



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des sciences exactes et des sciences de la nature et de la vie
Département des sciences de la nature et de la vie
Filière : Sciences biologiques

Référence / 2024

MÉMOIRE DE MASTER

Spécialité : Biochimie Appliquée

Présenté et soutenu par :
Smatti Fatma Zohra et Tarfaya Ilhem

Le : lundi 10 juin 2024

Contribution à l'étude de la Biodégradation des hydrocarbures par le processus Phytoremédiation

Jury :

Dr.	BENAMEUR Nassima	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Mme.	MERZOUGUI Imene	MCB	Université de Biskra	Président
Mme.	BENABDALLAH Fatima zohra	MCA	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2023-2024

Remerciement

*Nous tenons tout d'abord, à remercier Dieu le tout puissant pour nous avoir donné
santé, force, courage et volonté de continuer nos études et de mener à bien ce
Modeste travail.*

*Nos vifs et sincères remerciements vont à Mme Benameur Nassima, pour avoir accepté
d'encadrer ce travail, malgré
ses multiples occupations, pour ses grandes qualités humaines et professionnelles,
qui lui valent le respect et auxquels nous sommes très sensibles. Merci madame pour
votre grande gentillesse et votre disponibilité.*

*Nous remercions vivement l'ensemble de nos enseignants au sein du département
Des sciences BIOLOGIE.*

Dédicaces

*À mon père **Abdessamed***

Ce mémoire est une façon de te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi.

Tu m'as toujours appris à être curieux, à poser des questions et à chercher des réponses.

Tu m'as ouvert l'esprit au monde et m'as donné le goût de la connaissance.

*A ma mère **yamina***

Ce mémoire est le fruit de ton soutien indéfectible.

Tu m'as toujours encouragée, même lorsque les choses étaient difficiles.

Tu m'as appris le sens du travail, de la rigueur et de la persévérance.

A mes chères soeurs, **Djihad**

A mes chers frères **Idrisse** , **Abd el moaze** et **Mohamed**

A tous les famille **smatti**

A ma binôme **Ilhem** et sa famille.

A mes amies

A tout la promotion de biologie 2024_2023. A tous les enseignants(e) et les étudiants(e)

Je dédie ce projet

A mon cher père, **Noureddine**

L'homme de ma vie, pour son soutien, son encouragement et ses sacrifices

A ma chère mère, **Nadia**

La lumière de mes jours, source de vie, d'amour et d'affection.

Eux qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes chères soeurs, **Omaïma** et **Tasnim**

A mes chers frères **Moussa** , **Youcef** et **Adem**

A tous les familles: **Tarfaya** et **Djablahi**

A ma binôme **Fatima** et sa famille.

A mes amies *fatima el-zahra menacer, bourase soumia,salem hind ,mrabate hanin ,ZINAB RACHAM ET RIMA RAHALE*

A tout la promotion de biologie2024_2023. A tous les enseignants(e) et les étudiants(e)

Table de matières

Remerciement	2
Dédicaces	3
Table de matières.....	I
Liste des tableaux	III
Liste des figures	IV
Liste des abréviations	V
Introduction.....	V
Partie bibliographique.....	3
Chapitre 1	4
Hydrocarbures	4
I.1 Définition des hydrocarbures	5
I.2 Origine des hydrocarbures :	5
I.3 Sources d'hydrocarbures dans le sol.....	6
I.5 Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures.....	7
I.6 Devenir des hydrocarbures dans l'environnement	7
1.7 Impact des hydrocarbures sur l'environnement	8
Chapitre 2. Phytoremédiation	9
II.4.2.2 Définition phytoremédiation	10
II.2 Les mécanismes de la phytoremédiation	10
II.3 Avantage	12
II.4 Inconvénients de la phytoremédiation	12
Partie expérimentale synthétique	13
Chapitre 3 Matériel et Méthodes synthétique	14
3.1. Matériel et méthodes de la première expérience	15
3.2 Matériel et méthodes Deuxième expérience	17
3.3 Matériel et méthodes de la Troisième expérience	18
3.4 Matériel et méthodes Quatrième expérience	19
3.5 Matériel et méthode cinquième expérience	19
3.6 Matériel et méthodes de la sixième expérience	20

3.7 Matériel et méthode septième experience	21
3.8. Matériel et méthode de la huitième	22
3.9 Matériel et méthode neuvième experience.....	23
3.10 Matériel et méthodes de la dixième expérience	24
3.11 Matériel et méthode de la onzième expérience	26
3.12 Matériel et méthodes de la Douzième expérience	27
3.13 Matériel et méthodes de la Treizième expérience	29
3.14 Matériel et méthodes de la quatorzième expérience	30
3.15 Matériel et méthode de la quinzième expérience	31
Chapitre 4 Résultats et discussions Synthétique	33
4.1 Résultats et Discussion de la première expérience	34
4.2 Résultats et discision de deuxième expérience.....	34
4.3. Résultats et discussion de la Troisième expérience	35
4.4 .Résultats et discussions de la Quatrième expérience	35
4.5 Résultats et discussions de cinquième expérience.....	36
4.6 Résultats et discussions de la sixième expérience	37
4.7 Résultats et discussions de la septième expérience	37
4.8. Résultats et discussions de la huitième expérience.....	38
4.9. Résultats et discussion de la neuvième expérience.....	40
4.10 Résultats et discussion de la dixième expérience	41
4.11 Résultat et discussion de l'onzième expérience	43
4.12 Résultat et discussion de la Douzième expérience	44
4.13 Résultat et discussion de Treizième expérience	46
4.14 Résultat et discussion de la quatorzième expérience	48
4.15 Résultat et discussion de la quinzième expérience	49
Conclusion Générale	54
Bibliographie.....	57
BIBLIOGRAPHIE	58
ANNEXE	64
Les resumés.....	71

Liste des tableaux

Tableau 1 Coefficient de corrélation entre les activités enzymatiques et l'élimination des HAP efficients	65
Tableau 2 Caractérisation physico-chimique du sol	65
Tableau 3 Taux de croissance estimé de huit espèces de plantes cultivées dans le sol témoin et amendé en HF (HF1, HF2) pendant douze semaines.	66
Tableau 4 L'efficacité de l'élimination du mazout lourd (%) après 45 et 90 jours dans les cas de contamination par HF(HF1—2,5 g kg ⁻¹ , HF2—4 g kg ⁻¹) le sol, où huit espèces végétales (P.vulgaris (PV), G. orientalis (GO), O. viicifolia (OV), L. culinaris (LEC), L. corniculatus (LC), M. sativa (MS), M. albus (MA), P. sativum (PS)) ont grandi.	66
Tableau 5 Biomasse e fraîche et sèche (g) des parties aériennes et des racines de Cannabis sativa L. après 50 jours de phytoremédiation dans les PC1, PC2 et PC3 (c.-à-d. 100, 200 et 300 mg ΣHAPs kg ⁻¹). Les valeurs obtenues sont le moyen de trois analyses répétées et le RSD (écarts-types résiduels)	67
Tableau 6 Survie et biomasses sèches de <i>Helichrysum microphyllum subsp. Tyrrhenicum</i> à la fin de la essai en serre.	67
Tableau 7 Panicum maximum variables recorded at the beginning and 112 days of bioremediation in the BIO treatment	68
Tableau 8 Caractéristiques physico-chimiques des sols expérimentaux (0–20 cm), y compris pH, sable, limon, argile, densité en vrac (BD), organique Matière (MO), azote total (N total), phosphore disponible (disponibleP), potassium échangeable (K échangeable), cadmium et total Hydrocarbures pétroliers (TPHs)	68
Tableau 9 Effets des exsudats racinaires sur la biomasse des racines et des tiges foliaires de Sorghum sudanense sous différents types de sol (g)	69
Tableau 10 Propriétés physicochimiques du sol utilisé pour l'expérience	70
Tableau 11 Caractéristiques du site d'échantillonnage et de la concentration des HPT-IR.....	70

