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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Facultés des Sciences Biologiques 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 : Protection des Ecosystèmes.

Thème

Effet de la dose de l'ajout organique sur l'efficacité de décontamination par compostage d'un sol pollué aux carburants

Présenté par : Bacha Melissa.

Devant le jury :

Présidente : M^{me} LANDRI G.	M.A.A. à l'UMMTO
Promotrice : M^{me} ALI AHMED S.	M.C.B à l'U.MMTO
Examinatrice : M^{me} CHIBANE G.	M.A.A. à l'UMMTO

Promotion : 2022/2023.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier le Bon Dieu pour nous avoir donné le courage et la patience pour la réalisation de notre travail.

Ensuite, nous exprimons nos vifs remerciements, notre reconnaissance et notre profonde gratitude à notre promotrice Mme Ali Ahmed S. MCB à la FSBSA pour son encadrement, ses orientations, ses précieux conseils, son soutien et son encouragement tout au long de notre travail.

Nos remerciements s'adressent aussi à la Présidente du jury Mme Landri G., MAA à la FSBSA et à Mme CHIBANE G. pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à Mme SADOUDI-ALI AHMED D. Professeur à la FSBSA et directrice du laboratoire PSEMRVC pour nous avoir accueillis dans son laboratoire et pour avoir mis à notre disposition tout le matériel nécessaire à la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi l'ingénieur du laboratoire PSEMRVC Mme ABROUS H. pour son aide et surtout pour sa gentillesse.

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

Dédicaces

Je dédié ce modeste travail à mes chers parents source de tendresse, de force, et de courage.

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

A mes chers frères : Amirouce et Lounis qui m'ont toujours

Soutenue et encouragée durant ces années d'étude.

A mes chères sœurs Thinhinane, Rosa, et ma petite seour adorée Ikrame,

A mon beau-frère Bachir,

A mes chères cousines Lithesia, Milina,

Et à toute la famille Bacha,

À mes chères copines : Souad, Hakima, Kahina, et Fazia.

Bacha Melissa

Liste des abréviations

C0 : sol à concentration 0 (témoin)

C1 : sol à concentration 1(10% du fumier)

C2 : sol à concentration 2 (20% du fumier)

C3 : sol à concentration 3 (30% du fumier)

Liste des figures

Figure 1 : Phases du compostage aérobie (Paillat, 2005 in Houot, 2005).....10
Figure 2 : Schéma représentant le principe du compostage (Colombano et al., 2010). 13
Figure 3 : Image satellitaire de la station-service de Boukhalfa (Google Earth, 2023). 15
Figure 4 : Dispositif expérimental 17
Figure 5 : Dispositif de l'essai de toxicité sur les vers de terre. 19
Figure 6 : Protocole de mesure de la respiration microbienne du sol. 20
Figure 7 : Protocole de dosage de l'activité de la catalase. 21
Figure 8 : Taux de germination des graines de maïs en fonction de la dose de fumier. 22
Figure 9 : Croissance de la tige des plants du maïs en fonction de la dose de fumier. 23
Figure 10 : Croissance racinaire des plants du maïs en fonction de la dose de fumier. 24
Figure 11 : Survie des vers de terre dans les sols amendés avec différentes doses de fumier.....24
Figure 12 : Respiration microbienne dans les sols amendés avec différentes doses de fumier. 25
Figure 13 : Activité de la catalase dans les sols amendés avec différentes doses de fumier.....26

Liste des tableaux

Tableau 1: Classification générale des hydrocarbures (Guibet, 1997). 5

Tableau 2 : Test post-hoc de l'activité biologique en fonction de la dose du fumier 26

Sommaire

Introduction……1

Chapitre I : Synthèses bibliographique

1. Pollution du sol.....3

1.1. Définition du sol 3

1.2. Définition de la pollution du sol 3

1.3. Les polluants du sol 3

1.4. Hydrocarbures 4

1.5. Pollution du sol par les carburants 4

1.6. Effets des carburants sur l'écosystème 7

1.7. Procédés de décontamination ……..7

2. Compostage 8

2.1. Définition du compostage 8

2.2. Bases du processus de compostage 9

2.3. Paramètres clés du compostage 10

2.4. Procédés du traitement par compostage 12

3. Compostage des sols pollués 12

3.1. Application du compostage 13

3.2. Additifs 13

Chapitre II : Matériel et Méthodes

1. Matériel 15

1.1. Sol 15

1.2. Matériel végétal 15

1.3. Matériel animal 16

2. Méthodes.....17

2.1. Préparation du sol 17

2.2. Mise en place de l'essai.....17

2.3. Suivi du compostage 18

2.4. Évaluation de l'efficacité du compostage 18

2.5. Méthodes d'analyse statistique 21

Chapitre III : résultats et discussions

1. Résultats.....22

1.1. Test de germination des graines.....22

1.2. Croissance de la tige du maïs.....23

1.3. Croissance de la racine du maïs.....23

1.4. Viabilité de vers de terre.....24

1.5. Respiration microbienne.....25

1.6. Activité enzymatique.....26

2. Discussion.....27

Conclusion générale.....28

Références bibliographiques

Annexes

Résumé

Introduction

La pollution est toute modification anthropogénique d'un écosystème se traduisant par un changement de concentration des constituants chimiques naturels, ou résultant de l'introduction dans la biosphère de substances chimiques artificielles, d'une perturbation du flux de l'énergie, de l'intensité des rayonnements, de la circulation de la matière ou encore de l'introduction d'espèces exotiques dans une biocénose naturelle (Guermazi, 2017).

Ces dernières années, différentes activités anthropiques ont entrainé une augmentation de la pollution de l'environnement à l'échelle planétaire.

La pollution du sol, peut se présenter sous des aspects très variés. Elle est essentiellement ponctuelle ou locale.

La nature des sites pollués est très hétérogène, de quelque mètres carrés par épandage accidentel jusqu'à une superficie de plusieurs dizaines d'hectares (Koller, 2009).

La pollution des sols par des activités industrielles est devenue une source d'enjeux sociaux, économiques, sanitaires et écologiques.

La contamination par les hydrocarbures et les solvants chlorés mérite une attention particulière, du fait de l'utilisation très fréquente de ces produits (Colin, 2000).

La pollution du sol par les hydrocarbures est due à des rejets, volontaires ou non, de produits pétroliers. Elle relève à la fois de la pollution chimique et de la pollution organique (Koller, 2009).

Selon Thavasi et al. (2011), la pollution aux hydrocarbures, issus principalement des stations-services, présente des effets néfastes sur le sol, la faune et la fore.

D'après les données fournies par NAFTAL en 2014, 84 stations-service sont implantées dans la wilaya de Tizi-Ouzou, 18 sont étatiques et 66 font partie du secteur privé. La direction de l'agence distribue en moyenne 70 camions par jour au niveau de la wilaya et chaque station distribue 1 à 2 camions de $27m^3$ par jour. Ceci représente un risque potentiel important de pollution, c'est pourquoi le traitement des sols ainsi pollués est nécessaire (Ali Ahmed, 2022).

Les hydrocarbures ont des effets négatifs sur la faune et la flore du sol, contribuent aux changements climatiques globaux et sont impliqués dans la modification, la fragmentation et la réduction de la taille des habitats (Olivier et François, 2014 ; Noel, 2012).

Il existe plusieurs techniques de dépollution des sols polluées aux carburants. L'attention est actuellement accordée aux techniques biologiques (Ali Ahmed, 2022) comme le bioréacteur, la phytoremédiation et le compostage, qui aboutissent à la dégradation des polluants organiques.

Le compostage des sols pollués présente divers avantages. En effet, l'engrais organique contient beaucoup d'oligo-éléments que l'engrais chimique en général ne contiennent pas, et le compost aide à fertiliser le sol et améliore sa structure (Inckel et al., 2005).

Des travaux ont montré l'efficacité de divers ajouts comme les boues d'épuration (Sai et Tighrine, 2021) et le grignon d'olive (Boukrou et Nait Si Ahmed, 2022) dans l'accélération du processus du compostage des sols pollués aux carburants. Bouacem et Chabane (2022) ont étudié l'effet de divers ajouts organiques (fumier, grignon d'olive et paille) sur l'efficacité du compostage d'un sol pollué aux carburants. Leurs résultats montrent que le meilleur additif est le fumier.

C'est dans ce contexte que s'insère notre travail dont l'objectif est d'évaluer l'efficacité de décontamination d'un sol pollué aux carburants par ajout de différentes doses de fumier de bovin lors du compostage d'un sol pollué par les rejets d'une station-service située à Boukhalfa.

L'évaluation de l'efficacité de cette technique s'est faite par l'utilisation des tests biologiques quantifiant des paramètres faciles à mesurer : germination des graines de maïs, croissance caulinaire et racinaire, mortalité des vers de terre, respiration microbienne, activité de la catalase.

Le présent mémoire est subdivisé en 3 chapitres

- Le premier chapitre consiste en une synthèse bibliographique comportant des généralités sur la pollution du sol par des hydrocarbures, les procédés de la décontamination et sur le compostage.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de la zone d'étude, des méthodes adoptées et du matériel utilisé dans nos expériences.
- Le troisième chapitre traite des résultats obtenus et de leur discussion.

Une conclusion générale, reprenant les principaux résultats de l'étude et présentant quelques perspectives, vient clore ce mémoire

Chapitre I

Synthèse bibliographique

1. Pollution du sol

C'est à partir de la surface des sols que sont émis les polluants et par elle qu'ils transitent souvent avant de passer dans l'hydrosphère. Elle occupe ainsi une position dans les échanges et donc les pollutions avec les autres milieux. Etant donné que le sol constitue le support indispensable aux animaux et végétaux terrestres et à l'homme, toute pollution du sol retentira sur la flore, la faune et sur l'homme lui- même (Koller, 2009).

