental adopté.

1-Matériel

1-1- Matériel végétal

Trois espèces végétales différentes ont été utilisées à savoir la fève et le pois qui appartient a la famille des légumineuses et l'orge qui appartient à la famille des graminées car ces plantes sont réputées pour être pollu-résistantes.

1-1-1- la fève :

La fève est une plante annuelle, c'est une légumineuse de la famille des fabacées, elle est cultivée pour ces grains combustibles, tout particulièrement en Russie où elle constitue un mets traditionnel.



Figure 03 : La fève (*Vicia faba*. L) (Anonyme, 2015).

❖ **Classification botanique :**

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

Règne	Plantae
Sous règne.....	Tracheobiota
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
Genre.....	<i>Vicia</i>
Espèce.....	<i>Vicia faba</i> L.

❖ **Caractéristiques du la fève :**

La fève est une plante robuste, grimpante, qui peut atteindre plus d'un mètre. Ses feuilles composées de 2 à 7 folioles, sont alternes sur la tige de section carrée. Ses fleurs, disposées en grappe, sont blanches avec un point noir sur les ailes, zygomorphes et hermaphrodites, à pollinisation entomophile. Ses fruits sont des gousses, caractéristiques de la famille des Fabacées. Comme chez tous les représentants de cette famille, connus sous le nom de légumineuses, les racines de la fève possèdent des nodules à l'intérieur desquelles des cellules géantes servent d'abri à une bactérie symbiotique, appartenant à l'espèce *Rhizobium leguminosarum*. Cette bactérie est capable de capter le diazote atmosphérique et de le fixer sous forme d'ions utilisables par les plantes.

La fève préfère les sols profonds et peu acides, avec une alimentation hydrique régulière (Sibennaceur, 2007). Elle supporte les faibles gelées ne dépassent pas -3°C, les fortes chaleurs lui sont néfastes (arrêt de croissance). (Chaux, 1992).

1-1-2-le pois

Le pois (*Pisum sativum* L.), est une espèce de plante annuelle de la famille des Fabacées. Le terme désigne aussi la graine elle-même, riche en énergie (amidon) et en protéine (Clement, 1994).



Figure 04 : les pois (*Pisum sativum*.L) (Anonyme, 2015).

❖ Classification botanique

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

Règne	Plantae
Sous règne.....	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Sous-classe	Rosidae
Ordre	Fabales
Famille	Fabaceae
Sous-famille.....	Faboideae
Tribu.....	Fabeae
Genre.....	<i>Pisum</i>
Espèce.....	<i>Pisum sativum</i>

❖ **Caractéristiques du pois :**

Dans un sol sain et bien structuré le système racinaire est à tendance pivotante, la racine principale, vigoureuse, pouvant descendre très profondément (bien au-delà de 1m). On constate donc que, pour satisfaire ses besoins, la plante possède une grande aptitude à adapter son système racinaire au niveau de fertilité du sol; pour peu que ce dernier le permette.

Les exigences thermiques du pois sont relativement modestes. La graine germe facilement entre 5 et 17 °C. La température moyenne optimale de croissance se situe entre 15 et 19 °C. L'insuffisance de l'intensité lumineuse peut affecter les premiers étages nodaux et nuire à la ramification. Le pois se place parmi les espèces légumières ayant les besoins en eau les plus élevés (Chaux et Foury, 1994).

I-1-3-l'orge

C'est une céréale autogame qui appartient à la famille des poacées et au genre hordeum.



Figure05: L'orge (*Hordium vulgare* L.da.) (Anonyme, 2015).

❖ **Classification botanique**

Règne	<u>Plantae</u>
Sous-règne	<u>Tracheobionta</u>
Division	<u>Magnoliophyta</u>
Classe	<u>Liliopsida</u>
Sous-classe	<u>Commelinidae</u>
Ordre	<u>Cyperales</u>
Famille	<u>Poaceae</u>

Genre	<u>Hordeum</u>
Espèce	<i>Hordium vulgar L.da.</i>

❖ Caractéristiques du l'orge:

L'orge est une espèce sensible à la pollution par les hydrocarbures, résistante à la sécheresse et vigoureuse, l'orge peu être cultivé sur des terres peut propice aux céréales, Leur système racinaire est compose de deux types de racines, le premier correspond à la racine cimenale qui se développe dès la germination, et le second correspond aux racines coronaires représenté par les racines des talle, elles ne se développent qu'à partir de tallage (Simon, 1972 in Fezani et khider, 2007). Le système aérien de l'orge est constitué par des feuilles rubanées à nervures parallèle présentant une gaine développée, des tiges qui sont des chaumes. Les besoins en eau de l'orge sont estimés à 450-500 mm (Moule, 1971 in Babas et Ikour, 2005).

1-1- 4-Le blé dur

Le blé dur est une espèce autogame appartenant à la famille des Poacées et au genre *Triticum*.

❖ Classification botanique

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

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 durum</i>

❖ Caractéristiques du blé

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. Le système aérien est formé d'un certain nombre de ramification ou talles et chaque talle est constituée d'un chaume.

1-2-Le sol

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

a-Sol de la station –service de Boukhalfa :

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

Tableau III : Caractéristiques chimiques de l'échantillon du sol :

pH	7.2
CE	0.74 (mmhos /cm)
C _{org}	8.84N
N _{TOT}	0.3%
P (P ₂ O ₅)	5.46ppm (mg P ₂ O ₅ /kg sol)
Texture	Limono-argileuse

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

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.

b-Sol de l'ITMA :

Les résultats de l'étude du sol de l'ITMAS réalisée dans le laboratoire de pédologie de l'institut National de Recherche Forestière (INRF) montrent qu'il s'agit d'un sol à texture argilo-limoneuse et ses caractères chimique sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III: Caractéristiques chimiques de l'échantillon du sol de l'ITMAS

Caractéristiques chimiques	Résultats
pH	8,55
Calcaire total	2,1 %
Matière organique	3 %
Azote total	N % =0,02%
Carbone organique	1,74 %
Rapport C/N	8,7
Conductivité électrique	0,1 mmhos/cm

D'après BAIZE (2000), en sol agricole, les rapports C/N des horizons de surface labourés (horizon) sont dans l'ordre de 9 quand l'humification est bonne. Cela correspond à la présence des matières organique.

Après l'étude de notre échantillon de sol, nous pouvons dire qu'il s'agit d'un sol à pH alcalin, peu calcaire, riche en matière organique et qui présente une bonne activité biologique.

1-3-Les pots

Les pots utilisés pour la culture ont un diamètre de 7cm et une longueur de 8 cm.

2. Méthodes**2.1. Mise en place des cultures****2.1.1. La préparation du sol**

Après échantillonnage sur le terrain, le sol a été séché à l'air libre puis tamisé à 4mm et homogénéisé pour être ensuite divisé en 4 lots, 3 sont cultivés par la fève ,le pois et l'orge , l'autre il reste témoin non cultivé.

2.1.2. Le semis

Le sol contaminé est réparti sur douze pots à raison de 100g par pots. Le premier lot de trois pots, est constitué d'un sol contaminé cultivé par la fève, le deuxième lot est constitué d'un

sol contaminé cultivé par les pois, et le troisième lot constitué de sol contaminé cultivé par l'orge. Le quatrième est constitué du sol contaminé non cultivé.

-Le sol non contaminé est réparti sur neuf pots à raison de 100g par pot. Le premier lot de trois pots, est constitué d'un sol non contaminé cultivé par la fève, le deuxième lot est constitué d'un sol non contaminé cultivé par les pois, et le troisième lot constitué de sol non contaminé cultivé par l'orge.

Les trois pots constituant chaque lot représentent des répétitions (fig.6).

Pour évaluer l'effet des hydrocarbures sur les plantes, six lots ont été semés. Les deux premiers qui contiennent du sol contaminé pour le premier et du sol non contaminé pour le deuxième reçoivent 3 graines de la fève, les deuxièmes 4 graines du pois et le troisième 5 graines de l'orge.

Le semis a été réalisé le 14-12-2014.

La figure 06 montre le dispositif expérimental

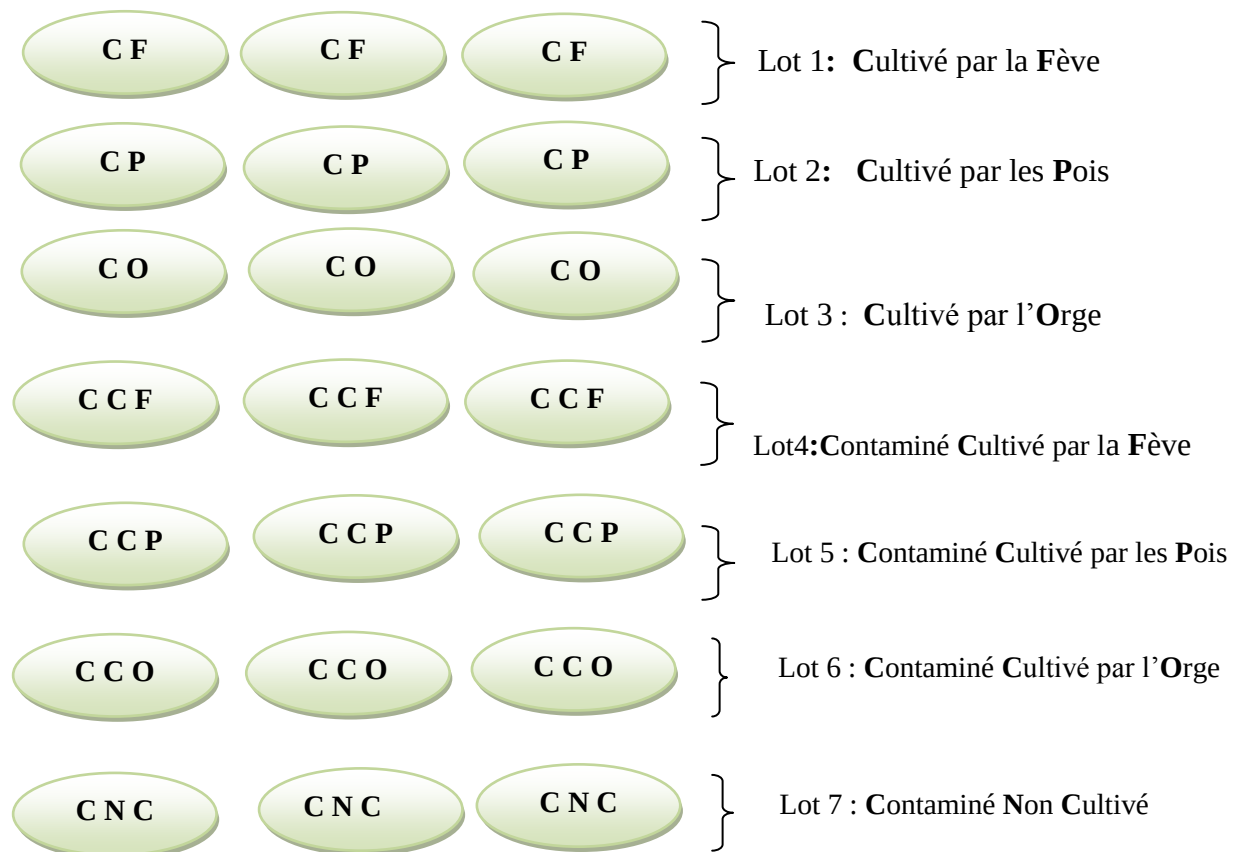


Figure 06 : Dispositif expérimental de l'essai au laboratoire.