Liste des figures

Figure 1 Processus physico-chimique et biologique affectant le devenir des hydrocarbures pétroliers au sein de la colonne d'eau et des sédiments	8
Figure 2 : Différents mécanismes de la phytoremédiation des sols.....	11

Liste des abréviations

ACC : -aminocyclopropane-1-carboxylic acid (Acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique)

AMF : champignons mycorhiziens à arbuscules

AHM : hydrocarbures aromatiques monocycliques

BCF : facteur de bioconcentration

BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes

CAT : catalase

CE : Conductivité électrique

DHP : dehydrogenase

GARD : substrat de jardin commercial

GC : Gas chromatography (Chromatographie en phase gazeuse)

GC-MS : Chromatographie en phase gazeuse couplée à spectromètre de masse

GSH : glutathion réduit

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

HF : *P. lilacinum*

HF: heavy fuel oil (mazout lourd)

HQ : *P. chrysogenum*

IAA : d'acide indole-3-acétique

MDA : malondialdéhyde

NA : Natural attenuation (atténuation naturelle)

OBDCs: oil-based drill cuttings

P : Phytoremediation (phytoremédiation)

PE : *Laroidoglomus etunicatum*

PGPR : Plant growth-promoting rhizobacteria

Phe: Phénanthrène

PI : Rhizophagus intraradices (Traitements de remédiation intraradices)

PM: plant-*Funneliformis mosseae*

PPO: polyphenol oxidase

PYR : pyrène

SUA : sucrase

TI : taux de tolérance

TPH : total petroleum hydrocarbons (Les hydrocarbures pétroliers totaux).

UNAM : substrat contaminé sans amendement,

WCAM : contaminé substrat modifié avec des copeaux de bois

Introduction

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont des composés organiques composés de deux anneaux aromatiques fusionnés ou plus, émis principalement par combustion incomplète et combustion de déchets agricoles. L'exposition humaine aux HAP peut se produire par inhalation, exposition cutanée ou contamination alimentaire. La recherche indique que les HAP dans l'air ambiant augmentent l'incidence du cancer, avec des associations positives signalées pour le cancer du sein, et du poumon. Les études épidémiologiques montrent une fonction pulmonaire réduite, une exacerbation de l'asthme et une augmentation des taux de maladies pulmonaires obstructives et de maladies cardiovasculaires (Europe, 2021).

Les hydrocarbures de pétrole (PHC) sont classés parmi les polluants les plus courants et les plus répandus dans l'environnement urbain et industriel. Après une libération des installations de confinement, ces mélanges complexes de composés organiques peuvent être trouvés sous forme de liquides de phase non aqueuse (NAPL) dans la sous-surface, où ils peuvent agir comme une source persistante de contamination des sols et des systèmes d'eau souterraine. Les combustibles pétroliers courants tels que l'essence (essence), le diesel et les carburants jet de type pétrole sont plus légers que les NAPL d'eau (LNAPLs) (García-Rincón et al., 2024).

Cette recherche synthétique apporte-t-elle une contribution à l'étude de la biodégradation des hydrocarbures par la méthode de phytoremédiation, aboutissant à des résultats prometteurs qui pourraient avoir des applications potentielles dans le futur ?

On préposer des solutions pour remédier les polluant des hydrocarbures a travers les techniques biologiques phytoremédiation et biodégradation.

La phytoremediation est une technologie de réparation utilisée depuis au moins les années 1980 pour dégrader, extraire, contenir ou immobiliser des contaminants provenant du sol et d'autres sources en utilisant des plantes (Landmeyer, 2012). La phytoremédiation traite efficacement les contaminants, en particulier les PHC, avec des décennies récentes où l'utilisation a augmenté en raison des apparences naturelles, des alignements des espèces végétales et des structures de suivi. Cette caractéristique est un autre avantage de cette méthode : elle préserve l'aspect esthétique de l'environnement naturel et peut même réduire le volume de récupération nécessaire après la réhabilitation. La phytoremediation efficace des PHCs se fait généralement à travers différents mécanismes, qui peuvent se produire simultanément (García-Rincón et al., 2024)

L'importance de la recherche réside dans sa contribution à l'étude de la biodégradation des hydrocarbures par phytoremédiation. Ceci est réalisé en menant diverses expériences visant à éliminer les hydrocarbures à l'aide de communautés bactériennes, telles que les genres de consortium, *Bacillus subtilis*, AMF et PGRP par inoculation bactérienne pour remédier à la contamination des sols. Les plantes appartenant aux familles des fabacées, des cannabacées, des poacées et des saules sont utilisées dans les processus de phytoremédiation. Différents types de sols, notamment sableux, limoneux et argileux, ont démontré leur capacité à assainir les hydrocarbures, le diesel, les métaux lourds et le cadmium. Certains tests ont été réalisés sur des sites contaminés, tandis que d'autres ont été réalisés en laboratoire pendant des périodes spécifiques.

Cette recherche vise à examiner le potentiel et les limites des espèces végétales et inoculation communautés bactériennes utilisées en phytoremédiation, une technologie peu coûteuse, respectueuse de l'environnement et rentable pour nettoyer les sols contaminés par les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

Pour ce faire, nous avons établi les objectifs suivants :

- 1) Nous avons passé en revue et examiner un certain nombre d'études qui ont mené diverses expériences sur des biodégradations des hydrocarbures par processus phytoremédiation
- 2) Nous comparons tous les résultats entre eux pour arriver à une conclusion sur la nature du Hydrocarbures, ses composants, ses concentrations, et son effet sur la plante et la phytoremédiation autant qu'une techniques viable pour remédier le degré de déversoir de Hydrocarbures polluée au milieu naturel.

Dans cette recherche synthétique, nous avons regroupé 15 études réparties en 4 chapitres. Le premier chapitre porte sur les définitions des hydrocarbures et leur nature, tandis que le deuxième chapitre aborde la phytoremédiation ainsi que les techniques de remédiation. Les troisième et le quatrième chapitre présentent le matériau et les méthodes utilisés, ainsi que la synthèse des résultats et la discussion des études sélectionnées.

Partie bibliographique

Chapitre 1

Hydrocarbures

I.1 Définition des hydrocarbures

Un hydrocarbure est tout composé chimique constitué uniquement d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). Ils contiennent tous une chaîne carbonée et ont des atomes H attachés à la chaîne. La plupart des hydrocarbures sont combustibles (Benguenab, 2022)

L'hydrocarbure de pétrole (HCP) est un terme générique désignant les mélanges de composés organiques présents dans des matériaux géologiques tels que le pétrole, le bitume, le charbon ou leurs dérivés. Ce terme désigne les composés organiques présents dans divers matériaux géologiques, notamment le pétrole, le bitume, le charbon et leurs dérivés. (Liu, Wang, Chen, et al., 2023)

I.2 Origine des hydrocarbures :**I.2.1 Origine biotique des hydrocarbures :**

Les hydrocarbures de la formation de Montney sont principalement dérivés de matières organiques qui ont migré et transformé sous l'effet d'une maturité thermique croissante, ce qui indique une origine biotique. (Watt et al., 2022)

La présence de pyrobitume et d'huile liquide dans les gisements aurifères de type Carlin suggère que les hydrocarbures ont joué un rôle essentiel dans le processus de minéralisation, avec des fissures d'huile liquide se produisant pendant le Trias supérieur. (Ge et al., 2021)

I.2.2 Origine abiotique des hydrocarbures :