1.1. Définition du sol :

Le sol est un milieu délimité. Il provient des roches décomposées et altérées par l'action de l'eau, de l'air et des organismes vivants. Il est constitué de particules minérales, mais aussi de composés organiques, autre source d'aliments en provenance des êtres vivants eux-mêmes. Le sol est aussi fait de vides, dans lesquels circulent l'air et l'eau, et qui sont autant de logements et de chemins adaptés aux besoins des animaux et végétaux (Ruellan, 2010).

« le sol est un corps naturel, de constituants organiques et minéraux, différencié en horizons d'épaisseur variable, qui diffèrent du matériau sous-jacent par leur morphologie, constitution physique, propriétés chimiques et composition des caractères biologiques » (Dabin et Segalen, 1970)

1.2. Définition de la pollution du sol :

La notion de pollution du sol désigne toutes les formes de pollution touchant n'importe quel type de sol (agricole, forestier, urbain…). Un sol pollué devient à son tour une source possible de diffusion directe ou indirecte de polluants dans l'environnement, via l'eau, les envols de poussières, les émanations gazeuses ou via une re-concentration et transfert de polluants par des organismes vivants (bactéries, champignons, plantes à leur tour mangés par des animaux). Un sol est dit pollué quand il contient un ou plusieurs polluant(s) ou contaminant(s) susceptibles de causer des altérations biologiques, physiques et chimiques.

1.3. Les polluants du sol :

Beaucoup de substances qui parviennent dans le sol peuvent être dangereuses pour les microorganismes, les plantes, les animaux et aussi les êtres humains. Elles peuvent être directement nuisibles pour les plantes, et dans certains cas aussi directement pour les animaux et les êtres humains (Bliefert et Perraud, 2001).

D'après Bliefert et Perraud (2001), les contaminations du sol peuvent être diffuses ou ponctuelles.

1.3.1. Pollutions diffuses du sol :

Dans les contaminations diffuses du sol, il y a un ou plusieurs composés dangereux, dont les concentrations varient peu ; dans la plupart des cas, les surfaces concernées sont très étendues. En général, les contaminations sont diffuses lorsque les polluants sont émis :

- A partir de sources non stationnaires (par exemple les automobiles) ;
- A partir de sources très étendues (par exemple les dépôts de produits en agriculture, les dépôts de sédiments lors d'inondation ;
- A partir d'un grand nombre de sources (par exemple les émissions provenant de véhicules, de foyers domestiques, etc.) (Bliefert et Perraud, 2001).

1.3.2. Pollutions ponctuelles du sol :

Dans les contaminations ponctuelles du sol, il s'agit le plus souvent de grandes quantités de polluants dans un domaine délimité par des clôtures, des terrils, des bâtiments, des sites contaminés, etc (Bliefert et Perraud, 2001).

1.4. Hydrocarbures :

Les hydrocarbures sont des composées constituées uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés qui proviennent de nombreux processus de pyrolyse et du pétrole. Ce sont des polluants environnementaux très répandus qui suscitent une grande préoccupation en raison de leurs propriétés génotoxiques (Haeseler et al., 1999).

1.5. Pollution du sol par les carburants

1.5.1. Définition

Le carburant est un combustible qui donne son énergie de fonctionnement à un moteur thermique.

Les carburants tels que l'essence et le gazole sont stockés et vendus dans les stations-service. Il s'agit de mélanges complexes d'hydrocarbures pétroliers. La composition en

hydrocarbures dépend de facteurs comme l'origine du pétrole brut et les conditions de raffinage (Demirdjian, 2006).

1.5.2. Classification des hydrocarbures :

On distingue trois grandes familles de composés, présentées dans le tableau 1.

Tableau 1: classification générale des hydrocarbures (Guibet, 1997).

Type de famille	Dégradation courante	Désignation officelle	Motif structural	Formules globales
saturés	Paraffines	Alcanes	Alcanes	C_nH_{2n+2}
	Naphtènes	Cyclanes	Cyclanes	C_nH_{2n}***
insaturés	Oléines**	Alcènes**	Alcènes	C_nH_{2n+2}***
	Acétléniques	Alcynes	Alcynes	C_nH_{2n-2}
aromatiques	Aromatiques	-		C_nH_{2n-6}****

*Formule valable uniquement pour les composés à un seul cycle.
** les cyclooléfines, dioléfines et polyoléfines sont classées dans cette catégorie.
*** formule valable uniquement pour les monooléfines non cycliques.
**** formule valable uniquement pour les composés à un seul cycle benzénique à chaînelatérale.

1.5.3. Devenir des hydrocarbures dans le sol :

Selon Saada et al. (2005), le devenir des hydrocarbures est dépendant de la rétention, de la volatilisation, de la dissolution, mécanismes abiotique d'atténuation naturelle qui eux même sont dépendants des propriétés du sol et de la composition du mélange d'hydrocarbures.

a) Infiltration :

L'infiltration se fait par les étapes suivantes :

- Sitôt répandue sur le sol les hydrocarbures ont à la fois tendance à s'étaler à la surface du sol et à en imprégner par infiltration les couches superficielles, sauf si celles-ci sont imperméables. Le degré de pénétration de l'huile est fonction de la texture et de la structure du sol comme de la quantité et de la nature du produit déversé.

- Un produit à faible viscosité pénètre rapidement dans le sol sec et poreux et s'étale donc peu à la surface. Inversement, sur un sol saturé d'eau de type argileux, le produit s'étale largement, d'autant plus que sa viscosité est relativement élevée.

- L'infiltration se poursuit j'jusqu'à ce que les conditions de saturation résiduelle soient réalisées et que l'hydrocarbure atteigne un stade « immobile » (Gatelleur et al., 1974).

b) Volatilisation :

C'est le passage d'une substance à l'état gazeux. La volatilisation permet de diminuer la concentration du contaminant dans le milieu, mais elle n'est jamais destructive (transformation mais non disparition). Ce mécanisme dépend de la pression de vapeur de chaque composé, des gradients de concentration qui existent dans la zone non saturée, de la densité des vapeurs des contaminants et des propriétés du sol (Saada et al., 2005).

c) Adsorption :

L'adsorption est une propriété qu'ont certains corps solides de retenir les molécules d'autres corps (à l'état gazeux ou liquide) à leur surface. La quantité d'hydrocarbures adsorbés est fortement liée aux propriétés du sol, à son humidité et à l'hydrophobicité du composé. Les coefficients pour l'argile et la matière organique sont positifs. L'argile possède une surface spécifique élevée et donc fixe facilement les polluants organiques (Saada et al., 2005).

d) Solubilisation :

D'après Bertand et Mille (1889), les hydrocarbures sont des composés insolubles dans l'eau, certains d'entre eux sont partiellement solubles.
Au contact du sol, l'eau s'enrichit en électrolytes (Mg^{2+}, Ca^{2+}, ...), et en matière organique. Plus la force ionique de la phase aqueuse augmente, plus le pouvoir de solubilisation des hydrocarbures va augmenter (Saada et al., 2005).

e) Dégradation :

Il y'a deux types de dégradation : biotique et abiotique.

- **Dégradation biotique ou biodégradation :**

La biodégradation est l'ensemble des mécanismes de transformation d'un contaminant en différents sous-produits, par l'action des microorganismes (surtout bactéries et champignons).

- **Dégradation abiotique :**

Les processus principaux à l'origine de la dégradation abiotique des contaminants sont la photolyse, les réactions d'oxydo-réduction, et l'hydrolyse (Saada et al., 2003)

1.6. Effets des carburants sur l'écosystème :

Le risque écologique présente en effet des particularités notables :

- Les phénomènes observés à l'échelle de l'écosystèmes n'ont pas d'équivalent humains (sauf de manière simplifiée au travers des chaînes agro-alimentaires) ; son évolution, ses mécanismes et niveau d'adaptation, de récupération et de protection sont rarement connue ;
- L'exposition aux polluants est généralement plus fort en raison d'une alimentation moins variée et d'un contact souvent plus intime des espèces avec le milieu environnemental ; le changement de nourriture ou d'habitat est plus difficile.
- Les espèces vivantes sont plus étroitement liées aux caractéristiques des milieux dans lesquels elles vivent (métabolisme énergétique plus intense, nombreux échanges, etc.) et sont donc plus sensibles aux pollutions de ces milieux (Colin, 2000).

D'après Noel (2012) et Olivier et François (2014), les impacts sur la faune et les habitats sont associés à l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures. Ces impacts sont multiples :

- Changements climatiques globaux ;
- Modification, fragmentation et réduction de la taille des habitats ;
- Diminution des ressources hydriques : le prélèvement d'eau dans les eaux de surface pourrait réduire significativement leur débit, ce qui peut dégrader l'habitat du poisson ;
- Écotoxicité : exposition à des contaminants ;
- Possible destruction du couvert forestier et remplacement par une végétation invasive (Procédés de traitement de la pollution ;

La décontamination est un ensemble de procédés consistant à épurer ou tout au moins à isoler un milieu ayant été exposé à une pollution chronique ou récurrente qui l'a rendu inutilisable pour des activités domestiques, agricoles ou industrielles (Koller, 2004).

I.7. Procédés de décontamination :

1.6.1. Procédés physiques :

Le principe consiste à utiliser des fluides, présents dans le sol ou injectés comme vecteur pour transporter la pollution vers des points de concentration et d'extraction. Les procédés les plus utilisé sont le lavage et le confinement (Colin, 2000).

1.6.2. Procédés thermiques :

Ces procédés consistent à chauffer le sol in situ pour favoriser la désorption et la volatilisation des contaminants. On les utilise pour l'élimination des fractions aliphatiques et aromatiques des carburants. L'essence et les composés chlorés se volatilisant entre 80 et 300°C (Koller, 2004).

1.6.3. Procédés chimiques :

Les techniques chimiques ont pour but de détruire les polluants ou de le transformer sous une forme moins nocive pour l'environnement. Les procédés qui sont appliqués directement à la phase solide polluée par les hydrocarbures et les solvants chlorés sont l'extraction et la mobilisation (Colin, 2000).