2.1.3. Le suivi des cultures

Le suivi des cultures en place a consisté en un arrosage régulier à l'eau de robinet durant toute l'expérimentation. L'eau infiltrée dans les assiettes est réutilisée pour l'arrosage pour maintenir la concentration des hydrocarbures dans le sol.

Un désherbage réalisé à chaque fois qu'on observe les mauvaises herbes dans les pots.

2.1.4. La récolte

La récolte a eu lieu le 04/02/2015, elle a été réalisée au début de floraison du pois et de la fève.

2.2. Evaluation des effets des hydrocarbures sur la croissance des plantes

Elle se fait par la mesure de plusieurs indicateurs de croissance.

2.2.1. Le taux de levée

Il consiste à établir un pourcentage de levée dans chaque pot de la troisième semaine, en dénombrant les plantes levées. Il est donné par la formule suivante :

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

Il consiste à mesurer des plantes hebdomadairement à l'aide d'une règle graduée en centimètre (Cm).

2.2.3. Biomasse aérienne

Il s'agit de peser la partie aérienne des plants, de chaque sol, à l'état sec. La partie aérienne étant séparée de la partie racinaire et séchée à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

2.2.4. Biomasse racinaire

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

2.2.5. Volume racinaire :

Après séparation des deux parties aérienne et racinaire, la partie racinaire de chaque plante est mise dans un tube gradué contenant de l'eau à un volume précis V_0 , le niveau d'eau augmente dans le tube jusqu'à un volume V_1 . Le volume V du système racinaire est donné par la formule : $V = V_1 - V_0$

2-2-6-Longueur des racines

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

2-3-Effets des hydrocarbures sur les propriétés biologiques du sol

2.3.1. Test de germination

Après la récolte, nous avons procédé à un test de germination d'une plante dans les échantillons du sol utilisés dans l'expérience, le semis est réalisé en mettant dans chaque boîte de pétri 100 graines de blé, puis nous les avons fait germer dans des conditions favorables avec un arrosage régulier dans les différents échantillons.

Le but de ce test est d'évaluer l'impact et l'effet de la concentration des hydrocarbures contenus dans le sol sur la germination des graines de blé et d'évaluer le degré de remédiation dans les différents échantillons de sol.

Il consiste à établir un pourcentage de germination dans chaque lot en démembrant les graines germées dans les sols contaminés et traités par la phytoremédiation. Le taux de germination est calculé comme suit :

$$\text{Taux de germination (\%)} = \frac{\text{nombre de graines germées}}{\text{nombre totale des graines}} \times 100$$

2.3. 2. La longueur des racines

Après le dénombrement des grains germés, nous avons pris 10 graines parmi celles qui sont germées pour mesurer leurs longueurs racinaires avant de les remettre à nouveau pour une

autre semaine. Après la récolte on mesure pour la deuxième fois la longueur des racines puis on calcule l'élongation racinaire qui se calcule de la façon suivante :

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

2-4-Effet des hydrocarbures sur le sol

Pour déterminer l'effet des hydrocarbures sur quelques propriétés du sol, celui-ci a été séché à l'air libre et tamisé 2mm.

2.4.1. Mesure du pH-eau

La détermination du pH se fait par électrométrie. Elle s'applique au moyen d'une électrode en verre, celle-ci convient pour tout type de solution. Après tamisage à 2 mm, peser 20g de sol et le mettre dans un bêcher, ajouté 50 ml d'eau distillée ; rincer l'électrode avec l'eau distillée ; puis mettre le bêcher sous agitation magnétique, pendant une deux minutes, on laisse au repos statique pendant deux heures ; à la fin introduire l'électrode dans la solution à analyser, mettre en marche le potentiomètre puis lire la valeur affichée sur l'appareil après sa stabilisation.

2.4.2. Mesure de la conductivité électrique (CE)

Elle renseigne sur la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Le sol est mélangé avec de l'eau distillée au rapport 1/5 (masse/volume) puis agité avec un agitateur magnétique pendant 5mn et laissé décanter pendant 15 à 20 mn. La CE est ensuite mesurée à l'aide d'un conductimètre de type WTW inolab. Elle est exprimée en décisiemens par mètre (ds/m) (Baize, 2000), en micro-Siemens par cm ($\mu\text{S/cm}$).

2-4-3-Evaluation de la quantité des hydrocarbures dans le sol

L'évaluation s'effectue par l'extraction des hydrocarbures contenus dans les lots de sol contaminés, le but de cette extraction est d'évaluer la quantité des hydrocarbures restante dans le sol après culture en comparaison à celles de même sol avant la culture. Elle se fait par dichlorométhane. 10g de sol sont pesés de chaque pot (contaminés et témoins), auxquels sont ajoutée 50ml de dichlorométhane et laissés en agitation pendant deux heures.

Après centrifugation pendant 25mn à 5000 trs/m, les surnageant sont récupérés pour les analyses par FTIR.

2.4.4. L'analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier est une méthode rapide qui donne des informations quantitative et qualitatives en caractérisant les groupements fonctionnels et des composantes majeures des différents échantillons de sol et de végétal.

Cette méthode analytique est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau. La spectroscopie infrarouge produit un rayonnement dont la fréquence (nombre d'onde) varie de 500 à 4000 cm^{-1} .

Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et nous enregistrons une diminution de l'intensité réfléchie ou transmise. Un matériau de composition chimique et de structure donnée va correspondre à un ensemble de bandes d'absorption caractéristiques permettant d'identifier ce matériau (Anonyme, 2004).

Elle sert à évaluer les modifications des groupements fonctionnels relatifs aux hydrocarbures dans les sols contaminés dans les sols traités, et dans les plantes

Les échantillons de sol, et de végétal sont broyés et séchés à une température de 40°C durant 24 heures puis mélangés avec le bromate de potassium (KBr) pour réaliser les pastilles à analyser

2-5- Méthodes d'analyse statistiques :

Le traitement de données a été réalisé grâce au logiciel R.3.0.2. Les résultats obtenues ont été soumis à une analyse de la variance pour l'ANOVA, est suivie du test de Newman et Keuls pour établir les groupes homogènes lorsque les différences entre les moyennes sont significatives.

1-Effet des hydrocarbures sur le végétal :

Dans le but d'évaluer l'effet des hydrocarbures sur le végétal nous avons comparé la croissance de la fève, le pois et l'orge dans un sol contaminé par les hydrocarbures et dans un sol non contaminé.

1-1-taux de levée :

La figure 07 représente le taux de levée de la fève, le pois et l'orge dans les différents sols.

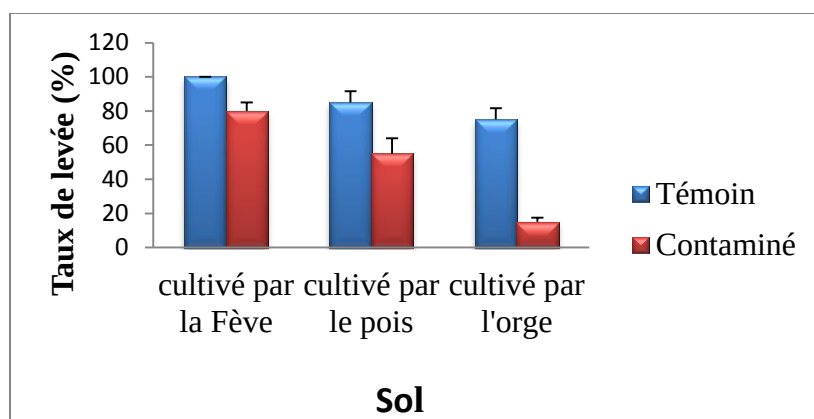


Figure 07 : Taux de levée de la fève, pois et l'orge dans les sols témoins et contaminés

La levée des graines de la fève a été observée dès le troisième jour après le semis sur le sol témoin et après le quatrième jour sur le sol contaminé. La levée de ces graines a atteint 100% dans le sol non contaminé, et un taux de 80% dans le sol contaminé.

La levée des graines du pois a été observée dès le deuxième jour après le semis dans le sol témoin et après le quatrième jour dans le sol contaminé, cette levée atteint 85% dans le sol non contaminé et un taux de 56.85% dans le sol contaminé par les hydrocarbures.

La levée des graines de l'orge a été observée dès le troisième jour après le semis sur le sol témoin et après le cinquième jour sur le sol contaminé. Nous avons enregistré un taux de 75.55% dans le sol témoin et 15% dans le sol contaminé.

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

Il ressort de ces résultats que le pourcentage de levée des graines de la fève dans le sol contaminé est meilleur que celui obtenu avec le pois et l'orge. Cela peut être dû à la capacité des graines de la fève à tolérer la pollution par les hydrocarbures.

Les résultats de l'analyse de la variance pour la levée des trois espèces dans le sol contaminé et le sol témoin sont présentés dans le tableau IV.

