

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

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

Mémoire



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

Spécialité : Protection de l'Environnement

Thème

Essai de remédiation d'un sol pollué aux hydrocarbures par la technique de bioaugmentation

Présenté par : M^{elle} Alik Smina
M^{elle} Belkacem Lynda

Devant le jury :

Présidente : M^{me} SADOUDI D.

Professeur à l'UMMTO

Promotrice : M^{elle} ALI AHMED S.

M A A à l'UMMTO

Examineurs: Mr OUDJIANE A.

M A A à l'UMMTO

M^{me} LAMRI T.

M A A à l'UMMTO

Soutenu le :14/06/2015

Remerciements

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

Nos vifs remerciements accompagnés de tout notre profond respect s'adressent à notre promotrice M^{elle} ALI AHMED S., Maitre assistante à l'U.M.M.T.O. pour son suivi et son engagement lors de l'élaboration de ce travail, nous la remercions pour les orientations et les conseils qui nous ont été bénéfiques;

Nous remercions vivement la présidente du jury M^{me} SADOUDI D., Professeur à L'U.M.M.T.O et les membres du jury, Mr OUDJIANE A. et M^{me} LAMRI T., Maîtres assistants à l'U.M.M.T.O. qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail ;

Nous remercions toutes les personnes qui travaillent au laboratoire de microbiologie, laboratoire commun et laboratoire de pédologie qui nous ont aidées dans notre travail. Nous remercions aussi l'ingénieur du laboratoire de pétrochimie de l'université M'Hamed Bougara de Boumerdes pour avoir accepté de nous faire l'analyse par spectroscopie infrarouge ;

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui travaillent à la station-service de Boukhalfa pour avoir accepté de réaliser notre essai dans leur station ;

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



Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents ;

A mon cher fiancé et à sa famille ;

A mon cher et unique frère Ahmed ;

A mes chères sœurs : Nassima, Dyhia, Sara et Amira ;

A mes oncles et mes cousines ;

A mes chers amis ;

A toute la promotion protection de l'environnement ;

Et à tous ceux qui m'aiment.

Smina



Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents ;

A ma chère grand-mère

A mes chers frères ;

A mes chères sœurs ;

A ma chère nièce Liza ;

A toute ma famille ;

A mes chers amis ;

A toute la promotion protection de l'environnement ;

Et à tous ceux qui m'aiment.

Lynda

Liste des figures

Figure 1 : Devenir des polluants dans le sol.....	4
Figure 2 : Image satellite de la station-service de Boukhalfa.....	12
Figure 3 : Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausсен pour la station de Boukhal.....	13
Figure 4 : Position de la station d'étude sur le climmagramme d'Emberger.....	14
Figure 5 : Dispositif expérimental de l'essai au laboratoire.....	16
Figure 6 : Dispositif expérimental sur le terrain.....	17
Figure 7 : Conductivité électrique des sols traités et non traités par bioaugmentation.....	19
Figure 8 : Résultats d'analyse statistique de la CE du sol de laboratoire et du terrain.....	19
Figure 9 : Valeurs du pH des sols traité et non traité.....	20
Figure 10 : Résultats de l'analyse statistique du pH du sol de laboratoire et du terrain.....	20
Figure 11 : Taux de germination du blé dans les différents sols traité et non traité.....	21
Figure 12 : Résultats de l'analyse statistique du taux de germination du blé dans le sol de laboratoire et du terrain.....	21
Figure 13 : Elongation des racines du blé dans les différents sols traité et non traité.....	22
Figure 14 : résultats de l'analyse statistique de l'élongation racinaire du blé dans le sol de laboratoire et du terrain.....	22
Figure 15 : Spectre FTIR de sol traité et non traité au laboratoire.....	23
Figure16 : Spectre FTIR de sol traité et non traité du terrain.....	23

Liste des tableaux

Tableau 1 : Biodégradation des produits pétroliers.....	5
Tableau 2 : Mécanismes de la phytoremédiation.....	8
Tableau 3 : Facteurs affectant les processus de la biodégradation.....	10
Tableau 4 : Quelques travaux réalisés sur la bioremédiation à l'UMMTO.....	10
Tableau 5 : Caractéristiques du sol de la station service de Boukhalfa.....	15

Sommaire :

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

Aperçu bibliographique

I- Pollution du sol par les hydrocarbures	2
I-1-Généralités sur les hydrocarbures	2
I-2-Sources de contamination du sol par les hydrocarbures.....	3
I-3-Quelques propriétés physiques des hydrocarbures.....	3
I-3-1-Densité.....	3
I-3-2- Pression de vapeur.....	3
I-3-3-Viscosité.....	3
I-3-4-Point d'éclair.....	3
I-4-Devenir des hydrocarbures.....	4
I-4-1-Volatilisation.....	4
I-4-2-Dissolution.....	4
I-4-3-Sorption.....	5
I-4-4-Dégradation.....	5
I-5-Effets des hydrocarbures.....	5
I-5-1-Effets des hydrocarbures sur le sol.....	5
I-5-2-Effets sur la santé.....	6
I-5-3--Effets sur la végétation.....	7
II-Décontamination des sols pollués.....	7
II-1-Procédés physiques.....	7
II-1-1-Méthode physique par évacuation.....	7
II-1-2-Méthode physique par piégeage.....	7

II-2-Procédés chimiques.....	7
II-3-Procédés thermiques.....	7
II-4-Procédés biologiques.....	8
II-4-1-Phytoremédiation.....	8
II-4-2-Bioremédiation.....	8
II-4-3-Types de biodégradation des hydrocarbures.....	9
II-4-4-Facteurs affectant la biodégradation des hydrocarbures.....	10
II-4-5-Travaux réalisés sur la bioremédiation.....	10

Matériels et méthodes

I .Présentation de la station d'étude.....	12
I.1. Localisation et description.....	12
I.2. Caractéristiques climatiques.....	12
I .2.1. Diagramme Ombrothermique de Bagnoul et Gaussen.....	12
I.2.2. Détermination du bioclimat de la station d'étude.....	13
I.3.Conditions climatiques pendant la période d'essai.....	14
I.3.1. Températures.....	14
I.3.2. Précipitations.....	14
II. Matériels utilisés.....	15
II.1.Le sol.....	15
II.2.La souche bactérienne.....	15
I.3. Le blé.....	15
III. Méthode.....	16
III.1.Préparation de la suspension bactérienne.....	16
III.2.Préparation du sol.....	16
III.3.Méthodes d'application du traitement de bioaugmentation.....	16
III.3.1.Application au laboratoire.....	16

III.3.2.Application sur le terrain.....	17
III.4.Evaluation de la qualité du sol	17
III.4.1.La conductivité électrique (CE).....	17
III.4.2.Le pH.....	17
III.4.3.Test de germination.....	18
III.4.4.Elongation racinaires.....	18
III.5.L'analyse par spectroscopie IR à transformé de Fourier (FTIR).....	18
II.6. Méthodes d'analyses statistiques.....	18

Résultats et discussion

I-Résultats des analyses chimiques	19
I-1-Conductivité électrique (CE).....	19
I-2-Le pH.....	19
I-3-Résultats des bio- essai.....	20
I-3-1-Test de germination.....	20
I-2-2-Elongation racinaire.....	21
I-4-Analyse par spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR).....	22
II-Discussion.....	24
Conclusion.....	25

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

Introduction générale

La pollution du sol est un problème majeur de par sa nature et l'étendue de son impact. C'est un phénomène caractéristique du monde moderne. L'extension de l'urbanisation et le développement des activités industrielles ont pour effets d'accentuer et de diversifier ce phénomène et par là de compromettre l'équilibre de l'environnement.

Les polluants ou facteurs de pollution du sol sont très nombreux, leur intensité et leurs effets sont changeants, dans le temps comme dans l'espace, parmi les plus répandus se trouvent les hydrocarbures (Koller, 2009).

La pollution du sol par les hydrocarbures est due principalement aux stations-services (fuites des cuves de stockages, points de remplissages, les ilots de pompes,...) qui sont une source importante et répandue dans l'espace (Colin, 2000). D'après la direction de l'environnement de la wilaya de Tizi-Ouzou (2014), quatre-vingt trois stations services fonctionnelles sont implantées dans la wilaya, sept sont en cours de réalisation et quatorze sont en projet. Malheureusement, la majorité de ces stations sont implantées sur des terres agricoles.

Il est temps de se pencher sérieusement sur ce problème de pollution pour diminuer et/ou éliminer ses effets sur l'environnement et sur les êtres vivants. Il existe plusieurs méthodes physiques, chimiques et thermiques pour la décontamination d'un sol pollué aux hydrocarbures, mais ces méthodes sont très coûteuses et détériorent le sol contrairement aux méthodes biologiques qui sont moins chères et plus respectueuses de l'environnement (Girard *et al*, 2005; Koller, 2009).

La biodégradation est une réalité qui prend de plus en plus d'importance dans le domaine de l'élimination des pollutions organiques (Koller, 2009). Plusieurs auteurs dont Chergui et Dahmani(2009), Amiri (2013), Boukherchoufa et Bouzid (2014) ont déjà réalisé des travaux au laboratoire sur la biodégradation des hydrocarbures. Leurs résultats ont été assez satisfaisants mais il reste à tester l'efficacité de ces méthodes dans les conditions de terrain (*in situ*). C'est dans cette optique que s'inscrit notre étude.

L'objectif de notre travail est d'essayer de décontaminer un sol pollué par des carburants (essence et gasoil) en utilisant la technique de bioaugmentation par l'ajout d'une souche bactérienne (*Pseudomonas aeruginosa*). L'analyse consistera à évaluer l'efficacité de cette technique en examinant l'évolution de la qualité du sol. Une comparaison est également envisagée entre le traitement réalisé au laboratoire et sur le terrain.

Ce travail est subdivisé en trois chapitres, le premier consiste en un rappel bibliographique rapportant des généralités sur les hydrocarbures ainsi que la pollution du sol par ces derniers et les procédés de décontamination.

Dans le deuxième chapitre sont présentés la situation géographique de la station d'études, les matériels et les méthodes utilisées. Le troisième chapitre consiste en la présentation des résultats obtenus concernant les paramètres biologiques et chimiques étudiés, ainsi que leur discussion. Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

Aperçu bibliographique

I- Pollution du sol par les hydrocarbures :

Le sol est la couche de quelques centimètres à plusieurs mètres de matières organique et inorganique (minérale) où vit toute une série d'êtres vivants, il comporte aussi une phase liquide (solution du sol) et une phase gazeuse (air, CO₂, CH₄) (Koller, 2009). Il se divise en couches horizontales successives aux caractéristiques physicochimiques et biologiques spécifiques (Anonyme, 2012)

La pollution du sol résulte de l'apport de polluants, sur ou dans le sol, à partir d'une source identifiable, et ayant pour conséquence l'augmentation de leurs concentrations originelles (Maes *et al.*, 2008).

