

**République Algérienne Démocratique et Populaire.**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de La Recherche Scientifique.**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.**

**Faculté des Sciences Biologique et des Sciences Agronomiques.**

**Département d'Écologie et Environnement.**



**Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Ecologie et environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

**Thème ;**

**Effet des ajouts organiques sur le compostage  
d'un sol pollué aux carburants**

**Présenté par : BENARAB Mokrane**

**Devant les membres de jury :**

**Présidente :** Mme LANDRI G.

M.A.A.

U.M.M.T.O

**Promotrice :** Mme SADOUDI-ALI AHMED D.

Professeur

U.M.M.T.O

**Co-promotrice:** Mme ALI AHMED S.

M.C.B

U.M.M.T.O

**Examinatrice :** Mme CHIBANE G.

M.A.A

U.M.M.T.O

**Année Universitaire:2024 /2025**

# Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu pour m'avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

J'exprime ensuite ma profonde gratitude à Madame SADOUDI-ALI AHMED D., Professeure à la FSBSA et directrice du laboratoire PSEMRVC, pour m'avoir accueillie dans son laboratoire et pour avoir mis à ma disposition tous les moyens nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont également à Madame ALI AHMED S., Maître de Conférences (MCB) à la FSBSA, ma co-promotrice, pour ses orientations, ses conseils avisés, son soutien constant et ses encouragements tout au long de ce travail.

Je remercie sincèrement Madame LANDRI G., Maître-Assistante (MAA) à la FSBSA, Présidente du jury et Madame CHIBANE G., pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Mes remerciements s'adressent aussi à Madame ABROUS H., ingénieure au laboratoire PSEMRVC, pour son aide précieuse et sa grande gentillesse.

Mes remerciement particulièrement à Salah BENARAB mon frère, ingénieur en géologie et étudiant en génie de l'environnement, pour son soutien constant, ses conseils avisés et ses encouragements qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours.

J'adresse un grand merci à tout mes enseignants qui m'ont encadré et enseigné durant ce parcours à l'université de l'UMMTO.

Enfin à ma famille ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

## Dédicaces

Je dédie ce travail à la mémoire de ma chère et unique sœur Feroudja, que je n'ai malheureusement pas eu la chance de connaître. Que ce travail soit un humble hommage à sa mémoire.

À mes frères Rabah, Rachid, et Salah,

À mes parents, piliers de ma vie. Que Dieu les protège et leur accorde une longue vie en bonne santé.

À tous mes camarades de promotion, ainsi qu'à l'ensemble de mes amis rencontrés durant mon parcours universitaire.

Enfin, je dédie ce mémoire à toutes celles et ceux qui sont derrière la science, en la connaissance, et en la capacité de l'esprit humain à construire un monde meilleur.

**« La science est la lumière qui éclaire les chemins du développement. »**

## Liste des abréviations

**F:** Fumier.

**S:** Sciure.

**P:** Paille.

**G:** Grignon d'olive.

**T:** Témoin.

**C:** cendre de bois.

**HC :** Hydrocarbures.

**TG:** Taux de germination.

**CAT:** Activité de la catalase.

**Tr/mn :** Tour par minute.

**T.O:** Tizi Ouzou.

**EPA:** Environmental Protection Agence.

**CNULD:** Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification.

**FAO:** Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

**HAP:** Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques.

**UV:** ultraviolet.

**CET :** Centre d'Enfouissement Technique.

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Devenir d'une pollution pétrolière à la surface du sol (Roger et Jacq, 2000).....	4
<b>Figure 2:</b> Structure moléculaire des hydrocarbures pétroliers (Colombano et collab, 2008) ...	4
<b>Figure 3:</b> Courbe théorique d'évolution de la température au cours du compostage.....	9
<b>Figure 4:</b> Image satellitaire de la station-service de Boukhalfa (Google Earth, 2025). ....	13
<b>Figure 5:</b> Dispositif de l'essai de toxicité sur les vers de terre d' <i>Eisenia fetida</i> . ....	17
<b>Figure 6:</b> Dispositif de l'essai de toxicité sur des grains de maïs ( <i>Zea mays</i> ) ....	18
<b>Figure 7:</b> Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol. ....	19
<b>Figure 8:</b> Protocole de dosage de l'activité de la catalase.....	20
<b>Figure 9:</b> Protocole d'extraction et de quantification des hydrocarbures. ....	21
<b>Figure 10:</b> Schéma du protocole de caractérisation des HAP par spectrophotométrie UV. ...	22
<b>Figure 11:</b> Taux de survie des vers de terre .....	24
<b>Figure 12:</b> Taux de germination des grains de maïs .....	25
<b>Figure 13:</b> La quantité de CO <sub>2</sub> dégagé en (mg/100g du sol) .....	26
<b>Figure 14:</b> Volume de KMnO <sub>4</sub> utilisé pour doser le H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> résiduel (Activité de la catalase)..	27
<b>Figure 15:</b> Volume de KMnO <sub>4</sub> utilisé pour doser le H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> résiduel (Activité de la catalase)..	28

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1:</b> Nature chimique des hydrocarbures (Mackay & Shiu, 2006).....	5
<b>Tableau 2:</b> Rôle des Micro-organismes dans le compostage (Sundberg &Tullberg ,2012) ..	10
<b>Tableau 3:</b> Dispositif expérimental .....	16
<b>Tableau 4 :</b> Composition des HAP dans les amendements organiques (sciure, fumier, cendre, grignon d'olive et la paille) .....	29

## Table des matières

<b>Introduction</b> .....	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : Synthèse bibliographique</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Pollution du sol</b> .....	<b>3</b>
1.1 Définition de la pollution du sol.....	3
1.2 Sites et sols pollués.....	3
1.3 Pollution des sols par les hydrocarbures .....	3
1.4 Structure moléculaire des hydrocarbures .....	4
1.5 Classification chimique des hydrocarbures .....	5
1.6 Origine de la pollution par les carburants.....	5
1.7. Source principale des hydrocarbures.....	6
1.8. Impacts des carburants sur le sol et les écosystèmes.....	6
1.9. Procédures de dépollution des sols pollués aux carburants.....	7
<b>2. Le compostage</b> .....	<b>8</b>
2.1. Définition du compostage .....	8
2.2 Phases du compostage.....	8
2.3 Rôle des microorganismes.....	9
2.4 Application du compostage dans la dégradation des carburants.....	10
2.5 Ajouts organiques lors du compostage.....	11
<b>CHAPITRE II : Matériel et méthodes</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Matériel</b> .....	<b>13</b>
1.1. Sol.....	13
1.2 Matériel végétal.....	14
1.3 Matériel animal.....	14
1.4 Substrats organiques.....	14
<b>2. Méthodes</b> .....	<b>16</b>
2.1. Méthode d'échantillonnage du sol .....	16
2.2. Préparation du sol.....	16
2.3. Suivi de compostage.....	17
2.4. Évaluation de l'efficacité du compostage.....	17
2.4.1. Test de toxicités sur les vers de terre.....	17
2.4.2. Germination des graines de maïs.....	18
2.4.3. Respiration microbiennes .....	19

2.4.4. Activité de la catalase .....	20
2.4.5. Etude quantitative des hydrocarbures résiduels : .....	21
2.4.6. Etude qualitative des hydrocarbures aromatique résiduels.....	22
2.5. Analyse statistique des données .....	23
<b>CHAPITRE III : Résultats et discussion .....</b>	<b>1</b>
<b>1. Résultats .....</b>	<b>24</b>
1.1 Test de toxicité sur les vers de terre .....	24
1.2. Test de germination des graines de maïs .....	25
1.3. Respiration microbienne.....	26
1.4. Activité de la catalase .....	27
1.5. Étude quantitative des hydrocarbures résiduels .....	28
1.6. Études qualitative des hydrocarbures résiduels .....	29
<b>2. Discussion .....</b>	<b>30</b>
<b>Conclusion .....</b>	<b>33</b>
<b>Référence bibliographique .....</b>	<b>35</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>39</b>

## Introduction

Le sol, ressource naturelle précieuse et non renouvelable à l'échelle humaine, constitue le socle de la vie terrestre. Il joue un rôle fondamental dans la régulation du cycle de l'eau, comme support de la végétation et réservoir de la biodiversité et constitue un lieu de stockage du carbone. En outre, il constitue la base de l'agriculture et de la sécurité alimentaire mondiale (Montanarella et al., 2016). La formation du sol est un processus lent, complexe, qui résulte de l'altération progressive des roches-mères sous l'action combinée du climat, des organismes vivants, du relief et du temps. Ce phénomène est connu sous le nom de « pédogenèse » (Jenny, 1941).

Le sol pollué, notamment par les hydrocarbures, représente une menace majeure pour les écosystèmes et la santé humaine. Cette problématique est accentuée par la croissance industrielle mondiale et la dépendance persistante aux combustibles fossiles (Bamforth & Singleton, 2005). Plusieurs initiatives internationales, notamment la Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification (CNULD), la Convention de Bâle, et les directives de la FAO, soulignent l'importance d'une gestion durable des sols pour préserver la sécurité alimentaire, atténuer les changements climatiques et protéger la biodiversité (FAO, 2015).

En Algérie, l'exploitation des ressources pétrolières entraîne des risques environnementaux importants, notamment la pollution des sols par les hydrocarbures. Les déversements accidentels, les fuites et les rejets liés aux activités de transport peuvent provoquer une contamination durable des sols (Bouterfas et al., 2020).

Plusieurs travaux réalisés à au sein du laboratoire PSEMRVC de la FSASB de l'UMMTO. sur les différentes techniques de dépollution des sols contaminés par les carburants. Parmi ces approches, les méthodes biologiques attirent une attention croissante en raison de leur capacité à favoriser la dégradation des polluants organiques (Ali Ahmed, 2022). Ces techniques incluent notamment l'utilisation de bioréacteurs, la phytoremédiation et le compostage.

D'autres études ont mis en évidence l'efficacité de divers amendements organiques dans l'optimisation du compostage, notamment Sai et Tighrine (2021) ont démontré l'intérêt des boues activées, tandis que Boukrou et Nait Si Ahmed (2022) ont souligné les effets bénéfiques du grignon d'olive. Bouacem et Chabane (2022) quant à elles, ont étudié

l'efficacité du fumier de bovins, de grignon d'olive et de la paille sur un sol pollué aux carburants, concluant que le fumier est l'amendement le plus performant.

C'est dans ce contexte que s'inscrit notre travail, dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité de quatre amendements organiques (le fumier d'ovin, le grignon d'olive, la paille et les cendres de bois), associés à la sciure de bois, sur le compostage d'un sol contaminé par les carburants prélevés au niveau d'une station-service située à Boukhalfa. Cette efficacité a été évaluée par différents tests (test de toxicité sur les vers de terre, test de germination des grains de maïs, respiration microbiennes, activité de la catalase, quantification et caractérisation des hydrocarbures résiduels).

Le présent mémoire se subdivise en trois chapitres. Le premier constitue une synthèse bibliographique traitant la pollution du sol par les hydrocarbures et de leurs impacts, ainsi que les principales techniques de décontaminations, le compostage et l'effet des ajouts organiques sur l'efficacité de ce procédé. Le deuxième chapitre présente la station d'étude, le matériel utilisé, ainsi que les méthodes expérimentales mises en œuvre. Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats obtenus et à leur discussion. Ce travail se conclut par une conclusion générale et quelques perspectives pour des recherches futures.

# **CHAPITRE I : Synthèse bibliographique**

## **1. Pollution du sol**

Le sol est un élément clé de l'environnement terrestre, constitué d'un mélange complexe de minéraux, d'organismes vivants, d'air et d'eau. Il sert de support à la végétation et constitue un réservoir de nutriments essentiels à la croissance des plantes. Le sol se forme par un processus lent d'altération des roches et de décomposition de la matière organique au fil du temps (Brady & Weil, 2016).

### **1.1 Définition de la pollution du sol**

La pollution du sol correspond à la contamination des sols par des substances chimiques, biologiques ou physiques, souvent introduites par des activités humaines (Alloway, 2013).

Cette pollution résulte en grande partie des activités, telles que l'agriculture intensive qui fait un usage excessif de pesticides et d'engrais, les décharges non régulées et les fuites de produits chimiques industriels ou d'hydrocarbures. Parmi les principaux polluants figurent les métaux lourds, les pesticides, les produits chimiques industriels et les déchets organiques (FAO, 2018). Ces substances polluantes affectent gravement la fertilité des sols, contaminent les eaux souterraines et mettent en péril la biodiversité locale (Charnay, 2005).

### **1.2. Sites et sols pollués**

Un site pollué désigne une zone géographique où les sols, l'air ou l'eau ont été contaminés par des substances toxiques qui peuvent s'infiltrer dans les sols et perturber l'écosystème (European Environment Agency, 2020).

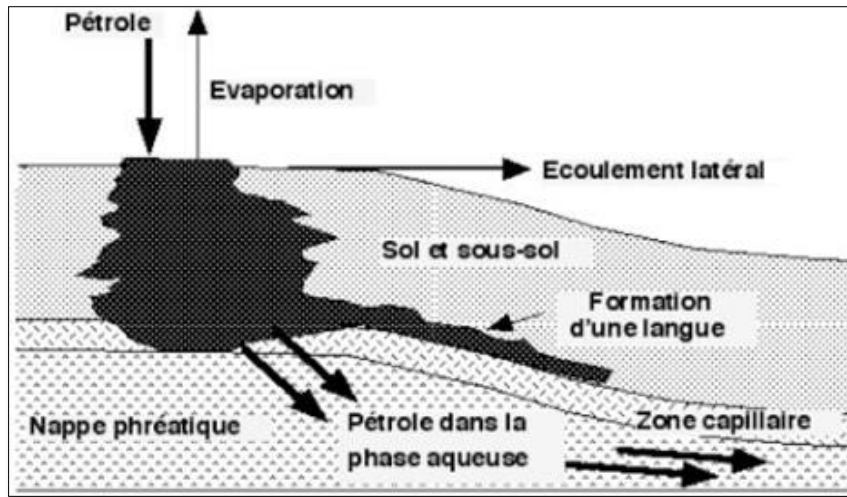
La pollution du sol présente des risques pour la santé publique, car certains polluants peuvent se transmettre via l'eau potable ou la chaîne alimentaire (Adriano, 2001).

### **1.3. Pollution des sols par les hydrocarbures**

Les hydrocarbures sont présents dans les combustibles fossiles tels que le pétrole, le gaz naturel et le charbon. Ils sont largement utilisés dans les secteurs de l'énergie, de l'industrie chimique et des transports. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), sont considérés comme des polluants environnementaux et des agents cancérogènes potentiels pour l'homme (Mackay & Shiu, 2006).

