

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERY de Tizi-Ouzou
Faculté Science Biologiques et Agronomiques
Département de biologie



Mémoire fin d'étude de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

En Science biologique

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Protection des écosystèmes

Thème

**Essai de la décontamination d'un sol pollué aux carburants par
compostage en utilisant des boues activées**

Présenté par :

TIGHRINE Thiziri

SAI Thiziri

Soutenu devant le jury :

Président du jury : Mme CHAOUCHI

M.C.A à l'U.M.M.T.O

Promotrice: Melle ALI AHMED S

M.A.A à l'U.M.M.T.O

Examinatrice: Mme CHOUAKI

M.C.B à l'U.M.M.T.O

**Année universitaire :
2020/2021**



Remerciement


*En première, nous tenons à remercier le bon dieu de nous avoir
Donné le courage et la patience pour la réalisation de notre travail
Jusqu'à sa fin.*

*En suite, nos vifs remerciements à notre reconnaissance et notre
Profonde gratitude à nos promotrice Melle **Ali Ahmed S** pour leur
Encadrement, leur orientations, leur précieuses conseils, leur soutien et
Leur encouragement tout au long de notre travail.*

*A la Présidente Madame **Chaouchi**, professeur au département de
biologie à L'UMMTO.*

*A madame **Chouaki** pour avoir accepté d'examiner ce travail
Nous remercions aussi l'ingénieur de laboratoire pour son aide et
surtout pour leur gentillesse*

*Enfin, nous adressons un grand merci à nos famille et à toute personne
ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail*





Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes chères parents source de
tendresse et la force, de courage d'étude*

*Je vous remercie d'être toujours à mes coté de me soutenir,
aimer, protéger et pour tous ce que vous avez fait pour moi*

*A mes chers frères : HILAL et JUGURTHA qui m'ont
toujours soutenu et encouragé durant ces années d'étude*

Et à tous la famille Tighrine

A mes chère copines : Samira et Kamilia

ma binome pour sa sympathie

et sa famille

Et tous ceux qui m'aiment

Tighrine Thiziri



Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices

A mon père et à la confiance qu'il m'a accordé

A mon frère Arezki et ma sœur Doudouche que j'adore

A la mémoire de ma chère grand-mère

A mon chère mari qui m'a soutenu et encouragé jusqu'au bout

A mes beaux parents, beaux frères

A mes chères belles sœurs et

A petit prince Dany

A tous les membres de ma famille

A mes tantes et oncles

A mes chères amies Samira et Kamilia

A ma chère binôme Thiziri pour sa patience et gentillesse et sa famille

Et tous ceux qui m'aiment

Sai Thiziri

Liste des figures

Figure 1 : Modes d'application des techniques de dépollution des sols par lieu de traitement (Colombano et al., 2010).....	9
Figure 2 : Image satellitaire de la station-service de Boukhalifa.....	13
Figure 3 : Dispositif expérimental du compostage.....	15
Figure 4 : Evaluation de la température du sol amendé et du sol non-amendé.....	18
Figure 5: variation du pH dans les sols amendé et non-amendé.....	19
Figure 6: Evaluation du taux d'humidité dans les sols amendé et non-amendé.....	20
Figure 7: Dégagement de CO ₂ en 7jours dans le sol amendé et le sol non-amendé.....	21
Figure 8: Activité de la catalase dans le sol amendé et le sol non-amendé.....	21
Figure 9: Taux de germination des graines de maïs dans le sol amendé et non-amendé.....	22
Figure 10: Résultats du test de germination des graines de maïs.....	22
Figure 11: Elongation des racines des plantules de maïs dans le sol amendé et non-amendé.....	23
Figure 12 : Variation du poids des vers de terre dans le temps de terre dans les sols amendé et non-amendé.....	24
Figure 13: Aspect des vers de terre pendant leur exposition au sol amendé et au sol non-amendé.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification des hydrocarbures	7
Tableau 2 : Le test de Newman-Keuls pour la température du sol	18
Tableau 3 : Le test de Newman- Keuls pour les groupes homogènes de pH des sols	19
Tableau 4 : Mortalité des vers de terre dans le sol amendé et le sol non-amendé	23



Sommaire

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction	2
Chapitre I : Synthèse bibliographique	5
I. Pollution du sol.....	5
1. Définition du sol	5
2. Définition de la pollution du sol	6
2.1 la pollution ponctuelle du sol	6
2.2. La pollution diffuse du sol	6
3. Les polluants du sol	7
4. Pollution du sol par les hydrocarbures	8
4.1 Définition	8
4.2. Classification	9
4.3. Source de la pollution par les hydrocarbures	9
5. Devenir des hydrocarbures dans le sol.....	9
6. Effets des hydrocarbures sur l'environnement	10
7. Procédés de traitement de la pollution	10
7.1. Traitement physique	11
7.2. Traitement chimique	11
7.3. Traitement thermique.....	11
7.4. Traitement biologique	11
7.5. Compostage.....	10
7.5.1. Définition du compostage du sol.....	11
7.5.2. Principe du compostage du sol.....	11
7.5.3. Avantages et inconvénients du compostage du sol.....	11

Chapitre II : Matériels et méthodes	13
I. Matériels.....	13
I.1 Sol	13
I.2. Boues activées	13
I.3. Matériel végétal	13
I.4. Vers de terre	14
II. Méthodes.....	14
II.1. Dispositif expérimental	14
II.2. Mesure de la température	15
II.3. Mesure du pH du sol	15
II.4. Mesure de l'humidité	15
II.5. Activité biologique du sol	15
II.6. Activité de la catalase	16
II.7. Evaluation de l'efficacité du compostage	16
II.7.1. Test de germination.....	16
II.7.2. Mesure de l'élongation racinaire.....	16
II.7.3. Test de toxicité sur les vers de terre :	16
II.6. Méthode d'analyse statistique	17
Chapitre III : Résultats et discussion	18
1. Résultats	18
1.1. Température du sol.....	18
1.2. pH du sol :.....	19
1.3. Humidité hygroscopique :.....	20
1.4. Activité biologique du sol :.....	20
1.5. Résultats de l'activité de la catalase :.....	21
1.6. Efficacité du compostage	22
1.6.1. Taux de germination des graines	22

1.6.2. Elongation racinaire	23
1.6.3. Toxicité sur les vers de terre :	23
2. Discussion :	25
Conclusion générale	28
Référence bibliographique	
Les annexes	
Résumé	



Introduction générale

L'environnement constitue aujourd'hui un thème majeur d'actualité touchant les domaines sociaux, économiques et législatifs. L'effet de la pollution sur les différents domaines de l'environnement est rarement mis en évidence (Turgay et al, 2010).

L'exploitation humaine de gisements de pétrole n'a cessé d'augmenter depuis le début du siècle dernier. L'extraction, le transport et l'utilisation de cette source d'énergie entraînent des risques de pollution (accidentelle et chronique) pour l'environnement qui peut influencer l'équilibre écologique et des effets néfastes sur la santé humaine. C'est pour cela que le traitement de ces sols est nécessaire (Koller, 2009). La protection de l'environnement et de la santé humaine nécessite des travaux de réhabilitation. Diverses approches sont envisageables pour éliminer ou réduire les concentrations des polluants dans le sol (techniques physiques, chimiques et thermiques), mais elles sont très coûteuses et non écologiques. C'est pourquoi, un grand intérêt est, aujourd'hui, accordé aux méthodes biologiques (bioremédiation) qui sont moins chères et plus respectueuses à l'environnement (Das et Chandran, 2011).

La bioremédiation se base sur l'utilisation des microorganismes pour éliminer ou réduire la toxicité des polluants en raison de leurs diverses capacités métaboliques. C'est une méthode évolutive pour l'élimination et la dégradation de nombreux polluants environnementaux y compris les produits de l'industrie pétrolière (Kumar et Gopal, 2015).

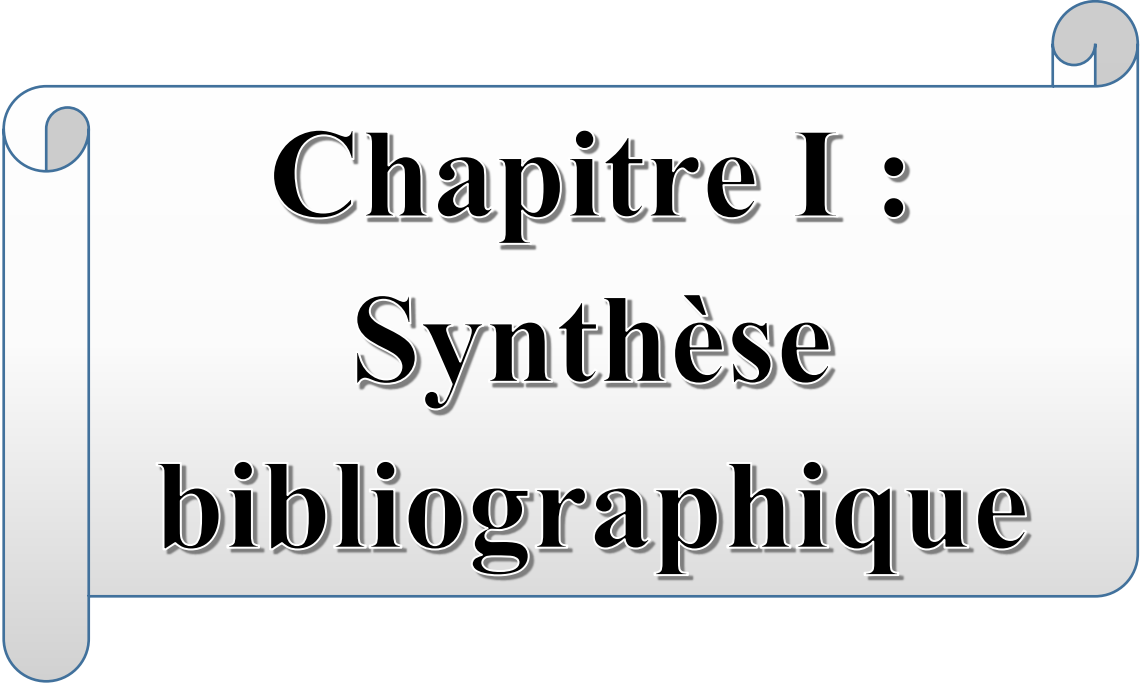
La biodégradation par les populations naturelles de microorganismes représente l'un des principaux mécanismes par lesquels le pétrole et les autres polluants hydrocarbonés peuvent être éliminés dans l'environnement (Das et Chandran, 2011 ; Kumar et al., 2011). La réussite de la biodégradation des sols pollués aux hydrocarbures réside, non seulement dans le choix de l'agent biologique, mais également dans la maîtrise des conditions physico-chimiques du sol telles que l'humidité, le pH, la température, le taux d'oxygène, la disponibilité des nutriments, et la concentration des contaminants (Kumar et Gopal, 2015).