Le sol est dit contaminé lorsqu'une substance potentiellement dangereuse est introduite dans le milieu naturel, quelque soit sa teneur (Jeannot *et al.*, 2000)

I-1-Généralités sur les hydrocarbures :

Les hydrocarbures sont des composés organiques de chaînes moléculaires contenant principalement du carbone, et de l'hydrogène et de formule générale C_xH_y avec x et y représentant les nombres respectifs d'atomes de carbone et d'hydrogène, principaux constituants du pétrole. Il existe d'autres éléments minoritaires qui sont des composés contenant des atomes de soufre, d'azote et d'oxygène (résines et asphaltènes) (Fattal, 2008 ; Amiard, 2011 ; Le corfec, 2011).

I-1-1-Classification des hydrocarbures:

Les hydrocarbures peuvent être classés en deux groupes.

I-1-1-1-Hydrocarbures acycliques (aliphatiques):

Ce sont des hydrocarbures à chaîne carbonée ouverte, linéaires ou ramifiées et qui contiennent des hydrocarbures acycliques saturés qui n'ont pas une liaison multiple appelés également alcanes et des hydrocarbures acycliques non saturés avec double liaison qu'on appelle alcènes ou alcynes s'ils comportent une triple liaison. Les hydrocarbures acycliques insaturés sont appelés également des hydrocarbures éthyléniques (Arnaud *et al.*, 2004).

I-1-1-2-Hydrocarbures cycliques :

Les hydrocarbures cycliques peuvent être benzéniques ou non, mono ou polycyclique, saturés ou non (Picot et Montandon, 2013).

a-Hydrocarbures cycliques non benzéniques :

Ce sont des hydrocarbures dont la chaîne carbonée est cyclique. Le nombre d'atome de carbone constituant un cycle est très variable (de 3 à plusieurs dizaines). Une molécule peut comporter deux ou plusieurs cycles de tailles différentes, les chaînes cycliques peuvent alors être monocycliques, bicycliques ou polycycliques (Arnaud, 2004).

b-Hydrocarbures cycliques benzéniques (aromatiques) :

Un hydrocarbure cyclique benzénique est une substance dont les molécules possèdent un cycle insaturé à six atomes de carbone (Fattal, 2008).

Leurs molécules contiennent un ou plusieurs cycles benzéniques (mono ou polycycliques). Ils sont appelés parfois des hydrocarbures aromatiques (Arnaud, 2004).

I-2-Sources de contamination du sol par les hydrocarbures :

La majorité des sources de pollution des sols par les hydrocarbures sont d'origine anthropique.

La principale source anthropique est la production d'énergie et les activités de l'industrie chimique (Ramade, 1992)

Les hydrocarbures s'accumulent dans l'environnement lors de l'utilisation du pétrole et de ses dérivés (gasoil, kérosène...), de la combustion incomplète où la pyrolyse de matières organiques (combustible fossiles) (Bertrand *et al.*, 2011).

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 ilots de pompages c'est une pollution ponctuelle (Colin, 2000 ; ADEME, 2006).

I-3-Quelques propriétés physiques des hydrocarbures :

Les hydrocarbures ont plusieurs propriétés physiques qui régissent leur comportement dans l'environnement.

I-3-1-Densité :

La densité des hydrocarbures varie avec la longueur des chaînes carbonées (Lumière *et al.*, 2008). Presque tous les hydrocarbures sont plus légers que l'eau, pour les produits les plus courants la densité varie de 0.7 à 0.9 (Fattal, 2008).

I-3-2- Pression de vapeur :

Ce paramètre sert à estimer la tendance d'un produit à se volatiliser et donc à passer en phase gazeuse à partir d'une phase aqueuse, du sol ou de la phase organique. Les tensions de vapeur sont modérément élevées à faibles. A partir de 10⁵kPa, les composés organiques sont considérés comme volatils (Gabet, 2004).

La plupart des hydrocarbures légers (C₅ à C₁₂) sont volatils, leur point d'ébullition est de 40 à 200°C, les plus lourds (C₁₂àC₂₆) sont volatils ou semi-volatils, leur point d'ébullition de 200°C à 300°C (Lumière *et al.*, 2008).

I-3-3-Viscosité :

Elle définit la résistance à l'écoulement. Elle est déterminée par la quantité de fractions légères et lourdes qui se trouvent dans les hydrocarbures, ainsi que la température. En effet, un hydrocarbure qui a une viscosité inférieure à 200cP se disperse facilement (Gouhier, 2014).

I-3-4-Point d'éclair :

C'est la température à laquelle un hydrocarbure émet assez de vapeur pour que celle-ci s'allume quand elle est exposée à une flamme. La plupart des hydrocarbures sont considérés comme inflammables, car leur point d'éclair est en dessous de 60°C (Gouhier, 2014).

I-4-Devenir des hydrocarbures dans le sol :

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

La figure1 résume le devenir des polluants dans le sol.

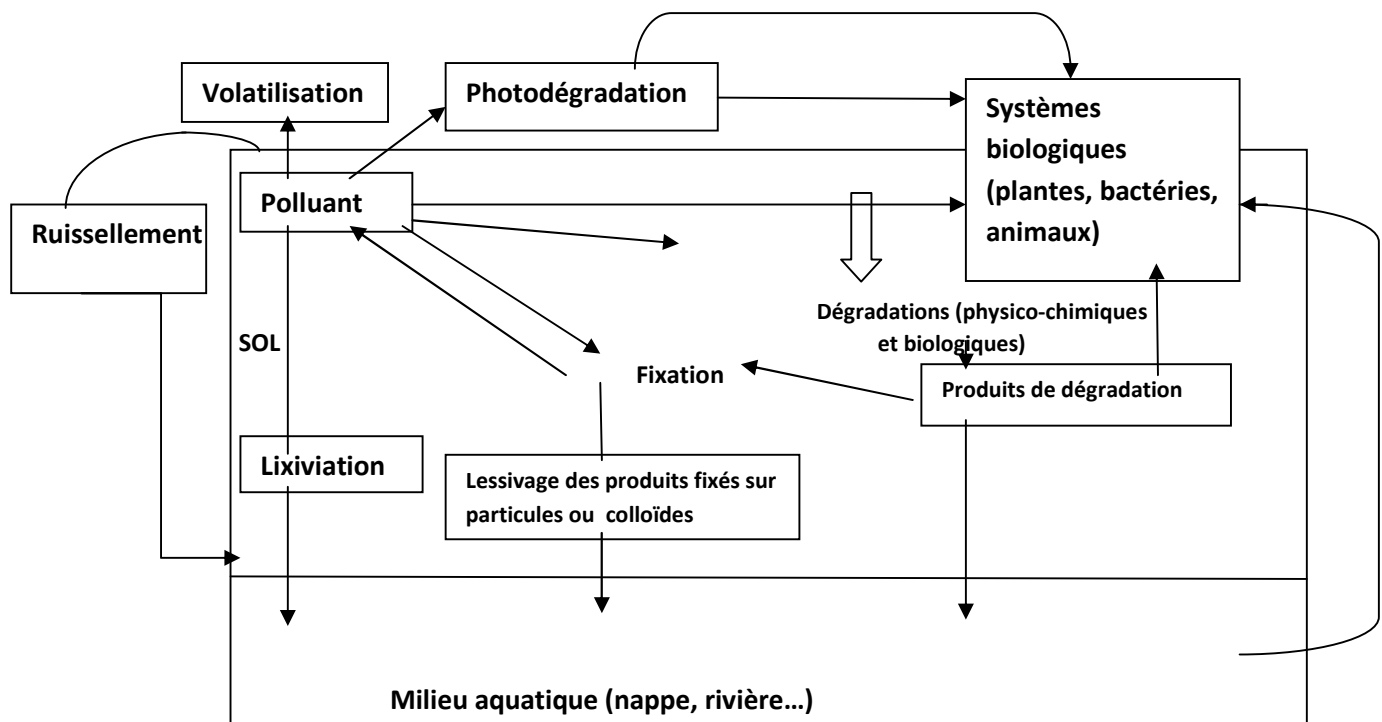


Figure 1: Devenir des polluants dans le sol (Savanne, 1999)

I-4-1-Volatilisation :

La transformation d'un hydrocarbure fluide à sa forme gazeuse est plus ou moins longue. Elle dépend des conditions climatiques et du type d'hydrocarbure. Ainsi l'essence et le gasoil se volatilisent totalement et plus rapidement dans des températures ambiantes chaudes (Fattal, 2008).

I-4-2-Dissolution :

Elle détermine la tendance d'une substance à se dissoudre dans l'eau. Plus la solubilité est grande, plus la substance sera susceptible de se dissoudre dans les eaux souterraines et à migrer loin de la zone source. Les polluants les plus solubles sont en général plus facilement biodégradables (Gomez, 2010)

Selon la directive 67/548/CEE, une substance est supposée comme insoluble si sa solubilité est inférieure à 1mg/l.

I-4-3-Sorption :

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

Les substances les plus lourdes (densité >à celle de l'air) se déplacent de haut en bas, tandis que les plus légères sont transportées vers le haut (Koller, 2009).

I-4-4-Dégradation :

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

I-4-4-1-Dégradation abiotique :

Les pertes abiotiques des hydrocarbures sont dues à des phénomènes physiques et chimiques comme la photolyse qui se fait sous l'action de la lumière, l'hydrolyse sous l'action de l'eau et les réactions d'oxydoréductions abiotiques (sans l'intervention d'organismes vivants). Elles seraient responsables de la perte de 20% d'hydrocarbures aromatiques dans le sol (Park *et al.*, 2001 *in* Germouche, 2014).

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

La biodégradation est l'un des premiers mécanismes conduisant à l'élimination des hydrocarbures (Soltani, 2004).

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

Le taux de biodégradabilité de quelques hydrocarbures est donné dans le tableau 1.

Tableau 1: biodégradabilité des produits pétroliers (Oudot, 1996 *in* Fattal, 2008)

Produits pétroliers	biodégradabilité
Essence	90-100%
Kérosène	80-100%
Gasols	60-85%
Fiouls lourds	10-20%
Lubrifiants	<50%
Asphaltes et bitumes	Négligeable
Pétrole brut	30-70%

1-5-Impacts des hydrocarbures :

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

I-5-1-Effets des hydrocarbures sur le sol :

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

I-5-1-1-Effets sur les propriétés physiques :

Il ya peu d'études qui ont été réalisées dans le but de déterminer l'effet des hydrocarbures sur les propriétés physiques du sol, malgré ça, des observations intéressantes ont été réalisé par certains auteurs.

Les hydrocarbures enrobent les particules minérales, et assurent leur dispersion (Rouquerol *et al.*, 1987)

Selon Mettaur *et al.* (1987) cités par Fezani et Khider (2007), la présence des hydrocarbures améliore la stabilité structurale du sol, accroît sa rétention en eau et réduit sa mouillabilité.

I-5-1-2-Effets sur les propriétés chimiques :

La contamination du sol par les hydrocarbures a comme effets :

-L'augmentation de la concentration du sol en éléments à l'état de traces tels que le manganèse (Mn), le zinc (Zn) et le fer (Fe) (Sauchelli, 1969 *in* Fezani et khider, 2007).

-L'augmentation de la conductivité électrique (CE) entraînant l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence des sels (Karaginnidis, 1999 *in* Fezani et khider, 2007).

