

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques
Département de Biologie Animale et Végétale



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en biologie

Option : Protection de l'Environnement

Thème

**Essai de remédiation d'un sol pollué aux
hydrocarbures par biostimulation
Cas des stations-service**

Présenté par :

**Nait Abdelkader Sonia
Djenad Mustapha**

Devant le jury :

Présidente : Mme SAHMOUN F.

M. A. A. à U.M.M.T.O

Promotrice : M^{elle} ALI AHMED S.

M. A. A. à U.M.M.T.O

Examinatrices : Mme TALEB K.

M. C. B. à U.M.M.T.O

Mme CHIBANE G.

Doctorante à U.M.M.T.O

Soutenu le : 24 /06/2015

REMERCIEMENTS

Nous commençons par remercier Dieu le tout puissant de nous donné le courage, volonté, l'amour du savoir et surtout la patience pour produire ce modeste travail

C'est pour nous autant de plaisir qu'un devoir d'exprimer notre gratitude et notre reconnaissance à Melle ALI AHMED S. qui nous a orienté et guidée à fin de mener à bien ce travail.

Nous remercions aussi très sincèrement les membres de jury la président M^{me} SAHMON F. M. A. A. au département de biologie de l'UMTO d'avoir accepté de présider le jury, M^{me} TALEB K, M. C. B. O L'UMMTO et M^{me} CHIBANE G. Doctorante à l'U.M.M.T.O. qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

Nous remercions l'ingénieure du laboratoire de pétrochimie de l'université M'Hamed Bougara de Boumerdes pour avoir accepté de nous faire l'analyse par spectroscopie infrarouge.

Nous voudrions aussi témoigner notre reconnaissance et exprimer toute notre gratitude à nous enseignants qui ont participé pour une grande part dans notre formation.

Enfin, nous tenons à remercier toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail et à tous ceux qui nous ont apporté leur aide.

Merci



Dédicace

Un moral d'acier et une volonté de fer décrivent bien mon parcours jusqu'ici. C'est dire combien il m'a été difficile de patienter toute une décennie pour prétendre à ce Master. Dieu merci, j'ai été bien entouré et je tiens à dédier ce mémoire :

A mes très chers parents pour leurs soutien moral et matériel tout au long de mes études, que dieu tout puissant me les garde.

A tous mes amis(es) surtout et à toute la promotion protection de l'environnement promotion (2014 et 2015).

Mustapha Djenad





Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leurs soutiens moral et matériel tout au long de mes études que dieu les protègent et leurs accordent une longue vie pleine de bonheur et de santé

À la mémoire de ma grande mère

À mes très chers sœurs : Sabrina, Katia, Nabila

À mes très chers frères : Amar, Lyes

À tous mes cousins (es), tantes et oncles et leurs enfants

À mon binôme et sa famille

À tous mes amis (es) et ceux qui m'aiment

À toute la promotion de protection de l'environnement (2014-2015)

Sonia



Liste des abréviations

BTEX : Benzène, Taluène, Ethylène, xylène

PCB : polychlorobiphényle

Liste des figures

Figure 01 :les modes d'action des plantes sur les polluant de sol au niveau de système racinaire.....	9
Figure 02 : localisation du site d'étude.....	13
Figure 03 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussens de la station de service.....	14
Figure 04 : Position de la station d'étude sur le Climagramme d'Emberger.....	15
Figure 05 : Dispositif expérimental au laboratoire.....	18
Figure 06 : Dispositif expérimental sur le terrain.....	19
Figure 07 : pH des différents sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain.....	22
Figure 08 : conductivité électrique des différentes sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain.....	23
Figure 09 : Taux de germination des graines de blé dans les différents sols traités et Non traités au laboratoire et sur le terrain.....	24
Figure 10 : la longueur des racines des graines du blé dans les sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain.....	25
Figure 11 : Spectre FTIR du sol traité et non traité sur le terrain.....	26
Figure 12 : Spectre FTIR du sol traité et non traité au laboratoire.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1: différents techniques de bioremédiation.....	10
Tableau 2: travaux de recherche sur la biostimulation.....	12
Tableau 3: caractéristiques du sol provenant de la station-service de Boukhalfa.....	16
Tableau 4: Résultats de l'analyse statistique du pH de sol traité au laboratoire et sur le terrain.....	22
Tableau 5: Résultats de l'analyse statistiques de la CE du sol traité au laboratoire et sur le terrain.....	23
Tableau 6: Résultats du l'analyse statistiques du taux de germination du blé dans le sol traité et non traité sur le terrain.....	24
Tableau 7: Résultat du l'analyse statistiques de la longueur racinaire des graines du blé dans le sol traité et non traité sur le terrain.....	25

Sommaire :

<i>Introduction générale</i>	1
------------------------------------	---

Aperçu bibliographique

I. Pollution des sols par les hydrocarbures	3
I.1. Généralité sur les hydrocarbures.....	3
I.2. Sources des hydrocarbures.....	4
I.3. Devenir des hydrocarbures dans le sol.....	5
I.4 Impacts des hydrocarbures.....	6
II. Décontamination des sols	7
II.1 Méthodes physiques.....	8
II.2 Méthodes chimiques.....	8
II.3 Méthodes thermiques.....	8
II.4 Méthodes biologiques.....	8

Matériels et méthodes

I. Description et localisation de site d'étude	13
II. Matériels	16
II.1. Sol :.....	16
II.2. Blé.....	16
II.3. Fertilisants.....	17
III. Méthodes	17
III.1. Mise en place de l'essai au laboratoire.....	17
III.2. Mise en place de l'essai sur le terrain.....	18
III.3. Bio-essais.....	19
III.4. Analyses chimiques.....	20
III.5. Méthode d'analyse statistique.....	20

Résultats et discussion

I. Résultats des analyses chimiques	21
I.1 pH.....	21
I.2 la conductivité électrique.....	22
II. Résultats des Bio-essais	23
II.1. Test de germination.....	23

II.2. Longueur racinaire.....	25
III. Analyse par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	26
IV. Discussion.....	27

<i>Conclusion</i>	29
-------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

Aperçu bibliographique

La pollution des sols est une pollution qui est due à une très vaste gamme de substances inorganiques comme les métaux lourds (Cd, Hg, Pb) et les métalloïdes ou organiques, incluant les pesticides, les hydrocarbures, les PCB, les BTEX et l'ensemble de leur produits de dégradation. Toutes ces substances ont en commun des propriétés toxiques à faible dose qui menacent la santé des organismes et des écosystèmes (Morel, 2014).

Selon la norme NF ISO11074-1 (1997), un site contaminé est un site où sont détectées des substances dangereuses et donc présentant ou moins une « concentration d'une substance dangereuse » (Colin, 2000).

I Pollution des sols par les hydrocarbures :

La pollution des sols par les hydrocarbures est majoritairement accidentelle ou d'origine industrielle sauf dans le cas d'épandages volontaires d'hydrocarbures à des fins expérimentales (Mansouri, 2013).

Généralement cette pollution associée aux activités de production de gaz (cokeries, anciennes usines à gaz), de raffinage du pétrole ou de traitement du bois (Magalie, 2013).

I.1 Généralité sur les hydrocarbures :

Les hydrocarbures sont des molécules composées uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène (Fattal, 2008). Ce sont des composés organiques de formule brute C_nH_m (où n et m sont des entiers naturels). Ils se forment à partir des débris d'algues de résidus de la faune marine et du plancton ; le vieillissement, la température et la pression qui s'exerce sur les fonds marins transforment cette substance organique en hydrocarbures (Battaz, 2009). De par leur abondance naturelle, ils font partie des produits chimiques les plus importants pour l'humanité et sont notamment utilisés comme source d'énergie primaire (Gaudu, 2014).

I.1.1 Classifications des hydrocarbures :

Les hydrocarbures peuvent être regroupés selon les familles suivantes :

I.1.1.1 Les hydrocarbures aliphatiques :

Les composés caractérisés par une chaîne ouverte linéaire ou ramifiée ; leur formule générale est C_nH_{2n+2} contenant des liaisons simples C-C et C-H, ce sont des alcanes classés dans les hydrocarbures aliphatiques saturés. Par contre, les hydrocarbures aliphatiques insaturés ce sont des alcènes s'ils comportent une double liaison et des alcynes s'ils comportent une triple liaison (Arnaud, 2004). Leur biodégradabilité est rapide lorsque les chaînes sont droites (Fattal, 2008).

I.1.1.2 Les hydrocarbures cycliques :

Ce sont des composés dont la chaîne carbonée est cyclique. Ils peuvent être saturés dans le cas des cycloalcanes ou insaturés dans le cas des cycloalcènes et des cycloalcynes

(Arnaud, 2004). Un hydrocarbure présentant certaines ramifications ou cyclisation aura une biodégradabilité plus faible qu'un hydrocarbure linéaire (Saada et *al.*, 2005).

I.1.1.3 Les hydrocarbures aromatiques :

Ce sont des composés insaturés dont la molécule contient de 1 à 6 cycles benzéniques. Ils ont des odeurs fortes et sont pour la plupart très toxiques. Quelques hydrocarbures aromatiques sont connus par leur action cancérigène, ce sont les HAP (Fattal, 2008) dont 16 ont été classés dans la liste noire de l'USEPA (Annexe1)

Selon Saada et ses collaborateurs (2005), le nombre de cycles aromatiques aura une incidence sur la biodégradation, plus le nombre des cycles augmente plus la dégradation sera difficile.

I.1.1.4 Les asphaltènes :

Correspondent à une classe de composé de haut poids moléculaire insolubles dans le pentane ou l'hexane. La structure de ces composés est mal connue du fait d'une part, de leur composition chimique complexe à base de cycles aromatiques condensés, de naphtho-aromatiques, de ramifications et d'hétéroatomes (O, N, S) et d'autre part de méthodes analytiques difficilement utilisables (Bouderhem, 2011).

I.2 Sources des hydrocarbures :

Les hydrocarbures proviennent de deux sources principales :

I.2.1 Sources naturelles :

Les feux de forêt, de prairie et les éruptions volcaniques, l'érosion des roches sont considérés comme les plus importants processus naturels qui génèrent les hydrocarbures (Girard et *al.*, 2005).

I.2.2 Sources anthropiques :

Les hydrocarbures présents dans les sols proviennent généralement d'une pollution pétrolière (production, raffinage, transport) ou issue de la pétrochimie, d'usines à gaz, de certaines industries chimiques ou industries mécaniques.