Les hydrocarbures pénètrent verticalement à travers la zone non saturée du sol jusqu'à atteindre la nappe phréatique (Figure 2). En raison de leur faible solubilité dans l'eau et de

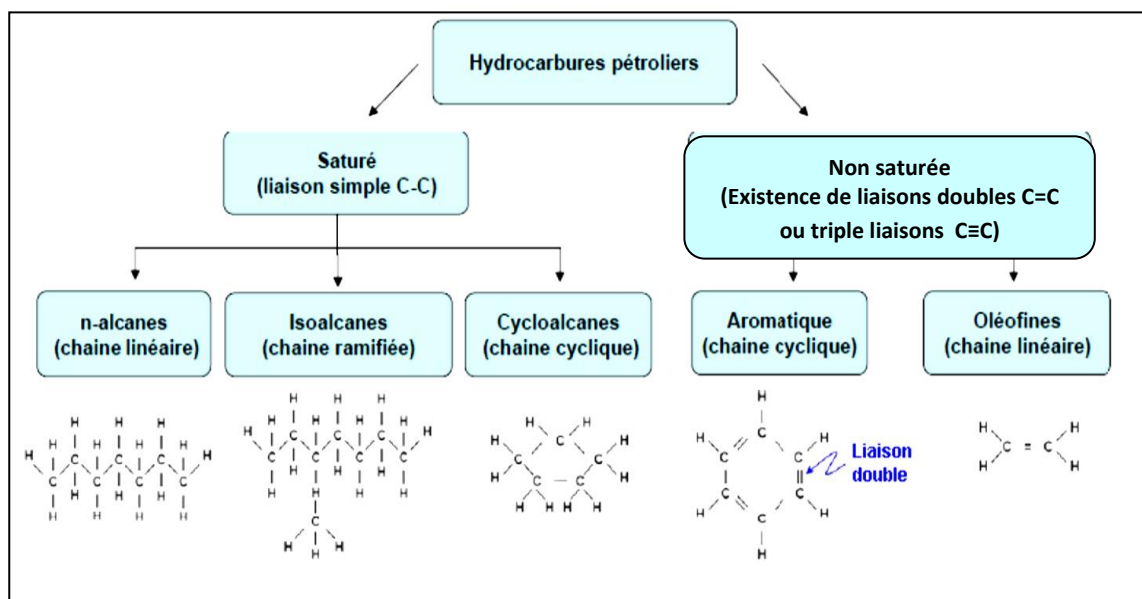
leur densité généralement plus faible que celle de l'eau, ils forment une couche flottante au-dessus de la nappe. Cette contamination se propage ensuite horizontalement, poussé par les gradients de pression, contaminant ainsi un large zone du sous-sol.



**Figure 1:** Devenir d'une pollution pétrolière à la surface du sol (Roger et Jacq, 2000).

## 1.4. Structure moléculaire des hydrocarbures

Les hydrocarbures organisés en chaînes ou en cycles de différentes longueurs et configurations. La diversité de ces structures explique la variété des propriétés physico-chimiques des hydrocarbures, telles que leur fréquence, leur solubilité, ou encore leur comportement dans l'environnement, notamment lors de la pollution des sols et des eaux.



**Figure 2:** Structure moléculaire des hydrocarbures pétroliers (Colombano et all, 2008)

## 1.5. Classification chimique des hydrocarbures

Les hydrocarbures constituent une famille de composés organiques exclusivement composés de carbone et d'hydrogène. Ils sont classés en différentes catégories selon la nature de leurs liaisons chimiques et la structure de leur squelette carboné. On distingue principalement les hydrocarbures saturés (alcanes), insaturés (alcènes et alcynes), ainsi que les hydrocarbures aromatiques, qui peuvent être monocycliques ou polycycliques (Tableau 1).

**Tableau 1.** Nature chimique des hydrocarbures (Mackay & Shiu, 2006)

Type d'hydrocarbures	Structure chimique	Exemples	Caractéristiques
<b>Hydrocarbures saturés (alcanes)</b>	Uniquement des liaisons simples entre les atomes de carbone.	Méthane(CH <sub>4</sub> ), Propane (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> )	Stables, peu réactifs, présents dans le gaz naturel et les carburants.
<b>Hydrocarbures insaturés (alcènes)</b>	Une ou plusieurs doubles liaisons entre les atomes de carbone.	Éthylène (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ), Propylène (C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> )	Plus réactifs que les alcanes, utilisés comme matières premières dans l'industrie chimique.
<b>Hydrocarbures insaturés (alcynes)</b>	Une ou plusieurs triples liaisons entre les atomes de carbone.	Acétylène (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )	Très réactifs, utilisés comme gaz industriel pour la soudure et la découpe des métaux.
<b>hydrocarbures aromatiques monocycliques</b>	Contiennent un ou plusieurs cycles aromatiques avec des électrons délocalisés.	Benzène (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> ), Toluène (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	Très stables, souvent toxiques, utilisés comme solvants ou pour synthétiser des plastiques et des colorants.
<b>Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)</b>	formés de plusieurs cycles aromatiques benzéniques fusionnés	Naphtalène (C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> )	Très peu solubles dans l'eau, résistants à la dégradation naturelle

## 1.6. Origine de la pollution par les carburants

Les carburants sont des substances énergétiques, principalement utilisées pour alimenter les moteurs et les systèmes de chauffage par combustion bien qu'ils soient pour les transports et l'industrie, leur utilisation contribue aux émissions de gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), et au changement climatique (Hirsch et al, 2005).

### **1.7. Source principale des hydrocarbures**

Les hydrocarbures naturels trouvent leur origine dans la dégradation de la matière organique, accumulée au fond des océans, enfouie sous des couches des sédiments et en l'absence d'oxygène, cette matière se transforme progressivement en kérogène sous l'effet de la pression et de la température. Lorsque les conditions thermiques sont optimales (entre 60 °C et 150°C), le kérogène génère du pétrole brut et du gaz naturel. Ces hydrocarbures migrent ensuite à travers les roches poreuses jusqu'à être piégés dans des roches réservoirs, sous des couches imperméables appelées roches couvertures (Tissot & Welte, 1984).

### **1.8. Impacts des carburants sur le sol et les écosystèmes**

Les carburants, lorsqu'ils contaminent les sols, entraînent une accumulation de composés organiques toxiques qui réduisent la fertilité des sols et perturbent les écosystèmes en altérant les cycles biologiques et chimiques naturels (Das & Chandran, 2011).

#### **1.8.1. Effet sur les propriétés physico-chimique du sol**

Les carburants peuvent altérer les propriétés physicochimiques du sol en modifiant son pH, sa structure et sa capacité d'absorption. Les hydrocarbures peuvent augmenter la toxicité du sol en perturbant les interactions entre les sols et les éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes. Cette contamination affecte également la structure du sol, ce qui réduit sa porosité et son aération, nuisant ainsi aux processus biologiques (Olsen, 2017).

Certains composants des carburants, tels que les métaux lourds et les hydrocarbures aromatiques polycycliques, peuvent contaminer le sol et affecter sa capacité à absorber les nutriments (Alloway, 2013). Ces changements affectent la croissance des plantes et la santé de l'écosystème.

#### **1.8.2. Toxicité pour les organismes vivants**

Les hydrocarbures, lorsqu'ils sont inhalés, ingérés ou entrent en contact avec un organisme, peuvent favoriser l'apparition de cancers. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont particulièrement reconnus pour leur caractère cancérigène. Une fois introduits dans l'organisme, ces composés s'intègrent dans les réseaux trophiques, où ils peuvent s'accumuler dans les tissus biologiques (bioaccumulation) ou se concentrer davantage à chaque niveau de la chaîne alimentaire (bioamplification). La présence de groupes alkyles dans leurs molécules renforce leur potentiel cancérigène, tandis que leur halogénéation augmente leur toxicité aiguë pour les espèces animales (Ramade, 1992).

### **1.9. Procédures de dépollution des sols pollués aux carburants**

La dépollution des sols contaminés par les hydrocarbures représente un enjeu majeur en matière de gestion environnementale. Pour faire face à cette problématique, plusieurs méthodes ont été développées en fonction de la nature, de la profondeur et de l'étendue de la pollution. Ces techniques se classent en différents procédés : physiques, thermiques, chimiques et biologiques, chacune reposant sur des mécanismes spécifiques et adaptées à différents contextes de contamination.

#### **1.9.1. Procédés physiques :**

Le principe de ces procédés repose sur l'utilisation de fluides, qu'ils soient naturellement présents dans le sol ou injectés, pour transporter les polluants vers des points de concentration et d'extraction. Les techniques les plus couramment utilisées sont le lavage et le confinement (Colin, 2000). D'autres techniques thermiques, comme la vitrification ou l'incinération, sont également utilisées selon la profondeur et la gravité de la pollution.

#### **1.9.2. Procédés thermiques:**

Ces procédés consistent à chauffer le sol in situ afin de favoriser la désorption et la volatilisation des contaminants. Ils sont principalement utilisés pour éliminer les fractions aliphatiques et aromatiques des carburants. L'essence et les composés chlorés se volatilisent à des températures comprises entre 80 et 300°C (Koller, 2004).

#### **1.9.3. Procédés chimiques :**

Les techniques chimiques visent à détruire les polluants ou à les transformer en des formes moins nocives pour l'environnement. Ces procédés, appliqués directement à la phase solide polluée par les hydrocarbures et solvants chlorés, incluent l'extraction et la mobilisation (Colin, 2000).

#### **1.9.4. Procédés biologiques :**

Les procédés de remédiation biologique ont pour objectif de dégrader la matière organique polluante grâce à l'activité de bactéries présentes naturellement dans le sol ou spécialement cultivées pour cette tâche. L'efficacité de ces procédés est optimisée par la gestion des conditions de prolifération bactérienne (Koller, 2004).

## **2. Le compostage**

### **2.1. Définition du compostage**

Le compostage est un processus biologique de transformation des matières organiques en compost sous l'action de micro-organismes (bactéries, champignons) en présence d'oxygène. Ce procédé naturel permet de recycler les déchets organiques et de produire un amendement riche en nutriments pour améliorer la fertilité des sols (Diaz et al., 2007).

### **2.2. Phases du compostage**

Le processus de compostage se déroule en plusieurs phases (figure 3), correspondant à l'évolution de l'activité microbienne et des paramètres physico-chimiques du substrat organique. Ces étapes (mésophile, thermophile, refroidissement et maturation) sont cruciales pour assurer la dégradation efficace des matières organiques, l'élimination des pathogènes et la stabilisation du produit final. Chaque phase joue un rôle spécifique dans la transformation des déchets en un compost mature, riche en humus et bénéfique pour les sols (Meena et al., 2021).

#### **2.2.1. Phase mésophile**

Au début du compostage, la température reste proche de celle de l'environnement, puis augmente progressivement pour atteindre environ 45 °C en quelques jours. Cette élévation est due à l'intense activité métabolique des micro-organismes mésophiles, qui décomposent les composés organiques simples en utilisant l'azote et le carbone comme sources d'énergie et de croissance. La dégradation des sucres et autres composés solubles entraîne la production d'acides organiques, pouvant abaisser le pH. Cette phase mésophile, caractérisée par une forte activité microbienne, dure généralement de deux à huit jours avant la transition vers la phase thermophile (Amrit et al., 2021).

#### **2.2.2. Phase thermophile**

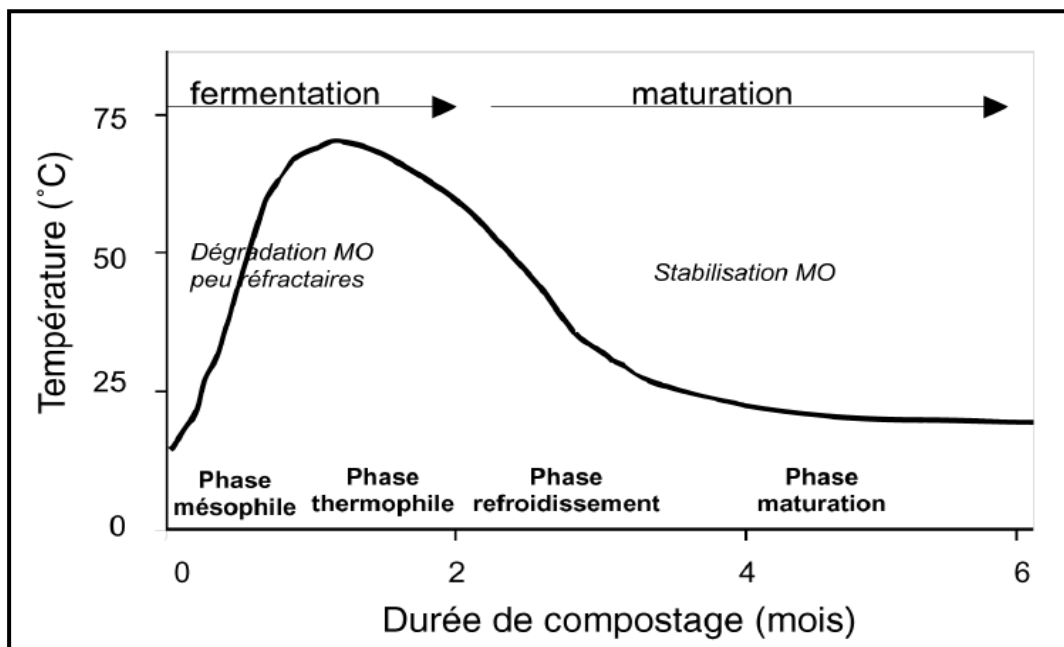
Lorsque la température atteint entre 60°C et 75°C, seules les bactéries thermorésistantes survivent. Cette phase est marquée par une intense dégradation de la matière organique, avec une forte production de CO<sub>2</sub> et une évaporation de l'eau (Finstein et al., 1975).

### 2.2.3. Phase de refroidissement

Lorsque la majorité des matières organiques facilement dégradables a été consommée, l'activité microbienne diminue, entraînant une baisse progressive de la température. Des micro-organismes mésophiles recolonisent alors le compost. Cette phase peut être influencée par les conditions climatiques et la taille du tas de compost (Bach et al., 1987).

### 2.2.4 Phase de maturation

Durant cette dernière phase, les processus d'humification prennent le relais, assurant la stabilisation du compost. La matière organique résiduelle est transformée en humus, rendant le compost prêt à l'emploi (Beck-Friis et al., 2000).



**Figure 3:** Courbe théorique d'évolution de la température au cours des différentes phases du compostage (Francou, 2003).

## 2.3 Rôle des microorganismes

Le processus de compostage mobilise une diversité de micro-organismes, chacun jouant un rôle spécifique selon les conditions de température et d'oxygène (tableau 2). Bactéries, champignons, actinomycètes, protozoaires et nématodes interviennent successivement pour dégrader les matières organiques simples ou complexes, contribuant à la transformation des déchets en compost stable, riche en nutriments et en humus (Meena et al., 2021).

**Tableau 2:** Rôle des Micro-organismes dans le compostage (Sundberg &Tullberg ,2012)

<b>Micro-organisme</b>	<b>Conditions favorables</b>	<b>Exemples de Polluants dégradés</b>	<b>Produits finaux</b>
<b>Bactéries (aérobies)</b>	Température modérée (25-40°C), en présence d'oxygène.	Pesticides, hydrocarbures, protéines.	CO <sub>2</sub> , eau, chaleur.
<b>Fungi (champignons)</b>	Température élevée (40-60°C), en présence d'oxygène.	Lignine, cellulose, matières résistantes.	CO <sub>2</sub> , humus.
<b>Actinomycètes</b>	Température élevée (45-60°C), aérobies.	Matières ligneuses, déchets de jardin.	CO <sub>2</sub> , chaleur, humus.
<b>Protozoaires</b>	Température modérée, aérobies.	Bactéries, petits débris organiques.	Libération d'azote, CO <sub>2</sub> .
<b>Nématodes</b>	Conditions modérées, aérobies.	Micro-organismes (bactéries et champignons).	Libération de nutriments, CO <sub>2</sub> .

