

Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences 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

*Effet de la dose du semis de la fève
(*Vicia faba* L.) sur l'efficacité de la
phytoremédiation d'un sol pollué
par les carburants*

Présenté par :

M^{elle} LARABI Thinhinane

M^{elle} MOUSSI Kahina

Devant le jury :

Présidente : M^{elle} METNA F.

M.C.A. à l'U.M.M.T.O

Promotrice : M^{elle} ALI AHMED S.

M.A.A. à l'U.M.M.T.O

Examineurs: M^{me} SAHMOUNE F.

M.A.A. à l'U.M.M.T.O

M^r MEDJBEUR D.

M.A.A. à l'U.M.M.T.O

Promotion 2015/2016

Remerciements :

Premièrement, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice M^{lle} ALI AHMED maitre assistante au département de Biologie à l'U.M.M.T.O. pour son aide, ses orientations et ses précieux conseils au cours de notre travail ;

Nous remercions aussi la présidente M^{lle} METNA ainsi que les examinateurs M^{me} SAHMOUNE et M^r MEDJBEUR D d'avoir accepté d'évaluer notre présent travail ;

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance aux ingénieurs des laboratoires du département de Biologie et l'ingénieur de laboratoire de département de Génie Civil M^r ANARIS pour leur accueil et leur aide ;

Enfin, nous voudrions aussi exprimer toute notre gratitude à nos enseignants qui ont participé pour une grande part dans notre formation.



2 Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents pour leur soutien moral et matériel et que Dieu les
accorde une longue vie et les bénisse ;*

*A mon cher frère Madjid et mes chères sœurs Samira et Wissam et que Dieu
les protège ;*

A la mémoire de mon grand-père ;

*A toute ma famille ; mes grands-parents, mes tantes et mes oncles chacun à
son nom ;*

A mon binôme et sa famille ;

A tous mes ami(e)s ;

*A tous ceux qui m'ont donné le courage et le soutien moral pour réaliser ce
travail.*

Kahina





2^e Dédicace²

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents pour leur soutien moral et matériel et que Dieu les
accorde une longue vie et les bénisse ;*

*A mon cher frère Jugurtha et ma chère et adorable petite sœur Cirta et que
Dieu les protège ;*

A la mémoire de mon grand-père ;

*A toute ma famille ; mes grands-parents, mes tantes et mes oncles chacun à
son nom ;*

A mon binôme et sa famille ;

A tous mes ami(e)s ;

*A tous ceux qui m'ont donné le courage et le soutien moral pour réaliser ce
travail*

Thinhinane



Liste des abréviations

HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques

BOFAS : British Orthopaedic Foot and Ankle Society

BTEX : Benzen, Toluene, Ethylène, Xylène

PV : pression de vapeur

H : constante de Henry

CE : conductivité électrique

pH : potentiel d'hydrogène

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

PCB : Polychlorobiphényle

INRF : Institut national de recherche forestière

D0 : sol sans graines

D1 : sol qui contient une graine de semi

D2 : sol qui contient cinq graines de semi

D3 : sol qui contient dix graines de semi

D4 : sol qui contient quinze graines de semi

D5 : sol qui contient vingt graines de semi

Fig. 1 : composition du sol en polluants dans la région de Lorraine en France	03
Fig. 2 : représentation des différents composants de l'essence et du gasoil.....	05
Fig. 3 : Dispositif expérimental de l'essai au laboratoire.....	17
Fig. 4 : Dispositif de mesure de l'activité biologique globale.....	19
Fig. 5 : Taux de levée de la fève selon les différentes doses de semis.....	22
Fig. 6: Evolution hebdomadaire de la hauteur des plantes de la fève selon les différentes doses de semis.....	22
Fig. 7 : Biomasse moyenne des plantes de la fève selon les différentes doses de semis.....	23
Fig. 8 : Teneur en eau des plantes de la fève (partie aérienne et racinaire) selon les différentes doses de semis.....	24
Fig. 9: Teneur en eau du sol selon les différentes doses de semis.....	25
Fig. 10 : pH des différents sols selon les doses de semis.....	26
Fig. 11 : Conductivité électriques des différents sols selon les doses de semis.....	27
Fig. 12 : Quantité de CO ₂ cumulée dans les différents sols selon les doses de semis.....	28
Fig. 13 : Taux de germination du maïs dans les différents sols cultivés par la fève et selon les doses de semis....	29
Fig. 14 : Elongation racinaire des graines du maïs dans les différents sols selon les doses de semis.....	29

Liste des tableaux

Tableau 1 : les compositions massiques des éléments pétroliers.....	04
Tableau 2 : Quelques propriétés physiques et chimiques de l'essence et du gasoil.....	06
Tableau3 : les mécanismes de la bioremédiation.....	10
Tableau4 : Quelques travaux de phytoremédiation réalisés à UMMTO.....	13
Tableau 5 : Caractéristiques du sol utilisé dans l'expérimentation.....	15
Tableau 6 : Groupes homogènes de la hauteur déterminés par le test de Newman et Keuls pour le facteur doses de semis.....	23
Tableau 7 : Groupes homogènes pour la biomasse aérienne moyenne pour le test de Newman et Keuls.....	24
Tableau 8 : Groupes homogènes de teneur en eau des sols déterminés par le test de Newman et Keuls.....	26
Tableau 9 : Groupes homogènes du pH des sols déterminé par le test de Ducun selon les doses de semis.....	27
Tableau 10 : Groupes homogènes de la quantité de CO ₂ cumulé dans les différents sols déterminés par le test de Newman et Keuls pour le facteur dose.....	29
Tableau 11 : Groupes homogènes de la longueur racinaire du maïs déterminée par le test de Newman et Keuls pour le facteur dose.....	30

Introduction générale.....	01
Chapitre I : synthèse bibliographique	
I-Polluants du sol.....	03
I-1- Pollution du sol par les hydrocarbures	04
I-1-2- Sources de pollution par les hydrocarbures	04
I-1-3- Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures	04
I-1-4- Les produits raffinés	05
I-1-5- Le devenir des hydrocarbures dans le sol	06
I-2- Toxicité des hydrocarbures	08
I-2-1- Effet des hydrocarbures sur les propriétés du sol	08
I-2-2- Effet des hydrocarbures sur le végétal	09
II- Techniques de dépollution des sols.....	09
II-1- Les procédés physiques.....	09
II-2- Les procédés chimiques	09
II-3- Les procédés thermiques.....	10
II-4- Les procédés biologiques	10
II-4-1- La bioremédiation.....	10
III- Généralités sur la fève.....	12
III-1- Position systématique	12
III-2- Caractères botaniques	12
III-3- Principales variétés	13
III-4- Quelques travaux de phytoremédiation réalisés à l'UMMTO.....	13

Chapitre II : Matériels et méthodes

I-Matériel.....	15
I-1-Matériel végétal.....	15
I-2-Le sol	15
II-Méthodes	16
II-1-Le semis	16
II-2- Le suivi de la culture	17
II-3-Evaluation de l'effet de la dose de semis sur la croissance du végétal1	7
II-3-1-La hauteur des plantes	17
II-3-2-La biomasse aérienne.....	17
II-3-3-La biomasse racinaire	18
II-3-4-La teneur en eau des plantes	18
II-4-Evaluation de l'effet de la dose de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation.....	18
II-4-1- La teneur en eau du sol	18
II-4-2-Le potentiel d'hydrogène (pH)	18
II-4-3-La conductivité électrique (CE).....	18
II-4-4-L'activité biologique globale.....	19
II-4-5-Test de germination	19
II-4-6-L'élongation racinaire.....	19
III-Analyse statistique	20

Chapitre III : Résultats et discussion

I- Effet de la dose de semis sur la croissance du végétal	21
I-1- Taux de levée des plantes de la fève	21
I-2- La hauteur des plantes de la fève	21
I-3 La biomasse moyenne de la fève	22
I-4- Teneur en eau des plantes.....	23
II- Résultats de l'effet de la dose de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation.....	24

Table des matières

II-1- Taux de la teneur en eau du sol.....	24
II-2 Le potentiel d'hydrogène (pH).....	25
II-3 La conductivité électrique (CE)	26
II-4- L'activité biologique globale	27
II-5- Taux de germination de maïs	28
II-6- Elongation racinaire du maïs	29
III- Discussion	30
Conclusion générale	32

Le sol est l'une des trois composantes majeures de la biosphère. Il joue en permanence un rôle déterminant dans l'apparition et le maintien de l'activité biologique et de la biodiversité à la surface de la planète. La contamination des sols due aux activités agricole, industrielle et urbaine devient aujourd'hui un problème préoccupant. En effet, cela se traduit par des impacts négatifs sur les activités dépendant directement ou indirectement de la terre, mais aussi sur la santé humaine et les écosystèmes (Verdin et al., 2004).

Bien que plusieurs sources de pollution locale urbaine soient mentionnées, l'analyse sera focalisée sur le cas des stations-service. Le choix de ce cas est lié au fait que les stations service représentent une proportion très importante au niveau des sources de pollution ponctuelle (Piedrafita et Carnicer, 2007). Cette pollution dans la station service est due aux différentes sources comme les déversements des hydrocarbures lors du remplissage, du stockage ou de la distribution des carburants (BOFAS, 2004).

Il existe différentes techniques de dépollution du sol (techniques biotechnologiques, physico-chimiques et thermiques). Cependant, les méthodes physico-chimiques sont très efficaces pour certains types de contaminants mais présentent des inconvénients. Les interventions sont lourdes et onéreuses et laissent en général un sol stérile. Par contre les techniques biotechnologiques ont une option avantageuse pour diminuer la pression exercée sur l'environnement (Abdelly, 2007).

Pour les polluants organiques difficilement biodégradables tels que les hydrocarbures, les plantes peuvent être d'un grand secours.

La phytoremédiation est l'une des méthodes biotechnologiques de décontamination des sols consistant en la dégradation de polluants par les plantes cultivées. Les plantes peuvent croître sur un sol contaminé jusqu'à un certain seuil par des hydrocarbures (Chaîneau et al., 1995).

La phytoremédiation a de nombreux avantages d'ordre environnemental et économique. Elle permet d'abord de conserver le paysage agréable contrairement à d'autres méthodes de dépollution qui le transforment. Ensuite, il est parfois possible de réutiliser des sols en agriculture, après leur décontamination (Dabouineau et al., 2005). Enfin, les frais et les dépenses énergétiques sont réduits et les ressources naturelles sont conservées en utilisant l'énergie solaire (Susarla et al., 2004).

Plusieurs travaux de phytoremédiation ont été réalisés à l'U.M.M.T.O sur des différentes espèces (Kellas, (2008) sur blé dur et pois vivace, Fezani et Khider (2007) orge et haricot, Ait Tayeb et Titouche (2011) haricot et pois chiche, Rahmani et Slimani (2012) sur la fève et le sainfoin, Alilouche et Toudouft (2014) sur la fève, Zebiche et Semaani (2015), sur le pois et la luzerne) ont montré que la fève est l'espèce la plus tolérante vis-à-vis des hydrocarbures, mais un effet négatif sur le taux de levée a été remarqué et que la densité des plantes est réduite. Pour compléter ces travaux, nous avons entrepris une étude qui consiste à évaluer l'effet des différentes doses de semis sur la décontamination du sol pollué par les carburants.

Le présent mémoire se subdivise en trois parties :

La première est une synthèse bibliographique où sont exposées les données relatives à la description des hydrocarbures pétroliers (l'essence super et le gasoil) : sources, propriétés, leur devenir dans le sol...etc., suivies des différentes techniques de dépollution des sols.

La deuxième partie consiste en la présentation des matériels et méthodes utilisées pour l'essai de phytoremédiation.

La troisième partie est consacrée à la présentation et la discussion des résultats obtenus concernant :

- L'étude de quelques paramètres de l'espèce végétale à savoir le taux de levée, la hauteur des plantes, la biomasse végétale moyenne et la teneur en eau des plantes.
- L'évaluation de l'efficacité de la phytoremédiation par l'étude de quelques paramètres du sol : la teneur en eau, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), l'activité biologique globale, le taux de germination et la longueur racinaire.

Nous avons terminé ce travail par une conclusion générale qui synthétise l'ensemble des résultats obtenus dans notre étude et les principales perspectives de recherche.

Beaucoup de substances qui parviennent dans le sol peuvent être dangereuses pour les micro-organismes, les plantes, les animaux et aussi l'être humain.

La pollution du sol peut agir de deux façons ; d'une part les substances du sol peuvent être directement miscibles pour les plantes, et dans certains cas aussi directement sur les êtres humains et les animaux, d'une autre part, ces composés peuvent être enlevés du sol par lessivage et parvenir dans la nappe phréatique ainsi que dans les eaux de la surface.

Le comportement des polluants dans le sol est déterminé par leurs propriétés telles que leur dégradabilité chimique ou biologique (Bliefert et Perraud, 2001).

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 des effets directs ou indirects altérant les critères de réparation des flux d'énergies, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique 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-Polluants du sol :

Dans l'environnement on trouve des différents types de polluants comme les métaux lourds, les hydrocarbures et huiles minérales, les HAP, les pesticides...etc (Jeannot et *al.*, 2000).

D'après Morel (1990), les polluants du sol dans la région Lorraine en France, sont présentés dans la figure 1.

