

REBUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri Tizi Ouzou

Faculté Des Sciences Biologiques Et Des Sciences Agronomiques

Département D'Écologie et Environnement



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention de diplôme en Ecologie et Environnement

Spécialité: Biodiversité Et Environnement

Thème

**Essai de Décontamination, par
Vermicompostage, d'un sol pollué aux
Carburants**

Présenté par:

Hellal Ferroudja

Rami Romaissa

Devant le jury:

Présidente: ALI AHMED D.

Promotrice: ALI AHMED S.

Co-Promotrice: LANDRI G.

Examinatrice: CHIBANE G.

Professeur à l'U.M.M.T.O.

M.C.B à l'U.M.M.T.O.

M.A.A à l'U.M.M.T.O.

M.A.A à l'U.M.M.T.O.

Promotion: 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu pour la force et la sagesse qu'Il m'a accordées tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à :

Madame ALI AHMED S., notre promotrice, pour son encadrement exigeant, ses précieux conseils et sa disponibilité durant tout ce parcours.

Madame LANDRI G., notre Co-promotrice, pour son soutien constant et ses orientations éclairées.

Madame Mme SADOUDI, présidente de notre jury, pour l'honneur de sa Participation et ses remarques constructives.

Madame CHIBANE, examinatrice, pour le temps consacré à l'évaluation de notre travail et pour ses précieuses suggestions.

Madame Mme ABROUS H., ingénieure de laboratoire, pour son assistance technique, son professionnalisme et sa bienveillance tout au long de nos expérimentations.

Un merci sincère à nos familles, nos amis et tous ceux qui m'ont encouragé(e) jusqu'à cette étape.

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à :

A mes chers parents qui ont été toujours présents, merci de fond du cœur pour leurs déroulement, leurs disponibilités et leurs affections tout au long de mes études.

A mes sœurs et mon frère.

A mes amis, à qui je souhaiterai adresser l'expression de mon amour le plus profond pour leur écoute, affection, soutien moral et conseils.

Ma binôme ferroudja qui m'a aidé et soutenu tout au long de ce projet d'étude.

Romaissa

Dédicaces

À mes parents bien-aimés,

Pour votre amour sans limites, vos sacrifices silencieux et votre foi inébranlable en moi. Vous êtes ma première source d'inspiration et ma plus grande fierté.

À mes frères et sœurs, cœurs battants de ma vie, merci d'être ma Première équipe et mon refuge inconditionnel.

Mes adorables sœurs : Lydia, Lynda, Fadhila.

Mes adorables frères : Nounou, Ghiles, Yacine .

Merci à ma sœur et à son mari pour leur présence réconfortante, et à leurs petits Lehna , Ghani , Celina,

Sources de joie et de motivation.

Merci à mes amis, véritables étoiles de mon chemin, pour votre présence qui a transformé chaque épreuve en aventure partagée.

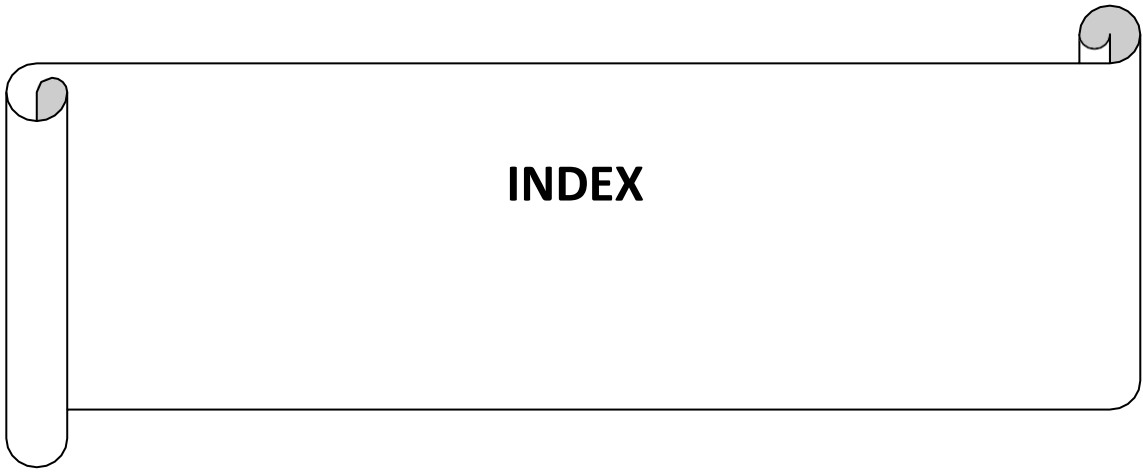
Mimo.

À ma binôme Romaiassa,

Merci d'avoir fait de cette collaboration le cœur battant de notre réussite.

Puisse ce mémoire concrétiser leurs aspirations profondes, tout en témoignant de l'immense appui qui l'a rendu possible.

Ferroudja



INDEX

Listes des figures

Figure 1 : Image satellitaire de la station service Freha	14
Figure 2 : Vers adultes d' <i>Eisenia fetida</i>	15
Figure 3 : Vers adultes d' <i>Esenia andrei</i>	15
Figure 4 : Dispositif de vermicompostage.....	18
Figure 5 : Cocons d' <i>Eisenia fetida</i>	18
Figure 6 : Juvénilles d' <i>Eisenia fetida</i>	18
Figure 7 : Taux moyen de mortalité des vers de terre de deux espèces	21
Figure 8 : Reproduction des vers de terre des deux espèces dans le sol pollué	22
Figure 9 : Résultats du test respirométrique dans les différents sols.....	23
Figure 10 : Activité de la catalase dans les différents sols.....	23
Figure 11 : Taux de germination des graines de maïs dans les différents sols	24
Figure 12 Résultats d'extraction des HC dans les différents sols.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : distribution des espèces de vers de terre sur les sols.....	17
Tableau 2 : résultats de la caractérisation des ha par spectroscopie	24

Sommaire

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

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Pollution du sol.....	3
1.1. Définition de la pollution du sol	3
1.2. Polluants du sol	3
1.2.1. Polluants organiques.....	4
1.2.2. Les polluants inorganiques.....	4
1.3. Pollution du sol par les hydrocarbures.....	4
1.3.1. Carburants.....	5
1.3.2. Classification des hydrocarbures.....	5
1.3.3. Source de la pollution du sol aux carburants.....	6
1.4. Devenir des carburantes dans le sol.....	6
1.5. Dégradation des hydrocarbures.....	7
2. Techniques de décontamination des sols pollués par les carburants	9
3. Définition le compostage.....	11
3.1. Définition du compost.....	11
4. Définition de Vermicomposta.....	12
4.1. Avantages du vermicompostage.....	13

4.2. Quelques travaux sur le vermicompostage des sols pollués.....	13
--	----

Chapitre II : Matériels et méthodes

1. Matériels

1.1. Le sol	14
1.2. Les Vers de terre	14
1.3. Matériel végétal	16
1.4. Fumier de bovin	16
1.5. Sciure de bois	16
1.6. Maïs.....	16

2. Méthodes

2.1. Méthode d'échantillonnage	16
2.2. Dispositif expérimental	17
3. Evaluation des traits de vie des vers de terre... ..	16
4. Etude de l'activité biologique du sol	17
5. Méthode d'analyse statistique.....	20

Chapitre III : Résultats et discussion

1. Résultats

1.1. Mortalité des vers de terre	21
1.2. Reproduction des vers de terre.....	22
1.3. Résultat de test respirométrique.....	22
1.4. Activité de la catalase.....	23
1.5. Germination des graines de maïs.....	24
1.6. Quantité des hydrocarbures résiduels dans le sol	24

2. Discussion	24
---------------------	----

Conclusion générale	26
----------------------------------	-----------

Références

bibliographiques Annexes

Résumé



Introduction générale

La pollution des sols est un phénomène complexe et multifactoriel qui constitue une menace sérieuse pour les écosystèmes terrestres, la santé humaine et la durabilité des ressources naturelles. Elle se caractérise par l'accumulation de substances chimiques, physiques ou biologiques dans le sol, altérant ses propriétés naturelles et sa capacité à remplir ses fonctions écologiques. Les principales causes de cette pollution incluent les activités industrielles, l'agriculture intensive, les déchets urbains, les accidents environnementaux et les pratiques inadéquates de gestion des déchets. Parmi les polluants les plus préoccupants figurent les métaux lourds (plomb, cadmium, mercure), les pesticides, les hydrocarbures, les plastiques et les produits pharmaceutiques. Ces contaminants peuvent persister dans l'environnement pendant des décennies, voire des siècles, et affecter la biodiversité, la fertilité des sols, la qualité des eaux souterraines et la sécurité alimentaire (Kabata-Pendias, 2011 ; FAO, 2015).

La pollution des sols est une problématique spécifique liée à l'exploitation, au transport et à l'utilisation des combustibles fossiles. Les carburants, tels que l'essence, le diesel, le kérosène et les huiles minérales, contiennent des composés organiques volatils (COV) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont hautement toxiques et persistants dans l'environnement. Ces substances peuvent s'infiltrer dans le sol à la suite de fuites de réservoirs, de déversements accidentels ou de mauvaises pratiques de stockage. Une fois dans le sol, elles peuvent migrer vers les nappes phréatiques, contaminant les ressources en eau potable et affectant les écosystèmes aquatiques. Les hydrocarbures peuvent également inhiber l'activité biologique du sol, réduisant la diversité microbienne et la décomposition de la matière organique, ce qui compromet la fertilité du sol (Hussain et al., 2018 ; US EPA, 2020).

Face à ces défis, des méthodes de remédiation et de gestion durable des sols pollués ont été développées. Parmi elles, le vermicompostage émerge comme une solution écologique et économiquement viable. Le vermicompostage est un processus biologique qui utilise des

Vers de terre, principalement l'espèce *Eisenia fetida* (ver rouge de Californie), pour décomposer les déchets organiques en un amendement riche en nutriments, appelé vermicompost. Ce processus implique une interaction symbiotique entre les vers de terre, les microorganismes du sol et les enzymes digestives des vers, qui transforment les matières organiques en un produit stable et fertile. Le vermicompostage présente plusieurs avantages : il réduit le volume des déchets organiques, recycle les nutriments, améliore la structure du sol et augmente sa capacité de rétention d'eau (Singh et al., 2011 ; Dominguez & Edwards, 2011). De plus, des études récentes ont montré que le vermicompostage peut contribuer à la dégradation de certains polluants organiques, tels que les hydrocarbures légers, grâce à l'activité enzymatique des vers et des microorganismes associés (Edwards & Arancon, 2004).

Le présent mémoire se subdivise en trois chapitres.