-La diminution du pH du sol et de la teneur du sol en phosphore (P) et une augmentation en carbone organique total (Chainau *et al.*, 1997)

I-5-1-3-Effets sur les 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 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, ainsi enrichis en lipides, deviennent à leur tour hydrophobes et difficilement biodégradables, la perméabilité excessive du sol ne permet pas la constitution des réserves hydriques suffisantes.

I-5-2-Effets sur la santé :

Des données toxicologiques montrent que certains HAP induisent des effets systémiques tels que des troubles hématologiques, immunologiques et hépatiques, ainsi que des effets sur la reproduction. D'autres HAP ont des effets génotoxiques et cancérigènes. L'exposition humaine aux HAP peut se faire via l'alimentation, par voie pulmonaire ou par voie cutanée. Les hydrocarbures cycliques provoquent des cancers tels que la leucémie et les cancers de pommons (Amiard, 2011).

Les hydrocarbures aromatiques monocycliques ont des effets hématologiques et immunologiques. Le benzène peut provoquer des troubles neuropsychiques chez l'Homme, le

styrène peut altérer l'appareil génito-urinaire et le phénol serait toxique pour le foie et les reins (Colin, 2000).

Les alcanes peuvent provoquer des brûlures œsophagiennes et gastriques suite à une exposition à long termes.

L'éthylène peut entraîner des troubles des fonctions visuelles, une diminution de la pression artérielle et une diminution de la fréquence cardiaque (Picot et Montandon, 2013).

I-5-3--Effets sur la végétation :

Les hydrocarbures ont des effets toxiques sur la végétation qui se traduisent par : la diminution de la germination et de la densité, des retards de la croissance et de rendement. L'apparition des chloroses et la diminution de l'activité photosynthétique et de respiration et l'apparition de stress hydrique ont été également rapportés par Reilly *et al.* (1996) in Ait Tayeb et Titouche (2011) et Gouhier (2014).

II-Décontamination des sols pollués :

Les techniques de décontamination ont pour objectif de traiter des produits ou des résidus constituant des sources de pollution, afin d'en diminuer, voire supprimer le caractère polluant et ainsi réhabiliter le site (Colin, 2000).

Les traitements peuvent être appliqués selon trois modes (Bertrand *et al.*, 2011).

- **Le traitement sur site :** implique aussi l'excavation des terres mais celles-ci sont traitées sur le site qui possède une unité de décontamination
- **Le traitement in situ :** se réalise sur le site sans bouger les terres polluées ; pour cela, on pratique des extractions, stabilisations ou encore des dégradations.
- **Le traitement hors site :** consiste à évacuer les terres, déchets et eaux polluées pour les acheminer vers un centre de dépollution. Lorsque la pollution est trop difficile à traiter, la solution ultime consiste à décaper la couche de terre polluée et à l'enfouir en CET.

Il existe plusieurs techniques de décontamination des sols.

II-1-Procédés physiques :

Selon Girard *et al.* (2005), il existe deux types de méthodes physiques :

II-1-1-Méthode physique par évacuation :

Elle repose sur l'extraction des polluants du sol. Les sols contaminés extraits seront stockés sous contrôle, lavés, concentrés ou dépollués. Ces méthodes sont applicables de façon préliminaire à une méthode de traitement complémentaire.

II-1-2-Méthode physique par piégeage :

Cette technique ne fait qu'immobiliser les polluants en les confinant ou en les stabilisant. C'est une technique de stabilisation qui peut consister à introduire dans le sol une substance fixatrice qui n'altère pas les propriétés de la terre et ne modifie pas sa fertilité.

II-2-Procédés chimiques :

Cette méthode met en œuvre l'action d'un acide, d'une base ou d'une électrolyse pour extraire ou transformer les polluants (Girard *et al.*, 2005).

Une autre voie de traitement chimique des sols consiste à provoquer la réaction des polluants avec certains réactifs qui généreront des composés moins toxiques (Lecomte, 1998).

II-3-Procédés thermiques :

Deux techniques *ex-situ* sont utilisées, l'incinération et la désorption, et sont employées pour la décontamination des sols pollués par les produits organiques. Ces technologies consistent à utiliser les hautes températures pour détruire les polluants en CO₂, H₂O et différents autres résidus de combustion (Gabet, 2004).

L'incinération se réalise en deux étapes ; une première à 400°C, dite de volatilisation et une seconde dite de destruction à une température supérieure à 1000°C. L'incinération est la seule technique qui détruit réellement les polluants (Lecomte, 1998 ; Gabet, 2004).

II-4-Procédés biologiques :

Ces procédés se font par phytoremédiation ou par bioremédiation dans le cas de traitement d'un sol contaminé (Girard *et al.*, 2005).

II-4-1-Phytoremédiation :

C'est une biotechnique végétale basée sur la capacité des plantes à extraire ou à bloquer les polluants, tant en milieux solides (sol pollué), que liquides (eau pollué) ou gazeux (air pollué). La phytoremédiation permet le traitement d'une grande diversité de polluants (métaux, pétrole brut, hydrocarbures aromatiques polycycliques,...) (Origo *et al.*, 2012).

Les mécanismes de phytoremédiation sont consignés dans le tableau 2.

Tableau 2: Mécanismes de la phytoremédiation (Delage et Schrefler, 2005 ; Lesquel, 2009)

Technique	Principe	Polluants à traiter
Phytoextraction	Utilisation des plantes accumulatrices pour extraire, transporter et concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables de la plante (feuilles, tiges, racines)	Métaux (Pb, Cd, Zn, Cu, nitrate).
phytostabilisation	Utilisation des plantes pour réduire la biodisponibilité, la mobilisation ou le lessivage des polluants.	Métaux (Pb, Cd, Zn, Cu, As, Cr, Se).
rhizodégradation	Utilisation des racines pour dégrader les polluants et l'activité microbienne qui y est associée	Composés organiques, solvants, produits phytosanitaires
phytovolatilisation	Stimulation de la volatilisation moyenne des plantes qui absorbent les polluants puis les éliminent par transpiration	Métaux (As, Hg, Se), composés organiques volatils.

phytodégradation	Transformation des composés organiques du polluant au moyen de réactions biochimiques engendrées par les enzymes de la plante	Composés organiques, nitrate, phosphate
------------------	---	---

II-4-2-Bioremédiation :

Selon Bertnard *et al*(2011), il existe cinq possibilités d'utiliser les microorganismes dans les traitements préventifs et de bioremédiation.

II-4-2-1-Biostimulation :

C'est l'ajout de substances nutritives et d'oxygène, sous forme liquide ou gazeuse, aux eaux usées ou aux sols contaminés pour favoriser la croissance et le développement de bactéries déjà existantes dans le milieu. La disparition des contaminants est contrôlée afin de garantir l'efficacité des mesures correctives (Koller, 2009)

L'objectif est de supprimer l'action de tout facteur limitant la biodégradation, permettant ainsi une activité maximale des microorganismes (Bertrand *et al.*, 2011)

II-4-2-2-Biolixiviation :

Correspond à la solubilisation par les microorganismes et au lessivage par entrainement dans la phase aqueuse de polluants fixés ou piégés dans une matrice solide (Bertrand *et al.*, 2011).

II-4-2-3-Bio-immobilisation :

Correspond à la capacité de certains microorganismes à immobiliser par piégeage dans une matrice minérale ou organique, ou par précipitation de certains polluants minéraux ou organiques (Bertrand *et al.*, 2011)

II-4-2-4 Traitement en bioréacteur (bioslurry) :

Consiste en la création d'une boue épaisse en mettant la partie fine du sol dans l'eau et l'ajout de nutriments pour stimuler la croissance de la population microbienne. Un système d'aération est employé pour les procédés aérobies. Enfin de traitement, les phases solides et liquides sont séparées et le sol est remis en place (ADEME, 2006).

II-4-2-5-Bioaugmentation :

C'est l'ajout de microorganismes aptes à dégrader un polluant particulier aux eaux ou aux sols contaminés. Elle est généralement utilisée avec succès sur des polluants retirés de leur site d'origine (Koller, 2009)

Les souches utilisées peuvent être des souches autochtones qui sont isolées du site pollué et sélectionnées en laboratoire en fonction du polluant à dégrader. Après croissance, les microorganismes seront ensuite réinjectés sur le site au niveau de la zone polluée. Il est également possible de faire appel à des microorganismes génétiquement modifiés pour la dégradation des alcanes et des hydrocarbures aromatiques, mais leur utilisation reste très limitée (Bertrand *et al.*, 2011).

II-4-3-Types de biodégradation des hydrocarbures :

Il existe deux types de biodégradation.

✓ Biodégradation aérobie :

Dans ce mécanisme, il faut apporter au milieu des quantités suffisantes d'éléments nutritifs et d'oxygène, pour que le processus puisse transformer la totalité du carbone présent (en l'occurrence le polluant). Elle peut traiter des pollutions en benzène, toluène, ethylbenzène, ... etc. Les produits rejetés par l'activité microbienne sont l'eau et le dioxyde de carbone (Colin, 2000).

✓ Biodégradation anaérobie :

Elle se pratique en milieu réducteur, afin d'éliminer des composés organiques, tels que les composés aromatiques chlorés ou non, ou les solvants halogénés à faible poids moléculaire. Les bactéries utilisent le SO_3 comme accepteurs d'électrons (au lieu de l'oxygène dans le cas du traitement aérobie), et les produits finaux sont surtout le méthane ou l'acide sulfhydrique, dépendant du composé organique initial (Colin, 2000).

II-4-4- Facteurs affectant la biodégradation des hydrocarbures :

D'après de nombreuses études, il existe plusieurs facteurs affectant la biodégradation microbienne (tableau 3).

Tableau 3: Facteurs affectant les processus de biodégradation (Delage et Schrefler, 2005)

Facteur	Commentaires
Microorganismes	Les microorganismes naturels sont satisfaisants L'accumulation peut être nécessaire Des conditions environnementales appropriées doivent être fournies
Toxicité	Degré de toxicité non élevé
Oxygène	Conditions aérobies désirées
Accepteurs d'électrons	O_2 (conditions aérobies) ; NO_3^- , Fe^{3+} , Mn^{2+} et SO_4^{2-} (conditions anaérobies)
pH du sol	5,5-8,5 (dégradation optimale)
Nutriments	Azote, phosphore et autres nutriments exigés pour la croissance microbienne
Températures	Affecte les taux de dégradation. La biodégradation favorisée à des températures entre 25 et 37°C

II-4-5-Travaux réalisés sur la bioremédiation :

Il ya plusieurs travaux qui ont été réalisés sur la décontamination des sols contaminés aux hydrocarbures par les méthodes biologiques, parmi lesquels nous citons quelques exemples (tableau 4)

Tableau 4 : Quelques travaux réalisés sur la bioremédiation à l'UMMTO.