1.7.4. Procédés biologiques :

Les procédés de remédiation biologique visent la dégradation de la matière organique essentiellement par l'activité des bactéries déjà présentes dans le sol ou encore par des bactéries spécialement cultivés et l'optimisation de leurs conditions de prolifération (Koller, 2004).

2. Compostage :

2.1. Définition du compostage :

Le compostage est un processus biologique auto-chauffant qui est utilisé depuis des siècles comme solution de gestion des déchets organiques. Le produit du compostage peut être utilisé comme engrais organique du sol ou comme substrat de culture (Chitsan et al., 2022).

2.2. Bases du processus de compostage :

Le processus de compostage a été clairement catégorisé en quatre phases : mésophile, thermophile, refroidissement et maturation (fig. 1). Ces phases présentent des différences de température, de demande en oxygène, de structure de la communauté microbienne, de stabilité, de teneur en carbone, de teneur en azote et de durée de vie (Chitsan et al., 2022).

2.2.1. Phase mésophile :

Le processus de compostage commence à température ambiante et en quelques jours, elle atteint 45°C. L'activité métabolique de divers groupes hétérogènes de micro-organismes entraîne une augmentation de la température car ces microbes utilisent l'azote et la matière organique pour leur assimilation corporelle. La décomposition des composés solubles, tels que les sucres, produit des acides organique et, par conséquent, le pH peut chuter jusqu'à environ 4 ou 4,5). La phase chaude dure de deux à huit jours (Amrit et al., 2021).

2.2.2. Phase thermophile :

La température étant un indicateur de l'activité microbienne, la phase initiale de la phase thermophile est considérée comme la période où l'activité est la plus élevée.

Les microbes mésophiles sont sensibles à la température et désactivés pendant la phase thermophile, tandis que les microbes thermophiles peuplent la communauté microbienne.

Les substances organiques moins biodégradables et complexes comme la cellulose et l'hémicellulose commencent à se biodégrader pendant cette phase. L'ammoniac produit par la dégradation des matières organiques contenant de l'azote entraîne une augmentation du pH.

L'activité microbienne ralentit au fur et à mesure que les sources de nutriments s'épuisent, ce qui entraîne une diminution de l'activité microbienne et par conséquent, une baisse de la température et le début de la phase de durcissement. Début de la phase de saison, qui comprend les phases de refroidissement et de maturation (Chitsan et al., 2022).

2.2.3. Phase de refroidissement :

La phase de refroidissement est la phase intermédiaire entre la phase thermophile et la phase de maturation. Elle prend fin avec le retour à la température ambiante. Le milieu est colonisé de nouveau par des micro-organismes mésophiles. Ils dégradent les polymères restés

intacts en phase thermophile et incorporent l'azote dans des molécules complexes (Laroche et Nicolas, 2012).

2.2.4. Phase de maturation :

Le compost a besoin de temps pour mûrir en entrepôt. Le degré de maturation correspond au degré d'humification, ou de conversion de la matière organique en humus, une matière résistante à la décomposition bactérienne (Martin, 2005).

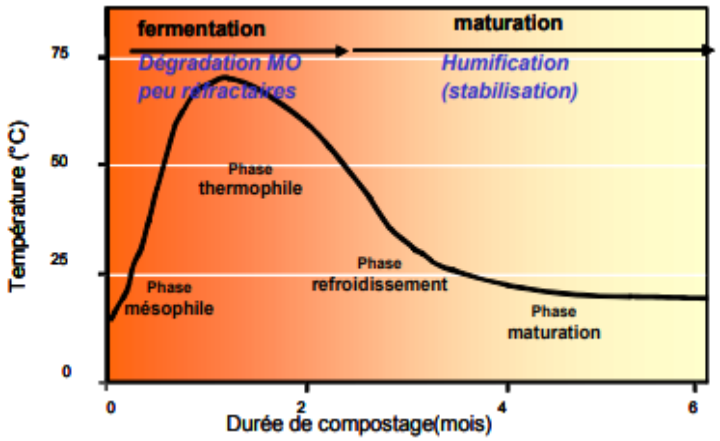

Figure 1: Les différentes phases du compostage aérobie (Paillat et al., 2005 in Houot, 2005).

2.3. Paramètres clés du compostage :

Les paramètres physico-chimiques à prendre en compte durant le processus de compostage sont la température, la teneur en eau, le rapport carbone/azote, l'aération et l'humidité.

2.3.1. Aération (oxygène) :

Le compostage est un processus aérobie. Une ventilation adéquate doit être maintenue pour permettre la respiration des micro-organismes qui libèrent du dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. De même, l'aération contribue également à réduire le compactage ou le remplissage d'eau dans le matériau de compostage. Les besoins en oxygène varient au cours du processus, atteignant le taux de consommation le plus élevé pendant la phase thermophile. Le niveau de saturation en oxygène du tas de compost ne doit pas être inférieur à 5 % (niveau optimal 10 %). Le niveau d'aération excessif entraîne une baisse de température et une perte d'humidité par évaporation, et le faible niveau d'humidité entrave le processus de décomposition (Amrit et al., 2021).

2.3.2. Humidité :

L'humidité est nécessaire pour assurer l'activité métabolique des micro-organismes. Le compost devrait avoir une teneur en eau de 40 à 65%. Si le tas est trop sec, le processus de compostage est plus lent, alors qu'au-dessus de 65% d'humidité, des conditions anaérobies se rencontrent. En pratique, il est conseillé de commencer le tas avec une teneur en eau de 50 à 6%, pour atteindre à la fin du processus, une humidité de 30% (Misra et al., 2005).

2.3.3. Température :

L'activité optimale des micro-organismes qui décomposent les déchets correspond à une plage de température bien définie. Les bactéries mésophiles sont actives entre 20 et 45°C et les thermophiles entre 45 et 65°C. une carence en oxygène peut ainsi être décelée par la baisse de la température et corrigée par retournement pour aérer (Bromblet et al., 2013).

2.3.4. pH :

Le pH initial des matériaux de compostage est influencé par le type de déchets organiques. Par exemple, les déchets alimentaires sont légèrement acides, tandis que le fumier animal est alcalin le fumier est alcalin. En outre, la communauté bactérienne dans le compost préfère les pH neutres ou Presque neutres, tandis que la communauté fongique préfère les conditions légèrement acides. Par conséquent, la plage de pH optimale varie sensiblement pour le compostage, de 5,5 à 8,0. Cela explique pourquoi le pH n'est généralement pas ajusté pendant le compostage par rapport à d'autres technologies de traitement biologique (Chitsan et al., 2022).

2.3.5. Rapport carbone-azote (C/N) :

Dans le processus de décomposition, les matières carboniques contenues dans les matières organiques sont utilisées par les microorganismes et rejetées sous forme de CO_2. Si, lors du processus de compostage, le rapport carbone/azote (rapport C/N) des matières organiques est inférieur à 15, une perte d'azote est à craindre. Si, par ailleurs, le rapport C/N est trop élevé, le processus de décomposition en est considérablement ralenti. Le rapport C/N optimal se situe entre 15 et 30 (Tangara et al., 2012).

2.3.6. Taille des particules :

L'activité microbienne est liée à la taille des particules, c'est-à-dire à la facilité d'accès au substrat. Les particules de compostage de très petite taille augmentent la surface spécifique, ce qui facilite l'accès au substrat. La densité du matériau de compostage est étroitement liée à la taille des particules et influe en fin de compte sur l'aération et l'efficacité du compostage. La densité du matériau de compostage au début du compostage est d'environ 150-250 kg/m^3 et augmente jusqu'à 600-700 kg/m^3 au fur et à mesure que le compostage progresse (Amrit et al., 2021).

2.4. Procédés de traitement par compostage :

Le compostage se déroule généralement en quatre grandes étapes qui s'échelonnent sur plusieurs semaines : la réception des matières organiques, la préparation des matières en vue de leur compostage (prétraitement), le procédé de compostage lui-même incluant la phase de maturation et l'affinage du compost en vue de son utilisation et de sa mise en marché.

3. Compostage des sols pollués :

Le compostage consiste à mélanger des sols excavés avec des amendements organiques et à les déposer en tas trapézoïdaux (andains) régulièrement espacés afin de favoriser la biodégradation (fig. 2). Cette technique est couramment employée sur les sites présentant des hydrocarbures volatils à semi-volatils biodégradables (Colombano et al., 2010).

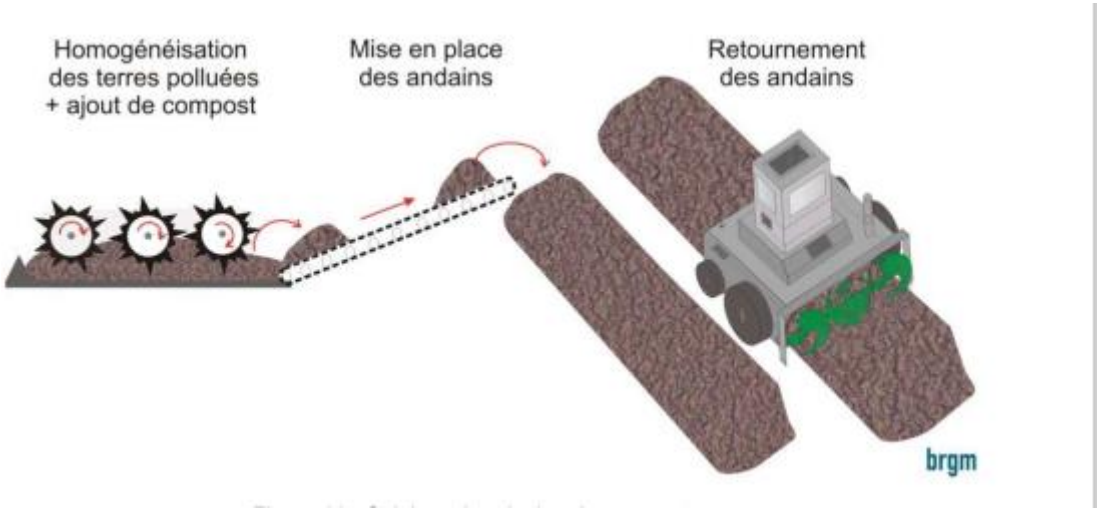

Figure 2 : schéma du principe du compostage (Colombano et al., 2010).