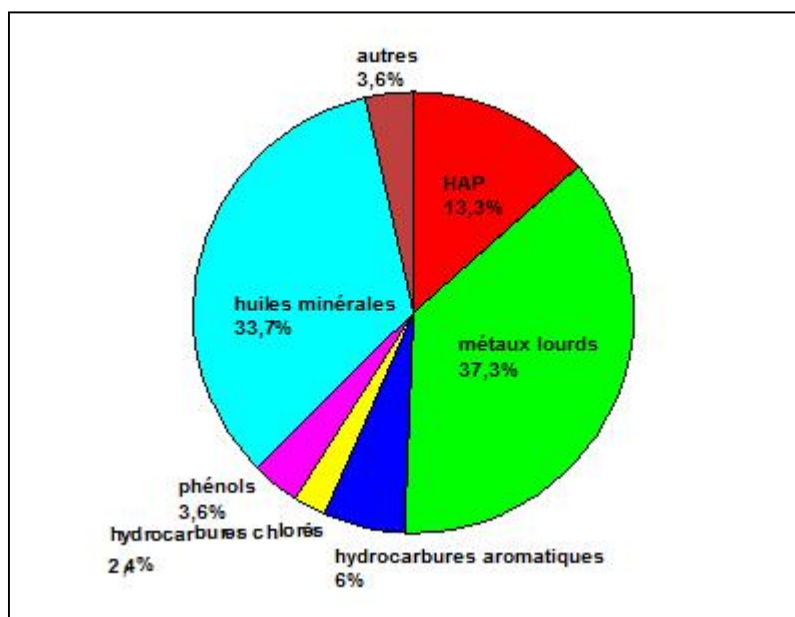


Fig. 1 : composition du sol en polluants dans la région de Lorraine en France (Morel, 1990)

Les polluants du sol sont majoritairement les hydrocarbures (huiles minérales, HAP, hydrocarbures aromatiques et les hydrocarbures chlorés).

I-1- Pollution du sol par les hydrocarbures :

Parmi les différents polluants organiques rencontrés dans le sol contaminé des vieux sites, la plupart sont facilement dégradables. C'est le cas des hydrocarbures aliphatiques (pétrole, essence) (Ramade, 1992).

I-1-1- Définition des hydrocarbures :

Selon Chitour (1999), les hydrocarbures sont constitués des éléments divers dont les proportions variables (Tableau 1)

Tableau 1 : les compositions massiques des éléments pétroliers (Chitour, 1999).

Composés	% massiques
Carbone	84 à 87 %
Hydrogène	11 à 14 %
Soufre	0.04 à 6 %
Azote	0.1 à 1.5 %
Oxygène	0.1 à 0.5 %
Métaux	0.05% à 0.015% soit 5 à 15 g/t

I-1-2- Sources de pollution par les hydrocarbures :

La pollution des sols par les hydrocarbures peut avoir des origines diverses :

- Industrie pétrolière et du gaz naturel où s'exercent différentes actions comme l'extraction du pétrole, le raffinage, la pétrochimie, les transports, stockage et distribution des produits pétroliers.
- Industrie chimique de base et industrie mécanique (Colin, 2000).
- Les stations-services où on utilise les cuves de stockage, les points de remplissage, les événements des citernes, les îlots de pompes, les séparateurs d'hydrocarbure, les canalisations entre les citernes et les îlots de pompes et les déversements d'hydrocarbure lors du remplissage des stockages de la station ou de la distribution de carburant (BOFAS, 2004).

I-1-3- Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures :

I-1-3-1- Solubilité :

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

I-1-3-2- Viscosité :

Selon Colin (2000), la viscosité influe directement sur la perméabilité de matériau poreux au produit pur et régit donc son écoulement en phase à travers les zones non-saturées et saturées.

I-1-3-3- Point d'éclair :

Il est défini comme la plus basse température à laquelle les fractions d'hydrocarbures s'enflamment lorsqu'elles sont soumises à une étincelle. Certaines essences ont des points

d'éclair à -4°C alors que le mazot, que l'on trouve comme élément dans une chaudière a un point d'éclair aux alentours de 55°C (Fattal, 2008).

I-1-3-4- Pression de vapeur :

D'après Colin (2000), la frontière entre un composé volatil et un composé non volatil peut être établie de la façon suivante :

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

I-1-4- Les produits raffinés :

Il existe plusieurs types de produits raffinés parmi lesquels on trouve l'essence et le gasoil.

I-1-4-1- Composition de l'essence et du gasoil :

Selon Colin (2000), la composition en atomes de carbones des essences, des gasoils légers et des gasoils lourds sont respectivement comme suit : de 4 à 10 atomes, de 14 à 18 atomes et de 19 à 25 atomes.

D'après Marchal et *al.*(2003), l'essence et le gasoil sont composés des quatre structures principales d'hydrocarbures selon la figure 2 :

- n-alcanes ou n-paraffines
- iso-alcanes ou isoparaffines
- cyclanes ou cycloparaffines
- composés aromatiques (BTEX et HAP)

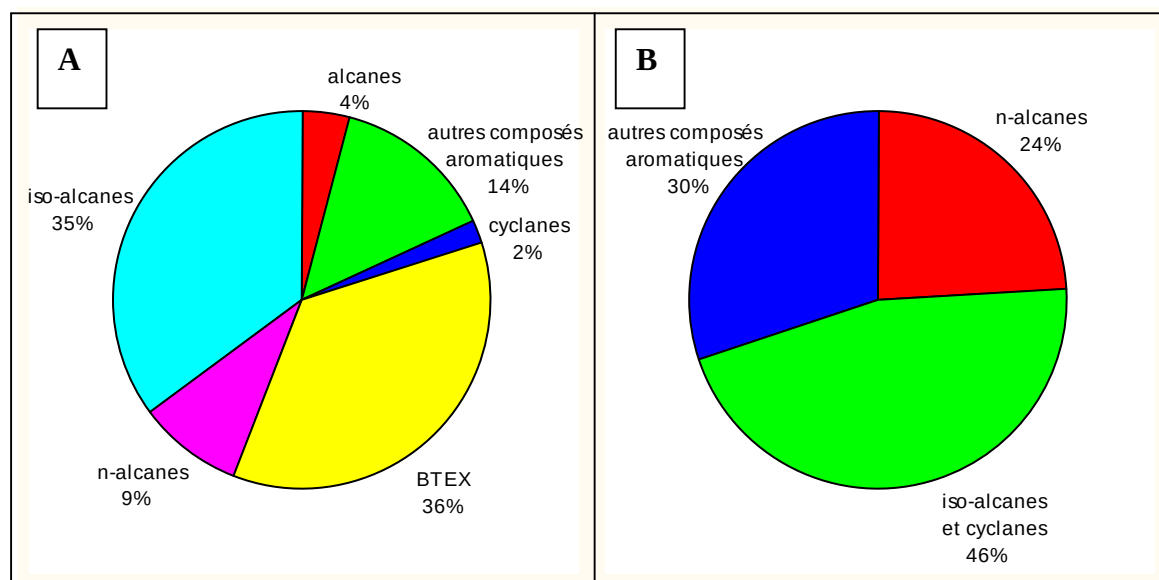


Fig. 2 : représentation des différents composants de l'essence et du gasoil (Marchal et *al.*, 2003)

I-1-4-2- Propriétés de l'essence et du gasoil :

Quelques propriétés physiques et chimiques de l'essence et du gasoil sont présentées dans le tableau 2(TOTAL, 2005 ; INRS, 2006 et dyneff, 2014)

Tableau 2 : Quelques propriétés physiques et chimiques de l'essence et du gasoil(TOTAL, 2000 ; INRS, 2006 et dyneff, 2014)

Propriétés	Essence	Gasoil
Etat physique	Liquide limpide à 20 °C	Liquide limpide à 20 °C
Couleur	Jaune pâle	Jaune pâle
Odeur	Caractéristique	Caractéristique
Masse volumique	70-775 Kg/m ³ à 15 °C	820-845 Kg/m ³
Point d'éclair	< -40°C	≥55°C
Température d'auto-inflammation	>300°C	≥250°C
Densité de vapeur	3- 4 (air=1)	5 (air=1)
Pression de vapeur	+100 K Pa (35°C)	~1h Pa (20°C)
Solubilité dans l'eau	Non miscible	Non miscible
Coefficient de partage : n-octanol/eau	Log Kow=2.1- 6	Sans objet
Viscosité	0.5-0.75mm ² /s à 20°C	2.324mm ² /s à 40°C
Teneur en soufre	≤ 0.005 %	≤ 0.005 %
Teneur en aromatiques	≤ 35 % (en HAP)	11 % max. (en HAP)

❖ Autres propriétés de l'essence et du gasoil:

Selon Colin (2000), d'autres propriétés de l'essence et du gasoil ont été mentionnées ; ils sont plus légers que l'eau, biodégradables, leur solubilité, viscosité et absorption sont variables, et ils sont des produits volatiles.

I-1-5- Le devenir des hydrocarbures dans le sol :

a. Solubilisation :

Certains composés solubles se dissolvent au contact de l'eau, ce qui rend impossible leur récupération. Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi

les plus dangereux pour l'environnement, ils sont difficile à éliminer et sont absorbés par le végétale (Chocat, 2004). L'élimination des HAP est atteinte plus rapidement dans le sol qui contient moins de matière organique. Plus la fraction de carbone organique augmente dans un sol, l'adsorption des HAP augmente (Gabet, 2004).

L'ensemble des liquides contaminants provenant des stations-service sont des liquides visqueux à température ambiante. Ils sont peu solubles dans l'eau et sont caractérisés par des densités plus faibles que l'eau. Ils formeront des nappes en surface en cas de déversement dans le milieu aquatique (BOFAS, 2004).

b. Volatilisation :

Les composés légers se volatilisent et deviennent très mobiles. Les hydrocarbures les plus légers sont éliminés rapidement dès les 1^{ers} jours, pouvant conduire à une pollution de l'atmosphère (Soltani, 2004).

La volatilité conditionne la répartition du produit entre phase gazeuse et liquide. Elle est appréciée par 3 paramètres :

- Le point d'ébullition
- La pression de vapeur (PV) : si PV est < 133 , l'hydrocarbure est non volatil mais si elle est ≥ 133 , donc l'hydrocarbure est volatil.
- La constante de Henry (H) qui relie la concentration des composés en solution aqueuse à sa concentration en phase gazeuse. Un composé est volatil lorsque $H > 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ atm.m}^3/\text{mole}$ (Colin, 2000).

En ce qui concerne le taux de volatilisation des carburants (essence et gasoil), le paramètre le plus important est la pression de vapeur des hydrocarbures qui les composent (DPRA, 2006).

c. Dégradation :

➤ La dégradation biotique :

La biodégradation des hydrocarbures est importante lorsque le nombre d'atomes de carbones de la molécule est faible (Saada et al., 2005)

La biodégradation est l'ensemble des mécanismes de transformation d'un contaminant en différents sous-produits moins toxiques, par l'action des microorganismes (bactéries et microbes). et il en résulte généralement une diminution de la concentration du polluant (Nowak et al., 2003).

Les gasoils sont majoritairement constitués d'isoalcanes et d'alcanes ramifiés, composants relativement récalcitrants, alors que les essences sont majoritairement constituées de BTEX et autres aromatiques légers, composés qui se dégradent relativement bien. De plus, les gasoils sont constitués d'hydrocarbures plus lourds (le nombre de carbones varie entre 11 et 25) que les hydrocarbures des essences (le nombre de carbones varie de 4 à 10). Or, en règle générale, plus la masse molaire ou le nombre de cycles augmente, plus les vitesses de biodégradation diminuent. L'essence présente un taux de biodégradabilité intrinsèque élevé (96 %), mais celui du gasoil commercial est plus faible (entre 60 et 73 %) (Marchal et al., 2003).

➤ **La dégradation abiotique :**

La photo-oxydation permet d'éliminer certains hydrocarbures pétroliers (Saada et *al.*, 2010). Elle s'observe en surface mais aussi dans les vapeurs atmosphériques. Les HAP peuvent être dégradés par photo-oxydation et par des réactions d'oxydation. Ce mécanisme est relativement important et permet une nette diminution des HAP dans le sol (Laurent et *al.*, 2005).

d. Fixation :

Le captage des polluants organiques est déterminé par leur solubilité, leur masse moléculaire et leurs caractères lipophiles, ainsi que leur concentration et les propriétés du sol (Koller, 2004).

La plupart des hydrocarbures présente une faible solubilité et une certaine hydrophobicité, ce qui leur permet d'être lié en proportion plus ou moins importantes aux sédiments de l'aquifère. Dans la plupart des aquifères, la fraction organique tend à contrôler la sorption des hydrocarbures pétroliers.

Le degré d'adsorption est directement lié au contenu en carbone organique du sol ; plus le milieu est riche en matière organique, plus il est favorable aux mécanismes de l'adsorption (Saada et *al.*, 2005).

En général on peut dire que, plus les hydrocarbures sont composés de nombre élevé d'atomes de carbone (le gasoil a de 14 à 25 atomes de carbones et l'essence a de 4 à 10 atomes de carbones (Colin, 2000)), la solubilité, la biodégradabilité et la volatilisation « diminuent » (Bergue et Mérienne, 1986), en outre, l'adsorption « augmente ».

I-2-Toxicité des hydrocarbures :

Le type d'hydrocarbure, la durée de contact, la quantité déposée et surtout le niveau de toxicité influent sur l'importance de son impact.

Les hydrocarbures légers sont plus toxiques que les hydrocarbures lourds, car si leur toxicité intrinsèque est inférieure à celle des composés de haut poids moléculaire, ils sont en général plus abondants dans les hydrocarbures déversés (Fattal, 2008).

I-2-1-Effet des hydrocarbures sur les propriétés du sol :

➤ **propriétés biologiques :**

Selon Jambu (1991) cité par Duchaufour (2001), les hydrocarbures s'ils sont incorporés au sol en quantités limitées (moins de 2% de la couche de 0 à 15 cm), n'exercent pas d'action dépressive vis-à-vis des micro-organismes du sol, mais ils exercent une action nocive indirecte. Les composés humiques deviennent à leurs tours hydrophobes et difficilement biodégradables, la perméabilité excessive du sol ne permet pas la constitution des réserves hydriques suffisantes. Les effets des hydrocarbures sur l'activité biologique du sol dépendent de leur concentration dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu.

➤ **propriétés chimiques :**

Les hydrocarbures exercent des effets sur les propriétés chimiques du sol, ces effets consistent généralement en une légère acidification du sol (Bergue et Mérienne,

1986 ;PiedrafitaCarnicer, 2007 ;Louni et Lounis, 2012 ; Amiri, 2013 ; Zerrouki et Ouhada, 2013)et un enrichissement en matière organique fraîche et une teneur en métaux légèrement plus importante (soufre (SO₃) et fer (Fe)) qui est synthétisée à partir de carbone et de l'azote(Bergue et Mérienne, 1986 ; Amiri, 2013).Les hydrocarbures diminuent la conductivité électrique (CE) du sol (Amiri, 2013 ; Zebiche et Semaani, 2015).