### 2.4. Application du compostage dans la dégradation des carburants

Le compostage est une méthode efficace pour la dégradation des hydrocarbures présents dans les carburants, utilisant des micro-organismes comme des bactéries et des champignons pour décomposer ces substances organiques.

Ce processus biologique se déroule dans des conditions optimales, où l'humidité, la température et le rapport carbone/azote sont ajustés pour favoriser l'activité microbienne. Des études ont démontré que le compostage permet non seulement de réduire les polluants issus des carburants, mais aussi d'améliorer la qualité du sol (Gautam & Pandey, 2020).

#### 2.4.1. Transformation des hydrocarbures en composés moins toxiques

Des études ont démontré que le compostage peut favoriser la dégradation de ces composés grâce à l'activité microbienne. Selon Zhang et al. (2021), les bactéries présentes dans le compost peuvent métaboliser les hydrocarbures, les transformant en produits non toxiques comme le dioxyde de carbone et l'eau. Cette dégradation se fait via des processus biochimiques complexes, dont l'oxydation des chaînes carbonées des hydrocarbures.

L'oxydation des hydrocarbures par les micro-organismes lors du compostage produit des composés plus simples et moins polluants.

Le processus du compostage lui-même crée des conditions idéales pour la dégradation de ces hydrocarbures. La chaleur générée par l'activité microbienne, combinée à l'aération et à la matière organique présente dans le compost, facilite la bioremédiation (Pillay et al., 2020). L'ajout de certains amendements, comme des nutriments supplémentaires, peut également améliorer l'efficacité du compostage dans la dégradation des hydrocarbures (Baptista et al., 2018).

Le compostage peut être une méthode écologique et économique pour traiter les sols contaminés par des hydrocarbures, en complément d'autres techniques comme la biorestauration. Selon les résultats de plusieurs recherches cette méthode permet de réduire les niveaux de pollution de manière significative tout en produisant un compost utile à l'agriculture. Cela offre un double bénéfice environnemental et économique en régénérant les sols tout en éliminant des contaminants dangereux (Liao et al., 2019).

### **2.4.2. Conditions favorables à la biodégradation**

Le compostage est un processus biologique complexe qui favorise la biodégradation des matières organiques dans des conditions optimales. La température, l'humidité, l'oxygénation et la composition des micro-organismes jouent un rôle crucial dans ce processus. Une température élevée, généralement entre 50 et 70°C, accélère la dégradation en créant un environnement favorable aux micro-organismes thermophiles (Haug, 1993). L'humidité doit être équilibrée, car un excès d'eau peut limiter l'oxygénation, tandis qu'un manque d'humidité ralentit l'activité microbienne (Bertoldi et al., 1983). L'aération est également essentielle pour maintenir les niveaux d'oxygène nécessaires aux micro-organismes aérobies (Epstein, 1997).

La diversité des matières organiques, riches en azote et en carbone, est primordiale pour favoriser la dégradation complète et éviter des déséquilibres dans le processus (Haug, 1993).

### **2.5. Ajouts organiques lors du compostage**

L'ajout d'éléments organiques lors du compostage est essentiel pour favoriser un processus de dégradation efficace et garantir la production d'un compost riche en nutriments.

Ces matériaux organiques incluent les résidus alimentaires, les déchets, les feuilles mortes, de jardin et parfois même les déchets animaux comme le fumier, qui apportent à la fois des

éléments azotés et carbonés nécessaires à l'équilibre du compost. L'ajout de matières riches en azote, telles que les restes de fruits et légumes, contribue à stimuler l'activité microbienne en augmentant la température et en accélérant la dégradation (Haug, 1993).

les matières riches en carbone, comme les copeaux de bois ou les feuilles sèches, fournissent l'énergie nécessaire pour soutenir la vie microbienne tout en améliorant la structure du compost ( Bertoldi et al., 1983).

La diversité des matériaux ajoutés favorise une dégradation homogène, ce qui permet d'obtenir un compost de qualité, adapté pour enrichir les sols agricoles et jardiniers.

Plusieurs travaux montrent que l'association de fientes de volaille aux déchets verts peut faire monter la température du tas de compost à plus de 60°C dès les premiers jours, ce qui accélère l'hygiénisation et la décomposition des matières. De même, la combinaison de boues d'épuration et de copeaux ou déchets bois améliore la structure du compost, stabilise le pH et augmente la teneur en matière organique stable (Bernal, Albuquerque & Moral, 2009).

D'autres travaux de recherche ont mis en évidence l'efficacité de différents amendements organiques dans l'amélioration du processus de compostage et la remédiation des sols pollués. Sai et Tigrine (2021) ont démontré l'intérêt des boues activées, notamment pour leur richesse en matière organique et en micro-organismes favorables à la dégradation des hydrocarbures. Boukrou et Nait Si Ahmed (2022) ont souligné les effets bénéfiques du grignon d'olive, qui améliorent la structure du compost et sa capacité à réduire la toxicité des carburants dans le sol. Bouacem et Chabane (2022) ont comparé l'efficacité du fumier de bovins, du grignon d'olive et de la paille sur un sol contaminé par des hydrocarbures, concluant que le fumier s'avère être l'amendement le plus performant en termes de réduction de la contamination. Mezari (2024) a étudié l'influence de différentes doses de fumier de bovins sur l'efficacité de compostage des sols pollués aux carburants. Ses résultats montrent qu'un apport à 20% de fumier permet une biodégradation plus efficace des hydrocarbures, suggérant une synergie optimale entre activité microbienne et qualité des substrats organiques.

## **CHAPITRE II : Matériel et méthodes**

Dans cette étude, nous avons cherché à évaluer l'impact des différents amendements organiques (fumier d'ovins, paille, grignon d'olive et cendres de bois), en association avec de la sciure de bois, sur le processus du compostage d'un sol contaminé aux carburants. L'expérimentation a été réalisée au sein du laboratoire PSEMRVC de la FSASB de l'UMMTO.

### 1. Matériel

#### 1.1. Sol

L'étude expérimentale a été réalisée sur un sol prélevé dans une parcelle localisée au sein de la station-service de Boukhalfa, située à une latitude de  $36^{\circ}$  et une longitude de  $4^{\circ}$ . Ce site se trouve à l'ouest du chef-lieu de la commune de Tizi Ouzou, en bordure de la route nationale n°12, qui relie Tizi Ouzou à Alger (figure 4). La zone présente une activité agricole importante, caractérisée par des terres fertiles et la présence d'un cours d'eau à proximité, ce qui en fait une zone à vocation agricole. La contamination du sol par des hydrocarbures dans ce contexte représente donc un risque environnemental et sanitaire notable.



**Figure 4:** Image satellitaire de la station-service de Boukhalfa (Google Earth, 2025).

### 1.2. Matériel végétal

Le maïs (*Zea mays*) a été utilisé comme bio-indicateur dans un test de germination afin d'évaluer la phytotoxicité résiduelles des sols après compostage. Ce test vise à analyser l'impact des différents amendements organiques sur la qualité des sols et à estimer leur potentiel de revalorisation biologique. Le choix du maïs comme espèce-test est justifié par sa sensibilité aux hydrocarbures, démontrée dans des travaux antérieurs (Chaineau et al., 1996).

### 1.3. Matériel animal

*Eisenia fetida* est une espèce de vers de terre largement utilisée comme bio-indicateur dans les tests de toxicité du sol elle est bien documentée en raison de sa sensibilité aux polluants et de son rôle clé dans la dégradation de la matière organique (Smith, 2020). Cette espèce est particulièrement adaptée pour évaluer l'impact des contaminants sur la biodiversité du sol, grâce à sa capacité à réagir rapidement aux changements environnementaux (Jones et al., 2018).

### 1.4. Substrats organiques

Afin d'optimiser le processus de compostage, différentes matières organiques ont été utilisées dans cette étude. Ces amendements ont pour rôle d'enrichir le sol contaminé en matière organique, notamment en carbone, élément essentiel au bon déroulement de l'activité microbienne impliquée dans la biodégradation des hydrocarbures.

#### 1.4.1. Sciure de bois

La sciure de bois joue un rôle clé dans le compostage en apportant du carbone, ce qui permet d'équilibrer le rapport carbone/azote, en améliorant la porosité et l'aération du sol, en favorisant ainsi l'activité microbienne. Elle possède également des propriétés absorbantes, capables de piéger certains hydrocarbures ou métaux lourds, réduisant leur toxicité (Epstein, 1997). La sciure utilisée provient d'une menuiserie locale située à Rédjaouana.

#### 1.4.2. Fumier

Le fumier, riche en azote et en matière organique, joue un rôle essentiel dans la stimulation de l'activité microbienne du sol, ce qui favorise la dégradation des hydrocarbures et d'autres composés chimiques. Lorsqu'il est incorporé au compost, il contribue à améliorer la structure du sol tout en augmentant sa capacité de rétention en eau et en nutriments. De plus, le fumier stimule la croissance des micro-organismes capables de dégrader les polluants organiques

(Haug, 1993). Dans cette étude, le fumier utilisé provient d'ovins nourris principalement avec des plantes et arbustes de montagne.

### **1.4.3. Cendres de bois**

Les cendres de bois, riches en minéraux tels que le potassium, le calcium et le magnésium, ont la capacité d'augmenter le pH du sol, ce qui peut favoriser la dégradation des composés chimiques acides et de certains polluants. Elles contribuent également à la neutralisation des hydrocarbures en créant un environnement plus favorable à l'activité microbienne. Cependant, leur utilisation doit être maîtrisée, car un excès peut entraîner une alcalinisation excessive du sol, perturbant ainsi l'équilibre biologique (Bertoldi et al., 1983). Dans cette étude, les cendres utilisées proviennent de la combustion du bois d'oléastre (*Olea europaea var. sylvestris*).

### **1.4.4. Paille**

La paille, constitue une excellente source de carbone et contribue à la structuration du sol. Elle favorise la rétention de l'eau et de l'air dans les sols compactés, comme ceux contaminés par les hydrocarbures, ce qui facilite la survie et l'activité des micro-organismes impliqués dans la dégradation des polluants. De plus, la paille limite l'évaporation, maintenant ainsi une humidité optimale pour les processus biologiques (Haug, 1993). Dans cette étude, la paille utilisée est issue du blé dur.

### **1.4.5. Grignon d'olive**

Le grignon d'olive, riche en matière organique et en composés antioxydants, apporte des éléments nutritifs essentiels au sol, favorisant ainsi la croissance et l'activité microbienne.

Il contient également des substances bioactives capables de participer à la dégradation de polluants tels que les hydrocarbures. Dans cette étude, le grignon d'olive utilisés provient de la production de l'année précédente d'une huilerie traditionnelle située à Redjaouna.

## 2. Méthodes

### 2.1. Méthode d'échantillonnage du sol

L'échantillonnage du sol a été réalisé le 23 janvier 2025 au niveau d'une station-service située à Boukhalfa. Le prélèvement a été effectué sur la couche superficielle du sol (0–20 cm de profondeur), selon la méthode en diagonale, à partir d'une placette localisée sous les événements de la station, qui entraînent une pollution chronique du sol. Le sol contaminé a été prélevé dans un quadrant de 30 cm de côté. Les échantillons collectés ont ensuite été conditionnés dans des sacs en plastique propres et secs, puis transportés au laboratoire.

### 2.2. Préparation du sol

Le sol contaminé a été laissé à l'air libre pendant deux jours (48 h) afin de réduire l'excès d'humidité et permettre une aération initiale, conditions favorables à l'activité microbienne. Ensuite, il a été tamisé à 5 mm afin de l'homogénéiser en éliminant les cailloux et débris grossiers.

Le sol ainsi préparé a été réparti dans des boîtes en plastique, à raison de 1 kg par boîte. Un carré de carton a été placé au fond de chaque boîte pour absorber l'excès d'humidité. Cinq types de matières organiques ont été utilisés comme amendements : la sciure de bois (S) a été ajoutée à toutes les boîtes à hauteur de 2 % du poids du sol pour améliorer l'aération. Quatre autres amendements ont été testés séparément à raison de 20 % du poids du sol, chacun dans trois boîtes : grignon d'olive (G), fumier (F), cendre de bois (C), paille (P), et sol témoin sans amendements (T) (Tableau 3).

**Tableau 3:** Dispositif expérimental

<b>Quantité</b> <b>Disposition</b>	<b>1kg sol</b> <b>+2%S</b>	<b>1kg sol</b> <b>+2%S+20</b> <b>%F</b>	<b>1kg sol</b> <b>+2%S+20</b> <b>%G</b>	<b>1kg sol</b> <b>+2%S+20</b> <b>%P</b>	<b>1kg sol</b> <b>+2%S+20</b> <b>%C</b>	<b>sol témoin</b>
1	Sol+S	Sol+S+F	Sol+S+G	Sol+S+P	Sol+S+C	Sol T
2	Sol+S	Sol+S+F	Sol+S+G	Sol+S+P	Sol+S+C	Sol T
3	Sol+S	Sol+S+F	Sol+S+G	Sol+S+P	Sol+S+C	Sol T

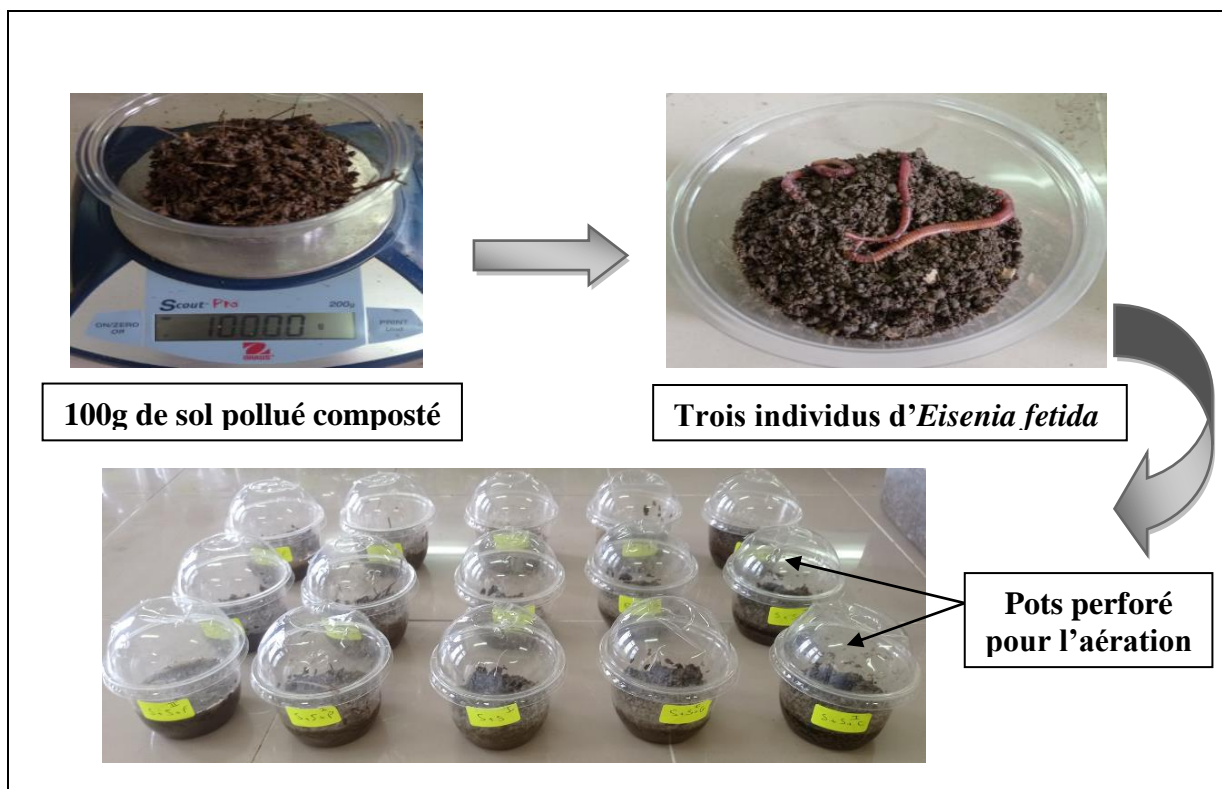
## 2.3. Suivre du compostage

L'ensemble des boîtes a été soumis à un arrosage quotidien et à une aération par retournement manuelle pendant huit semaines, afin de favoriser le processus de compostage et la dégradation des hydrocarbures présents dans le sol.