Les produits pétroliers, notamment dans les stations-services, sont parmi les principales sources de pollutions du sol à cause des déversements des hydrocarbures lors du remplissage des cuves de stockage de la station ou de la distribution de carburant, lors d'une fuite dans les réservoirs ou dans les canalisations entre les citernes et les îlots de pompes c'est une pollution ponctuelle (Colin, 2000).

I.3 Le devenir des hydrocarbures dans le sol :

Le devenir des hydrocarbures dans les sols dépend d'un ensemble de processus responsables de la volatilisation, de l'immobilisation, de la mise en solution, du transport et de la transformation chimique des molécules. Ainsi, la mobilité des hydrocarbures dans les sols fait intervenir les phénomènes suivants :

I.3.1 Percolation :

Elle consiste en l'entraînement par l'eau de pluie dans le sol, des composés les plus facilement solubles vers la profondeur, voir jusqu'aux nappes phréatiques.

I.3.2 Volatilisation :

Elle implique un transfert des composés du sol vers la phase gazeuse et éventuellement jusqu'à l'atmosphère. Elle dépend de la pression de vapeur de chaque hydrocarbure, du nombre d'atomes de carbone et du type d'hydrocarbure. Ce phénomène est significatif dans l'atténuation naturelle des pollutions pétrolières ; cependant bien qu'ils se volatilisent, les vapeurs de certains composés vont s'accumuler à la surface de la nappe profonde, où les composés en phase gazeuse ne seront pas libérés dans l'atmosphère (Saada et al., 2005).

I.3.3 Solubilisation :

La solubilité des hydrocarbures dans le sol est très faible. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée ; il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour le sol, ils sont difficiles à éliminer et sont absorbés par la faune et la flore (Bouchez et al., 1995 in Boudershem, 2011).

I.3.4 Dégradations des hydrocarbures :

Les hydrocarbures une fois sorbés au sol peuvent subir des dégradations abiotiques (hydrolyse, réactions photochimiques) et des transformations biotiques liées aux micro-organismes des sols.

La dégradation caractérise la décomposition des molécules organiques par les micro-organismes présents dans le sol ; elle dépend principalement de la présence suffisante de micro-organismes adaptés, de la température, et de la quantité d'oxygène ou d'autres accepteurs d'électron tels que les nitrates qui sont présents dans le sol (Stegmann et al., 2001 in Neggach, 2013).

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

I.3.5 La sorption :

Après pénétration des polluants organiques dans le sol, ils sont absorbés par celui-ci, ou ils restent en phase gazeuse ou en solution. Les substances ayant une densité plus grande que celle de l'air se déplacent de haut en bas, tandis que les substances plus légères sont transportées vers le haut.

Les polluants organiques sont fixés au sol en fonction de leur solubilité dans l'eau, de leur structure moléculaire et de leur groupe fonctionnel (Koller, 2009).

I.4 Impacte des hydrocarbures :

La majorité des hydrocarbures ont des effets négatifs sur les propriétés du sol, la santé et la végétation.

I.4.1 Effet des hydrocarbures sur le sol :

Les hydrocarbures ont des effets néfastes sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol

I.4.1.1 Sur les propriétés physiques du sol :

Les études ont été réalisées pour déterminer l'effet des hydrocarbures sur les propriétés physiques du sol sont vraiment limitées.

Rouquerol et ses collaborateurs (1987), ont montré que Les hydrocarbures enrobent les particules minérales et assurent leur dispersion.

Quant à Mettauer et ses collaborateurs (1987) in Fezani et Khider (2007), ils soutiennent l'idée que la présence des hydrocarbures améliorent la stabilité structurale du sol, accroissent sa rétention en eau et réduisent sa mouillabilité.

I.4.1.2 Sur les propriétés chimiques du sol :

Les effets des hydrocarbures sur les propriétés chimiques du sol consistent généralement en :

- Une augmentation de la conductivité électrique (CE) entraînant l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence de sel (Alilouche et Toudouft, 2014).
- Une augmentation de la concentration du sol en éléments à l'état de traces tels que le manganèse (Mg), le zinc (Zn) et le fer (Fe) (Sauchelli, 1969 in Fezani et khider, 2007).
- Elévation de pH du sol, une diminution de la teneur du sol en potassium (K), en calcium (Ca) et en phosphore (P) (Chaineau et *al.*, 1996).

I.4.1.3 Sur les propriétés biologiques du sol :

Les polluants organiques qui incorporés au sol peuvent induire l'inhibition de la croissance des micro-organismes et leur métabolisme. Cet effet serait lié à des interactions avec la membrane cellulaire de ces polluants fortement hydrophobes et à la formation des métabolites toxiques (Girard et *al.*, 2005). Les résidus pétroliers de toute nature qualifiés de xénobiotiques sont défavorables à la vie des micro-organismes du sol (Duchaufour, 2001).

Les hydrocarbures s'ils sont incorporés au sol en quantité limités (moins de 2% de la couche 0-15 cm) n'exercent pas d'action dépressive vis-à-vis des micro-organismes, mais ils exercent une action nocive indirecte (Duchaufour, 2001).

I.4.2 Effets sur la végétation :

Le sol est à la fois le support et le réservoir nutritif du végétal. Les effets toxiques des hydrocarbures sur les végétaux sont très divers selon les familles qui se manifeste par : la réduction de la photosynthèse, de la biomasse de la plante et l'empêchement de l'éclosion de nouveaux bourgeons (Judy et *al.*, 2014 in Gauhier, 2014).

Selon Michel et ses collaborateurs (1986), Les hydrocarbures sont susceptibles de provoquer des effets immédiats : réduction des échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère, brûlures des parties aériennes et des nécroses ou déformations des zones de croissance ce qui induit la suppression ou le retard de la floraison ou de la fructification.

Selon Girard et ses collaborateurs (2005), les hydrocarbures inhibent la germination des graines et la croissance des plantes.

I.4.2 Effets sur la santé :

Les hydrocarbures sont susceptibles d'induire l'apparition des cancers chez les organismes qui leur sont exposés par inhalation, par ingestion ou par contact (Girard *et al.*, 2005). Les principaux hydrocarbures carcinogènes sont représentés par les HAP, actuellement les effets toxicologiques de tous les HAP sont imparfaitement connus ; toutes fois les données expérimentales disponibles chez l'animal ont montré que certains HAP pouvaient induire spécifiquement de nombreux effets sur la santé tels que les effets hépatiques, les systémiques ou hématologiques immunologiques et le développement d'athérosclérose ou des effets sur la reproduction ainsi que des effets génotoxiques dans le cas du benzo [a] pyrène (Pichard *et al.*, 2005).

II Décontamination des sols :

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 (Koller, 2009).

II.1 Moyens de décontamination :

Selon Girard et ses collaborateurs (2005), le traitement des sites contaminés peut se faire *in situ*, *sur site* après excavation, ou hors site (*ex situ*) lorsque les parties polluées sont ramenées à un endroit extérieur pour les traiter (centre de traitement).

- **Application de traitements « *in situ* »:** Le principe consiste à traiter les horizons contaminés directement dans le milieu naturel pollué (sur place) sans l'enlèvement des parties contaminées (Lecomte, 1998).

Les traitements *in situ* utilisent l'activité biologique intrinsèque du sol, ou l'atténuation naturelle, et limitent la migration de la contamination (Girard *et al.*, 2005).

- **Application de traitements « *sur site* »:** Le principe consiste à traiter le matériel à dépolluer sur place après l'enlèvement du milieu naturel. Le traitement se fait à l'aide d'installations d'une unité de décontamination mobile (Lecomte, 1998).

- **Application de traitements hors site « *ex situ* » :** Consiste à traiter le matériel à décontaminer dans des zones spécialisées en dehors du site après l'enlèvement par excavation, le sol traité peut être remis en place (Lecomte, 1998).

Les traitements *sur site* et *ex situ* ont pour objectifs d'optimiser le taux de dégradation et de rendre les polluants plus accessibles pour la biodégradation (Girard *et al.*, 2005).

Les techniques de réhabilitations sont classées comme suit :

II.2. Méthodes physiques :

Ce sont les méthodes les plus largement utilisées. Leur principe consiste à utiliser des fluides présents dans le sol ou injectés comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'éliminations et d'extractions (Colin, 2000).

II.3 Méthodes thermiques :

Ces technologies sont basées sur un même principe qui consiste à utiliser les hautes températures pour détruire les produits polluants, qui sont convertis en gaz carbonique et en vapeur d'eau.

Elles peuvent être appliquées *sur site* ou *hors site* ; c'est le cas le plus fréquent (Lecomte, 1998).

II.4 Méthodes chimiques :

Les méthodes chimiques ont pour but de détruire les polluants contenus dans le sol en provoquant des réactions entre ceux-ci et un réactif ajouté (Colin, 2000).

La majorité des procédés de traitement chimiques exigent que les sols soient mobilisés dans un milieu liquide (Gabet, 2004).

II.5 Méthodes biologiques :

Le principe de ces méthodes repose sur une biodégradation naturelle des polluants par l'intervention des micro-organismes (bactéries, champignons,...). La décontamination par voie biologique va consister à stimuler ce phénomène naturel pour en augmenter le rendement, afin de détruire en un minimum de temps le polluant organique (Lecomte, 1998).

L'avantage de ces techniques de traitement est de maintenir les propriétés physico-chimiques, voir biologique des sols. Ces techniques se sont largement développées durant les dernières années, car elles sont efficaces, peu coûteuses et s'adressent à un grand nombre de polluants organiques ou non (Girard et *al.*, 2005).

Parmi ces méthodes nous distinguons :

II.5.1 Phytoremédiation :

C'est un concept très large qui recouvre une gamme de technologies relativement différentes, mais toutes basées sur l'utilisation des plantes pour réduire les risques écotoxicologiques liés à la contamination des sols.

La phytoremédiation pourrait aussi s'appeler « rhizoremédiation » car le travail est principalement réalisé par les racines. Les parties aériennes de la plante jouent un rôle important, dans la mesure où elles captent l'énergie solaire et assurent les flux de polluants par la transpiration, mais c'est dans l'environnement racinaire que se passe l'essentiel du processus (fig. 1).