C'est dans ce contexte que s'insère notre travail dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité de l'utilisation des boues activées provenant d'une station d'épuration des eaux usées de l'ONA pour la remédiation d'un sol pollué par les carburants, au cours du processus de compostage qui aide la dégradation de ces derniers par une succession de communautés microbiennes dans le compost, évoluant en condition aérobie (Rhbai et al., 2020). Dans cette étude, il est question de suivre l'évolution des paramètres physico-chimiques et biologiques du sol avec et sans boues activées, et d'évaluer l'efficacité de cette technique de décontamination par le biais de bio-essais.

Le présent mémoire se subdivise en trois chapitres :

- le premier consiste en une synthèse bibliographie sur les généralités de la pollution du sol par les hydrocarbures, leur devenir, leurs impacts ainsi que les procédés de traitement qui leurs sont appliqués ;
- le deuxième chapitre est consacré à la présentation du matériel utilisé ainsi que les méthodes adoptées.
- le troisième chapitre présente les résultats obtenus au cours de notre expérimentation et leur discussion

Une conclusion termine ce mémoire et des perspectives sont proposées.



Chapitre I :
Synthèse
bibliographique

I. Pollution du sol

1. Définition du sol

Le sol est la couche supérieure meuble de l'écorce terrestre. Elle comprend des roches qui ont été réduite en petits fragments et plus ou moins transformés chimiquement avec des débris de plantes et animaux qui vivent dessus et s'en servent (Ramann, 2001).

Le sol est un système hétérogène et complexe. Il est composé d'une phase solide représentée par les particules du sol, une phase liquide représentée par l'eau du sol et une phase gazeuse constituée par l'air emprisonné dans le sol (Gabet, 2004).

2. Définition de la pollution du sol

La pollution désigne l'accumulation anormale et exogène, généralement due à une activité humaine, d'éléments ou de composés minéraux, organiques ou d'agents pathogènes dans un sol donné dont la qualité se trouve affectée (Baize, 1996).

En fonction des modalités d'arrivée des polluants au sol et de l'étendue des pollutions, on distingue :

2.1. Des pollutions ponctuelles souvent accidentelles ou liées à une activité industrielle, se caractérisant par des déversements très localisés, dans l'espace et dans le temps, d'un nombre limité de produits à des concentrations élevées (Chaineau et al. 2000).

2.3 Des pollutions diffuses impliquant des polluants à faibles concentrations sur de grandes surfaces (Girard, 2011).

3. Polluants du sol

Dans le cas de la pollution des sols, le risque s'apprécie plutôt en termes de pollution chronique, et en dehors des agents pathogènes générés directement par l'homme, les animaux domestiques ou les animaux sauvages, trois types de polluants sont grosso modo à considérer.

D'abord des composés plus ou moins dangereux et utilisés couramment : substances pesticides, substances nettoyantes (lessives, solvants), carburants, peintures, colles ou autres produits utilisés en bâtiment ou à usage domestique.

Ensuite, des composés présents dans les produits manufacturés à des teneurs assez faibles : c'est le cas de certains éléments traces métalliques et de certaines substances organiques que l'on retrouve à l'état d'impuretés dans des préparations commerciales.

Enfin, des composés dangereux pouvant être issus par exemple de certaines phases de combustion mal maîtrisées, qui sont généralement appliquées pour détruire les composés cités précédemment : il peut s'agir de certains composés réputés cancérigènes comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou de certaines dioxines ou furannes (PCDD ou PCDF). Certaines de ces substances sont persistantes et peuvent à priori s'accumuler dans les sols (Jullien, 1997).

Parmi les groupes de composés pétroliers polluants pour lesquels la bio-dépollution est possible sont :

- Les hydrocarbures pétroliers (gasoils, fuels, kérosène, huiles minérales)
- Les déchets d'exploitation du pétrole (boues et résidus d'huiles de forages)

(Bertrand et al, 1972).

4. Pollution du sol par les hydrocarbures :

4.1. Définition


Les hydrocarbures sont des composés organiques de formule brute C_nH_m , dont la plupart sont générés par l'activité humaine. Néanmoins, certains hydrocarbures (Tableau 1) peuvent avoir une origine naturelle (Lemière et al, 2001).

Le terme « hydrocarbure pétrolier » (HCP) est un terme générique qui désigne les mélanges de composés organiques présents dans des matières géologiques comme l'huile et le charbon ou les dérivés de ces matières (Standards et Pancanadiens, 2008)

4.2 Classification :

Parmi les hydrocarbures, composé formés à partir de deux éléments (Carbone et Hydrogène). En distingue classiquement trois grandes familles (Tableau 1) :

Tableau 1 : classification des hydrocarbures (Guibet, 1997)

Famille	Désignation courante	Désignation Officielle	Motif structural	Formule globale
Saturés	Paraffines	Alcanes	—C—C—	C_nH_{2n+2}
	Naphtènes	Cyclanes	Cycle à 4, 5 ou 6 carbones	C_nH_{2n}
Insaturés	Oléfines	Alcènes	—C=C—	C_nH_{2n}
	Acétyléniques	Alcynes	—C≡C—	C_nH_{2n-2}
Aromatiques	Aromatiques	—		C_nH_{2n-6}

4.3. Sources de pollution du sol par les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont émis dans l'environnement par des processus naturels ou anthropiques. Il apparaît que les hydrocarbures d'origine anthropique prennent progressivement le pas sur ceux d'origine naturelle. Les processus naturels de génération des hydrocarbures sont divers. Les feux de forêts et de prairies sont considérés comme les plus importants. Mais, il existe d'autres processus tels que les éruptions volcaniques, l'érosion des roches, les fuites de réservoirs naturels ainsi que la production d'hydrocarbures par les végétaux supérieurs ou par les algues. La production des végétaux est marquée par la prédominance des n-alcanes (Rocher et Moilleron, 2003).

Les mêmes auteurs distinguent deux sources principales : les sources pétrolières correspondant à une pétrogenèse à basse température et les sources pyrolytiques correspondant à des processus de combustion à haute température. La circulation automobile constitue l'une des principales sources d'hydrocarbures puisqu'elle combine les deux processus. Les véhicules émettent des gaz d'échappement provenant de la combustion incomplète des carburants et sont aussi à l'origine de déversements de produits variés (carburants, huiles, débris de pneu, etc.).

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 carburants, 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).

5. Devenir des hydrocarbures dans le sol

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

- **Volatilisation** : La volatilisation est un phénomène qui touche les fractions de faible poids moléculaire et dépend des conditions atmosphériques (vent, température ...) (Mattei, 1995).
- **Solubilisation** : La solubilité des hydrocarbures dans l'eau est très faible. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée (Mattei, 1995).
- **Sorption** : C'est la propriété de certains corps solides de pouvoir retenir les molécules d'autres corps (à l'état gazeux ou liquide) à leur surface, on distingue deux mécanismes de sorption : l'adsorption physique qui est due à des forces électrostatiques, et l'adsorption chimique qui met en jeu des liaisons chimiques entre le solide adsorbant (matière organique) et le fluide adsorbé (hydrocarbure) (Saada et al., 2005).
- **Dégradation abiotique** : Selon Fattal (2008), les trois processus principaux de la dégradation abiotique des polluants sont : la photolyse (se fait sous l'action de la lumière), les réactions d'oxydo-réduction (sans l'intervention d'organismes vivants) et l'hydrolyse chimique (sous l'action de l'eau).
- **Biodégradation biotique** : Elle caractérise la décomposition des molécules organiques par les micro-organismes présents dans le sol. Elle dépend principalement de la présence suffisante de micro-organismes adaptés, de la température et de la quantité d'oxygène ou d'autres accepteurs d'électrons, tels que les nitrates qui sont présents dans le sol. La biodégradation se fait dans les milieux aérobies grâce à des micro-organismes principalement des bactéries et des champignons qui puisent dans le pétrole leur alimentation (Fattal, 2008).

6. Effets des hydrocarbures sur l'environnement

Le type d'hydrocarbure, la durée de contact et surtout le niveau de toxicité, influent sur l'importance de l'impact sur l'environnement. Les hydrocarbures légers sont plus toxiques que les hydrocarbures lourds (Fattal, 2008).

Ces derniers constituent une classe de produits chimiques organiques dangereux dont certains sont reconnus comme fortement cancérigènes, génotoxiques, immunotoxiques, mutagéniques

ou tératogéniques. Ils représentent une menace pour la santé publique (Wang et al, 2000 ; Rehmann et al, 2001).

Les sols contaminés par les hydrocarbures présentent un danger lors d'un contact direct avec l'Homme ou l'animal ou lors de leur transfert dans les chaînes alimentaires. C'est le phénomène de bioaccumulation avec le piégeage, par les végétaux et les animaux, des polluants ou de leurs produits de dégradation jusqu'à des teneurs atteignant les seuils de toxicité (Scriban, 1999).