## 2.4. Évaluation de l'efficacité du compostage

### 2.4.1. Test de toxicités sur les vers de terre

Un essai de toxicité a été conduit sur une période de 14 jours afin d'évaluer l'effet des ajouts organiques sur la survie et la biomasse des vers de terre. Le protocole expérimental consistait à dénombrer le nombre des vers vivants pu à mesurer leur biomasse après 24 heures, 48 heures, 72 heures et à l'issue des 14 jours d'exposition. Trois individus d'*Eisenia fetida* ont été introduits dans chaque pot en plastique contenant 100 g de sol. Afin de garantir une bonne aération, chaque pot a été soigneusement perforé (figure 5). L'humidité du sol a été régulièrement contrôlée et maintenue à un niveau optimal tout au long de l'expérience.



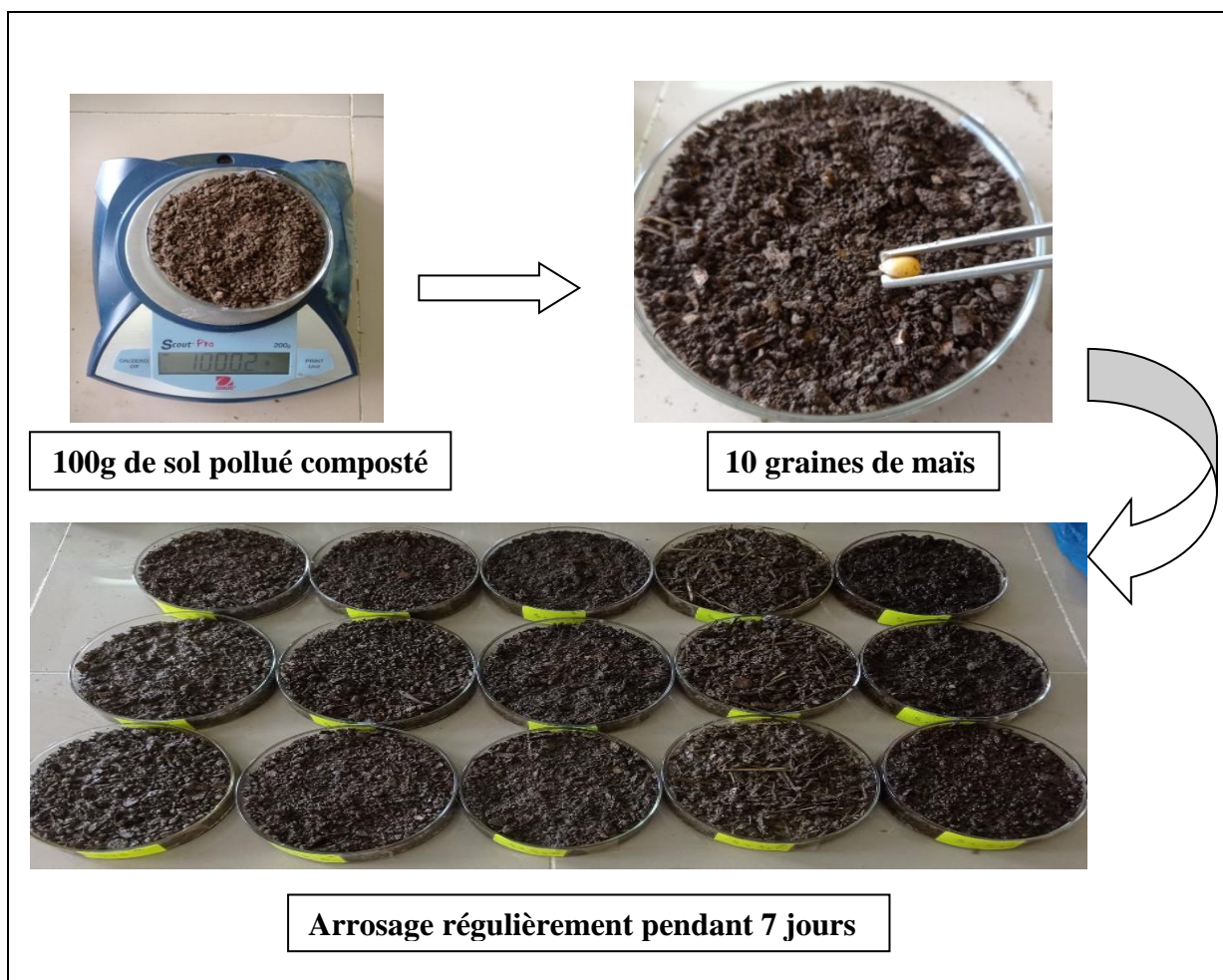
**Figure 5:** Dispositif de l'essai de toxicité sur les vers de terre d'*Eisenia fetida*.

### 2.4.2. Germination des graines de maïs

Afin d'évaluer l'efficacité de la décontamination du sol, un test de germination a été réalisé en utilisant des graines de maïs (*Zea mays*). Pour chaque boîte, 10 graines ont été placées dans une boîte de Pétri contenant chacune 100 g de sol. Les boîtes ont été humidifiées régulièrement pendant 7 jours (figure 6).

Le taux de germination (TG) a été déterminé selon la formule suivante :

$$\text{TG (\%)} = (\text{Nombre de graines germées} / \text{Nombre total de graines semées}) \times 100.$$



**Figure 6:** Dispositif de l'essai de toxicité sur des grains de maïs (*Zea mays*)

### 2.4.3. Respiration microbiennes

L'évaluation de l'activité biologique du sol a été réalisée à l'aide d'un test respirométrique, conformément à la méthode décrite par Dormmergues (1960). Ce test repose sur la mesure de la respiration microbienne, en quantifiant le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) émis au cours d'une incubation de 7 jours à  $28^\circ\text{C}$ . Chaque flacon de 250 mL contient 50 g de sol, ainsi que deux tubes à hémolyse : l'un, contenant 3 mL d'eau, afin de maintenir l'humidité du sol, et l'autre, 5 mL de soude ( $\text{NaOH}$ ) 0,5 M, pour capturer le  $\text{CO}_2$  dégagé.

À la fin de l'incubation, les tubes contenant la soude ont été rapidement retirés et hermétiquement fermés. Avant le titrage, trois gouttes de solution de chlorure de baryum ( $\text{BaCl}_2$ ) à 20% ont été ajoutées à la soude afin de précipiter les carbonates formés. La solution a ensuite été transférée dans un bécher et titrée avec une solution d'acide chlorhydrique ( $\text{HCl}$ ) à 0,25 M, en présence de quelques gouttes de phénolphtaléine. Le titrage a été effectué jusqu'à la disparition de la couleur rose, signalant l'atteinte du point d'équivalence (figure 7). Un témoin sans sol a également été réalisé sous les mêmes conditions pour permettre une correction des valeurs obtenues.

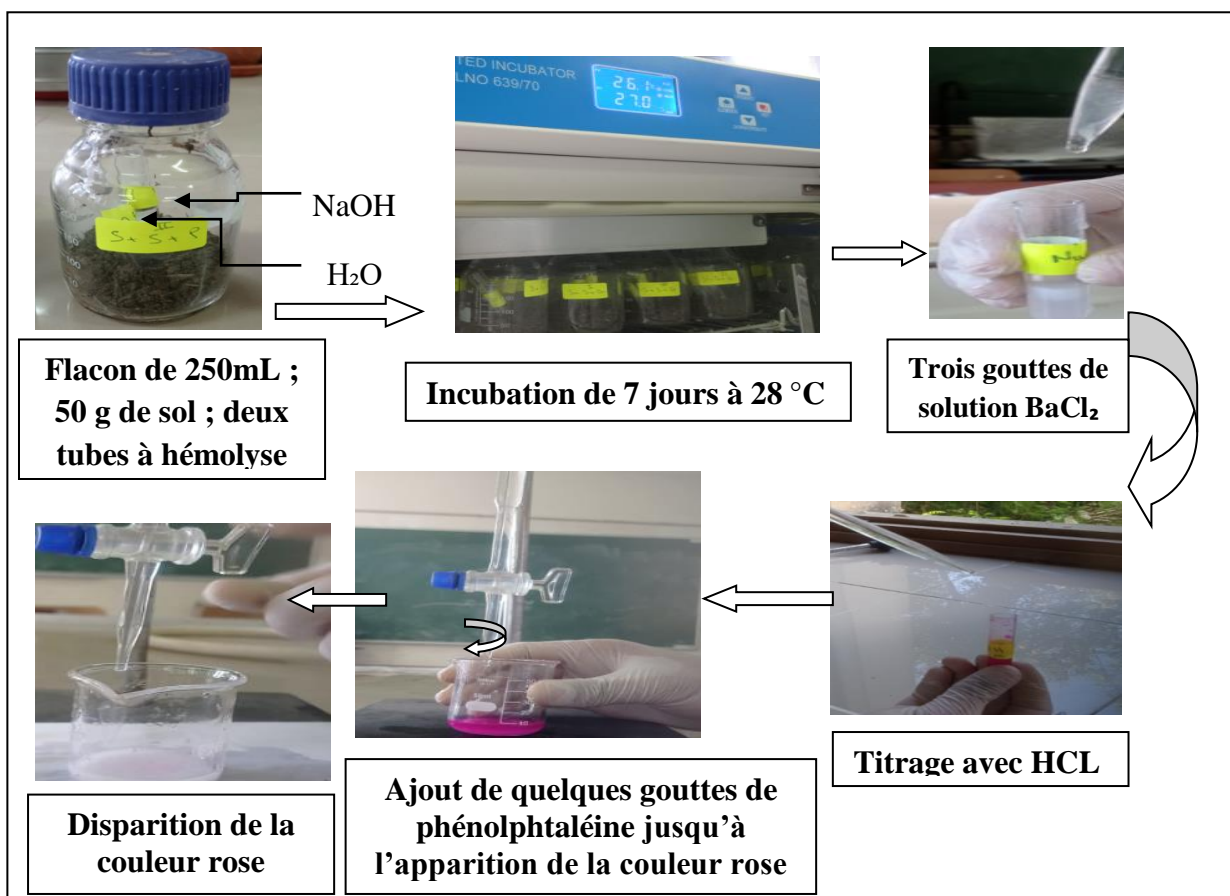


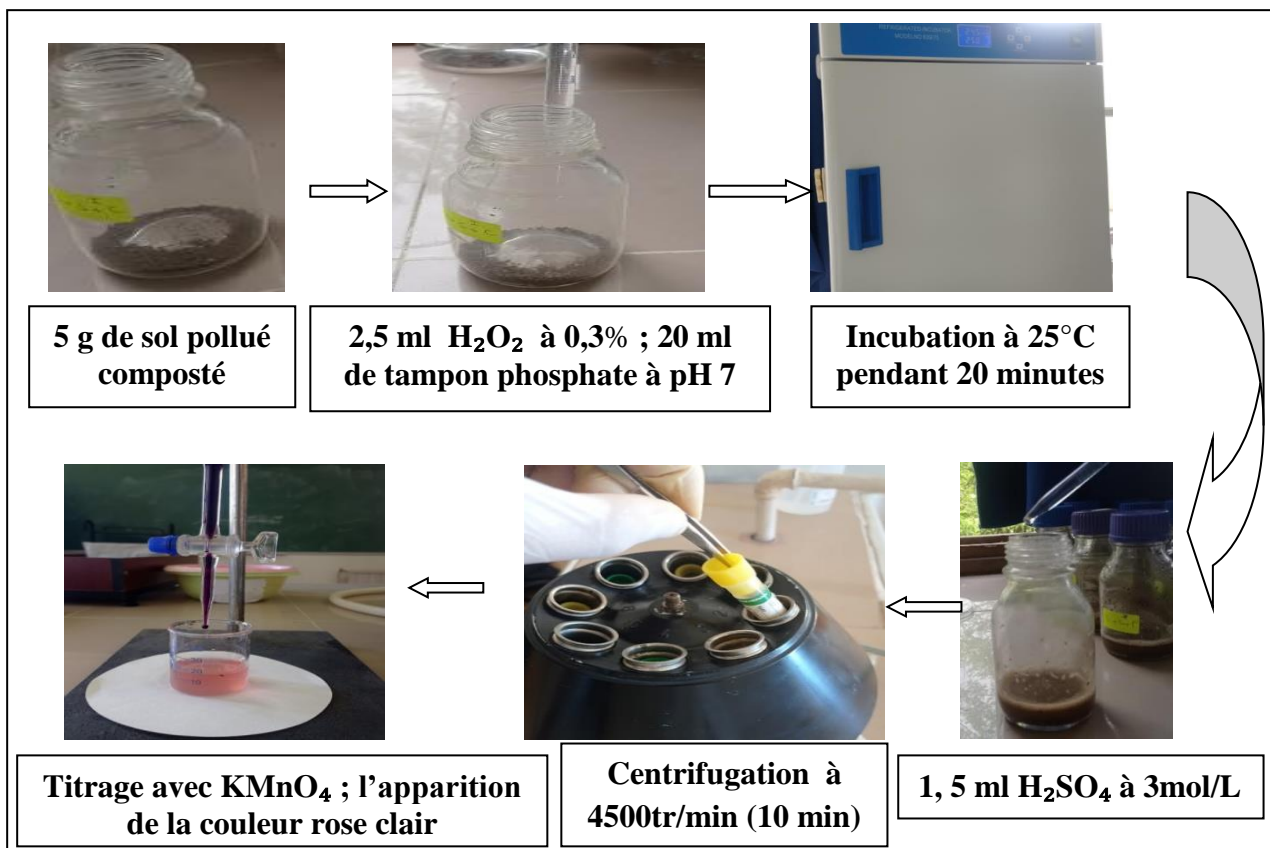
Figure 7: Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol.