➤ **propriétés physiques :**

La présence des hydrocarbures dans le sol accroît son pouvoir de rétention en eau (Bergue et Mérienne, 1986 ; Ait Tayeb et Titouche, 2011 ; Amiri, 2013), par ailleurs, dans les sols pollués, les hydrocarbures enrobent les particules minérales et assurent leur dispersion (Bergue et Mérienne, 1986).

➤ **propriétés biologiques :**

L'action toxique des hydrocarbures provoque des modifications des caractéristiques de la microflore. La présence des hydrocarbures dans le sol engendre une inhibition de l'activité biologique des micro-organismes (Benamara et Mohammedi, 2010).

I-2-2-Effet des hydrocarbures sur le végétal :

Selon Koller (2004), Ait Tayeb et Titouche (2011) et Mahlal et Moula (2011), les hydrocarbures inhibent le développement de certains végétaux d'où le terme « phytotoxicité » des hydrocarbures. Cette toxicité se manifeste par une inhibition de la germination des graines et/ ou celle de la croissance végétative (Fezani et Khider, 2007 ; Ait Tayeb et Titouche, 2011 ; Mahlal et Moula, 2011 ; Zerrouki et Ouhada, 2013 ; Zebiche et Smaani, 2015) qui a un impact sur le rendement en matière sèche (Koller, 2004). Un déficit alimentaire causé par les hydrocarbures provoque la réduction de la croissance des plantes (chaîne et al., 1997). Les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, atteindre et altérer les réactions métaboliques et/ou tuer l'embryon en contact direct. En outre, la germination est corrélée avec les propriétés hydrophobes du pétrole qui empêchent ou réduisent les échanges d'eau et du gaz.

Les hydrocarbures peuvent atteindre l'Homme par la chaîne trophique en consommant des plantes ou des produits de la mer qui seraient contaminés, ou même en cas de contact cutané avec les hydrocarbures d'une façon directe, ce qui provoque, à long terme, des troubles neurologiques et neurophysiologiques (Fattal, 2008).

II-Techniques de dépollution des sols :

Les techniques de dépollution peuvent être classées en quatre catégories principales :

II-1-Les procédés physiques :

Le principe consiste à utiliser des fluides (eau ou gaz), présents dans le sol ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser (Saada et al., 2010).

II-2-Les procédés chimiques :

Ils utilisent les propriétés chimiques des polluants, à l'aide de réactions appropriées, pour les rendre inertes, les détruire (oxydation, etc.) ou les séparer du milieu pollué (surfactants, etc.) (Saada et *al.*, 2010).

II-3-Les procédés thermiques :

Ils utilisent la chaleur pour détruire le polluant (ex : incinération), l'isoler, ou le rendre inerte (Saada et *al.*, 2010).

II-4-Les procédés biologiques :

Ils consistent à utiliser des micro-organismes, le plus souvent des bactéries (mais aussi des champignons et des végétaux), pour favoriser la dégradation totale ou partielle des polluants. Certains bioprocédés permettent aussi de fixer ou de solubiliser certains polluants (Saada et *al.*, 2010).

II-4-1-La bioremédiation : (utilisant les microorganismes)

La bioremédiation est une branche des biotechnologies qui utilise des mécanismes biologiques naturels ou détournés pour traiter des problèmes environnementaux (Michaille, 2014).

II-4-1-1- Les mécanismes de la bioremédiation :

Les mécanismes de la bioremédiation sont mentionnés dans le tableau 4

Tableau3 : les mécanismes de la bioremédiation (ADEME, 2006).

Technique	Principe	Polluant
Bioaugmentation	Introduction dans le sol des microorganismes exogène adaptés aux polluants à traiter.	Hydrocarbures lourds, HAP, PCB.
Biostimulation	Réensemencement de populations prélevées sur le site, dont la croissance a été stimulée en laboratoire ou en bioréacteurs installés sur site.	Hydrocarbures pétroliers, HAP.
Bioréacteur	Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau et ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. Un système d'aération est employé pour les procédés aérobies. En fin de traitement, les phases solides et liquides sont séparées et le sol est remis en place.	Hydrocarbures, HAP, pétrole, PCB, composés organiques halogénés volatils ou semi volatils
Bioventing	Injection d'O ₂ dans la zone non saturée pour stimuler la microflore et la biodégradation des polluants.	Hydrocarbures totaux (essence, gasoil), BTEX, polluants Biodégradables

II-4-1-2-La phytoremédiation :

La phytoremédiation est une technique de bioremédiation *in situ* définie par l'utilisation des plantes potentiellement associées à des communautés de microorganismes (bactéries et champignons) pour dégrader, séquestrer ou stabiliser les contaminants présents dans le sol (Cunningham et *al.*, 1993).

Le travail de la phytoremédiation, est principalement réalisé par les racines où se passent l'essentiel des processus. Le système racinaire peut développer une très grande surface qui constitue le lieu des interactions avec le sol.

Si l'on examine ce qui passe au niveau de l'extrémité d'une racine, on constate que beaucoup de composés organiques, appelés exsudats, y sont libérés, ils servent de substrats aux micro-organismes présents, autour de la racine on observe une activité biologique particulièrement intense ce qui constitue ce que l'on appelle la rhizosphère (Morel, 1990).

Dans la rhizosphère, les bactéries ou les champignons développant des mycorhizes, ont la capacité de dégrader les composés organiques présents dans le sol. Cependant il a été montré que lorsque certaines plantes étaient présentes sur un sol pollué par des composés organiques difficilement dégradables, cette biodégradation se faisait plus efficacement. (Dabouineau et *al.*, 2005).

II-4-1-2-1-Les mécanismes de la phytoremédiation :

Les mécanismes de la phytoremédiation diffèrent selon la nature des polluants ;

- Pour les polluants inorganiques :
 - phytoextraction : utilisation de plantes capables d'extraire, de transformer et de concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables.
 - phytostabilisation : c'est la séquestration des métaux par la plante.
- Pour les polluants organiques :
 - phytodégradation : transformation par la plante des molécules organiques complexes en composés plus simple, qui seront intégrés dans les tissus de la plante.
 - rhizodégradation : c'est la dégradation des polluants par les racines et l'activité microbienne associée.

Pour les deux types, il y a la phytovolatilisation qui est la stimulation de la volatilisation du polluant absorbé par la plante et éliminé par l'évapotranspiration (ADEME, 2006).

II-4-3-2-Les avantages de la phytoremédiation :

Selon Saada et *al.*, (2010) les avantages de la phytoremédiation sont multiples :

- C'est une technique approuvée ayant démontré des résultats extrêmement significatifs ;
- les plantes limitent les transferts de polluants et les expositions ;
- la compétitivité en termes de coût par rapport aux autres techniques ;
- l'application générant peu de perturbation de sols et d'impact ;

- la possibilité de réaliser des traitements de contamination de grande superficie ;
- une bonne intégration paysagère ;
- c'est une technologie visuellement attractive et a une perception généralement positive de la population.
- Elle répond aux critères du développement durable (Morel, 1990).

II-4-3-3-Espèces utilisées dans la phytoremédiation :

Les légumineuses sont plus efficaces dans la biodégradation des hydrocarbures (Fezani et Khider, 2007) et leur capacité dans la réhabilitation des sols pollués (Kellas, 2008) et d'améliorer leur qualité (Ait Tayeb et Titouche, 2011).

Selon Ali Ahmed et Belkaid (2006), les hydrocarbures ont un effet négatif sur le sol et aussi sur l'orge et la luzerne. La luzerne a un effet positif sur l'activité biologique du sol.

La fève a révélée être plus tolérante que le trèfle en vers le pétrole (Belkacem et Rouas, 2012).

La phytoremédiation par la fève est plus efficace par apport au sainfoin (Rahmani et Slimani, 2012).

III-Généralités sur la fève :

III-1-Position systématique :

La fève est une plante annuelle appartenant à la famille des légumineuses, appelé *Vicia faba*.

Selon Chaux et Foury(1994), la fève est classée comme suit :

Règne.....	Plantae
Sous-règne.....	Tracheobionta
Division.....	Magnoliophyta
Classe.....	Liliopsida
Sous-classe.....	Rosidea
Ordre.....	Fabales
Famille.....	Fabaceae
Genre.....	<i>Vicia</i>
Espèce.....	<i>Vicia faba</i> L.

III-2-Caractères botaniques :

La fève se développe à partir d'une tige simple, sa hauteur est généralement comprise entre 0,80 à 1,20m. Les feuilles sont constituées par 2 à 4 paires de folioles amples, d'un vert glauque ou grisâtre ; le rachis se termine par une arrête étroite qui représente la foliole terminale. Les fleurs prennent naissance en position axillaire, soit en isolé soit en grappes peu fournies, elles sont du type papilionacé, blanc ou faiblement violacées, et portent sur chaque aile une macule noire ou violette.

Le fruit est une gousse large. Selon le type, la gousse peut être plus au moins longue et contenir un nombre très variable de graines volumineuses par rapport aux autres espèces légumières.

Le système racinaire est pivotant pouvant s'enfoncer jusqu'à 80cm. Les nodosités sont abondantes dans les 30 premiers centimètres (Chaux et Foury, 1994).

III-3-Principales variétés :

Selon Chaux et Foury (1994), on peut distinguer quatre groupes :

- **Variétés très précoces :** le fruit est une gousse vert clair contenant 5 à 6 grains blancs et présentant une maturité simultanée permettant une récolte en deux passages, au stade jeune.
- **Variétés précoces :** le fruit est une gousse longue, renfermant 5 à 6 graines sa hauteur est modérée (70cm) à folioles vert blond, allongées.
- **Variétés demi-précoces :** elles appartiennent au type fève d'Aguadulce et sont très répandues en cultures. Elles sont caractérisées par une végétation haute (1,10 à 1,20m) et vigoureuses, gousse vert franc, volumineuse et très longue pouvant atteindre 20 à 25cm, 7 à 9 graines par gousse et une production très importante et échelonnée.
- **Variétés tardives :** elles sont représentées par un type cultivé dans le Nord de l'Europe sous le nom de fève trois fois blanche. La plante de hauteur moyenne (0,85m), produit de nombreuses gosses contenant 4 graines assez fines.

III-4-Quelques travaux de phytoremédiation réalisés à UMMTO :

De nombreux travaux sur la phytoremédiation ont été faits dans notre faculté dont quelques un sont cités dans le tableau 3 :

Tableau4 :Quelques travaux de phytoremédiation réalisés à UMMTO

Les espèces utilisées	Le sol pollué	Résultats	Auteurs et années
-Orge <i>(Hordeumvulgaris L.)</i> -Luzerne <i>(Medicago sativa L.)</i>	-Sol CP à 2% et 5% provient de l'INA -Pétrole brut prévenu de HassiMessaouad	-effet d'hydrocarbures sur le sol et les deux espèces -plus la concentration des hydrocarbures augmente plus leurs effets est importants - effet positif de Luzerne sur l'activité biologique du sol.	Ali Ahmed et Belkaid (2006)
-Orge <i>(HordeumvulgareL.)</i> -Haricot <i>(PhaseolusvulgarisL.)</i>	-sol CP 5% provient de l'ITMA -pétrole brut de HassiMessaouad -l'essence provient d'une unité de NAFTAL.	-l' essence plus biodégradable que pétrole -l'essence est plus toxique que le pétrole brute -diminution du rendement végétal -modification de la microflore bactérienne -les légumineuses sont plus efficaces dans la biodégradation d'hydrocarbures.	Fezani et Khider (2007)
-Blé dur <i>(TriticumdurmnL.)</i> -Pois vivace <i>(LathyruslatifoliusL.)</i>	-le sol provient de l'ITMA (Boukhalfa) -le pétrole brut et l'essence provient d'une unité NAFTAL.	-l'essence est moins toxique que le pétrole -le pois vivace plus résistant aux hydrocarbures que le blé dur -la capacité des légumineuses à réhabiliter des sites contaminés.	Kellas (2008)
-Le pois <i>(PisumsatinumL.)</i>	-le sol provient de l'ITMA	-effet toxique des hydrocarbures sur les deux espèces et sur le sol	Benamara etMohammadi

Partie Bibliographique

-Le pois chiche, (<i>Cicer arietinum</i>L.)	-pétrole brut de HassiMessaouad	-le pois est plus efficace dans la biodégradation des hydrocarbures que le pois chiche.	(2010)
-Maïs (<i>Zeamays</i>L.) -Sorgho, (<i>Sorghum</i>bicolorL.)	-le sol provient de l'ITMA (Boukhalifa) -Pétrole brut prévenu de Hassi-messaouad	-augmentation de l'humidité et la mouillabilité du sol -diminution du rendement en matière sèche de deux espèces -la dégradation des hydrocarbures dans le sol.	Mahlal et Moula (2011)
-Haricot (<i>Phaseolus</i>vulgarisL.) -Le pois chiche, (<i>Cicer arietinum</i>L.)	-le sol provient de l'ITMA (Boukhalifa) -le pétrole -l'essence	-la quantité d'essence dégradée est plus élevée que celle de pétrole brut -grande toxicité pour les deux espèces -effet sur les propriétés du sol -la capacité des légumineuses à améliorer la qualité des sols pollués.	Ait Tayeb et Titouche (2011)
-Fève (<i>Vicia faba</i>L.) -Trèfle (<i>Trifolium alexandrinum</i>L.)	-sol de l'ITMA contaminé par le pétrole à 5%.	-la fève est plus résistant que le trèfle en vers le pétrole	Belkacem et Rouas (2012)
-Fève (<i>Vicia faba</i>L.) -Sainfoin d'Espagne (<i>Hédysarum flexuosum</i>L.)	-le sol provient de l'ITMA (Boukhalifa) -Pétrole brut prévenu de Hassi-messaouad	-la toxicité de pétrole vis-à-vis de deux plantes -l'efficacité de la phytoremédiation par la fève par apport au sainfoin d'Espagne.	Rahmani et Slimani (2012)
-Fève (<i>Vicia faba</i>. L)	-sol de l'ITMA contaminé à 5% par l'essence normal, l'essence super et le gasoil.	-effet sur le rendement de la partie racinaire de la plante - la réduction de la quantité des hydrocarbures dans les sols contaminés n'est pas importante.	Alilouche et Toudouft (2014)
-Fève (<i>Vicia faba</i>L.)	-Le sol est prélevé de l'ITMA de Boukhalifa contaminé par l'essence à différentes concentrations (1%, 3%, 5%, 7% et 9%)	-L'essence a un effet toxique sur la fève. -La fève n'a tolérée que les concentrations inférieures à 3%.	Kettane (2015)
-Pois (<i>Pisumsativum</i> L.) -Luzerne (<i>Medicago Sativa</i> L.)	-Le sol provient d'une parcelle l'ITMA de Boukhalifa contaminé par le pétrole brut au concentrations de 0%, 1%, 3%, 5%, 7% et 9 %.	-Diminution de rendement végétal dans les deux espèces. -Biodégradation des hydrocarbures. -la luzerne est plus efficace que le pois.	Zebiche et Smaani (2015)

Les travaux que nous avons déjà cités ont montré un effet négatif sur le taux de levée. La densité des plantes est alors réduite ; ce qui peut diminuer l'efficacité de la phytoremédiation.