La dégradation à haute température de la matière organique dans les systèmes volcan hydrothermaux peut produire des hydrocarbures qui imitent les signatures isotopiques abiotiques, ce qui suggère que de nombreux hydrocarbures que l'on pensait être abiotiques peuvent en fait être d'origine biotique. (Fiebig et al., 2019)

Les systèmes hydrothermaux peuvent synthétiser des hydrocarbures à longue chaîne (jusqu'à C₂₄) grâce à la réduction du bicarbonate à l'aide de métaux de fer et de cobalt, soutenant la théorie de la formation d'hydrocarbures abiogènes dans les systèmes hydrothermaux alcalins naturels. (D. He et al., 2021)

I.3 Sources d'hydrocarbures dans le sol

I.3.1 Sources naturelles

comprennent la décomposition de la matière organique, les feux de forêt et les activités volcaniques, qui contribuent à la présence d'hydrocarbures dans l'environnement Sources anthropiques (Ilić et al., 2021)

Les activités anthropiques telles que l'industrie, l'utilisation du pétrole et de ses dérivés (gasoil, diesel, et kérosène) ainsi que la combustion incomplètes des combustibles fossiles sont à l'origine de l'accumulation des hydrocarbures dans l'environnement (Peixoto et al., 2011)

I.4 Classification des hydrocarbures

Les hydrocarbures peuvent être classés en deux groupes principaux :

I.4.1 Les hydrocarbures aliphatiques :

Les hydrocarbures aliphatiques, ou paraffines, sont abondants dans les dépôts de pétrole et de gaz naturel et sont constitués de structures linéaires ou cycliques (Varjani, 2017) .

Ils manquent de liens doubles et possèdent une faible polarité, ce qui entraîne une solubilité et une réactivité minimales en eau à température ambiante (Pandolfo et al., 2023)

Les hydrocarbures aliphatiques insaturés Ils comprennent les alcènes de formule générale C_nH_{2n} , portant une double liaison et les alcynes de formule générale C_nH_{2n-2} avec une triple liaison (Oultaf, 2015) .

I.4.2 Hydrocarbures aromatiques :

Qui comprennent à la fois les hydrocarbures aromatiques monocycliques (AHM) et (PAHs)

I.4.2.1 Hydrocarbures aromatiques monocycliques (AHM) :

D'autre part, les hydrocarbures aromatiques comprennent des composés avec des anneaux de benzène, subdivisés en (MAHs) comme le BTEX (xylène, benzène, ethylbenzène et toluène) et (PAHs). Ces hydrocarbures présentent différents niveaux d'aromatisme en raison de leurs structures en anneau de benzène (Alaidaroos, 2023).

I.4.2.2 Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs) :

Les PAH, résultant de processus biologiques ou de combustion incomplète, qu'ils soient naturels ou induits par l'homme (par exemple, émissions de véhicules), sont des polluants organiques lipophiles de préoccupation environnementale substantielle du fait de leur présence omniprésente dans l'air, le sol et l'eau et de leurs effets néfastes sur la santé humaine et les écosystèmes.(Alaidarros, 2023)

I.5 Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures**I.5.1 Viscosité :**

C'est une information sur la résistance à l'écoulement, plus la viscosité est faible, plus le déplacement de polluant sera rapide. Elle influe donc sur la mobilité de polluant et l'infiltration dans le sol.

I.5.2 Solubilité :

La solubilité est un indicateur sur la tendance de composé à se dissoudre. Les hydrocarbures sont entraînés par les eaux dans le sol, ils sont faiblement solubles dans l'eau, mais ceux qui sont solubles sont les plus dangereux pour l'environnement (Chaineau & Morel J.L., Oudot J, 2000).

I.5.3 Pression de vapeur :

La pression de vapeur est un indicateur sur la tendance de composé à s'évaporer.

I.5.4 Densité :

La densité est un indicateur sur la tendance de composé à flotter, dans la zone saturée les hydrocarbures se flottent au-dessous de la nappe si leurs densités sont supérieures à celle de l'eau, où bien au-dessus si leurs densités inférieures à celle de l'eau.

I.5.5 Teneur en aromatique :

La teneur en aromatique est un indicateur sur la toxicité du produit.

I.6 Devenir des hydrocarbures dans l'environnement

La biodégradation est un processus naturel qui affecte les hydrocarbures par des modifications physiques et chimiques : évaporation, dispersion, émulsification, dissolution, oxydation (Photo oxydation) et sédimentation, Solubilisation, Biodégradation.

1.7 Impact des hydrocarbures sur l'environnement

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

Les impacts de la pollution par les hydrocarbures sont multiples. Les aspects les plus évidents sont les grandes catastrophes très médiatisées (SOLTANI, 2004).

Les sols contaminés par les hydrocarbures présentent un danger lors d'un contact direct avec l'homme ou l'animal ou indirecte lors de leur transfert dans la chaîne alimentaire. C'est le phénomène de bioaccumulation avec le piégeage par les végétaux et les animaux des polluants ou de leurs produits de dégradation jusqu'à des teneurs atteignant les seuils de toxicité (SOLTANI, 2004).

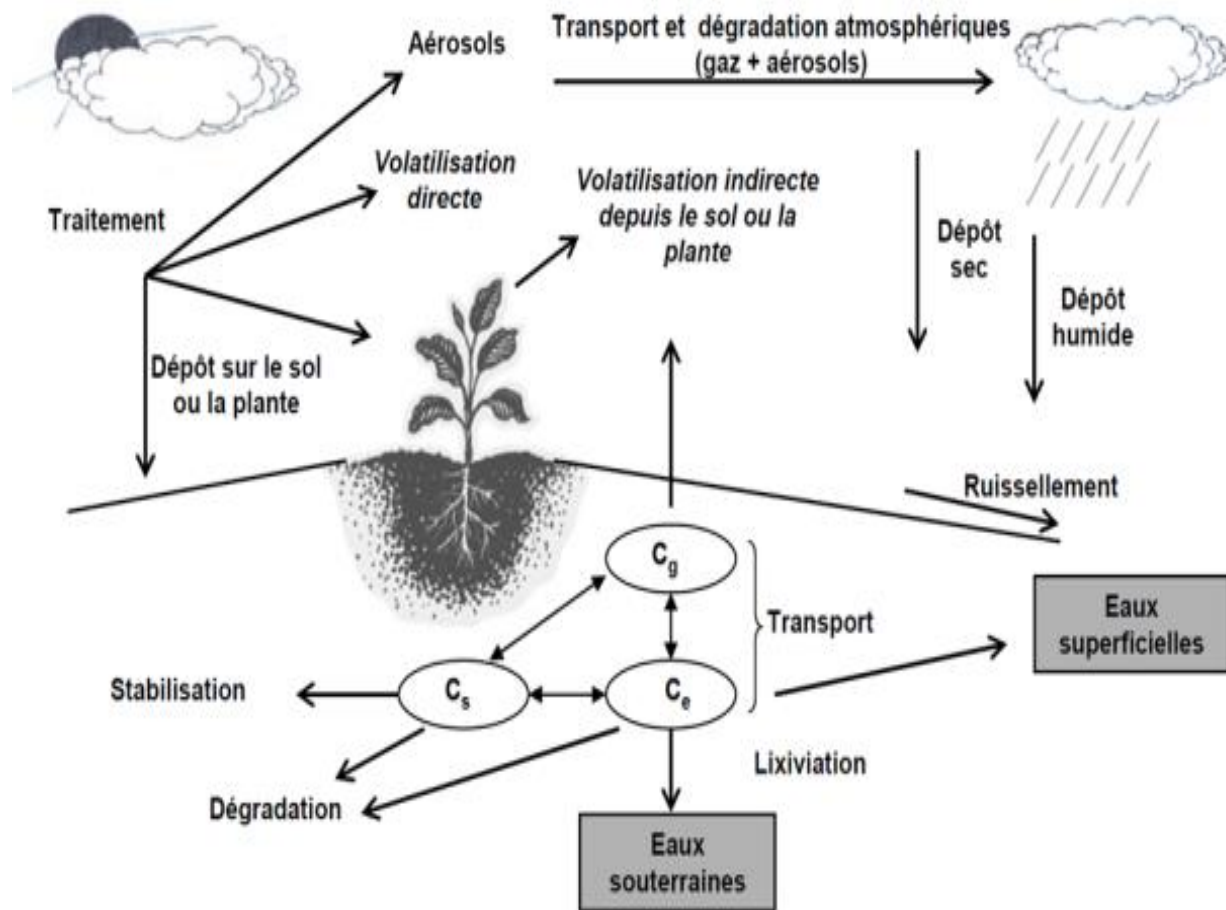


Figure 1 Processus physico-chimique et biologique affectant le devenir des hydrocarbures pétroliers au sein de la colonne d'eau et des sédiments (Miralles, 2007)

Chapitre 2.