- Le premier représente une synthèse bibliographique sur le sol et la pollution par les carburants, leur nature, leur devenir et leurs impacts sur l'environnement ainsi que les techniques de décontamination de ce type de pollution, en particulier le vermicompostage.
- Le second chapitre est consacré à la présentation de la station d'étude, du matériel et des méthodes utilisés dans ce travail, notamment la survie et la biomasse des vers de terre, la respiration, l'activité de la catalase et la germination des graines.
- Le troisième chapitre consiste en la présentation des résultats obtenus concernant les paramètres biologiques et chimiques étudiés, ainsi que leur discussion.

Enfin, ce travail se termine par une conclusion générale et quelques perspectives.



**Synthèse
bibliographique**

1. Pollution du sol

Le sol est la couche superficielle meuble de la lithosphère, dont l'épaisseur varie de quelques centimètres à plusieurs mètres. Composé d'un mélange de matériaux minéraux et organiques, il sert de support et de milieu naturel pour la croissance des plantes (Legros, 2007). Le sol est l'un des milieux les plus importants de notre environnement, jouant un rôle essentiel pour l'homme et les êtres vivants. Avec les sédiments et les eaux de surface, il informe des niches écologiques riches en productivité de matière vivante (notamment grâce aux végétaux), en diversité biologique (végétaux producteurs, animaux consommateurs et micro-organismes minéralisateurs) et en réserves de matières organiques (Dominique, 1997)

1.1. Définition de la pollution du sol

La pollution et la contamination désignent l'accumulation anormale et exogène d'éléments ou de composés minéraux, organiques ou d'agents pathogènes dans un milieu, altérant sa qualité. Ces phénomènes sont généralement causés par des activités humaines (Chassin et al. 1996). Un polluant est une substance naturelle ou synthétique, minérale ou organique, qui peut être absorbée par les plantes (via les feuilles ou les racines) ou par les animaux (par inhalation, ingestion ou contact). Il perturbe les fonctions vitales des organismes, pouvant entraîner des intoxications, voire la mort (Ramade, 2000).

1.2. Polluants du sol

Les polluants des sols sont divers et souvent toxiques pour l'homme. Ces polluants peuvent être naturellement présents dans les sols ou résulter d'activités humaines

(Roger et Jacq, 2000). On distingue généralement deux groupes de polluants dans les sols contaminés : les polluants organiques et les polluants inorganiques.

1.2.1. Polluants organiques

Les polluants organiques sont majoritairement des produits de synthèse issus des activités humaines. Ils proviennent principalement des secteurs industriels (production d'énergie, industries chimiques), urbains (transports, traitement des déchets) et agricoles (utilisation de produits phytosanitaires). Les polluants organiques d'origine industrielle incluent notamment le pétrole et ses dérivés, qui regroupent une large gamme de composés. Ces substances peuvent être classées selon leur origine, leur structure chimique ou leurs propriétés chimiques et physiques (Khellout et Settouf, 2004).

1.2.1.1. Produits organiques industriels

Boucheseiche et al. (2002) soulignent que les produits organiques les plus couramment utilisés dans l'industrie incluent les polychlorobiphényles (PCB), les phénols, les chlorophénols et les phtalates.

1.2.1.2. Hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués uniquement de carbone et d'hydrogène, formant des molécules d'une grande variété (Vandecasteele, 2005). Ils englobent divers produits, tels que le pétrole brut, les produits raffinés, le kérosène, le fioul, les lubrifiants et les huiles moteurs (Wauquier, J.-P. 1998).

Selon Schadeck (2007), cette famille comprend plusieurs catégories : les hydrocarbures aliphatiques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les hydrocarbures halogénés volatils (HHV) et les hydrocarbures aromatiques volatils tels que les BTEX.

1.2.2. Les polluants inorganiques

Les polluants inorganiques comprennent principalement les éléments traces métalliques (ETM), caractérisés par une densité élevée et leur tendance à former des composés insolubles (Alloway, 2013). Naturellement présents dans les sols, ils s'accumulent surtout à cause des activités humaines comme l'industrie, l'agriculture et la combustion fossile (Adriano, 2001). Les métaux les plus courants sont le plomb, le cadmium, le cuivre, le nickel, le zinc, le chrome et le

mercure. Leur présence excessive menace la qualité des sols et la santé des écosystèmes (McLaughlin et al., 2000). L'arsenic, bien que métalloïde, est souvent inclus en raison de ses propriétés similaires (Smedley & Kinniburgh, 2002).

1.3. Pollution du sol par les hydrocarbures

La pollution du sol par les hydrocarbures correspond à la contamination des sols par des composés pétroliers qui perturbent leur structure et leur activité biologique, entraînant des risques pour les écosystèmes et la santé humaine (Alexander, 1999). L'impact dépend des propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures ainsi que des conditions environnementales, telles que le type de sol, le climat et la présence de micro-organismes capables de les dégrader (Maila & Cloete, 2004).

1.3.1. Carburants

Les carburants sont des mélanges combustibles principalement composés d'hydrocarbures. On distingue deux catégories de carburants : les légers et les lourds (Saada et al., 2005). Les plus couramment utilisés sont l'essence (légère) et le gasoil (lourd). Ces produits sont obtenus par distillation du pétrole et sont classés parmi les produits pétroliers raffinés (Colombano et al., 2014).

1.3.1.1. Pétrole brut

Le pétrole brut est un mélange naturel complexe d'hydrocarbures liquides, extrait directement des gisements souterrains. Il constitue une source d'énergie majeure et la matière première essentielle pour la production de carburants, lubrifiants et nombreux produits chimiques industriels. Sa composition varie selon l'origine géologique, influençant ses propriétés physiques et chimiques ainsi que les procédés de raffinage nécessaires (Speight, 2014).

1.3.1.2. Essence

L'essence est un liquide inflammable, principalement utilisé comme carburant et solvant. Elle est constituée d'un mélange complexe d'hydrocarbures légers, comprenant environ 230 hydrocarbures différents (Lemière et al., 2001). Sa composition se répartit en cinq classes principales : les n-alcanes, les iso-alcanes, les cyclo-alcanes, les alcènes et les hydrocarbures aromatiques (Saada et al., 2005).

1.3.1.3. Gasoil

Le gasoil est un liquide contenant des hydrocarbures plus lourds et moins volatils que ceux présents dans l'essence. Contrairement à l'essence, il ne contient pas d'alcènes et est principalement composé de n-alcanes et de cyclo-alcanes (Saada et al., 2005). Il est largement utilisé comme carburant pour les véhicules et dans les systèmes de chauffage (Lumière et al., 2001).

1.3.2. Classification des hydrocarbures

La classification des hydrocarbures repose sur leur structure chimique et leurs propriétés physiques. Elle permet de regrouper ces composés en catégories homogènes afin de mieux comprendre leur comportement dans les processus de transformation et d'utilisation industrielle. Cette organisation est essentielle pour l'analyse, le traitement et l'exploitation efficace du pétrole brut (Tissot & Welte, 1984).

Parmi les hydrocarbures, on distingue également les sous-catégories suivantes :

1.3.2.1. Hydrocarbures aromatiques

Les hydrocarbures aromatiques sont une catégorie importante, caractérisée par des structures cycliques particulières, comme le benzène. La composition chimique des pétroles bruts, y compris les hydrocarbures aromatiques, varie significativement selon leur origine géographique et géologique (Tissot et al., 1984).

1.3.2.2. Hydrocarbures aliphatiques

Les hydrocarbures aliphatiques sont constitués de chaînes carbonées linéaires, qui peuvent être soit saturées (alcane), soit insaturées avec une ou plusieurs doubles liaisons (alcènes) ou triples liaisons (alcynes) (Milton, 2007).

1.3.2.3. Hydrocarbures cycliques

Les hydrocarbures cycliques peuvent également être saturés (cyclanes) ou insaturés avec une ou plusieurs doubles liaisons (cyclènes). Cependant, la présence de triples liaisons (alcynes) dans une structure cyclique est impossible en raison de leur géométrie linéaire, sauf si la molécule contient au moins 8 atomes de carbone (cyclynes) (Arnaud, 2004).

1.3.3. Sources de pollution du sol par les carburants

Les hydrocarbures sont des polluants à la fois organiques et chimiques (Koller, 2009). La pollution des sols par les hydrocarbures peut résulter de causes naturelles ou anthropiques (liées à l'activité humaine).

1.3.3.1. Sources naturelles

Les sources naturelles de pollution par les hydrocarbures incluent les émissions provenant des feux de forêts, des éruptions volcaniques (Edwards, 1983), ainsi que la production naturelle par les végétaux. Par exemple, les hydrocarbures aliphatiques sont présents dans les cires des végétaux supérieurs ou des algues, et peuvent également provenir de déchets microbiens (Barriuso et al., 1996). Selon Lemièrre et al. (2011), certains hydrocarbures, comme les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), peuvent aussi avoir une origine naturelle, comme dans les sols des forêts de sapins ou de hêtres autour des lacs.

1.3.3.2. Sources anthropiques

Les sources anthropiques de pollution par les hydrocarbures sont les plus importantes. Cette pollution est principalement liée aux activités industrielles, urbaines et énergétiques. Parmi ces activités la production et la dispersion de matières créosotées (utilisées dans les chemins de

fer), les industries pétrolières (production de brai de goudron, d'asphalte et épandage de boues) (Whitacre et al., 2008, cité par Técher, 2011), les accidents de la route et les décharges non contrôlées (Chaineau et al., 2000).

Selon Crepineau et al. (2003), les concentrations d'hydrocarbures dans les sols sont généralement élevées près de la source de pollution et diminuent de manière exponentielle avec la distance. Par exemple, les stations-service sont considérées comme des sources majeures de pollution des sols en raison du stockage souterrain de carburants. Les fuites lors des opérations de transfert de liquides, ainsi que les défaillances des réservoirs souterrains, peuvent provoquer une contamination du sol. Cette pollution peut ensuite se propager par ruissellement et atteindre les zones environnantes, notamment les cours d'eau ou d'autres milieux naturels sensibles (Patej, 2002). De telles situations représentent un risque environnemental majeur.

1.4. Devenir des carburants dans le sol

Les carburants, une fois introduits dans le sol, subissent divers processus physiques, chimiques et biologiques qui déterminent leur devenir et leur impact sur l'environnement. Ces processus incluent la volatilisation, la dissolution, l'adsorption, la dégradation biologique et la migration dans les sols et les eaux souterraines (Chaineau et al., 2000).

1.4.1. Volatilisation

Une partie des composés légers des carburants, tels que les hydrocarbures aromatiques volatils (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène), s'évaporent dans l'atmosphère dès leur contact avec le sol. Ce processus dépend de la température, de la porosité du sol et de la pression de vapeur des composés (Patej, 2002).

1.4.2. Dissolution

Certains composés des carburants, en particulier les hydrocarbures aromatiques, se dissolvent dans l'eau présente dans le sol. Cette dissolution facilite leur migration vers les

nappes phréatiques, augmentant ainsi le risque de contamination des eaux souterraines (Técher, 2011).