### 2.4.4. Activité de la catalase

L'activité de la catalase, enzyme produite par les micro-organismes aérobies, est couramment utilisée comme indicateur de l'activité biologique du sol. Elle permet d'estimer indirectement la vitalité microbienne, car elle reflète la capacité des organismes à se défendre contre le stress oxydatif induit par le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) (Kandeler et al., 1999).

L'activité de la catalase a été mesurée selon la méthode décrite par Guan (1986). Pour chaque échantillon, 5 g de sol pollué composté ont été placés dans des flacons de 250 ml. À ces échantillons, ont été ajoutés 2,5 ml de peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ) à 0,3 % ainsi que 20 ml de tampon phosphate à pH 7. Le mélange réactionnel a été incubé à 25°C pendant 20 minutes.

Pour stopper la réaction enzymatique, 1,5 ml d'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) à 3 mol/L ont été ajoutés. Le tout a ensuite été centrifugé à 4500 tours/min pendant 10 minutes. Un blanc (témoin) sans sol a été préparé dans les mêmes conditions. L'excès de  $H_2O_2$  non décomposé a ensuite été titré avec une solution de permanganate de potassium ( $KMnO_4$ ) à 0,5 mol/L, jusqu'à l'apparition d'une coloration rose claire (figure 6).



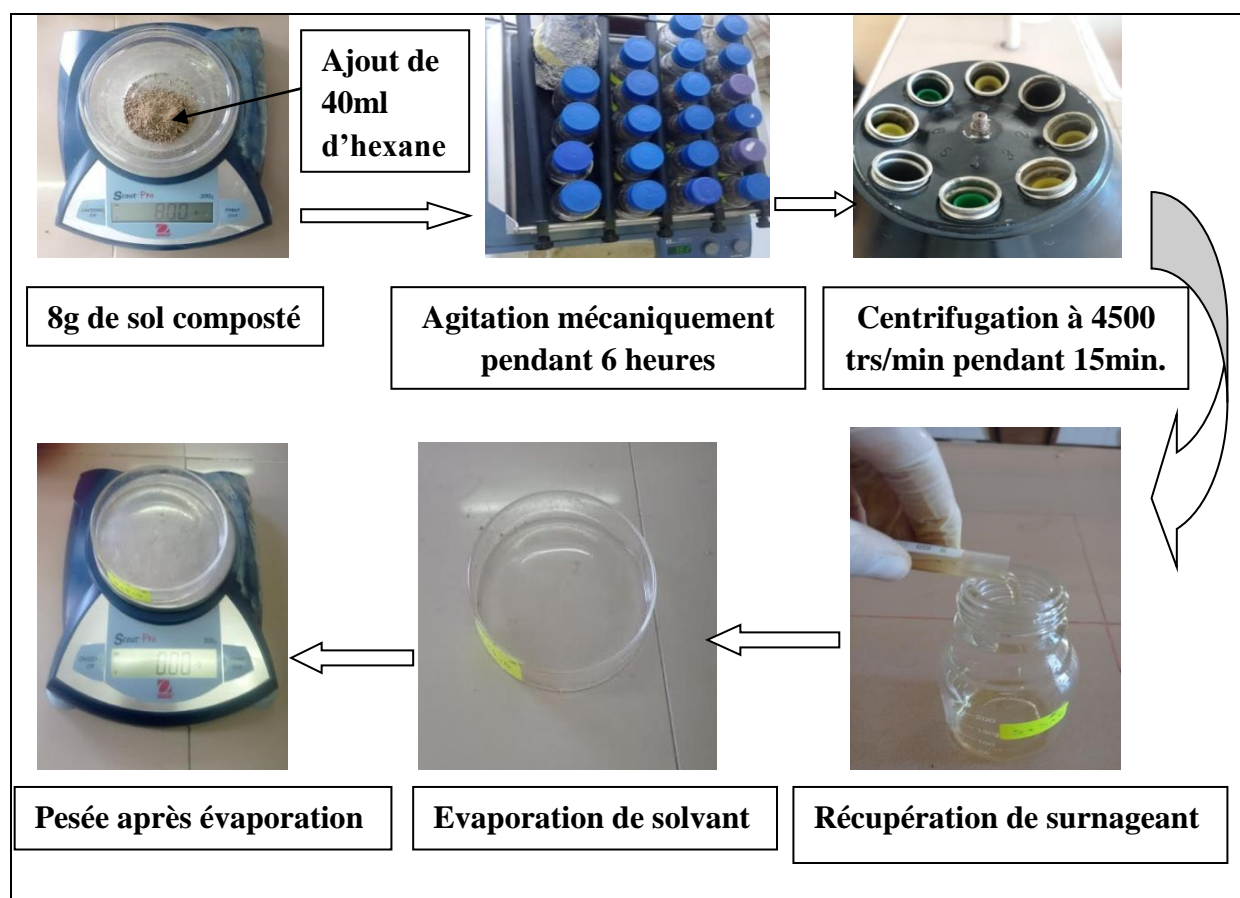
**Figure 8:** Protocole de dosage de l'activité de la catalase

### 2.4.5. Etude quantitative des hydrocarbures résiduels :

Pour évaluer la quantité d'hydrocarbures restant dans le sol après traitement, une extraction a été réalisée à l'aide de l'hexane comme solvant organique. Un échantillon de sol prélevé dans chaque boîte, séché à l'air libre et tamisé à 2 mm, a été mélangé avec de l'hexane selon un rapport masse/volume de 1/5 (soit 1 g de sol pour 5 mL de solvant), dans un flacon de 250mL.

Le mélange a été agité mécaniquement pendant 6 heures à température ambiante, puis centrifugé à 4500 tr/min pendant 15 minutes. Le surnageant, contenant les hydrocarbures extraits, a été récupéré et transféré dans des boîtes de Pétri préalablement tarées, puis laissé à température ambiante jusqu'à évaporation complète du solvant (figure 9).

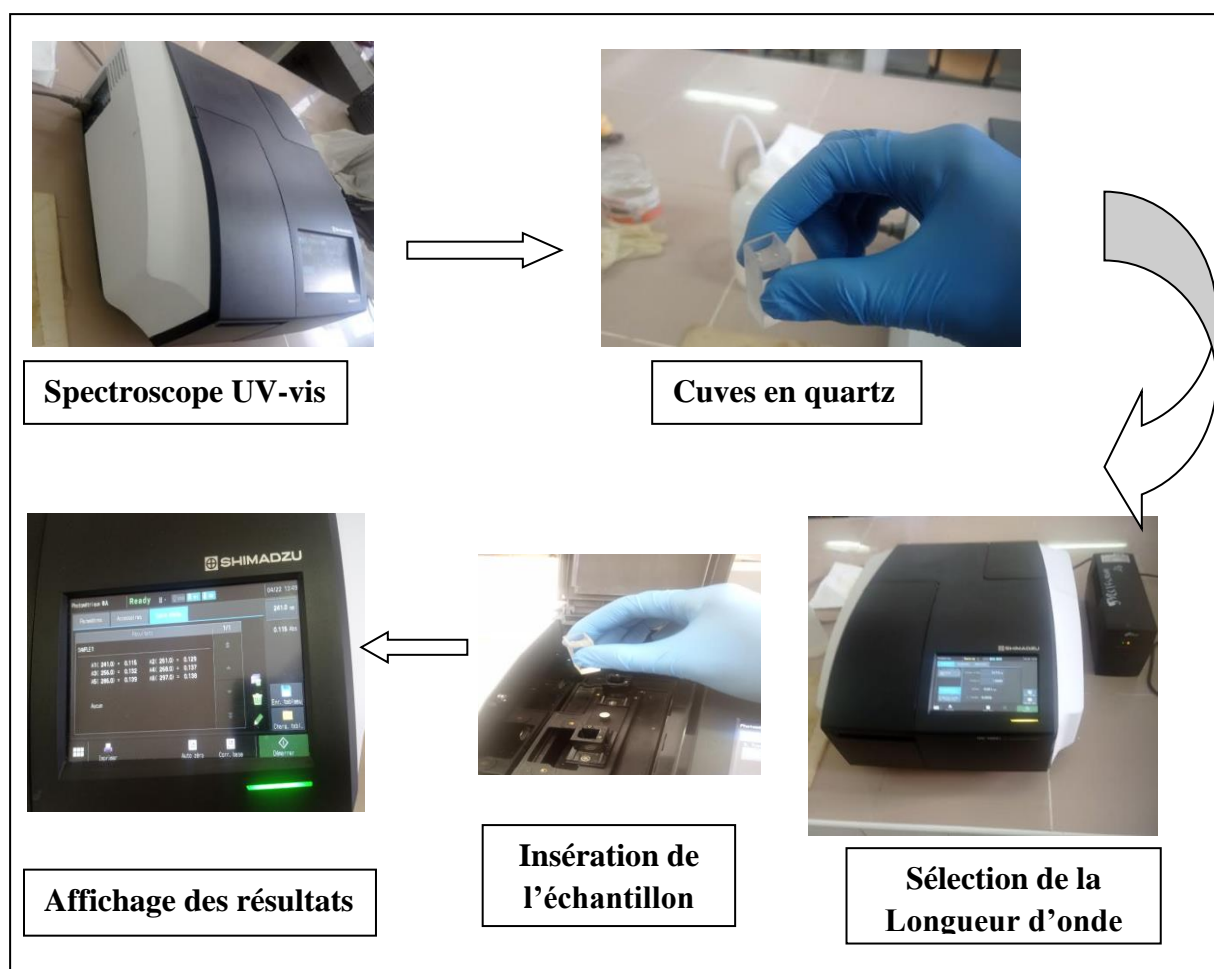
La masse des hydrocarbures résiduels a été déterminée par pesée gravimétrique à l'aide d'une balance de précision. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'hydrocarbures par gramme de sol sec (mg/g).



**Figure 9:** Protocole d'extraction et de quantification des hydrocarbures.

## 2.4.6. Etude qualitative des hydrocarbures aromatique résiduels

Nous avons caractérisé des hydrocarbures aromatiques, par leur toxicité et leur persistance dans l'environnement. L'hexane contenant les hydrocarbures a été transférée dans des cuves en quartz pour l'analyse. Un blanc contenant uniquement de l'hexane pur a été utilisé pour calibrer l'appareil. Les mesures d'absorbance ont été réalisées en balayant les longueurs d'onde comprises entre 200 et 300 nm, plages correspondant aux pics de 14 hydrocarbures aromatiques prioritaires définis par l'Environmental Protection Agency (EPA) (figure 10).



**Figure 10:** Schéma du protocole de caractérisation des HAP par spectrophotométrie UV.

### **2.5. Analyse statistique des données**

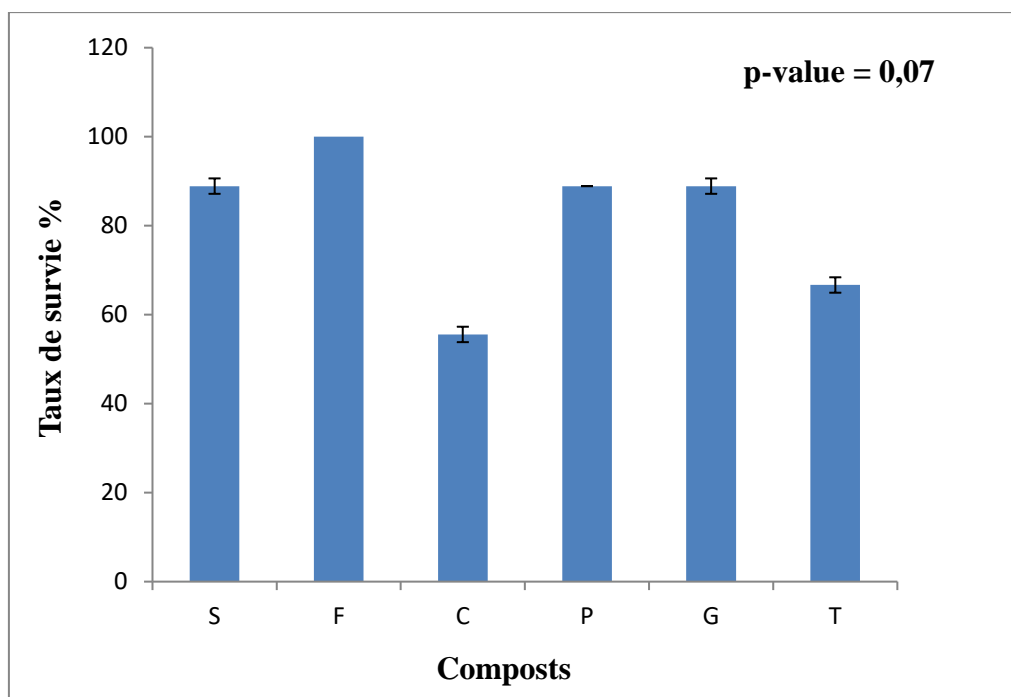
L'analyse statistique des résultats obtenus a été réalisée avec de logiciel R 4.4.2. Les données ont été soumises à une analyse de la variance à un facteur lorsque les conditions de normalité et d'homogénéité des variances sont vérifiées. En cas de différences significatives entre les moyennes, une comparaison post-hoc a été effectuée à l'aide du test de Newman et Keuls afin d'identifier les groupes homogènes. Lorsque ces conditions d'homogénéité ne sont pas remplies, les données ont été analysées à l'aide du test non paramétrique de Kruskal-Wallis, suivi d'un test post-hoc approprié en cas de différences significatives.

## **CHAPITRE III : Résultats et discussion**

## 1. Résultats

### 1.1 Test de toxicité sur les vers de terre

Les résultats obtenus montrent des différences marquées dans les taux de survie des vers de terre selon le type d'amendement organique utilisé pour le traitement du sol. Le taux de survie le plus élevé a été observé dans le sol traité avec du fumier (F), atteignant 100%. Les sols traités avec la sciure de bois (S), la paille (P) et les grignons d'olive (G) présentent des taux de survie similaires, autour de 88,88 %. En revanche, le taux de survie est nettement plus faible dans le sol traité avec de la cendre (C), atteignant seulement 55,55 %. Le sol témoin (T), sans ajout d'amendements organiques, présente un taux de survie modéré de 66,66 % (Figure 10).