Phytoremédiation

II.4.2.2 Définition phytoremédiation

Le terme phytoremédiation est composé de deux mots : phyto, qui signifie plante, et remédiation qui signifie remise en état affirme (Dechamps & Meerts, 2003).

Selon Origo et al (2012), La phytoremédiation est une biotechnique végétale basée sur la capacité des plantes à extraire ou à bloquer les polluants. Elle offre une réelle alternative, aussi bien écologique que paysagère et financière face aux techniques de dépollution traditionnelles pour aider à la réhabilitation des terrains contaminés.

D'autres façons c'est l'Ensemble de techniques de traitement des sols pollués utilisant les plantes et leur interactions avec les micro-organismes du sol pour bloquer, extraire, accumuler, transformer ou détruire les contaminants environnementaux. On distingue : phytostabilisations, phytovolatilisation, phytoextraction et phytodégradation (Baize, 2016).

II.2 Les mécanismes de la phytoremédiation

Plusieurs mécanismes permettent l'élimination des polluants par phytoremédiation (Bortoloti & Baron, 2022) d'après (figure 1).

II.2.1 Rhizofiltration

Adsorption et accumulation de contaminants dans la racine Phytoremédiation

II.2.2 Phytoextraction

Absorption des contaminants du sol à travers les racines et leur translocation & accumulation dans la biomasse au-dessus du sol

II.2.3 Phytostabilisation

Réduire la mobilité et la biodisponibilité des contaminants dans le sol par la formation complexe

II.2.4 Rhizodégradation

Dégradation et ourification par les racines des plantes.

II.2.5 Phytoévaporation

Absorption des contaminants du sol par les racines des plantes, transformation en forme volatile et réalise ultérieurement dans l'atmosphère

II.2.6 Phytodesalinisation

Élimination des sels excédentaires du sol salin par les plantes.

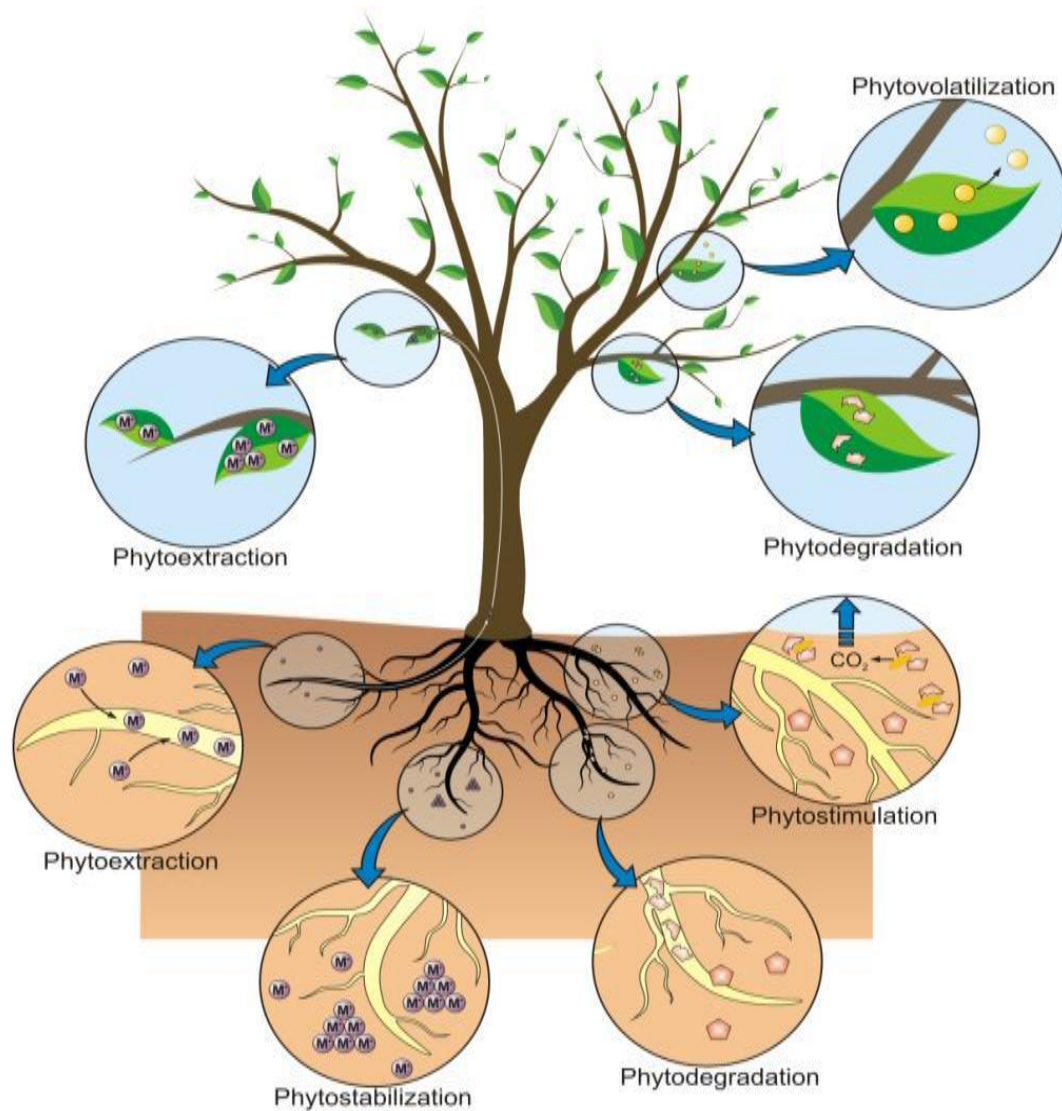


Figure 2 : Différents mécanismes de la phytoremédiation des sols (Alchimia, 2016).

II.3 Avantage

- La phytoremédiation est considérée comme une technologie prometteuse, rentable et respectueuse de l'environnement, basée sur des plantes capables d'éliminer, d'isoler et de stabiliser les polluants du sol par l'extraction et la dégradation (Chen et al., 2019) .
- La phytoremédiation garanti un couvert végétal qui participe à la beauté du paysage et qui freine l'érosion du sol et le lessivage des particules du sol tout en assurant une augmentation des infiltrations (Dechamps & Meerts, 2003). Ce couvert végétal permet de réduire le déplacement des polluants dans l'air, l'eau, ou le sol, puisqu' ils sont maintenus près ou dans les plantes (sauf dans le cas de la Phytovolatilisation).
- Avec la phytoremédiation, la remédiation du sol se fait en minimisant les perturbations de l'environnement et permet même parfois de relancer le cycle de dégradation de la matière organique dans des zones où la végétation est limitée vu la présence des métaux lourds qui altèrent la pédoflore et la pédofaune.
- La biodégradation semble être la plus rentable des technologies disponibles (Imron et al., 2020) .
- La phytoremédiation requiert moins d'équipement et de travail que d'autres méthodes puisque ce sont les plantes qui font l'essentiel du de travail (PILON-SMITS, 2005)

II.4 Inconvénients de la phytoremédiation

La phytoremédiation présente cependant des inconvénients non négligeables. Les plantes doivent être en contact avec le polluant pour pouvoir agir. Par conséquent, les propriétés du sol, les niveaux de toxicité et le climat doivent permettre la croissance des plantes envisagées. Si la toxicité est trop élevée, elle peut cependant être diminuée par dilution du sol avec des sols non contaminés mais cela augmente les coûts de mise en œuvre. De plus, les contaminants doivent être accessibles aux tissus absorbants. La phytodépollution est donc limitée par la profondeur des racines des plantes utilisées. Celles-ci peuvent atteindre 2 m de profondeur dans le cas des herbacées et plus de 5 m pour les arbres (NEGRI et al., 2003).