Le procédé dit « de compostage de sols » consiste à mélanger des terres contaminées avec un compost adapté afin de favoriser la dégradation des contaminants. Le compostage de sol est donc un procédé ex situ.

Bien qu'utilisée couramment, l'appellation compostage de sols n'est pas totalement correcte. En effet, le compostage stricto sensu, consiste à favoriser la décomposition de matières organiques naturelles et non xénobiotiques. Ces matières organiques naturelles peuvent être :

- D'origine animale : lisiers de porc, de cheval, de bovins, d'ovidés ou de volailles. Ces sources sont souvent enrichies en microorganismes lithotrophiques (nitrifiants et S-oxydants) et hétérotopiques ;

- D'origine végétale : légumes, fruits, bois, gazon…

Il existe de multiples techniques de compostage et au sien de ces procèdes, de multiples savoir-faire. Pour une même sorte de compost, l'état d'avancement du compostage pourra jouer un rôle dans l'efficacité du compost choisi avant le passage à grande échelle.

Plus le compostage est avancé, plus le matériau est homogène, structuré et riche en substances humiques (Roudier, 2005).

3.1. Application du compostage :

Le compostage n'est pas uniquement une solution de valorisation des bio-déchets, c'est aussi une technique basée sur l'ajout de composts au sol pour favoriser la biodégradation des polluants comme les carburants.

Le compostage de sols pollués est appliqué pour accélérer la décontamination d'un sol pollué par des hydrocarbures. Rhbal et al. (2020) ont utilisé des boues activées pour la décontamination d'un sol pollué aux hydrocarbures. Ceci a augmenté l'efficacité de la technique en assurant une plus grande dégradation des hydrocarbures pétroliers. De leur côté, Tahseen et Antoni (2020) ont utilisé un compost de déchets verts comme un amendement du sol contaminé.

3.2. Additifs :

L'ajout organique a toute son importance lorsque l'on veut augmenter l'efficacité de la décontamination. Des travaux ont été réalisés dans ce contexte au niveau du l'université

Mouloud Mammeri. Sai et Tighrine (2021), ont constaté que les boues d'épuration ont accéléré le compostage du sol pollué. D'autres études (Boukrou et Nait Si Ahmed, 2022 ; Bouacem et Chabane, 2022), ont testé le grignon d'olive, le fumier, et la paille. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le fumier utilisé à une dose de 20%. C'est l'ajout organique qui a accéléré la décontamination du sol pollué aux carburants. Il serait intéressant, à la suite de ces travaux, de déterminer la dose de fumier qui aboutirait à une détoxification optimale du sol.

Chapitre II

Matériel et Méthodes

Cette étude consiste à comparer l'efficacité de l'ajout de différentes doses de fumier lors du compostage d'un sol pollué aux carburants. Pour ce faire, une expérience a été menée au laboratoire PSEMRVC lors de laquelle des tests biologiques ont été effectués.

1. Matériel

1.1. Sol

Dans notre étude, le sol utilisé est un sol contaminé aux carburants, provenant d'une station-service de Boukhalfa située à 36° de latitude et 4° de longitude. Cette station est implantée à 5 Km à l'ouest du chef-lieu de la wilaya Tizi-Ouzou, sur la route nationale n° 12 reliant Alger et Tizi-Ouzou (fig. 3).

Figure 3: Image satellitaire de la station-service de Boukhalfa (Google Earth, 2023).

1.2. Matériel végétal

Les graines de maïs (*Zea mays*) ont été utilisées pour évaluer l'efficacité de la décontamination du sol par compostage. C'est une espèce qu'on utilise parce qu'elle est justement sensible aux hydrocarbures (Chaineau et al., 1997).

Une augmentation du taux de germination indiquera une détoxification du sol donc une efficacité du traitement appliqué.

1.3. Matériel animal

Des vers de terre de l'espèce *Eisenia fœtida* ont été utilisés dans cette étude afin d'évaluer la toxicité des carburants résiduels donnant ainsi une indication sur l'efficacité du traitement du sol par compostage. Les doses de fumier qui seront les plus efficaces vont réduire la toxicité des carburants dans le sol et diminueront par conséquent le taux de mortalité de ces vers.

1.4. Fumier

Le fumier est un mélange plus ou moins décomposé de litière carbonée (par exemple : pailles de canne à sucre, bagasse, broyat de déchets verts) et de déjections (fèces et urine) de bovin.

Dans cette étude, le fumier utilisé est jeune avec une phase de maturation inférieure à 2 mois. Il est issu de la vidange et du raclage des étables d'élevages de bovins (filières viande et lait à petite échelle) situés au village de Bouaoune à Bouzgeune. C'est une matière brune, plus ou moins pailleuse et compacte, hétérogène, à odeur caractéristique, relativement humide (François et al., 2022).

L'objectif d'utiliser des matières organiques dans un sol pollué est d'améliorer l'efficacité de la décontamination, car ils contribuent et accélèrent la dégradation des polluants organiques.

1.5. Sciure de bois

D'après Oliveira et al. (2020), la sciure de bois est composée d'atomes de carbone (environ 48.15%), d'oxygène (43%), d'hydrogène (6%) et d'azote (0.18%). Le bois est essentiellement constitué de cellulose (55.3%), d'hémicelluloses (14.1%), de la lignine (25%) et éventuellement d'autres composants (résine, tannins, etc.) (Eyheraguibel, 2004). Cette matière organique améliore les propriétés physiques, notamment l'aération, des matériaux à composter.

La sciure de bois utilisée dans ce travail provient d'une menuiserie située au village Méhaga à Bouzeguène.

2. Méthodes

2.1. Préparation du sol :

L'échantillonnage du sol a été réalisé le 12/03/2023 au niveau d'une station-service du secteur privé située à Boukhalfa. Le prélèvement a porté sur la couche superficielle (0-15cm) le long d'une diagonale tracée sur une placette. Cette dernière se trouve sous les évents par lesquels le sol reçoit des gouttelettes de carburants occasionnant ainsi une pollution chronique.

Le sol est mis dans des sacs et est acheminé au laboratoire où il est laissé à l'air libre pendant 1 jour pour faciliter l'effritement des mottes de terre. Ce sol est ensuite tamisé à l'aide d'un tamis à maille de 5 mm de diamètre pour éliminer la fraction grossière. Après homogénéisation, le sol est réparti sur 12 boites destinées à recevoir déférentes traitements. Chaque boite contient 1kg de sol (fig. 4).

2.2. Mise en place de l'essai

Dans cette étude, nous avons cherché à mettre en évidence l'effet de la variation de la quantité de fumier sur l'efficacité de décontamination, par compostage, d'un sol polluéaux carburants. Quatre concentrations de fumier ont été testées, à savoir 0, 10, 20 et 30%. Chaque concentration est répétée trois fois. Dans chacune des boites, le sol est enrichi avec 2% de sciure de bois. Les traitements sont répartis comme suit :

1er lot de 3 boites : 1 kg de sol contaminé + sciure de bois mais sans fumier (0%).

2ème lot de 3 boites : 1kg de sol contaminé + sciure de bois + 100g de fumier (10%).

3ème lot de 3 boites : 1kg de sol contaminé + sciure de bois + 200g de fumier (20%).

4ème lot de 3 boites : 1 kg de sol contaminé + sciure de bois + 300g de fumier (30%).

Figure 4 : Dispositif expérimental

2.3. Suivi du compostage :

Le suivi du compostage consiste en un arrosage régulier du sol de toutes les boites avec la même quantité d'eau. Un retournement du sol a été effectué quotidiennement durant les 8 semaines de l'essai pour assurer l'aération du sol à composter.

2.4. Évaluation de l'efficacité du compostage :

Après 8 semaines, nous avons évalué l'efficacité du traitement du sol pollué par compostage avec les différentes doses de fumier. Cette efficacité a été évaluée par des tests biologiques, rapides, d'exécution facile : germination des graines de maïs, croissance aérienne et racinaire des plants de maïs, mortalité des vers de terre, activité biologique globale et activité de la catalase du sol.

2.4.1. Germination des graines de maïs :

Nous avons réalisé un test de germination dans les 12 échantillons de sol composté, en mettant dans chaque boite de Pétri 100g de sol couvrant 10 graines de maïs. Les graines ont été laissé à germer, avec un arrosage régulier pendant 7 jours. Le taux de germination (TG) est calculé selon la formule suivante :

TG= (nombre de graines germées/ nombre total de graines semées) *100

2.4.2. Croissance racinaire :

La croissance racinaire a été mesurée par l'élongation des racines des plantules de maïs issues de la germination des graines. La différence de la longueur des racines mesurée 2 fois espacées de 2 semaines représente l'élongation racinaire en 15 jours.

2.4.3. Croissance caulinaire :

La croissance caulinaire a été mesurée par l'élongation de la tige. La longueur de la tige a été mesurée deux fois espacées de 2 semaines.

2.4.4. Mortalité des vers de terre :

Il s'agit d'un test de toxicité aigüe sur des vers de terre (fig. 5). Trois individus ont été enfouis dans 200g de sol contenus dans des pots à couvercles percés afin de permettre la respiration de ces animaux.

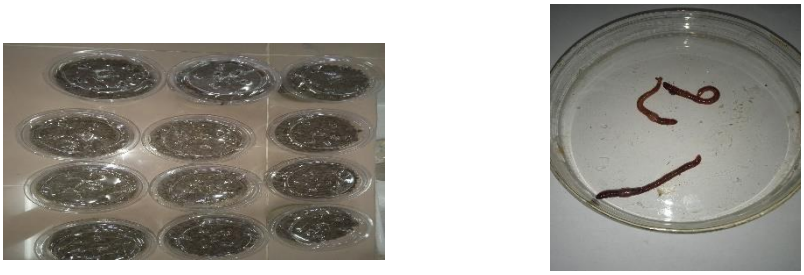

Figure 5 : Dispositif de l'essai de toxicité sur les vers de terre.