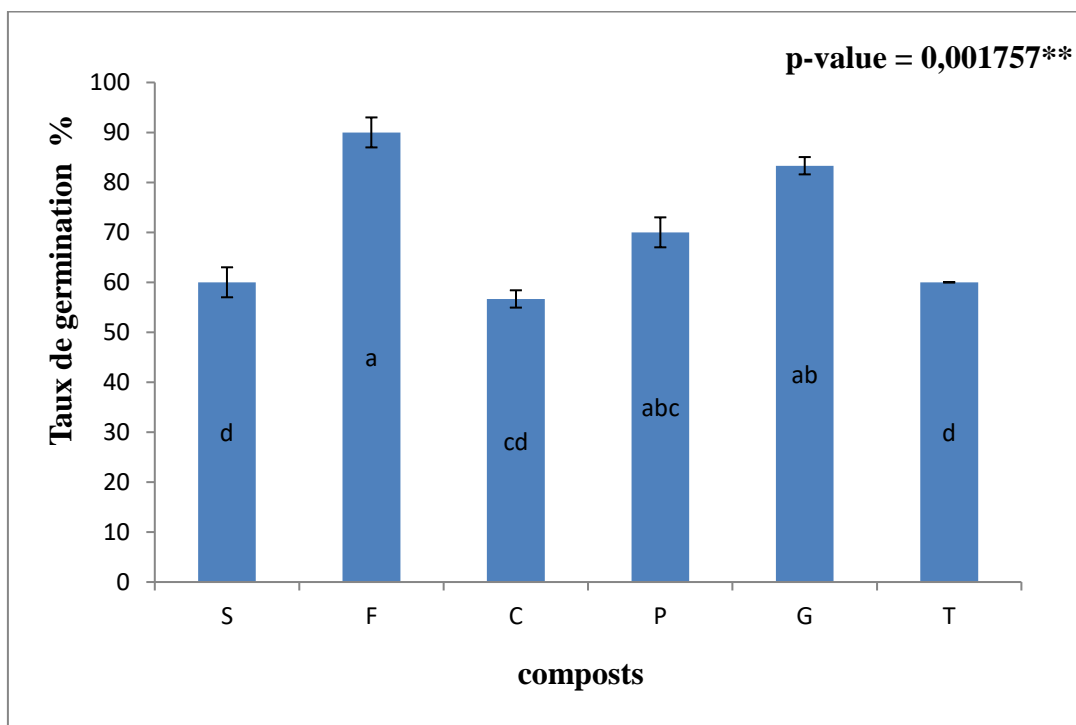


**Figure 11:** Taux de survie des vers de terre

Les différences observées ne sont toute fois pas significative selon, le résultat. Le test de Kruskal-Wallis, qui a donné une p-value de 0,07 (Annexe 1). Ce résultat indique que les différences entre les traitements ne sont pas statistiquement significatives au seuil de 5 %.

### 1.2. Test de germination des graines de maïs

Le test de germination réalisé a permis d'évaluer l'effet des ajouts organiques sur la survie des grains de maïs. Le taux de germination le plus élevé a été observé dans le sol traité avec du fumier (F), atteignant 90 %. Le sol amendé avec des grignons d'olive (G) a également donné de bons résultats, avec un taux de germination de 83,33 %. La paille (P) a permis d'atteindre 70 %, tandis que la sciure de bois (S) et le sol témoin (T) ont un taux identique de 60 %. En revanche, le sol traité avec de la cendre (C) a présenté le taux de germination le plus faible, avec 56,66 % (figure 12).

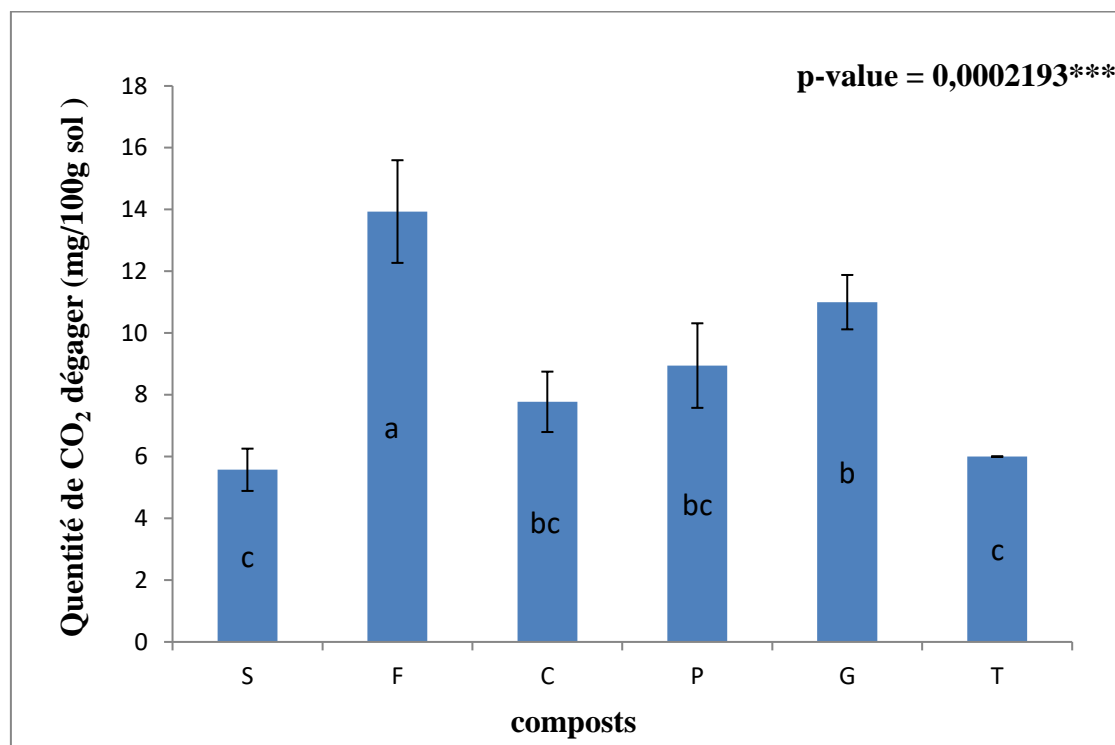


**Figure 12:** Taux de germination des grains de maïs

Les résultats de l'anova (Annexe 2) ont montré un effet hautement significatif du type d'amendement sur le taux de germination du maïs ( $p$ -value = 0,001757). Le test de Newman et Keuls a permis de classer les moyennes en six groupes homogènes. Le groupe (a) comprend l'amendement au fumier (F), tandis que le groupe (ab) inclut les grignons d'olive (G). La paille (P) se classe dans le groupe (abc), le sol témoin (T) et la sciure de bois (S) dans le groupe (d), les cendres (C) dans le groupe (cd).

### 1.3. Respiration microbienne

La quantité de CO<sub>2</sub> dégagée a été utilisée comme indicateur de l'activité microbienne dans les différents traitements. La production la plus élevée a été enregistrée dans le sol traité avec du fumier (F), atteignant 13,93 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol, ce qui traduit une forte activité biologique. Le sol amendé avec des grignons d'olive (G) a dégagé 11 mg de CO<sub>2</sub>/100g, suivi par le sol traité avec de la paille (P) 8,94 mg/100g, la cendre (C) 7,77 mg/100g, le sol témoin(T) 6 mg/100g, et enfin la sciure de bois (S), qui a présenté la plus faible production avec 5,57 mg de CO<sub>2</sub>/100g de sol (figure 13).

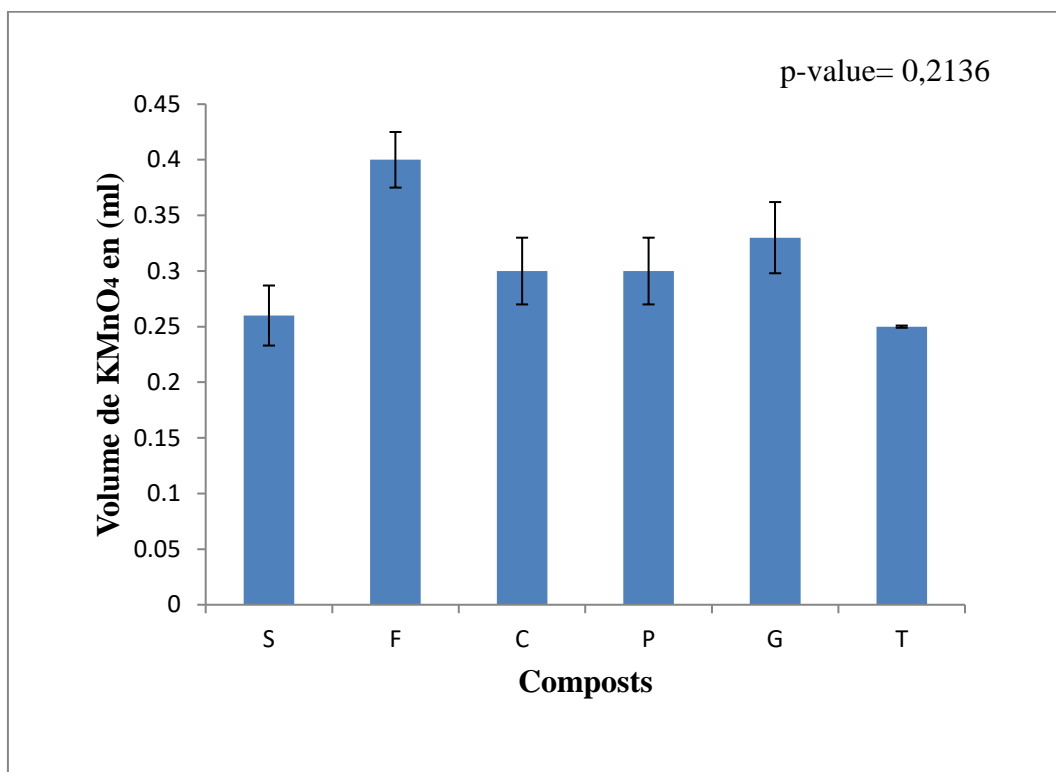


**Figure 13:** La quantité de CO<sub>2</sub> dégager en (mg/100g du sol)

Les résultats de l'anova ont donné une p-value de 0,0002193, ce qui signifie que les différences observées sont très hautement significatives. D'après le test de Newman et Keuls (Annexe 3), les différents amendements ont été classés en quatre groupes homogènes. Le groupe (a) comprend le fumier (F), qui a généré la plus forte production de CO<sub>2</sub>. Le groupe (b) inclut les grignons d'olive (G), tandis que le groupe (bc) regroupe la paille (P) et les cendres (C). Le groupe (c) contient le sol témoin (T) et la sciure de bois (S), qui ont montré les valeurs les plus faibles.

### 1.4. Activité de la catalase

Les résultats présentés dans la figure 14 montrent des différences notables d'activité de la catalase entre les différents sols compostés, elle est exprimée par le volume de  $\text{KMnO}_4$  n'ayant pas réagi avec  $\text{H}_2\text{O}_2$  résiduel. Le sol traité avec du fumier (F) présente l'activité de la catalase la plus élevée, avec un volume de  $\text{KMnO}_4$  (0,4 mL). Il est suivi par le grignon d'olive (G) avec un volume de (0,33 mL), la paille (P) et la cendre (C) avec (0,30 mL), et la sciure de bois (S) avec (0,26 mL). Le témoin (T) présente la plus faible activité enzymatique, avec un volume de  $\text{KMnO}_4$  (0,25 mL).

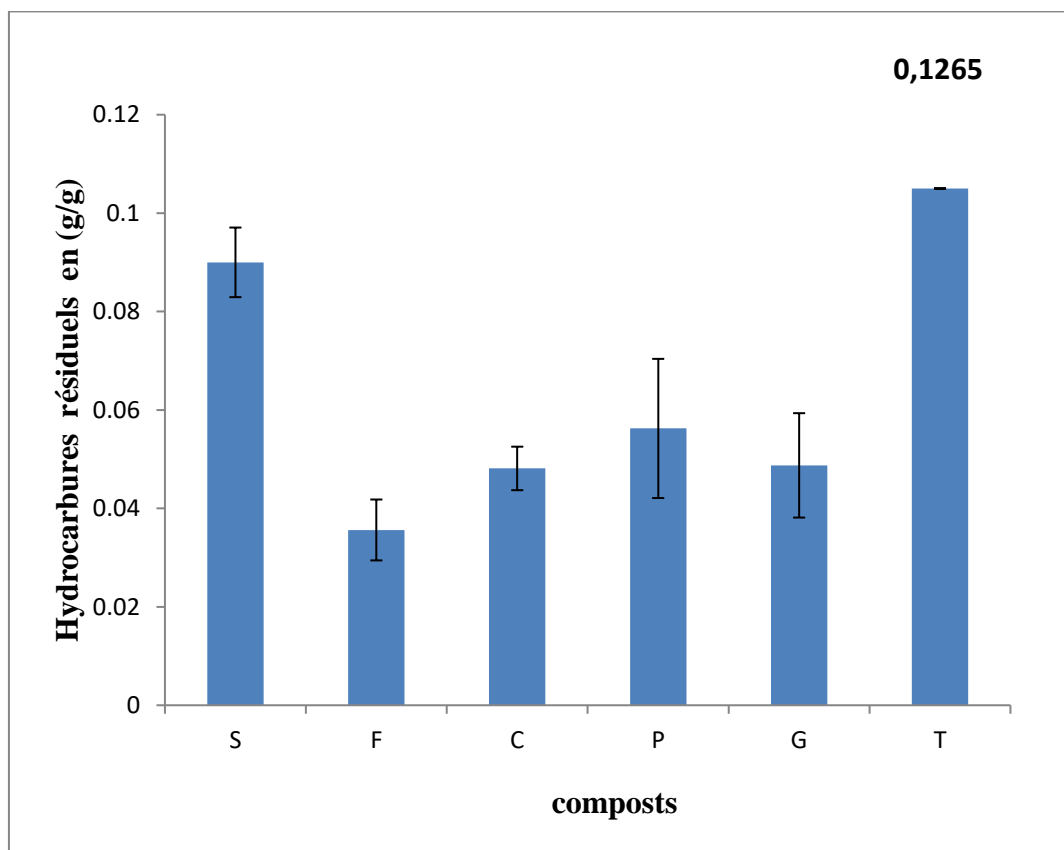


**Figure 14:** Activité de la catalase

Le test de Kruskal-Wallis n'a révélé aucune différence significative entre les différents ajouts ( $p$ -value = 0,2136). Ceci indique qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les différents traitements.

### 1.5. Étude quantitative des hydrocarbures résiduels

Une différence marquée est observée entre le sol témoin et les sols traités par les ajouts organiques. Le sol témoin (T), présente la plus forte teneur en hydrocarbures, atteignant (0,105 g / g du sol). Le sol traité avec du fumier (F) affiche la plus faible concentration avec (0,036 g / g du sol), suivi de la cendre (C) avec (0,048 g / g du sol), du grignon d'olive (G) avec (0,049 g / g du sol), et de la paille (P) avec (0,056 g / g du sol), tandis que le sol traité avec de la sciure de bois (S) présente une concentration plus élevée (0,09 g / g du sol), proche de celle du témoin (figure 15).



**Figure 15:** Quantité des hydrocarbures résiduels dans le sol

Le test de Kruskal-Wallis (p-value = 0,1265) indique qu'il n'existe pas de différence statistiquement significative entre les groupes au seuil de 5%.