Partie expérimentale

synthétique

Chapitre 3

Matériel et Méthodes

synthétique

Chapitre 3 Matériel et Méthodes

Les biothérapies sont des méthodes biologiques utilisant des organismes vivants (bactéries, champignons, levures et plantes) pour décomposer les hydrocarbures. Ces stratégies peuvent aussi présenter des avantages. La méthode biologique de décontamination implique :

Pour accélérer la dégradation du polluant, il est nécessaire de stimuler un processus naturel qui sera utilisé comme source de carbone.

Exposer le dispositif expérimental de 15 études ainsi que les méthodes utilisées pour évaluer la biodégradation des hydrocarbures par phytoremédiation dans chacune d'elles.

3.1. Matériel et méthodes de la première expérience réalisée par Li et al., (2023)

3.1.1 Solvants et réactifs utilisés

Des solvants et réactifs de haute qualité avec une pureté supérieure à 98% ont été utilisés. Des composés HAP (phénanthrène, pyrène et benzo (α) pyrène) provenant de Sigma-Aldrich ont également été utilisés

3.1.2 Sol utilisé

Le sol provenait de la périphérie de Beijing, sans utilisation agricole, à une profondeur de 0-20 cm. C'était un sol brun-jaune courant dans le nord de la Chine. Avant l'expérience, le sol a été mélangé avec des composés HAP purs et les échantillons ont été mélangés après évaporation de l'acétone. Le sol pollué a été vieilli pendant 6 semaines et ses propriétés physico-chimiques et concentrations de HAP ont été mesurées.

3.1.3 Préparation de plantes et de champignons mycorhiziens arbusculaires

Les plants de *Salix viminalis* ont été préparés pour la phytoremédiation en utilisant des boutures provenant d'un clone de saule situé en Chine. Les boutures ont été placées dans de l'eau claire pour absorber l'eau, puis plantées dans des pots contenant un mélange de tourbe et de perlite. Les plantes ont été arrosées régulièrement et cultivées en serre pendant semaines. Des souches de champignons mycorhiziens à arbuscules (AMF) ont été achetées à une banque de germplas. L'inoculum commercial contenant les spores des champignons, les racines infectées et le mycélium a été conservé à -20 °C.

3.1.4 Expérience en pot

Des expériences d'assainissement des sols pollués par les HAP ont été menées dans une serre de recherche à une température de 20 à 28°C et à un cycle lumière/obscurité de 16/8 h. Les saules ont été utilisés dans les traitements P, PM, PE et PI.

3.1.5 Détermination des paramètres d'infection mycorhizienne

Le taux d'infection de l'AMF a été déterminé en blanchissant la racine primaire du saule avec de l'H₂O₂, en maintenant la soude à température ambiante pendant 30 minutes, en la rinçant à l'eau au moins trois fois, en ajoutant 1 % d'HCl et en l'acidifiant pendant 1h. Le taux d'infection a été calculé au microscope.

3.1.6 Analyse quantitative de la teneur en HAP

Le phénanthrène, le pyrène et le benzo(α) pyrène ont été extraits d'échantillons de sol par ultrasons et analysés par chromatographie en phase gazeuse.

3.1.7 Détermination de l'activité enzymatique du sol

Les activités enzymatiques du sol ont été examinées en utilisant le sol rhizosphérique de *S. viminalis*. L'activité de déshydrogénase du sol, l'activité de laccase du sol, l'activité de polyphénol oxydase du sol, l'activité d'uréase du sol et l'activité de catalase du sol ont été mesurées à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Vis T6.

3.1.8 Analyse des données

3.1.8.1 Analyse des données sur les HAP et les enzymes

Une analyse statistique a été réalisée avec GraphPad Prism v.9.0 pour étudier la relation entre les concentrations de HAP et l'activité enzymatique (corrélation de Pearson, $P < 0,05$).

3.1.8.2 Analyse des données sur les métabolites

Les métabolites ont été analysés avec R v.3.4.3, Python v.2.7.6 et CentOS 6.6. Les métabolites significativement différents entre les groupes de traitement ont été identifiés avec un score $VIP \geq 1,0$ et $P < 0,05$.

3.2 Matériel et méthodes Deuxième expérience réalisés par Y.-Y. Lee et al., (2023)

3.2.1 Préparation du sol

L'étude concernait la préparation du sol d'un jardin situé près de l'Université des femmes d'Ewha à Séoul, en Corée du Sud. Après avoir retiré les herbes et les pierres, le sol a été mélangé avec du compost (9,5:0,5, w/w) et analysé au National Instrumentation Center for Environmental Management (NICEM). On a ensuite contaminé le sol avec du diesel et des éléments lourds à des concentrations de 30,000 mg de hydrocarbures totaux de pétrole (TPH) par kg de sol, 500 mg de cuivre par kg de sol, 500 mg de plomb par kg de sol, et 20 mg de cadmium par kg de sol. Une solution aqueuse a été passée par un filtre stérile avant d'être utilisée.

3.2.2 Dispositif expérimental

Une expérimentation au pot a été réalisée sur des graines de fesses élevées dans un sol contaminé pendant 571 jours. Les graines ont été semées dans un sol non contaminé et cultivées pendant deux mois. Les échantillons de sol ont été prélevés à différentes profondeurs et analysés en utilisant la méthode d'analyse standard du sol coréen. Le pH, le contenu en eau et la teneur en matière organique du sol ont été mesurés. Les résultats ont montré une plage de 6,14–6,90, 26,2–47,7%, et 8,6–11,1%, respectivement..

3.2.3 analyse expérimental :

Des échantillons de sol et de plantes ont été recueillis pour mesurer les concentrations des métaux lourds biodisponibles. Le sol est séché au four et terrassé, tandis que les pousses et les racines sont séparées et lavées avec de l'eau du robinet. Les échantillons ont ensuite été extraits avec une solution de DTPA et centrifugés. Le supernatant a été filtré à travers un filtre à membrane.

3.2.4 Analyse de l'activité enzymatique du sol

L'étude a mesuré la production d'acide indole-3-acétique (IAA) et de siderophores dans le sol en utilisant l'analyse colorimétrique. On a fabriqué de l'IAA en ajoutant du phosphate buffer et une solution de L-tryptophan et de glucose à la terre séchée. On a observé la production de siderophores par les plantes et les bactéries dans le sol, et leur taux a été exprimé en $\mu\text{g-IAA}\cdot\text{g-dry soil}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$. On a mesuré l'absorbance à 535 nm en utilisant un spectromètre UV/Vis. On a analysé les résultats en utilisant une courbe standard et un spectromètre UV/Vis.

3.2.5 Analyse structurale de la communauté bactérienne

On a analysé la communauté bactérienne des échantillons de sol en utilisant la plateforme Illumina Miseq Sequencing, et les données de lecture de séquence ont été traitées par Macrogen Inc. à l'aide de QIIME 1.9, puis enregistrées dans l'archive de lecture de séquence de la NCBI sous le numéro d'accès SRP408331.