Tous ces résultats nous ont conduits à poser la question suivante: est ce que la densité des plantes a un effet sur la qualité de la phytoremédiation des sols pollués par les hydrocarbures ?

Notre travail a été réalisé au laboratoire avec une culture en pots dans le but d'évaluer l'effet de différentes doses de semis de la fève sur l'efficacité de la phytoremédiation dans la décontamination d'un sol pollué par les carburants (l'essence super et le gasoil).

I-Matériel :

I-1-Matériel végétal :

Deux espèces ont été utilisées dans ce travail :

I-1-1-La fève :

L'espèce que nous avons utilisée dans l'essai de phytoremédiation est une légumineuse. D'après Duchaufour (2001), les légumineuses sont considérées comme des plantes ayant un bon potentiel de phytoremédiation. La symbiose de ces légumineuses avec les bactéries de genre *Rhizobium* leur confère un avantage supplémentaire par rapport aux autres espèces.

L'espèce choisie est la fève (*Vicia faba*) de type Aguadulce qui s'est révélée très tolérante à la contamination du sol par divers hydrocarbures (Fezani et Khider, 2007 ; Belkacem et Rouas, 2012 ; Louni et Lounis, 2012).

I-1-2-Le maïs :

L'espèce du maïs a été utilisée pour estimer l'évolution du niveau de toxicité dans le sol après phytoremédiation.

Le choix du maïs est justifié par le fait que cette espèce soit sensible à la pollution aux hydrocarbures (Chaineau et *al.*, 1996).

I-2-Le sol :

Le sol utilisé provient de la station-service de Boukhalfa, c'est un sol contaminé par des déversements d'essence super et de gasoil. Les analyses de celui-ci ont été effectuées au laboratoire de pédologie de l'INRF de Bainem. Les caractéristiques de ce sol sont mentionnées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Caractéristiques du sol utilisé dans l'expérimentation

Caractéristiques du sol	Résultats
pH	7.2
Carbone organique	8.84%
Azote total	0.3%
C/N	29.47
Phosphore assimilable P ₂ O ₅	5.46mg P ₂ O ₅ / Kg de sol
Salinité	0.74mmhos/cm
Texture	Limono-argileuse

Le sol est de texture limono-argileuse, ce qui signifie un sol lourd qui a une forte capacité de rétention d'eau et d'éléments minéraux, de pH neutre, riche en carbone organique et faiblement pourvu en azote et en phosphore (Mémento de l'agronome, 1993) in Hadjou et Rabhi (2015).

C'est un sol avec une faible salinité (Mémento de l'agronome, 1993) in Hadjou et Rabhi (2015) ce qui favorise la biodégradation (Bertrand et *al.*, 1993 in Boudershem, 2011).

Le pH est neutre (7,2) qui est situé entre 6.5 et 7.5 (Baize, 2000) ce qui influence positivement sur l'activité microbienne du sol car il favorise une bonne assimilabilité des éléments nutritifs (Mathieu et Pielain, 2003).

Selon Brown(2014), le rapport C/N indique la vitesse de décomposition du carbone. L'azote est la source d'aliment pour les micro-organismes qui décomposent le carbone. Un rapport C/N > à 25 exige une grande quantité d'azote du sol pour décomposer le carbone et pourrait causer une carence en azote.

Lorsque le rapport C/N est de 25 environ, il y a équilibre entre la libération d'azote par minéralisation et la consommation par les micro-organismes transformateurs de l'azote libéré (Baize, 2000).

La salinité est inférieure à 2,5 ce qui indique que ce sol est non salé (Baize, 2000).

II-Méthodes :

II-1-Le semis :

Le semis de la fève a été réalisé le 07-11-2015 dans un sol contaminé à un seuil de 7% par les carburants (essence super et gasoil).

Le sol est tamisé à 5 mm puis reparti sur 18 pots de 15 cm de diamètre et 15 cm de profondeur à raison de 2 Kg par pot.

Les pots sont répartis en 6 lots contenant chacun trois pots. Chaque lot reçoit un nombre différent de graines de fève (fig.3).

Le lot 1 : 0 graines ;

Le lot 2 : 1 graines ;

Le lot 3 : 5 graines ;

Le lot 4 : 10 graines ;

Le lot 5 : 15 graines ;

Le lot 6 : 20 graines.

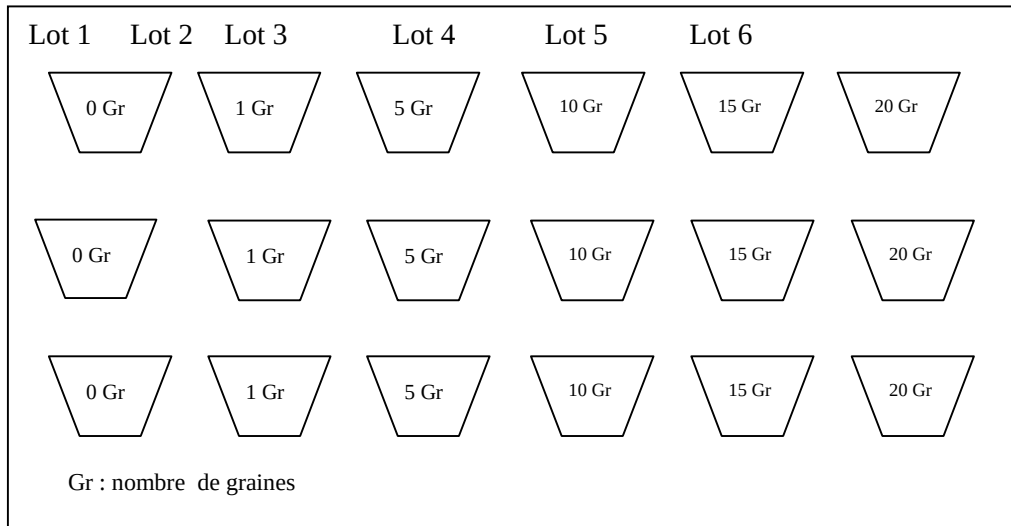


Fig. 3 : Dispositif expérimental de l'essai au laboratoire

II-2- Le suivi de la culture :

Un arrosage de la culture a été effectué régulièrement (10 ml d'eau / pot / jour) pendant une durée de 12 semaines.

II-3-Evaluation de l'effet de la dose de semis sur la croissance du végétal :

Afin d'évaluer les effets de l'essence super et du gasoil sur la fève, nous avons mesuré quelques indicateurs de croissance : le taux de levée, la hauteur des plantes, la biomasse aérienne et racinaire et la teneur en eau des plantes.

II-3-1-Le taux de levée :

Il consiste à calculer un pourcentage de levée dans chaque pot, selon la loi suivante :

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

II-3-2-La hauteur des plantes :

C'est la mesure de la croissance en longueur des plantes chaque semaine à l'aide d'une règle.

II-3-3-La biomasse aérienne :

C'est la pesée de la partie aérienne dans chaque pot à l'état sec après séchage à l'air libre à la fin de la culture.

II-3-4-La biomasse racinaire :

C'est la pesée de la partie racinaire de chaque plante à l'état sec après séchage à l'air libre après les avoir nettoyées.

II-3-5-La teneur en eau des plantes :

Elle consiste à peser les plantes (partie aérienne et partie racinaire) à l'état frais (PF) puis à l'état sec (PS) après séchage à l'air libre.

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{\text{PF} - \text{PS}}{\text{PF}} \times 100$$

II-4-Evaluation de l'effet de la dose de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation:

Nous avons mesuré quelques propriétés du sol, tels que la teneur en eau, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), l'activité biologique globale.

Par ailleurs, un test de germination a été réalisé en utilisant les graines de maïs ainsi que la mesure de l'élongation racinaire. Ces analyses ont été effectuées sur le sol rhizosphérique et non rhizosphérique ainsi que sur un sol témoin.

La rhizosphère peut être définie comme la zone du sol immédiatement en contact avec le système racinaire des plantes et qui est sous son influence (Chen et *al.*, 2006).

II-4-1-La teneur en eau du sol :

Elle consiste à peser le sol (partie aérienne et partie racinaire) et les sols à l'état frais (PF) puis à l'état sec (PS) après séchage à l'air libre.

$$\text{Taux d'humidité} = \frac{\text{PF} - \text{PS}}{\text{PF}} \times 100$$

II-4-2-Le potentiel d'hydrogène (pH):

Nous avons préparé une suspension du sol (r dans de l'eau distillée au rapport de 1/2,5 (m/v). Après une agitation de 5mn à l'aide d'un agitateur magnétique, nous avons laissé la solution préparée décanter pendant 2h puis une mesure du pH a été prise à l'aide d'un pH-mètre HI 2210.

II-4-3-La conductivité électrique (CE):

Nous avons préparé un extrait aqueux du sol dans de l'eau distillée au rapport de 1/5 (m/v). Après une agitation de 5mn, nous avons laissé la solution décanter pendant une nuit. Après filtration, la CE est mesurée à l'aide d'un conductimètre de références LF 42.

II-4-4-L'activité biologique globale :

Elle est estimée par un test respirométrique qui consiste à quantifier le CO₂ dégagé lors d'une incubation de 7 jours à une température de 30°C. Le CO₂ dégagé est capté par une solution de NaOH à 0.5 N contenue dans des tubes à hémolyse associés à des tubes contenant de l'eau pour éviter le dessèchement du sol. Ces tubes sont placés dans des flacons bien fermés contenant chacun 50g du sol (fig.4).

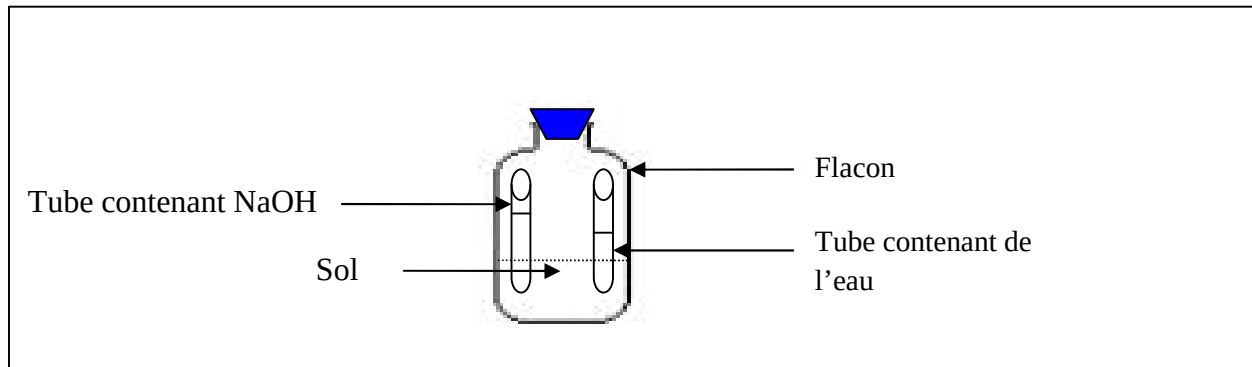


Fig. 4 : Dispositif de mesure de l'activité biologique globale

II-4-5-Test de germination :

Après la récolte, nous avons effectué un test de germination du maïs dans les échantillons du sol de chaque lot, dans le but d'évaluer l'efficacité de la phytoremédiation dans les différents échantillons.

Le test de germination est réalisé en mettant dans chaque boîte de Pétri 100 graines de maïs, puis nous les avons laissées germer dans des conditions favorables avec un arrosage régulier pendant 15 jours.

Après germination, nous avons établi un pourcentage de germination dans chaque lot en dénombrant les graines germées dans les sols contaminés et traités par phytoremédiation avec différentes doses de semis de la fève.

$$\text{Taux de germination (\%)} = \frac{\text{nbr de graines germées}}{\text{nbr total de graines}} \times 100$$

II-4-6-L'élongation racinaire :

C'est la mesure de la longueur des racines du maïs utilisé dans le test de germination afin d'évaluer l'efficacité du traitement appliqué.

Parmi les graines germées, nous avons pris 5 graines pour mesurer la longueur de leur racine. La 1^{ère} mesure a été prise 15 jours après la semence, la 2^{ème} mesure après 21 jours et la 3^{ème} mesure après 28 jours.

III- Méthodes d'analyse statistique :

Le traitement des résultats a été fait avec le logiciel R version 3.2.2. Les résultats ont été soumis à une analyse de variance à un critère de classification (dose de semis). Le test de Newman et Keuls permet la détermination des groupes homogènes.

Résultats et discussion

Pour évaluer l'effet de la dose de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation, il nous a paru utile d'étudier aussi la croissance des plantes selon la dose de semis, nous avons obtenu les résultats suivants.

I-Effet de la dose de semis sur la croissance du végétal :

I-1- Taux de levée des plantes de la fève :

La figure 5 montre le taux de la levée des plantes de la fève selon les différentes doses de semis.