### 1.6. Études qualitative des hydrocarbures résiduels

Le tableau 4 présente les absorbances des différents hydrocarbures aromatiques présents dans les sols traités par divers amendements organiques. Ces données mettent en évidence des variations notables selon la nature des hydrocarbures aromatiques et le type d'amendement utilisé.

Globalement, le sol sans ajout (sol + S) affiche les valeurs d'absorbance les plus élevées pour les HA mesurés, notamment le benzo(g,h,i)pérylène, le naphthalène, l'acénaphène, l'acénaphthylène, le fluoranthène, le benzo(k)fluoranthène, le pyrène, le phénanthrène, le benzo(b)fluoranthène, le chrysène, le benzo(a)anthracène et le dibenzo(a,h)anthracène. Tous les sols traités avec des amendements organiques fumier (F), paille (P), grignon d'olive (G) et cendres (C) présentent une diminution des absorbances des HAP par rapport au sol sans ajout organique (sol + S). c'est dans le sol traité par le fumier que les plus faibles absorbances ont été enregistrées surtout pour les hydrocarbure aromatique les plus lourds du benzo(g,h,i)pérylène au dibenzo(a,h)anthracène viennent ensuite les absorbances des sol traité avec la paille ,les cendres et le grignon d'olive.

**Tableau 4 :** Composition des HAP dans les amendements organiques (sciure, fumier, cendre, grignon d'olive et la paille)

HAP	LO (nm)	sol+ S	sol+ S+ F	sol+ S+ C	sol+ S+ P	sol+ S+ G
Benzène	200	3,246	3,149	3,148	3,149	3,247
Fluorène	205	3,766	3,766	3,669	3,67	3,669
Benzo(g,h,i)pérylène	210	4	2,998	3,801	3,926	3,927
Naphtalène	220	3,933	2,603	3,673	3,77	3,828
Acénaphène	227	4	2,228	3,598	3,289	3,76
Acénaphthylène	229	3,968	2,076	3,551	3,169	3,721
Fluoranthène	236	3,934	1,528	3,466	2,826	3,66
Benzo(k)fluoranthène	238	3,781	1,4	3,344	2,715	3,541
Pyrène	241	3,63	1,17	3,079	2,453	3,296
Phénanthrène	251	3,305	0,916	2,729	2,23	2,922
Benzo(b)fluoranthène	256	3,316	0,863	2,722	2,289	2,906
Chrysène	268	3,479	0,679	2,69	2,607	3,136
Benzo(a)anthracène	286	2,839	0,544	2,122	2,122	2,562
Dibenzo(a,h)anthracène	297	2,315	0,437	1,778	1,705	2,093

### 2. Discussion

L'évaluation de l'efficacité des ajouts organiques dans le compostage d'un sol contaminé par des carburants a permis de mettre en évidence leur rôle crucial dans la stimulation de la biodégradation des hydrocarbures et dans l'amélioration de la qualité du sol.

Les résultats du test de toxicité sur les vers de terre d'*E. fetida* montrent que dans le sol contenant le fumier le taux de survie était de (100%), ce qui témoigne de l'efficacité de cette matière organique à améliorer et réduire l'effet toxique des hydrocarbures dans le sol pollué. Ce résultat confirme que le fumier favorise un environnement biologiquement actif, riche en micro-organismes et en éléments nutritifs, ce qui permet, non seulement la dégradation des polluants, mais aussi la réduction de leur biodisponibilité toxique (Benyahia et al., 2005).

L'ajout de la sciure de bois, de la paille et du grignon d'olive a également mené à des résultats satisfaisants, avec des taux de survie de (88%). Ces matières organiques présentent un rapport C/N élevé, notamment le grignon d'olive (Sayara et al., 2011).

Les résultats obtenus pour le sol témoin (66%) et le sol traité avec les cendres de bois (55%) montrent un taux de survie plus faible. Dans le cas du sol témoin, l'absence d'amendement explique la faible dégradation des hydrocarbures et donc leur forte biodisponibilité pour les organismes. Quant aux cendres de bois, bien qu'elles puissent jouer un rôle dans l'ajustement du pH, leur utilisation en excès s'est avérée nocive pour les vers de terre comme l'ont noté Zhang et al. (2002). Les différences observées entre les traitements ne sont cependant pas statistiquement significatives, comme l'indique le test de Kruskal-Wallis, qui a donné une p-value de 0,07.

Les résultats de la germination des grains de maïs montrent des différences notables dans les taux de germination selon les amendements organiques utilisés. Le fumier d'ovin a montré l'effet le plus favorable, en améliorant le taux de germination (90%), suivi du grignon d'olive avec (83%). Ces valeurs élevées témoignent de leur richesse en matière organique, en nutriments et en microorganismes bénéfiques qui participent à la dégradation des hydrocarbures. Nos résultats concordent avec ceux de Bouacem et Chabane (2022) qui ont montré que l'ajout de fumier et de grignon d'olive a permis une germination des graines de maïs.

Des taux de germination modérés, compris entre (56%) et (70%), ont été enregistrés dans les sols amendés avec la paille, la sciure de bois et les cendres de bois. En comparaison, le sol témoin, non enrichi par un apport organique, a présenté un taux de germination similaire,

traduisant la présence résiduelle d'hydrocarbures dans le sol. En effet, Chaineau et al. (1997) ont montré que la présence d'hydrocarbures dans le sol pouvait inhiber la germination des graines et réduire la croissance des plantes.

L'analyse statistique par l'anova a révélé que les différences entre les traitements sont très significatives ( $p$ -value = 0,0002193), confirmant l'influence importante des amendements sur la germination. Le test de Newman-Keuls a montré l'efficacité supérieure du fumier, suivi des grignons d'olive, pour améliorer la qualité biologique du sol.

Par ailleurs, les résultats obtenus dans l'étude de l'activité biologique du sol montrent que la respiration microbienne est plus élevée dans les sols amendés avec le fumier d'ovin et le grignon d'olive, ce qui s'explique par leur teneur élevée en matière organique et leur richesse en nutriments essentiels à l'activité microbienne. Ce type d'amendement stimule les micro-organismes du sol, accélérant ainsi la dégradation des hydrocarbures présents.

Ces résultats sont cohérents avec ceux rapportés par Anderson et Domsch (1990), qui ont montré que la respiration microbienne est fortement corrélée à la disponibilité des substrats organiques dans le sol. D'autres travaux ont démontré que l'ajout de fumier accroissait significativement l'activité microbienne du sol, notamment la respiration microbienne, en fournissant à la microflore un substrat riche en carbone et en nutriments (Insam, 1990).

Les sols amendés avec la paille, la sciure de bois, les cendres de bois, ont présenté une respiration microbienne modérée, s'expliquent par leur biodégradabilité lente, ainsi que leur faible teneur en nutriments labiles, limitant ainsi l'activité microbienne (Bernal et al., 2009). Le sol témoin, non amendé, conservait une toxicité importante liée aux hydrocarbures, qui inhibent la respiration des micro-organismes comme l'ont souligné Chaineau et al. (1997).

Les résultats montrent aussi des variations notables de l'activité enzymatique de la catalase entre les différents traitements. Ces variations interprétées à la lumière du rôle de la catalase comme enzyme antioxydante majeure, qui décompose le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ), un produit toxique du métabolisme cellulaire, en eau et en oxygène (Chelikani et al., 2004).

Une activité enzymatique faible, comme celle observée dans le sol témoin. le sol traité avec les cendres de bois et la paille, indique une réponse adaptative à un stress environnemental important, lié à une concentration plus élevée en hydrocarbures. A l'inverse, une importante activité catalasique dans le sol traité avec le fumier et le grignon d'olive traduit une réduction de la toxicité.

Le sol témoin, sans ajouts, conserve une concentration élevée en hydrocarbures résiduels, soulignant une activité microbienne naturelle limitée en l'absence de substrats organiques supplémentaires.

Cela confirme les observations de Bento et al. (2005), selon lesquels la bioremédiation naturelle dans les sols pollués est souvent lente sans intervention favorisant l'activité microbienne. En revanche, tous les traitements organiques ont permis une réduction de la quantité d'hydrocarbures, avec une efficacité particulièrement pour le fumier, ce qui suggère une stimulation intense de la biomasse microbienne et de l'activité enzymatique .

Les résultats montrent que les concentrations des hydrocarbures aromatiques identifiés (HA) sont nettement plus élevées dans le sol non amendé, mettant en évidence une faible biodégradation naturelle. L'ajout d'amendements organiques tels que le fumier, la paille, le grignon d'olive et les cendre ont entraîné une réduction significative des HA. Cette diminution est attribuée à la stimulation de l'activité microbienne et enzymatique favorisée par les apports en matière organique et nutriments. Le fumier s'est révélé comme l'ajout le plus efficace, suivi des autres amendements.

Ces résultats confirment que la nature de l'amendement joue un rôle clé dans l'efficacité du compostage des sols contaminés. Les résultats du test Kruskal-Wallis ( $p$ -value = 0,1265), montrent une différence entre le sol témoin (T) et les sols amendé, bien que cette différence ne soit pas statistiquement significative.

Les résultats de l'analyse qualitative des hydrocarbures résiduels par le spectroscopie-UV a montrent que les concentrations d'hydrocarbures aromatiques sont plus élevées dans le sol non amendé, mettant en évidence une faible de biodégradation naturelle (Bento et al., 2005). Affiche les concentrations les plus élevées en HAP, notamment pour des composés lourds et persistants tels que le benzo(g,h,i)pérylène, le dibenzo(a,h)anthracène, ainsi que pour des HAP plus légers comme le naphtalène et le phénanthrène.

Cette présence forte confirme l'incapacité du sol non enrichi à assurer une biodégradation naturelle efficace des hydrocarbures, probablement en raison d'une activité microbienne limitée et de l'absence de nutriments disponibles.

L'ajout d'amendements organiques tels que le fumier, la paille, le grignon d'olive et la cendre entraînent une réduction significative des HAP. Cette diminution peut être attribuée à la

stimulation de l'activité microbienne et enzymatique, favorisée par les apports en matière organique et en nutriments comme l'ont montré les travaux de Zhao et al. (2011).

Le fumier s'est révélé le plus efficace, grâce à sa richesse en micro-organismes et en éléments nutritifs, suivi d'autres amendements comme le grignon d'olive et la paille qui offrent également une bonne biodégradabilité ceci concorde avec les résultats de Khan et al. (2004). La cendre, bien que moins organique, peut améliorer les conditions physico-chimiques du sol, facilitant indirectement la dégradation (Margesin & Schinner, 2001).

### Conclusion

Notre travail a eu pour but de comparer l'effet de différents ajouts organiques sur le compostage d'un sol pollué aux carburants, provenant d'une station-service.

L'efficacité du processus de décontamination a été démontré à travers plusieurs paramètres qui sont les tests écotoxicité (test de germination des grains de maïs, test de toxicité sur les vers de terre), la mesure de l'activité biologique du sol par (test respirométrique, activité de la catalase), est la caractérisation des hydrocarbures par (spectroscopie UV, et la quantification des hydrocarbures résiduels).

L'évaluation de l'efficacité des ajouts organiques a clairement démontré leur rôle fondamental dans la stimulation de la biodégradation et l'amélioration de la qualité du sol. Le test de survie sur les vers de terre *E. fétida* a révélé que le fumier est l'amendement le plus efficace mais ce n'est pas significatif, avec un taux de survie de 100%. Les autres amendements comme la sciure de bois, la paille et le grignon d'olive ont donné des résultats satisfaisants 88%, tandis que les cendres de bois et le sol témoin ont affiché des taux modéré respectivement de 55 et 66%, montrant que les hydrocarbures exercent encore un effet toxique notable dans le sol.

Concernant le test de germination des graines de maïs, le fumier a montré les meilleurs résultats (90% de germination), suivi du grignon d'olive (83%), qui seraient dus à leur richesse en nutriments et microorganismes bénéfiques. Les taux de germination modérés observés dans les sols amendés avec la paille, la sciure et les cendres (entre 56 et 70%), ainsi que dans le sol témoin (60%), traduisent la persistance des hydrocarbures dans le sol.

L'analyse de la respiration microbienne a confirmé une forte activité biologique dans les sols enrichis avec le fumier et le grignon d'olive, traduisant une activité microbienne et donc une biodégradation accélérée des polluants. Les autres traitements ont montré une activité modérée, notamment les cendres de bois et le sol témoin, qui serait la conséquence de leur faible apport en carbone biodégradable.

L'étude de l'activité enzymatique de la catalase a révélé une activité faible dans le sol témoin traduisant une réponse au stress oxydatif. En revanche, l'activité plus élevée dans les sols traités avec fumier et grignon d'olive indique une meilleure stabilisation biologique du sol et une réduction de la pression toxique exercée par les hydrocarbures.

Les analyses chimiques ont montré que le sol témoin présentait les plus fortes concentrations en HA. Tous les amendements organiques ont permis une réduction significative de ces contaminants, avec une efficacité maximale enregistrée pour le fumier. Ces résultats confirment que les apports organiques, stimulent efficacement la dégradation des hydrocarbures.

Dans le prolongement de cette étude, plusieurs perspectives de recherche peuvent être envisagées, notamment :

- Combiner les techniques biologiques avec la phytoremédiation en utilisant des plantes capables de tolérer et d'absorber les hydrocarbures (*Helianthus annuus*).
- Etude de l'efficacité d'autres amendements organiques comme, le biochar, et les boues résiduaires pour stimuler la biodégradation des hydrocarbures.
- Analyse de la dégradation des hydrocarbures en fonction de leur nature chimique (alcanes, aromatiques, HAP) pour adapter les techniques de bioremédiation selon les polluants.
- Étude de l'efficacité de mélanges des ajouts organiques pour accélérer la biodégradation des hydrocarbures dans les sols impactés.
- Evaluer efficacités des déchets organique des centre d'enfouissement technique (CET) sur le compostage d un sol pollué aux carburant

## Référence bibliographique

### -A-

**Alloway B.J. (2013).** Métaux lourds dans les sols : métaux traces et métalloïdes dans les sols et leur biodisponibilité. 614p.

**Adriano D.C. (2001).** Les éléments traces dans les milieux terrestres. biogéochimie, biodisponibilité et risques liés aux métaux. 867 p.

**Ali Ahmed S. (2011).** Essai de réhabilitation d'un sol contaminé par les hydrocarbures à l'aide de tensioactifs obtenus par voie biologique. Thèse de magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique. 99p.

**Ali Ahmed S. (2022).** Optimisation de quelques techniques de décontamination de sols pollués aux hydrocarbures. Réalisation de bio-essais. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou. 129p.

**Anderson T.H., & Domsch K.H. (1990).** Application des biomasses microbiennes de sols issus de différents cycles de culture. *Biologie et biochimie des sols*, 22 (2), 251–255.

### -B-

**Buchanan M.V., Griffin, D.W., & Sloan D.S. (2000).** Petroleum hydrocarbons and environmental protection. *Environmental Science & Technology*, 34(2), 55–61.

**Boukrou A. et Nait Si Ahmed L. (2022).** Effet des ajouts organiques sur l'efficacité de la décontamination d'un sol pollué aux carburants par compostage. Mémoire de Master UMMTO. 33p.