Ces polluants peuvent aussi affecter la structure physique du sol en recouvrant les agrégats du sol ; réduire et détourner la filtration et la circulation de l'eau dans le sol ; entraver la circulation de l'air dans la matrice du sol (Len et Gawel, 2001), induisant, ainsi, une moins bonne aération du sol et, par voie de conséquence, une minéralisation plus lente de la matière organique (Bert et Deram, 1999). Selon ces mêmes auteurs, le fonctionnement de l'écosystème sol est réduit à long terme, ainsi que sa fertilité. La nutrition et le métabolisme des plantes sont perturbés. Certaines espèces végétales non tolérantes disparaissent, ce qui entraîne des changements dans la composition des communautés végétales (Bert et Deram, 1999).

7. Procédés de traitement de la pollution

Les différents procédés de décontamination des sols consistent à traiter les sols pour en supprimer ou en diminuer fortement le caractère contaminant. Quant aux diverses actions, elles comprennent à la fois des opérations de dépollution et de réhabilitation d'un site en vue d'en permettre un nouvel usage (Khalil, 2004).

Les procédés de décontamination des sols sont diversifiés et peuvent être appliqués selon trois modes : traitement sur site, hors site et in situ (fig. 1).

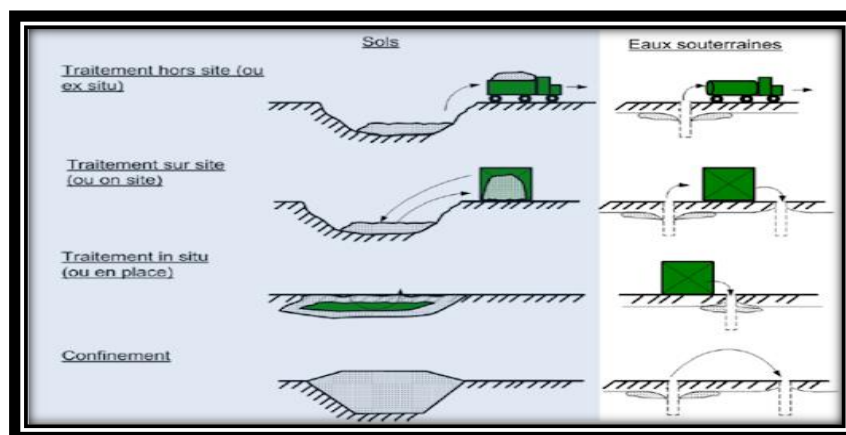


Figure 1 : Modes d'application des techniques de dépollution des sols par lieu de traitement (Colombano et al., 2010)

7.1. Traitements physiques

Actuellement les traitements physiques constituent la majorité des techniques mises en œuvre. Elles consistent à séparer et concentrer les polluants sans modifier ou les détruire (SCRIBAN,

1999). Parmi ces méthodes on distingue les procédés d'extraction, de solidification-stabilisation et de confinement.

7.2. Traitements chimiques

Ils ont pour but de détruire les polluants ou les transformer sous une forme moins nocive pour l'environnement, en provoquant des réactions chimiques entre les polluants contenus dans le sol et un réactif ajouté (Colin, 2000). Parmi ces méthodes figurent l'oxydo-réduction et le lavage des terres.

7.3. Traitements thermiques

Deux techniques de traitement thermique sont utilisées *ex situ*, l'incinération et la désorption thermique. Elles sont employées pour la décontamination des sols pollués par les produits organiques. Ces technologies consistent à utiliser les hautes températures pour transformer les polluants en CO₂ et H₂O (Lecomte, 1995).

7.4. Traitements biologiques

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action des microorganismes (bactéries, champignons) et les végétaux (Koller, 2004). Ils peuvent être utilisés seuls ou en complément d'une autre technique. La décontamination par voie biologique consiste donc à stimuler un phénomène naturel pour en augmenter le rendement afin de détruire le polluant organique qui sera utilisé comme source de carbone (Colin, 2000).

- Les techniques de bioremédiation

Elles sont basées sur l'utilisation de souches microbiennes (bactéries et/ou champignons), pour transformer les substances chimiques toxiques en substances non toxiques (Chevrier, 2013). Les techniques les plus couramment utilisées sont le compostage, la bioaugmentation, la biostimulation, le bioventing, la biofiltration... (Vidali, 2001).

7.5. Compostage

7.5.1. Définition du compostage du sol

Le compostage du sol consiste à mélanger le sol pollué avec des matériaux organiques frais. L'élévation de la température et l'accroissement de la diversité microbienne favorisent la biodégradation des polluants (Khalil Hanna, 2004).

Selon Savage et al, (1985), la température, l'humidité, le pH, l'aération et le rapport C/N sont les principaux facteurs environnementaux qui influencent le processus de compostage.

7.5.2. Principe du compostage de sol

Le compostage de sol est un procédé *ex situ* qui repose sur le principe de l'ajout de compost ou d'amendement organique au sol pollué en andain pour favoriser la dégradation des contaminants (Sayara et Sanchez, 2020).

Ce compost joue un rôle dans la dégradation des contaminants qui contribuent par l'amélioration de la structure, l'aération du sol et de l'activité des microorganismes. Il enrichit, aussi, le sol en éléments nutritifs et en microorganismes (Roudier, 2017).

7.5.3. Avantages et inconvénients du compostage du sol

Le compostage de sol offre plusieurs avantages qui font d'ailleurs son efficacité. C'est une technique peu coûteuse qui traite *ex situ* ; une quantité des contaminants réduit dans le sol en raison de présence des populations bactériennes et une biodégradation plus rapide;

Ce traitement est efficace pour traiter les sols souillés par les hydrocarbures aromatiques polycycliques, hydrocarbures pétrolières... Il permet, également, d'accélérer les traitements biologiques.

Ce procédé présente, cependant, quelques inconvénients dans la mesure où les paramètres de composte (T°, pH, humidité, aération) doivent être maintenus au niveau optimal. Aussi, la durée du traitement par compostage est relativement longue.

A decorative graphic of a scroll with a light gray gradient background and a blue border. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top corners curled up. The text is centered on the scroll.

Chapitre II : Matériels et méthodes

Dans ce chapitre nous allons présenter les matériels et les méthodes utilisées dans notre essai de compostage ainsi que les paramètres de mesures de l'efficacité de la décontamination d'un sol pollué par les carburants.

I. Matériels

I.1 Sol :

Le sol utilisé dans cette étude est un sol contaminé par les carburants (essence et gasoil) provenant d'une station-service Ait Ben-Amara à Boukhalfa, située à 36° de latitude et 4° longitude, elle est implantée à 5 km à l'ouest du chef-lieu de la wilaya de Tizi-Ouzou sur la route nationale n°12 reliant Alger à Tizi-Ouzou (fig. 2).



Fig. 2 : Image satellitaire de la station-service de Boukhalfa (Google earth)

I.2. Boues activées

Les boues activées utilisées pour cette étude proviennent de la station d'épuration des eaux usées l'ONA (Organisation national d'assainissement) qui sont riches en microorganismes capables de dégrader les polluants organiques. Ces boues proviennent du bassin de traitement biologique des eaux.

I.3. Matériel végétal

Les graines de maïs ont été utilisées pour évaluer l'efficacité de la décontamination des sols par compostage. Le choix de cette espèce végétale est justifié par sa sensibilité aux hydrocarbures (Chaineau et al., 1996) et sa bonne faculté germinative.

I.4. Vers de terre

Les vers de terre utilisés appartiennent au genre *Eisenia*. Ils sont utilisés dans un test de toxicité aigüe pour évaluer l'efficacité du traitement du sol par compostage.

II. Méthodes

Le but de l'étude c'est décontaminer le sol pollué aux carburants par le processus du compostage.

II.1. Dispositif expérimental

Le sol est tamisé à l'aide d'un tamis à mailles de 5 mm de diamètre pour éliminer la fraction grossière, puis réparti sur 6 palettes, à raison de 3Kg de sol dans chacune d'entre elles (fig. 3).

Le sol est dilué par homogénéisation avec 0.1% de sable pour fournir une distribution homogène d'hydrocarbures et 0.64% de copeaux de bois ont été ajoutés au mélange sol-sable pour diminuer le compactage et favoriser l'aération. Le sol de trois palettes a été amendé avec les boues biologiques au rapport massique sol/boue de 1/5. Le sol des trois autres palettes n'a pas été amendé avec les boues et a servi de témoin. Les palettes ont été couvertes avec des sacs plastiques pour réduire les déperditions de chaleur, mais sans affecter l'aération assurée par des retournements manuels une fois par jour. Un arrosage est effectué au besoin. L'essai a duré 8 semaines.

Des échantillons de sol amendé et non amendé sont prélevés chaque semaine pour mesurer quelques caractéristiques physico-chimiques du sol (pH, température et humidité). Une partie du sol a été caractérisé juste avant l'application du compostage pour indiquer l'état initial du sol (avant traitement), car même dans le sol non enrichi en boues activées, l'atténuation naturelle peut induire la réduction de la pollution dans le sol.



Fig. 3 : Dispositif expérimental du compostage du sol

II.2. Mesure de la température

Chaque semaine, la température du sol est mesurée à l'aide d'un thermomètre.

II.3. Mesure du pH du sol

Le pH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre sur une solution de sol dans de l'eau distillée au rapport 1/2,5 (poids /volume) ayant décanté pendant 2 heures.

II.4. Mesure de l'humidité

Elle est déterminée par le calcul du rapport de la différence entre le poids du sol frais et le poids du sol sec au poids du sol sec. Ce dernier est obtenu par pesée du sol après séchage dans une étuve à 105°C pendant 24h.