2.4.5. Activité biologique globale

L'activité biologique a été évaluée au moyen d'un test respirométrique tel que décrit par Dormmergues (1960). Le principe étant de mesurer la respiration des microorganismes du sol par la quantification du CO_2 dégagé lors d'une incubation de 7 jours, à une température constante de 28°C.

Dans des flacons de 250 ml contenant 100g de sol composté, ont été placés deux tubes à hémolyse, l'un contenant 3 ml d'eau pour éviter le dessèchement du sol, et l'autre 5 ml d'une solution de NaOH 0,5M pour fixer CO_2 dégagé par la respiration des microorganismes.

Après incubation, les tubes de NaOH ont été retirés rapidement et fermés. 3 gouttes de chlorure de baryum ont été incorporées à la soude avant de la transvaser dans un bécher pour titrage. L'excès de soude n'ayant pas fixé le CO_2 dégagé par la respiration microbienne a été titré par l'acide chlorhydrique (HCl) 0,25M en présence de quelques gouttes de phénolphtaléine jusqu'à la disparition de la couleur rose (fig. 6). Un témoin sans sol a été réalisé.

2.4.6. Activité de la catalase

L'activité de la catalase a été mesurée par la méthode de Guan (1986) : 5g du sol pollué composté ont été placés dans les flacons de 250 ml auxquels ont été ajoutés 2,5 ml de H_2O_2 à

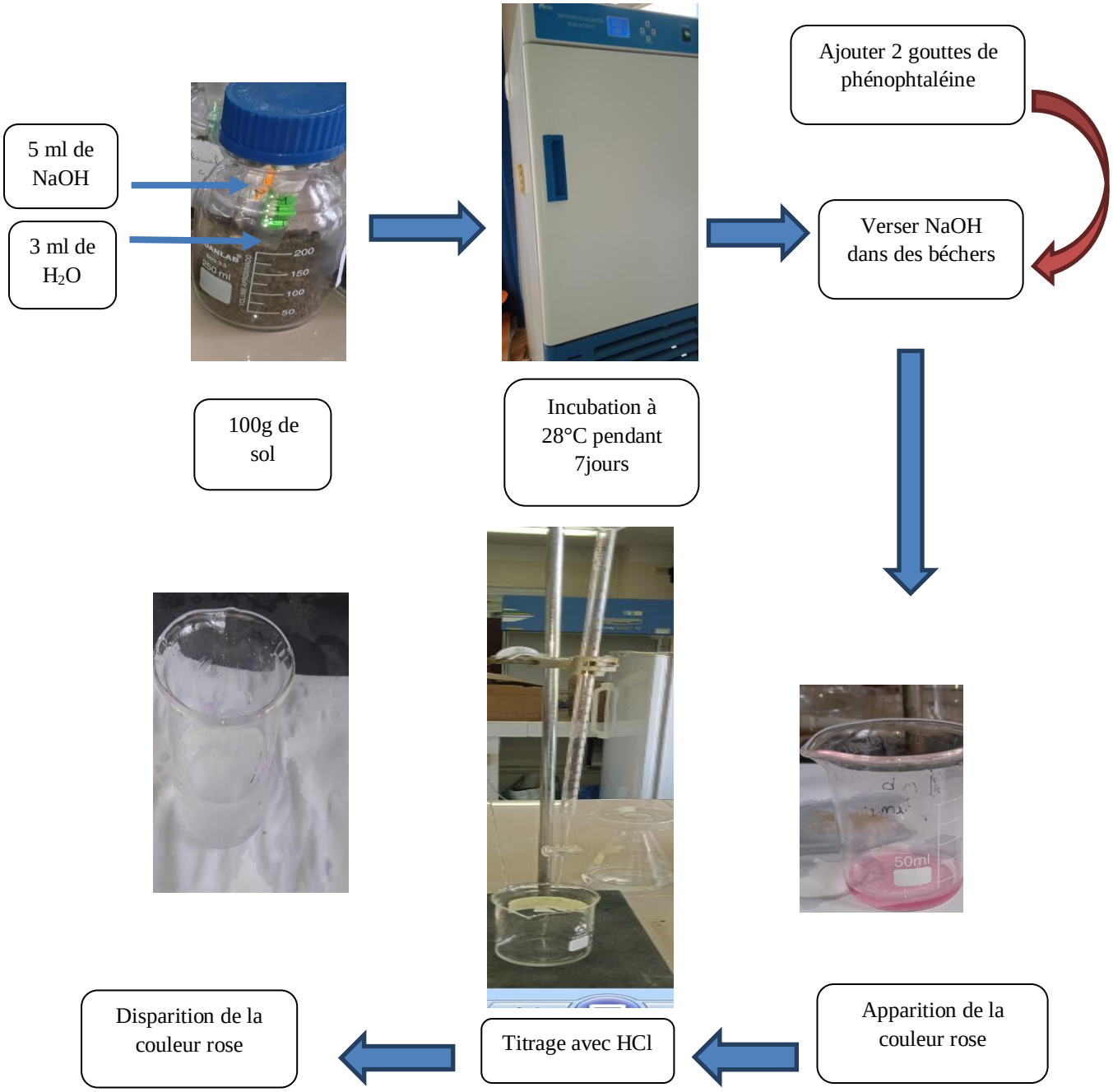

Figure 6 : protocole de mesure de la respiration microbienne du sol.

0,3% et 20 ml de tampon phosphate à pH 7. Les mélanges réactionnels ont été incubés à 25°C pendant 20 min. 1.5 ml de la solution de H_2SO_4 à 3mol/l ont été ajoutés au mélange pour arrêter la réaction. Le mélange a été centrifugé à 4500 trs/min pendant 10 min. Un témoin sans sol a été réalisé.

L'excès de H_2O_2 a été titré avec une solution de $KMnO_4$ 0,5M, jusqu'à l'apparition de la couleur rose claire (fig. 7).

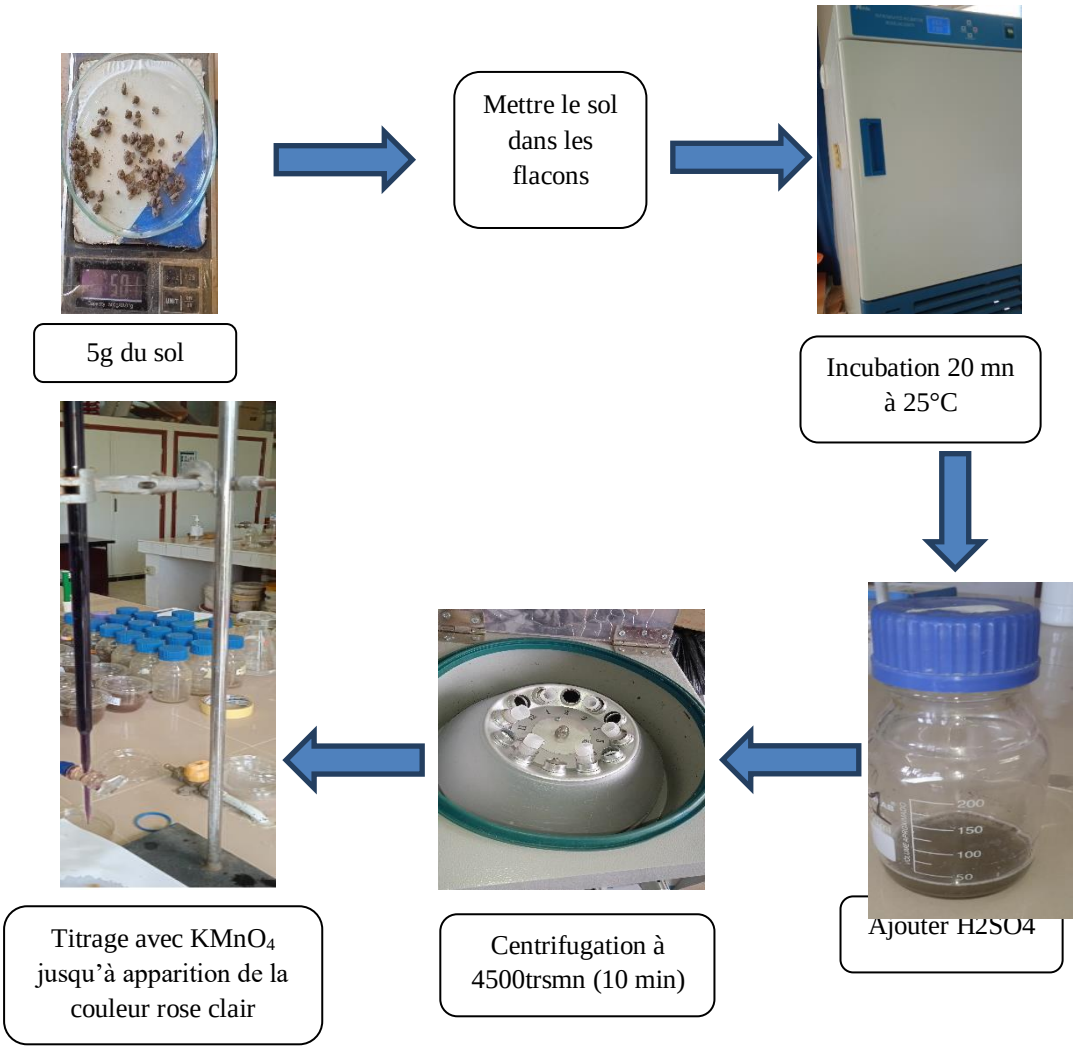

Figure 7 : Protocole de dosage du l'activité de la catalase.