1.5.3. Adsorption

Les hydrocarbures peuvent se fixer sur les particules du sol, en particulier sur les matières organiques et les argiles. Ce processus réduit temporairement leur mobilité mais peut également prolonger leur persistance dans l'environnement (Barriuso et al., 1996).

1.4.4. Migration

Les carburants peuvent migrer verticalement ou horizontalement dans le sol sous l'effet de la gravité et du ruissellement. Cette migration peut entraîner la contamination des couches profondes du sol et des aquifères, surtout en cas de fuites prolongées ou de déversements importants (Patej, 2002).

1.5. Dégradation des hydrocarbures

Les hydrocarbures présents dans le sol peuvent être dégradés par deux types de processus : la dégradation biotique (impliquant des organismes vivants) et la dégradation abiotique (résultant de processus physico-chimiques). Ces deux mécanismes jouent un rôle essentiel dans la transformation et l'élimination des polluants.

1.5.1. Dégradation abiotique

La dégradation microbienne joue un rôle crucial dans la transformation des hydrocarbures dans le sol. Les microorganismes du sol, tels que les bactéries et les champignons, peuvent décomposer les hydrocarbures en composés moins toxiques, comme le dioxyde de carbone et l'eau (Chaineau et al., 2000). Cependant, cette dégradation dépend de facteurs tels que la disponibilité de l'oxygène, la température, l'humidité et la présence de nutriments (Whitacre et al., 2008, cité par Técher, 2011).

1.5.2. Dégradation biotique

La dégradation biotique des hydrocarbures est principalement assurée par les microorganismes du sol, tels que les bactéries, les champignons et les levures. Ces organismes utilisent les hydrocarbures comme source de carbone et d'énergie, les transformant en produits moins toxiques, comme le dioxyde de carbone (CO₂) et l'eau (H₂O) (Chaineau et al., 2000).

1.5.1.1. Processus de dégradation

Les bactéries et les champignons produisent des enzymes spécifiques qui oxydent les hydrocarbures, facilitant leur décomposition.

Les hydrocarbures aliphatiques sont généralement plus facilement dégradés que les hydrocarbures aromatiques en raison de leur structure chimique plus simple (Whitacre et al., 2008 cité par Técher, 2011).

1.5.1.2. Facteurs influençant la dégradation biotique

Plusieurs facteurs conditionnent l'efficacité de la dégradation biotique des hydrocarbures dans le sol. Parmi eux, la disponibilité en oxygène joue un rôle crucial, puisque la dégradation aérobie se révèle généralement plus rapide et complète que la dégradation anaérobie. Par ailleurs, des paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité et la présence de nutriments essentiels comme l'azote et le phosphore influencent fortement l'activité microbienne. Enfin, la nature même des hydrocarbures impacte leur dégradation : les composés légers sont généralement plus rapidement dégradés que les hydrocarbures lourds et complexes (Barriuso et al., 1996).

Exemples :

Les bactéries du genre *Pseudomonas* et *Rhodococcus* sont connues pour leur capacité à dégrader les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques (Chaîneau et al., 2000).

Les champignons, comme *Aspergillus* et *Penicillium*, jouent également un rôle important dans la dégradation des hydrocarbures complexes, tels que les HAP (Técher, 2011).

1.5.2. Dégradation abiotique

La dégradation abiotique des hydrocarbures résulte de processus physico-chimiques, sans intervention d'organismes vivants. Ces processus incluent l'oxydation, la photolyse, l'hydrolyse et les réactions avec les minéraux du sol (Patej, 2002).

☐ Oxydation

Les hydrocarbures peuvent réagir avec l'oxygène présent dans le sol ou avec des oxydants naturels, comme les peroxydes, pour former des composés oxygénés (alcools, cétones, acides carboxyliques) (Edwards, 1983).

☐ Photolyse

En surface, les hydrocarbures peuvent être dégradés par la lumière ultraviolette (UV), notamment les composés aromatiques qui absorbent fortement les UV (Tissot et Welte, 1984).

☐ Hydrolyse

Certains hydrocarbures peuvent être hydrolysés en présence d'eau, bien que ce processus soit moins courant pour les hydrocarbures purs (Barriuso et al., 1996).

Réactions avec les minéraux du sol

Les hydrocarbures peuvent interagir avec les oxydes de fer, de manganèse ou d'autres minéraux réactifs présents dans le sol, conduisant à leur transformation chimique

(Crepineau et al., 2003).

Facteurs influençant la dégradation abiotique

La dégradation abiotique des hydrocarbures est principalement influencée par leur composition chimique, les composés insaturés étant généralement plus réactifs que les composés saturés. De plus, les conditions environnementales jouent un rôle déterminant : la température, le pH du milieu ainsi que la présence de catalyseurs naturels peuvent accélérer ou ralentir les réactions chimiques impliquées dans cette dégradation (Patej, 2002).

2. Techniques de décontamination des sols pollués par les hydrocarbures

La décontamination des sols pollués par les hydrocarbures est un enjeu majeur pour préserver l'environnement et la santé humaine. Plusieurs techniques sont utilisées pour éliminer ou réduire les concentrations d'hydrocarbures dans les sols. Le choix de la méthode dépend de la nature de la pollution, des caractéristiques du site et des objectifs de réhabilitation (Chaîneau et al., 2000).

2.1. Techniques physico-chimiques

Ces méthodes reposent sur des processus physiques ou chimiques pour extraire ou détruire les hydrocarbures présents dans le sol.

- Extraction par lavage (soilwashing)

Cette technique consiste à séparer les particules fines du sol (argiles, limons) contaminées par les hydrocarbures en utilisant de l'eau ou des solvants. Les hydrocarbures sont ensuite récupérés par flottation ou filtration (Patej, 2002).

- Ventilation du sol (soilventing)

La ventilation permet d'extraire les composés volatils des hydrocarbures (comme le benzène ou le toluène) en injectant de l'air dans le sol pour favoriser leur évaporation. Cette méthode est efficace pour les sols perméables (Técher, 2011).

- Adsorption sur charbon actif

Les hydrocarbures dissous dans l'eau du sol peuvent être adsorbés sur du charbon actif, qui est ensuite régénéré ou éliminé (Barriuso et al., 1996).

2.2. Techniques thermiques

Les méthodes thermiques reposent sur l'application de chaleur pour éliminer ou détruire les hydrocarbures.

- Désorption thermique

Le sol contaminé est chauffé à haute température (200-600 °C) pour volatiliser les hydrocarbures, qui sont ensuite captés et traités. Cette méthode est efficace pour les sols fortement pollués (Edwards, 1983).

- Incinération

Le sol est brûlé à très haute température (800-1200 °C) pour détruire complètement les hydrocarbures. Cette technique est coûteuse et génère des résidus qui doivent être gérés (Tissot et Welte, 1984).

2.3. Techniques de confinement

Lorsque la décontamination n'est pas possible, des techniques de confinement peuvent être utilisées pour limiter la propagation des polluants.

- Barrières physiques :

Des barrières étanches (géomembranes, murs de bentonite) sont installées pour empêcher la migration des hydrocarbures vers les nappes phréatiques ou les écosystèmes adjacents (Patej, 2002).

- Stabilisation/solidification:

Les hydrocarbures sont immobilisés dans le sol par l'ajout de liants (ciment, chaux) pour réduire leur mobilité et leur toxicité (Barriuso et al., 1996).

2.4. Techniques biologiques

Les méthodes biologiques, ou bioremédiation, exploitent la capacité des microorganismes à dégrader les hydrocarbures en composés moins toxiques.

- Biostimulation

Cette technique consiste à optimiser les conditions du sol (ajout de nutriments, oxygène, eau) pour stimuler l'activité des microorganismes indigènes capables de dégrader les hydrocarbures (Chaineau et al., 2000).

- Bioaugmentation

Des souches microbiennes spécifiques, sélectionnées pour leur capacité à dégrader les hydrocarbures, sont introduites dans le sol pour accélérer la décontamination (Whitacre et al., 2008, cité par Técher, 2011).

- Phytoremédiation

Certaines plantes, comme les saules ou les peupliers, peuvent absorber, accumuler ou dégrader les hydrocarbures dans leurs tissus. Cette méthode est souvent utilisée en complément d'autres techniques (Crepineau et al., 2003).

3. Définition de compostage

Le compostage est un processus biologique aérobie qui transforme les matières organiques (déchets végétaux, résidus alimentaires, fumier, etc.) en un produit stable et riche en nutriments, appelé compost. Ce processus est réalisé par l'action de microorganismes (bactéries, champignons) et nécessite des conditions contrôlées de température, d'humidité et d'aération pour optimiser la décomposition des matières organiques (Chaîneau et al., 2000). Le compostage est largement utilisé pour recycler les déchets organiques et améliorer la qualité des sols.

3.1 Définition du compost

Le compost est le produit final du processus de compostage, qui transforme les déchets organiques en un amendement riche en humus, nutriments essentiels (azote, phosphore, potassium) et microorganismes bénéfiques. Utilisé pour améliorer la structure et la fertilité des sols, le compost augmente également leur capacité de rétention d'eau. Par ailleurs, le compostage trouve une application importante dans la réhabilitation des sols pollués notamment par hydrocarbures, en favorisant la dégradation biologique des contaminants et en restaurant la qualité du sol. Ainsi, il constitue une méthode durable pour recycler les déchets organiques tout en participant à la dépollution et à la revitalisation des terres affectées (Barriuso et al., 1996).

3.2 Intérêts environnementaux du compostage

- Réduction des déchets : Le compostage valorise les déchets organiques, limitant leur enfouissement en décharge et réduisant les émissions de gaz à effet de serre qui y sont associées (Técher, 2011).
- Amélioration des sols : En enrichissant le sol en matière organique, le compost favorise la croissance des plantes, stimule la biodiversité microbienne et renforce la résilience des écosystèmes (Edwards, 1983).

- Séquestration du carbone : L'incorporation de compost dans les sols contribue à la fixation du carbone, réduisant ainsi la quantité de CO₂ libérée dans l'atmosphère (Whitacre et al., 2008).
- Réduction de l'utilisation d'engrais chimiques : Fournissant des nutriments naturels, le compost diminue la dépendance aux engrais synthétiques et leurs impacts négatifs sur l'environnement (Patej, 2002).

3.3 Inconvénients du compostage

- Temps de traitement : Le processus de compostage peut durer plusieurs mois, voire jusqu'à un an, en fonction des conditions et des matériaux utilisés (Crepineau et al., 2003).
- Contrôle des conditions : Une gestion rigoureuse de l'humidité, de la température et de l'aération est nécessaire pour éviter les mauvaises odeurs, la prolifération de pathogènes ou la production de méthane en milieu anaérobie (Tissot et Welte, 1984).
- Limites pour certains polluants : Le compostage est moins efficace pour dégrader certains polluants persistants, tels que les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ou les métaux lourds (Chaineau et al., 2000).
- Espace requis : La mise en œuvre à grande échelle du compostage nécessite un espace important pour le stockage et le traitement des matières organiques (Barriuso et al., 1996).