II.5. Activité biologique du sol

Dans des flacons de 250ml, contenant 50g de sol chacun, ont été placés deux tubes à hémolyse, l'un contenant de 3ml d'eau (3ml) et l'autre 5ml de NaOH 0,5N pour fixer le CO₂ dégagé par la respiration des microorganismes. Les flacons ont été incubés pendant 7 jours à 28°C, respectivement trois répétitions ont été réalisées pour les deux types de sols (Sol amendé par les boues et le sol non amendé).

Après l'incubation, le NaOH contenu dans les tubes est titré avec une solution d'acide sulfurique dilué (0,25N) en présence de quelques gouttes de phénophtaléine. La fin de la titration est marquée par la disparition de la couleur rose.

II.6. Activité de la catalase

Afin de mesurer l'une des activités enzymatiques du sol, la catalase, 1,25ml de H₂O₂ à 0,3% et 10 ml de tampon phosphate à pH7 sont ajoutés à un échantillon de sol 2,5g. Le mélange réactionnel a été incubé à 25°C pendant 20min. Après l'incubation, 1,25ml de H₂SO₄ à 3,0 mol/L est ajouté à la solution pour arrêter la réaction. Le mélange est, ensuite, filtré à travers un papier filtre. Le filtrat est titré par une solution de KMnO₄ à 0,02 mol/L jusqu'à apparition d'une couleur rose clair.

II.7. Evaluation de l'efficacité du compostage

Dans le but d'évaluer l'efficacité de la décontamination du sol pollué par compostage, deux tests rapides ont été réalisés : un test de germination des graines de maïs et un test d'élongation racinaire des plantules de la même espèce.

II.7.1. Test de germination

Vingt graines de maïs sont mises à germer dans une boîte de Pétri contenant 100g de sol avec trois répétitions. Après 7jours, un taux de germination (TG) est calculé par la formule suivante :

$$\text{TG}(\%) = (\text{nombre des graines germées} / \text{nombre des graines totales}) \times 100$$

II.7.2. Mesure de l'élongation racinaire

La longueur de la racine est mesurée 2 fois, à 15 jours d'intervalle sur 5 radicules des embryons des graines ayant germé. La croissance racinaire est exprimée par l'élongation (LR) calculée par la formule ci-après :

$$\text{LR} = \text{longueur de la racine après 15 jours} - \text{longueur initiale de la racine}$$

II.7.3. Test de toxicité sur les vers de terre :

Il s'agit d'un essai de toxicité aiguë. Trois individus adultes de vers de terre du genre *Eisenia*, pesant entre 0,80g et 0,90g, ont été exposés dans des pots contenant 100g de sol avec trois répétitions pour chaque palette.

Ces pots ont été recouverts d'un tissu en tulle fixé sur les bords des boîtes par un élastique. Le taux de mortalité et le poids des vers de terre ont été déterminés après 14 jours.

II.6. Méthode d'analyse statistique

Le traitement des résultats a été réalisé avec le logiciel R.4.1.0. Les résultats des paramètres du sol amendé et non amendé ainsi que les résultats des tests de toxicité ont été soumis à une analyse de la variance ou au test de Kruskal-Wallis lorsque les données ne suivent pas une loi normale. Trois moyennes sont comparées : la moyenne obtenue dans le sol amendé, celle obtenue dans le sol non amendé et la valeur moyenne mesurée dans le sol avant l'application du traitement.

A decorative graphic of a scroll with a light blue border and a white-to-light blue gradient fill. The scroll is unrolled on the left and right sides, with the top edge slightly curved. The text is centered within the scroll.

Chapitre III : **Résultats et** **discussion**

1. Résultats

Les résultats représentent une comparaison entre le sol contaminé amendé avec les boues activées et le sol contaminé non non-amendé afin d'évaluer l'efficacité du traitement. Ces résultats sont ensuite comparés aux valeurs mesurées sur le sol contaminé avant le début de l'expérience (état initial).

1.1. Température du sol

Les résultats du suivi hebdomadaire de la température du sol amendé et non amendé sont représentés par la figure 4

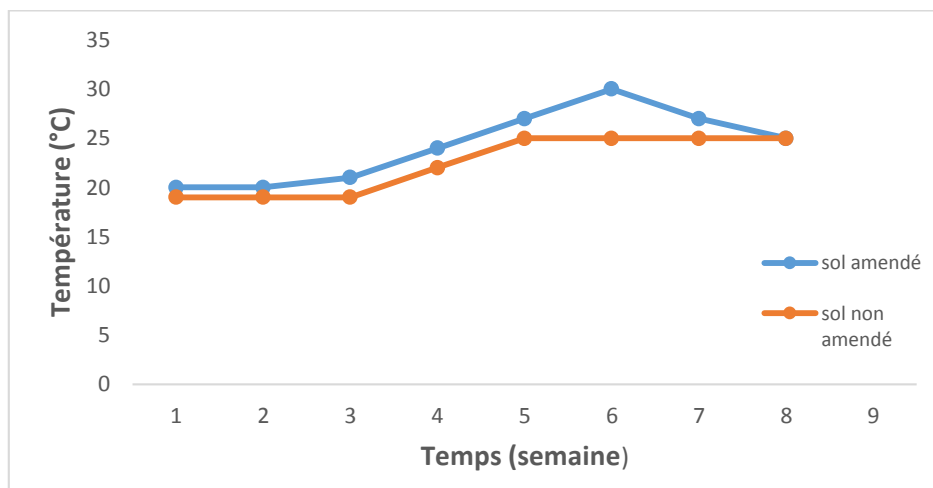


Figure 4 : Evolution de la température du sol amendé et du sol non-amendé.

La température au cours du processus de compostage est plus élevée dans le sol amendé avec les boues activées par rapport au sol non amendé. Cette élévation est plus importante entre la 4^{ème} et la 7^{ème} semaine du traitement, avec un maximum de 30°C atteint après 6 semaines de compostage, suivi d'une baisse de température jusqu'à 25°C enregistré à la 8^{ème} semaine. Dans le sol non amendé, la température commence à augmenter à partir de la 3^{ème} semaine jusqu'à la 5^{ème} semaine où elle a atteint 25°C. Un plateau à cette température est observé jusqu'à la fin de l'expérience (après 8 semaines).

Tableau 2 : Le test de Newman et Keuls pour les groupes homogènes de la température du sol

Sol	Moyenne	Groupe
Sol amendé	27	a
Non-amendé	25	b
Sol initial	19,5	c

L'analyse de la variance de la température du sol, comparant les moyennes des températures dans le sol amendé, le sol non amendé et le sol à l'état initial, a révélé des différences très hautement significative avec un p-value de 0,0002632. Le test de Newman-Keuls (tableau 2) classe ces moyennes dans trois groupes différents, indiquant que la température est plus élevée dans le sol amendé, suivie de la température du sol non-amendé qui sont toutes les deux supérieures à la température enregistrée avant l'application du traitement.

I.2. pH du sol :

L'évolution du pH des sols amendé et non-amendé sont illustrées dans la figure 5

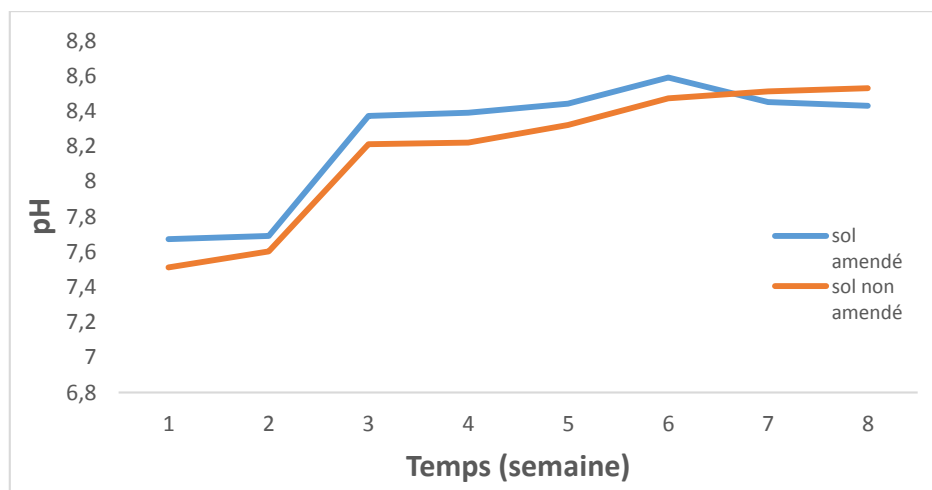


Figure 5 : variations du pH dans les sols amendés et non-amendé

Les résultats montrent que le pH est plus élevé dans le sol amendé que dans le sol non-amendé pendant les six premières semaines de traitement atteignant un maximum de 8,59 à la 6^{ème} semaine. Une baisse du pH est, ensuite, observée avec des valeurs inférieures à celles du sol non amendé aux alentours de la 7^{ème} semaine jusqu'à pH 8,43 enregistré à la fin de l'expérience.

Dans le sol non-amendé, les valeurs du pH n'ont pas cessé d'augmenter, dépassant même le pH du sol amendé à partir de la 7^{ème} semaine atteignant 8,53 à la fin de l'expérience.

Tableau 3 : Le test de Newman-Keuls pour les groupes homogènes de pH des sols

Sol	Moyenne	Groupe
Non-amendé	8,555	a
amendé	8,443	b
initial	7,593	c

Les résultats de l'analyse de la variance du pH du sol à la fin de l'expérience a révélé qu'il y'avait une différence très hautement significative avec p-value de 0,0004953. Le test de Newman-Keuls a classé le sol non amendé dans le groupe a, suivi du pH du sol amendé dans le groupe b et le sol à l'état initial dans le groupe c. Ceci montre que le pH a augmenté pendant l'incubation du sol, qu'il soit amendé ou pas, avec les boues activées (tableau 3).