Auteur	Titre	But du travail
Chergui et Dahmani (2009)	Essai de décontamination d'un sol pollué naturellement par les hydrocarbures par deux techniques biologiques (biostimulation et bioaugmentation)	Biodégradation d'un sol pollué par les hydrocarbures par la technique de bioaugmentation associée à la biostimulation en présence de biosurfactants
Amiri (2013)	Essai de décontamination de deux sols (Alger et Hassi Messaoud) par bioaugmentation	Effets de la bioaugmentation par <i>Pseudomonas aeruginosa</i> sur la dépollution de deux sols contaminés aux hydrocarbures
Boukherchoufa et Bouzid (2014)	Etude de l'effet de l'apport d'azote et de phosphore sur l'efficacité de biodégradation des hydrocarbures	Effets de l'apport de l'azote et de phosphore dans deux sols de textures différentes (argilo-limoneuse et sableuse) contaminés par les hydrocarbures.
Kahil et Issad (2014)	Essai de réhabilitation d'un sol pollué aux hydrocarbures par biostimulation	Estimer l'efficacité de la biostimulation sur un sol pollué par des carburants provenant d'une station-service.

Les travaux cités sur les techniques de bioremédiation ont 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

Nous avons entrepris un essai de décontamination biologique par bioaugmentation d'un sol pollué par les hydrocarbures au laboratoire et sur le terrain. L'expérience ex situ est réalisée au laboratoire de pathologie des écosystèmes de l'UMMTO.

I. Présentation de la station d'étude :

I.1. Localisation et description :

La station d'étude se situe dans une station-service dans la région de Boukhalfa au centre de la wilaya de Tizi-Ouzou sur la route national 12 reliant la wilaya à Alger, à environ 5Km du chef lieu de la commune de Tizi-Ouzou.

La station-service de Boukhalfa est mise en service le 02 février 2002, elle s'étale sur une superficie de 10000m². Sa capacité est de 150000L pour le gasoil, 23000L d'essence sans plomb, 23000L d'essence super et 10000L de GPL, elle est entourée de terres agricoles cultivées et non cultivées et sur sa droite passe un oued (figure 2).



Figure 2 : image satellite de la station-service de Boukhalfa (Google earth, 2015)

I.2. Caractéristiques climatiques :

Le climat est l'ensemble des actions de l'atmosphère : humidité, pluie et température.

Il a une influence directe sur l'intensité d'une pollution (augmentation ou diminution) et sur la disponibilité des eaux.

Le climat a une influence directe et /ou indirecte sur les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques des sols ; il joue un rôle très important dans la répartition des êtres vivants et leur développement.

Pour caractériser l'état climatique de la région, nous avons pris en considération les données climatiques sur une période de 10 ans allant de 2004 jusqu'à 2013 (tableau1 de l'annexe1). Ces données nous ont été fournies par la station météorologique de Tizi-Ouzou.

I.2.1. Diagramme Ombrothermique de Bagnoul et Gausson :

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

P : précipitations moyennes mensuelles en mm

T : températures moyennes mensuelles en °C

A partir de ces données (tableau 1 de l'annexe 1), il est possible de tracer le diagramme ombrothermique de la zone d'étude en portant les mois en abscisse et en ordonnée les températures moyennes mensuelles et les précipitations moyennes mensuelles (figure 3).

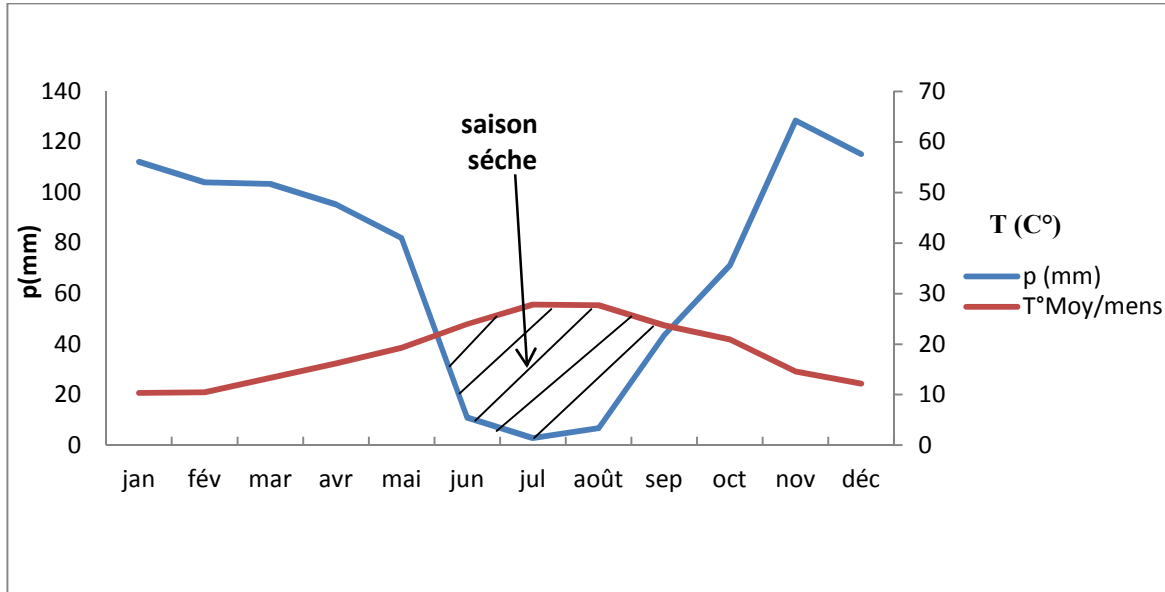


Figure 3 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson pour la station de Boukhalfa

Ce diagramme permet d'estimer au sein d'une même année, deux périodes :

- Une période humide qui s'étend du fin Septembre jusqu'à fin Mai
- Une période sèche qui s'étend de mois de Mai jusqu'à fin du mois de Septembre

1.2.2. Détermination du bioclimat de la station d'étude :

Pour caractériser un bioclimat, Emberger (1952) a établi un quotient représenté par le rapport entre les précipitations mensuelles annuelles et les températures moyennes (tableau 2 de l'annexe 1). Le quotient est exprimé selon la formule de Stewart (1996) : $Q_2 = 3,43(P/M-m)$

Q_2 : le quotient pluviométrique d'Emberger

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

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

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

D'une manière générale, la station de Boukhalfa se situe dans l'étage bioclimatique Subhumide à hiver tempéré (figure 4).

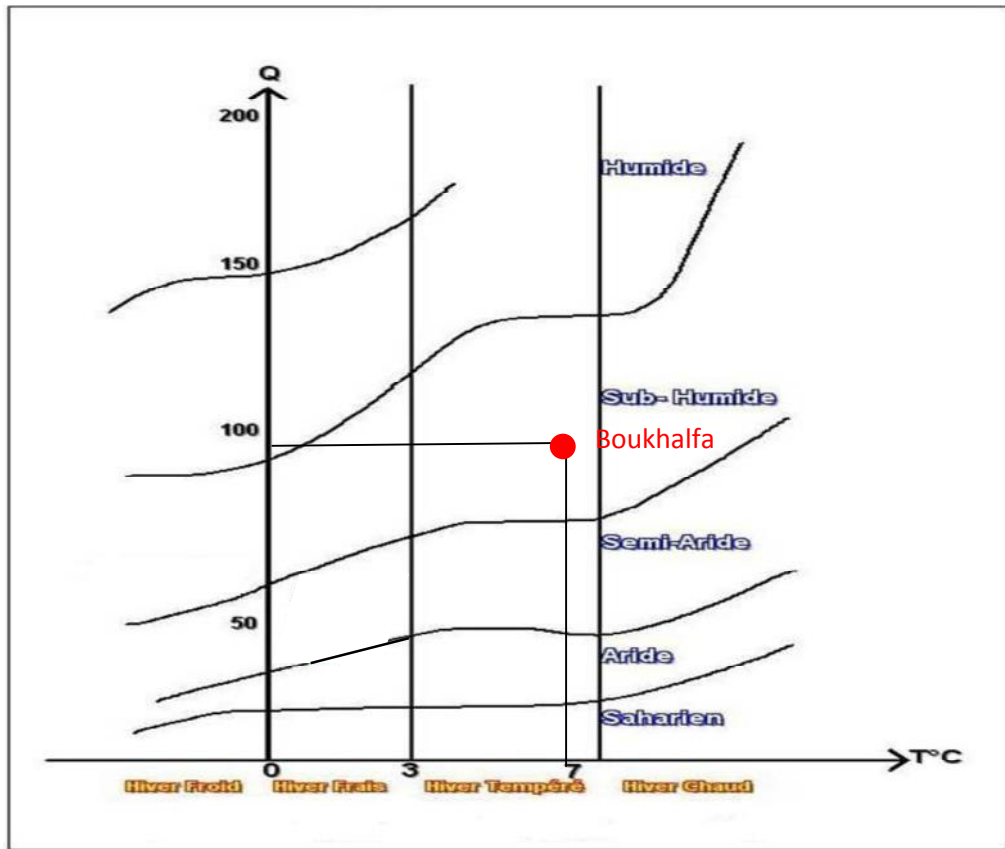


Figure 4 : position de la station d'étude sur le climagramme d'Emberger.

I.3. Conditions climatiques pendant la période d'essai :

I.3.1. Températures :

La température intervient dans l'étude hydro-climatique d'une région, c'est un facteur très important en écologie (Lakrouf, 1984)

Les variations de température influent sur les propriétés d'un sol, sur le comportement et la biodiversité des microorganismes (Davet, 1996) et agit sur la rapidité des processus biologiques (Léveque, 2001)

Pour la région de boukhalfa, pendant la période d'essai qui s'étale de décembre 2014 jusqu'à février 2015, les températures moyennes mensuelles atteignent 11,5°C - 9,9 °C et 9,8°C respectivement.

I.3.2. Précipitations :

Les précipitations sont un facteur très important pour la détermination d'un climat. L'eau constitue l'élément vital pour tous les organismes vivants dont la survie n'est possible qu'en présence de cet élément. Les valeurs des précipitations mensuelles de la période d'essai sont de 272,4mm pour décembre et de 200,9mm pour le mois de janvier.

II. Matériels utilisés :

II.1. Le sol :

Le sol utilisé dans notre travail provient de la station-service de Boukhalfa, c'est un sol contaminé par l'essence et le gasoil, cette contamination est le résultat des rejets provenant des cuves de stockage sous-terraines. D'après les analyses effectuées au laboratoire de pédologie de l'INRF de Bainem, ce sol présente les caractéristiques suivantes (Tableau 5).

Tableau 5 : caractéristiques du sol provenant de la station service de Boukhalfa (Kahil et Issad, 2014)

Caractéristiques	Résultats
pH	7.2
CE	0.74 mmhos /cm
C _{org}	8.8%
N _{tot}	0.3%
P(P ₂ O ₅)	5.46 (mgP ₂ O ₅ /Kg sol)
Texture	Limono-argileuse

D'après les normes d'interprétation (Mémento de l'agronome, 1993 dans l'annexe 3), le sol utilisé dans cet essai est d'une texture limono-argileuse, d'un pH neutre, non salé, riche en carbone organique, faiblement pourvu en azote et en phosphore.

II.2. La souche bactérienne:

La souche *Pseudomonas aeruginosa* utilisé dans ce travail provient du CHU de Tizi Ouzou.