2.5. Méthodes d'analyse statistique :

Les résultats obtenus pour les tests biologiques ont été soumis à une analyse de la variance à un critère de classification (la dose de fumier) réalisée avec le logiciel R.4.1.0. Dans le cas où les données ne suivent pas une loi normale ou présentent des variances inégales, la comparaison des moyennes a été faite par le test de Kruskal-Wallis.

Lorsque les différences observées entre les moyennes sont significatives, le test post-hoc approprié a été effectué pour établir les groupes homogènes.

Chapitre III
Résultats et discussion

Ce travail a consisté à comparer l'efficacité du compostage d'un sol pollué aux carburants sans et avec ajout de fumier de bovin à différentes doses.

1. Résultats

1.1. Test de germination des graines

Les résultats exposés dans la figure 8 montrent que le taux de germination est très élevé dans tous les traitements.

Le taux de germination le plus élevé a été observé dans le sol traité avec l'ajout de fumier à 10% avec un taux de 100 %. Il est suivi par le sol C0 sans ajout de fumier qui est le témoin, et le sol C3 avec l'ajout de 30% de fumier avec un même taux de germination qui est de 96,66%.

Le taux de germination le plus faible a été observé dans le sol ayant reçu 20% de fumier, avec un taux de 93.33%.

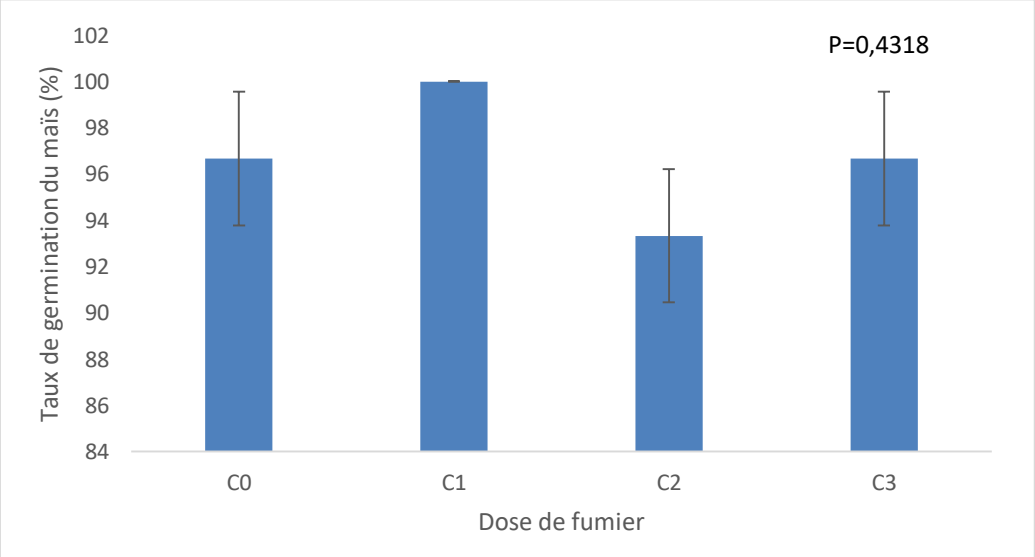

Figure 8: taux de germination des graines de maïs en fonction de la dose de fumier.

Le test de Kruskal et Wallis du taux de germination montre que les différences observées entre les doses de fumiers ne sont pas significatives. Donc les doses de fumier testées, y compris la dose 0%, ont toutes eu le même effet sur la germination des graines de maïs (annexe 1).

1.2. Croissance caulinaire des plantules de maïs

La croissance du la tige en (cm) en fonction de la dose de fumier ajoutée au sol est représentée dans la figure 9.

La meilleure croissance de la tige a été observée dans le sol amendé avec 30% de fumier.

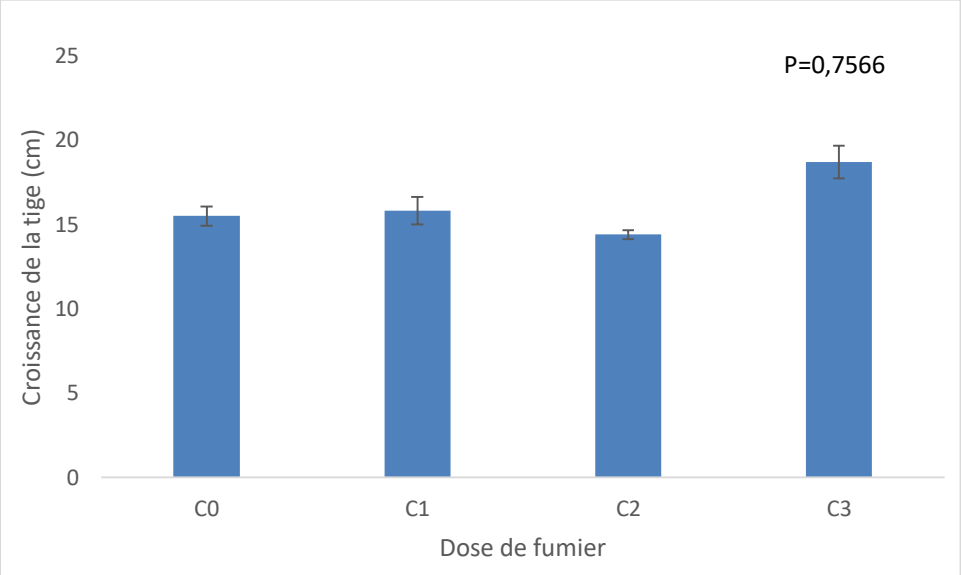

Figure 9 : croissance de la tige des plants de maïs en fonction de la dose de fumier.

Les résultats de l'anova montrent que les différences ne sont pas significatives observées de la croissance caulinaires du maïs selon la dose de fumier ne sont pas significatives (0,7566). (annexe 2).

1.3. Croissance de la racine de plantules de maïs

Dans la figure 10 sont illustrés les résultats de l'élongation racinaire (cm) en fonction de la dose de fumier ajoutée au sol.

La meilleure croissance racinaire a été observée dans le sol C3 contenant 30% de fumier.

L'anova a révélé que les déférences n'étaient pas significatives entre les différentes doses de fumier testées (p= 0,7566) (annexe 3).

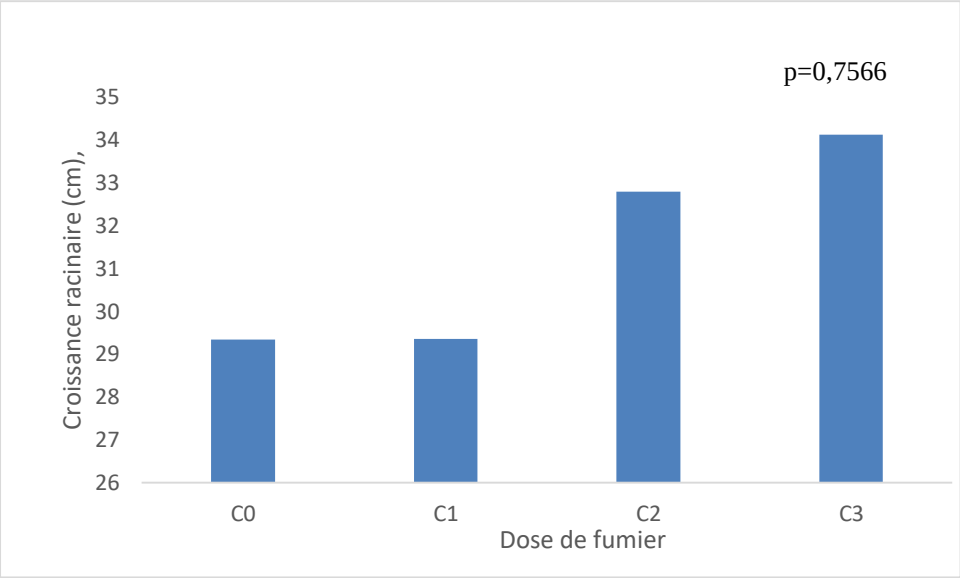

Figure 10 : croissance racinaire des plants de maïs en fonction de la dose de fumier.

1.4. Viabilité de vers de terre

Les résultats des taux de mortalité des vers de terre (figure 11) montrent que les vers de terre dans les sols ayant reçu les différentes doses de fumier sont tous vivants.

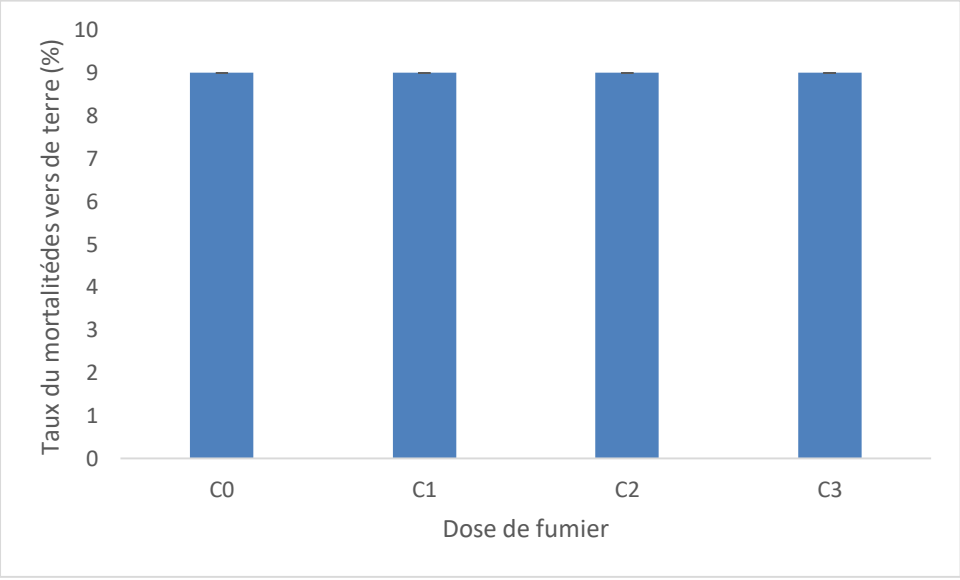

Figure 11 : survie des vers de terre dans les sols amendés avec différentes doses de fumier.