1.3. Humidité hygroscopique :

Les résultats de l'humidité hygroscopique sont illustrés par la figure 6

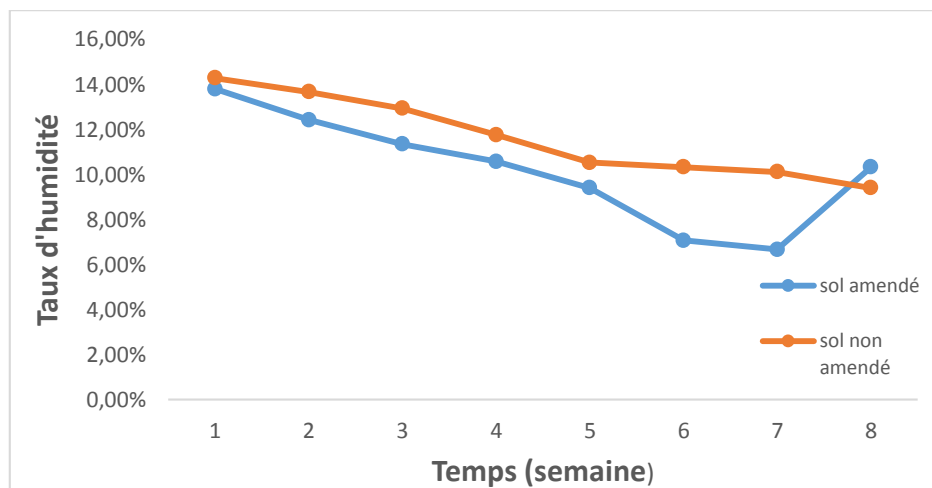


Figure 6 : Evolution du taux d'humidité dans les sols amendés et non-amendés.

Le taux d'humidité est moins élevé dans le sol non-amendé par rapport au sol amendé. Cette différence s'est accentuée à partir de la 5^{ème} semaine avec des taux inférieurs à 10%. Le taux d'humidité a commencé à augmenter à partir de la 7^{ème} semaine pour dépasser l'humidité du sol non-amendé quelques jours avant la fin de l'expérience.

L'analyse de la variance a révélé qu'il n'y avait pas de différences significatives du taux d'humidité entre les sols amendés, non-amendé et le sol non incubé, avec une p-value de 0,4604.

1.4. Activité biologique du sol

Les résultats de l'activité biologique du sol exprimée en quantité de CO₂ dégagé par la respiration microbienne du sol sont illustrés dans la figure 7. Les résultats montrent que la quantité de CO₂ dégagé dans le sol non-amendé est plus élevée (24,2mg/50g de sol) que celle du sol amendé (29mg/50g de sol).

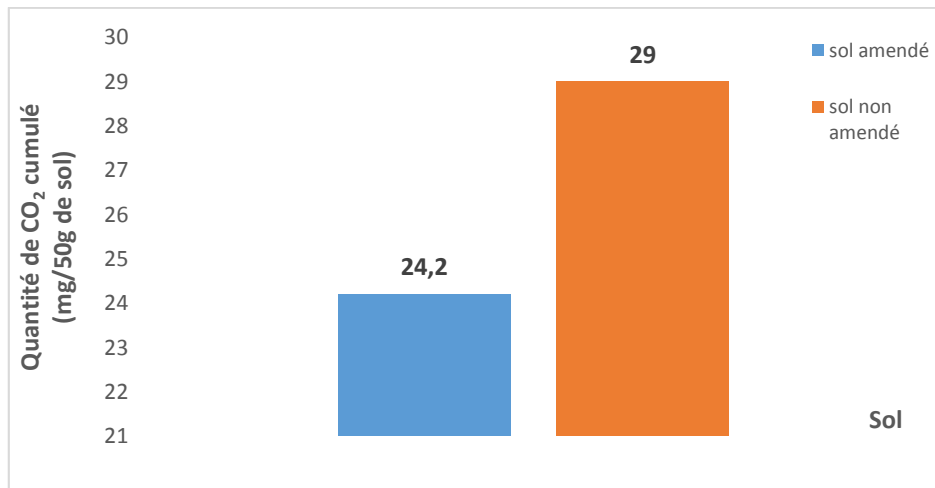


Figure 7 : Dégagement de CO₂ en 7 jours dans le sol amendé et le sol non-amendé

Le test Student pour la respiration microbienne du sol a révélé qu'il y avait une différence hautement significative avec p-value (0,004338). Cela signifie que l'activité biologique est plus intense dans le sol non-amendé.

1.5. Résultats de l'activité de la catalase

La catalase est un enzyme qui dégrade l'eau oxygénée (H₂O₂) en eau (H₂O) et en oxygène (O₂). D'après les résultats obtenus, la quantité de H₂O₂ transformée en O₂ atteint une moyenne de 1,7 moles dans le sol amendé alors qu'elle est de 1,24 moles dans le sol non-amendé (fig. 8).

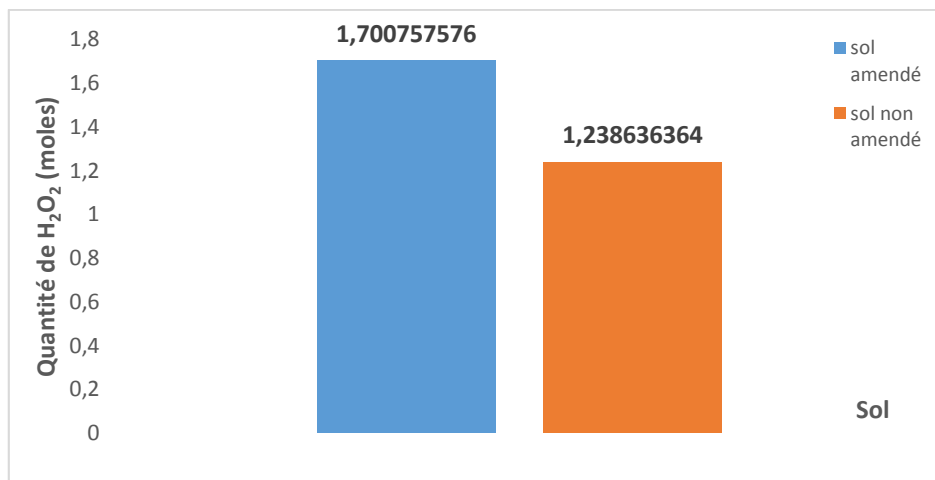


Figure 8 : Activité de la catalase dans le sol amendé et le sol non-amendé

Le test de Student pour l'activité de la catalase a révélé qu'il n'y avait pas une différence significative de l'activité de la catalase entre le sol amendé et le sol non-amendé, avec une p-value égale 0,1835.

1.6. Efficacité du compostage

1.6.1. Taux de germination des graines

Le test de germination est réalisé afin d'évaluer l'efficacité du traitement du sol par compostage en présence de boues activées. Les résultats sont présentés dans les figures 9 et 10.

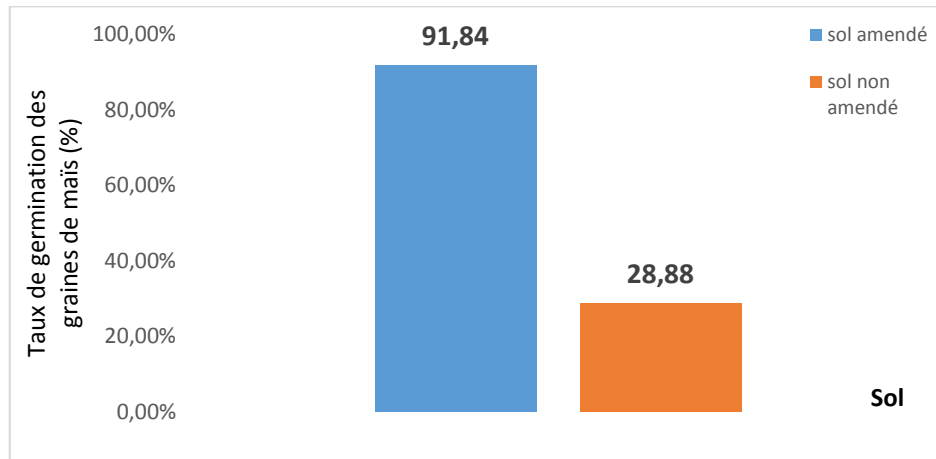


Figure 9 : Taux de germination des graines de maïs dans les sols amendés et non-amendé

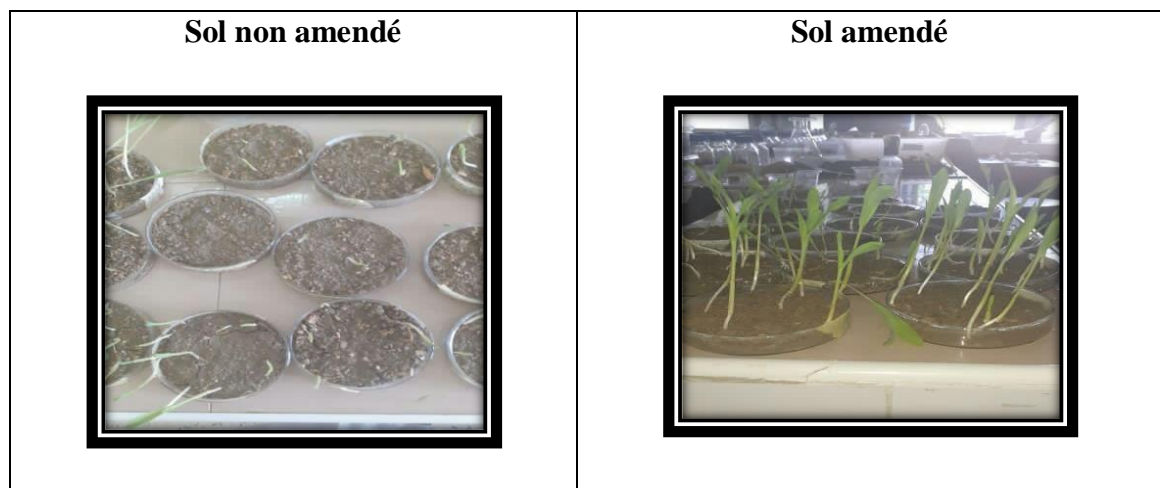


Figure 10 : Résultat du test de germination des graines de maïs

Une grande différence de germination a été observée entre le sol amendé et le sol non-amendé où l'on a enregistré un taux de germination avoisinant 30% et qui représente environ 1/3 de celui observé dans le sol amendé.