Plusieurs bactéries du genre *Pseudomonas* sont capables de dégrader le pétrole pour satisfaire leurs besoins en carbone et en énergie comme *P. aeruginosa*. En présence d'air, elles s'attaquent aux grosses molécules de pétrole et en retirent deux carbones à la fois (Tortora *et al.*, 2003).

C'est un genre très important, composé de bacilles légèrement incurvés de 0,5 à 1 µm sur 1,5 à 5,0 µm. Ce sont des bactéries à Gram négatif aérobies, parfois elles utilisent le nitrate comme accepteur d'électron au lieu du dioxygène, ce processus est appelé respiration anaérobie. Leur mobilité est assurée soit par une unique flagelle polaire, ou par une touffe de flagelles polaires (Tortora *et al.*, 2003 ; Prescott *et al.*, 2010).

Le choix de cette souche s'est fait parce que c'est une bactérie indigène qui fait partie de la composition du sol et elle est parmi les espèces les plus importantes qui dégradent les hydrocarbures, elle a été testée plusieurs fois et elle a donné des résultats satisfaisants dans la biodégradation des matières organiques (Tortora *et al.*, 2003).

II.3. Le blé :

Le blé est utilisé dans le test de germination et l'évaluation de l'élongation racinaire pour avoir une estimation de la qualité biologique du sol.

Le blé dur est une espèce autogame appartenant à la famille des Poacées et au genre *Triticum*. Le blé germe dès que la température est entre 20 à 22°C. Au moment de la germination, les racines primaires issues de la semence se développent et les premières feuilles apparaissent (Soltner, 1990 in Lounes et Guerfi, 2010)

Selon la classification proposée par Cronquist (1981), le blé dur appartient au :

Règne : Plantae
Sous règne : Tracheobionta
Division : Magnoliophyta
Classe : Liliopsida (Monocotylédones)
Sous-classe : Commelinidae
Ordre : Cyperales
Famille : Poaceae
Sous-famille : Pooidae
Tribu : Triticeae
Genre : *Triticum*
Espèce : *Triticum durum* L.

Le blé est une espèce sensible aux hydrocarbures, nous l'avons utilisée pour voir l'efficacité et le degré de la réussite du traitement de laboratoire et du terrain. Le test de germination effectué sur le sol avant incubation a été négatif (0% de graines germées).

III. Méthodes :

III.1. Préparation de la suspension bactérienne:

La suspension est obtenue par un repiquage des colonies de *P. aeruginosa* développées sur milieu solide dans le milieu de culture liquide (constitué du glucose et d'eau minérale) après une incubation de 48 h à 37°C.

III.2. Préparation du sol :

Le sol contaminé échantillonné est tamisé à l'aide d'un tamis à mailles de 5mm. Ensuite, il est divisé en deux parties, la première est considérée comme témoin (sans traitement) et la deuxième est destinée au traitement par bioaugmentation.

III.3. Méthode d'application du traitement de bioaugmentation :

III.3.1. Application au laboratoire :

Introduire 5ml de la suspension bactérienne qui est constituée d'une eau physiologique et de la souche bactérienne *P. aeruginosa* dans des flacons en verre de 250 ml, dont la prise d'essai est de 100g du sol prélevé dans la station-service de Boukhalfa avec trois répétitions pour le sol traité et trois répétitions pour le non traité. Enfin, les flacons sont fermés et laissés aux conditions du laboratoire pendant trois mois à température ambiante (Figure 5).

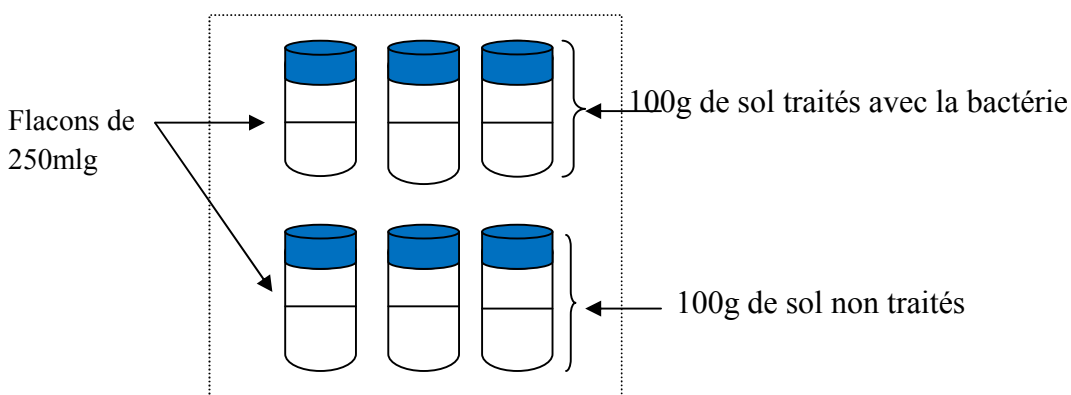


Figure 5 : dispositif expérimental de l'essai au laboratoire.

III.3.2. Application sur le terrain :

Délimiter deux petites parcelles d'une surface de 160cm² chacune et qui sont proches de la source de pollution (rejets d'essence et de gasoil). Six échantillons sont prélevés aléatoirement (trois dans chaque parcelle) à une profondeur de 10cm et ayant un diamètre de 10cm. Ensuite trois échantillons sont traités par la suspension bactérienne, les trois autres n'ont reçu aucun traitement. Enfin, tous les échantillons sont remis à leurs places de prélèvement (Figure 6) et ils sont laissés aux conditions climatiques de la station pendant trois mois.

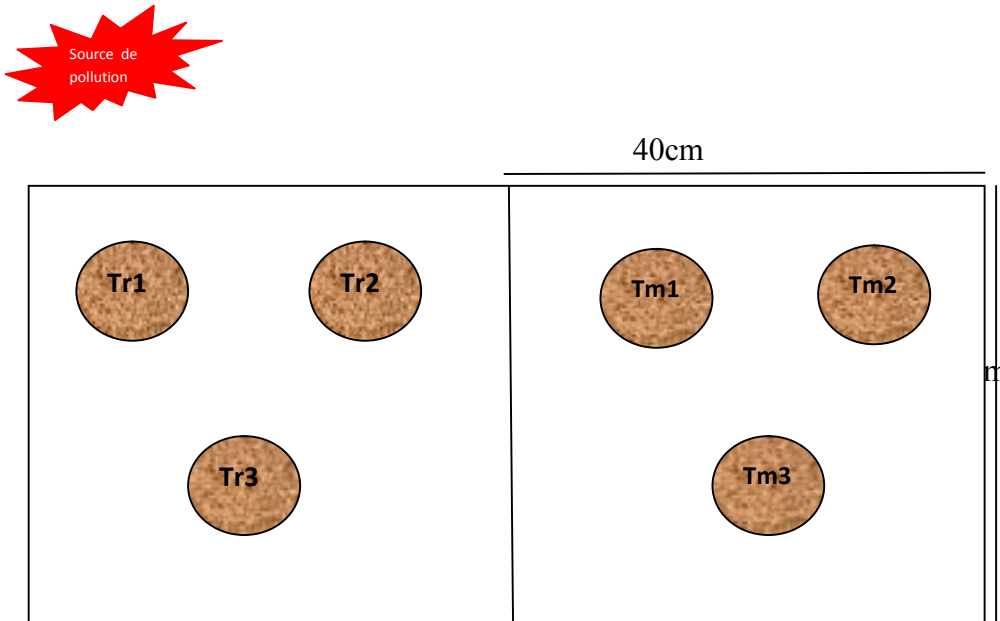


Figure 6: dispositif expérimental sur le terrain.

III.4. Evaluation de la qualité du sol:

Le sol est ramené au laboratoire pour effectuer des analyses chimiques et des tests biologiques.

III.4.1. La conductivité électrique (CE) :

La conductivité électrique d'une solution du sol est un indice de teneurs en sels solubles dans ce sol, donc elle exprime le degré de la salinité du sol (Clément et Pieltain, 2003).

Le sol après avoir été tamisé à 2mm de diamètre, a été mélangé avec de l'eau distillée au rapport 1/5 (masse /volume), puis agité avec un agitateur magnétique pendant 2mn et laissé décanter pendant 30mn, puis le surnageant a été filtré 2 fois pour obtenir un filtrat clair, la CE est ensuite mesurée à l'aide d'un conductimètre (référence LF42).

III.4.2. Le pH:

Les sols ont une réaction neutre, acide ou basique. Leur degré d'acidité ou de basicité est exprimé par le pH. La mesure du pH constitue ainsi le test le plus sensible des modifications survenant dans l'évolution d'un sol (Clément et Pieltain, 2003).

Le sol a été mélangé avec de l'eau distillée au rapport 2 /5 (masse/volume) puis agité avec un agitateur magnétique pendant 2mn et laissé décanter pendant 2h. Le pH est mesuré ensuite à l'aide d'un pH-mètre (référence inolab).

III.4.3. Test de germination :

Le but de ce test est d'évaluer l'impact et l'effet du traitement réalisé (au laboratoire et sur le terrain) sur la phytotoxicité des hydrocarbures existants dans le sol sur la germination des graines de blé et évaluer le degré de la remédiation susceptible d'être enregistré dans les différents échantillons.

Ce test consiste à semer dans les différents échantillons du sol (traités et non traité) 100 graines de blé pour chaque répétition, puis les laisser germer pendant une semaine. La formule pour le calcul du taux de germination est la suivante:

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

III.4.4. Elongation racinaire :

C'est la mesure de la longueur des racines du blé utilisé dans le test de germination pour évaluer la phytotoxicité des hydrocarbures et voir l'efficacité du traitement appliqué. La mesure de la longueur est effectuée sur les racines de 10 graines germées du blé pour chaque échantillon, les mesures sont faites après une semaine du semis.

III.5. L'analyse par spectroscopie IR à transformée de Fourier (FTIR) :

La FTIR est une méthode rapide qui donne des informations quantitatives et qualitatives en caractérisant les groupements fonctionnels et des composantes majeures de différents échantillons.

Cette méthode 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 dans les sols contaminés et les sols traités, ainsi que l'efficacité de la bioaugmentation.

Les échantillons de sol sont broyés et séchés à une température de 40°C durant 24h et sont ensuite mélangés avec le bromate de potassium (KBr) pour réaliser les pastilles à analyser. L'analyse s'est effectuée dans le laboratoire de pétrochimie à l'université M'hamed Bougara de Boumerdes.

III.6. Méthodes d'analyse statistique :

Le traitement des résultats obtenus a été réalisé avec le logiciel R.3.0.2. Le test de Student a été réalisé en vue de comparer, pour chaque variable étudiée, la moyenne obtenue dans le sol non traité et celle obtenue dans le sol traité au laboratoire ou sur le terrain.

Résultats et discussion

Notre travail consiste en un essai de décontamination biologique du sol pollué par les hydrocarbures par la technique de bioaugmentation au laboratoire et sur le terrain.

I-Résultats des analyses chimiques:

I-1--Conductivité électrique (CE) :

Les résultats de la mesure de la conductivité électrique du sol traité et non traité sont présentés dans la figure 7.