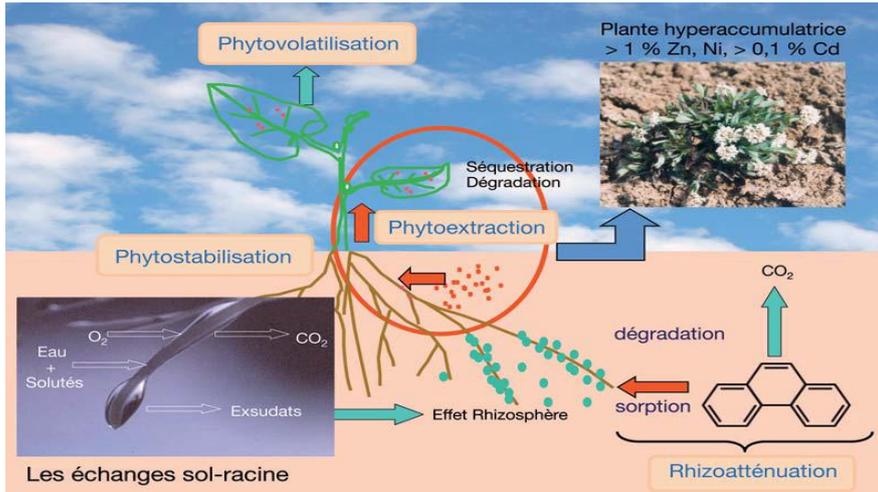


Fig.1 : Les modes d'action des plantes sur les polluants des sols au niveau de système racinaire (Morel, 1983).

II.5.2 Procédés utilisant les microorganismes :

Elle consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux organismes, la plupart du temps microscopiques (bactéries, champignons et microalgues) à dégrader les polluants en composés inertes tels que l'eau, ou le gaz carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes ou exogènes (Jemal, 2002).

La bioremediation se déroule généralement en conditions d'aérobies. Cependant, l'application de la bioremediation en conditions d'anaérobies permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes (Abdely, 2007 ; Zawieurucha et Crzegorz, 2014).

La bioremédiation regroupe plusieurs technologies dont les plus importantes sont résumées dans le (tableau 1).

Tableau 1 : différentes techniques de bioremediation (ADEME ,2006)

Technique	Principe
Biolixiviation	Solubilisation et entrainement dans la phase aqueuse par les micro-organismes de polluants fixés ou piégés dans le sol.
Bioréacteur	Création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau et ajout de nutriment pour stimuler la croissance de la population.
Bioaugmentation	Introduction dans le sol des micro-organismes exogènes adaptés aux polluants à traiter.
Bioventing	Injection d'O ₂ dans la zone non saturée pour stimuler la microflore et la biodégradation des polluants.
Biosparging	Injection d'air, d'O ₂ ou de nutriments (N, P) dans la zone saturée pour entrainer l'activité des micro-organismes indigènes.
Biopile	Regroupement des sols excavés en tas de terre qui sont traités sur site ou hors site par divers voies (compostage, biocentre).
Compostage	Procédé d'aération stimulant la flore aérobie optimisé par l'apport d'agents structurants (copeaux de bois, paille, fumier) et de population fongiques dégradant les xénobiotiques.

➤ **Biostimulation :**

La biostimulation est une technique qui se fonde sur l'augmentation de l'activité des bactéries indigènes en ajoutant les facteurs qui peuvent limiter leur activité, principalement l'oxygène et les nutriments (Iwana et Grzegorz, 2008).

Le but principal de la biostimulation est de fournir aux communautés bactériennes un environnement favorable, dans lequel elles peuvent effectivement dégrader des contaminants (Mohan et al., 2006 ; Ueno et al., 2007 in Iwana et Grzegorz, 2008).

II.5.3 Facteurs contrôlant la bioremediation :

La biodégradation des hydrocarbures est influencée par plusieurs facteurs dont les principaux sont : la nature de sol, la concentration et les caractéristiques physico-chimiques des polluants ainsi que les paramètres environnementaux :

➤ **Structure et nature du sol :**

Les bioprocédés s'appliquent à une grande variété de sols. Pour cela il est important de connaître la structure et la nature du sol.

Selon Girard et ses collaborateurs (2005), les agrégats tendent à diminuer l'activité microbienne dans le sol de manière indirecte par un ralentissement de la diffusion de l'oxygène et l'apport des nutriments à l'intérieur de l'unité structurale et par la protection mécanique des substrats qu'elles renferment.

La nature du sol a un important impact sur le degré d'absorption du polluant et des nutriments ; le sol doit être suffisamment poreux pour permettre l'injection de la solution nutritive ainsi que l'insufflation de l'air (Lecomte, 1998).

➤ **Teneur en oxygène :**

La teneur des sols en oxygène est contrôlée par différents facteurs, un minimum d'espaces occupés par l'air (10%) est généralement considéré comme nécessaire pour l'activité microbienne. Selon Lecomte (1998), l'oxygène peut être fourni sous plusieurs formes ; L'oxygène pur, le peroxyde d'hydrogène (H₂O₂).

➤ **pH :**

Pour une bonne biodégradation il convient de rester dans une gamme de pH comprise entre 5.5 et 8.5. Les champignons acceptent généralement des conditions plus drastiques, que les bactéries. Il est important de noter que des changements de pH peuvent influencer la dissolution ou la précipitation de certains composés dans le sol, il faut vérifier que l'augmentation ou la diminution du pH ne mobilise pas des composés dangereux (Ould Rabah, 2012).

➤ **Température :**

La température optimale pour la biodégradation des hydrocarbures dans le sol est comprise entre 27°C et 28°C. Des températures inférieures à ces valeurs ralentissent le processus de biodégradation à la fois par la diminution de l'activité microbienne et des taux de biodégradation par l'inhibition de l'activité enzymatiques des micro-organismes. (Atlas, 1981 *in* Fezani et Khider, 2007).

➤ **Nutriments :**

Les nutriments sont nécessaires pour le développement et l'activité microbienne, en particulier l'azote et le phosphore. Ils constituent un facteur clé dans le processus de bioremediation naturelle des hydrocarbures (Bireche et Berregui, 2014).

Dans se cadre, des nombreux travaux ont été faits pour l'évaluation de la technique de biostimulation. Les plus récents sont synthétises dans le (tableau 2).

Tableau 2 : quelques travaux de recherche sur la biostimulation

Auteurs	Intitulés	Résultats
Sari et al. (2011)	Amélioration de la bioremédiation du sol diesel carburant –diesel – fuel –contaminated dans un climat boréal comparaison de biostimulation et de bioaugmentation.	La biostimulation par l’intermédiaire de l’optimisation de l’azote et de fourniture d’oxygène a amélioré de manière significative la bioremédiation du sol polluée par une dégradation rapide des hydrocarbures.
Rafik et al. (2013)	Effect of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil.	Cette étude montre l’efficacité de l’addition des aliments (azote et le phosphore) sur le déplacement de TPH. Amélioration de processus de biodégradation à un pourcentage de 30%.
Kahil et Issad (2014)	Essai de réhabilitation d’un sol polluée aux hydrocarbures par biostimulation.	Une diminution significatif de la quantité d’hydrocarbures contenus dans le sol traité par l’azote et le phosphore ce qui signifie que les populations bactérienne sont aptes à dégrader les polluants.
Boukherchoufa et Bouzid (2014)	Etude de l’effet de l’apport d’azote et de phosphore dans deux sols de textures différentes argilo-limoneux (Alger), sableux (Hassi Messaoud) contaminés par les hydrocarbures.	Accélération de la dégradation des hydrocarbures dans les deux sols considérés par l’amélioration de la capacité des micro-organismes autochtones.

Les travaux cités sur les techniques de biostimulation été réalisés au laboratoire et ils ont donné des résultats assez satisfaisants, mais il reste à savoir si ces techniques ont aussi une efficacité suffisante dans le milieu naturel.

Matériels et méthodes

En vue de décontaminer un sol pollué aux hydrocarbures par biostimulation, Un essai à été mené au laboratoire et sur le terrain.

I Description et localisation du site d'étude :

La région de Boukhalfa, se situé au centre de la wilaya de Tizi-Ouzou ; Elle est limitée par la commune de Sidi Nammane au nord, à l'est par la commune de Sidi Belloau et Tala Allam à l'ouest par la commune de Draâ Benkhedda et au sud par la commune de Tizi-Ouzou.

La station- service de Boukhalfa dans laquelle nous avons réalisé notre essaie est situé à 5km à l'ouest du chef-lieu de la commune, sur la route nationale n°12 reliant Alger à Tizi-Ouzou.

C'est une station privée, mise en service le 02 février 2002. Elle s'étale sur une superficie de 10000 m² ; elle est entourée par des terres agricoles. Notons aussi la présence d'un oued à proximité de cette station.

La capacité de leurs réservoirs est de 15000 l pour le gasoil et 23000 l pour l'essence super et l'essence sans plomb et 10000 l pour le GPL. La localisation de la station est présentée dans la (fig.2)



Fig.2 : Localisation du site d'étude (Google Earth, 2015)

I.1 Données climatiques :

Afin de déterminer les caractéristiques climatiques de la région d'étude nous nous sommes basés sur les données climatiques qui ont été fournies par (Station Météorologique de Boukhalfa) pour l'année 2004-2013. Et il y a un manque de donnée par rapport à une précipitation du mois de février 2015.

I.1.1 Synthèse climatique :

❖ Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен :

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен permet de déterminer une saison sèche selon la relation $P \leq 2T$

P : précipitations moyennes mensuelles en mm

T : Température moyennes mensuelles en C°

A partir de ces données (Annexe 2) nous pouvons tracer le diagramme ombrothermique, qui est un graphique sur la durée et l'intensité de la période sèche se trouvent matérialisées par la surface de croisement, où la courbe thermique passe au-dessous de la courbe ombrique (fig.3).