**Bach P., Smith D.R., et Ghaly A.E. (1987).** Transfert de chaleur et de masse dans les systèmes de compostage. *Waste Management & Research*, 5 (2), 183–194.

**Beck-Friis B., Smars S., Jonsson H., et Kirchmann H. (2000).** Émissions gazeuses de dioxyde de carbone, d'ammoniac et de protoxyde d'azote provenant des déchets organiques ménagers dans un réacteur à compost sous différents régimes de température. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 78 (4), 423–430.

**Bertoldi M., Ferranti M.P., et Manzi, S. (1983).** Le processus de compostage : principes fondamentaux et applications. *Le compostage des déchets solides* (pp.25–60).

**Bernal M.P., Alburquerque J.A., et Moral R. (2009).** Compostage des déjections animales et critères chimiques pour l'évaluation de la maturité du compost . *Bioresource Technology*, 100(22), 544–553.

**Benyahia F., Abdelghani A., et Murvin P. (2005).** Biorestoration des sols contaminés par le pétrole brut grâce au compostage. *Journal of Hazardous Materials*, 124(3), 229–234.

**Bouacem L., Chabane C., (2022)** : effet de l'ajout organique sur l'efficacité de décontamination, par compostage, d'un sol pollué aux carburants. Mémoire de master. UMMTO. 23p.

**Bouterfas M., Bensmail F., et Khaladi M. (2020).** État de la pollution des sols par les hydrocarbures en Algérie cas des sites pétroliers. Journal Algérien des Régions Arides, 14(1), 25-34.

**Baptista F., Faria P. et Oliveira, L. (2018).** Amélioration de la biorestauration des hydrocarbures pétroliers grâce au compostage. Environmental Pollution, 237, 397–405.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.02.063>

-C-

**Chaîneau C.H., Morel J.L., & Oudot J. (1996).** Phytotoxicité et absorption des hydrocarbures du fioul par les plantes. Journal of Environmental Quality , 25 (4), 1478–1483.

**Chelikani P., Fita I., et Loewen P.C. (2004).** Diversité des structures et des propriétés des catalases. Sciences de la vie cellulaire et moléculaire, 61 (2), 192-208.  
<https://doi.org/10.1007/s00018-003-3206-5>

-E-

**Epstein E. (1997).** La science du compostage. CRC Press LLC, Floride, 504 p.

-F-

**Finstein M.S., Miller F.C., Strom P.F et Macgregor S.T. (1975).** Microbiologie du compostage des déchets solides municipaux. Progrès en microbiologie appliquée, 19, 113–151.

**Franco C. (2003).** Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains. Influence de la nature des déchets et du procédé de compostage. 145 p.

**FAO. (2015).** L'état des ressources mondiales en sols (SWSR) – Rapport principal. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. 651 p.

-G-

**Gautam A., et Pandey V.C. (2020).** Bioremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures par compostage : une revue. Environmental Science and Pollution Research, 27 , 861–878.

**-H-**

**Hassan M.L., Shokry E.A., Fadel S.M., et Wakil N.A. (2012).** Nanocellulose issue de tiges de maïs : isolement et caractérisation. Carbohydrate Polymers , 89 (2), 592–599.

**Haritash A.K., et Kaushik C.P. (2009).** Aspects de la biodégradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : Une revue. Journal des matières dangereuses, 169 (1–3), 1–15.

**Haug R.T (1993).** The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers.

**-I-**

**Insam H. (1990).** La biomasse microbienne et la respiration. Biologie des sols et biochimie, 22 (4), 525-532.

**-J-**

**Jones A., et Brown T. (2018).** Impact des polluants sur la faune du sol : Le rôle des vers de terre. Toxicologie environnementale, 22 (4), 399-410.

**-K-**

**Kandeler E., Tschierko D., et Spiegel H. (1999).** Suivi à long terme de la biomasse microbienne, de la minéralisation de l'azote et de l'activité enzymatique d'un chernozem sous différentes pratiques culturales. Biologie et fertilité des sols , 28 (4), 343–351.

**Khan F.I., Husain T., et Hejazi R. (2004).** Aperçu et analyse des technologies de réhabilitation des sites. Journal of Environmental Management, 71 (2), 95–122.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.02.003>

**-L-**

**Liao X., Zhang X. et Wang H. (2019).** Le compostage comme solution durable pour la remédiation des sols contaminés par les hydrocarbures. Journal of Hazardous Materials , 373 , 189–197.

**-M-**

**Mezari. (2024).** Essai de décontamination d'un sol pollué aux hydrocarbures par compostage Mémoire de Master UMMTO. 25p.

**Miller F.C., Macauley B.J., et Harper S.R. (1989).** Compostage. Considérations microbiennes. Écologie microbienne, 18 (1), 59–71.

**Margesin R., et Schinner F. (2001).** Bioremédiation (atténuation et biostimulation naturelles) des sols contaminés par du diesel dans une station de ski sur glacier alpin. *Microbiologie appliquée et environnementale* , 67 (7), 127–133.

**Montanarella L., Badraoui M., Chude V., Baptista I., et Vargas R. (2016).** Les sols du monde sont menacés. *Sol*, 2 (1), 79-82.

**Meena R., Kumari R., Meena R.S Kumar M., et David S. (2021).** Phases de compostage et facteurs responsables d'un compostage efficace et amélioré. *Revue internationale du recyclage des déchets organiques en agriculture*, 10, 367–377.

**-P-**

**Pillay K., Lange W., et Weiersbye I.M. (2020).** Compostage pour la biorestauration des sols contaminés par les hydrocarbures. *Waste Management*, 112 , 276–285.

**-S-**

**Sundberg C., et Tullberg C. (2012).** Le rôle des micro-organismes dans le compostage. revue de la littérature. *Composting Science & Technology Journal*, 3 (1), 25–45.

**Smith J. (2020).** Utilisation de *Eisenia fetida* dans les tests de levée des sols. Un modèle biologique pour la bioremédiation. *Journal d'écologie des sols* , 15 (3), 245-258.

**Sayara T., Sarra M. et Sánchez A. (2011).** Compostage de différents déchets organiques et effet du processus de compostage sur le devenir des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP). *Journal des sciences de l'environnement et de la santé*, 46 (13), 112-118.

**-V-**

**Vidali M. (2001).** Bioremédiation. *Chimie pure et appliquée* , 73 (7), 163–172.

**-W-**

**Waksman S.A, et Cordon T.C (1939).** Population microbiologique des composts de fumier d'étable. *Soil Science*, 47 (2), 83–114.

**-Z-**

**Zhang L. (2021).** Dégradation microbienne des hydrocarbures pétroliers dans les systèmes de compostage. *Environmental Science and Pollution Research* , 28 (21), 855–867.

**Zhang L., Yamasaki S., et Nanzyo M. (2002).** Cendres résiduelles pour la production agricole. Teneur en éléments nutritifs des plantes et caractéristiques chimiques de certains métaux. *Science de l'environnement*, 284 (1–3), 215–225.

**Zhao Y., Fan Z.P et (2011).** Réponse de la biomasse microbienne et des activités enzymatiques aux amendements dans les sols contaminés par le pétrole. *Contamination des sols et des sédiments*, 20 (2), 211-220. <https://doi.org/10.1080/15320383.2011.546447>

## Annexes

### Annexe I: Résultats des tests.

#### Annexe 1. Tableau des résultats du teste de toxicité sur les verres de terres pondons 14 jours

Durée Traitements	0H		24H		48H		72H		14 Jours	
	F%	N	F%	N	F%	N	F%	N	F%	N
sol+ S I	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
Sol+ S II	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
Sol+ S III	100	3	100	3	66	2	66	2	66	2
sol+ S+ F I	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
sol+ S+ F II	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
sol+ S+ F III	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
sol+ S+ C I	100	3	100	3	66	2	66	2	66	2
sol+ S+ C II	100	3	100	3	100	1	33	1	33	1
sol+ S+ C III	100	3	100	3	66	2	66	2	66	2
sol+ S+ P I	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
sol+ S+ P II	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
sol+ S+ P III	100	3	100	3	66	2	66	2	66	2
sol+ S+ G I	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
sol+ S+ G II	100	3	100	3	66	2	66	2	66	2
sol+ S+ G III	100	3	100	3	100	3	100	3	100	3
Sol T	100	3	100	3	66	2	66	2	66	2

#### Annexe 2. Résultats teste de germination des graines de maïs

Traitements	Nombres des graines semées	Nombres des graines germées après 7 jours	Taux de germination (%)
Sol+ S I	10	6	60
Sol+ S II	10	7	70
Sol+ S III	10	5	50
sol+ S+ F I	10	10	10
sol+ S+ F II	10	9	90
sol+ S+ F III	10	8	80
sol+ S+ C I	10	6	60
sol+ S+ C II	10	6	60
sol+ S+ C III	10	5	50
sol+ S+ P I	10	8	80
sol+ S+ P II	10	6	60
sol+ S+ P III	10	7	70
sol+ S+ G I	10	8	80
sol+ S+ G II	10	8	80
sol+ S+ G III	10	9	90
Sol T	10	6	60

### Annexe 3. Résultats de la respiration microbienne

Traitement	volume de HCl utilisé	CO <sub>2</sub> dégagé (mg/50g Sol)	CO <sub>2</sub> dégagé (mg/100g Sol)
sol+ S I	4,9	2,42	4,84
Sol+ S II	4,5	3,3	6,6
Sol+ S III	4,8	2,64	5,28
sol+ S+ F I	3,4	5,72	11,44
sol+ S+ F II	2,3	8,14	16,28
sol+ S+ F III	2,8	7,04	14,08
sol+ S+ C I	4,3	3,74	7,48
sol+ S+ C II	3,9	4,62	9,24
sol+ S+ C III	4,5	3,3	6,6
sol+ S+ P I	4,3	3,74	7,48
sol+ S+ P II	3,5	5,5	11
sol+ S+ P III	4,1	4,18	8,36
sol+ S+ G I	3,4	5,72	11,44
sol+ S+ G II	3,8	4,84	9,68
sol+ S+ G III	3,3	5,94	11,88
Témoin	6		

### Annexe 4. Résultats de l'Activité de la catalase

Traitements	Volume de KMnO <sub>4</sub> utilisé en (ml) (réagi avec H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )
sol+ S I	0,4
Sol+ S II	0,3
Sol+ S III	0,3
sol+ S+ F I	0,2
sol+ S+ F II	0,3
sol+ S+ F III	
sol+ S+ C I	0,4
sol+ S+ C II	0,2
sol+ S+ C III	0,3
sol+ S+ P I	0,2
sol+ S+ P II	
sol+ S+ P III	0,4
sol+ S+ G I	0,3
sol+ S+ G II	0,2
sol+ S+ G III	0,3
Témoin	0,6

## Annexe 5. Quantification des hydrocarbures résiduels

Traitements	hydrocarbures résiduels dans 8 g de sol
sol+ S I	0,76
Sol+ S II	0,68
sol+ S+ F I	0,32
sol+ S+ F II	0,25
sol+ S+ C I	0,36
sol+ S+ C II	0,41
sol+ S+ P I	0,53
sol+ S+ P II	0,37
sol+ S+ G I	0,45
sol+ S+ G II	0,33
Sol Témoin	0,84

## Annexe II : Résultats des analyses statistiques

### Annexe 1. Test de Kruskal- wallis pour la survie des vers de terre

```
> kruskal.test(NV~Trt)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  NV by Trt
Kruskal-Wallis chi-squared = 9.9778, df = 5, p-value = 0.07587
```

### Annexe 2. Test d'ANOVA pour germination des graines de maïs

```

> reg.aov=lm(NG~Trt)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: NG
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Trt     5 45.611   9.1222   7.819 0.001757 **
Residuals 12 14.000   1.1667
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

```

$groups
      NG groups
F 9.000000    a
G 8.333333   ab
P 7.000000  abc
T 6.000000  bcd
C 5.666667   cd
S 4.333333    d

```

### Annexe 3. Test d'ANOVA pour la respiration microbienne

```

> reg.aov=lm(CO2~Trt)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: CO2
      Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
Trt     5 151.463 30.2926 13.739 0.0001293 ***
Residuals 12 26.459   2.2049
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

```

$groups
      CO2 groups
F 13.933333    a
G 11.000000    b
P  8.946667   bc
C  7.773333   bc
T  6.000000    c
S  5.573333    c

```

### Annexe 4. Test de Kruskal- wallis de l'activité de la catalase

```

> kruskal.test(KMnO4~Trt)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  KMnO4 by Trt
Kruskal-Wallis chi-squared = 7.0961, df = 5, p-value = 0.2136

```

### Annexe 5. Test de Kruskal- wallis des hydrocarbures résiduelles

```

> kruskal.test(hcr~Trt)

      Kruskal-Wallis rank sum test

data:  hcr by Trt
Kruskal-Wallis chi-squared = 8.5909, df = 5, p-value = 0.1265

```

## **Résumé**

Ce travail porte sur la bioremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures, une problématique environnementale majeure notamment en Algérie. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité du compostage, d'un sol pollué enrichi par divers amendements organiques, pour le décontaminer.

Cinq matériaux organiques ont été testés : fumier d'ovin, grignons d'olive, paille, sciure et cendres de bois. Plusieurs paramètres biologiques et physico-chimiques ont été analysés pour évaluer l'efficacité du processus : survie des vers de terre (*Eisenia fetida*), germination des graines de maïs, respiration microbienne, activité enzymatique de la catalase, quantification des hydrocarbures résiduelles dans les échantillons de sols traités et leurs caractérisations.

Les résultats ont montré que le fumier d'ovin est l'amendement le plus efficace, assurant une survie totale des vers de terre, une germination élevée (90%), une forte activité microbienne et une réduction marquée de la pollution en hydrocarbure notamment les plus dangereux comme les hydrocarbure aromatique. Le grignon d'olive la paille la sciure et les cendres de bois ont également montré des effets positifs.

Ce travail a mis en évidence l'importance du choix des amendements organiques dans les stratégies de compostage pour la dépollution des sols.

**Mots clés :** compostage, sol, Hydrocarbure, pollution, ajouts organique

## **Abstract**

This work focuses on the bioremediation of hydrocarbon-contaminated soils, a major environmental issue in Algeria in particular. The main objective is to evaluate the effectiveness of composting a polluted soil enriched with various organic amendments, in order to decontaminate it.

Five organic materials were tested: sheep manure, olive pomace, straw, sawdust and wood ash. Several biological and physico-chemical parameters were analyzed to assess the effectiveness of the process: earthworm (*Eisenia fetida*) survival, corn seed germination, microbial respiration, catalase enzymatic activity, quantification of residual hydrocarbons in treated soil samples and their characterization.

The results showed that sheep manure was the most effective soil improver, ensuring total survival of earthworms, high germination (90%), high microbial activity and a marked reduction in hydrocarbon pollution, particularly the more dangerous aromatic hydrocarbons. Olive pomace, straw, sawdust and wood ash have also shown positive effects.

This work has highlighted the importance of the choice of organic amendments in composting strategies for soil decontamination.

**Keywords:** composting, soil, hydrocarbon, pollution, organic additions