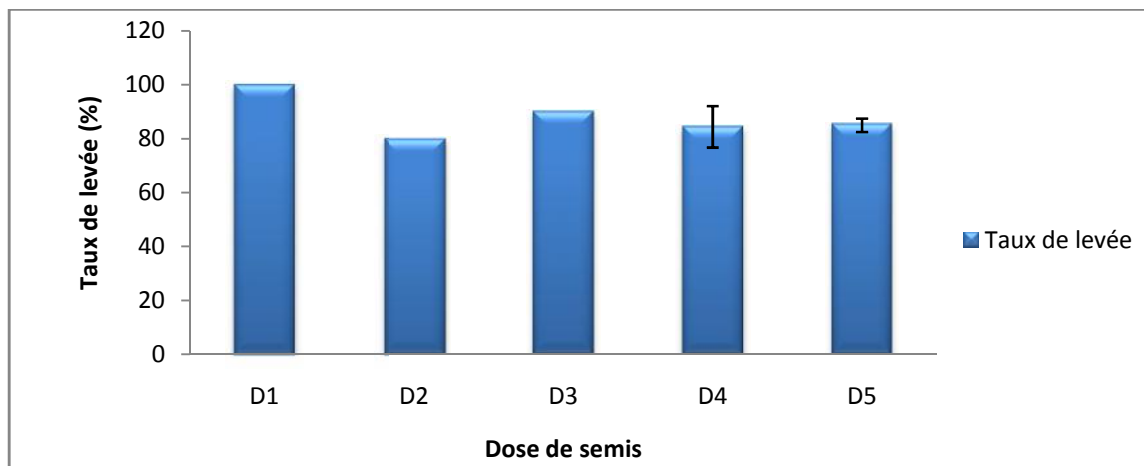


Fig. 5 : Taux de levée de la fève selon les différentes doses de semis

Le taux de levée des plante attient le maximum dans le semi qui contient 1^e graine (100%) puis vient D3, D5, D4 et enfin D2 avec 80%.

L'analyse de la variance (Annexe 1) du taux de levée de la fèvea révélé qu'il n'y avait pas de différence significative entre les différentes doses de semis.

I-2- La hauteur des plantes de la fève :

La figure 6 illustre l'évolution hebdomadaire de la hauteur des plantes de la fève selon les différentes doses de semis.

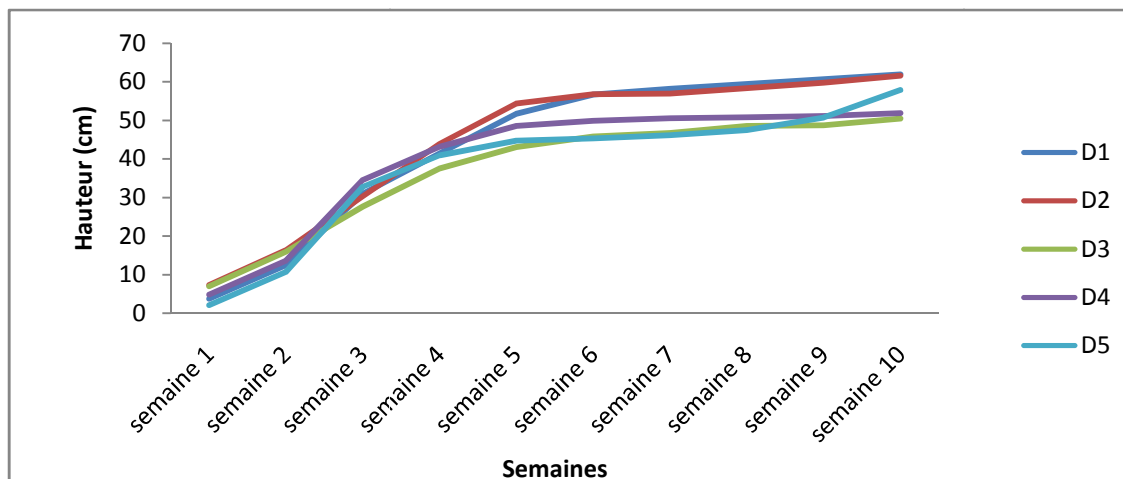


Fig. 6: Evolution hebdomadaire de la hauteur des plantes de la fève selon les différentes doses de semis

Résultats et discussion

D'une façon globale, une bonne croissance a été observée dans tous les pots. A la 10^{ème} semaine, les hauteurs moyennes des plantes avec les différentes doses de semis : la dose de semis D1 a atteint la hauteur la plus élevée avec 62 cm, D2 avec 61.65 cm, suivie par D3, D4 et D5 avec les hauteurs 57,86 cm, 51,94 cm et 50,48 cm respectivement.

L'analyse de la variance (Annexe 2) a révélé qu'il y avait une différence significative entre les hauteurs des plantes selon le facteur dose.

Le test de Newman et Keuls a fait sortir 2 groupes homogènes (Annexe 3) pour le facteur dose de semis (Tableau 6). Le groupe A contient les doses D1 et D2, le groupe AB contient les doses D3, D4 et D5.

Tableau 6 : Groupes homogènes de la hauteur déterminés par le test de Newman et Keuls pour le facteur doses de semis.

Libellé	Moyennes	Groupes
D1	62	A
D2	61,65	A
D3	57,86	AB
D4	51,94	AB
D5	50,48	AB

I-3 La biomasse moyenne de la fève :

La figure 7 montre les résultats de l'analyse de la biomasse aérienne et racinaire moyenne.

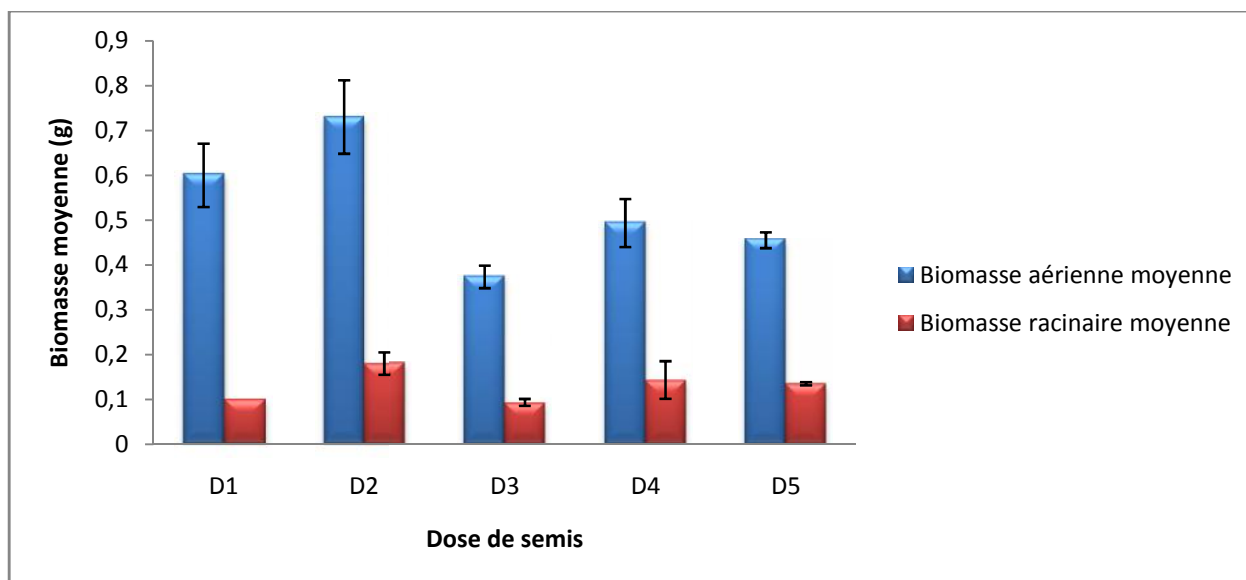


Fig. 7: Biomasse moyenne des plantes de la fève selon les différentes doses de semis

Les valeurs des biomasses moyennes de la partie aérienne des plantes de la fève sont décroissantes selon les doses D2, D1, D4, D5 et D3 avec les valeurs de 0,73 g, 0,6 g, 0,49g, 0,45g et 0,37g.

Résultats et discussion

Pour la biomasse racinaire moyenne de la fève, il n'y a pas de différence significative entre les valeurs des doses de semis. Pour la dose de semis D2 est de 0,18 g. La dose de semis D4 est de 0,14 g, puis la valeur de la dose de semis de D5 qui est de 0,13 g. La dose de semis de D1 avec 0,1 g et enfin la dose de semis D3 avec 0,09 g.

L'analyse de la variance (Annexe 4) a révélé qu'il y avait une différence significative pour la biomasse aérienne moyenne pour le facteur dose et pas de différence significative pour la biomasse racinaire moyenne pour le facteur dose (Annexe 6).

Le test de Newman et Keuls a fait sortir 3 groupes homogènes (Annexe 5) sachant que le groupe A contient la dose D2, le groupe B contient la dose D3, et les doses D1, D4 et D5 appartiennent au groupe AB (Tableau 7).

Tableau 7 : Groupes homogènes pour la biomasse aérienne moyenne pour le test de Newman et Keuls

Libellé	Moyenne	Groupe
D2	0,73	A
D1	0,6	AB
D4	0,49	AB
D5	0,45	AB
D3	0,37	B

I-4- Teneur en eau des plantes :

La figure 8 représente la teneur en eau des plantes de la fève selon les différentes doses de semis.

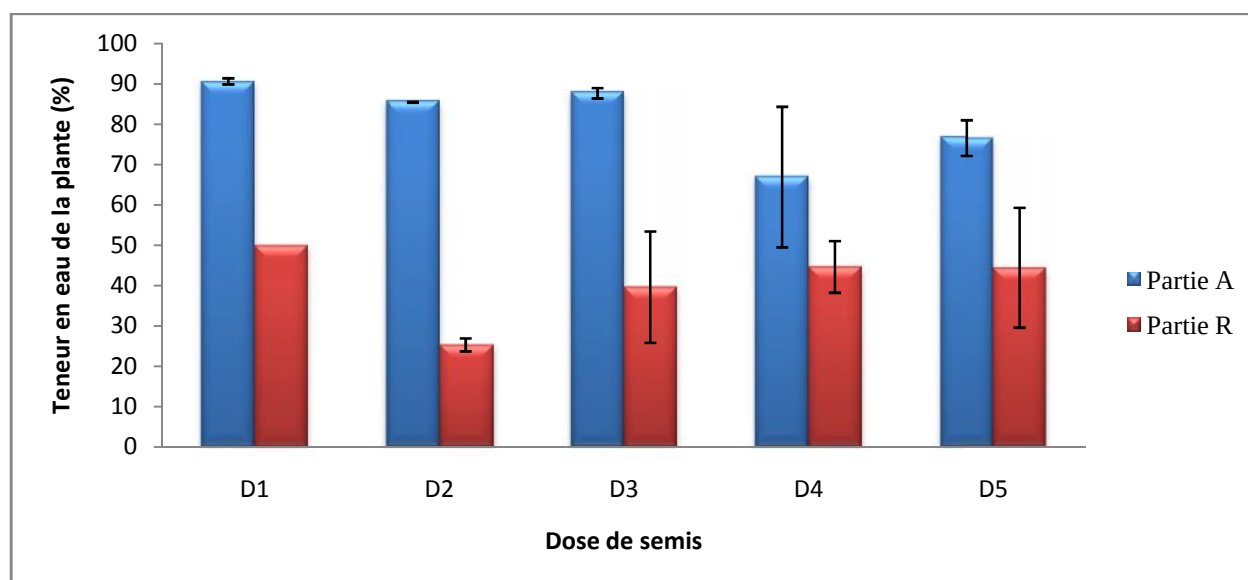


Fig. 8 : Teneur en eau des plantes de la fève (partie aérienne et racinaire) selon les différentes doses du semis

Résultats et discussion

Le taux d'humidité de la partie aérienne atteint le maximum dans le semi D1 avec 90,6% puis D3 avec 87,64%, D2 avec une valeur de 85,40%, D5 avec 76,54% et enfin D4 avec 66,88%.

Le taux d'humidité de la partie racinaire atteint le maximum dans le semi D1 avec 50% puis nous avons observé la valeur de la dose D4 avec 44,59%, ensuite c'est la valeur de D5 avec 44,39%, D3 39,56% et enfin D2 avec 25,26%.

L'analyse de la variance (Annexe 7) pour la teneur en eau pour la partie aérienne et racinaire des plantes de la fève a montré qu'il n'y avait pas de différence significative pour le facteur dose ce qui signifie que la teneur en eau n'a pas d'effet sur la croissance de la fève.

II-Résultats de l'effet de la dose de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation :

A fin d'évaluer l'effet de la dose de semi sur l'efficacité de la décontamination du sol, nous avons mesuré le taux d'humidité du sol, le potentiel d'hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), l'activité biologique globale, test de germination et l'élongation racinaire dans le sol rhizosphérique et le sol non rhizosphérique.

II-1- Taux de la teneur en eau du sol :

La figure 9 représente la teneur en eau du sol selon les doses de semis.

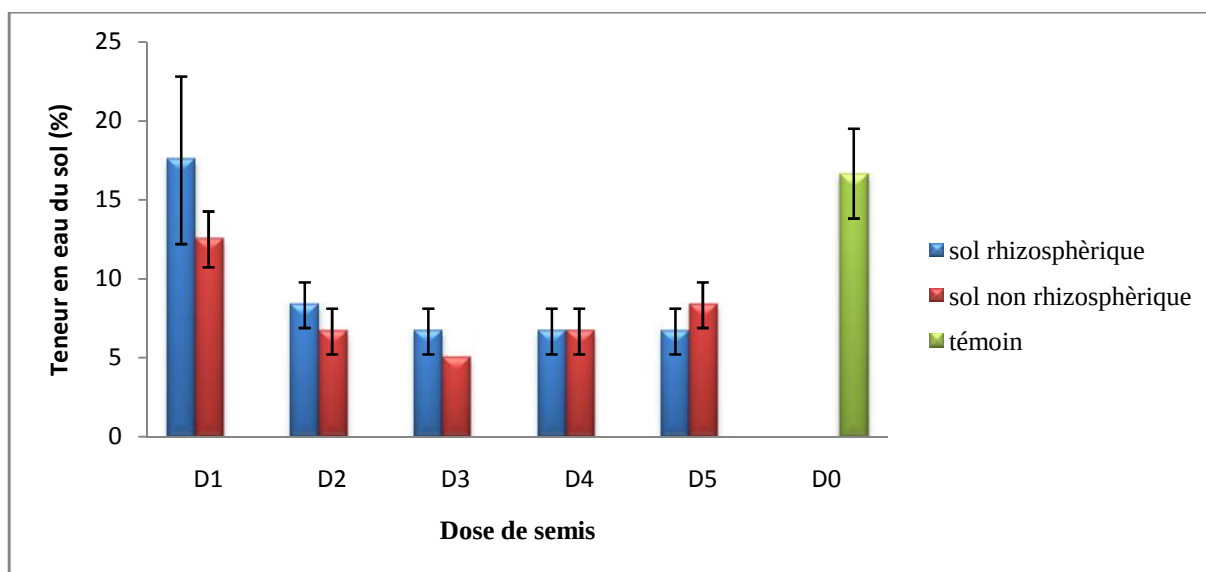


Fig. 9: Teneur en eau du sol selon les différentes doses de semis

Dans le sol rhizosphérique, la dose de semi D1 atteint la plus grande valeur avec 17,5%, puis la valeur de semi D2 dans lequel nous avons observé la valeur 8,33%. Enfin les doses des semis D3, D4 et D5 avec 6,67%.