3.2.6 Analyse statistique

La normalité et l'homogénéité ont été testées et la variance des données, et on a effectué des tests t et des analyses de variance en une seule voie (ANOVAs). On a analysé les changements dans la structure de la communauté bactérienne pendant la période de phytoremédiation en utilisant une analyse de corrélation canonique (CCA) et une analyse de similarité locale approfondie (eLSA).

3.3 Matériel et méthodes de la Troisième expérience Réalisé par Urana et al., (2023)

3.3.1 Produits chimiques

Le produit chimique utilisé est le Naphtalène et phénanthrène (pour 99 % de pureté)

3.3.2 Sol

Le sol utilisé dans cette expérience a été recueilli dans la crèche de l'Université des sciences et de la technologie Guru Jambheshwar, Hisar, Haryana (Inde), et a été sculpté à l'aide d'un écran de 2 mm. Le sol était sablonneux dans la nature. Les caractéristiques du sol sont présentées dans le tableau 3 (voir tableau 3 dans l'annexe)

3.3.3 Experimentation en pot

Différentes concentrations de phénanthrène et de naphtalène ont été utilisées dans une expérimentation sur *Trigonelle foenum-graceum* (*Pusa Early Bunching-PEB*). La moitié des pots contenant du phénanthrène et du sol traité au naphtalène ont été remplis de PGPR

3.3.4 Extraction du PAH et analyse du GC

Le sol contaminé a été extrait à l'aide de toluène et soniqué à basse température. L'extrait a été analysé en utilisant la chromatographie gazeuse et un détecteur d'ionisation à flamme 98. Dans le processus d'injection, on a augmenté la température de la colonne, le temps de marche et le temps d'équilibrage.

3.4 Matériel et méthodes Quatrième expérience menée Selon Meištininkas et al.,(2023)

Pour Conception expérimentale Nous avons choisi huit espèces de légumes de la famille des *Fabaceae* pour réaliser un essai afin d'évaluer l'impact de la contamination par le heavy fuel oil (HF) sur la croissance des plantes. Le sol utilisé dans l'expérience a été prélevé d'un champ ouvert en Lituanie et présentait une composition en sable. On a contaminé le sol avec deux concentrations d'HF, de 2,5 g kg⁻¹ et de 4 g kg⁻¹. L'expérience a été réalisée dans une salle de croissance avec des conditions de température, de lumière et d'humidité régulées. Après 90 jours, les plants ont été récoltés et leurs niveaux de feuilles ont été mesurés. Les racines et les parties supérieures des plantes ont été séparées et séchées pour une étude approfondie. L'échantillon de terre a également été prélevé pour une analyse chimique. L'efficacité de l'élimination d'HF du sol a été calculée. On surveillait les variations des teneurs en nutriments dans le sol, et on calculait le taux de tolérance (TI) afin d'évaluer la capacité des plantes à supporter la contamination par HF. Il a été effectué des analyses statistiques afin d'évaluer les variations dans la croissance des plantes et les paramètres du sol entre différentes méthodes.

3.5 Matériel et méthode cinquième expérience selon Gabriele et al.,(2023)

3.5.1 produits chimiques

PYR, PHE, Cu et acetone ont été achetés respectivement chez Sigma-Aldrich et Thermo Fisher Scientific. Le MilliQ water a servi de base pour préparer toutes les solutions.

3.5.2 Sol

Une partie du sol non contaminé a été prélevée du sol de surface de Sora, dans la région Lazio, dans la province de Frosinone, en Italie. Elle a été séchée dans une ozone TCF-50 à une température de 45 °C jusqu'à atteindre une masse constante, puis a été séchée à travers un sillon de 2 mm. Le sol était classé en limon.

3.5.3 Procédure de sondage pour le sol

La même quantité de PHE et de PYR a été dissoute dans de l'acétone et ajoutée à la terre non contaminée afin d'obtenir des concentrations théoriques initiales de 100 (pc1), 200 (pc2) et 300(pc 3) mg de Σ PAHs kg⁻¹ dans la terre contaminée, respectivement.

3.5.4 Dispositif expérimental

Trois concentrations différentes de phénanthrène et de PYR ont été testées dans des pots de 300 mL, et on a pris en compte une concentration de cuivre constante de 350 mg·kg⁻¹. Trois répliques ont été préparées pour chaque condition d'opération dans un box de culture sous conditions contrôlées, tandis que trois répliques ont été préparées pour les tests sans la plante. Le sol contaminé par les PAH et Cu a été planté dans des pots et placé dans une salle de croissance dans l'obscurité pendant 50 jours. La température oscillait entre 15 et 22 °C, tandis que l'humidité était comprise entre 45 et 50%.

3.5.5 Méthodes analytiques et échantillonnage

Le taux de TS et VS, le taux de TOC, le pH et la conductivité électrique ont été mesurés dans le sol selon les méthodes traditionnelles, tandis que le taux de nitrogène a été mesuré par spectrophotométrie à l'aide d'un test de nitrogène Spectroquant®. Après 50 jours de phytoremediation, 3 à 4 sous-échantillons ont été prélevés des pots choisis et mélangés. 0,5 g du échantillon de sol a été séché sous des conditions ventilées et sombres, puis extrait pour évaluer la quantité de PYR et de PHE, conformément aux recherches (Sun et al., 1998). On mesure chaque semaine la hauteur des plantes afin de suivre l'évolution de la croissance. La biomasse a été récolté dans le sol et torréfié à 50 °C jusqu'à obtenir une masse constante.

3.6 Matériel et méthodes de la sixième expérience Selon Ologidi et al.,(2023)

3.6.1 Sélection des plantes

Six espèces d'herbes ont été sélectionnées en fonction de leur croissance rapide, de leur couverture végétale dense, d'une facilité d'établissement et de maintenance, de la dureté et des potentiels de phytoremédiation.

3.6.2 Sites expérimentaux, conception expérimentale et plantation

L'expérience s'est déroulée à l'Université du Niger Delta, au Nigeria, avec un design complet à l'échelle de l'arbre, des traitements, du temps et du stade de croissance. Le niveau de traitement 0% était un sol non contaminé, tandis que les niveaux de traitement de 25% et 50% étaient préparés à partir d'un sol destiné à l'extraction de coupe. Les espèces de végétaux ont été transplantées dans des sols contaminés et non contaminés, puis arrosées quotidiennement.

3.6.3 Méthodes étudiées

Paramètres physico-chimiques tels que le taux de nitrogène total, la texture du sol, le pH, (TPH) et les métaux lourds. OBDCs ont été analysés. On a mesuré le taux de nitrogène total à l'aide de la méthode Kjeldahl, (Bremner, 1996), on a mesuré la texture du sol à l'aide d'un hydromètre (Bouyoucos, 1962), Le pH a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre Hanna Professional Benchtop, le TPH a été quantifié par une extraction Soxhlet de 16 heures, et les métaux lourds ont été analysés.

3.7 Matériel et méthode septième expérience Selon Mandaresu et al., (2023)

3.7.1 Substrats, Plantes et copeaux de bois

On a récupéré un volume de 2 m³ de substrat contaminé provenant d'un site côtier en Sardaigne, en Italie, et on mélangé à une préparation de jardin commercial. On a également obtenu des copeaux de bois à partir de charbon de bois et de bois sec. Les plantes *Helichrysum tyrrhenicum* ont été cultivées pendant deux ans sur un substrat non contaminé avant d'être transplantées sur le substrat contaminé. Les échantillons du substrat contaminé et des copeaux de bois ont été prélevés avant d'être testé en serre.