4. Définition du vermicompostage

Le vermicompostage est un processus de dégradation des matières organiques impliquant des vers de terre (comme *Eisenia fetida*) et des microorganismes. Les vers ingèrent et fragmentent les matières organiques, accélérant leur transformation en un produit fini appelé vermicompost, riche en nutriments et en microorganismes bénéfiques. Le vermicompostage est une méthode écologique et efficace pour recycler les déchets organiques et améliorer la qualité des sols (Edwards, 1983).

4.1. Avantages du vermicompostage

☒ Efficacité accrue: Les vers de terre accélèrent la décomposition des matières organiques, réduisant le temps de traitement par rapport au compostage traditionnel (Técher, 2011).

☒ Amélioration de la qualité du sol : Les vers améliorent la structure du sol, sa fertilité et sa capacité à retenir l'eau, tout en augmentant la biodiversité microbienne (Barriuso et al., 1996).

☒ Dégradation des polluants : Le vermicompostage est efficace pour dégrader certains hydrocarbures et réduire la toxicité des sols contaminés, grâce à l'action combinée des vers et des microorganismes (Chaineau et al., 2000).

4.2. Synthèse de quelques travaux sur le vermicompostage des sols pollués

Plusieurs études expérimentales ont démontré l'efficacité du vermicompostage dans la dépollution des sols contaminés. Par exemple, une recherche menée par Atiyeh et al. (2000) a montré que l'utilisation des vers *Eisenia fetida* sur des sols pollués par des hydrocarbures aromatiques a permis une réduction significative (jusqu'à 70 %) de ces polluants après plusieurs semaines de traitement. De même, un travail réalisé par Garg et al. (2012) sur des sols contaminés par des pesticides a mis en évidence une amélioration de la qualité du sol et une dégradation accrue des composés toxiques grâce à l'activité des vers. Par ailleurs, une étude de Pérez et al. (2015) a révélé que le vermicompostage, combiné à des amendements organiques, favorisait la restauration de la biodiversité microbienne dans des sols affectés par des métaux lourds, contribuant à réduire leur bio-disponibilité. Ces exemples illustrent le potentiel du vermicompostage comme méthode durable et écologique pour la réhabilitation des sols pollués.

Issouli Yanis et Mimouni Hamida (2023) ont réalisé une étude portant sur la décontamination d'un sol pollué par des hydrocarbures en utilisant la technique du vermicompostage. Leur travail a consisté à évaluer l'efficacité de deux espèces de vers de terre,

Eisenia fetida et *Allolobophora chlorotica*, en présence de matières organiques telles que le fumier de bovin et la sciure de bois. L'analyse s'est appuyée sur des paramètres biologiques et écotoxicologiques, notamment le taux de mortalité, la reproduction, la biomasse, l'activité de la catalase, la respiration microbienne et la germination des graines de maïs. Les résultats ont mis en évidence une meilleure tolérance et une efficacité plus marquée d'*E. fetida* dans les sols contaminés, traduisant son potentiel dans les procédés de bioremédiation. Cette étude confirme que le vermicompostage, lorsqu'il est bien encadré et adapté aux conditions locales, représente une alternative écologique, économique et durable pour la réhabilitation des sols pollués (Issouli & Mimouni, 2023).



Matériel et méthodes

L'étude expérimentale entreprise a été effectuée sur un sol pollué aux carburants, prélevé au niveau de la station-service de Freha dans la wilaya de Tizi Ouzou. L'objectif de cette étude est de décontaminer ce sol en utilisant la technique du vermicompostage. Les expériences ont été réalisées au laboratoire Pathologie et protection des écosystèmes de la Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

1. Matériel :

1.1. Sol :

Le sol utilisé dans notre étude provient d'une station-service le Patron Auto située à Freha dans la wilaya de Tizi Ouzou (Figure1)

Cette station a été choisie à cause de la sensibilité du sol qui retient facilement les polluants comme les hydrocarbures et les fuites de carburant (essence et gasoil) qui représente une dégradation de la qualité du sol.

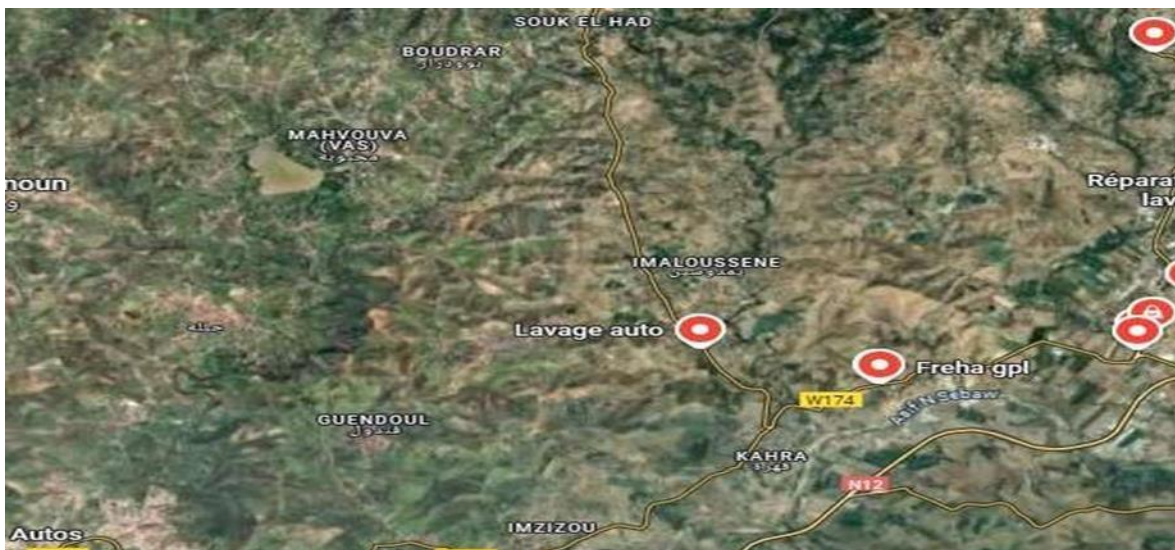


Figure 1 : Image satellitaire de la Station-Service de Fréha

2.2. Vers de terre

Les vers de terre jouent un rôle fondamental dans le maintien de la santé des sols, notamment en favorisant leur aération et leur structuration. Dans le cadre de cette étude, les espèces choisies, appartenant aux genres *Eisenia*, ont été sélectionnées pour leur présence abondante sur le site d'échantillonnage ainsi que pour leur cycle de vie court, qui les rend particulièrement adaptés aux tests de dépollution de sols contaminés par des carburants.

Afin de décontaminer le sol pollué aux carburants, deux espèces de vers de terre ont été Utilisées :

Eisenia fetida (également orthographié *Eisenia fetida*), communément appelée ver de fumier ou ver tigré, est une espèce de ver de terre épigé largement utilisée en vermicompostage en raison de sa capacité à décomposer rapidement la matière organique (Edwards & Bohlen, 1996).

Les adultes mesurent généralement entre 3 et 10 cm (Domínguez et al., 2017) (Figure 2). Le poids moyen d'un individu adulte varie de 0,4 à 1 gramme en conditions naturelles (Edwards & Arancon, 2022).

Cette espèce préfère les milieux riches en matière organique en décomposition (compost, fumier) et joue un rôle crucial dans la formation de l'humus et la fertilisation des sols (Blakemore, 2018).

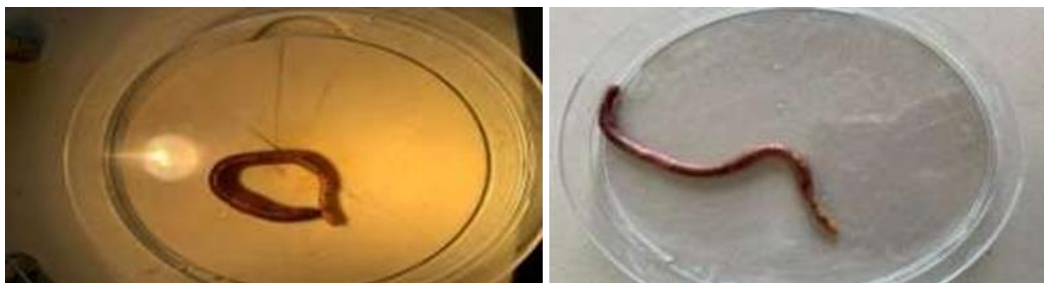


Figure 2 : Vers adultes d'*Eisenia foetida*

Eisenia Andrei (anciennement considérée comme une souche de *Eisenia fetida*) est une espèce de ver de terre épigé, largement utilisée en vermicompostage.

Eisenia andrei mesure généralement 5 à 8 cm à l'âge adulte, bien que certains individus puissent atteindre jusqu'à 10 cm dans des conditions optimales (Dominguez et al., 2017) (Figure 3). Son poids naturel varie entre 0,3 et 0,6 g en moyenne, selon son stade de développement et son environnement (Edwards & Arancon, 2022).

Cette espèce est souvent confondue avec *Eisenia fetida* (ver tigré), mais elle se distingue par une coloration plus uniforme (rougeâtre sans bandes claires) et une meilleure tolérance à la chaleur (Domínguez, 2004).



Figure 3 : Vers adultes d'*Eisenia andrei*

1.3. Fumier de bovin

Le fumier apporte des nutriments (azote, phosphore) et de la matière organique, favorisant l'activité des bactéries et champignons capables de dégrader les hydrocarbures (Trindade et al., 2005).

1.4. Sciure de bois

La sciure de bois joue un rôle important dans la décontamination des sols pollués aux carburants grâce à plusieurs mécanismes. Elle favorise l'aération du sol, essentielle pour la

biodégradation aérobie des hydrocarbures par les microorganismes (Antizar-Ladislao et al., 2008).

Son apport en carbone facilite l'équilibre nutritif nécessaire à l'activité microbienne (Frutos et al., 2012). Elle absorbe partiellement les hydrocarbures, réduisant leur mobilité et leur toxicité (EPA, 2012). Elle peut servir de substrat pour fixer des bactéries dégradant les carburants (Mohan et al., 2006).