Dans le sol non rhizosphérique les doses sont classées par un ordre décroissant en commençant par la dose D1 avec une valeur de 12,5%, D5 avec 8,33%, D2 et D4 avec 6,67%. L'humidité du sol témoin est de 16,67%.

Résultats et discussion

L'analyse de la variance de teneur en eau du sol a dévoilé qu'il y avait une différence hautement significative entre les doses de la fève.

Le test de Newman et Keuls a fait sortir 3 groupes homogènes : A qui contient les doses D1R et D0, AB qui contient les doses D1NR, D2R et D5NR et le groupe B contenant les doses D2NR, D3R, D4NR, D4R, D5R et D3NR (Tableau 8).

Tableau 8 : Groupes homogènes de teneur en eau des sols déterminés par le test de Newman et Keuls

Libellé	Moyenne	Groupe
D1R	17,5	A
D0	16,67	A
D1NR	12,5	Ab
D2R, D5NR	8,33	Ab
D2NR, D3R, D4NR, D4R, D5R	6,67	B
D3NR	5	B

II-2 Le potentiel d'hydrogène (pH):

La figure 10 montre les résultats de l'analyse du potentiel d'hydrogène.

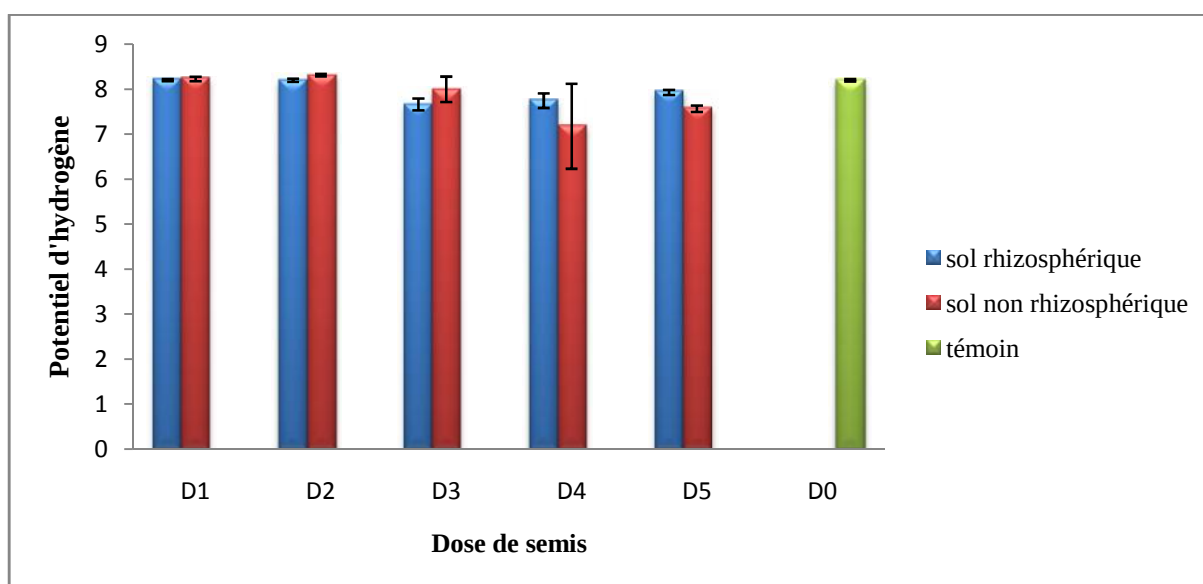


Fig. 10 : pH des différents sols selon les doses de semis.

D'après ces résultats, nous remarquons que le pH des différents sols est neutre à légèrement alcalin.

Nous n'avons pas une très grande différence entre le pH du sol rhizosphérique et non rhizosphérique.

Le sol témoin et le sol des doses des semis D1 et D2 (sol rhizosphérique et non rhizosphérique) ont presque la même valeur du pH qui est aux alentours de 8,2.

Résultats et discussion

Pour les doses D2 et D3 le pH du sol non rhizosphérique est un peu plus élevé par rapport au pH du sol rhizosphérique.

Dans les doses du sol des semis D4 et D5, le pH du sol rhizosphérique est élevé par rapport au pH du sol non rhizosphérique.

L'analyse de la variance a révélé une différence significative entre les doses de semis (Annexe 8).

Le test de Duncan a fait ressortir 3 groupes homogènes (Annexe 9) : A qui contient les doses D2NR, D1NR, D1R, D0, D2R, D3NR et D5R. Le groupe AB qui contient les doses D4R, D3R et D5NR et le groupe B qui contient la dose D4NR (Tableau 9).

Tableau 9 : Groupes homogènes du pH des sols déterminé par le test de Duncan selon les doses de semis.

Libellé	Moyenne	Groupe
D2NR	8,31	A
D1NR	8,23	A
D1R	8,21	A
D0, D2R	8,2	A
D3NR	8	A
D5R	7,93	A
D4R	7,75	AB
D3R	7,66	AB
D5NR	7,57	AB
D4NR	7,18	B

II-3 La conductivité électrique (CE)

La figure 11 illustre les résultats de la conductivité électrique des sols selon les doses de semis.

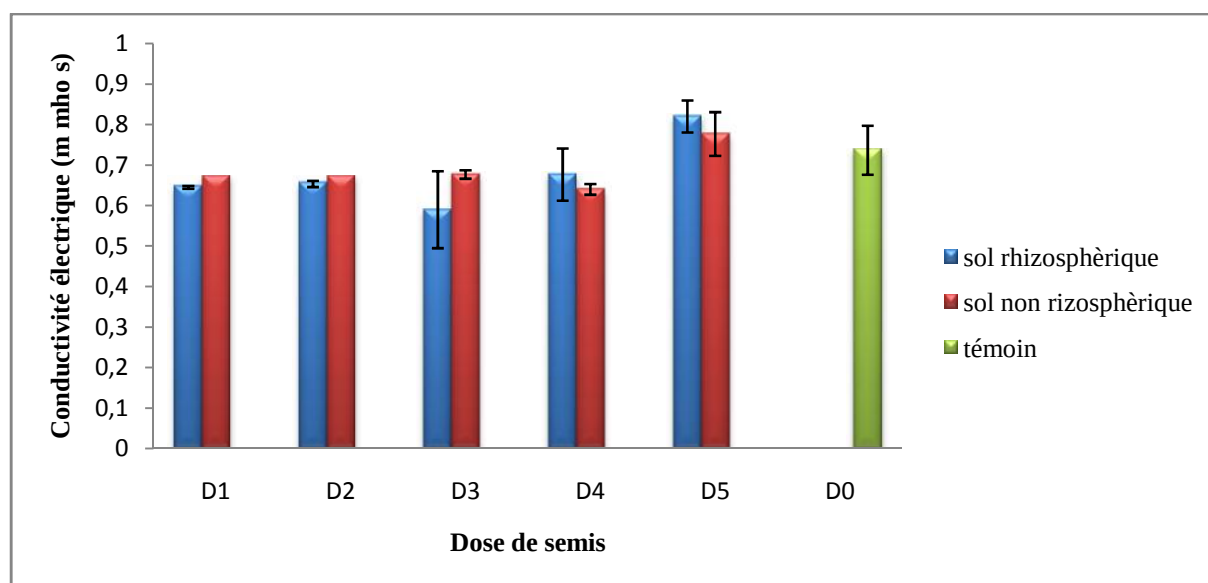


Fig. 11 : Conductivité électriques des différents sols selon les doses de semis

Résultats et discussion

La valeur la plus élevée de la conductivité électrique a été enregistrée dans le sol ayant reçu la dose D5 avec une moyenne de 0,82mmho.s dans le sol rhizosphérique et non rhizosphérique avec 0,77mmho.s. Dans les sols rhizosphériques ayant reçus les doses D4, D2, D1 et D3 ont les valeurs de 0,67, 0,65, 0,64 et 0,59 mmho.s respectivement.

Dans le sol non rhizosphérique après la valeur de D5, les valeurs de la CE des sols ayant reçus les doses D1, D2 et D3 ont la même valeur avec 0,67 mmho.s, et enfin la valeur de la dose D4 est de 0,64mmho.s.

Notant que la valeur de la CE dans le sol témoin est de 0,73mmho.s.

L'analyse de la variance montre qu'il n'y avait pas de différence significative entre les doses de semis de la fève (Annexe 10).

II-4- L'activité biologique globale :

La figure 12 illustre les résultats de la quantité de CO₂ cumulé dans les différents sols selon les doses de semis.

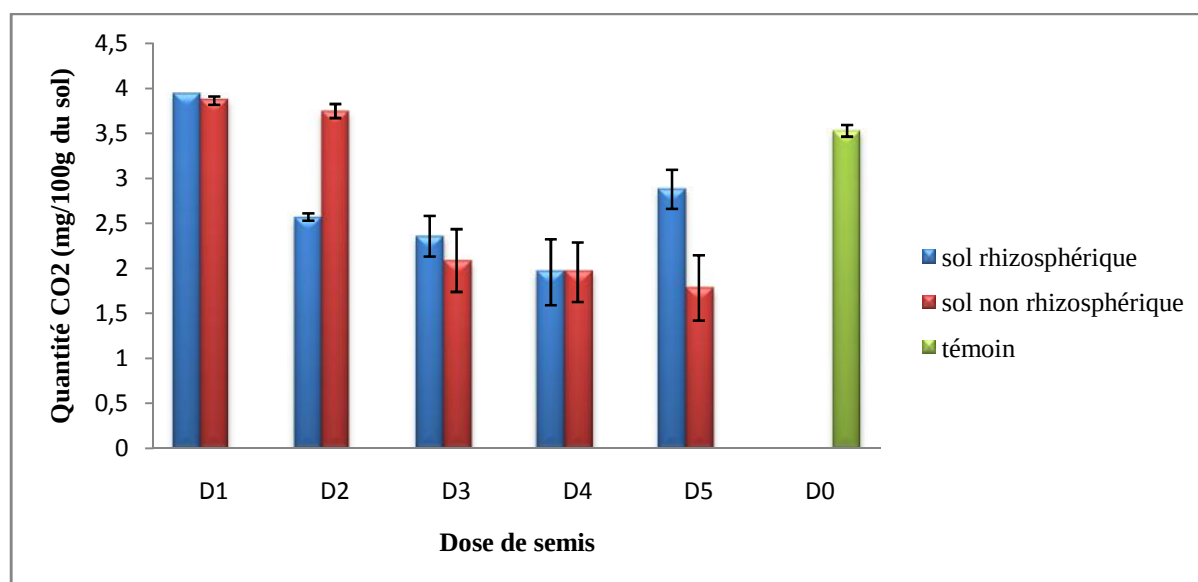


Fig. 12 : Quantité de CO₂ cumulé dans les différents sols selon les doses de semis

La quantité de CO₂ dégagé (mg /100g du sol) est plus importante dans le sol rhizosphérique que celle du sol non rhizosphérique dans les doses D1, D3 et D5 avec 3,93, 2,36 et 2,88 respectivement.

Dans la dose D2 la quantité de CO₂ dégagée est plus importante dans le sol rhizosphérique que dans le sol non rhizosphérique.

La quantité de CO₂ dégagée est la même dans le sol rhizosphérique et non rhizosphérique dans la dose D4 (1,96mg / 100 g du sol).

L'analyse de la variance de la quantité de CO₂ cumulée dans les différents sols (Annexe 11), a montré qu'il y avait une différence très hautement significative.

Le test de Newman et Keuls a fait ressortir 5 groupes homogènes(Annexe 12) : Le groupe A contient les doses D1R, D1NR et D2NR. Le groupe AB contient la dose D0. Le groupe ABC

Résultats et discussion

contient D4R, D5R et D2R. Le groupe BC contient la dose D3R. Le groupe C contient les doses D3NR, D4NR et D5NR (Tableau 10).

Tableau 10 : Groupes homogènes de la quantité de CO₂ cumulée dans les différents sols déterminés par le test de Newman et Keuls pour le facteur dose de semis.

Libellé	Moyenne	Groupe
D1R	3,93	A
D1NR	3,87	A
D2NR	3,75	A
D0	3,53	AB
D4R	3,03	ABC
D5R	2,88	ABC
D2R	2,57	ABC
D3R	2,36	BC
D3NR	2,09	C
D4NR	1,96	C
D5NR	1,79	C

II-5- Taux de germination de maïs :

La figure 13 représente le taux de germination du maïs dans le sol cultivé par la fève.