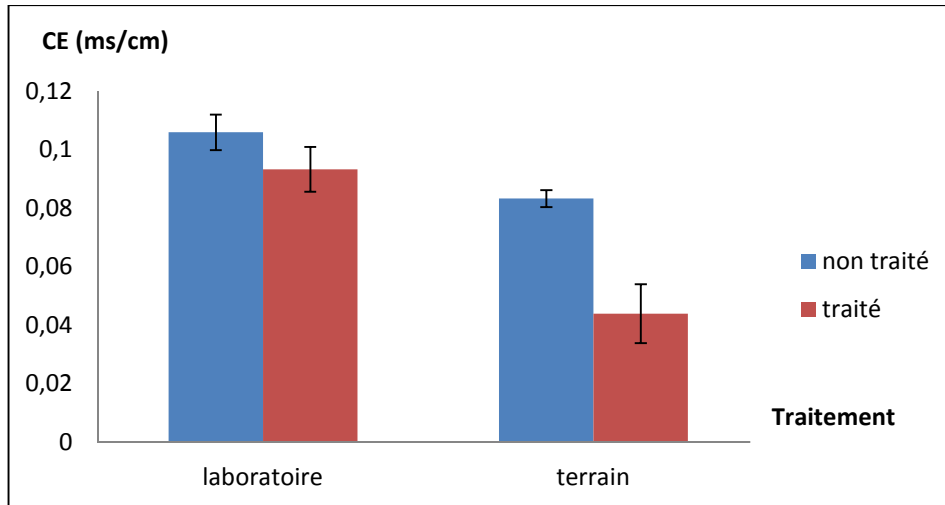


Figure 7 : Conductivité électrique des sols traités et non traités par bioaugmentation.

La conductivité électrique du sol non traité de laboratoire est de 0,106 ms/cm. Elle diminue légèrement dans le sol traité et atteint 0,093. Pour le sol non traité du terrain cette valeur est de 0,083 ms/cm, valeur qui diminue dans le sol traité pour atteindre 0,044 ms/cm (tableau 4 de l'annexe 2).

Les résultats du test student ont révélé qu'il y'avait pas de différences significatives entre le CE des sols non traités et celle des sols traités au laboratoire et sur le terrain (figure 8). Nous pouvons dire que la bioaugmentation n'a pas d'effet sur la CE.

<p>data: CE [labo == "temoin"] and CE [labo == "traité"]</p> <p>t = 1.6337, df = 2.863, p-value = 0.2051</p> <p>Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0</p> <p>sample estimates:</p> <p>mean of x mean of y</p> <p>0.10600000 0.09333333</p>	<p>data: CE [terrain == "temoin"] and CE [terrain == "traité"]</p> <p>t = 2.6881, df = 3.722, p-value = 0.05913</p> <p>Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0</p> <p>sample estimates:</p> <p>mean of x mean of y</p> <p>0.08333333 0.04400000</p>
---	--

Figure 8 : Résultats d'analyse statistique de la CE du sol de laboratoire du terrain.

I-2-Le pH :

Les résultats de la mesure de pH des échantillons du sol traité et non traité sont présentés par la figure 9.

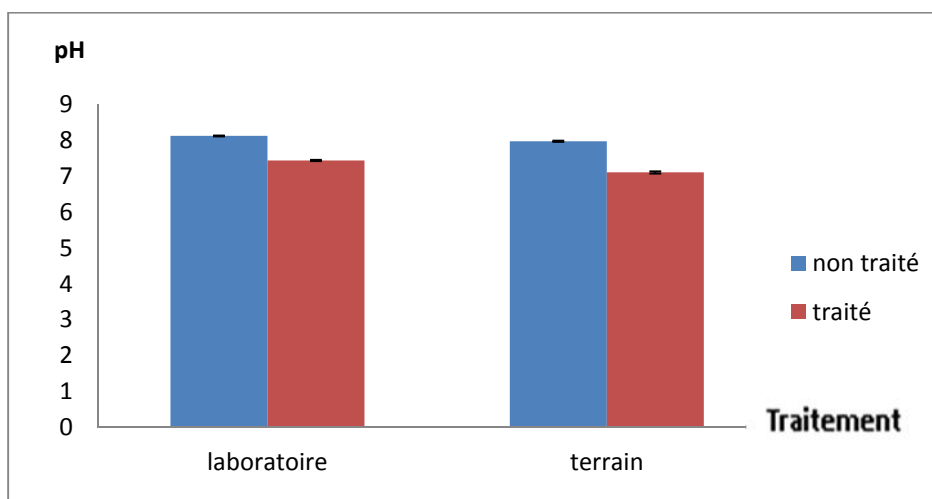


Figure 9 : valeurs du pH des sols traité et non traité.

Nous avons observé une légère diminution du pH, elle est passée de 8,11 dans le sol non traité à 7,42 pour le traité au laboratoire. Sur le terrain et de 7,96 dans le sol non traité à 7,09 dans le sol traité sur le terrain, cette valeur est proche de la neutralité (tableau3 de l'annexe 2).

Les résultats du test student ont révélé qu'il y'avait de différences très hautement significatives entre le pH des sols non traités et celui des sols traités au laboratoire et sur le terrain (figure 10). Nous concluons que la bioaugmentation a un effet sur le pH.

<p>data: pH [labo == "temoin"] and pH [labo == "traité"]</p> <p>t = 24.5022, df = 4, p-value = 1.646e-05</p> <p>Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0</p> <p>sample estimates:</p> <p>mean of x mean of y</p> <p>8.110000 7.426667</p>	<p>data: pH [terrain == "temoin"] and pH [terrain == "traité"]</p> <p>t = 21.7423, df = 4, p-value = 2.647e-05</p> <p>Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0</p> <p>sample estimates:</p> <p>mean of x mean of y</p> <p>7.963333 7.096667</p>
---	---

Figure 10 : résultats de l'analyse statistique du pH du sol de laboratoire du terrain.

I-3-Résultats des bio-essais :

I-3-1-Test de germination :

Les résultats de taux de germination du blé dans les différents sols traités et non traités au laboratoire et sur le terrain sont représentés par la figure 11.

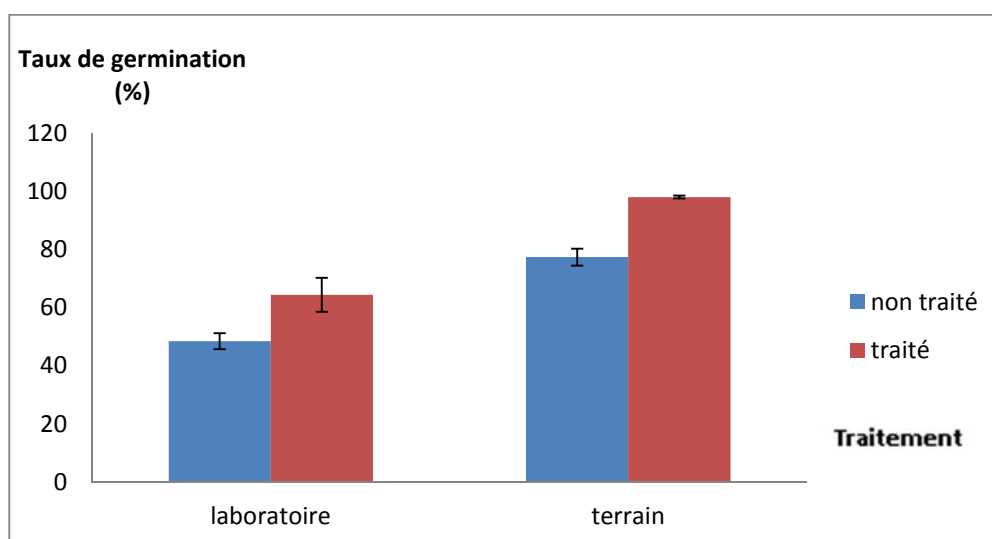


Figure 11: taux de germination du blé dans les différents sols traité et non traité.

Le taux de germination dans le sol non traité de laboratoire est de 48,33% et elle est de 64,33 pour le traité. Dans le sol non traité du terrain le taux de germination est de 77,33% et elle est de 98% dans le traité. Nous remarquons que le taux de germination est très élevé dans les sols traité mais il est aussi acceptable dans le sol non traité (Tableau 1 de l'annexe 2).

Les résultats du test Student ont révélé qu'il y'avait pas de différences significatives entre le taux de germination du blé du sol non traité et celui du sol traité au laboratoire mais la comparaison de taux de germination entre le sol non traité et le traité du laboratoire, fait ressortir une légère différence, malgré que l'analyse statistique ne la montre pas. L'analyse statistique montre aussi il y'avait de différences hautement significatives entre le taux de germination du blé du sol non traité et celui du sol traité sur le terrain (figure12). A cet effet nous pouvons conclure que la biodégradation par bioaugmentation à un effet sur la qualité biologique du sol.

<pre>data: germination [labo == "temoin"] and germination [labo == "traité"] t = -2.1466, df = 2.848, p-value = 0.1259 Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 sample estimates: mean of x mean of y 48.33333 64.33333</pre>	<pre>data: germinat[terrain == "temoin"] and germinat[terrain == "traité"] t = -13.2184, df = 2.616, p-value = 0.001815 Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 sample estimates: mean of x mean of y 77.33333 98.00000</pre>
---	--

Figure 12 : Résultats de l'analyse statistique du taux de germination du blé dans le sol de laboratoire et du terrain.

I-3-2-Elongation racinaire :

Les résultats de l'élongation racinaire du blé dans les différents sols non traités et traités du laboratoire et du terrain sont représentés par la figure 13.

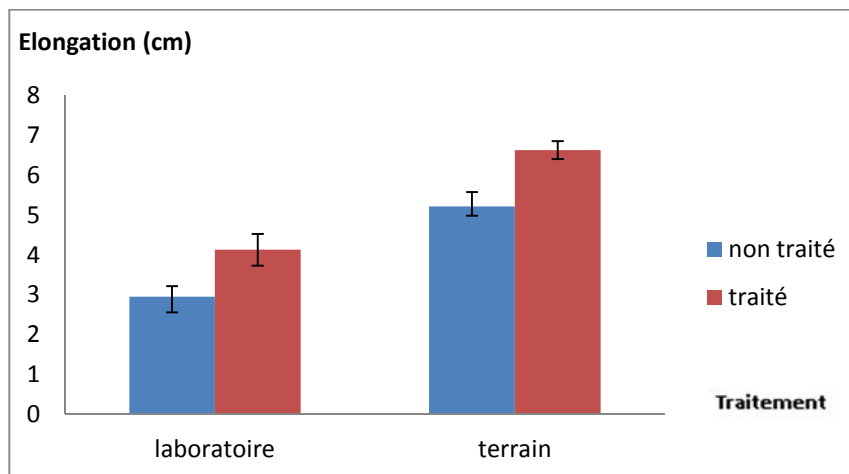


Figure 13 : Elongation des racines du blé dans les différents sols traité et non traité.

Les valeurs de la longueur des racines du blé dans le sol non traité de laboratoire est de 2,95cm et elle est de 4,12cm pour le traité. Dans le sol non traité du terrain elle est de 4,12cm et elle est de 6,62 dans le traité. Nous remarquons que cette longueur est plus élevée dans le traité que le non traité (tableau 2 de l'annexe 2).