1.5. Maïs (Zea mays)

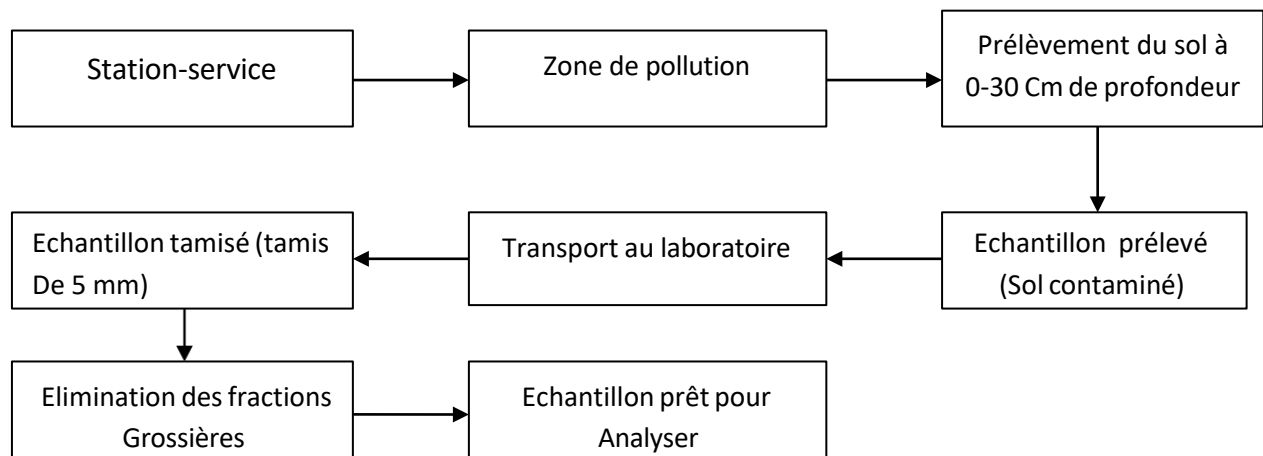
Le maïs a été utilisé comme indicateur végétal pour évaluer la phytotoxicité des sols après traitement. Des graines saines et homogènes ont été choisies en raison de leur sensibilité aux hydrocarbures et de leur croissance rapide. Ce matériel végétal a permis d'estimer l'effet des différents traitements de vermicompostage sur la capacité du sol à favoriser la germination.

2. Méthodes

2.1. Méthodes d'échantillonnage

2.1.1. Sol

Au niveau de la station-service, nous avons prélevé un échantillon de sol contaminé à proximité de la source de pollution sous l'ouverture des événements au niveau de la couche superficielle de 0 à 30 cm. Au laboratoire on a ramené les échantillons, puis on a tamisé ce dernier à travers un tamis à mailles de 5mm de diamètre pour éliminer la fraction grossière et ne pas détruire les agrégats.



2.1.2. Prélèvement des vers de terre

L'échantillonnage s'est déroulé au cours des sorties sur le terrain le 23 Février 2025. Une zone d'échantillonnage a été définie : Sol humide dans une zone d'ombre et sol riche en fumier dans le village ABIZAR (commune TIMIZART).

Les vers de terre ont été extraits du sol selon la méthode de détergence qui consiste à :

- Creuser un trou d'environ 30 cm de côté et 20-25 cm de profondeur.
- Les vers de terre remontent à la surface.
- Récolter les individus adultes.
- Les vers de terre ont été extraits et mis dans une boîte fermée et ramener au laboratoire

2.2. Dispositif expérimental

Le sol a été réparti sur 9 boîtes à raison de 1Kg par boîte des ajouts de 20 % de fumier de bovin et 2% de sciure de bois ont été effectués dans chaque boîte. Les boîtes ont été à l'air libre avec un arrosage selon le besoin du sol pour le garder à son état humide avec le retournement quotidien.

Pour réaliser les tests, chaque pot en plastique a été rempli d'un kilogramme de sol, puis 50 vers adultes, pesés au préalable, y ont été introduits. Des perforations ont été faites dans les couvercles pour garantir une bonne aération.

Après 2 semaines, des vers ont été incorporés du sol (Figure 4) le tableau suivant.

	Sols C (Témoin)	Sols F (<i>E.Fetida</i>)	Sols A (<i>E.Andrei</i>)
1	0 individus	50 individus	50 individus
2	0 individus	50 individus	50 individus
3	0 individus	50 individus	50 individus

Tableau 1 : distribution des espèces de vers de terre sur les sols

Le compostage du sol après incorporation des vers à durée 30 jours (figure 4)



Figure 4 : Dispositif de vermicompostage

3. Evaluation des traits de vie des vers de terre

L'objectif de ces essais est d'évaluer les effets toxiques des carburants sur la survie, la croissance et la reproduction des vers de terre après une exposition de quatre semaines. Une

amélioration de ces paramètres (survie, présence de juvéniles et de cocons) est interprétée comme un signe de meilleure qualité du sol.

Quatre semaines plus tard, le nombre de survivants et la présence de juvéniles et de cocons ont été relevés afin de déterminer le taux de mortalité et la performance reproductive.



Figure 5 : cocon d'*Eisenia foetida*

Figure 6 : juvéniles d'*Esenia foetida*

Figure 5 : cocon d'*Eisenia foetida*

Figure 6 : juvéniles d'*Esenia foetida*

4. Étude de la qualité biologique du sol

À la fin de l'essai des paramètres biologique du sol ont été mesuré afin d'évaluer l'efficacité des 2 espèces de vers de terre à décontaminer le sol.

4.1. Méthode re spirométrique

L'activité biologique globale a été évaluée selon la méthode de Domergue (1968) en utilisant un test re spirométrique. Pour cela, des flacons de 250 ml hermétiquement fermés ont été utilisés, chacun contenant 50 g de sol. Deux tubes à hémolyse ont été placés à la surface du sol dans chaque flacon :

- Le premier tube contenait 5 ml d'eau pour éviter le dessèchement de l'échantillon.

- Le second tube contenait 10 ml de soude (NaOH) à 0,5 M pour capter le dioxyde de carbone (CO₂) produit par la respiration des microorganismes.

Les flacons ont ensuite été incubés pendant 7 jours à 28°C. Après incubation, la soude a été titrée avec une solution d'acide chlorhydrique (HCl) à 0,25 M en présence de phénolphtaléine après avoir ajouté 2 gouttes de BaCl₂ à 20%. Le point final du titrage était marqué par la disparition de la coloration rose-violette, indiquant la neutralisation complète de la soude par l'acide.

Cette méthode permet de quantifier le CO₂ libéré, reflétant ainsi l'activité microbienne du sol.

4.2. Mesure de l'activité catalasique :

L'évaluation de l'activité de la catalase, une enzyme clé dans le métabolisme oxydatif du sol, a été réalisée en utilisant des flacons de 250 ml, chacun contenant 5 g de sol. À ce sol, nous avons ajouté 2,5 ml de peroxyde d'hydrogène (H₂O₂) à 0,3 % ainsi que 20 ml d'un tampon phosphate au pH 7 selon la méthode décrite par Guan. Le mélange obtenu a été incubé à 25 °C pendant 20 minutes afin de permettre la réaction enzymatique. À la fin de l'incubation, 1,5 ml d'acide sulfurique (H₂SO₄) à 3 mol/L a été ajouté pour stopper l'activité enzymatique. Le contenu du flacon a ensuite été centrifugé à 4500 tours par minute pendant 15 minutes. En fin le surnageant a été titré à l'aide d'une solution de permanganate de potassium (KMnO₄) à 0,02 mol/L jusqu'à l'obtention d'une couleur rose clair, indiquant la fin de la titration.

4.3. Test de germination :

Dix graines de maïs sont mises à germer dans une boîte de Pétri contenant chacun 100g de sol, avec trois répétitions. Après sept jours, le taux de germination (TG) est calculé selon la formule suivante :

TG (%) = (nombre des graines germées/ nombre des graines totales) ×100

4.4. Extraction et dosage des hydrocarbures (HC) par spectroscopie UV :

L'extraction des hydrocarbures présents dans les échantillons de sol a été réalisée par solvant, en utilisant l'hexane comme phase organique. Environ 10 g de sol séché ont été mélangés à 20 ml d'hexane dans un agitateur pendant 30 minutes. Après décantation, le surnageant a été filtré et récupéré pour analyse. Le dosage des hydrocarbures extraits a été effectué par spectroscopie UV-visible, en mesurant l'absorbance à une longueur d'onde spécifique ($\lambda = 245$ nm), caractéristique des hydrocarbures. La concentration a été déterminée à l'aide d'une courbe d'étalonnage construite avec des standards d'hydrocarbures connus. Cette méthode permet une estimation rapide et sensible de la teneur résiduelle en hydrocarbures dans les sols traités.

5. Méthode d'analyse statistique

Les traitements statistiques des données ont été effectués à l'aide du logiciel R, version 4.3.1. Une analyse de variance à un facteur a été utilisée pour évaluer le traitement. Lorsque les conditions d'application de l'ANOVA (normalité et homogénéité des variances) n'étaient pas remplies, le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été employé. En cas de différences significatives entre les moyennes, un test post-hoc approprié a permis d'identifier les groupes homogènes. Par ailleurs, la comparaison entre les deux espèces de vers de terre a été réalisée à l'aide du test de Student pour échantillons indépendants.

Notre travail expérimental consiste à un essai de décontamination d'un sol pollué par les carburants provenant d'une station-service située à Freha dans la wilaya Tizi Ouzou à l'aide de la technique du vermicompostage. Deux espèces de vers de terre ont été utilisées dans nos expériences : *E. fetida* et *E. andrei*.

1. Résultats

A la fin du compostage, plusieurs paramètres ont été mesurés sur les vers de terre (taux de mortalité, reproduction) et sur le sol (respiration microbienne, germination des graines de maïs, activité de la catalase, quantité d'hydrocarbures résiduels et caractérisation d'hydrocarbures aromatiques dangereux pour la santé).

Nous avons observé au cours du compostage une migration active des vers de terre d'*E. fetida* et d'*E. andrei*) vers le carton dans le sol contaminé aux hydrocarbures démontre leur capacité à détecter et éviter les milieux toxiques. Ce comportement d'évitement est lié à la fois à la toxicité directe des polluants et aux propriétés refuge du carton (humidité, neutralité chimique).

1.1. Mortalité des vers de terre :

Les résultats des taux de mortalité des vers de terre obtenus à la fin de l'expérience (figure7) montrent des taux de mortalité moyens de 8,66 et 100% pour les espèces *E. fetida* et *E. andrei* respectivement.

Notre travail expérimental consiste à un essai de décontamination d'un sol pollué par les carburants provenant d'une station-service située à Freha dans la wilaya Tizi Ouzou à l'aide de la technique du vermicompostage. Deux espèces de vers de terre ont été utilisées dans nos expériences : *E. fetida* et *E. andrei*.

1. Résultats

A la fin du compostage, plusieurs paramètres ont été mesurés sur les vers de terre (taux de mortalité, reproduction) et sur le sol (respiration microbienne, germination des graines de maïs, activité de la catalase, quantité d'hydrocarbures résiduels et caractérisation d'hydrocarbures aromatiques dangereux pour la santé).

Nous avons observé au cours du compostage une migration active des vers de terre d'*E. fetida* et d'*E. andrei*) vers le carton dans le sol contaminé aux hydrocarbures démontre leur capacité à détecter et éviter les milieux toxiques. Ce comportement d'évitement est lié à la fois à la toxicité directe des polluants et aux propriétés refuge du carton (humidité, neutralité chimique).