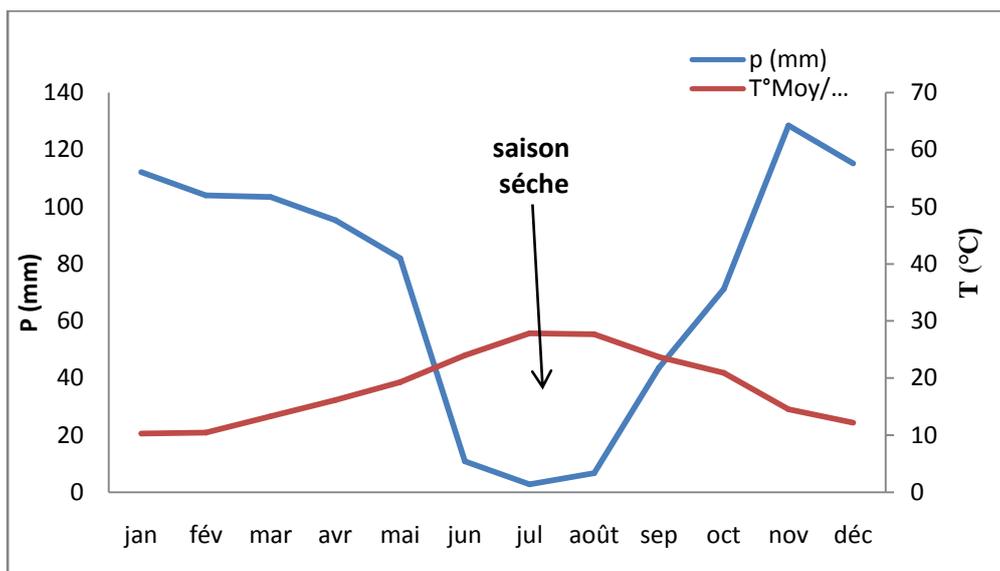


Fig. 3 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour la station - service de Boukhalfa, durant la période 2004-2013.

Ce diagramme permet de distinguer globalement au sein d'une même année, deux périodes : une période sèche, qui s'étale de la fin du mois de Mai à la fin du mois de Septembre et une période humide qui s'étale du début du mois Septembre au début du mois de Mai.

❖ **.Climagramme d’Emberger :**

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

Q_2 : le quotient pluviométrique d’Emberger

P : moyenne des précipitations des années prises en considération, exprimé en mm

M : moyenne des températures maxima du mois le plus chaud, exprimé en °C

m : moyenne des températures minima du mois le plus froid, exprimé en °C

Ce Climagramme permet de classer La station de Boukhalfa dans l’étage bioclimatique subhumide à hiver tempérée fig.4

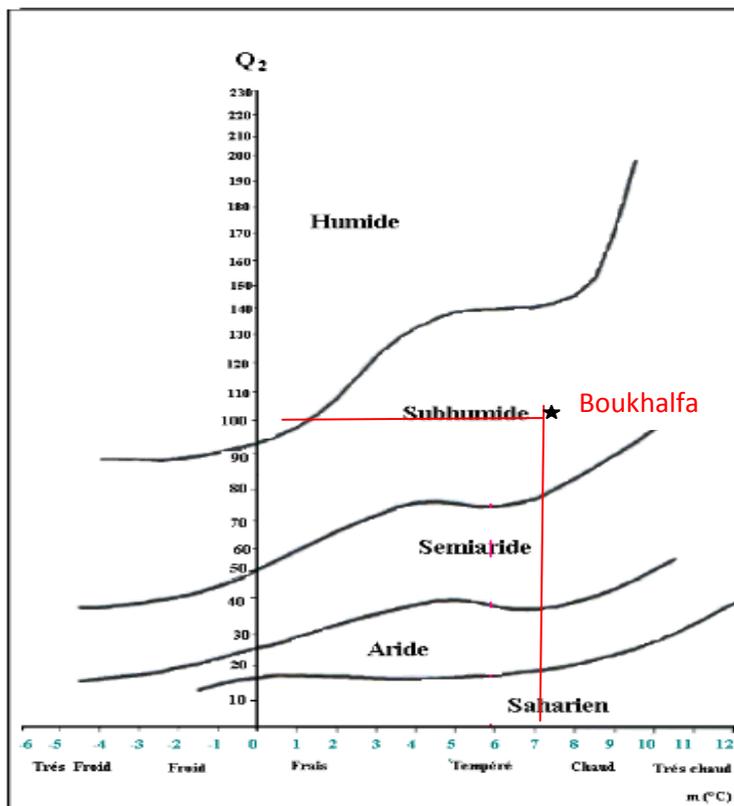


Fig.4 : Position de la station d’étude sur le Climagramme d’Emberger

I.1.2 Données climatiques durant la période d’étude :

I.1.2.1Température :

La température a un impacte sur les propriétés du sol et influence sur l’activité microbienne

Pour la région de Boukhalfa, pendant notre essai qui est déroulé du mois de décembre 2014 au mois de février 2015, les températures moyennes sont respectivement de 11,5 °C ; 9,9 °C ; 9,8 °C. Durant cette période les températures étaient assez basses.

I.1.2.2 Pluviomètre :

Les précipitations sont des facteurs prépondérants pour la détermination d'un climat. La vie sur terre est commandée par la présence d'eau. Pour notre essai les précipitations moyennes sont respectivement de 272,4 mm, 200,9 mm. Ces valeurs indiquent de fortes précipitations pendant la période de notre essai.

II Matériels

II.1 Sol :

L'étude expérimentale a été réalisée sur un sol prélevé d'une station - service de Boukhalfa. Les prélèvements correspondent à la couche superficielle du sol (0-10 cm). C'est un sol contaminé par les rejets des carburants (essence et gasoil). Ce sol présente des caractéristiques consignées dans le (tableau 3).

Tableau3 : Caractéristiques du sol provenant de la station- service de Boukhalfa (Kahil et Issad, 2014)

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

D'après les normes d'interprétation qui figurent dans le Mémento de l'agronome (1993), le sol utilisé dans cet essai est de texture limono-argileuse, caractérisé par une forte capacité de rétention d'eau, de pH neutre. Il est non salé, riche en carbone organique et faiblement pourvu en azote et en phosphore.

II.2 Le blé

Nous avons utilisé cette espèce dans le bio-essais, et le choix se fait par leur sensibilité aux hydrocarbures.

D'après Cronquist (1981), le blé occupe la position suivante :

Règne	Plantae
Sous -règne.....	Trachéobionta
Division	Magnoliophyta
Classe.....	Liliopsida
Sous-classe	Commelimidae
Ordre	Cyperales
Famille	Poaceae
Sous-famille.....	Pooideae
Tribu.....	Triticeae
Genre.....	<i>Triticum</i>
Espèce	<i>Triticum durum</i> L.

II.3 Les fertilisants

Nous avons utilisé les nutriments inorganiques, qui permettent de stimuler l'activité des populations microbiennes indigènes et le maintien d'une forte densité des populations de micro-organisme actifs vis-à-vis de la dégradation des hydrocarbures contenus dans le sol. Et le choix de ces sels est conditionné par leur disponibilité.

Pour calculer les quantités d'azote et de phosphore ajoutées, nous nous sommes basés sur la quantité d'hydrocarbures contenue dans le sol. D'après Rosenberg et *al.* (1992), il faut 150 mg d'azote et 30 mg de phosphore pour dégrader 1g d'hydrocarbure.

II.3.1 Phosphate Dipotassique

De formule chimique KH_2PO_4 , c'est une poudre granulaire, incolore ou blanche, en cristaux ou en masse, avec un poids moléculaire de 174.18 g/ mol

II.3.2 Sulfate d'ammonium

De formule chimique $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, se présente sous forme de cristaux, de couleur blanchâtre et de poids moléculaire égal à 132,14 g / mol.

III Méthodes :

La biostimulation est réalisé en enrichissant le sol pollué en azote et en phosphore.

III.1 Mise en place de l'essai au laboratoire :

Le sol est tamisé à l'aide d'un tamis à maille de 5mm puis le sol a été réparti dans 6 flacons étiquetés, chaque flacon recevant 100g de sol.

Trois flacons sont traités par l'ajout du 4.70g du $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ et 0.92g de KH_2PO_4 et les trois flacons restants n'ont pas été traités.

Tous les flacons sont ensuite incubés à une température ambiante pendant 12 semaines (fig.5).

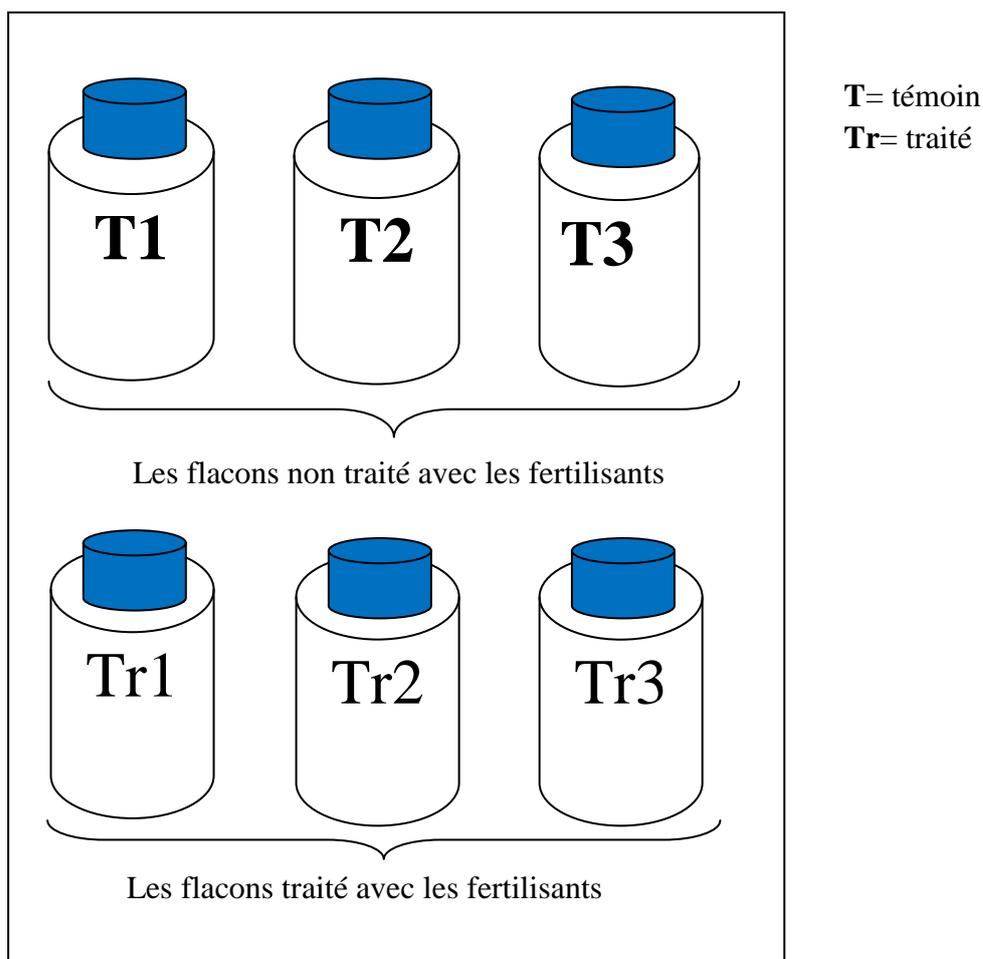


Fig.5 : dispositif expérimental au laboratoire

III.2 Mise en place de l'essai sur le terrain

Notre étude expérimentale à été menée dans une parcelle de dimension 80/40 cm² située à proximité de la source de pollution par les hydrocarbures (rejets d'essences et de gasoil), Nous avons partagée cette parcelle en 2 parties où nous avons effectué 6 prélèvements de 10 cm³, de façon aléatoire. 3 dans chaque partie. Les 3 échantillons de l'une des deux parties est traités par l'ajout de l'azote et de phosphore.