Tableau IV : Analyse de la variance pour la levée des trois espèces dans les sols contaminés et témoins.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Sol	1	5908.2	5908.2	35.7	6.4e-0.5***
Sp	2	6043.7	3021.9	18.28	0.0002***
sol : sp	2	1380.5	690.2	4.17	0,04*
Var résiduel	12	1983.7	165.3		
Var total	17	15316.1	9785.6		

L'analyse de la variance du taux de levée a révélé qu'il y a des différences très hautement significatives pour les deux facteurs à savoir le type du sol et l'espèce. Ceci signifie que les graines de ces trois espèces ne réagissent pas de la même façon à la pollution par les hydrocarbures.

Le test Newman et Keuls a donné trois groupes homogène pour le facteur espèce, le groupe A contient la fève, le groupe B contient le pois et le groupe C contient l'orge (tableau V).

Tableau V : Groupes homogènes de la levée des trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	90	A
2	Pois	70.92	B
3	Orge	45.29	C

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogène pour le facteur sol, le groupe A contient le sol non contaminé et le groupe B contient le sol contaminé (tableau VI).

Tableau VI : Groupes homogènes de la levée dans les deux sols déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Non contaminé	86.85	A
2	Contaminé	50.61	B

D'après ces résultats, les hydrocarbures présents dans le sol contaminé ont provoqué un effet toxique sur la germination des graines de la fève du pois et de l'orge.

Ces résultats et selon Udo et Fayemi (1995) in Chianeau, (1997) ; montrent que les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, empêcher les réactions métaboliques et tuer l'embryon par une toxicité aigüe directe, ou encore aux modifications des caractéristiques physico-chimiques du sol. Il y a également une forte évidence que l'inhibition de la germination soit corrélée à l'hydrophobie des hydrocarbures qui empêche les échanges d'eau et de gaz dans un stade où la graine a besoin de quantités suffisantes d'oxygène et d'eau.

D'après Chaineau et *al.* (1997) les graines n'ont pas la même capacité de résistance à la contamination par les hydrocarbures.

Selon Ben Naceur et *al.*, (2001) la réponse au stress dépend de l'espèce même, de sa variété, de la concentration en polluant et du stade de développement de la plante.

1-2-la hauteur des plantes :

➤ **La fève**

La figure 8 montre l'évolution hebdomadaire de la hauteur des plants de la fève dans le sol témoin et le sol contaminé par les hydrocarbures.

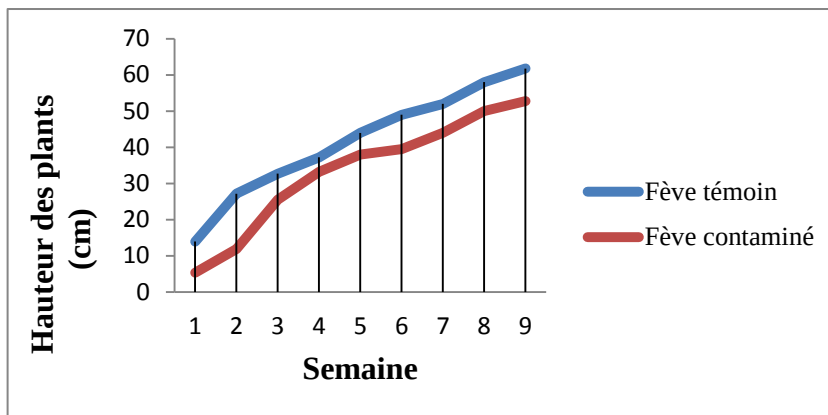


Figure 08 : hauteur des plants de la fève dans le sol contaminé et témoin.

Nous remarquons une augmentation de la croissance hebdomadaire pendant toute la durée de la culture. En effet, nous avons constaté au bout de la neuvième semaine que la fève a atteint 63.10 cm de hauteur dans le sol témoin et une hauteur de 54.45 cm dans le sol contaminé par les hydrocarbures.

➤ **Le pois**

La figure 9 montre l'évolution hebdomadaire de la hauteur des plants du pois dans le sol témoin et le sol contaminé par les hydrocarbures

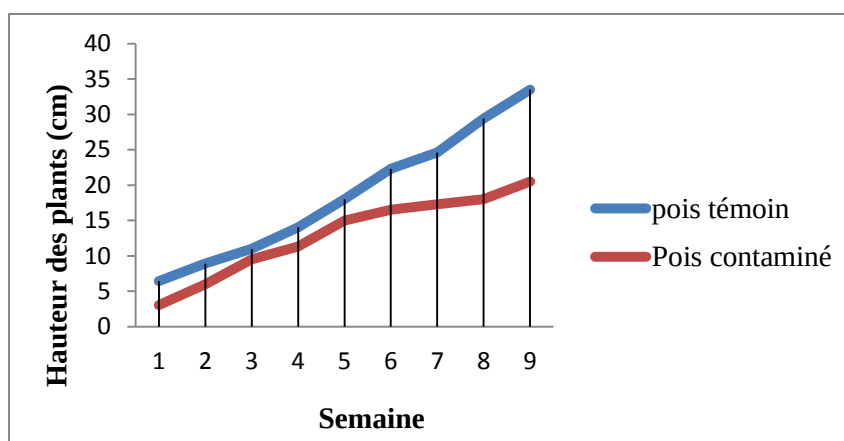


Figure 9 : Hauteur des plants du pois dans les sols témoin et contaminé par les hydrocarbures.

Concernant les pois, nous avons enregistré au bous de la neuvième semaine de culture une hauteur moyenne de 25.12cm dans le sol témoin et une valeur moyenne de 21.72 cm dans le sol contaminé.

➤ **L'orge**

La figure 10 montre l'évolution hebdomadaire de la hauteur des plants de l'orge dans le sol témoin et le sol contaminé par les hydrocarbures.

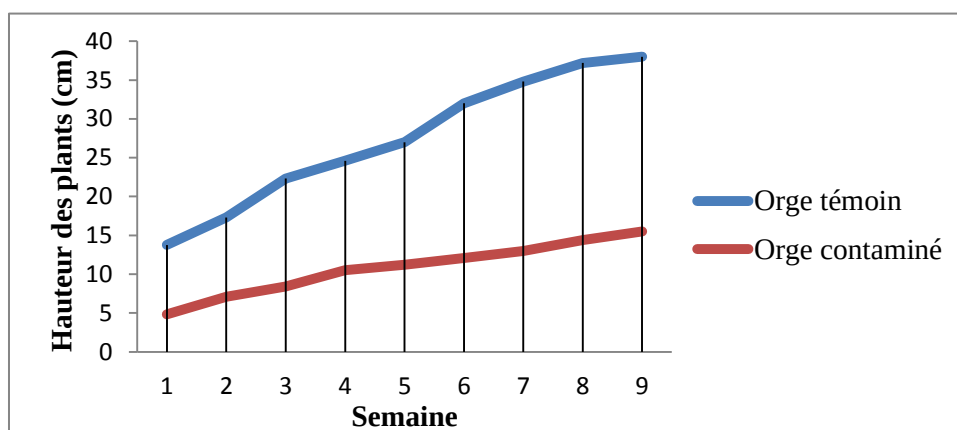


Figure 10: Hauteur des plants de l'orge dans le sol témoin et contaminé par les hydrocarbures.

En ce qui concerne l'orge la figure sus- citée montre une augmentation hebdomadaire de la croissance des plantes du l'orge cultivé dans le sol témoin avec un rythme de croissance rapide pour atteindre une valeur proche de 40 cm au bout de la neuvième semaine. Par contre dans le sol contaminé nous avons observé un rythme beaucoup moins important que celui enregistré dans le sol témoin où les plantes n'ont pas dépassé 15 cm pendant neufs semaines de culture à cause de l'effet toxique des hydrocarbures sur la croissance de ces plantes.

Les résultats de la hauteur des plants de la fève dans le sol contaminé sont beaucoup plus importants que celles obtenues avec le pois et l'orge sur le même type du sol. Les résultats de l'analyse de la variance pour la hauteur des trois espèces dans le sol contaminé et le sol témoin sont présentés dans le tableau VII.

Tableau VII: Analyse de la variance pour la hauteur des trois espèces dans les sols contaminés et témoins.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Sol	1	992.5	992.5	24.86	0.0003****
Sp	2	3689.9	1844.9	46.23	2.3e-06****
sol*sp	2	143.3	71.66	1.79	0.21
Var résiduel	12	479	39.92		
Var total	17	5304.7	2948.9		

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogène pour le facteur espèce le groupe A contient la fève, le groupe B contient le pois et l'orge (tableau VIII).

Tableau VIII : Groupes homogènes de la hauteur des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	57.24	A
2	Pois	27	B
3	Orge	26.75	

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogène pour le facteur sol, le groupe A contient la fève, le groupe B contient le pois et l'orge (tableau IX).

Tableau IX : Groupes homogènes de la hauteur des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Non contaminé	44.42	A
2	Contaminé	29.57	B

D'après ces résultats, nous constatons que, les hydrocarbures a un effet sur la croissance des plantes qui a été beaucoup plus marqué sur l'orge et le pois, et une hauteur plus

importante dans la fève, et cela peut être dû aux caractéristiques physiologiques ou génétiques de la fève qui tolère la pollution par les hydrocarbures.

Ces résultats peuvent être dus à l'effet des hydrocarbures sur la disponibilité des éléments nutritifs tel que rapporté par Guiddens (1975), quelque soit la concentration en hydrocarbures, la croissance des plantes telles que l'orge et le maïs est réduite. Cette réduction serait due à un manque d'assimilation d'eau et d'éléments nutritifs et au changement des propriétés de sol.

Ces résultats peuvent être dus aussi au changement des propriétés du sol. Selon Chaineau et *al.* (1996), les hydrocarbures peuvent provoquer une diminution de la teneur du sol en phosphore (P) et une augmentation en carbone organique total.

Enfin, certains auteurs ont signalé de la réduction de la croissance des plantes dans le sol pollué par les hydrocarbures et cela est dû aux propriétés de l'espèce et de l'hydrocarbure.

D'après Duchauffour (1997), les résultats obtenus au laboratoire montrent que les hydrocarbures perturbent la croissance des végétaux et leur phytotoxicité dépend de la dose, du type de molécules et des espèces végétales.

D'après Chaineau et *al.* (2000) la hauteur des plantes diminue avec l'augmentation de la concentration en hydrocarbures. Cela est dû à la phytotoxicité des hydrocarbures qui inhibent, pour une longue période, le développement de la végétation.

1-3-Biomasse aérienne

La figure 11 représente la biomasse aérienne de la fève, du pois et de l'orge dans le sol contaminé et le sol témoin.