Les résultats du test Student ont révélé qu'il y'avait pas de différences significatives entre la longueur des racines du blé du sol non traité et celle du sol traité au laboratoire mais qu'il y'avait de différences significatives entre la longueur des racines du blé du sol non traité et celle du sol traité sur le terrain (Figure14).

La comparaison des valeurs de la longueur des racines entre le traité et le non traité du laboratoire, fait ressortir une légère différence (figure 13).

Nous pouvons conclure que la bioaugmentation a un effet sur la qualité biologique du sol.

<pre>data: elong[labo == "temoin"] and elong[labo == "traité"] t = -2.1337, df = 4, p-value = 0.09979 Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 sample estimates: mean of x mean of y 2.950000 4.126667</pre>	<pre>data: elong[terrain == "temoin"] and elong[terrain == "traité"] t = -2.8805, df = 4, p-value = 0.04499 Alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0 sample estimates: mean of x mean of y 5.210000 6.626667</pre>
--	--

Figure 14 : résultats de l'analyse statistique de l'élongation racinaire du blé dans le sol de laboratoire et du terrain.

I-4-Analyse par spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) :

La figure 15 illustre les résultats de l'analyse par spectroscopie à infrarouge des sols traités et non traités au laboratoire.

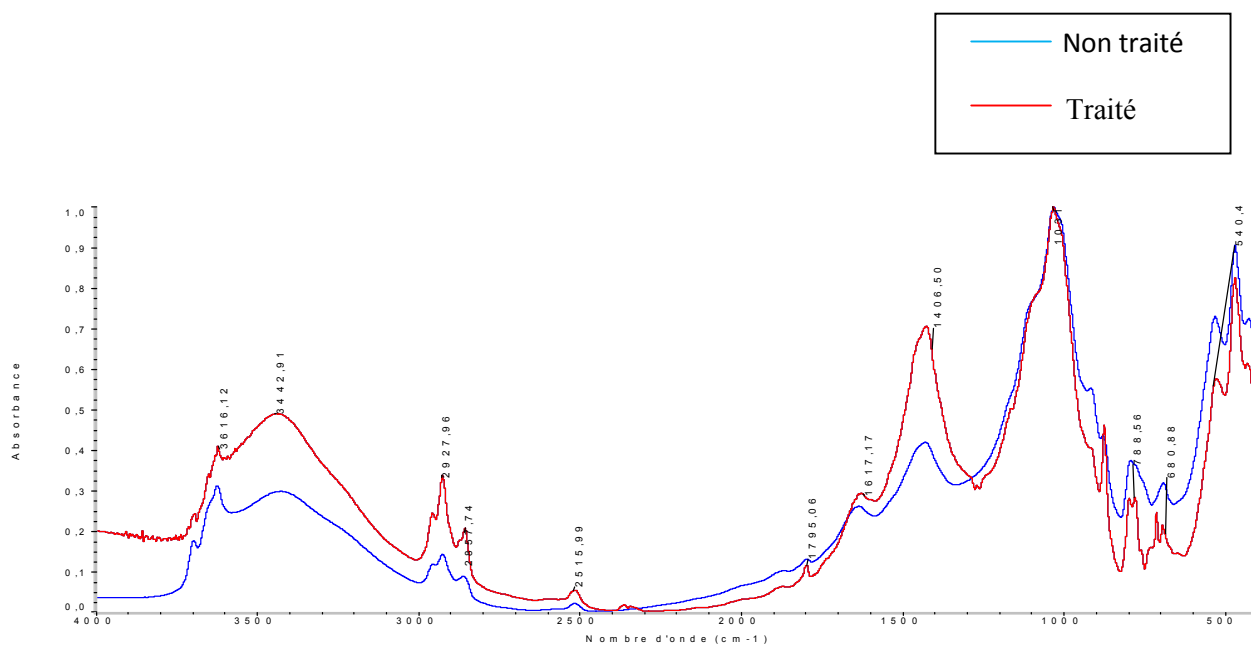


Figure 15: spectre FTIR de sol traité et non traité au laboratoire.

La figure 16 illustre les résultats de l'analyse par spectroscopie à infrarouge des sols traités et non traités sur le terrain.

L'analyse par spectroscopie infrarouge des différents sols traité et non traité au laboratoire, montre une légère modification des différentes bandes caractéristiques des groupements fonctionnels correspond a une augmentation des alcanes, des acides carboxyliques et dérivés et des alcools et phénols.

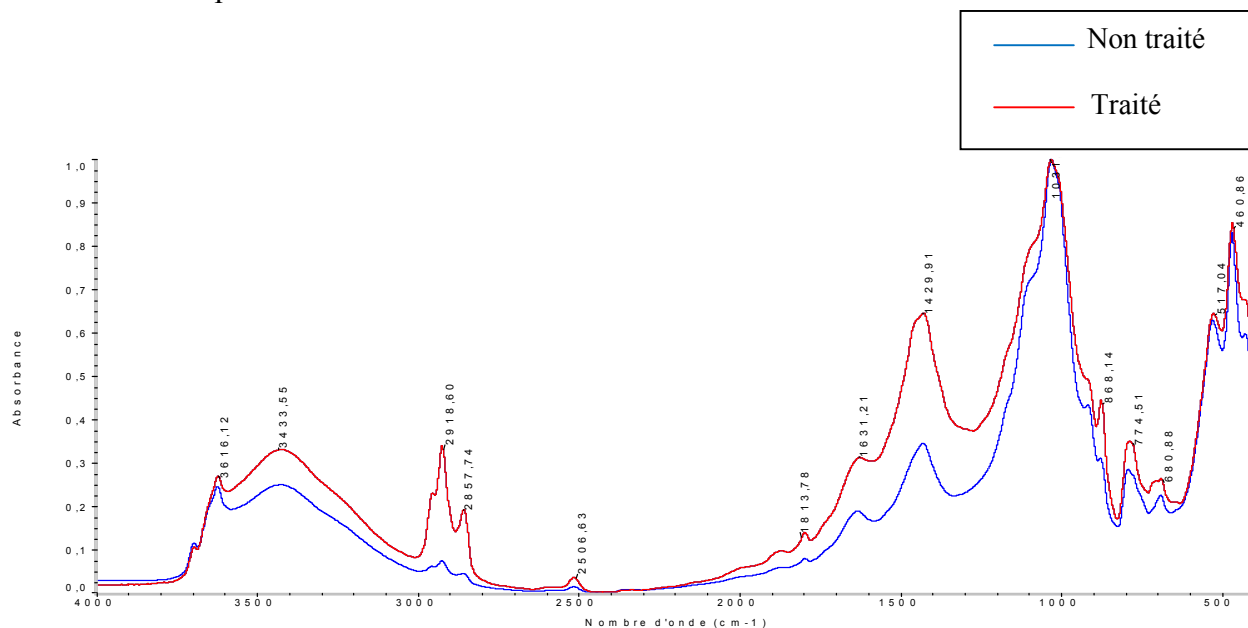


Figure 16 : spectre FTIR de sol traité et non traité du terrain

L'analyse par spectroscopie infrarouge des différents sols traité et non traité au laboratoire, montre une légère modification des différentes bandes caractéristiques des groupements fonctionnels correspond à une augmentation des alcanes, des alcènes, des acides carboxyliques et dérivés et des alcools et phénols (Tableau 5 de l'annexe 2).

II-Discussion :

La différence significative entre le pH du sol traité et le pH du sol non traité, peut être due à la biodégradation des hydrocarbures par *Pseudomonas aeruginosa*, d'après ce que rapporte Ayotamuno et al.(2004) et Merkl et al.(2005) in Njuko et al. (2009) le pH des sols diminué en raison de la dégradation du pétrole, cette diminution selon Merkel et al. (2005) in Njuko et al.(2009) pourrait être due à l'accumulation d'acides organiques produits lors de la dégradation. Selon Davet, 1996 les microorganismes peuvent modifier le pH du sol par l'accumulation des acides organiques pendant leur action sur les composés organiques.

L'absence d'une différence significative entre la CE des sols traités et la CE des sols non traités nous porte à dire que le traitement par bioaugmentation n'a pas d'effet sur la CE et que les hydrocarbures n'ont pas d'effets eux aussi sur elle puisque il n'ya pas eu une grande différence entre le sol traité et le non traité, cette observation a déjà été faite par Saad et Imine (2014).

D'après les résultats obtenus, nous estimons que l'élévation du taux de germination des sols traités est peut être dû à la dégradation des hydrocarbures par *P.aeruginosa* entraînant une diminution de leur toxicité sur les graines du blé. En effets selon Sifour *et al* (2007) in Djerbaoui, (2011) *P.aeruginosa* est connu par sa capacité à biodégradé les composés hydrocarbonés.

La différence significative entre le l'élongation racinaire dans le sol traité et dans le sol non traité peut être due aux effets des hydrocarbures sur les propriétés du sol et sur la croissance des racines du blé dans le sol non traité puisque il a une faible croissance comparant au sol traité par bioaugmentation. D'après Njoku *et al*, (2009) l'atteinte des racines peut être due aux changements des propriétés du sol et/ou la diminution des éléments nutritifs, qui sont corrélés par les propriétés des hydrocarbures.

Les modifications des groupements fonctionnels caractéristiques et de l'intensité des pics, laissent penser qu'il ya une biodégradation de ces derniers dans les sols traités par bioaugmentation, ce qui soutient l'idée que *Pseudomonas aeruginosa* est efficace dans la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures.

Les résultats obtenus dans les sols non traité montrent une légère amélioration de la qualité biologique qui est remarqué grâce au taux de germination élevé par rapport à celui effectué juste après le prélèvement du sol (0% de germination), cette amélioration peut être due à l'atténuation naturelle des polluants qui est se fait par le sol par des processus abiotique comme le dispersion, des réactions d'oxydoréductions abiotiques et l'hydrolyse ou par la dégradation biotique par les micro-organismes indigènes du sol(Saada *et al.*,2005)

D'après toutes les analyses chimiques, biologiques et l'analyse par spectroscopie IR, les résultats de l'essai sur le terrain sont mieux que ceux de l'essai au laboratoire en terme de dégradation de hydrocarbures, cette différence de résultats peut être due à la différence des conditions des deux expériences (T°, O₂, humidité) qui ont un effet sur la vitesse et sur la qualité de la dégradation. D'après Bégin, 1999 ; Duchesne, 2013 in Belley-Vézina, (2014) les

conditions du milieu sont très importantes à prendre en compte lors des traitements, car les conditions inadéquates peuvent mener à une dégradation partielle des hydrocarbures.

Sur le terrain, la dégradation est aérobie en raison de la présence d'O₂ et l'arrosage du sol par les eaux de pluies donc c'est un milieu favorable pour l'activité bactérienne. Par contre au laboratoire, le sol a manqué d'oxygène dans les flacons (la quantité d'O₂ était limitée). D'après Prescott *et al.*, (2010) *P. aeruginosa* a la capacité de dégrader les hydrocarbures dans les conditions anaérobies mais la vitesse de dégradation et la qualité des produits résultants sont différents de ceux de l'aérobie. Les hydrocarbures peuvent se dégrader en conditions anaérobies, mais les taux de réactions associés à une dégradation en milieu aérobie sont plus élevés que ceux associés à une dégradation anaérobie (Intera Technologies, 1995 *in* Belley-Vézina, 2014).