Chaque échantillon contenant 1,750g du sol ont été additionné de 16,1g du(NH₄)₂SO₄ et de 82.25g du KH₂PO₄.

Après traitement, les échantillons sont remis à leur place. Les 3 échantillons de l'autre partie sont remis en place sans avoir subit de traitement. Tous les échantillons restés incubés pendant 12 semaines. Une couverture en polyéthylène est déployée afin d'éviter le lessivage lorsque de fortes précipitations sont annoncées (fig.6)

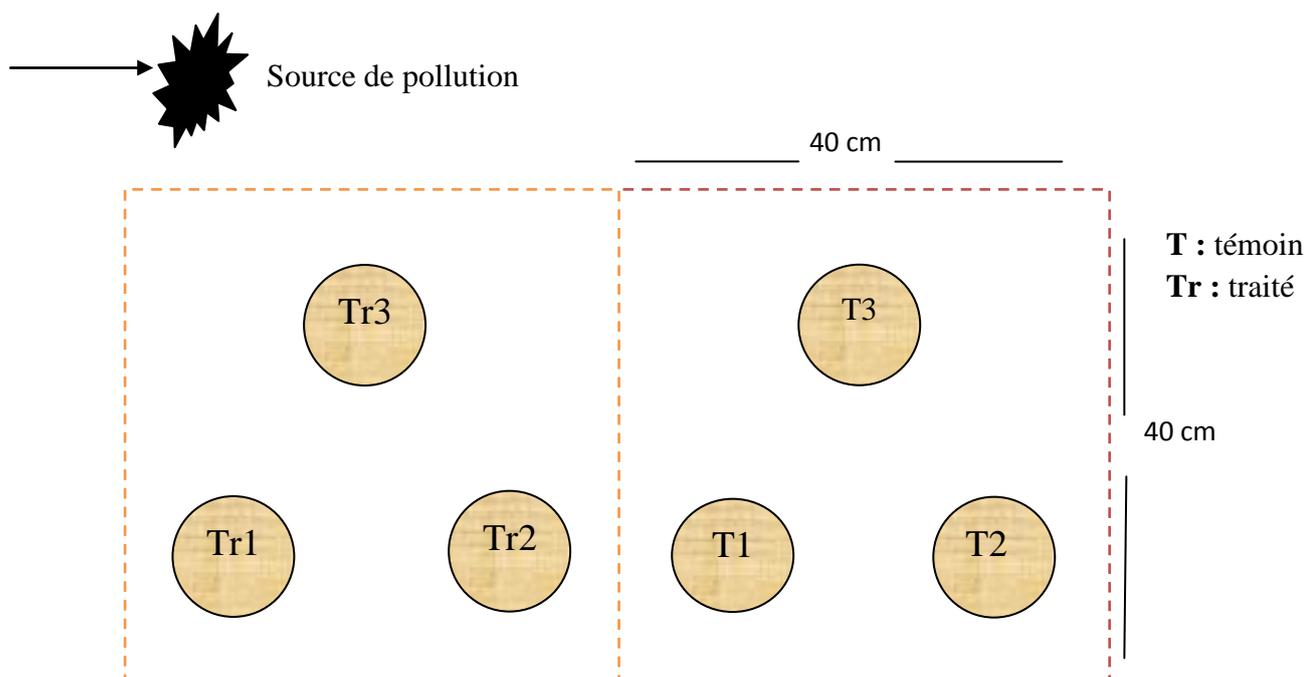


Fig.6 : dispositif expérimental sur le terrain

III.3 Bio-essais

III.3.1 Test de germination

Le but de ce test est d'évaluer l'efficacité du traitement réalisé en estimant le degré de toxicité des hydrocarbures contenus dans le sol. C'est un test réalisé dans des boîtes de Pétri. Il consiste à mettre 100 graines de blé dans chaque boîte contenant du sol traité ou non traité pour l'essai de laboratoire et pour celui du terrain. Après 2 semaines, les graines germées sont dénombrées dans chaque boîte. Pour calculer le taux de germination, nous avons utilisé la formule suivante

$$G\% = 100 (X/N)$$

X= le nombre de graines germées

N= nombre total de graine

III.3.2 Longueur racinaire:

C'est la mesure de la longueur des racines des graines de blé germées pour évaluer la phytotoxicité des hydrocarbures et voir l'efficacité du traitement appliqué. Les mesures sont faites 3 semaines après la germination.

III.4 Analyses chimiques :

Afin de déterminer les caractéristiques du sol après traitement, nous avons procédé à des analyses suivantes :

III.4.1 Potentiel d'hydrogène (pH)

La mesure du pH constitue le test le plus sensible des modifications survenant dans l'évolution des sols (Clément et Pieltain, 2009).

Le sol a été mélangé avec de l'eau distillée au rapport de 2/5 (masse/volume) puis agité pendant 2 minutes à l'aide d'un agitateur magnétique, et laissé décanter pendant 2h.

Le pH est ensuite mesuré avec un pH-mètre (Inolab).

III.4.2 Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice des teneurs en sels solubles dans ce sol, elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables présentes dans l'échantillon, c'est-à-dire son degré de salinité (Clément et Pieltain, 2009).

Le sol a été mélangé avec de l'eau distillée au rapport de 1/5 (masse/volume), puis agité pendant 2 minutes puis laissé décanter pendant 30 minutes, et fait la mesure avec un conductimètre (LF42).

III.4.3 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 quantitatives et qualitatives, en caractérisant les groupements fonctionnels et les composantes majeures de différents échantillons.

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}

Elle permet d'évaluer les modifications des groupements fonctionnels relatifs aux hydrocarbures des sols contaminés.

Les échantillons de sol 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.

III.5 Méthode d'analyse statistique

Les résultats obtenus en laboratoire et sur le terrain ont fait l'objet d'une analyse statistique effectuée avec le logiciel R 3.0.3.

Le test de Student a été réalisé pour comparer, pour chaque variable, la moyenne obtenue dans le sol traité et celle du sol non traité.

Résultats et discussion

I Résultats des analyses chimiques

I.1 Le pH

Les résultats de la mesure du pH des sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain sont présentés par la fig.9

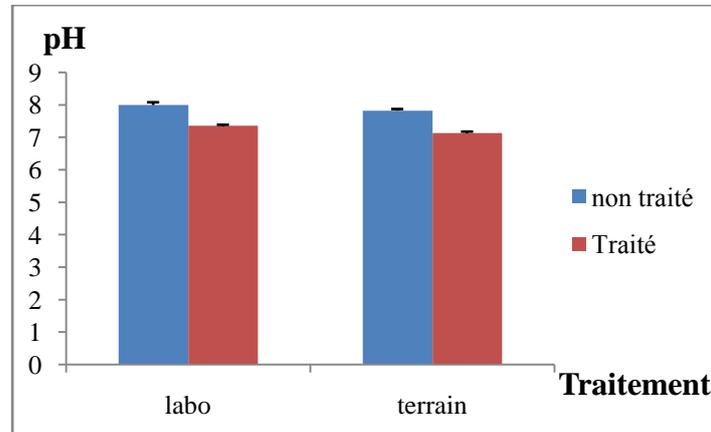


Fig.9 : pH des différentes sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain

Les résultats d'analyses de pH ont montré une diminution du pH, qui est de 7.82 dans le sol non traité à 7.13 pour le sol traité par biostimulation sur le terrain. Dans le sol non traité au laboratoire est de 7.94 à 7.35 dans le sol traité.

Les résultats de test de Student ont montré qu'il y'a une différence hautement significative entre le pH du sol non traité et celui du sol traité sur le terrain et au laboratoire (Tableau 4).

Tableau 4 : résultats de l'analyse statistique du pH du sol traité au laboratoire et sur le terrain

Sol	t	df	p-value	Moyenne	
				Traité	Non traité
terrain	6.5775	8.1557	0.00276	7.13	7.82
laboratoire	8.1557	4	0.00123	7.353333	7.99667

I.1 La conductivité électrique (CE)

Les résultats de la mesure de la conductivité électrique du sol traité et non traité sont présentés dans la fig.10

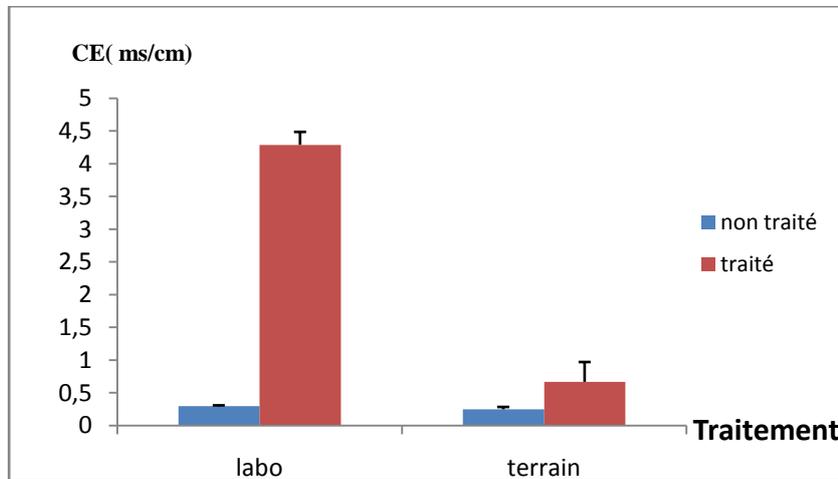


Fig. 10 : Conductivité électrique des différents sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain

La conductivité électrique du sol non traité sur le terrain est de 0.25 ms/cm. Elle augmente légèrement dans le sol traité et atteint 0.67 ms/cm, pour le sol non traité au laboratoire la valeur est de 0.30 ms/cm, cette dernière augmente dans le sol traité pour atteindre 4.29 ms/cm.