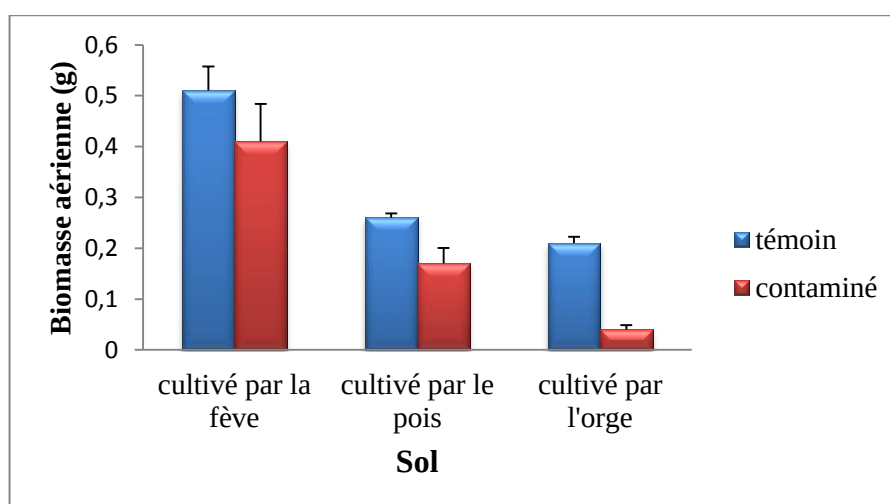


Figure 11 : la biomasse aérienne de la fève, du pois et de l'orge dans le sol témoin et contaminé.

La fève présente une biomasse aérienne de 0,51g dans le sol témoin, et une valeur de 0.41 g dans le sol contaminé.

Concernant le pois nous avons enregistré une valeur moyenne de 0.26g dans le sol témoin, et elle est de 0.17g dans le sol contaminé. En ce qui concerne l'orge cultivé dans le sol témoin elle a atteint 0.21g au niveau du sol témoin et elle n'est que de 0.04g dans le sol contaminé.

L'analyse de la variance à révéler qu'il y a une différence très hautement significative pour le facteur espèce, et une différence significative pour le facteur sol, mais pas pour leur interaction (Tableau X).

Tableau X: Analyse de la variance pour la biomasse aérienne des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Sol	1	0.037	0.037	4.944	0.04*
Sp	2	0.290	0.145	19.196	0.00018***
sol :sp	2	0.00021	0.000106	0.014	0.98
Var résiduel	12	0.0906	0.00755		
Var total	17	0.4178	0.1896		

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogènes pour le facteur espèce, le groupe A contient la fève et le groupe B contient le pois et l'orge, ce qui montre que la biomasse aérienne de la fève est différente de celle du pois et de l'orge (Tableau XI).

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

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	0.46	A
2	Pois	0.21	B
3	Orge	0.17	

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogènes pour le facteur sol, le groupe A contient le sol non contaminé et le groupe B contient le sol contaminé (Tableau XII).

Tableau XII : Groupes homogènes de la biomasse aérienne dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Non contaminé	0.32	A
2	Contaminé	0.23	B

L'effet néfaste des hydrocarbures sur la biomasse végétale est probablement dû à la perturbation de la nutrition hydrominérale du végétal, ainsi qu'à l'inhibition de la croissance racinaire qui peut mener à une basse absorption de l'eau ce qui induit une diminution du développement du végétal. En effet, l'accroissement des racines permet à la plante de pouvoir subvenir à ses besoins en azote sachant que l'azote est l'un des éléments essentiels pour la croissance des végétaux.

La biomasse végétale étant un critère de mesure du rendement au niveau d'un sol contaminé par les hydrocarbures, l'effet toxique des hydrocarbures sur la partie aérienne s'exprime par un retard significatif de la croissance, cette diminution se traduit par la réduction du poids sec (Chaineau et *al.*, 1997).

Morot (1997), a noté que la nutrition azotée limitait généralement la croissance, le développement et le rendement du végétal. Cette réduction de la biomasse végétale nous laisse penser aussi au sol qui est la source d'une grande partie des éléments nécessaires au développement des végétaux, le changement de ses propriétés (changement de la teneur en humidité, en pH et en matière organique) influence la croissance végétale.

Les rapports C/N et C/P diminuent puisqu'il y a un enrichissement du sol en carbone suite à l'apport de pétrole (Morot, 1997).

1-4- Biomasse racinaire

La figure 12 représente la biomasse racinaire de la fève, du pois et de l'orge dans le sol contaminé et le sol témoin.

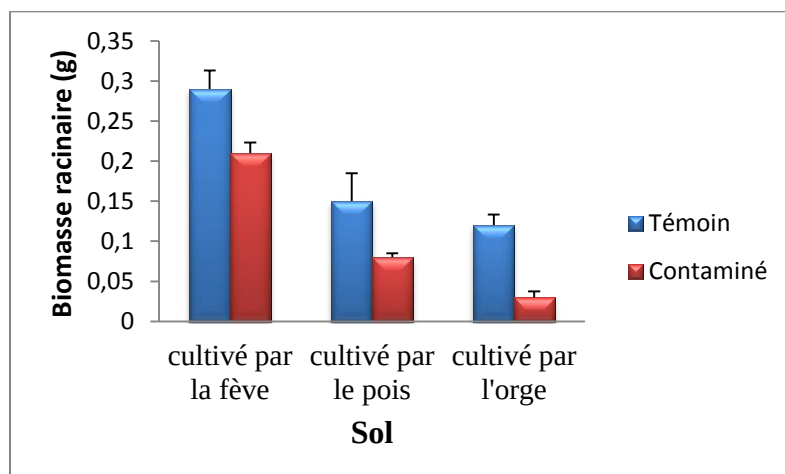


Figure 12 : la biomasse racinaire de la fève, du pois et de l'orge dans le sol témoin et contaminé.

La fève présente une biomasse racinaire de 0,29 g dans le sol témoin, et une valeur de 0.21 g dans le sol contaminé.

Concernant le pois nous avons enregistré une valeur moyenne de 0.15g dans le sol témoin, et elle est de 0.08g dans le sol contaminé. En ce qui concerne l'orge cultivé dans le sol témoin elle a atteint 0.12g au niveau du sol témoin et elle n'est que de 0.03g dans le sol contaminé.

L'analyse de la variance à révéler qu'il y a une différence très hautement significative pour les deux facteurs à savoir le type de sol et l'espèce, mais pas pour leur interaction (Tableau XIII).

Tableau XIII : Analyse de la variance pour la biomasse racinaire des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	0.031	0.031	21.47	0.0057***
Sp	2	0.105	0.052	36.22	8.2e-06***
Sol : sp	2	0.0006	0.00034	0.23	0.7
Var résiduel	12	0.017	0.0014		
Var total	17	0.153	0.084		

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogènes pour le facteur espèce, le groupe A contient la fève et le groupe B contient le pois et l'orge, ce qui montre que la biomasse racinaire de la fève est différente de celle du pois et de l'orge (Tableau XIV).

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

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	0.25	A
2	Pois	0.12	B
3	Orge	0.07	

Nous remarquons que la biomasse racinaire de l'orge et du pois sont classés dans le même groupe B, alors que la fève dans le groupe A, ce qui signifie que la biomasse racinaire de la fève est différent (supérieur) à celui de l'orge et du pois.

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogènes pour le facteur sol, le groupe A contient le sol non contaminé et le groupe B contient le sol contaminé (Tableau XV).

Tableau XV: Groupes homogènes de la biomasse aérienne dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Non contaminé	0.18	A
2	Contaminé	0.10	B

1-5- Volume racinaire

La figure 13 représente le volume racinaire de la fève, du pois et de l'orge dans les différents sols.

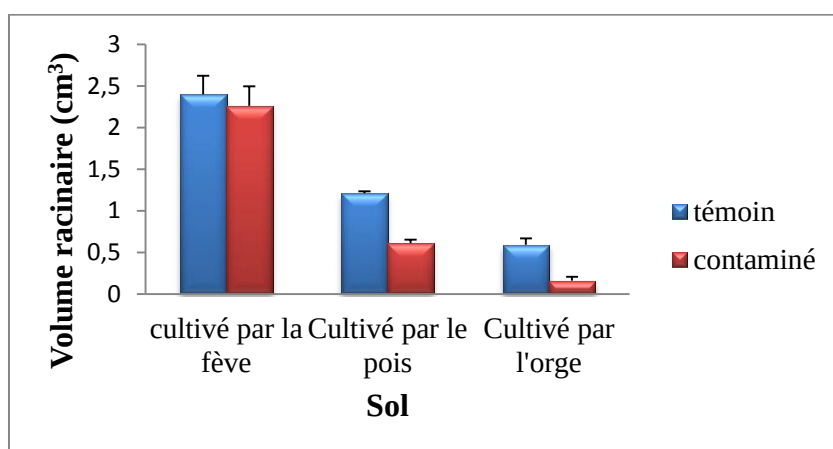


Figure 13 : le volume racinaire de la fève, du pois et de l'orge dans les sols témoin et contaminé.

Nous avons enregistré une valeur moyenne de 2.4 cm^3 pour la fève cultivée dans le sol témoin, et celle enregistrée dans le sol contaminé est de 2.26 cm^3 .

Le pois présente un volume racinaire de 1.21 cm^3 dans le sol témoin et une valeur de 0.61 cm^3 dans le sol contaminé. En ce qui concerne l'orge cultivé dans le sol témoin nous avons observé une valeur moyenne de 0.59 cm^3 et une valeur de 0.16 cm^3 dans le sol contaminé. L'analyse de la variance a révélé qu'il y a une différence très hautement significative pour le facteur espèce, et une différence très significative pour le facteur sol, mais pas pour leur interaction (Tableau XVI).

Tableau XVI : Analyse de la variance pour le volume racinaire des trois espèces dans les sols contaminés et les témoins.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	0.853	0.853	12.96	0.0036**
Facteur 2 :sp	2	11.929	5.96	90.62	5.73e-0.8***
Inter : sol*sp	2	0.159	0.079	1.20	0.33
Var résiduel	12	0.789	0.065		
Var total	17	13.831	6.968		

Le test Newman et Keuls pour le volume racinaire a donné trois groupes homogènes A, B et C pour le facteur espèce, ce qui montre que le volume racinaire est différent d'une espèce à l'autre.