3.7.2 Essai et échantillonnage de serre

Des tests de phytoremédiation ont été réalisés dans des serres de Sgaravatti Land. Trois conditions expérimentales ont été testées : UNAM, WCAM et GARD. Les paramètres de croissance ont été surveillés toutes les deux semaines et à la fin du test, cinq pots de chaque condition ont été sélectionnés au hasard pour des analyses chimiques, microbiologiques et enzymatiques. La biomasse sèche des plantes a également été déterminée.

3.7.4 Analyses microbiologiques et enzymatiques

Ont été réalisées sur des substrats raffinés, des copeaux de bois, des blocs et des substrats de rhizosphère provenant de pots non amendés et modifiés. Les micro-organismes capables de dégrader les hydrocarbures ont été énumérés sélectivement par la procédure NPP numéro le plus probable procédure dans les cinq répétitions NPP (Alexander, 1983), tandis que l'activité déshydrogénase a été mesurée en utilisant l'INT comme substrat.

3.7.5 Analyse statistique

Les tests de Shapiro-Wilk et Levine ont été utilisés pour évaluer la normalité et l'homoscédasticité. Les conditions expérimentales ont été comparées à l'aide d'une ANOVA non paramétrique de rang de Kruskal-Wallis et de tests post.

3.8. Matériel et méthode de la huitième expérience Selon Martínez-Rabelo et al., (2023)

3.8.1 Site expérimental

Le site expérimental se situe dans la région Totonaca, près de la ville de Papantla, au nord de Veracruz, au Mexique, et a été conditionné de novembre 2017 à mars 2018.

3.8.2 Configuration de l'expérimentation du système

3.8.2.1 Consortium bactérien et encapsulation

Bacillus sp., *Pseudomonas sp.* et *Shigella sp.* ont formé un groupe qui dégradait les hydrocarbures de pétrole dans un milieu minimum et favorisait la croissance des plantes, tout comme d'autres (PGPR).

3.8.2.2 Les vers de terre et l'herbe

On a créé une carte hybride en utilisant des données provenant de la Global Biodiversity Information Facility (Gitipour et al., 2018) afin de déterminer la répartition de *Panicum maximum* et de *P. corethrurus* dans les provinces d'huile du sud-est mexicain contaminées par des hydrocarbures.

3.8.2.3 Mise en place du système pilote sur place

Un espace de 100 m² contaminé a été choisi sur le site pour être réparé. Un maximum de 5 m² de *Panicum* ont été transplantés depuis le même site vers le système de piles de biorémédiation (phyto-rémédiation), 55 m² de *P. corethrurus* ont été placés sur le dessus (vermire-médiation), et les bactéries du consortium ont été inoculées près des racines avec 5 doses (16 g) par m².

3.8.4 Extraction d'hydrocarbures et analyse GC-MS

Le processus d'extraction des hydrocarbures impliquait de mesurer l'humidité du sol pour déterminer les concentrations d'hydrocarbures. L'extraction, l'identification et la quantification des alkènes et des PAH ont été effectuées à l'aide de la méthode d'extraction QuEChERS® (Cvetkovic et al., 2016) et du GC-MS avec un détecteur de spectre de masse SIM.

3.8.5 Changement des populations bactériennes et de la fonctionnalité du système pilote

Le génome génétique a été extrait du sol homogène en utilisant le kit FasDNA SPIN pour le protocole du sol. La quantification a été réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre NanoDrop 2000, et l'intégrité a été confirmée par électrophorèse à gel d'agarose. Microbiota metagenomics a été analysée en utilisant le gène ribosomal 16S. Les séquences ont été analysées à l'aide de fastqtools, approfondies et regroupées. On a effectué une taxonomie.

3.8.6 Détermination macro et mesofaune

Deux monoliths ont été découverts de manière équitable dans chaque pile à 0, 35, 75, et 112 jours, et la macrofaune a été recueillie, identifiée, comptée et pesée dans le laboratoire. Le sol mesofauna a été extrait à l'aide d'un funnel de Berlese fait maison.

3.9 Matériel et méthode neuvième expérience Solon Yuan et al., (2023)

3.9.1 Préparation du sol

On a prélevé du sol non-TPH ajouté sur le sol agricole de Changqing Oilfield, dans la province du Gansu, dans le nord de la Chine, Le sol était séché à l'air, on homogénéisé et on conservé à température ambiante ($20\pm 5^{\circ}\text{C}$). Le sol non-TPH ajouté présentait un pH de 8,43, un TOC de 16,68 g kg⁻¹, un EC de 9193,7 us cm⁻¹ et une salinité de 6,207 g kg⁻¹. On classé comme une terre très saline un sol alcalin et des compléments nutritifs supplémentaires

3.9.2 Expériences en pot et collecte d'échantillons

Pour l'expérience en pot, 350,00 g de sol contaminé par l'huile ont été ajoutés à chaque pot en plastique, et 20 semis de chaque espèce ont été transférés dans chaque pot. Les pots ont été randomisés et repositionnés chaque semaine, et six groupes de temps de collecte ont été établis pour chacune des trois espèces de plantes.

3.9.3 Mesures des caractéristiques du sol

Les propriétés chimiques du sol ont été mesurées. les indicateurs de fertilité et la capacité d'échange de cations. La méthode a été utilisée du dichromate de potassium, la méthode de digestion de Kjeldahl, la méthode du molybdenum bleu et la méthode de photométrie à flamme pour mesurer les contenus. Après la collecte du sol de la rhizosphère, on a mesuré les activités enzymatiques de SUA, DHP, catalase et (PPO)

3.9.4 Analyse statistique

L'analyse bidirectionnelle de la variance a été utilisée pour déterminer les significations des différences entre les traitements. La matrice de corrélation entre l'élimination du TPH, les paramètres de la plante et les propriétés du sol a été obtenue à l'aide de l'analyse de la corrélation de Pearson.

3.10 Matériel et méthodes de la dixième expérience D'après M. He et al.,(2022)

3.10.1 Condition climatique

Type de sol sans pollution On a choisi l'aire de Changning-Weiyuan de la province de Sichuan pour l'étude, en mettant l'accent sur la zone subtropicale mousson chaude et humide, avec une moyenne annuelle de température et de précipitations.

3.10.2 Sol échantillonnage

Les échantillons de sol ont été prélevés à l'aide d'un aiguiseur de 5 cm de diamètre, analysés pour leur texture, leur pH, leur contenu organique, leur taux de phosphore total, leur phosphore disponible, leur taux de potassium échangeable, leur densité de masse et leur taux de cadmium selon des méthodes standard. Les caractéristiques physiques et chimiques fondamentales des sols expérimentaux sont présentées dans Tableaux 8 (voir Tableaux 8 annexe).

Dix sous-échantillons par emplacement expérimental ont été collectés de manière équitable afin de créer un échantillon composite, qui a été séché à l'air et séché (0.5 mm). La quantité totale d'hydrocarbures de pétrole dans le sol a été mesurée par gravimétrie (Zhang et al., 2019)

3.10.3 Réactifs

Des réactifs ont été achetés Sinopharm Chemical Reagent Co., Ltd., et des semences chez Huazhong Agricultural University. Les sols sablonneux ont été contaminés, limoneux, et argileux avec des ions cadmium et des hydrocarbures de pétrole, respectivement, et on a utilisé 81 pots de fleurs en plastique pour l'élevage de *S. sudanense*, *F. arundinacea* et *L. perenne*. Des solutions d'acide citrique ont été ajoutées, de glycine et de maltose aux pots correspondants, et les systèmes de contrôle n'ont été arrosés que pour provoquer leur dégradation naturelle. Le projet a duré 67 jours (voir Tableaux 8 annexe)

3.10.4 Conception de test

3.10.4.1 Élimination du cadmium du sol par des exsudats de racines dans des conditions de sol différentes

20 graines de *S.sudanense* ont été cultivées dans des boîtes de Pétri en utilisant une solution améliorée de Hoagland, avec des éléments nutritifs tels que Ca^{2+} , K^{+} , KH_2PO_4 , Mg^{2+} , Zn^{2+} et Cu^{2+} . Les graines ont ensuite été transplantées dans des pots de fleurs avec un sol préparé sablonneux, limoneux et argileux. Trois groupes expérimentaux (C, G et M) ont été mis en place pour différentes conditions de sol. Après 40 jours de traitement, les plantes ont été récoltées, lavées et séchées, et la biomasse des échantillons de plantes séchées a été pesée et calculée.