Les résultats du test de Student ont montré qu'il n'y avait pas de différences significatives entre la CE des sols non traités et celle des sols traités sur le terrain. Mais d'après le diagramme en barre on remarque une légère différence. Malgré que l'analyse statistique ne la montre pas. L'analyse statistique montre aussi il y'a une différence hautement significative entre le sol traité et non traité au laboratoire (tableau 5).

Tableau 5 : Résultat d'analyse statistique de la CE du sol traité et non traité au laboratoire et sur le terrain

sol	t	df	p-value	Moyenne	
				Traité	Non traité
Terrain	-1.8478	4	0.13	0.6766667	0.2533333
laboratoire	-9.0691	3	0.002832	0.3033	4.35

I.3 Résultats des Bio-essais :

I.3.1 Test de germination

Les résultats du test de germination des graines de blé dans les sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain sont représentés par la fig.12

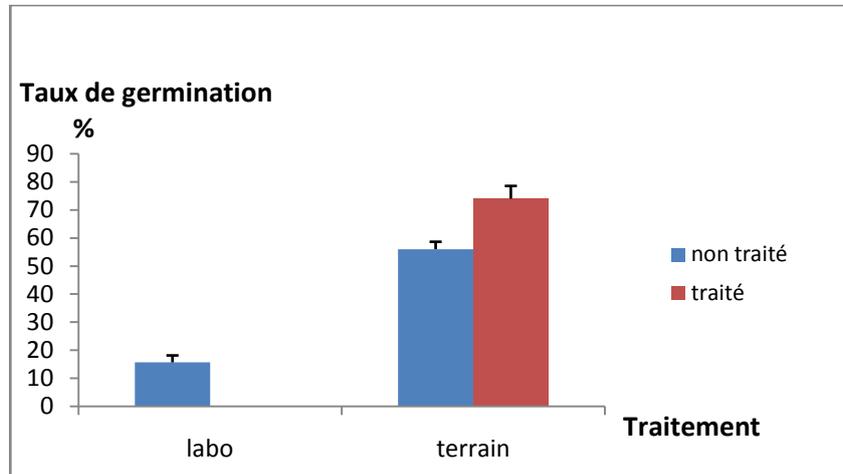


Fig.12 : taux de germination des graines de blé dans les différents sols traités et Non traités au laboratoire et sur le terrain

Le taux de germination dans le sol non traité sur le terrain est de 56% et elle est de 74% pour le sol traité. Dans le sol non traité au labotatoire est de 15% par contre dans le sol traité au laboratoire il ya une absence totale de germination.

Les résultats de test de Student ont montré qu'il y'avait une différence hautement significatives entre le taux de germination du blé de sol non traité et celui du sol traité sur le terrain (tableau 6).

Le taux de germination dans le sol traité au laboratoire est nul .A cette effet on ne peut pas faire une analyse statistique.

Tableau 6 : Résultats du l'analyse statistique du taux de germination du blé dans le sol traité et non traité sur le terrain

Sol	T	df	p-value	Moyenne	
				Traité	Non traité
Terrain	-5.0018	3.219	0.0129	56	74

I.3.2 La longueur racinaire

Les résultats de la mesure de la longueur racinaire des graines du blé dans le sol traité et non traité au laboratoire et sur le terrain sont représentés par la fig.14

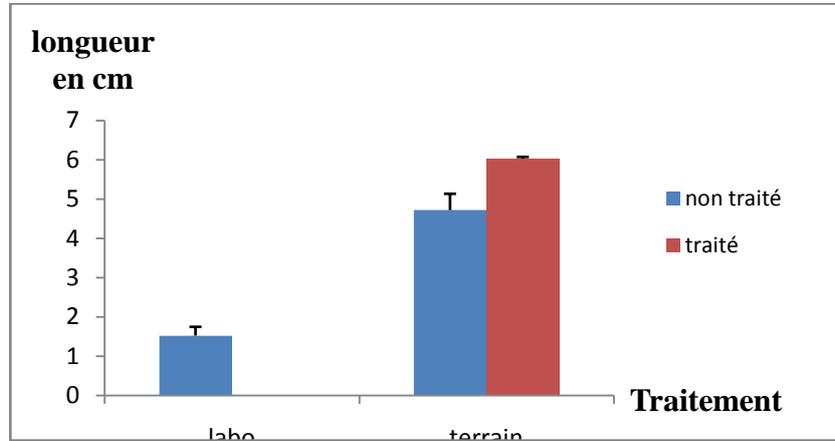


Fig.14 : la longueur des racines des graines du blé dans les sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain

Les valeurs de la mesure de la longueur des racines du blé dans le sol non traité sur le terrain est de 4.7cm et elle est de 6 cm pour le sol traité. Dans le sol non traité au laboratoire elle est de 1.52cm. Pour le sol traité la mesure de la longueur racinaire n'a pu être estimée puisque les graines n'ont pas germées. Nous remarquons que la longueur des racines dans le sol traité est plus élevée que le sol non traité sur le terrain.

Les résultats de l'analyse statistique pour la longueur racinaire des graines du blé dans les sols traités et non traités sur le terrain ont montré une différence significative (tableau 7).

Tableau 7 : Résultat de l'analyse statistique de la longueur racinaire de blé dans le sol traité et non traité sur le terrain

Sol	T	df	p-value	Moyenne	
				Traité	Non traité
Terrain	-3.7813	2.339	0.0493	1.523333	5.006667

I.2 Analyse par la spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR)

Les résultats de l'analyse par la spectroscopie Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) réalisé pour le sol traité et non traité sur le terrain sont représentés par la fig.15

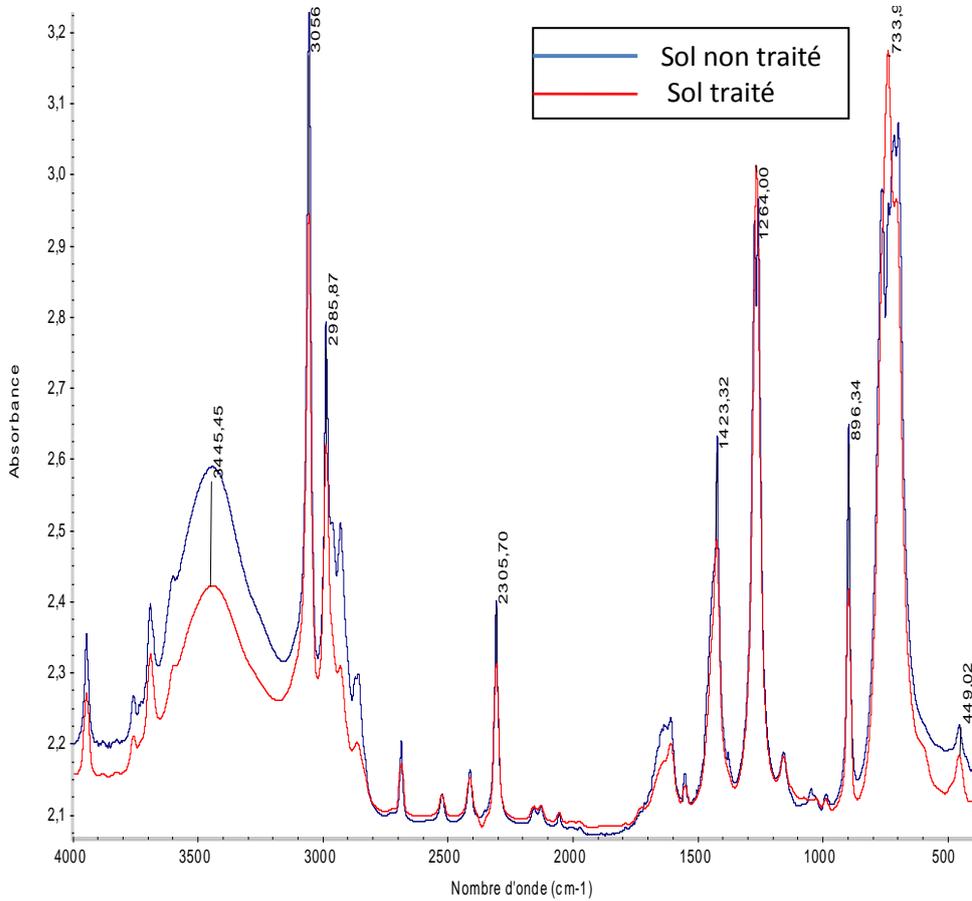


Fig.15 : Spectre FTIR du sol traité et non traité sur le terrain

L'analyse par spectroscopie à infrarouge des sols traité et non traité sur le terrain montre une modification des différentes bandes caractéristiques des groupements fonctionnels correspond à une diminution des alcanes, alcools et phénols (annexes 4)

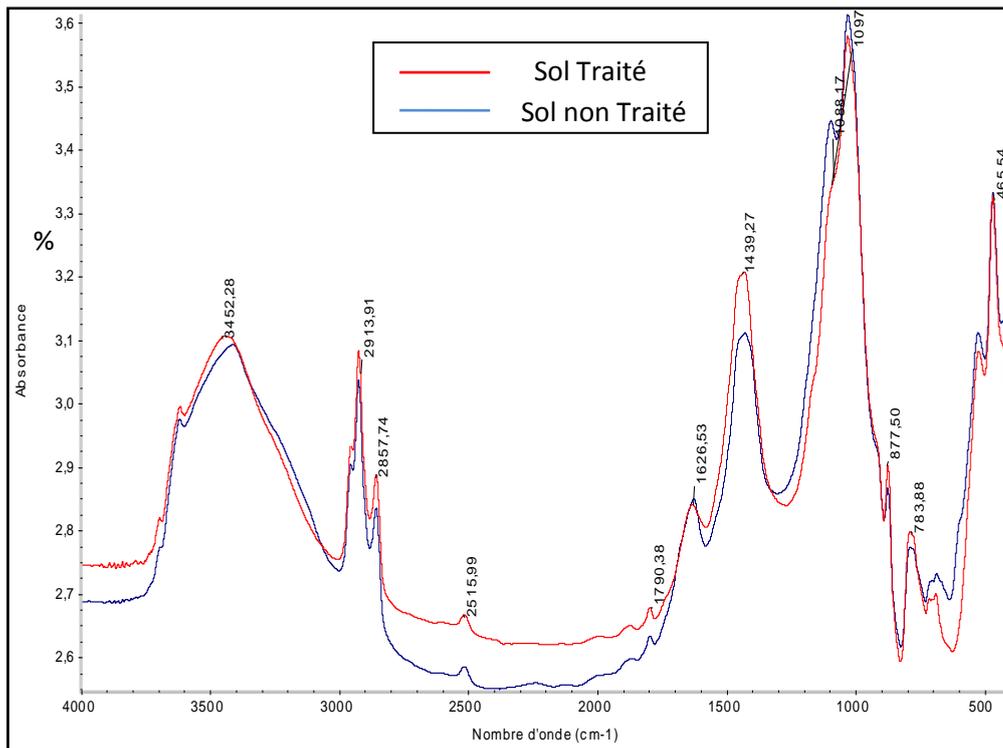


Fig. 16 : Spectre FTIR des sols traité et non traité au laboratoire

L'analyse par spectroscopie à infrarouge des sols traités et non traités au laboratoire montre un chevauchement du spectre entre le traité et non traité ce traduit par une diminution de la bande qui situe entre les ondes qui correspond 1700 et 3000 cm^{-1} .