Tableau XVII : Groupes homogènes de volume racinaire des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	2.34	A
2	Pois	0.91	B
3	Orge	0.43	C

Le test Newman et Keuls pour le volume racinaire a donné deux groupes homogènes pour le facteur sol, le groupe A contient le sol contaminé et le groupe B contient le sol non contaminé. (Tableau XVIII).

Tableau XVIII : Groupes homogènes de volume racinaire dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Contaminé	1.40	A
2	Non contaminé	1.01	B

1-6- Longueur de la racine principale

La figure 14 représente la longueur de la racine principale de la fève, du pois et de l'orge dans le sol contaminé et le sol témoin.

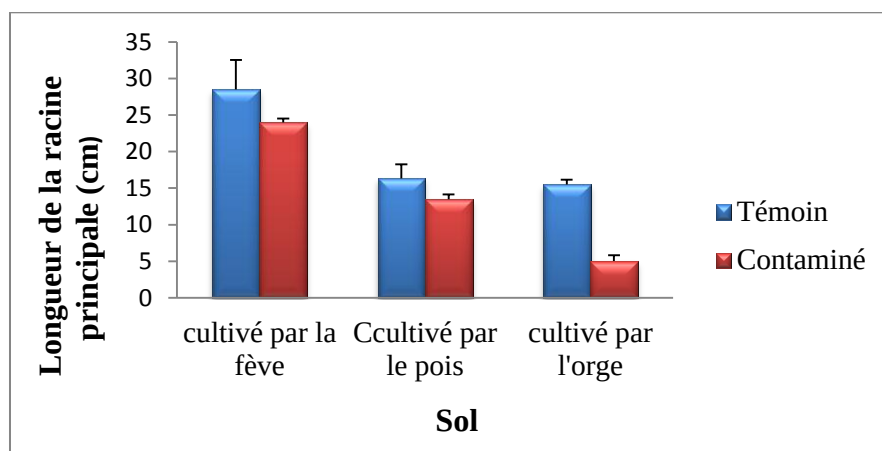


Figure 14 : la longueur de la racine principale de la fève, du pois et de l'orge dans les sols témoin et contaminé.

La longueur de la racine principale des plantes de la fève est de 28.5 et 24 cm respectivement dans le sol témoin et le sol contaminé. La réduction de la longueur des racines n'est pas importante dans le sol contaminé et cela peut être due à la capacité de la fève à tolérer la pollution par les hydrocarbures.

Concernant la longueur de la racine principale du pois, elle a atteint 16.32 cm au niveau du sol elle est de 13.5 cm dans le sol contaminé. En ce qui concerne l'orge cultivé dans le sol témoin elle a atteint 15.5cm au niveau du sol témoin et elle n'est que de 5.02 cm dans le sol contaminé.

Les résultats de l'analyse de la variance pour la longueur de la racine principale des trois espèces dans le sol contaminé et le sol témoin sont présentés dans le tableau XIX.

Tableau XIX : Analyse de la variance pour la longueur de la racine principale des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	69.62	69.62	4.79	0.04*
Facteur 2 :sp	2	519.84	259.91	17.90	0.0002***
Inter : sol :sp	2	110.43	55.21	3.80	0.05
Var résiduel	12	174.5	14.51		
Var total	17	874.4	399.25		

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogène pour le facteur espèce, le groupe A contient la fève, le groupe B contient le pois et l'orge (tableau XX).

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

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	23.25	A
2	Pois	14.91	B
3	Orge	10.26	

Le test Newman et Keuls a donné deux groupes homogène pour le facteur sol, le groupe A contient le sol non contaminé, le groupe B contient le sol contaminé (tableau XXI).

Tableau XXI : Groupes homogènes de la longueur de la racine dans les deux sols déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Non contaminé	20.10	A
2	Contaminé	14.17	B

A partir de ces analyses concernant la biomasse racinaire, le volume racinaire et la longueur de la racine principale, nous constatons que la présence des hydrocarbures dans le sol induit une réduction de la croissance racinaire. Ces résultats montrent que le milieu favorable pour la croissance des racines est le sol non contaminé où nous avons remarqué la présence d'un système racinaire très développé avec de nombreuses ramifications tandis que les cultures des sols contaminés comportent une partie racinaire moins développée et moins ramifiée, ce qui explique la diminution du volume racinaire dans le sol contaminé. L'atteinte des racines peut être due au changement des propriétés du sol et/ou à la diminution des éléments nutritifs qui sont essentiels pour leur développement.

D'après Hopkins (2003), les nutriments minéraux sont prélevés sélectivement de la solution du sol par la racine. La concentration et la disponibilité en minéraux dans la solution du sol dépendent de la propriété de ce sol ainsi que des activités métaboliques des racines.

D'après les résultats d'Ait taye et Titouche (2011), la teneur du sol contaminé en humidité est beaucoup plus importante dans le sol contaminé par les hydrocarbures par rapport au sol témoin du fait que l'hydrocarbure est une huile visqueuse qui rend difficile l'évapotranspiration du sol et accroît sa rétention en eau. L'augmentation de la teneur du sol en humidité provoque une asphyxie du végétal en remplissant les pores du sol en eau à la place de l'air.

Chaineau et *al.* (1997), ont montré que la concentration élevée du pétrole brut a un effet sur la physiologie du végétal.

Selon 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-micro-organismes qui est basée sur les flux de substance solubles. Cette atteinte des racines ne permet pas à la plante d'augmenter sa surface de contact avec le milieu de culture pour optimiser la nutrition minérale.

Selon Hopkins (2003), des excès de microélément (Fe, Mn, Cl, Cu) inhibent typiquement la croissance des racines.

2-Effet des hydrocarbures sur le sol

2-1-Effet sur le pH du sol

La figure 15 illustre la mesure du pH des différents sols contaminés et cultivés par les trois espèces et le contaminé non cultivé.

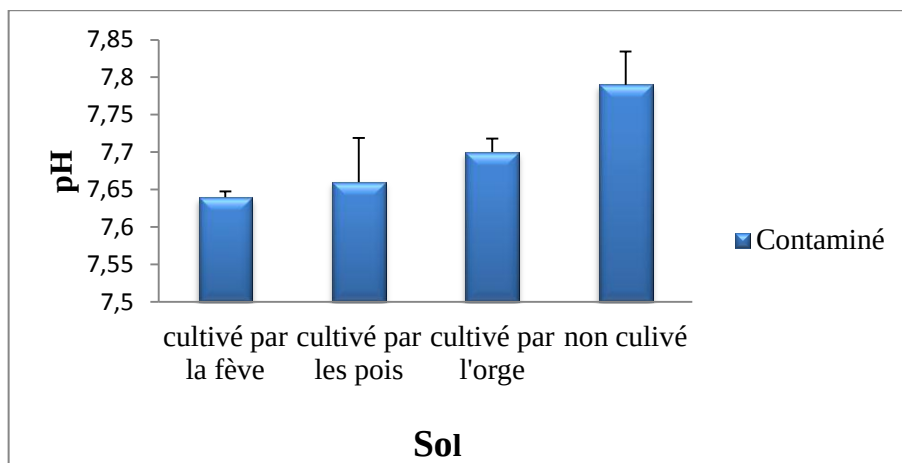


Figure 15: Mesure du pH des sols contaminés cultivés par les trois espèces et de sol contaminé non cultivé.

Le sol contaminé cultivé présente un pH de 7.64 pour la culture de la fève, 7.66 pour la culture du pois et 7.70 pour la culture de l'orge. Dans le sol contaminé non cultivé il est de 7.79.

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

Il ressort de ces résultats que le sol contaminé cultivé par la fève présente un pH inférieur par rapport à celui cultivé par le pois et l'orge et ça peut être dû à son système racinaire développé.

Les résultats de l'analyse de la variance pour le pH des sols sont présentés dans le tableau XXII.

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

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : sol	3	0.037	0.012	2.15	0.17
Résiduelle	8	0.046	0.006		
Total	11	0.083	0.018		

L'analyse de la variance pour la mesure du pH du sol contaminé portant la fève, le pois et l'orge et du sol contaminé non cultivé, a révélé que l'effet lié à la présence des hydrocarbures n'est pas significative.

La comparaison du pH du sol contaminé non cultivé à celui des sols contaminés cultivés par les trois espèces fait sortir une légère diminution dans ces derniers malgré que l'analyse statistique ne montre pas de différence significative. On peut corrélérer cette diminution à la dégradation des hydrocarbures.

D'après (Njuko et al., 2009) la diminution du pH est dû à la dégradation des hydrocarbures, elle pourrait être dû à l'accumulation des acides organiques produits lors de la dégradation dans le sol.

Par contre (Berge et al., 1986) note que la diminution est dû soit à l'oxydation des n-alcanes, soit de celle des composés prévenant de la rupture de noyaux aromatique.

2-2- Conductivité électrique

La figure 16 représente la conductivité électrique des différents sols.

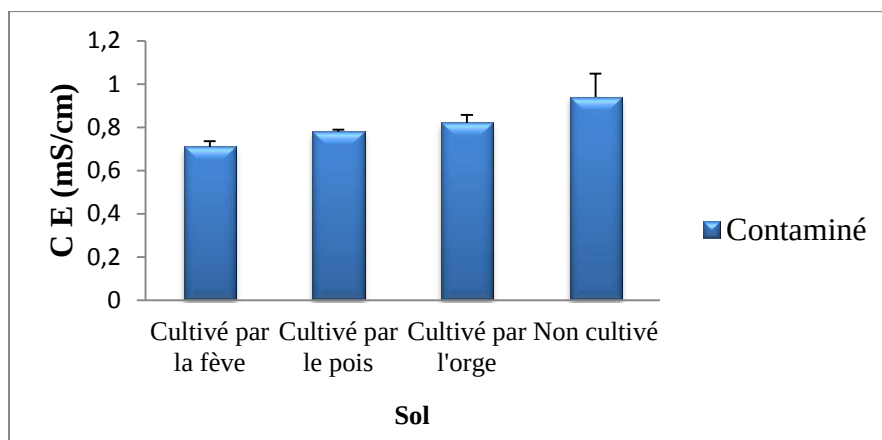


Figure 16: Mesure de la conductivité électrique des sols contaminés cultivés par les trois espèces et du sol contaminé non cultivé.