1.1. Mortalité des vers de terre

Les résultats des taux de mortalité des vers de terre obtenus à la fin de l'expérience (figure7) montrent des taux de mortalité moyens de 8,66 et 100% pour les espèces *E. fetida* et *E. andrei* respectivement.

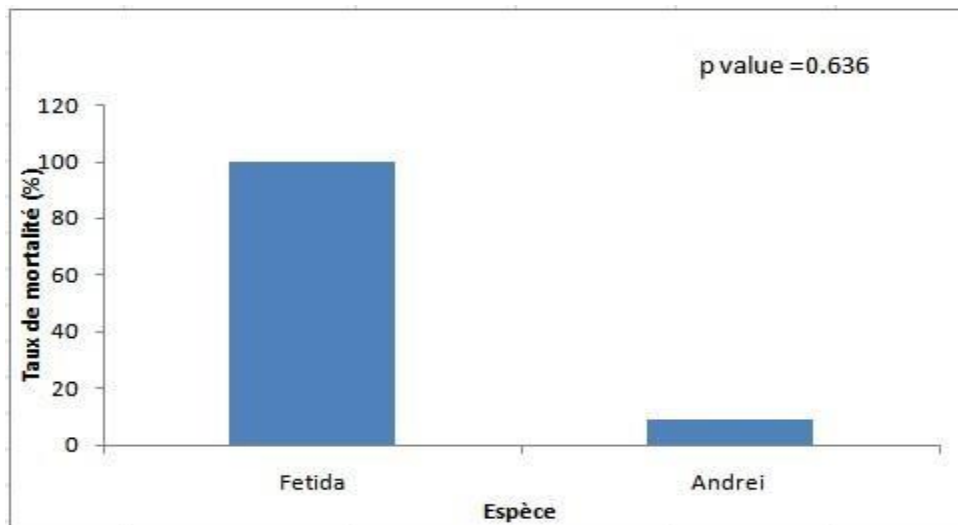


Figure 7 : Taux moyen de mortalité des vers de terre des deux espèces

Le test de Student a donné une p-value de 0,636 ($> 0,05$), ce qui signifie qu'aucune différence statistiquement significative n'a été détectée au seuil de 5 %. Néanmoins, la mortalité observée est nettement plus élevée chez *Eisenia andrei*.

1.2. Reproduction des vers de terre :

Les résultats de reproduction (Figure 8) indiquent qu'*Eisenia fetida* a produit 21 juvéniles, tandis qu'*E. andrei* n'a montré aucune reproduction dans les mêmes conditions.

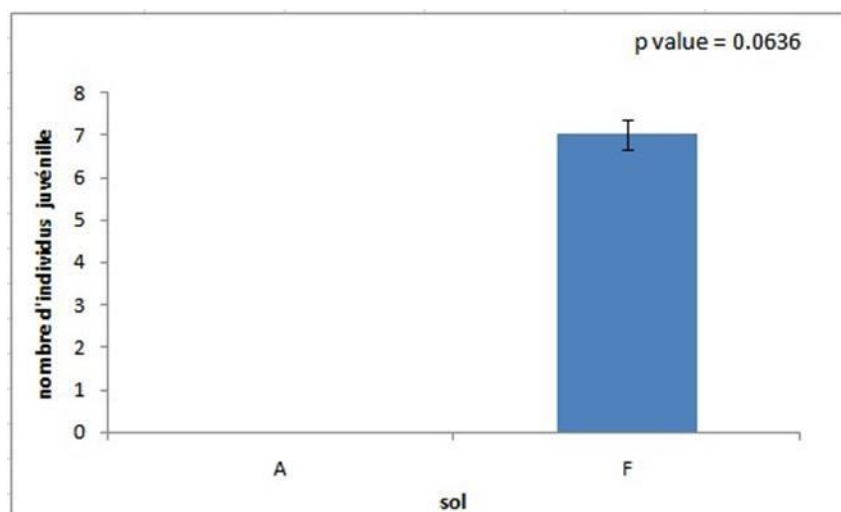


Figure 8 : reproduction des vers de terre des deux espèces dans le sol pollué.

Le test de Student a donné une p-value de 0,0636 ($> 0,05$) : la différence n'est donc pas significative au seuil de 5 %, mais traduit une tendance.

(Annexe 2).

1-3 Résultat de test re spirométrique :

Les résultats du test respirométrique exprimés en quantité de CO₂ dégagée dans les différents sols après 7 jours d'incubation à 27°C sont représentés par la figure 9. Une grande variation

A été observée pour la quantité de CO₂ dégagée dans les différents sols.

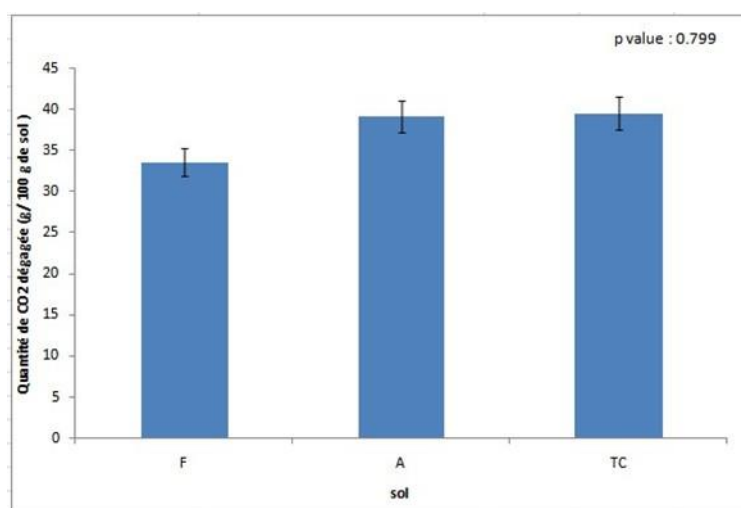


Figure 9 : Résultat du test respirométrique dans les différents sols

L'analyse statistique des résultats du test respirométrique dans les différents sols montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les traitements.

1.4. Activité de la catalase

Les résultats de l'activité de la catalase dans les différents sols, exprimée par la quantité de KMnO₄ (en moles) équivalente à la quantité de H₂O₂ transformée, sont représentés dans la Figure 10. De faibles différences ont été observées entre les trois modalités.

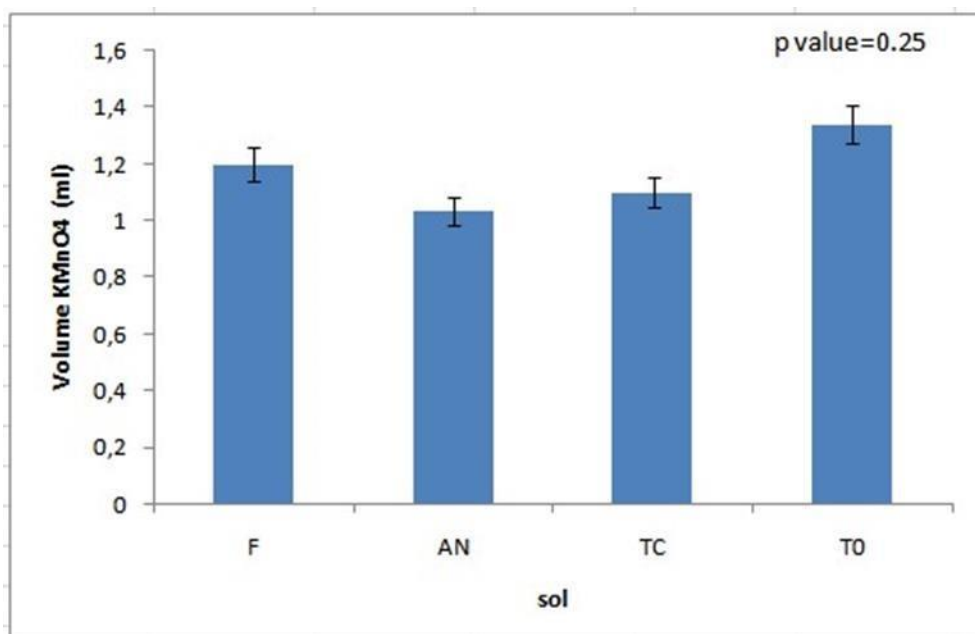


Figure 10 : activité de la catalase dans les différents sols

L'analyse statistique des résultats d'activité de la catalase dans les différents sols montre qu'il n'y a pas de différences significatives entre les traitements.

1.5. Germination des graines de maïs

Les résultats exposés dans la figure 12 montrent que les taux de germination des graines de Maïs différaient d'un sol à l'autre. Le taux de germination le plus élevé a été obtenu

Dans le sol A et TC (86,66%), suivi par celui enregistré dans sol F décontaminé Avec l'espèce *E.Fetida*. Le taux de germination d'un peu faible (66.67%) a été enregistré dans le sol T0 qui n'a pas été décontaminé et non composté.

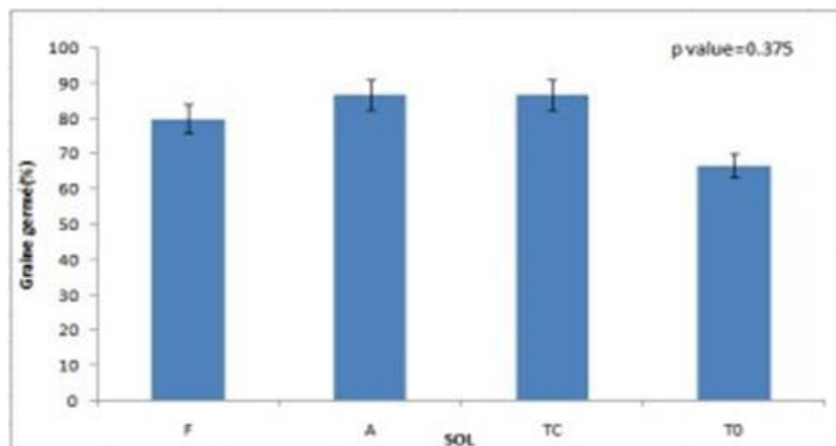


Figure 11 : Taux de germination des graines de maïs dans les différents sols.

L'analyse statistique des résultats de germination a montré une différence non significative entre les traitements

1.6. Quantité des hydrocarbures résiduels dans le sol

Nos résultats de l'extraction des hydrocarbures à l'aide de l'hexane, Pour l'échantillon F, une réduction notable du poids est observée, passant de 9,82 g à 6,22 g, De même, l'échantillon An présente une diminution marquée, de 10,23 g à 5,91 g, suggérant une contamination importante. En revanche, les échantillons TC et T0 montrent des réductions moins prononcées 9,25 g → 9,16 g et 9,18 g → 8,76 g, respectivement ce qui pourrait indiquer une faible concentration en hydrocarbures ou une extraction moins efficace dans ces sols.