Dans les conditions du laboratoire, il ya un manque d'eau (pas d'arrosage) dans les flacons ce qui peut induire la mort de certains individus de *P. aeruginosa* (ceux qui ne résistent pas à la dessiccation). D'après Davet (1996), une forte dessiccation entraine la mort de certains individus microbiens et les variations de la teneur en eau ont des répercussions considérables sur l'activité biologique du sol.

Conclusion générale

Conclusion générale

La pollution du sol par les hydrocarbures est due à des rejets volontaires ou non de produits pétroliers qui met en péril la qualité des sols, les ressources naturelles et les êtres vivants. C'est pour cette raison qu'on s'intéresse aujourd'hui à la décontamination des sols pollués en utilisant des processus à avantages écologiques, de mise en œuvre facile et peu coûteuse.

Ce travail porte sur l'essai de remédiation d'un sol pollué par des carburants par la bioaugmentation en utilisant la souche bactérienne *Pseudomonas aeruginosa*.

D'après les résultats obtenus, nous concluons qu'il a eu une biodégradation des hydrocarbures dans les sols traités. Cette dégradation des hydrocarbures se traduit par la diminution du pH et l'élévation du taux de germination ainsi que par une importante élongation des racines du blé, pendant que la conductivité électrique n'a pas été influencée par les effets des hydrocarbures sur les propriétés du sol.

L'analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) a montré des modifications des différentes bandes caractéristiques des groupements fonctionnels relatifs aux hydrocarbures ce qui peut être dû à leur biodégradation.

Au regard de ces résultats, nous nous apercevons que cet essai de bioaugmentation par *Pseudomonas aeruginosa* peut être utilisé pour la réhabilitation des sites et des sols pollués par les hydrocarbures. Le traitement est plus satisfaisant sur le terrain qu'au laboratoire.

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 approfondie sur les micro-organismes du sol qui dégradent les hydrocarbures ;
- Optimiser les facteurs influençant la biodégradation des hydrocarbures à savoir le pH, la température, le taux d'humidité et les éléments nutritifs ;
- Réaliser des essais multi locaux et sur d'autres hydrocarbures.

Références bibliographiques

Référence :

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

AIT TAYEB Z. et TITOUCHE H., 2011. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes (Phaseolus vulgaris L et Cicer arietinum L), du sol et de l'essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en biologie UMMTO. 68p

AMIARD J.C., 2011. Les risques chimiques environnementaux. Ed. Lavoisier, Paris. 782p.

AMIRI N., 2013. Ecotoxicité des hydrocarbures sur le sol : Essai de décontamination biologique. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en biologie. UMMTO. 50p

ANONYME, 2012. Agence de l'Urbanisme de l'Arrondissement de Béthune. Caractéristiques et potentiels des sols. Revue l'Observatoire de l'environnement. n°4

ARNAUD P., JANAUT B., BODIGUEL J. et BROSSE N., 2004. Chimie organique. 17^{ème} édition. Ed. Dunod, Paris. 709p.

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 maître en environnement. 140p.

BERTNARD J.C., CAUMETTE P. et LEBARON P., 2011. Ecologie microbienne : Microbiologie des milieux naturels. Ed. Presse universitaire l'Adour. 1002p.

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

BOUKHARCHOUFA 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 biologie. UMMTO. 25p

BOURCEREAU L., BINET P. et CHIAPUSION G., 2008. Accumulation des hydrocarbures polycycliques dans les sédiments de la rivière Doubs .Rapport final de l'Université Franche comte. 57p.

CHAIANEAU C.H., MOREL J.L., et OUDET J., 1997. Phytotoxicity and plant Uptac of fuel oil hydrocarbures. Environ. Qual. Vol. 26. pp 1483-1487.

CHERGUI R. et DAHMANI Y., 2009. Essai de décontamination d'un sol pollué naturellement par les hydrocarbures par deux techniques biologiques (bioaugmentation et biostimulation). Mémoire d'ingénieur. U.M.M.T.O. 54p.

CLEMENT M. et PIELTAIN F., 2003. Analyse chimique des sols méthodes choisies. Ed. Lavoisier, 382p.

COLIN F., 2000. Pollution localisée des sols et des sous sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés. Rapport n°44. Edition. Tec & Doc. Paris. 417p.

D'ALMEIDA G.A., KOEPKE P. et SHETTLE E.P., 1991. Atmospheric aerosols : Global climatology and radiative characteristics. A. Deepak publishing, pp126-161.

- DAVET P., 1996.** La vie microbienne du sol et de production végétale. Ed. I.N.R.A.Paris.367p
- DELAGE P. et SCHREFLER B., 2005.**Géomécanique environnementale : Sols pollués et déchets. Ed. Lavoisier. Paris. 247p.
- DJERBAOUI A., 2011.** Utilisation de souches bactériennes autochtones dans la production de biosurfactant et la bioremédiation des sols de Hassi Messaoud contaminé par les hydrocarbures. Thèse de magister à l'Université de KASDI MERBAH de OURGLA. 133P.
- DUCHAUFOR P., 2001.**Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6^{ème} édition. Masson, Paris. 287p.
- FATTAL P., 2008.** La pollution des cotes par les hydrocarbures. Edition presse Universitaire de Rennes. 395 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'état en biologie U.M.M.T.O. 73p.
- GABET S., 2004.** Remobilisation d'hydrocarbures Aromatique Polycyclique (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'une tension d'origine biologique. Thèse de doctorat. Université de Limoges. 177p.
- GIRARD M.C., WALTER C., REMY J.C., BERTHELIN J.et MOREL J.L., 2005.** Sol et environnement.Ed. Dunod. Paris. 816p.
- GOBAT J.M., ARAGON.et MATTHY W., 2003.** Le sol vivant. Ed. Lausanne. 569p.
- GOMEZ D., 2010.** Etude approfondie de l'influence de la nature chimique fine des polluants hydrocarbures sur le calcul du risque sanitaire. Mémoire d'ingénieur. Ecole des hautes études en santé publique. 74p.
- GOUHIER V. 2014.**Résilience des écosystèmes après un déversement d'hydrocarbures : Essai pour l'obtention du grade de maître en science. Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. 107p.
- GUERMOUCHE A. 2014.** Caractérisation moléculaire des bactéries impliquées dans la biodégradation des hydrocarbures. Thèse de doctorat en microbiologie. Université d'Oran. 166p.
- JEANNOT R., LEMIERE B. et CHIRON S., 2000.**Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués. Ed. BRGM. 110p.
- KAHIL L. et ISSAD H., 2014.** Essai de réhabilitation d'un sol pollué aux hydrocarbures par biostimulation mémoire Master. UMMTO. 45p.
- KOLLER E., 2009.**Traitements des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues. Edition Dunod, Paris. 569p.
- LECOMTE P., 1998.** Les sites pollués : traitement des sols et des eaux souterraines 2^{ème} Edition Lavoisier. 127p
- LE CORFEC Y., 2011.** Sites et sols pollués : gestion des passifs environnementaux. Dunod, Paris.407p.
- LESQUEL E., 2009.** La phytoremédiation, un procédé prometteur. Revue la Gazette. pp42-44.

- LEVEQUE C., 2001.** Ecologie de l'écosystème à la biosphère. Ed. Dunod. Paris.502p.
- LOUNES A et GUERFI Y., 2010.** Contribution à l'étude du comportement agronomique de vingt sept nouvelles variétés du blé dur en vue de leur inscription au catalogue officiel national. Mémoire d'ingénieur. UMMTO. pp 6-10.
- MAES E., SCHABECH S. et BRAHY V., 2008.** La contamination locale des sols. pp500-519.
- NJOKU K., AKINOLA O. et OBOH B.O., 2009.**Phytoremediation of crude oil contaminated soil. Edition marslandpress. pp80-85.
- ORIGO N., WICLHEREK S. et HOYAT M., 2012.** Réhabilitation des sites pollués par phytoremédiation. Revue électronique en science de l'environnement Vertigo. Vol.12, n°2.
- OULD RABAH N., 2012.** Essai de phytoremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures. Mémoire Magister à UMMTO. 132p.
- PICOT A. et MONTANDO F., 2013.** Ecotoxicochimie appliquée aux hydrocarbures.Ed. Lavoisier, Paris.668p.
- PORTET F., NOEL O. et NICAISE S., 2011.**Classification des sols.36p
- PRESCOTT., HARLEY., KLEIN. et WILEY., 2010.** Microbiologie. 3^{ème}édition. Deboeck Université. 1087p.
- RAMADE F., 1992.** Précis d'écologie. Ed. Masson. Paris.300p.
- 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.
- SAAD L. et IMINE K., 2014.** Etude physique et chimique des sols selon un gradient de pollution (cas des stations-services). Mémoire Master. UMMTO.56p.
- SAADA A., NOWAK C. et COQUEREAU N., 2005.** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. Rapport BRGM/RP.53739.FR.110p
- SAVANNE D., 1999.**Ecotoxicité des sols et des déchets : extraction des polluants. Ademe. Paris.138p.
- 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.
- TORTORA G.J., FUNKE B.R, CASE C.L., 2003.** Introduction à la microbiologie. Du Renouveau pédologique Inc. 945p.

Annexes

Annexe1 : données climatiques de la station

Tableau 1: Température moyennes et précipitation moyennes pour la station (station météorologique de tizi ousou).

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 ousou).

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

Tableau3 : des T° Max et T° min de la région d'étude (station météorologique de tizi ousou).

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 2 : résultats brutes des traitements effectués et de l'analyse par FTIR :

Tableau1 : taux de germination du blé dans le sol utilisé.

Témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
Tm1	Tm2	Tm3	Tr1	Tr2	Tr3	Tm1	Tm2	Tm3	Tr1	Tr2	Tr3
54	48	43	54	62	77	80	95	75	77	99	98

Tableau 2 : élongation racinaire des graines du blé utilisé.

Témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
Tm1	Tm2	Tm3	Tr1	Tr2	Tr3	Tm1	Tm2	Tm3	Tr1	Tr2	Tr3
3,56	2,63	2,66	4,94	3,35	4,09	5,81	5,41	4,41	6,35	7,15	6,38

Tableau 3 : 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
8,14	8,11	8,08	7,4	7,47	7,41	7,95	7,94	8	7,15	7,03	7,11

Tableau 4: conductivité électrique

Témoin labo			Traité labo			Témoin terrain			Traité terrain		
Tm1	Tm2	Tm3	Tr1	Tr2	Tr3	Tm1	Tm2	Tm3	Tr1	Tr2	Tr3
0,099	0,099	0,12	0,09	0,1	0,09	0,1	0,1	0,07	0,021	0,052	0,059

Tableau5 :Table 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 3 : 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 à7.8	Légèrement alcalin
7.9 à8.4	Moyennement alcalin
8.5 à9	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

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