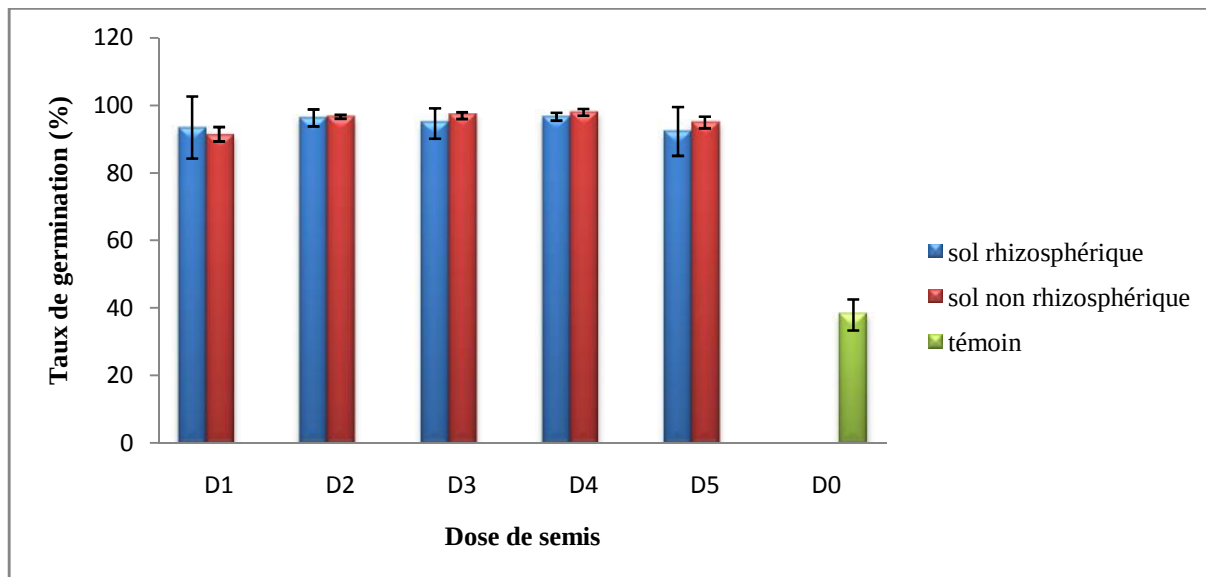


Fig. 13 : Taux de germination du maïs dans les différents sols cultivés par la fève selon les doses de semis.

Le taux de germination des graines du maïs est plus important dans le sol rhizosphérique et non rhizosphérique) par rapport au taux de germination dans le sol témoin avec 38 %.

Résultats et discussion

Le sol rhizosphérique a une valeur moyennela plus élevéeest observée dans la dose D4 avec 96,66 %, puis les doses D2,D3, D1 etD5 96,33%, 94,66%, 93,5% et 92,33% respectivement.

Le taux de germination des graines dans les sols non rhizosphériques est plus élevé dans la dose de semi D4 avec 98%, puis les valeurs des doses D3, D2, D5 et D1 avec les valeurs 97%, 96,66%, 95% et 91,5% respectivement.

L'analyse de la variance de taux de germination a montré qu'il n'y avait pas de différence significative dans les différentes doses de semis(Annexe 13).

II-6- Elongation racinaire du maïs :

La figure 14 montre la l'élongation racinaire du maïs dans les différents sols.

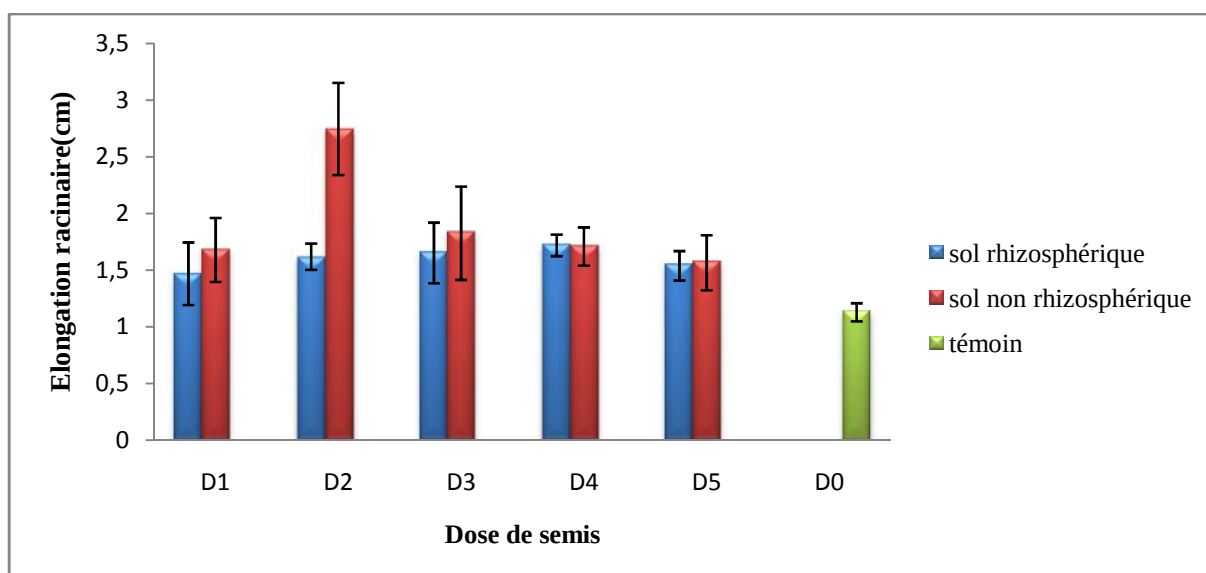


Fig. 14 :Elongation racinaire des graines du maïs dans les différents sols selon les doses de semis.

L'élongation racinaire du maïs augmente dans le sol rhizosphérique pour la dose de semis D4 avec 1,72 cm par rapport aux doses D3, D2, D5 et D1 avec les valeurs de 1,65 cm, 1,62 cm, 1,54 cm et 1,47 cm respectivement.

Dans le sol non rhizosphérique, les valeurs de l'élongation racinaire du maïs sont décroissantes selon les doses D2, D3, D4, D1 et D5 avec les valeurs de 2,97 cm, 2,75 cm, 1,83 cm, 1,68 cm et 1,57 cm respectivement.

L'analyse de la variance de l'élongation racinaire (Annexe 14) a révélé qu'il y avait une différence hautement significative pour le facteur dose de semis.

Le test de Newman et Keuls a fait ressortir 2 groupes homogènes A et B (Annexe 15). Le groupe A contient les doses D2NR et D3NR. Le groupe B contient les doses D4NR, D4R, D1NR, D3R, D2R, D5NR, D5R, D1R et D0 (Tableau 11).

Résultats et discussion

Tableau 11 : Groupes homogènes de la longueur racinaire du maïs déterminée par le test de Newman et Keuls pour le facteur dose.

Libellé	Moyenne	Groupe
D2NR	2,97	A
D3NR	2,75	A
D4NR	1,83	B
D4R	1,72	B
D1NR	1,68	B
D3R	1,65	B
D2R	1,62	B
D5NR	1,57	B
D5R	1,54	B
D1R	1,47	B
D0	1,13	B

III- Discussion :

D'après les résultats de la croissance de la fève, nous avons remarqué qu'il n'y avait pas de différence entre les doses de semis pour le taux de levée des plantes de fève, la biomasse racinaire moyenne et la teneur en eau des plantes. Par contre, pour les hauteurs des plantes de la fève et la biomasse aérienne moyenne, nous avons remarqué des différences entre les doses de semis testées.

Pour les doses D1 et D2 la croissance de la fève était meilleure. A partir de la dose D3, nous avons remarqué une diminution de la croissance de la fève et cela devrait être dû à la concurrence entre les plantes. Ait Tayeb et Titouche (2011) ont remarqué que la présence des hydrocarbures inhibait la croissance racinaire des légumineuses, ce qui laisse supposer que la quantité d'hydrocarbures a baissé dans les sols ayant reçu les doses D1 et D2.

Nous avons observé d'après nos résultats que les doses de semis n'ont pas influencé sur la biomasse racinaire moyenne des plantes de la fève par contre ils ont influencé sur la biomasse aérienne moyenne.

D'après les résultats de l'effet de la dose de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation nous avons constaté que les résultats de la teneur en eau du sol ont montré que la présence des plantes favorisait la diminution de la teneur en eau du sol, à l'exception du sol rizosphérique de la dose D1 qui a la même teneur en eau que le sol témoin, cela pourrait être dû à la quantité limitée de la dose de semis (1^e seule graine) par rapport aux autres doses où il y a une concurrence entre les plantes sur la quantité de l'eau absorbé, selon Susarla et al. (2002) les plantes jouent un rôle important dans la régulation de l'eau contenu dans le sol.

Selon les résultats du pH des sols des différentes doses de semis, nous avons constaté que le sol témoin et le sol de D1 et D2 ont presque la même valeur du pH. La valeur du pH du sol de la dose D3 est la plus favorable (une diminution de la valeur du pH du sol

Résultats et discussion

rhizosphérique par rapport au sol non rhizosphérique), cela pourrait être dû à l'effet des racines des légumineuses qui sécrètent des exsudats racinaires. Dans les doses D2 et D3 le pH du sol non rhizosphérique est un peu élevé par rapport au pH du sol rhizosphérique. Dans les doses D4 et D5 le pH du sol rhizosphérique est élevé par rapport au pH du sol non rhizosphérique contrairement aux résultats trouvés par Louni et Lounis (2012) qui ont montré que la valeur du pH du sol polluée non cultivée avoisine la neutralité et augmente par rapport à celui du sol cultivé.

Nous avons observé qu'il n'y a pas une différence entre la CE des différentes doses de semis. Cela signifie que la dose de semis n'influence pas la CE. Selon Mathieu et Pielain (2003), la CE d'une solution du sol est un indice des teneurs en sels solubles dans ce sol, elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon, c'est-à-dire son degré de salinité. Si cette valeur est inférieure à 2,5 mmho.s signifie que le sol n'est pas salé (Baize, 2000). Donc d'après nos résultats on conclut que les sols des différentes doses de semis ne présentent aucune salinité.

Nous avons constaté que les doses de semis ont une influence sur l'activité biologique du sol. Selon le travail de Susarla et al (2002) les racines des plantes aèrent le sol, ce qui peut stimuler l'activité microbienne dans le sol. Les exsudats racinaires peuvent être une source de nutriments pour les microorganismes étant donné que la rhizosphère contient généralement un nombre significativement élevé des microorganismes les plus actifs que le sol similaire sans plantes.

D'après les résultats nous avons observé un bon taux de germination dans le sol rhizosphérique et non rhizosphérique, cela signifie que la dose de semis n'a pas d'effet sur la germination du maïs, donc une bonne dégradation des hydrocarbures par la fève aurait eu lieu grâce à son système racinaire bien développé et les associations plantes-bactéries qui peuvent augmenter la biodégradation des hydrocarbures, ceci est confirmé par les résultats de Fezani et Khider (2007).

Nous avons remarqué que les doses de semis n'ont pas d'effet sur l'élongation racinaire des graines de maïs germées. La meilleure élongation racinaire a été observée dans le semis D2 ce qui signifie qu'il y a un bon résultat de décontamination de ce sol par rapport aux autres sols. Selon Susarla et al. (2002), les plantes peuvent contribuer à améliorer la biodégradation dans le sol. Un contaminant peut être éliminé par l'intermédiaire d'un enzyme végétale.

Le présent travail réalisé a porté sur l'étude d'un sol d'une station service contaminé par les carburants (essence super et gasoil) dans lequel nous avons semé à différentes doses des graines de fève. Nous nous sommes intéressés à l'effet des différentes doses de semis sur l'efficacité de la phytoremédiation.

D'après les résultats obtenus, au cours de notre travail, nous avons conclu que la dose qui a donnée un bon résultat est la dose de semis D2 qui correspond à 5 graines/pot. Cela est confirmé par la bonne croissance des plants avec une valeur de 61,65 cm, la biomasse végétale de 0,73 g, l'élongation racinaire de 2,97 cm et l'activité biologique exprimée par la respiration des microorganismes de 3,75 mg /100 g du sol.

La dose D1 qui contient 1^e seule graine est en deuxième position, cela est observé dans ces paramètres : sa valeur de croissance de 62 cm, sa biomasse végétale moyenne avec 0,6 g, son activité biologique avec 3,93 mg / 100 g du sol et le potentiel d'hydrogène avec 8,23.

Puis la dose D3 qui a 10 graines, a une bonne croissance avec une valeur de 57,86 cm, potentiel d'hydrogène avec une valeur de 8 et une longueur racinaire de 2,75.

Ensuite, nous trouvons la dose D4 qui contient 15 graines, où nous avons remarqué de bons résultats pour la croissance avec une hauteur moyenne de 51,94 cm, une bonne activité biologique globale avec 3,03 mg de CO₂ dégagé par 100 g du sol et une élongation racinaire de 1,83 cm.

Enfin, la dose D5 qui contient 20 graines, où on a remarqué la croissance la plus faible par rapport aux autres doses avec une hauteur moyenne de 50,48 cm, une teneur en eau du sol avec une valeur de 6,67% et une activité biologique globale avec 1,79 mg de CO₂ dégagé par 100 g du sol et une élongation racinaire de 1,83 cm.

Pour mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la phytoremédiation et pour compléter ce travail, nous proposons quelques perspectives de recherche :

- Faire des essais en plein champ sur des sols contaminés afin d'étudier l'efficacité de cette technique dans les conditions naturelles.
- Réaliser une étude approfondie sur les microorganismes du sol (notamment le genre *Rhizobium*) pour mieux comprendre le processus de fixation symbiotique de l'azote et son implication dans la tolérance de la fève aux hydrocarbures.
- Réaliser des études sur les relations sol-plante-micro-organismes et les mécanismes enzymatiques impliqués dans la dégradation des hydrocarbures.
- Faire une étude génétique sur la fève pour comprendre la résistance de cette espèce à une certaine concentration des hydrocarbures dans le sol.

Références bibliographiques

Abdelly C., 2007. Bioremédiation / Phytoremédiation. Série N° 232. Université de Tunis Institut Supérieure de l'Eduction et de la Formation Continue. 32 p.

Ait Tayeb Z. et Titouche H., 2011. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de *Phaseolus vulgaris* L. et *Cicer arietinum* L. et du sol : essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie U.M.M.T.O. 85 p.

Ali Ahmed H. et Belkaid H., 2006. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes et des micro-organismes du sol et essai de la phytoremédiation. Mémoire d'ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 73 p.