La conductivité électrique de sol contaminé cultivé par la fève est de 0.71ms/cm, et de sol contaminé cultivé par le pois elle est de 0.78ms/cm. Le sol cultivé par l'orge présente une valeur moyenne de 0.82ms/cm, et dans le sol contaminé non cultivé elle est de 0.94ms/cm.

Les résultats de l'analyse de la variance pour la conductivité électrique des sols sont présentés dans le tableau XXIII.

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

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : sol	3	0.083	0.022	1.99	0.19
Résiduelle	8	0.11	0.013		
Total	11	0.193	0.035		

L'analyse de la variance pour la conductivité électrique du sol contaminé portant la fève, le pois et l'orge et du sol contaminé non cultivé, a révélé que l'effet lié à la présence des hydrocarbures n'est pas significative.

Selon les travaux réalisés par Khajehnouri, (2011) sur les propriétés électriques des sols contaminés par les hydrocarbures, a montré que la conductivité électrique du sol

contaminé décroît avec l'augmentation de la saturation en hydrocarbure. La conductivité électrique, en principe, sensible à la composition minérale du sol, granulométrie, teneur en eau, chimie du fluide interstitiel, la teneur en métal et le degré de présence d'hydrocarbures. Par contre (Chaineau et *al*, 1999) note une augmentation de la conductivité électrique que entrainera l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence des sels.

2-3- Test de germination

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

➤ La longueur des racines

La figure 17 représente l'élongation racinaire des graines du blé dans les différents sols

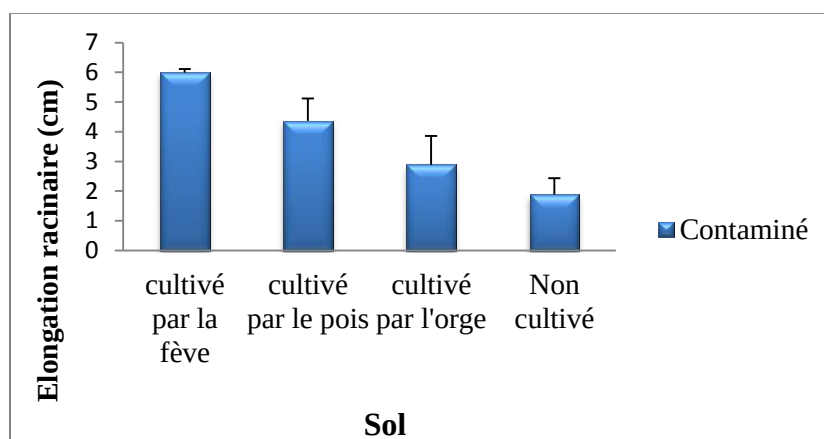


Figure 17: Mesure de la longueur des racines du blé dans les différents sols cultivés et dans le sol non cultivé.

Après une semaine on a mesuré la longueur des racines des plants du blé dans les différents sols, on a enregistré une valeur moyenne de 5.99 cm dans le sol traité par la fève, 4.36 cm dans le sol traité par les pois, 2.89 cm dans le sol traité par l'orge, et elle n'est que de 1.89 cm dans le sol non traité.

Les résultats de l'analyse de la variance pour l'élongation racinaire des graines du blé dans les différents sols sont présentés dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV : Analyse de la variance pour la longueur des racines des graines du blé dans le sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois espèces.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : sol	3	28.77	9.53	5.24	0.027*
Résiduelle	8	14.62	1.82		
Total	11	43.39	11.11		

L'analyse de la variance a révélé que l'effet lié à la présence des hydrocarbures dans le sol est significative.

Le test Newman et Keuls pour l'élongation racinaire a donné trois groupes homogènes, A, B, et AB qui contiennent respectivement sol cultivé par la fève, sol non cultivé, sol cultivé par l'orge et le cultivé par les pois. (Tableau XXV).

Tableau XXV : Groupes homogènes de la longueur des racines des graines du blé dans les différents sols.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Sol cultivé par la fève	5.99	A
2	Sol cultivé par l'orge	4.36	AB
3	Sol cultivé par les pois	2.89	
4	Sol non cultivé	1.88	B

D'après Brunete (2008), la perte réduite de la transpiration due à l'eau et la réduction du taux d'absorption de l'eau dans le sol ont comme conséquence l'augmentation de l'humidité du sol.

Selon 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-micro-organismes qui est basée sur les flux de substance solubles. Cette atteinte des racines ne permet pas à la plante d'augmenter sa surface de contact avec le milieu de culture pour optimiser la nutrition minérale.

➤ Taux de germination

La figure 17 représente le taux de germination des graines du blé dans les différents sols.

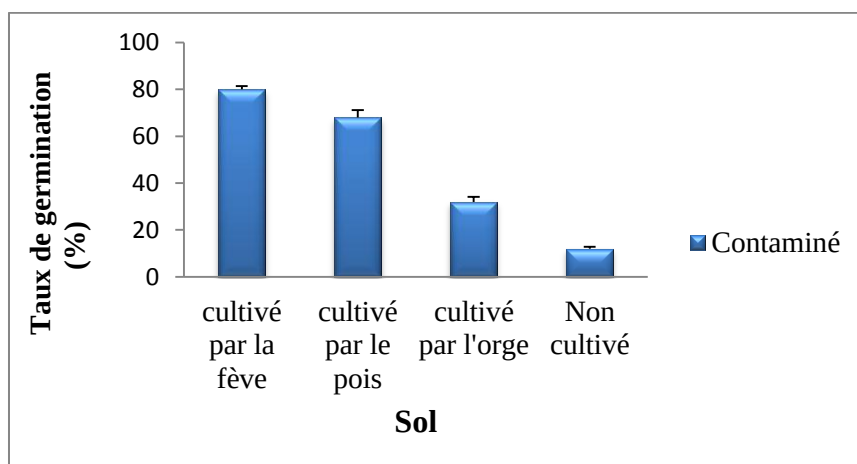


Figure 17 : Taux de germination des graines du blé dans les différents sols contaminés cultivés et dans le sol contaminé non cultivé.

Le taux de germination des graines du blé dans le sol cultivé par la fève est de 80%, et dans le sol cultivé par les pois il est de 68%. Concernant la germination des graines dans le sol cultivé par l'orge on a enregistré un pourcentage de 32 et dans le sol non cultivé il est de 12%.

La capacité de la germination représentée dans la figure 15 est importante dans les sols cultivés par les trois espèces par rapport au sol non cultivé.

Nous avons constaté l'inhibition de la germination des graines du blé au niveau du sol contaminé non cultivé, et ça peut être dû à l'effet toxique des hydrocarbures exercés sur les graines du blé.

L'analyse de la variance a révélé que l'effet lié à la présence des hydrocarbures dans le sol est très hautement significative (Tableau XXVI).

Tableau XXVI : Analyse de la variance pour la germination des graines du blé dans les différents sols.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : sol	3	8928	2976	175.6	1.24e-07***
Résiduelle	8	136	17		
Total	11	9064	2993		

Le test Newman et Keuls pour le taux de germination a donné quatre groupes homogènes, A, B, C et D qui contiennent respectivement sol cultivé par la fève, sol cultivé par le pois, sol cultivé par l'orge et le sol non cultivé (Tableau XXVII).

Tableau XXVII : Groupes homogènes de la germination des graines du blé dans les différents sols.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Sol cultivé par la fève	80.25	A
2	Sol cultivé par les pois	72.10	B
3	Sol cultivé par l'orge	56.70	C
4	Sol non cultivé	30.66	D

Selon Udo et Fayemi (1975) et Chaîneau et al., (1997), les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, atteindre et altérer les réactions métaboliques et tuer l'embryon au contact direct.

C'est essentiellement la fraction légère des hydrocarbures qui induit une réduction assez significative de la germination en outre la germination est corrélée avec les propriétés hydrophobes des hydrocarbures qui empêchent et réduisent les échanges d'eau et de gaz.

La résistance des graines à la contamination par les hydrocarbures suit l'ordre suivant :

Tournesol > haricot > blé > trèfle > coniorcultiure > maïs > orge > laitue. (Chaîneau et al., 1997).

3-Analyse par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Le spectre IR des trois sols contaminés : non cultivé, le cultivé par le pois et le cultivé par l'orge fait apparaître une série de pics qui sont représentés dans la figure 18.

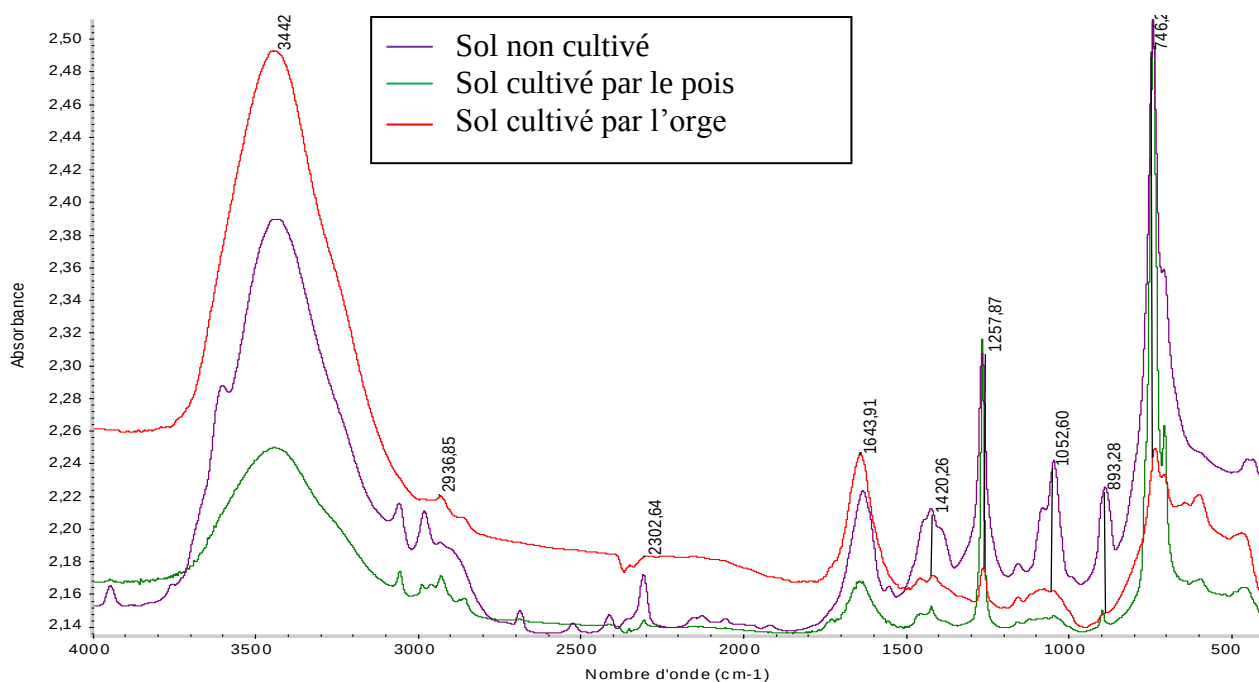


Figure 18 : Spectre FTIR de sol contaminé non cultivé, contaminé cultivé par le pois et de sol contaminé cultivé par l'orge

L'analyse par spectroscopie à infrarouge des différents sols contaminés, le non cultivé, le cultivé par les pois et cultivé par l'orge montre une modification des différentes bandes caractéristiques des groupements fonctionnels relatifs aux hydrocarbures ainsi que l'intensité des pics Tableau(XXVIII).