Le test de Student du taux de germination a révélé que la différence observée entre les deux sols amendé et non-amendé était hautement significative avec une p-value égale 0,0036.

1.6.2. Elongation racinaire

Les résultats de la mesure de l'élongation racinaire des plantules de maïs (figure 11) montrent que la valeur de ce paramètre dans le sol amendé dépasse le double de la valeur obtenue dans le sol non-amendé.

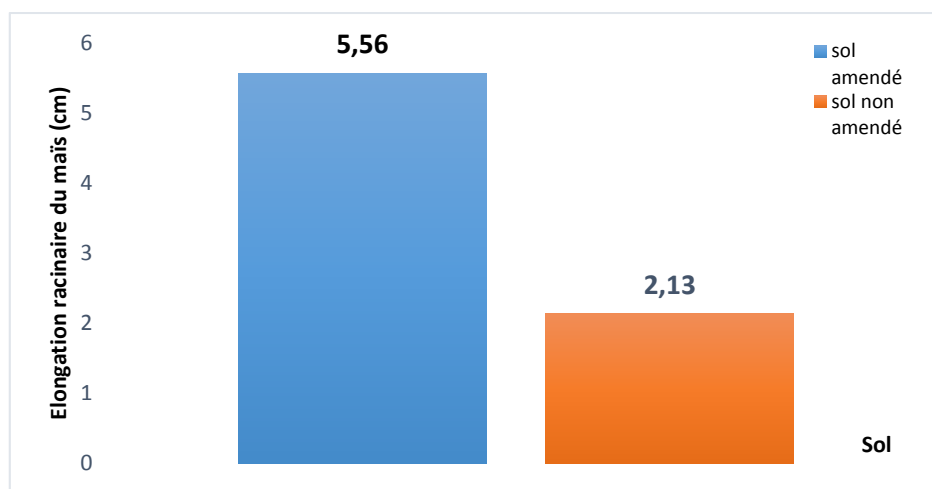


Figure11 : Elongation des racines des plantules de maïs dans les sols amendés et non-amendé

Le test de Student a révélé que l'élongation racinaire était significativement plus élevée dans le sol amendé par rapport au sol non-amendé (p -value = 0,01794).

1.6.3. Toxicité sur les vers de terre :

Le tableau 5 représente la mortalité des vers de terre dans le sol amendé et le sol non-amendé après 24, 48 et 72 heures d'exposition. Il en ressort que la mortalité des vers de terre est nulle dans le sol amendé alors que le tiers des individus est encore vivant dans le sol non-amendé.

Tableau 4 : Mortalité des vers de terre dans le sol amendé et le sol non-amendé

	T0	Après 24heures		Après 48heures		Après 72heures	
		Nombre de morts	Nombre de vivants	Nombre de morts	Nombre de vivants	Nombre de morts	Nombre de vivants
Sol amendé	3	0	3	0	3	0	3
Sol non-amendé	3	1	2	1	1	0	1

Le poids des vers de terre a augmenté de jour en jour dans le sol amendé pendant que celui-ci a commencé à diminuer sensiblement après 24 heures d'exposition.

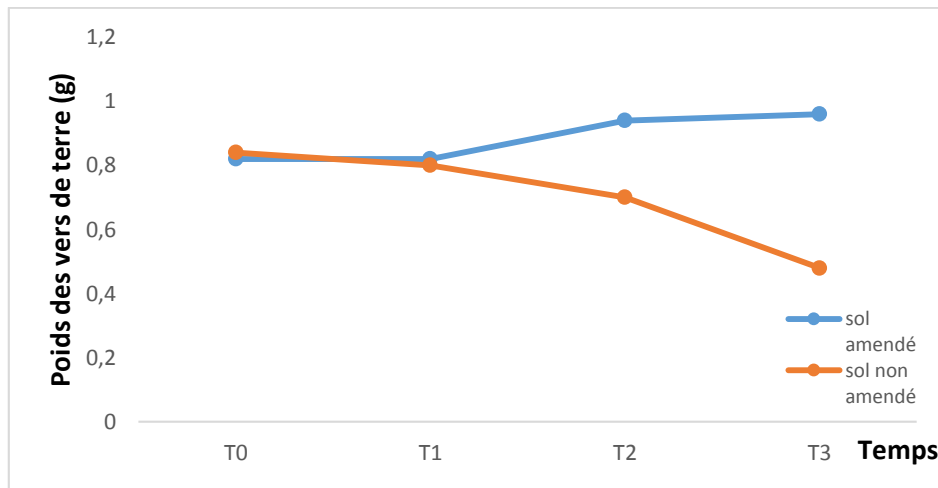


Figure 12 : Variation du poids des vers de terre dans le temps de terre dans les sols amendé et non-amendé Le test de Student pour la toxicité sur les vers de terre a révélé qu’il y’avait une différence significative du nombre de vers vivants entre le sol amendé et le sol non-amendé, avec p-value 0,01527 mais qu’il n’y’avait pas de différence significative de leur poids (p-value = 0,07442) dans les deux sols.

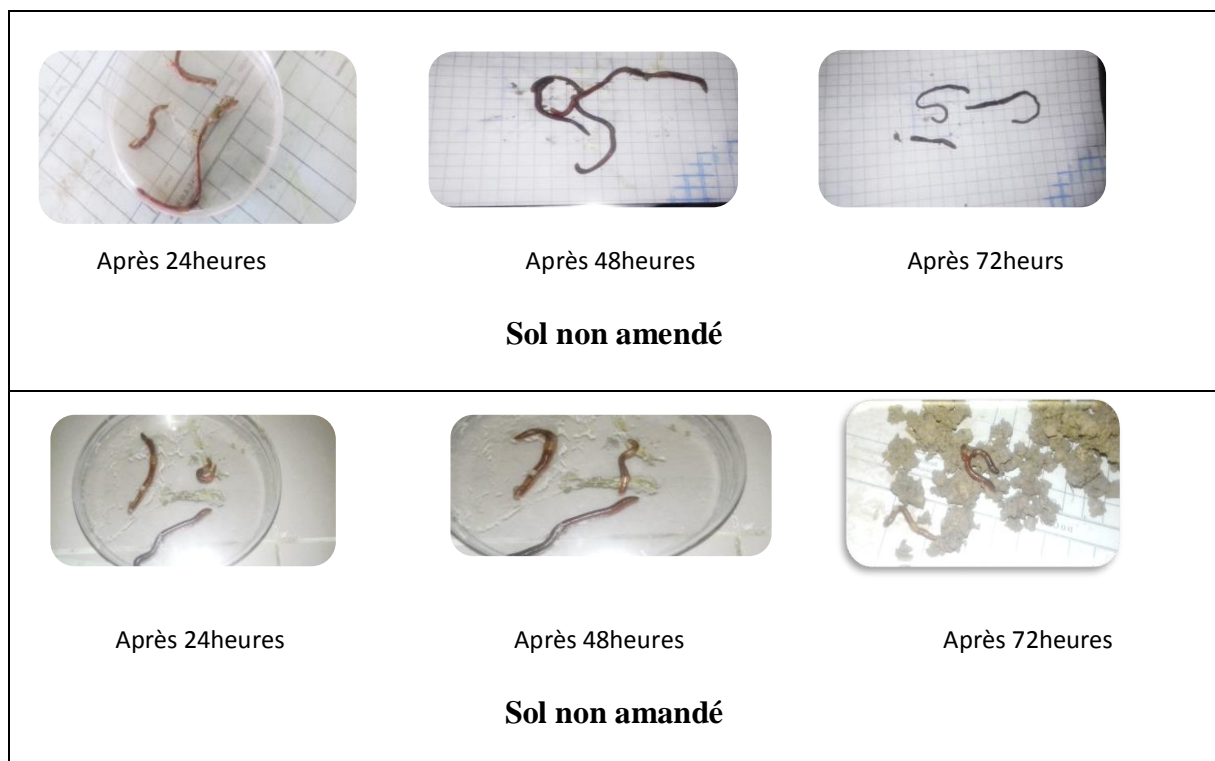


Figure 13 : Aspect des vers de terre pendant leur exposition au sol amendé et au sol non-amendé

Il est à souligner que dans le sol non-amendé, un changement morphologique dans le corps des vers de terre a été observé au-delà de 24 heures.

2. Discussion :

Concernant la température du sol, elle a oscillé entre 20 et 30°C dans le sol amendé, ce qui favorise la biodégradation des constituants des carburants. En effet, Margesin et Schinner (1997) notent que la température optimale pour la biodégradation des hydrocarbures dans le sol est comprise entre 20 et 30°C.

Aussi, la charge microbienne initiale était élevée dans le sol amendé, en raison de la présence des boues activées. Ceci a favorisé le rapprochement intime des matrices (sol/substrats) par des réactions physico-chimiques et biologiques (activité métabolique) pour rendre les carburants faciles à dégrader par les microorganismes (Rhbal et al, 2020).

Au-delà de la 6^{ème} semaine, la température du sol baisse, ce qui pourrait indiquer le début de la phase de stabilisation du compost qui se caractérise, selon Rhbal et al. (2020), par un changement de température. Selon Zarren (2006), la diminution de la température marque le début de la phase de maturation durant laquelle a lieu la synthèse des éléments précurseurs de l'humus.