Alilouche M. et Toudouft L., 2014. L'effet des quelques carburants (l'essence normal, essence super et le gasoil) sur les nodosités des racines de la fève (*Vicia faba* L.) et sur quelques propriétés du sol. Mémoire de master en Biologie. U.M.M.T.O. 35 p.

Amiri N., 2013. Effet des hydrocarbures sur quelques propriétés du sol et essai de décontamination biologique. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 50 p.

Baize D., 2000. Guide des analyses en pédologie. INRA 2^{ème} édition. 375 p.

Belkacem S. et Rouas F., 2012. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes *Vicia faba* L. et *Trifolium alexandrinum* L. Essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 58 p.

Benamara Z. et Mohammedi H., 2010. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes et des micro-organismes du sol et essai de phytoremédiation. Memoire d'ingenieur d'Itat en Biologie. U.M.M.T.O. 69 p.

Bergue J-M. et Mérienne D., 1986. La pollution des sols par les hydrocarbures. pp 57-66.

Blanc C., Zornig C. et Girardeau I., 2010. Quelles techniques pour quels traitements- Analyse coûts-bénéfices. Edition BRGM. 399 p.

Bliefert C. et Perraud R., 2001. Chimie de l'environnement (Air, Eau, sol, Déchet). 2^{ème} édition De BOECK. 360 p.

BOFAS., 2004. Directive BOFAS. Assainissement des sols des stations-service en Belgique.

Bouderhem A., 2011. Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodétection et la bioremediation des sols pollués par les hydrocarbures. Mémoire de magistère en Biologie. 49 p.

Bouziane O., Hassen A., Jedidi N., 2002. Détermination de la biomasse C et N par la méthode de Fumigation-Extraction dans un sol de résidus organiques. Institut National de Recherche Scientifique et Technique. Tunisie. pp 406-416.

Brown C., 2014. Interpréter l'analyse détaillée d'un amendement organique. Ontario. Ministère de l'agriculture de l'alimentation et des affaires rurales.

Références bibliographiques

- Cadiere F., 2006.** Traitement biologique des sols pollués : recherche et innovation. ADEME. 92 p.
- Chaineau CH., Morel JL. et Oudot J., 1995.** Microbial degradation in soil microcosms of fuel oil hydrocarbons from drilling cutting. Environ. Sci. and Technol. Vol 29. pp 1615-1621.
- Chaineau CH., Morel JL. et Oudot J., 1996.** Land traitement of oil-based drill cuttings in agricultural soil. J. Environ. Quali. Vol. 26. pp 856-867.
- Chaineau CH., Morel JL. et Oudot J., 1997.** Phytotoxicity and plant uptake of Fuel Oil hydrocarbons. J. Environ. Quali. V26. pp 1478-1483.
- Chen YM., Wang MK., Zhuang SY. et Chiang PN., 2006.** Chemical and physical properties of rhizosphere and bulk soils of three tea plants cultivated in ultisols. Geoderma. pp 378-387.
- Chocat B., 2004.** Pollution par les hydrocarbures dans les eaux de ruissellement et traitabilité : Solution existante, 1ère édition Tec et Doc Lavoisier. pp 289-290.
- Colin F., 2000.** Pollutions localisées des sols et sous-sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés. Edition Tec et Doc. Paris. 417 p.
- Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Beranger S., Hube D., Blanc C., 2010.** Quelles techniques pour quels traitements. BRGM. 399 p.
- Cunningham S.D. et Berti W.R., 1993.** Remediation of contaminated soils with green plants: an overview. In vitro cellular et developmental Biology-plant, 29(4), pp 207-208.
- Dabouineau L., Lamy Y., Collas P. 2005.** Phytoremediation et phytorestauration ou l'utilisation des plantes pour la dépollution et l'épuration des eaux usées. Le Rôle d'eau. Vol 124. pp 8-15.
- Doyle C., 2008.** La phytoremédiation : une solution à la contamination des sites de traitement du bois. Grade de maître en environnement. Université de Sherbrooke. 85 p.
- DPRA., 2006.** Estimating the Date of a Hydrocabon Fuel Release.
- Duchaufour P., 2001.** Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6ème édition MASSON, Paris Milan Barcelone. 498 p.
- dyneff., 2014.** Fiche de données de sécurité. Gasoil. 17 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.73 p.

Références bibliographiques

Gabet S., 2004. Remobilisation d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine biologique. Thèse de Doctorat. Université de Limoges. 177 p.

Hadjou O. et Rabhi S., 2015. Essai de bioremédiation d'un sol pollué aux hydrocarbures par Bioaugmentation et Biostimulation. Mémoire de Master en Biologie. U.M.M.T.O. 30 p.

Institut National de Recherche Scientifique (INRS), 2006. Institut National de Recherche et Sécurité, France. Combustibles et carburants pétroliers. ED 989 Aide-mémoire technique.

Jeannot R., Lemiere B. et Chiron S., 2000. Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Edition BRGM. 110 p.

Kellas K., 2008. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis du blé dur (*Triticum durum*), du pois vivace (*Lathyrus latifolius*) et de la microflore du sol. Essai de phytoremédiation. Mémoire d'ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 69 p.

Kettane L., 2015. Effets de différentes concentrations de l'essence sur la croissance de la fève (*Vicia faba* L.). Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 28 p.

Koller E., 2004. Traitement des pollutions industrielles ; Eau. Air. Déchets. Sols. Boues. Edition DUNOD. Paris. 424 p.

Laurent C., Feidt C. et Laurent F., 2005. Contamination des sols : transfert des sols vers les animaux. Edition EDP Science /ADEM. 216 p.

Louni L. et Lounis L., 2012. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de l'avoine (*Avena sativa* L.). Essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 65 p.

Mahlal M. et Moula S., 2011. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de deux plantes (*Zea mays* L., *Sorghum bicolor* L.) et du sol : essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 88 p.

Marchal R., Penet S., Solano-Serena F., et Vandecasteele JP., 2003. Gasoline and Diesel Oil Biodegradation, Oil & Gas Science and Technology. Vol 58, n°4, Edition Technip. pp 441-448.

Mathieu C. et Pieltain F., 2003. Analyse chimique des sols. Edition TEC & DOC. 385 p.

Michaille P., 2014. La bioremédiation-application à la décontamination des sols et des eaux polluées par des éléments métalliques toxiques ou radioactifs. ARCEA/GASN. N° 38. 6 p.

Morel J-L., 1990. Phytoremédiation des sols contaminés : Des plantes pour guérir les sols. La chimie et la nature. pp 157-184.

Nowak C., Mossmann JR. et Saada A., 2003. L'état des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre Rapport final. Edition BRGM. 97 p.

Références bibliographiques

Piedrafita M. et Carnicer V., 2007. La pollution ponctuelle des sols : cas des stations-service dans la Région de Bruxelles-Capitale. Thèse d'Etudes Spécialisées en Gestion de l'Environnement. Université Libre de Bruxelles. 154 p.

Rahmani D. et Slimani M., 2012. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis de la fève (*Vicia faba* L.) et du sainfoin (*Hedysarum flexuosum* L.) Essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 68 p.

Ramade F., 1992. Précis d'écologie. 6^{ème} édition Masson. Paris. 300 p.

Saada A., Nowak C. et Coquereau N., 2005. L'état des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. Edition BRGM. 107 p.

Slimani M., 2015. Effet de la concentration du pétrole brut sur la croissance de la fève (*Vicia faba* L.), du pois (*Pisium sativum* L.) et de la luzerne (*Medicago sativa* L.) Essai de phytoremédiation. Mémoire de Master en Biologie. U.M.M.T.O. 53 p.

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.

Susarla S., Medina V., McCutcheon S., 2002. Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. pp 647-658.

Takilt O. et Taouachi F., 2013. Effets de la concentration du pétrole brute sur la croissance du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) et de luzerne (*Medicago sativa* L.) et essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 59 p.

TOTAL., 2005. Fiche de données de sécurité. Supercarburant, supercarburant sans Plomb. 10 p.

TOTAL., 2006. Fiche de données de sécurité. Gasoil. 9 p.

Verdin A., Lounès-Hadj Sahraoui A., et Durand R., 2004. Les agents de la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures polycyclique aromatiques. N° 36. 4^e trimestre. pp 30-37.

Zebiche B. et Smaani L., 2015. Effet de la concentration du pétrole brut sur la croissance du pois (*Pisium sativum* L.) et de la luzerne (*Medicago sativa* L.) Essai de phytoremédiation. Mémoire de Master en Biologie. U.M.M.T.O. 38 p.

Zerouki H. et Ouhada M., 2013. Phytotoxicité des hydrocarbures vis-à-vis de la luzerne, du pois et de la fève. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. U.M.M.T.O. 56 p.

Annexe 1 : Analyse de la variance de taux de levée de la fève

```
Analysis of Variance Table

Response: levée
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose      4  539.25  134.812   2.0574 0.1788
Residuals 8  524.19   65.524
```

Annexe 2 : Analyse de la variance des hauteurs des plantes de fève

```
Analysis of Variance Table

Response: hauteur
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose      4  314.53   78.633   5.207 0.02307 *
Residuals 8  120.81   15.101
```

Annexe 3 : Le test Newman et Keuls pour la hauteur des plantes de fève

```
Groups, Treatments and means
a      D1      62
a      D2     61.65
ab     D5     57.86
ab     D4     51.94
ab     D3     50.48
```

Annexe 4 : Analyse de la variance de la biomasse aérienne moyenne des plantes de fève.

```
Analysis of Variance Table

Response: Bam
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose      4  0.21871  0.054677   4.2557 0.03888 *
Residuals 8  0.10278  0.012848
```

Annexe 5 : Le test Newman et Keuls pour la biomasse aérienne moyenne des plantes de fève.

```
Groups, Treatments and means
a      D2      0.73
ab     D1      0.6
ab     D4     0.4933
ab     D5     0.455
b      D3     0.3733
```

Annexe 6 : Analyse de la variance de la biomasse racinaire moyenne des plantes de fève.

```
Analysis of Variance Table

Response: Brm
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose      4  0.013847  0.0034619   1.4142 0.3128
Residuals 8  0.019583  0.0024479
```

Annexe 7 : Analyse de la variance de teneur en

eau des plantes (partie aérienne et racinaire) des plantes de fève.

```
Analysis of Variance Table

Response: Ha
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose    4  994.38   248.60   0.7675 0.5753
Residuals 8 2591.35    323.92
```

```
Analysis of Variance Table

Response: Hr
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose    4 1100.4    275.11   1.0733 0.4299
Residuals 8 2050.6    256.32
```

Annexe 8 : Analyse de la variance de Ph de différents sols.

```
Analysis of Variance Table

Response: Ph
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose   10  3.6264  0.36264   2.5293 0.03709 *
Residuals 20  2.8676  0.14338
```

Annexe 9 : Le test de Ducun pour le pH de différents sols.

```
Groups, Treatments and means
a      D2NR      8.313
a      D1NR      8.23
a      D1R       8.205
a      D0        8.2
a      D2R       8.2
a      D3NR      8
a      D5R       7.93
ab     D4R       7.747
ab     D3R       7.663
ab     D5NR      7.567
b      D4NR      7.177
```

Annexe 10 : Analyse de variance de la CE des différents sols.

```
Analysis of Variance Table

Response: CE
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose   10 0.12837  0.0128365   1.4807 0.218
Residuals 20 0.17338  0.0086692
```

Annexe 11 : Analyse variance de la quantité de CO₂ cumulé dans les différents sols.

```
Analysis of Variance Table

Response: AB
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
dose   10 16.7125  1.67125   6.4388 0.0002128 ***
Residuals 20  5.1912  0.25956
```

Annexe 12 : Le test de Newman Keuls de la quantité de CO₂ cumulé dans les différents sols.

Groups, Treatments and means		
a	D1R	3.93
ab	D1NR	3.865
ab	D2NR	3.75
abc	D0	3.53
abcd	D4R	3.01
bcde	D5R	2.88
cdef	D2R	2.573
def	D3R	2.36
def	D3NR	2.09
ef	D4NR	1.96
f	D5NR	1.787

Annexe 13 : Analyse de la variance de taux de germination du maïs dans les différents sols.

```

Kruskal-Wallis rank sum test

data:  TG by dose
Kruskal-Wallis chi-squared = 14.8026, df = 10, p-value = 0.1394

```

Annexe 14 : Analyse de la variance de l'élongation racinaire du maïs des différents sols.

```

Analysis of Variance Table

Response: ER
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
dose   10  8.9389   0.89389    3.6493 0.006625 **
Residuals 20  4.8989   0.24495

```

Annexe 15 : Le test de Newman Keuls pour l'élongation racinaire du maïs.

Groups, Treatments and means		
a	D2NR	2.973
a	D3NR	2.747
b	D4NR	1.827
b	D4R	1.72
b	D1NR	1.68
b	D3R	1.653
b	D2R	1.62
b	D5NR	1.567
b	D5R	1.54
b	D1R	1.47
b	D0	1.13

Résumé :

L'objectif de notre travail est d'évaluer l'effet de la dose de semis de la fève (*Vicia faba* L.) Sur l'efficacité de la phytoremédiation d'un sol pollué par les carburants. Des semis ont été réalisés selon différentes doses D0, D1, D2, D3, D4 et D5 avec un nombre de graines de 0, 1, 5, 10, 15 et 20 respectivement. En effet, sur la base des résultats obtenus, nous pouvons conclure que le semis D2 qui correspond à 5 graines / pot est la dose qui a donné un bon résultat de décontamination du sol. Cela est confirmé par une bonne croissance des plantes, une biomasse végétale moyenne plus élevée, une elongation racinaire et une activité biologique meilleures.

Abstract :

This study aims to evaluate the effect of sowing rate of bean (*Vicia faba* L.) on the phytoremediation effectiveness in a soil polluted with hydrocarbons. Seedlings were performed with the sowing rates D0, D1, D2, D3, D4 and D5 corresponding to a seed number of 0, 1, 5, 10, 15 and 20 respectively. The results showed that sowing 5 seeds of bean gave the better effectiveness of phytoremediation which is indicated by a good plant growth, higher average plant biomass, root growth and a better biological activity in the treated soil.