Tableau XXVIII:

Nombre d'onde	Groupements fonctionnels
3400-3500	Amine (N-H)
1630-1695	alcène(C=C)
1210-1320	Acide carboxylique (O-C)
650-770	Alcools et phénols(O-H)

Le spectre IR de sol contaminé non cultivé fait apparaître une série de pics dont, le plus intense à 3445 cm^{-1} correspond au groupement N-H de la fonction amine, le second à 1639 cm^{-1} correspond au groupement C=C de la fonction alcène, la bande située à 733 cm^{-1} correspond au groupement O-H de la fonction alcool.

Le spectre IR de sol contaminé cultivé par les pois fait apparaître une série de pics dont, le plus intense à 3442 cm^{-1} correspond au groupement N-H de la fonction amine, le second à 1265 cm^{-1} correspond au groupement O-C de la fonction acide carboxylique, la bande située à 740 cm^{-1} correspond au groupement O-H de la fonction alcool.

Le spectre IR de sol contaminé cultivé par l'orge fait apparaître une série de pics dont, le plus intense à 3443 cm^{-1} correspond au groupement N-H de la fonction amine, le second à 1265 cm^{-1} correspond au groupement O-C de la fonction acide carboxylique, la bande située à 740 cm^{-1} correspond au groupement O-H de la fonction alcool.

On a constaté que les plantes du pois et du l'orge cultivées dans le sol contaminé ont montré un changement dans la composition chimique, qui se traduit par une modification des bandes caractéristiques des groupements fonctionnelles relatifs aux hydrocarbures, avec l'apparition d'un nouveau groupement O-C de la fonction acide carboxylique et la disparition de groupement C=C de la fonction alcènes.

Le changement qui a été enregistré dans les bandes caractéristiques des groupements fonctionnelles relatifs aux hydrocarbures dans le sol contaminé après la culture du pois et du l'orge, peut être dû à l'utilisation de ces hydrocarbures par ces plantes ou leur dégradation par les micro-organismes du sol. Schnoor et *al.* (2003) ont noté que le sol est une matrice complexe servant de support au développement des plantes et des micro-organismes qui se nourrissent des composés organiques ou inorganique. Les composés en excès peuvent alors être utilisés comme source d'énergie par les plantes et les micro-organismes.

Selon Cardiere (2006), certaines plantes sont capables d'extraire, de transporter et de concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables (feuilles, tiges et racines).

SCHNOOR et *al.* (2003) ont noté que les plantes vont soit absorber le contaminant pour le métaboliser ou le stocker, soit réduire voir empêcher la libération du contaminant dans les autres compartiments de l'environnement.

Le présent travail a été mené en vue de mettre en évidence l'effet qu'engendrent les hydrocarbures sur le sol et la végétation, d'approfondir nos connaissances sur l'action écotoxique des polluants organiques et de faire un essai de phytoremédiation pour évaluer l'efficacité de cette technique.

Par le biais d'une étude au laboratoire, quelques paramètres de la végétation ainsi que des propriétés d'un sol agricole contaminé par les hydrocarbures ont été examinés. Cela a été observé en comparant un sol témoin et un sol contaminé par les hydrocarbures, et a essayé de mettre en évidence l'influence ou la capacité de deux plantes légumineuse (la fève et le pois) et la graminée (orge) à remédier ce sol contaminé. Le but de cette étude réside également dans l'analyse des effets des hydrocarbures sur le sol et le végétal cultivé.

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 confirmé par : le taux de levée, la hauteur des plantes, la longueur racinaire, le volume racinaire et la biomasse végétale. Cela a été observé en comparant un sol témoin et un sol contaminé par les hydrocarbures. La fève a supporté cette concentration des hydrocarbures contrairement à l'orge dont quelques plants ayant poussé sont morts après leur levée et au pois dont le taux de la levée et la croissance sont faible.

- La fève a mieux supporté la contamination par les hydrocarbures contrairement à l'orge dont quelques plants ayant poussé sont morts après leur levée et au pois dont le taux de levée et la croissance étaient faibles.

- Une légère augmentation de pH du sol et de la conductivité électrique, et une diminution de taux de germination et de la longueur racinaire des graines du blé en comparant ces paramètres de sol contaminé non cultivé à celles des sols contaminé cultivé par les trois espèces.

- En parallèle ce travail nous a permis de montrer l'efficacité d'un traitement biologique qui est la phytoremédiation. En effet, des plantes telles que les légumineuses, ont une capacité de dépollution importante, en dégradant les hydrocarbures, grâce à un système racinaire bien développé, ce dernier induirait des changements des propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, permettant ainsi l'amélioration de l'environnement microbien et un développement normal de la végétation.

Au regard de ces résultats, nous apercevons que la toxicité des hydrocarbures est différente d'une espèce à l'autre et que la fève peut être utilisée comme moyen biologique de décontamination des sols pollués par les hydrocarbures.

Enfin, pour une meilleure compréhension de ces phénomènes, nous recommandons :

- Une étude sur la génétique de la fève qui permet la résistance de cette espèce à une certaine concentration des hydrocarbures dans le sol.
- Comprendre les relations sol-plante-micro-organismes, ainsi que les mécanismes enzymatiques impliqués dans la dégradation et la transformation des hydrocarbures qui permettra d'optimiser les techniques de la phytoremédiation.
- Extraire les hydrocarbures des plantes après un essai de phytoremédiation pour élucider les mécanismes par lesquels ces plantes décontaminent le sol.

AIT TAYEB Z. ET TITOUCHE H., 2001. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes (*Phaseolus vulgaris* L et *Cicer arietinum* L), du sol et essai de phytoremédiation. Memoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie U.M.M.T.O. Pp 22-68.

ALI AHMAD 1998

ARNAUD P., 2004. Chimie organique. Edition DUNOD, Paris. 208p

ARNODE 1983

Babas S. et Ikkour M., 2005- Contribution à l'étude du comportement de 9 variétés d'orge et de 9 variétés de triticales introduites en zone sub-humide (OUED SEMMAR-ALGER).

Mémoire d'Ingénieur d'Etat. Université de TIZI OUZOU. 110p.

BEN NACEUR 2001

Berg J.M et Merienne D., 1986. La pollution des sols par les hydrocarbures.65p.

BERTAND 1989

Bomboi M.T.et Hernandez A., (1991)- Hydrocarbon in urban runoff their contribution to the wastewaters « Water Research » 25(5): 557-565.

CADIERE F. 2006 .Traitement biologique des sols pollués ; recherche et innovation.

Département sites des sols pollués. Direction Déchets et sol- ADEME (Angers) pp 6-17

CHACHEAU C.H., MOREL J.L. et OUDOT J., 1997. Phytotoxicity and plant Uptake of Fuel Oil hydrocarbons. J. Environ. Qual. V 26, pp: 1478-1483. .

CHACHEAU C.H., MOREL J.L. et OUDOT J., 1996.phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbon .J .environ .Quali. . V 26, pp 1483- 1487.

CHACHEAU C.H., MOREL J.L. et OUDOT J.,2000. Bioremediation and biodegradation. Biodegradation of fuel Oil Hydrocarbons in the rhizosphere of Maize.J.Environ.Qual. V29, 569-578.

CHERGUI

CHOCAT B., 2004-Pollution par les hydrocarbures dans les eaux de ruissellement et traitabilité: Solution existante, 1ere édition Tec et Doc Lavoisier. pp 289-290.

.CHOUX 1992

CHOUX ET FOURY .,1994-production des légumières.Edition Tec et Doc.paris.pp17.47.

- 1. Clément J.M- 1994.** Le technicien d'agriculture tropicale - les cultures maraîchères - Maisonneuve et Larose --Larousse Agricole ACCT - CTA - Librairie Larousse 191-France.

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

- CRONQUIST A,** 1981-An Integrated system of classification of Flowering plants.Columbia University press, New York.

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

- DUCHAUFOR P., 2001.** Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6ème édition MASSON, Paris Milan Barcelone. 498 p.
- FATTAL P., 2008.** Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Rennes. 498 p.
- FEZANI S. et KHIDER F., 2007.** Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes, leurs caractérisations et leurs effets sur la microflore du sol. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en biologie U.M.M.T.O. 73p
- 1. GIDDENS J., 1976.** Spent motor oil effects on soil and crops. J. Environ. Qual., Vol. 5. N° 2. 179-181 pp.

- GirardC.M., Walter CH.et Berthelin J., 2005 :** Sols et environnement. Edition DUNOD, Paris (France).436p.

- Hanh H. H.etRudiger P., (1994)-** The contribution of parked vehicle emissions to the pollution of urban runoff. The Science of the Total environment 146: 525-353

- ILLOVIC S. et BONNARME V., 2012.** Ces plantes qui guérissent l'habitat phytoépuration et génie végétale .Ed EYROLLES. Institut Français d'Urbanisme – Université Paris. 130 p.

- KOLLER E., 2004.** Traitement des pollutions industrielle (eau, air ; déchet, sol, boues). Edition DUNOD. Paris. 424p.
- LECOMTE P., 1998.** Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines 2^{ème} édition Lavoisier TEC & DOC. 204p.