Dans le sol non-amendé, la phase de dégradation a duré plus longtemps. Ceci est indiqué par le fait que la température n'a pas baissé pendant l'incubation. L'absence des boues activées dans ce sol explique la lenteur de la dégradation des hydrocarbures.

L'évolution du pH du sol suit celle de la température. Le pH du sol amendé s'élève jusqu'à une valeur de 8,59 vers la 6^{ème} semaine. Ce résultat concorde avec ceux de Michel et Reddy (1998) et ceux d'Eklin et Kirchmann (2000) qui ont montré que les composts soumis à des bonnes conditions d'oxygénation ont des pH qui atteignent des valeurs voisines de 8. Par ailleurs, les valeurs enregistrées durant cette phase sont propices à la biodégradation. En effet, Webet et Gainey (1951) et Cookson (1995) ont avancé que le processus de biodégradation se déroule généralement dans des pH compris dans l'intervalle [6,5 ; 9], plus particulièrement la biodégradation des hydrocarbures. Le pH du sol amendé a, ensuite, baissé après la 6^{ème} semaine d'incubation marquant ainsi la formation probable d'acides organiques constituant de l'humus du sol (acides humatomes, fulviques et humiques). Dans le sol non-amendé, l'élévation du pH continue jusqu'à la fin de l'expérience, indiquant que les acides organiques ne se sont pas encore formés.

Le taux d'humidité, quant à lui, a été plus élevé dans le sol non-amendé, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'une plus grande quantité d'hydrocarbures qui ne seraient pas

dégradés rapidement par rapport au sol amendé. Selon Bergue et Merienne (1986), les sols contenant des hydrocarbures ont 2% d'humidité de plus que les sols n'en contenant pas.

L'augmentation de l'humidité du sol au-delà de la 6^{ème} semaine d'incubation, dépassant même l'humidité du sol non-amendé, indique une éventuelle rétention de l'eau par les composés humiques issus de la néo-synthèse.

En ce qui concerne l'activité biologique, elle est plus intense dans le sol non-amendé que dans le sol amendé car l'activité de dégradation était plus intense dans le sol non-amendé à la fin de l'incubation. Des études montrent que dans les sols contaminés par les carburants, les paramètres biologiques du sol tels que la respiration augmentent (Margesim et al., 2000). L'activité de la catalase, en revanche, n'est pas influencée par l'apport de boues activées.

A la fin de l'incubation, nous avons constaté une augmentation considérable du taux de germination des graines ainsi que l'élongation racinaire du maïs, une absence de mortalité des vers de terre et une augmentation de leur poids dans le sol amendé. Ces résultats montrent que la toxicité due à la présence des carburants a fortement baissé suite à l'incorporation des boues activées qui ont accéléré la phase de dégradation. Ceci vient confirmer les résultats que nous avons obtenus pour les paramètres physico-chimiques et biologiques qui indiquent une diminution de la quantité de carburants dans ce sol. Le compostage du sol en présence des boues secondaires a donc, été efficace pour décontaminer le sol pollué aux carburants.

La légère augmentation du taux de germination et de l'élongation racinaire du maïs dans le sol non-amendé est due à la dissipation des carburants par atténuation naturelle. Néanmoins, ce processus n'a pas suffi pour décontaminer le sol, ce qui explique la mortalité de 2/3 des vers de terre et la diminution de leurs poids au bout de 72 heures d'exposition.



Conclusion générale

Nous avons entrepris un essai de dépollution d'un sol pollué aux carburants en utilisant un traitement biologique qui est le compostage en présence de boues activées.

D'après les résultats obtenus au cours de ce travail, nous pouvons dire que la technique de décontamination testée a donné l'efficacité escomptée.

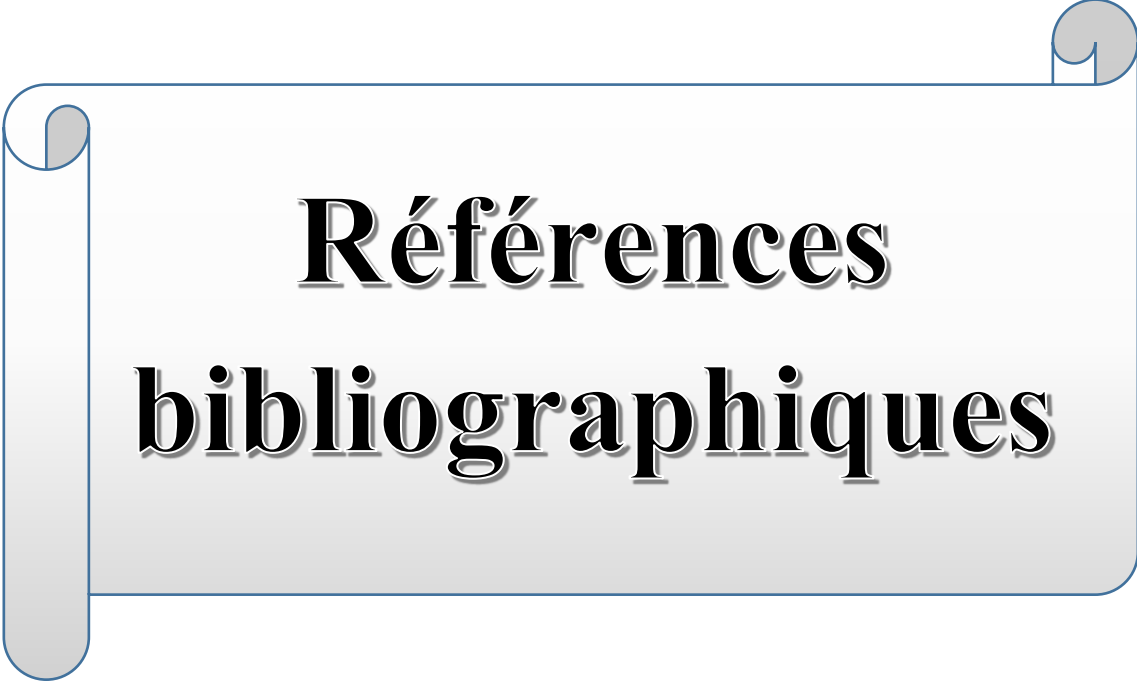
Au cours de l'incubation, le suivi des paramètres physico-chimiques du sol a montré que le processus du compostage a été accéléré par la présence des boues biologiques, avec notamment une baisse de la température et du pH, une élévation de l'humidité au-delà de la 6^{ème} semaine indiquant le début de la phase de stabilisation par comparaison au sol non-amendé avec les boues. Ces résultats sont confirmés par une activité biologique moins intense dans le sol amendé, avec un moindre dégagement de CO₂, après huit semaines d'incubation car la phase de dégradation n'était pas encore achevée dans le sol non-amendé. L'activité de la catalase, quant à elle, n'a pas été affectée par ce processus.

La grande amélioration du taux de germination et de l'élongation des racines de maïs obtenus dans le sol amendé montre que la toxicité des carburants a baissé considérablement. L'absence de mortalité et l'augmentation du poids des vers de terre dans ce sol a, également, été observée. Tout cela indique une élimination d'une quantité importante des hydrocarbures présents initialement dans le sol et une amélioration de la qualité du sol.

Dans le sol non composté, la baisse relative de la toxicité par rapport à l'état initial du sol peut être attribuée à l'atténuation naturelle.

A l'issu de ce travail, nous proposons de :

- ❖ Compléter cette étude en suivant le processus de compostage sur une période plus longue.
- ❖ Réaliser des essais sur d'autres sols et d'autres hydrocarbures pour confirmer les résultats obtenus.
- ❖ Utiliser des boues activées à différentes concentrations.

A decorative graphic of a scroll with a light gray gradient and a blue border. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curled up. The text is centered within the unrolled portion.

Références bibliographiques

1. **Aberkane M., Ayach R. 2018** : Essai de bioremédiation de sol pollué au gasoil par des bactéries Hydrocarbonoclastes. Memoire de Master. Université des frères Mentouri Constantine.p49.
2. **Agarry.S., Ogunley. 2012**: Box-Behnken design application to study enhanced bioremediation of soil artificially contaminated with spent engine oil using biostimulation strategy. International Journal of Energy and environmental Engineering.
3. **Ballerini ., Vendaecastale.1999** : La restauration par voie microbiologique des sols contaminés par les polluants organique. Biotechnologie, coordinateur R. scriban, 5ème édition Tech et doc. p900.
4. **Benchouk A. 2017**: Bioremediation des sols polluent de pétrole par les micro-organismes indigènes et amélioration génétique de leur pouvoir. Thèse doctorants. Université d'IBEN BASID MOUTAGANEM. p772.
5. **Bouderhem A. 2012**: utilisation des souches Bactérienne Telluriques Autochtones dans la bio détection et la bioremediation des sols pollué par les hydrocarbures. Mémoire de Master. Université KASDI'MERBAH-OURGLA.p 91.
6. **Colin F. 2000** : pollution localisées des sols et sous-sol par les hydrocarbures et les solvants chlorés. Rapport N° 44, Edition, Tech et doc. Paris. p 417.
7. **Colombano S., Saada A., Guerin V., Ballenfant G., Beranger S., Hube D., Blanc C., Zoring C., Girargeau L. 2010** : Quelques techniques pour quels traitement-Analyse coutent bénéfice : Rapport annuelle juin 2010 : BRGM/RP-58609. p403.
8. **Gabet S. 2004** : Remobilisation des HAP présent dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine biologique. Thèse de l'environnement. Université Limogs. p177.
9. **Rahbal H., Souabi S., Safi M., Terta M., Arad M., Anouzela A., Hafidi M. 2020** : Décontamination des sols pollues par les hydrocarbures. Scientific study and research: chemisty and chemical Enginneering. ISSN 1582-540X. p16.
10. **Khalil H. 2004** : Etude de faisabilité de l'utilisation de molécule « cage » dans la dépollution des sols : stabilisation et extraction de polluants organique par les cyclo dextrines. Thèse doctorant. p 180.
11. **Koller E. 2004** : traitement de pollutions industrielles. Eau, Air, Déchets, Sol, Boues. Edition Dunod. Paris. Série Environnement et sécurité. p424.
12. **Nait Abdelkader S., Djenad M. 2015** : Essaie de remédiation d'un sol pollué aux hydrocarbures par bio stimulation cas des stations-services. Mémoire fin d'étude. UMMTO. p27.