1.5. Respiration microbienne

Les résultats du test respirométrique montrent une grande variation de la quantité de CO_2 dégagée. Elle est plus intense dans le sol amendé avec 30% de fumier (C3) où elle a attient 132,44 mg, suivi par celui traité avec 20 % de fumier. Les plus faibles quantités de CO_2 dégagée ont été enregistrées dans le sol traité avec 10% de fumier et le sol non amendé (C0).

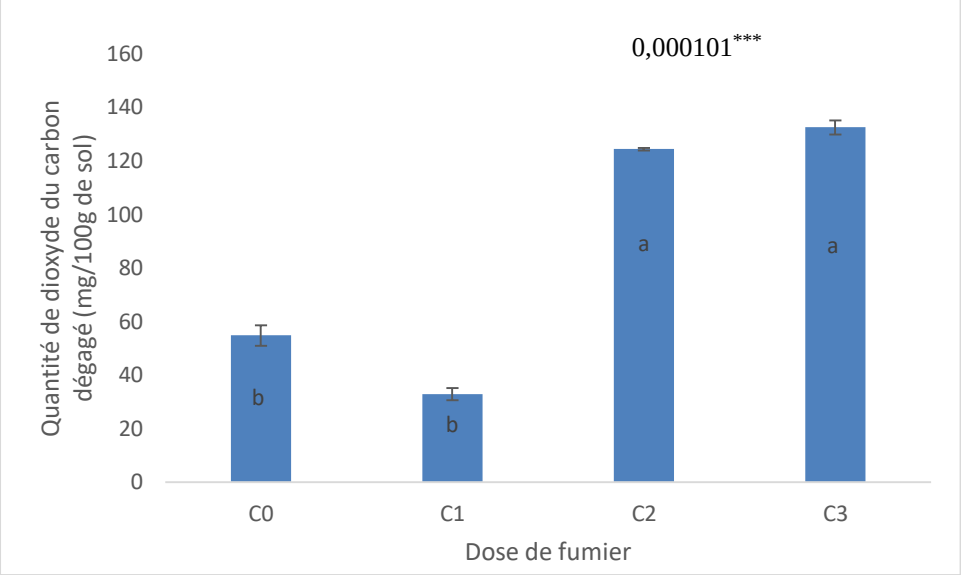

Figure 12: Respiration microbienne dans les sols amendés avec différentes doses de fumier.

Les résultats de l'anova montrent que les différences sont très hautement significatives entre les sols ayant reçu différentes doses de fumier (p= 0,000101).

Le groupe « a » qui contient le sol C3 de 30% de fumier, et le sol de C2 de 20% du fumier, avec des moyennes respectives de 132,44 et 124,43 et le groupe de « b » renfermant le sol de C0 qui est le témoin et C1 qui contient 10% du fumier avec des moyennes respectives de 58,26 et 21,92.

Les résultats des groupes homogènes sont illustrés dans le tableau 2.

Tableau 2 : résultats du test de Newman-Keuls groupes homogènes de l'activité biologique

sols	Moyenne	Groupes
C3	132,44	a
C2	124,43	a
C0	58,26	b
C1	21,92	b

1.6. L'activité enzymatique de la catalase

La figure 13 illustre les résultats de l'activité de la catalase exprimée par la quantité de $KMnO_4$ en fonction des différentes doses de l'ajout de fumier aux sols.

Nous remarquons que la plus grande activité enzymatique a été enregistrée dans le sol C1 avec 10% de fumier et dans le sol C2 avec 20% de fumier avec un volume de 4,5ml. Dans les sols C0 sans fumier et le sol C3 avec 30% de fumier, des volumes respectifs de 4,3 et 4,2ml ont été obtenus.

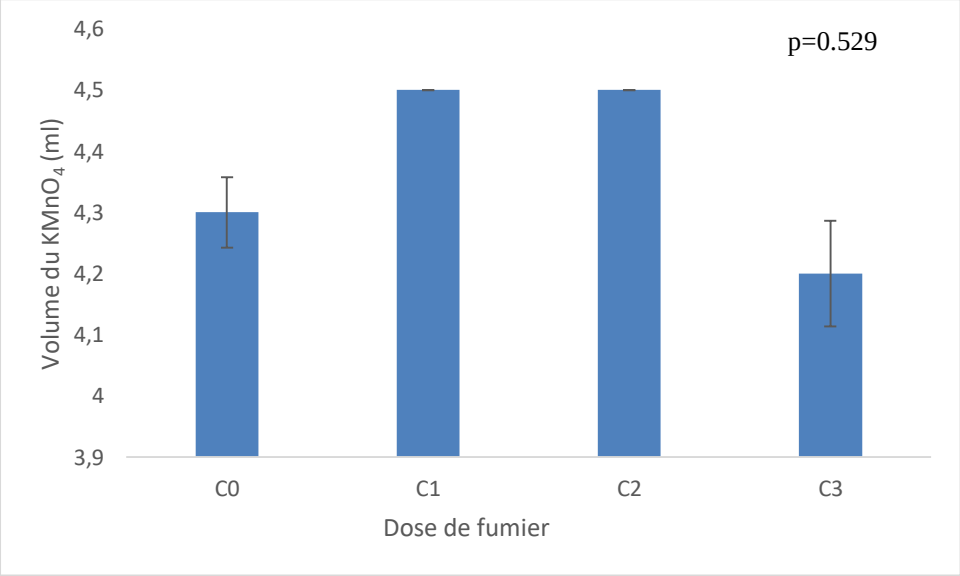

Figure 13 : activité de la catalase dans les sols amendés avec les différentes doses de fumier.

Le test de Kruskal-Wallis a donné une p-value de 0,5296 qui indique que les différences ne sont pas significatives entre les différentes doses de fumier (annexe 6).

2. Discussion

Notre étude sur l'efficacité des doses de fumier dans l'accélération du processus du compostage des sols pollués aux carburants a montré que l'ajout de cet engrais organique, toutes doses confondues, a permis une bonne germination des graines de maïs, ce qui signifie que la toxicité a diminué dans les sols pollués. 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 de plus de 95% des graines.

Les résultats de la croissance racinaire et caulinaire montrent que la dose de fumier n'a eu aucune influence sur ces paramètres.

Les taux de germination obtenus (proches des 100%) et la bonne croissance des tiges et des racines seraient dus aux bonnes conditions de germination dans tous les sols.

En effet, Eghaball (1999) note que l'utilisation de fumier composté et de fumier de bovin sont d'excellentes sources d'éléments nutritifs, ils contiennent 25% de matière organique qui peut être utilisée pour améliorer les propriétés physiques et chimiques du sol.

Concernant le test de toxicité aigüe sur les vers de terre, aucune mortalité n'a été enregistrée à la fin de l'expérience, ce qui indique que le sol a été détoxifié.

L'absence de différences avec le témoin peut être expliquée par le fait que le sol n'ayant pas été amendé avec le fumier a quand même subi un traitement par compostage. En effet, ce sol a été enrichi avec la sciure de bois, arrosé et retourné régulièrement, ce qui aurait eu comme effet la dégradation d'une fraction des polluants. L'application du compostage comme alternative de traitement pour les sols contaminés par l'industrie semble être une bonne solution. Lin et al.(2022) ont montré l'efficacité du compostage dans la dégradation des contaminants organiques.

Dans l'étude de l'activité biologique, le dégagement de CO_2 a été observé dans tous les sols traités avec une respiration plus intense dans les sols traités avec 20 et 30% de fumier de bovin. Les valeurs obtenues avec la dose de 10% sont similaires à celles du témoin. Donc, plus on augmente la dose du fumier plus les microorganismes qui vivent dans le sol sont actifs. Ceci concorde avec les observations faites par Maliszewska-Kordybach et Smreczak (2003).

Quant à l'activité enzymatique du sol, les résultats montrent qu'il n'y a pas eu d'effet significatif de la dose sur la catalase. Le même constat a été fait par Khan et Anjaneyulu (2006) et Mohsenzadeh et al. (2012).

Conclusion générale

Notre travail a porté sur l'effet de différentes doses de fumier sur l'efficacité du compostage d'un sol pollué aux carburants.

Au vu des résultats obtenus, l'ajout du fumier lors du compostage a amélioré la qualité du sol et réduit sa toxicité.

Les graines de maïs ont eu une bonne germination dans le sol, quelle que soit la dose de fumier appliquée. Dans le même sens, le test de toxicité aigüe sur les vers de terre n'a donné aucune mortalité. Ceci indique une bonne efficacité de la décontamination.

L'efficacité a été meilleure avec la dose 30% du fumier, ceci s'observe clairement dans les résultats de l'activité biologique. Le dégagement de CO_2 a été intense dans tous les sols traités avec différentes doses de l'ajout du fumier de bovin, avec une activité significativement plus élevée dans les sols ayant reçu les doses de fumier les plus élevées (20 et 30%)

Pour ce qui est de l'activité de la catalase et de la croissance des plantules de maïs, aucune différence significative n'a été observée entre les différentes doses de fumier.

Il serait intéressant de proposer quelques perspectives de recherche telles que :

- Faire une optimisation pour déterminer la dose optimale de fumier.
- Réaliser des essais sur les durées plus longues pour déceler l'efficacité des ajouts de fumier.
- Effectuer des essais dans des composteurs de grande taille pour une meilleure efficacité.

Références bibliographiques

A

- **Amrit M., Minakshi K., Debashis D., R.P. Mishra. 2021** : Composting: Phases and Factors Responsible for Efficient and Improved Composting. Agriculture and Food : E. Newsletter. Quality. Vol 3. N°1. pp : 85-90.
- **Ali Ahmed S., 2022 :** Optimisation de quelques techniques de décontamination de sols pollués aux hydrocarbures. Réalisation de bio-essais. Thèse de Doctorat Es Science. UMMTO. 114 p.