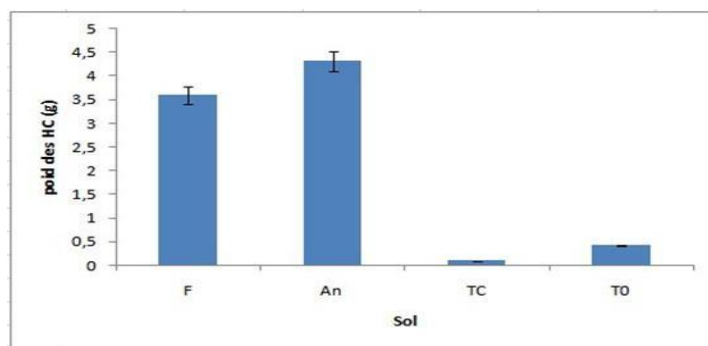


Figure 12 : Résultats d'extraction des HC dans les différents sols

L'analyse d'absorbance des hydrocarbures aromatiques à différentes longueurs d'ondes, est donnée dans le tableau.

Langueur d'onde	And3	Fet1	T01	TC2
200	0,592	0,062	0,221	0,108
205	0,475	0,053	0,186	0,080
210	0,295	0	0,097	0,015
220	0,281	0,029	0,119	0,053
227	0,233	0,027	0,065	0,021
229	0,222	0,031	0,054	0,017
236	0,184	0,044	0,036	0,015
238	0,140	0,026	0,009	-0,007
241	0,242	0,196	0,130	0,177
251	0,194	0,124	0,118	0,132
256	0,219	0,123	0,152	0,148
268	0,203	0,111	0,161	0,140
286	0,137	0,073	0,107	0,091
297	0,105	0,048	0,083	0,068

Tableau 2 : Résultats de la caractérisation des HA par spectroscopie UV

Discussion

Les essais de décontamination d'un sol pollué aux carburants, menés avec deux espèces de vers de terre et enrichis d'amendements organiques (fumier et sciure de bois), ont mis en évidence une différence marquée de sensibilité entre les espèces après quatre semaines d'exposition. *Eisenia andrei* a présenté une mortalité totale, alors que *Eisenia fetida* n'a enregistré qu'un taux de mortalité nettement plus faible. Cette différence reflète une tolérance accrue d'*E. fetida* vis-à-vis de la toxicité des hydrocarbures présents, phénomène déjà souligné dans la littérature (Lukkari et al., 2005 ; Domínguez et al., 2005).

L'absence complète de reproduction chez *E. andrei* traduit une sensibilité élevée aux effets sublétaux des hydrocarbures, tandis qu'*E. fetida* a maintenu une reproduction notable (production de juvéniles et de cocons) malgré la pollution. Cette capacité reproductive confirme la résilience physiologique d'*E. fetida* et sa faculté à se reproduire même sous stress environnemental, comme l'ont observé Domínguez et al. (2005) et l'OCDE (2008).

Le test de germination a révélé des différences non significatives mais cohérentes : le sol non traité présentait le taux le plus faible, conséquence probable de la persistance des hydrocarbures (altération des membranes et stress oxydatif). À l'inverse, les sols décontaminés par *E. fetida* ou enrichis en matière organique ont montré des taux de germination supérieurs, traduisant l'amélioration de la structure et de la fertilité du sol par l'action combinée des vers et des amendements. Ces résultats rejoignent ceux d'Adam & Duncan (2002) et de Merkl et al. (2005), qui ont montré l'impact négatif des hydrocarbures sur la germination des graines.

Le test respirométrique a mis en évidence des variations de production de CO₂ selon les traitements. L'activité microbienne la plus élevée a été observée dans le sol traité par *E. andrei*, probablement stimulée par la bioturbation et les déjections de cette espèce (Brown et al., 2000). À l'inverse, le sol traité par *E. fetida* a produit moins de CO₂, ce qui peut traduire une

disponibilité moindre des substrats ou des conditions moins favorables pour l'activité microbienne associée à cette espèce (Edwards & Bohlen, 1996 ; Gómez-Brandón et al., 2011).

L'extraction des hydrocarbures à l'hexane a montré des réductions variables selon les échantillons. Ces différences reflètent à la fois le niveau de contamination initial et les propriétés du sol (texture, teneur en matière organique, adsorption). De telles disparités soulignent l'importance de caractériser finement les hydrocarbures et leur biodisponibilité pour interpréter les résultats (OCDE, 2008).

Enfin, l'analyse spectroscopique UV a révélé des profils d'absorption contrastés. Les pics élevés dans l'échantillon A à 200–205 nm indiquent une forte présence de composés aromatiques complexes (fluorène, benzo-pérylène) (Piccolo, 2001), tandis que le sol traité par *E. fetida* montre des absorbances plus faibles, suggérant une dégradation avancée de ces composés. Le pic à 241 nm, lié au pyrène (Korshin et al., 1997), confirme la transformation partielle de certains hydrocarbures aromatiques et renforce l'hypothèse d'une fragmentation plus poussée des polluants par *E. fetida*.

La contamination des sols par les hydrocarbures issus des carburants constitue aujourd'hui un enjeu environnemental majeur.

Le présent travail consiste à évaluer l'efficacité du vermicompostage comme méthode biologique de décontamination d'un sol pollué par les carburants.

Les résultats ont mis en évidence une nette supériorité de *E. fetida* par rapport à *E. andrei*. La première espèce a montré une excellente résistance à la pollution, avec un taux de mortalité faible, une capacité de reproduction maintenue et une influence positive sur les paramètres biologiques du sol. La production de CO₂, indicateur de l'activité microbienne, ainsi que l'augmentation du taux de germination des graines de maïs, témoignent de l'amélioration de la qualité biologique du sol après traitement. De plus, l'analyse spectroscopique a confirmé une réduction significative des hydrocarbures, notamment aromatiques, indiquant une véritable action dépolluante de *E. fetida*.

À l'inverse, *Eisenia andrei* a présenté une sensibilité extrême à la contamination, avec une mortalité totale et une absence complète de reproduction. Ce constat souligne que le choix de l'espèce de ver de terre est déterminant pour le succès du vermicompostage en contexte de pollution organique. Par ailleurs, l'apport de fumier de bovin et de sciure de bois a contribué à créer un environnement favorable à la dégradation biologique, en fournissant à la fois des nutriments et une meilleure aération du sol.

En conclusion, ce travail confirme que le vermicompostage, notamment avec l'espèce *Eisenia fetida*, représente une méthode prometteuse, écologique et accessible pour la remédiation des sols pollués aux hydrocarbures. Son efficacité repose sur l'action conjointe des vers de terre et des microorganismes du sol, capables de transformer les composés toxiques en substances moins nuisibles, tout en améliorant les propriétés physiques et biologiques du sol. Cette approche, simple à mettre en œuvre et peu coûteuse, s'inscrit dans une démarche de développement durable adaptée aux contextes locaux, en particulier en zones rurales ou semi-urbaines.

Ce travail ouvre enfin plusieurs perspectives de recherche. Il serait pertinent d'explorer l'effet de différentes combinaisons de vers et de microorganismes pour renforcer l'efficacité du traitement. Des essais en conditions réelles, sur des surfaces plus vastes ou sur des sites industriels, permettraient également de valider le potentiel de cette méthode à grande échelle. De même, l'évaluation des effets à long terme sur la qualité du sol et la sécurité des produits issus du compostage reste une étape cruciale. Le vermicompostage peut ainsi devenir un outil central dans les stratégies de dépollution durable, alliant protection des sols, valorisation des déchets organiques et restauration écologique.



Références bibliographiques

-A-

Adam, G., & Duncan, H. (2002). Influence of diesel fuel on seed germination. *Environmental Pollution*, **120**(2), 363–370. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(02\)00119-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(02)00119-7)

Adriano, D. C. (2001). *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biogeochemistry, Bioavailability, and Risks of Metals*. Springer-Verlag, New York.

Alexander, M. (1999). *Biodegradation and Bioremediation* (2nd ed.). Academic Press.

Alloway, B. J. (2013). *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability* (3rd ed.). Springer.

Antizar-Ladislao, B., Lopez-Real, J., & Beck, A. J. (2008). Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in an aged coal-tar-contaminated soil using sewage sludge and composted green waste. *Chemosphere*, **72**(10), 1514–1519.

Arnaud, A. (2004). *Chimie organique: structure et réactivité*. Dunod.

Atiyeh, R. M., Dominguez, J., Subler, S., & Edwards, C. A. (2000). Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei* and *E. fetida*) and the effects on seedling growth. *Pedobiologia*, **44**, 709–724.

-B-

Barriuso, E., Houot, S., Serra-Wittling, C., & Bergheaud, V. (1996). Influence de l'amendement organique sur la dégradation des hydrocarbures dans les sols. *Étude et Gestion des Sols*, **3**(4), 207–219.

Blakemore, R. J. (2018). Description and ecology of a new vermicomposting species: *Eisenia fetida* (Savigny, 1826). *Recycling*, **3**(4), 55.

Boucheseiche, C., Le Cloirec, P., & Germain, P. (2002). *Pollution des sols: diagnostic et traitement*. Techniques de l'Ingénieur.

-C-

Chaîneau, C. H., Yepremian, C., Vidalie, J. F., Ducreux, J., & Ballerini, D. (2000). Bioremediation of a crude oil-polluted soil: Biodegradation, leaching and toxicity assessments. *Water, Air, and Soil Pollution*, **144**, 419–440.

Chassin, P., Déchamps, C., & Henry, A. (1996). *Pollution et dépollution des sols*. Éditions Tec & Doc.

Colombano, S., Tran, A., & Richard, Y. (2014). *Hydrocarbures et environnement*. Lavoisier.

Contreras-Ramos, S. M., Alvarez-Bernal, D., & Dendooven, L. (2008). Eisenia fetida increased removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from soil. *Environmental Pollution*, **156**(3), 1368–1375.

Crepineau, C., Bounaga, S., & Houot, S. (2003). Influence des caractéristiques du sol sur la biodégradation des hydrocarbures. *Étude et Gestion des Sols*, **10**, 215–225.

-D-

Domínguez, J., & Edwards, C. A. (2011). Biology and ecology of earthworm species used for vermicomposting. In *Vermiculture Technology: Earthworms, Organic Wastes, and Environmental Management* (pp. 27–40). CRC Press.

Domínguez, J., Aira, M., & Gómez-Brandón, M. (2005). Vermicomposting of organic wastes: A review. *Pedobiologia*, **49**, 931–940.

Domínguez, J., Velando, R., & Aira, M. (2017). Earthworm traits for evaluating environmental hazards. *Science of the Total Environment*, **589**, 556–567.

Dominique, A. (1997). *Le sol : interface fragile entre la géosphère, la biosphère et l'anthroposphère*. Éditions Masson, Paris.

-E-

Edwards, C. A. (1983). *Earthworm Ecology: From Darwin to Vermiculture*. Chapman and Hall.

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2004). *The Use of Earthworms in Organic Waste Management*. Earthworm Ecology, CRC Press.

Edwards, C. A., & Arancon, N. Q. (2022). *Vermicomposting for sustainable waste management*. CRC Press.