- 13. Nielsen., Guillaume. 2011 :** traitement physique de sols contaminés par des HAP et retraitement des concentrés de HAP pour valoriser les sols. Mémoire Québec. Université du Québec. Institut national de la recherche scientifique Maitrise en science de la terre. p144
- 14. Pascal- Roudier. 2004 :** Technique de réhabilitation des sites et sols pollués. Fiche de synthèse.
- 15. Pascal Fokou Mbogne, 2017 :** Bioremeditaion augmentée des sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organiques. Mémoire de l'école technologie supérieur. Université du QUEBEC. p109.
- 16. Remdani N. 2015 :** transformation de la matière organique au cours de Co-compostage de boue de station d'épuration et des déchets verts : approche expérimental pour une production durable de compost. Thèse de doctorat. Université d'ORAN AHMD BEN BELLA. p 195.
- 17. Remy-Albrecht. 2007 :** Co-compostage de boues de station d'épuration et de déchets verts : nouvelle Méthodologie du suivi de la transformation de la matière organique. Thèse doctorat. Université PAUL CEZANNE AIX-MARSEILLE III. p170.
- 18. Schoor. 2003:** phytoremediation transformation and control of contamination. Dans Wiley- interciences, INC, NJ, USA, p987.
- 19. Siméon., Nathalie. 2007 :** Décontamination de sols pollués par les hydrocarbures aromatiques polycycliques par biodégradation en présence de substrat organiques. Mémoire Québec. Université du Québec. Institut national de la recherche scientifique. p151.
- 20. Tahseen S., Sanchez A. 2020:** bioremediation of PAH-Contaminated soils: Process Enhancement through Composting/Compost. Vol 10. p20.
- 21. Techer D. 2018 :** Réhabilitation des sols pollués par les HAP grâce aux bactéries associés à la rhizosphère de Miscanthus X gignateus. Thèse doctorat. Université Paul Verlaine de METZ. p352.
- 22. Vidali. 2001:** Bioremediation an orview, pure appel. Hem. p 222.
- 23. Zareen K., Anjaneyulu Y. 2006:** bioremediation of contaminated soil and sediment by composting. Remediation journal: The journal of Environmental Cleanup Costs. N°: 109-122.



Les annexes

Annexe1 : les paramètres de sol durant processus du compostage

la semaine	Sol amendé				Sol non amendé			
	répétitions	Ph	T°	humidité	répétitions	ph	T°	humidité
La 1ère semaine	1	7,49	20	13,82%	4	7,45	19	14,39%
	2	7,76	20	13,8%	5	7,5	19	14,23
	2	7,78	20	13,79%	6	7,58	19	14,26
	moyenne	7,67667	20	13,79%	moyenne	7,51	19	14,29%
La 2ème semaine	1	7,71	21	11,11%	4	7,71	19	13,67%
	2	7,69	21	12,38%	5	7,58	19	13,64%
	3	7,68	21	13,78%	6	7,53	19	13,66%
	moyenne	7,69333	21	12,42%	moyenne	7,6	19	13,66%
La 3ème semaine	1	8,32	24	11,39%	4	8,23	19	13,50%
	2	8,4	24	11,34%	5	8,33	19	12,68%
	3	8,39	24	11,30%	6	8,08	19	12,60%
	moyenne	8,37	24	11,34%	moyenne	8,21	19	12,93%
La 4ème semaine	1	8,23	27	10,60%	4	8,21	22	11,75%
	2	8,4	27	10,57%	5	8,17	22	11,76%
	3	8,54	27	10,54%	6	8,28	22	11,77%
	moyenne	8,39	27	10,57%	moyenne	8,22	22	11,76%
La 5ème semaine	1	8,41	30	9,40%	4	8,3	25	10,54%
	2	8,45	30	9,53%	5	8,34	25	10,52%
	3	8,47	30	9,28%	6	8,32	25	10,51%
	moyenne	8,44333	30	9,40%	moyenne	8,32	25	10,52%
La 6ème semaine	1	8,6	29	7,07%	4	8,46	25	10,34%
	2	8,59	29	7,06%	5	8,47	25	10,31%
	3	8,58	29	7,09%	6	8,48	25	10,32%
	moyenne	8,59	29	7,07%	moyenne	8,47	25	10,32%
La 7ème semaine	1	8,44	27	6,66%	4	8,49	25	10,10%
	2	8,46	27	6,58%	5	8,53	25	10,11%
	3	8,45	27	6,75%	6	8,52	25	10,12%
	moyenne	8,45	27	6,66%	moyenne	8,51	25	10,11%
La 8ème semaine	1	8,44	25	10,34%	4	8,54	25	9,42%
	2	8,42	25	10,31%	5	8,52	25	9,39%
	3	8,43	25	10,32%	6	8,53	25	9,40%
	moyenne	8,43	25	10,32%	moyenne	8,53	25	9,40%

Annexe 2 : Les paramètres de sol initial avant le traitement

Les répétitions de sol	La température °C	pH	Humidité %
1	20	7.49	13.82%
2	20°C	7.76	13.8%
3	20°C	7.78	13.79%
4	19°C	7.45	14.39%
5	19°C	7.50	14.23%
6	19°C	7.58	14.26%

Annexe 3 : Le taux de germination des graines du maïs dans le sol amendé et le sol non amendé

	Sol amendé	sol non amendé
	91,10%	42,21%
	89,99%	8,88%
	94,44%	35,55%
La moyenne	91.84%	28.88%

Annexe 4 : Elongation racinaires des graines de maïs dans le sol amendé et le sol non amendé

	répétitions	1 ^{ère} mesure	2 ^{ème} mesure
Sol amendé	1	14.3 cm	20.1 cm
	2	15 cm	20cm
	3	11.4cm	17.3 cm
Sol non amendé	4	2.4 cm	3.5 cm
	5	3.3 cm	5.3 cm
	6	4.3 cm	8.1cm

Annexe 5 : Le nombre de vers de terre vivants et de morts dans le sol amendé et non amendé

	nombre de vivant	Nombre de mort	temps
Sol amendé	3	0	Après 24h
	3	0	Après 48h
	3	0	Après 72h
Sol non amendé	1	2	Après 24h
	0	3	Après 48h
	0	3	Après 72h

Annexe 6 : le poids des vers de terre durant leurs exposer au sol amendé et le sol non amendé

	après24h	après 48h	après 72h
sol amendé	0,82 g	0,94 g	0,96 g
sol non amendé	0,8 g	0,7 g	0,48 g

Annexe 7 : Le test student pour taux de germination du maïs dans le sol amendé et non amendé

```
> t.test(TG[sol=="trt"],TG[sol=="ntrt"],var.equal=T)

Two Sample t-test

data: TG[sol == "trt"] and TG[sol == "ntrt"]
t = 6.1305, df = 4, p-value = 0.003588
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 34.44765 91.47901
sample estimates:
mean of x mean of y
 91.84333  28.88000
```

Annexe 8 : Le test student pour élongations racinaire des graines de maïs dans le sol amendé et non amendé

```
> t.test(pds[sol=="trt"],pds[sol=="ntrt"],var.equal=T)

      Two Sample t-test

data:  pds[sol == "trt"] and pds[sol == "ntrt"]
t = 2.1567, df = 6, p-value = 0.07442
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.02489788  0.39489788
sample estimates:
mean of x mean of y
  0.880     0.695
```

Annexe 9 : Le test student pour le poids des vers de terre dans le sol amendé et non amendé

```
> t.test(pds[sol=="trt"],pds[sol=="ntrt"],var.equal=T)

      Two Sample t-test

data:  pds[sol == "trt"] and pds[sol == "ntrt"]
t = 2.1567, df = 6, p-value = 0.07442
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 -0.02489788  0.39489788
sample estimates:
mean of x mean of y
  0.880     0.695
```


Résumé

L'objectif de notre travail c'est d'évaluer l'efficacité de la décontamination du sol pollué par les carburants (cas station-service) par l'ajout de boues activées lors du processus de compostage. Des paramètres physico-chimiques (pH, Température, Humidité) ont été contrôlés pour assurer du bon déroulement du processus et pour permettre le suivi de ses étapes

Les résultats obtenus montrent que l'apport des boues a accélère le compostage. Ceci ressort de l'évaluation de la température, de l'humidité et du pH durant le processus et de l'activité biologique du sol après 8 semaines d'incubation. Les bio-essai ont montré que la toxicité a diminué dans le sol amendé. L'amélioration de la germination et de l'élongation racinaire du maïs, l'absence de la mortalité des vers de terre, ainsi que l'augmentation de leur poids confirme ces résultats.

Mots clés : sol pollué, compostage du sol, les boues activées, les carburants.

Abstract

The objective of our work to evaluate the efficiency of decontamination of a fuel-contaminated soil (case of gaz station) by adding activated sludges during composting process. Physico-chemical parameters (pH, temperature and moisture) have been controlled in order to ensure the smooth running of the process and allow steps follow-up.

The results obtained show that the addition of sludges accelerated composting. This is evident from the changes in temperature, humidity and pH during the process and the biological activity of the soil after 8 weeks of incubation. Improved germination and root elongation of maize, the absence of earthworm mortality, as well as the increase in their weight confirm this result.

Keywords: polluted soil, soil composting, activated sludge, fuels