B

- **Bianchi M., Marty D., Bertrand J.C., Caumette P. et Gauthier, M.J**. Microorganismes dans les écosystèmes océaniques. Ed. Masson. Paris. Chapitre 13 : 343-385.
- **Bliefert C., Perraud R., 2001 :** Chimie de l'environnement ; Air, Eau, Sols, Déchets. 1ère edt De Boeck Université. 477p.
- **Bromblet H., Somaroo G., 2015 :** Analyse synthétique des retours d'expérience sur les techniques de compostage dans les pays en développement. Déchets Sciences et Techniques N°70. pp : 19-28.
- **Boukrou A., Nait Si Ahmed L., 2022 :** Effet des ajouts organiques sur l'efficacité de la décontamination d'un sol pollué aux carburants par compostage. Mémoire du master UMMTO. 30 p.
- **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.

C

- **Chaineau C.H., Morel J.L., Oudot J., 1996** : Land treatement of oil based drill cuttings in an agricultural soil. Journal of Environmental. Quality. Vol. 25. N°4. pp : 858-867.
- **Chaineau CH., Morel J. L., Oudot J,. 1997** : Phytotoxicity and Plant Uptake of Fuel Oil Hydrocarbons. Journal of Encironmental. Quality. Vol. 25. N°4. pp : 1478-1483.
- **Chaineau CH., Morel J.L., Oudot J,.1995** : Microbial Degradation in Soil Microcosms of Fuel Oil Hydrocarbons from Drilling Cuttings. Journal of environmental science and technology. Vol. 29. N°6. pp : 1615-1621.
- **Colin F. 2000** : pollution localisées des sols et sous-sol par les hydrocarbures et les solvants chlorés. Rapport N° 44, Edition, Tech et doc. Paris. p 417.

- **Colombano S., Saada A., Guerin V., Bataillard P., Bellenfant G., Beranger S., Hubed D., Belan C., Zornig C., Girardeau I. 2010**. Quelles techniques pour quels traitements-analyse coûts bénéfices. Rapport final BRGM/RP-5860-FR. 399p.

D

- **Dabin B., Segalen P. 1970** : Le sol, sa définition, ses constitutions. Techniques rurales en Afrique. Ovaty-Paris. N°06. 42p.

E

- **Eghball B., 1999** : Liming Effects of Beef Cattle Feedlot Manure or Compost. Departement of Agronomy and USDA-ARS. University of Nebraska-Lincoln, NE. Commn. Soil. Science plant anal, Vol.30 N°19 and 20. pp : 2563-2570.
- **Eyheraguibel B., 2004 :** caracterisation des substances humiques biommetiques- Effets les vegetaux. Thèse de doctorat sciences des Agroressources. Université Toulouse 7.

F

- **François P., Keerchove V., Macary H. 2022 : G**uide de la fertilisation organique à la Réunion. Fiche Matière organiques fumier de bovin.

I

- **Inckel M., Smet P., Termette T., Veldkamp T., 2005 :** la fabrication et l'utilisation du compost. Série Agrododok N°8. 71 p.

G

- **Gatelleur C., Gudin C., Rogier Ph. 1974** : Conséquences d'un déversement d'hydrocarbures dans le sol et technique applicables à une réhabilitation.
- **Guermazi W. 2017** : cours de Pollution et nuisances. Université de Gabes. 27 p.
- **Guibet J. 1997** : Carburants et Moteurs. Edition TECHNIP. Paris 1997. 22 p.

H

- **Houot S., 2005** : Stabilisation des matières organiques au cours du compostage : lien avec les effets observés. Séminaire Sols, 10 février 2005, Centre Armoricain de Recherche en Environnement, 59 p.

K

- **Koller E. 2009** : traitement de pollutions industrielles. Eau, Air, Déchets, Sol, Boues. Edition Dunod. Paris. Série Environnement et sécurité. 366 p.
- **Khan Z**., Anjaneyulu., 2006 : Bioremediation of contaminated Soil and sediment by composting. Remedation DOI : 10.1002. rem.

L

- **Laroche B., et Nicolas B. 2012 :** Compostage : principe. Matière Organique. Fiche N°04. Agriculture et territoires.

M

- **Maliszewska-Kordybach B., Smreczak B., 2003** : Habitat function of agricultural soils as affected by heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons contamination. Environment International. Soil Science and Land Reclamation Department, Institute of Soil Science and Plant Cultivation, ul Czartoryskich 8, 24-100 Pulawy, Poland. pp : 719-78.
- **Misra R.V., Hiraoka R.N., Roy H., 2005** : Méthodes de compostage au niveau de l'exploitation agricole. Document de travail sur les terres et les eaux. Organisation des nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. Rome 2005. 35 p.
- **Martin H., 2005 :** Introduction au compostage agricole. Fiches techniques du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario. Les ressources du monde entier au service de l'Ontario rural. N°05.
- **Mohsenzadeh F., Chehregani Rad A., Akbari M., 2012 :** Evaluation of oil removal efficiency and enzymatic activity in some fungal strains for bioremediation of petroleum-polluted soils. Journal of Environmental Health Sciences and Engineering. V.26. N°9. 8p.

N

- **Noel M-O., 2012** : Les risques pour la biodiversité de l'exploitation des gaz de schiste dans la vallée du Saint-Laurent. Maitrise en Science de l'environnement. Université au Québec Montéral. 92 p.

O

- **Olivier P., François J. 2014 :** Revue de littérature sur les impacts environnementaux du développement des hydrocarbures au Québec. Rapport soumis par : Bureau de la recherche et centre de développement technologique (B.R.C.D.T.) école polytechnique de Montréal.

R

- **Rhbal H., Souabi S., Safi M., Terta M., Arad M., Anouzla A., Hafidi M., 2020 :** Décontamination des sols pollues par les hydrocarbures. Scientific Study & Research Chemistry & Chemical Engineering, Biotechnology, Food Industry. University of Bacău. pp : 1-16.

- **Roudier P., 2005 :** Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués. Fiche de synthèse de techniques de l'ingénieure. Gestion des sites et sols pollués. 40 p.

S

- **Saada A., Nowak C., et Mossmann J.R. 2003** : Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle : mécanismes et mise en œuvre. Rapport final BRGM/RP-51960-FR. p 77.
- **Saada A., Nowak C., et Coquereau N. 2005** : Etats des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. Rapport intermédiaire. Résultats de la phase 1. Rapport BRGM/RP-53739. FR. 107P.
- **Sai T., Tighrin T,. 2021 :** Essai de la décontamination d'un sol pollué aux carburants par compostage en utilisant des boues activées. Mémoire de master. Université Mouloud Mammeri TO. 28 p.

T

- **Tangara T., Élevage., Cnra., Mali. 2012** : Technique du compostage. Fiche technique. Japan International Research Center for Agricultural Sciences. 15p.
- **Thavasi R**., Jayalaskshim S., M. Banat I. 2011 : application of biosurfactant produced from peanut oil cake by lactobacillus debhruechii in biodégradation of crude oil. Journale of bioresource technology.pp : 3366-3772.

Annexes

Annexe 1 : test de germination des graines de maïs.

```
> leveneTest(TG~trt)
Levene's Test for Homogeneity of Variance (c
      Df F value Pr(>F)
group  3  0.3333 0.8018
       8
```

Annexe 2 : test d'élongation de tige (aérienne).

```
Analysis of Variance Table

Response: CA
          Df  Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
trt        3  4.1964  1.3988   0.663 0.5977
Residuals  8 16.8786  2.1098
>
```

Annexe 3 : test de croissance racinaire.

```
> anova(reg.aovl)
Analysis of Variance Table

Response: CR
          Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
trt        3  5.909  1.9698  0.4005 0.7566
Residuals  8 39.346  4.9182
```

Annexe 4 : test du l'ANOVA de l'activité biologique (respiromitrique)

```
Response: ABG
          Df  Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
trt        3 2476.87  825.62  30.046 0.0001051 ***
Residuals  8  219.83   27.48
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Annexe 5 : groupe homogène de l'activité biologique

```
$groups
         ABG groups
C3 44.34667      a
C2 41.43333      a
C0 18.26000     ab
C1 10.92667      b
```

Annexe 6 : test du Kruskal et Wallis de l'activité du la catalase

```
> kruskal.test(CAT~trt)

        Kruskal-Wallis rank sum test

data:  CAT by trt
Kruskal-Wallis chi-squared = 2.2121, df = 3, p-value = 0.5296
```

Résumé

Le présent travail a pour objectif de tester l'effet de différentes doses de fumier sur l'efficacité de la décontamination, par compostage, d'un sol pollué aux carburants prélevé dans une station-service.

Les résultats obtenus montrent que toutes les doses de fumier testées ont donné une bonne germination des graines de maïs, indiquant une réduction de la toxicité dans le sol. Ceci est confirmé par l'absence de mortalité des vers de terre dans tous les traitements. Aucune différence de l'élongation racinaire, de la croissance caulinaire et de l'activité de la catalase n'a été observée. Cependant, la respiration microbienne du sol a été plus intense dans les sols amendés avec 20 et 30% de fumier. Ce qui laisse supposer que les doses de fumier les plus élevées décontaminent mieux le sol.

Mots clés : sol, carburants, compostage, doses de fumier

Abstract

The aim of this work was to test the effect of different doses of manure on the effectiveness of decontamination, by composting, of fuel-polluted soil taken from a gas station.

The results showed that all the tested doses of manure improved the germination of maize seeds, indicating a reduction in soil toxicity. This was confirmed by the absence of earthworm mortality in all treatments. No differences in roots and stem growth and catalase activity were observed. However, soil microbial respiration was higher in the soils amended with 20 and 30% manure. This suggests that the higher doses of manure decontaminate the soil more effectively.

Key words: soil, fuels, composting, manure doses