II Discussion :

La différence significative du pH entre le sol traité et le sol non traité serait due à la diminution de la toxicité des sols traités par l'azote et le phosphore. D'après les résultats obtenus par Mercle et *al.*, 2005 in Njuko et *al.* (2009), la diminution du pH du sol pourrait être due à l'accumulation d'acides organiques produits lors de la biodégradation dans le sol ou bien à la production des radicaux acides par la nitrification.

Selon Belly-vizina (2014), le NH_4 est utilisé comme source d'azote, et une fois métabolisé par les microorganismes modifie le pH du milieu suite à la libération d'un ion de H^+ .

L'absence d'une différence significative de la CE entre les sols traités et non traités sur le terrain serait due à l'utilisation des sels apportés sur le terrain par les bactéries indigènes du sol traité ce qui confirme la biodégradation des hydrocarbures.

La différence significative de la CE entre les sols traités et non traités au laboratoire peut être due à l'effet de la biostimulation en effet les résultats obtenus témoignent d'une salinité assez élevée du sol ce qui empêché l'activité microbienne du sol. D'après ce que rapporte Mallohi (1989), la salinité diminue le nombre des microorganismes dans le sol, elle ralentit les processus de l'humification et de la minéralisation des matières organiques. Ainsi, Soltani (2004), la salinité constitue une barrière naturelle pour la biodégradation.

La capacité de la germination est élevée dans le sol traité sur le terrain est cela peut être dû à la biodégradation intense des hydrocarbures après leur stimulation par les fertilisants ce qui induit à l'amélioration de la qualité du sol. En effet, d'après les résultats de Kahil et Issad (2014) et Boukharchoufa et Bouzid (2014), l'apport de l'azote et du phosphore a accéléré la dégradation des hydrocarbures par les microorganismes.

L'absence de germination dans le sol traité au laboratoire est serai due à l'effet du stress salin qui à été indiqué par la mesure de la CE, ce qui induit à l'inhibition de la germination. D'après Hayward (1952), les sols salins peuvent agir de deux façons sur la germination du blé :

- il peut y avoir assez de sel dans le milieu où se trouve la graine, ce qui augmente la pression osmotique de la solution du sol au point de retarder et d'empêcher l'absorption de l'eau nécessaire.
- les ions de ce sol peuvent être toxiques pour l'embryon et la plantule.

Ces résultats concordent avec ceux de Mrani et *al.* (2013), qui ont montré que le sel avait un effet dépressif sur le taux de germination et la croissance biologique de la plantule.

Concernant la longueur des racines, la différence significative entre le sol traité et non traité sur le terrain est dû à la diminution de la toxicité du sol et à l'amélioration des propriétés biologique du sol traité par les fertilisants.

Le changement qui à été enregistré dans les bandes caractéristiques des groupements fonctionnelles relatifs aux hydrocarbures dans le sol traité par l'azote et le phosphore peut être dû à la dégradation des hydrocarbures par les microorganismes.

Les chevauchements qui apparaissent entre le spectre du sol traité et non traité au laboratoire correspondent à la dégradation naturelle des hydrocarbures.

Dans les sols non traités nous avons enregistré une légère amélioration de la qualité de sol qui a été indiqué par les bio-essai (taux de germination, élongation racinaire) qui du a la dégradation naturelle des hydrocarbures. Cette dégradation peut être effectuée par les bactéries indigènes présentes dans le sol ou bien par les processus abiotiques (Mazarine et Assouak, 2009).

Les résultats des analyses biologiques et chimiques et l'analyse par spectroscopie infrarouge montrent que la dégradation des hydrocarbures est efficace sur le terrain qu'au laboratoire où nous n'avons pas enregistré une amélioration de la qualité biologique du sol à cause de la salinité. Cette différence de décontamination est due à la différence des conditions de l'expérience (la température, le taux d'humidité, l'aération de sol).

Sur le terrain, nous avons un système ouvert ce qui permet d'avoir des conditions favorables à la dégradation des hydrocarbures et le traitement assimilé favorise la croissance des microorganismes.

conclusion générale

Nous avons réalisé une incubation au laboratoire et sur le terrain d'un sol pollué aux carburants traités ou non par l'ajout de nutriments.

D'après les résultats obtenus, nous concluons qu'il y a une diminution de la toxicité des sols traités sur le terrain qui se traduit par la diminution du pH qui tend à la neutralité. Nous avons également enregistré une élévation du taux de germination ainsi qu'une importante élongation racinaire, ce qui confirme l'amélioration de la qualité biologique de ce sol.

Au laboratoire, une forte salinité a été notée dans les sols traités. Celle-ci a compromis la germination des graines de blé. Le taux de germination était nul dans ces sols traités. Les nutriments ; N et P n'ont donc pas été utilisés pour la dégradation des carburants par les microorganismes de ce sol, eux-mêmes affectés par la salinité. Toutefois, la germination des graines de blé a été observée au laboratoire dans les sols non traités avec un taux de 15,66%. Ceci pouvant être attribué à l'atténuation naturelle.

L'analyse par spectroscopie infrarouge montre des changements des bandes caractéristiques des groupements fonctionnels des alcanes, ce qui confirme leur dégradation.

La biostimulation par l'ajout d'azote et de phosphore peut donc être utilisée comme moyen efficace pour la décontamination des sites pollués par les carburants notamment au niveau des stations-service puisque le traitement a donné de meilleurs résultats sur le terrain.

Enfin, et afin de comprendre les mécanismes de dégradation qui se déroulent dans le sol et d'optimiser cette dégradation, nous recommandons de :

- Faire une étude sur les micro-organismes du sol pour comprendre les processus de dégradation.
- Faire une étude sur différentes doses d'azote et de phosphore.

Références bibliographiques

ABDELLY CH., 2007. Bioremédiation /phytoremédiation. Série N°232. Université de Tunis. Institut Supérieur de l'éducation et de la formation continue. Département des sciences naturelles. p60

ADEME., 2006. Agence de l'environnement et de la Maitrise de l'Energie, France.
<http://www.ademe.fr>

ALILOUCHE M et TOUDOUFT L., 2014. L'effet des quelques carburants (l'essence normal, essence super) sur les nodosités des racines de la fève (*Vicia faba L.*) et sur quelques propriétés du sol. Mémoire de Master en Biologie. Spécialité : protection de l'environnement. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. p35

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

BELLEY-VEZINA V., 2014. Vers un traitement durable des sols au Québec : Possibilités et perspectives des traitements in situ des sols contaminés aux hydrocarbures. Essai présenté au centre Universitaire de formation en environnement et développement durable en vue d'obtention du grade de maitre en environnement. 140p

BATTAZ S., 2009. Etude comparative de la dégradation d'une terre polluée par des hydrocarbures lourds. Thèse de Magister. Université 20 Août 1955.Skikda. 91P

BOUDERHEM A., 2011. Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodétection et la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Thèse de Magister. Université Kasdi Merbah. Ouargla .91P

BIRECHEY et BERUI F., 2014. Effet de la salinité sur l'activité des bactéries hydrocarbonoplaste. Master Académique. Spécialiste microbiologie appliquée. Filière : Biologie. Université Kasdi Merbah-Ouargla. 64p

BERGUE J.M, DANILLE M., 1986. Pollution des sols par les hydrocarbures. Bull, Liaison P. et CH 146.p125

BOUKHERCHOFA L et BOUZID L., 2014. Etude de l'effet de l'apport d'azote et de phosphore sur l'efficacité de biodégradation des hydrocarbures. Mémoire de Master en science. Biologique. Option protection de l'environnement. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. P28

BLANDIN D, AMMICK P., 2005. Analyse et protection des méthodes d'évaluation de la relation dose-réponse des effets cancérigènes induit par un mélange d'hydrocarbures aromatique polycyclique. Environnement risqué santé. Vol : 3.pp 350-488

CHANEAU C.H, MOREL J.L. et OUDOT J., 1996. Land Treatment of oil-based drill cutting in an agricultural soil. Journal of Environment Quality. Vol: 25.pp:858-867

CHANEAU C.H, MOREL J.L. et OUDOT J., 1997. Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. Journal of Environnement Quality. Vol : 26.pp:1478-1483

COLIIN F., 2000. Pollution localisée des sols et sous-sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés. Edition TEC ET DOC. 417P

CLEMENT M ET PIELTAIN F., 2003. Analyse chimique des sols. Edition Tec et Doc.382p

DUCHAUFFOUR P., 2001. Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6eme Edition Masson. Paris. Milan Barcelone.498p

FATTAL P., 2008. Pollution des côtes par les hydrocarbures. Presse Universitaire de Rennes.395 p487

FEZANI S. et KHIDER F., 2007. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes, leur caractérisation et leurs effets sur la microflore du sol. Mémoire d'ingénieur d'état en Biologie. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou.73p

FERHATI S et BOUZIANEM., 2012.Lavage des différents sols contaminés par les hydrocarbures en utilisant un rhamnolipide produit par pseudomonas aeruginosa. Mémoire d'ingénieur d'état en écologie végétale et environnement. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. P40

GAUDU F., 2014. Bioremédiation des sols pollués Aux hydrocarbures. Master2 Université de Rennes 1, UFRSVE. 56p

GIRARD M.C., WALTER C., REMY J. C., BERTHLIN J. ET MOREL.J.I., 2005. Sol et environnement. Edition DUNOD. Paris.529p