Edwards, C. A., & Bohlen, P. J. (1996). *Biology and Ecology of Earthworms* (3rd ed.). Springer.

EPA. (2012). *A Citizen's Guide to Bioremediation*. U.S. Environmental Protection Agency. EPA 542-F-12-003.

-F-

FAO. (2015). *Status of the World's Soil Resources: Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Frutos, F. J., Escolano, O., Garcia, S., & Fernandez, M. D. (2012). Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the addition of compost. *Compost Science & Utilization*, **20**(3), 155–161.

-G-

Garg, P., Gupta, A., & Satya, S. (2012). Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia fetida*: Comparative evaluation of the vermicompost quality. *Bioresource Technology*, **97**, 391–395.

Gómez-Brandón, M., Lores, M., & Domínguez, J. (2011). Species-specific effects of epigeic earthworms on microbial community structure during first stages of decomposition of organic matter. *PLoS One*, **6**(2), e16824.

-H-

Hussain, I., Puschenreiter, M., Gerhard, S., & Bueker, P. (2018). Bioremediation of petroleum hydrocarbons in contaminated soils by microorganisms: A sustainable approach. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **157**, 438–452.

-K-

Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace Elements in Soils and Plants* (4th ed.). CRC Press.

Khellout, S., & Settouf, R. (2004). Pollution des sols par les hydrocarbures: Origines et solutions. *Revue des Sciences de l'Environnement*, **12**, 45–59.

Koller, G. (2009). *Pollution des sols: Détection, causes et remèdes*. Ellipses Édition.

-L-

Legros, J. P. (2007). *Les grands types de sols du monde*. Presses de l'Université Laval.

Lemière, B., Deschamps, E., & Ayrault, S. (2001). *Les produits pétroliers dans l'environnement*. BRGM, Orléans.

Lukkari, T., Aatsinki, M., & Väisänen, A. (2005). Toxicity of copper and zinc assessed with three soil-living species. *Environmental Toxicology and Chemistry*, **24**(2), 313–321.

-M-

Maila, M. P., & Cloete, T. E. (2004). Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: Are simplicity and cost-effectiveness the only advantages? *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, **3**, 349–360.

McLaughlin, M. J., Parker, D. R., & Clarke, J. M. (2000). Metals and micronutrients: Food safety issues. *Field Crops Research*, **60**, 143–163.

Merkl, N., Schultze-Kraft, R., & Infante, C. (2005). Phytoremediation of petroleumcontaminated soils in the tropics—Pre-selection of plant species from eastern Venezuela. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, **79**, 168–176.

Milton, C. (2007). *Chimie organique pour les biologistes*. De Boeck Supérieur.

Mohan, D., Singh, K. P., & Singh, V. K. (2006). Trivalent chromium removal from wastewater using low cost activated carbon derived from agricultural waste material and activated carbon fabric cloth. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **45**, 10231–10240.

-O-

OECD. (2008). *Earthworm Reproduction Test (Eisenia fetida / Eisenia andrei)*. OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2.

-P-

Patej, T. (2002). *Les hydrocarbures dans l'environnement*. Lavoisier.

Pérez-Leblic, M. I., Hernández, T., & García, C. (2012). Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons: Influence of compost addition on biodegradation. *Bioresource Technology*, **104**, 667–673.

-R-

Ramade, F. (2000). *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Dunod.

Roger, L., & Jacq, V. (2000). *Écotoxicologie des sols*. Lavoisier.

-S-

Saada, A., Barriuso, E., & Houot, S. (2005). Retention and degradation of herbicides in soil amended with composts and manure. *Chemosphere*, **61**(5), 668–676.

Schadeck, A. (2007). *Les hydrocarbures et l'environnement*. Institut Français du Pétrole.

Singh, A., Ward, O. P., & Kuhad, R. C. (2011). *Advances in Applied Bioremediation*. SpringerVerlag Berlin Heidelberg.

Sinha, R. K., Herat, S., Bharambe, G., & Brahmabhatt, A. (2010). Vermistabilization of organic wastes for quality compost production through vermicomposting using epigeic earthworms. *International Journal of Global Environmental Issues*, **10**(3–4), 263–278.

Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum* (5th ed.). CRC Press.

Smedley, P. L., & Kinniburgh, D. G. (2002). A review of the source, behavior and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, **17**, 517–568.

-T-

Técher, C. (2011). *La remédiation des sols pollués par les hydrocarbures*. Université de Pau et des Pays de l'Adour.

Tissot, B. P., & Welte, D. H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence* (2nd ed.). Springer- Verlag.

Trindade, H., Coutinho, J., & Moreira, N. (2005). Influence of cattle slurry and poultry manure application on mineralization and immobilization of nitrogen in a sandy loam soil. *Bioresource Technology*, **96**(4), 549–555.

-U-

US EPA. (2020). *Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS): Volume I*. U.S. Environmental Protection Agency.

-V-

Vandecasteele, J. P. (2005). *Chimie analytique: méthodes et techniques*. Dunod.

-W-

Wauquier, J. P. (1998). *Pétrochimie: chimie et procédés*. Éditions Technip.

Whitacre, D. M. (2008). *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* (Vol. 195). Springer.



Les annexes

Résultat des tests de toxicité

Sol	Nombre d'individus adultes		Juvéniles	adultes	Cocons	Taux de mortalité (%)
	Avant	Après				
A1	50	0	0	0	0	100
A2	50	0	0	0	0	100
A3	50	0	0	0	0	100
F1	50	50	18	50	94	0
F2	50	45	1	45	42	10
F3	50	42	2	42	71	16

Tableau I : Résultat du taux de mortalité et de reproduction des vers de terre

Tableau II : Résultat de test spirométrique

Sol	V acide HCL (ml)	Quantité de CO2 dégagée(100g du sol)
Sol F1	10,5	30,8
Sol F2	10,6	30,36
Sol F3	8,5	39,6
Sol A1	7,8	42,68
Sol A2	9,3	36,08
Sol A3	8,7	38,72
Sol TC1	13,7	16,72
Sol TC2	6,3	49,28
Sol TC3	5,5	52,8
Sans Sol 1	14.9	11,44
Sol inerte 2	17.5	0
Sol inerte 3	15.2	10,12
Sol T0 1	12	24,2
Sol T0 2	13	19,8
Sol T0 3	11,3	27,28

Tableau V : Résultat de l'activité de la catalase exprimée par le volume de KMnO4 (ml)

Sol	Volume KMnO4 (ml)
Sol F1	1.1
Sol F2	1.2
Sol F3	1.3
Sol An1	0.8
Sol An2	1
Sol An3	1.3
Sol TC 1	1
Sol TC 2	1.1
Sol TC 3	1.2
Sol T0 1	1.28
Sol T0 2	1.4

Tableau II : Résultat de la germination des graines de maïs

Sol	Taux de germination (%)
Sol F1	70
Sol F2	80

Sol F3	90
Sol A1	80
Sol A2	90
Sol A3	90
Sol TC1	60

Tableau IV : Résultats de test d'extraction de poids des hydrocarbures résiduel dans le sol :

Sol	Avec Hexane (g)	Sans Hexane (g)
Sol F	9.82	6.22
Sol An	10.23	5.91
Sol TC	9025	9.61
Sol T0	9.18	8.76

Résultats des analyses statistiques des bio-essais

```
> wilcox.test(tdm~sol)

Wilcoxon rank sum test with continuity correction

data:  tdm by sol
W = 9, p-value = 0.0636
alternative hypothesis: true location shift is not equal to 0
```

Annexe 1 : Résultat de taux de mortalité des vers de terre

```

> library(car)
Le chargement a nécessité le package : carData
> local({pkg <- select.list(sort(.packages(all.available = TRUE)),graphics=TRUE)
+ if(nchar(pkg)) library(pkg, character.only=TRUE)})
> library(car)
> leveneTest(rep~sol)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 1  1.1992  0.335
      4
Message d'avis :
Dans leveneTest.default(y = y, group = group, ...) : group coerced to factor.
> reg.aov=lm(rep~sol)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: rep
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
sol    1   73.5    73.5  1.6154  0.2726
Residuals 4  182.0    45.5
> |

```

Annexe 2 : Résultat de la reproduction des vers de terre des deux espèces

```

> library(car)
> leveneTest(qcd~sol)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (center = median)
      Df F value Pr(>F)
group 2  0.7647  0.506
      6
Message d'avis :
Dans leveneTest.default(y = y, group = group, ...) : group coerced to factor.
> reg.aov=lm(qcd~sol)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: qcd
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
sol    2   67.42  33.708  0.233  0.799
Residuals 6 867.84 144.641
.

```

Annexe 3 : Résultat de test respirométrique

```

> reg.aov=lm(vkmn~Sol)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: vkmn
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
Sol    3  0.12795  0.042651  1.7171  0.25
Residuals 7  0.17387  0.024838
> |

```

Annexe 4 : Résultats de test d'activité catalase

```

> reg.aov=lm(tg~sol)
> anova(reg.aov)
Analysis of Variance Table

Response: tg
      Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
sol      3     800   266.67   1.1852 0.3748
Residuals 8    1800   225.00
> |

```

Annexe 5 : Résultat de test de germination des grains de maïs

Résumé

L'objectif de notre travail est l'utilisation du vermicompostage pour la décontamination

D'un sol pollué aux carburants (cas station-service) car il offre plusieurs avantages potentiels. Cette méthode utilise des vers de terre pour décomposer et transformer les contaminants présents dans le sol, réduisant ainsi leur concentration et leur toxicité.

Deux espèces de vers de terre ont été utilisées : *Eisenia fetida* et *Eisenia andrie*.

Les résultats obtenus montrent qu'il y'avait une mortalité totale des vers de terre dans le sol traité avec l'espèce *E. andrie* indique une sensibilité de cette espèce aux hydrocarbures initialement présents dans le sol et une amélioration de la qualité du sol. En ce qui concerne la croissance et la reproduction des vers de terre, il est observé dans le sol traité avec l'espèce *E.foetida* qu'il y a un nombre élevé de juvéniles, ceci étant le signe d'une décontamination plus importante dans ce sol et que cette espèce a un cycle de reproduction élevé.

Les mots clés : vermicompostage, sol pollué, carburant

Abstract

The objective of our work is the use of vermicomposting for the decontamination of fuel-polluted soil (gas station case), as it offers several potential advantages. This method utilizes earthworms to break down and transform contaminants present in the soil, thereby reducing their concentration and toxicity.

Two species of earthworms were used: *Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*.

The results obtained show that there was total mortality of earthworms in the soil treated with the species *E. andrei*, indicating this species' sensitivity to the hydrocarbons initially present in the soil and an improvement in soil quality. Regarding the growth and reproduction of earthworms, it was observed in the soil treated with the species *E. fetida* that there was a high number of juveniles, which is a sign of greater decontamination in this soil and that this species has a high reproductive cycle.

Key words: vermicomposting, polluted soil, fuel