Ngo C. et Regent A., 2004 : Déchets, pollution, impact sur environnement et la santé. Edition DUNOD Paris. 134p

NjokuK.I., Akinola M.O. etObuh B.O., 2009: Phytoremediation of crude oil contaminated soil. Edition marslandpress. 87p.

NORINI M-P., 2007.Eco dynamique des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des communautés microbiennes dans les sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique. Thèse de Doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I. pp 75-9

RAMADE F, 2011 : Introduction à l'écochimie. Edition TEC et TOC. P

RAMADE F., 2007. Introduction à l'écotoxicologie. Fondaments et applications. Ed et TEC et DOC. Lavoisier. 618 p.

RAMADE F., 1992. Précis d'écotoxicologie. Edit. MASSOUN. Paris. 300 p

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. 156 p.

SCHNOOR J.L et McCutcheon S.C.,2003. Phytoremediation – transformation and control of contaminants. Dans wiley-interscience, Inc, NJ, USA, 987p.

SOLTANI M., 2004. Distribution lipidique et voies de décontamination métabolique chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat d'univers Paris. 284 p

Takada H., Onda T.et Oguran. (1990)- Determination of PHA in urban street dusts and their source materials by capillary gas chromatography. «Environmental Science and Technology»24(8): 1179-11.

VIDALI M., 2001. Bioremédiation an overview.Pure appl. chem. 222 p.

Annexe 1 : résultats de mesure

Annexe 1-1- : taux de levée des plantes la fève cultivées sur le sol témoin et contaminé.

en (g)

sol pot	Témoin			contaminé		
	Fève	pois	orge	fève	pois	orge
Pot1	100	100	65	90	50	10
Pot2	100	80	90	70	75	15
Pot3	100	57	70	30	40	20

Annexe1-2 : la hauteur des plants de la fève cultivé sur le sol témoin et contaminé en (cm).

Durée	1 ^{ère} semaine	2 ^{ème} semaine	3 ^{ème} semaine	4 ^{ème} semaine	5 ^{ème} semaine	6 ^{ème} semaine	7 ^{ème} semaine	8 ^{ème} semaine	9 ^{ème} semaine
Témoin	13.94	27.18	32.7	37.2	44	49	52	58	61.77
contaminé	5.33	11.88	25.5	33.2	38	39.5	44	50	52.72

Annexe 1-3 : Hauteurs des plants de pois cultivé sur le sol témoin et contaminé par en (cm).

Durée	1 ^{ère} semaine	2 ^{ème} semaine	3 ^{ème} semaine	4 ^{ème} semaine	5 ^{ème} semaine	6 ^{ème} semaine	7 ^{ème} semaine	8 ^{ème} semaine	9 ^{ème} semaine
Témoin	6.41	8.9	11	14.04	18	22.3	24.6	29.4	33.5
contaminé	3.05	6	9.5	11.3	15	16.5	17.3	18	20.5

Annexe 1-4 : Hauteurs des plants de l'orge cultivé sur le sol témoin et contaminé en (cm).

Durée	1 ^{ère} semaine	2 ^{ème} semaine	3 ^{ème} semaine	4 ^{ème} semaine	5 ^{ème} semaine	6 ^{ème} semaine	7 ^{ème} semaine	8 ^{ème} semaine	9 ^{ème} Semaine
Témoin	13.76	17.3	22.32	24.6	27	32	34.8	37.2	38
contaminé	4.83	7.1	8.4	10.5	11.2	12.1	13	14.4	15.5

Annexe 1-5 : biomasse aérienne des trois plantes cultivées dans le sol contaminé et témoin en (g)

sol pot	Témoin			contaminé		
	Fève	pois	orge	fève	pois	orge
Pot1	0.56	0.24	0.24	0.58	0.13	0.031
Pot2	0.4	0.27	0.21	0.32	0.14	0.03
Pot3	0.57	0.27	0.19	0.33	0.24	0.06

Annexe 1-6 : biomasse racinaire des trois plantes cultivées dans le sol contaminé et témoin en(g)

sol pot	Témoin			contaminé		
	Fève	pois	orge	fève	pois	orge
Pot1	0.3	0.08	0.1	0.23	0.08	0.011
Pot2	0.24	0.15	0.15	0.22	0.07	0.037
Pot3	0.33	0.22	0.11	0.18	0.09	0.010

Annexe 1-7 : volume racinaire des trois plantes cultivées dans le sol témoin et contaminé en (cm³)

sol pot	Témoin			contaminé		
	Fève	pois	orge	fève	pois	orge
Pot1	1.91	1.16	0.66	1.82	0.53	0.1
Pot2	2.52	1.23	0.41	2.2	0.6	0.11
Pot3	2.77	1.24	0.7	2.76	0.7	0.27

Annexe 1-8 : mesure de pH des différents sols contaminés.

pH des sols	témoin	fève	pois	orge
Pot 1	7.86	7.66	7.69	7.71
Pot 2	7.69	7.65	7.53	7.66
Pot 3	7.82	7.63	7.76	7.73

Annexe 1-9 : mesure de conductivité électrique des différents sols contaminés en (ms/s⁻¹).

conductivité électrique de sol	témoin	fève	pois	orge
Pot 1	0.69	0.68	0.76	0.9
Pot 2	1.08	0.77	0.8	0.81
Pot 3	1.05	0.68	0.78	0.75

Annexe 1-10: taux de levée des grains de blé dur en %

Taus de levée	témoin	fève	pois	orge
Pot 1	14	81	73	29
Pot 2	11	82	70	30
Pot 3	11	77	61	37

Annexe 1-11 : la longueur moyenne des racines de blé dur en (cm).

Taus de levée	témoin	fève	pois	orge
Pot 1	1.05	6.17	2.75	1.2
Pot 2	3.12	6.09	4.53	2.49
Pot 3	1.49	5.7	5.80	4.99

Annexe 2 : résultats des analyses statistiques

Annexe 2-1 : analyse de la variance pour la levée des trois espèces dans le sol contaminé et le témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur 1 : sol	1	5908.2	5908.2	35.7	6.4e-0.5***
Facteur 2 : Sp	2	6043.7	3021.9	18.28	0.0002***
Inter : sol :sp	2	1380.5	690.2	4.17	0,04*
Var résiduel	12	1983.7	165.3		
Var total	17	15316.1	9785.6		

Annexe 2-3: Groupes homogènes de la levée des trois espèces déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellule	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	90	A
2	Pois	70.92	B
3	Orge	45.29	C

Annexe 2-4 : Groupes homogènes de la levée dans les deux sols déterminée par le test de Newman et Keuls.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Non contaminé	86.85	A
2	Contaminé	50.61	B

Annexe 2-5: Analyse de la variance pour la hauteur des trois espèces dans les sols contaminés et témoins.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	992.5	992.5	24.86	0.0003***
Facteur 2 :sp	2	3689.9	1844.9	46.23	2.3e-06***
Inter : sol*sp	2	143.3	71.66	1.79	0.21
Var résiduel	12	479	39.92		
Var total	17	5304.7	2948.9		

Annexe 2-6 : Groupes homogènes de la hauteur des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellule	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	57.24	A
2	Pois	27	B
3	Orge	26.75	

Annexe 2-7: Analyse de la variance pour la biomasse aérienne des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	0.037	0.037	4.944	0.04*
Facteur 2 :sp	2	0.290	0.145	19.196	0.00018***
Inter : sol :sp	2	0.00021	0.000106	0.014	0.98
Var résiduel	12	0.0906	0.00755		
Var total	17	0.4178	0.1896		

Annexe 2-8 : Groupes homogènes de la biomasse aérienne des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellule	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	0.46	A
2	Pois	0.21	B
3	Orge	0.17	B

Annexe 2-9 : Analyse de la variance pour la biomasse racinaire des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	0.031	0.031	21.47	0.0057****
Facteur 2:sp	2	0.105	0.052	36.22	8.2e-06****
Inter : sol:sp	2	0.0006	0.00034	0.23	0.7
Var résiduel	12	0.017	0.0014		
Var total	17	0.153	0.084		

Annexe 2-10 : Groupes homogènes de la biomasse racinaire des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellule	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	0.25	A
2	Pois	0.12	B
3	Orge	0.07	B

Annexe2-11 : Analyse de la variance pour le volume racinaire des trois espèces dans les sols contaminés et les témoins.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	0.853	0.853	12.96	0.0036**
Facteur 2 :sp	2	11.929	5.96	90.62	5.73e-08****
Inter : sol*sp	2	0.159	0.079	1.20	0.33
Var résiduel	12	0.789	0.065		
Var total	17	13.831	6.968		

Annexe 2-12 : Groupes homogènes du volume racinaire des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellule	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	2.34	A
2	Pois	0.91	B
3	Orge	0.43	C

Annexe 2-13 : Analyse de la variance pour la longueur de la racine principale des trois espèces dans le sol contaminé et témoin.

Source de variance	DDL	S.C.E	CM	F	P
Facteur1 : sol	1	69.62	69.62	4.79	0.04*
Facteur 2 :sp	2	519.84	259.91	17.90	0.0002****
Inter : sol :sp	2	110.43	55.21	3.80	0.05
Var résiduel	12	174.5	14.51		
Var total	17	874.4	399.25		

Annexe 2-14 : Groupes homogènes de longueur de la racine principale des trois espèces déterminée par le test Newman et Keuls.

Cellule	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Fève	23.25	A
2	Pois	14.91	B
3	Orge	10.26	B

Annexe 2-15 : Analyse de la variance pour le pH de sol contaminé non cultivé et le contaminé cultivé par les trois sont présentés dans le tableau XVII.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : sol	3	0.037	0.012	2.15	0.17
Résiduelle	8	0.046	0.006		
Total	11	0.083	0.018		

Annexe 2-16 : Analyse de la variance pour la germination des graines du blé dans les différents sols.

Source de variation	D.D.L	S.C.E	CM	F	P
Factoriel : sol	3	8928	2976	175.6	1.24e-07****
Résiduelle	8	136	17		
Total	11	9064	2993		

Annexe 2-17 : Groupes homogènes de la germination des graines du blé dans les différents sols.

Cellules	Libellés	Moyennes	Groupes
1	Sol cultivé par la fève	80.25	A
2	Sol cultivé par les pois	72.10	B
3	Sol cultivé par l'orge	56.70	C
4	Sol non cultivé	30.66	D