GOUTHIER V., 2014. Résilience des écosystèmes après un déversement d'hydrocarbures. Programme de maîtrise professionnelle en biogéosciences de l'environnement. Centre d'expertise en analyse environnementale. Québec. 107p

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.117p

HAYWARD H., 1952. Croissance des plantes en milieu salin. Rapport examinant les problèmes biologique relatifs aux plantes qui peuvent supporter l'eau pour l'irrigation. Organisation des nations unies pour l'éducation de la science et la culture .pp40-60

JEMAL F., 2002. La bioremédiation. Revue H.T.E N° 122.1060.Tunis-Tunisie.p20-30

KOLLER E., 2004. Traitement des pollutions Industrielles (eau, air, déchet, sol, boues) Edition DUNOD. Paris.424

KAHIL L et ISSAD K., 2014.Essai de réhabilitation d'un sol pollué aux hydrocarbures par biostimulation. Mémoire d'ingénieur d'état en biologie. Spécialité. Ecologie végétale et environnement. Option : Pathologie des écosystèmes. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. p27

- LECOMTE P., 1998.** Les sites pollués : traitements des sols et des eaux souterraines 2^{ème} Edition.127p
- MOREL J.L., 2014.**Stratégies de remédiation in situ des sols pollués- la phytoremédiation. Laboratoire sols et environnement UMR 1120 INPL-INRA.50P
- MANSOURI O., 2013.**Etude physico-chimique et floristique de deux sols pollué et non pollué par les hydrocarbures. Mémoire d'Ingénieur. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. 70p
- MOUZARINE S et ASSOUAK D., 2009.** Mise en évidence d'une décontamination naturelle d'un sol contaminé par les hydrocarbures. Mémoire d'ingénieur d'état en Biologie. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou. P32
- MRANI ALAOUI M, EL JOURMI L, OURZANE A, LAZAR S, EL ANTRI, ZAHOUILY M, HMYENE A., 2013.** Laboratoire de biochimie, environnement Agroalimentaire, URAC36, FST. Université Hassani Mohammedia-Casablanca, BP146, 20650 Mohammedia. Maroc, pp 904-1004
- NEGGAH K., 2013.** Investigation de l'efficacité de certaines techniques de bioremédiation de pollution par HAP. Mémoire de Magister. Université Abou BEKR Belkaid. Tlemcen. 91p
- NJOKU K., AKINOLA O. et OBOH B.O., 2009.**Phytoremédiation of crude oil contaminated soil. Edition marslandpress. pp80-85.
- OULD RABAH NASSERA., 2012.** Thèse de magister. Spécialité chimie. Option chimie de l'environnement, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. P132
- RAFIK M.HESNAWI A et MOHAMED D, ADBEIB B., 2013.**effet of nutrient source on indigenous biodegradation of diesel fuel contaminated soil. APCCBEE PROCEDIA. DUBAI. PP 557-561
- RIVIER J.L., 1998.** Evaluation du risqué écologique des sols pollués. Lavoisier Tec et Doc. P193
- 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.156p.
- SAADA A., NOWAK C., et COQUEREAU N., 2005.** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. ROPPORT intermédiaire : résultats de la phase 1. Rapport BRGM/RP-53739-FR.107 P
- SARI K, AKI S, MARTIN R., 2011.**Enchancing bioremediation of diesel-fuel-contaminated soil in a boreal climate comparison of biostimulation and bioaugmentation. Article history N°65.PP 359-368

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'université Paris. 284p.

ZAWIERUCH I et CRYGOZ M., 2014. Bioremédiation of contaminated soils: effects of Bioaugmentation and Biostimulation on enhancing biodegradation of oil hydrocarbon. 187p

Annexes

Annexes

Annexe 1 : Propriétés physico-chimique des 16 HAP prioritaires listés par l'USEPA tiré et adopté (ATSDR, 1995).

HAP	Formule brute	Nombre de cycle	Poids moléculaire g/mol	Solubilité à 20 ° C Mg/l	Pression de vapeur Saturante à 20 ° C (pa)	Log(K _{oc} ^{ik}) à 20°C
<i>Naphtalène</i>	C10H8	2	128.2	31	36.8	3.37
<i>Acénaphène</i>	C12H10	3	154.2	3.8	1.52	3.92
<i>Acénaphthylène</i>	C12H8	3	152.2	16.1	4.14	4
<i>Anthracène</i>	C14H10	3	178.2	0.045	0.0778	4.54
<i>Fluorène</i>	C13H10	3	166.2	1.9	0.715	4.18
<i>phrénanthréne</i>	C14H10	3	178.2	1.1	0.113	4.57
<i>Benzo(a)anthracène</i>	C18H12	4	228.3	0.011	6.06.10 ⁻⁴	5.91
<i>Chrysène</i>	C18H12	4	228.3	0.002	8.4.10 ⁻⁷	5.6
<i>Fluoranthène</i>	C16H10	4	202.3	0.26	8.72.10 ⁻³	5.22
<i>pyréne</i>	C16H10	4	202.3	0.132	0.0119	5.18
<i>Benzo(a)pyréne</i>	C20H12	5	252.3	0.0038	2.13.10 ⁻⁵	6.04
<i>Benzo(b)pyréne</i>	C20H12	5	252.3	0.0015	6.7.10 ⁻⁵	5.8
<i>Benzo(k)fluranthène</i>	C20H12	5	252.3	0.0008	4.12.10 ⁻⁶	6
<i>Dibenzo(h)anthracène</i>	C22H14	5	278.3	0.0006	9.16.10 ⁻⁴	6.75
<i>Benzo(gh,i)pérylène</i>	C21H12	6	264.3	0.062	1.3.10 ⁻⁸	6.6
<i>Indeno(1,2,3-cd)pyréne</i>	C22H11 2	6	276.3	0.062	1.3.10 ⁻⁸	6.6

Annexes 2 : données climatiques de la station

Tableau 1 : Températures moyennes et précipitations moyennes pour la station (station météorologique de TIZI-OUZOU).

mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
T° moy	10,31	10,48	13,33	16,16	19,3	23,99	27,84	27,71	23,72	20,92	14,57	12,18
Pluv	112,16	103,99	103,4	95,29	81,96	10,9	2,79	6,75	43,61	71,22	128,45	115,18

Tableau 2 : Q₂ d'Emberger calculé pour la station d'étude (station météorologique de TIZI-OUZOU).

Région	P (mm)	M(C°)	m(C°)	Q ₂
Boukhalfa	875,7088889	24,7568519	13,4114815	75,32589822

Annexes

Tableau 3 : des T° Max et T° min de la région d'étude (station météorologique De TIZI-OUZOU).

T°Max	15,56	15,83	19,22	21,84	25,8	31,38	35,71	35,86	31,094	27,9	20,166	16,72
T°min	6,4	6,38	8,78	11,23	14,05	17,77	21,33	21,91	18,4	16,03	10,83	7,82

Annexe 3 : Résultat brute des traitements effectués

Tableau 1 : pH des différents sols (traité et non traité)

témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3	TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3
7,95	7,93	8.11	7,28	7,32	7,46	7,94	7,9	7.63	7,13	7,06	7.20

Tableau 2: Conductivité électrique

témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3	TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3
0.22	0.35	0.34	3.76	4.95	4.16	0,23	0.26	0.27	1,09	0,64	0.3

Tableau 3 : Taux de germination des différents sols traités et non traités

témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3	TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3
18%	19%	10%	0	0	0	58%	60%	50 %	93%	70%	90%

Tableau 4: Elongation racinaire

témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3	TM1	TM2	TM3	TR1	TR2	TR3
1.83	1.01	1.73	0	0	0	3.8	4.42	4.96	5.64	6.26	6.12

Annexes

Annexes 4 : Normes d'interprétation

Mémento de l'agronome (1993) :

Norme d'interprétation du pH du sol.

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

Norme pour la matière organique.

Taux en argile en %	Taux souhaitable de matière organique en %
< 10	3-3.5
10 à 15	2.53
15 à 20	2-2.5
20 à 25	2 .5
25 à 30	2.5-3
>30	3-3 .5

Norme pour l'azote totale du sol(%) :(Norme de Kjeldhal).

Taux d'azote	Quantification
<0.05	Très faible
0.05-0.09	Faible
0.1-0.15	Moyenne
>0.15	Elevé

Norme d'interprétation pour le phosphore assimilable (ppm) :(Olsen).

Valeur de phosphore	Quantification
0-5	Très basse
5-10	Basse
10-22	Moyenne
>22	Elevé

Annexes

Norme de la C.E en (ms /cm).

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

Tableau de vibration d'élongations

Intervalle d'ondes	Groupement fonctionnelle
2850-2970	Alcanes (C-H)
1610-1680	Alcènes (C=C)
1750 - 1820	Acides carboxyliques et dérivés (C=O)
1340-1470	Alcanes (C-H)
675-995	Alcènes(C=C)
3580-3650	Alcools et Phénols (O-H)
2500-3300	Acides carboxyliques et dérivés (O-H)
3200-3550	Alcools et Phénols (O-H)

Annexes

Résumé :

L'objectif de notre travail est décontaminer un sol polluée, par les carburants (cas des stations de service) par la méthode de biostimulation par l'apport d'azote et de phosphore afin de stimuler l'activité des micro-organismes. Cette technique est appliquée au laboratoire et sur le terrain.

Sur la base des résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'effet de l'amélioration du taux de germination et de la longueur racinaire du blé, ainsi que la diminution de pH peuvent être associées à la dégradation de certaines fractions d'hydrocarbures par biostimulation, confirmée par l'analyse par spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier. Enfin, nous concluons que le traitement par biostimulation a donné de meilleurs résultats sur le terrain.

Mots-clés : sol, biostimulation, carburants.

Abstract :

The objective of our work is to decontaminate a soil polluted by refined hydrocarbons (case of the stations of service) by biostimulation consisting in the fertilization of the soil with nitrogen and phosphorus in order to stimulate the activity of the micro-organisms. This treatment was applied in a laboratory and a field study.

On the basis of the obtained results, we can conclude that the effect of the improvement of the rate of wheat germination and root's length, also the reduction in pH values may be associated to the degradation of some fractions of hydrocarbons as shown by the Infrared spectroscopy. Finally, we conclude that the effectiveness of the biological treatment was better in the field study.

Key-words : soil, biostimulation, refined hydrocarbons.