3.10.4.2 Élimination du total des hydrocarbures pétroliers du sol avec des exsudats de racine dans des conditions de sol différentes

Trois types de sols propres et secs ont été tamisés et des hydrocarbures de pétrole ont été dissous dans de l'éther de pétrole pour créer un sol contaminé par des hydrocarbures de pétrole de 12000 mgkg⁻¹. Quarante-et-un pots de fleurs en plastique ont été utilisés, remplis de 600 g de sol et de solutions de glycine et de maltose. Dix semis ont été transplantés dans chaque pot, placés sous la lumière naturelle et arrosés régulièrement. Neuf essais de traitement ont été effectués sur chaque plante, avec trois répétitions pour chaque essai. L'expérience a duré du 6 juin 2021 au 12 août 2021.

3.10.5 Mesure des indicateurs des plantes

L'étude a mesuré la taille et le poids frais des plantes de *F. arundinacea*, *L. perenne* et *S. sudanense*, et a observé la croissance des semis dans des conditions de pollution par les hydrocarbures pétroliers dans différents types de sol.

Mesure de la concentration de cadmium dans les racines et les feuilles ont été placées dans un flacon conique et mélangées avec du nitrique acide concentré, de l'hydrofluoric acid, du perchloric acid, puis nettoyées avec du nitrique acide dilué à 5%. On filtra la solution et on la mettait dans un réfrigérateur à 4°C pour l'étudier.

3.10.6 Analyse statistique

Les données ont été analysées en utilisant IBM SPSS version 24.0 et Origin Pro version 8.0. Les corrélations entre la biomasse des racines, la biomasse des feuilles et des tiges, la

concentration de Cd de la racine, les concentrations de Cd de la feuille et des tige et le rapport de translocation sur différents types de sols ont été analysées par l'analyse de la corrélation des personnes.

3.11 Matériel et méthode de la onzième expérience Solon Liu, Wang, Wang, et al., (2023)

3.11.1 Préparation et échantillonnage du sol

Le sol contaminé de l'étude a été échantillonné dans le champ pétrolifère de Dagang à Tianjin et testé pour la valeur du pH, la teneur en eau, la matière organique, l'azote total, les HAP et les concentrations de HCP total (TPH).

3.11.2 Conception expérimentale d'expériences en pot

Après la collecte du sol, tamisé à travers une maille de 4 mm, 1.5 kg de terre a été rempli dans chaque pot, équilibré pendant deux semaines, et trois plantes ont été transplantées dans chaque pot. Nano-SiO₂, nano-CeO₂ et Na-MMT ont été ajoutés au sol sous forme de poudre selon la concentration de conception. Un total de 18 traitements sont constitués du groupe témoin (P, T, T + P) :

- Traitement nano-SiO₂ groupe (P + S3, T + S3, T + P + S1, S3, S5)
- Traitement nano-CeO₂ groupe (P + C3, T + C3, T + P + C1, C3, C5)
- Traitement au Na-MMTgroupe (P + M3, T + M3, T + P + M1, M3, M5).

3.11.3 Détermination des caractéristiques de croissance des plantes

Au moment de la récolte, *S. spectabile* a été doucement rincé quatre fois avec de l'eau du robinet suivie d'eau dés ionisée pour enlever la poussière attachée à la surface de la plante. Le poids sec des plantes a été déterminé à l'aide de ciseaux.

3.11.4 Extraction et détermination des HAP et alcanes

La méthode d'extraction Soxhlet de l'Agence nationale de protection de l'environnement a été utilisée pour extraire les HAP, et les alcanes et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) ont été élués et purifiés. les HAP ont été détectés par chromatographie en phase gazeuse - spectrométrie de masse.

3.11.5 Détermination des concentrations de Si et de Ce dans les usines

Un échantillon de plante lyophilisée a été digéré avec du HNO₃, puis chauffé à l'aide d'un système de digestion par micro-ondes. Les concentrations de Si et de Ce ont été mesurées utilisant ICP-MS.

3.11.6 Séquençage à haut débit des amplicons du gène de l'ARNr 16S

Le séquençage à haut débit des amplicons du gène de l'ARNr 16S a été effectué pour la structure de la profiler communauté microbienne du sol de la rhizosphère.

3.12 Matériel et méthodes de la Douzième expérience D'après Rafique et al., (2023)

3.12.1 Prélèvement d'échantillons de sol

Des échantillons provenant de différentes régions de Shekhupura ont été recueillis, Wazirabad, Muzzafargarh, Multan, Rawalpindi et Faisalabad, contaminées par des produits petrocoles tels que le kérosène, le pétrole à haute octane et le diesel. Le sol a été prélevé à l'aide de tube augers et conservé à 4°C dans l'obscurité pour l'isolation des bactéries et l'évaluation de la concentration de TPH.

3.12.2 Analyse de sol

3.12.2.1 Distribution granulométrique et état nutritionnel du sol

Une méthode d'analyse d'échantillons de sol à l'aide d'une méthode hydrométrique. Un échantillon de terre a été traité en ajoutant 30 % de H₂O₂, en la chauffant à 80°C pendant 30 minutes, puis en la dispersant avec du Sodium hexa-meta-phosphate. La fraction de texture sèche du sol a été déterminée en s'appuyant sur la suspension, tandis que la classe de texture est déterminée à l'aide d'un triangle de texture. L'étude évalue également la disponibilité du phosphore et du potassium extrait à l'aide d'un spectrophotomètre à 880nm (voir annexe tableaux 10) .

3.12.2.2 TPH par spectroscopie infrarouge

L'analyseur d'huile a été utilisé Horiba-350 pour mesurer le taux (TPH) dans des échantillons de sol. Le sol a été mélangé avec du sulfate de sodium, du RDH-CCl₄, et filtré à l'aide d'un filtre Whatman No.40. L'échantillon filtré a ensuite été calibré avec des concentrations

de TPH connues afin d'assurer des résultats précis. Des dilutions ont été effectuées pour garantir des résultats précis (voir annexe tableaux 10).

3.12.2.3 Analyse du sol pour le diesel restant sur GC

Les fractions de crude d'huile dans le sol en utilisant une méthode d'extraction modifiée par shaking et une analyse GC-FID. Les échantillons de terre ont été mélangés avec du sodium sulfate et du hexane, un solvant à base d'acétone, centrifugés et évaporés. Les échantillons ont été analysés sur un GC-17A Shimadzu équipé d'une colonne DB-WAX, en utilisant de l'hélium comme combustible. On a calculé la concentration des TPH en utilisant une solution standard interne, et les zones à haut niveau et les ratios ont été calculés. Une ligne standard a été construite entre les standards de TPH et l'aire de pointe.

3.12.3 Essai de colonisation des racines

Été effectué à l'aide de sachets de croissance stérilisés, imbibés de la solution nutritive stérile de Hoagland et conservés dans des conditions contrôlées. Après 15 jours, les pointes des racines ont été récoltées et diluées dans un incubateur rotatif. Des dilutions ont été faites et versées dans un milieu minimal de sel DF (Fan et al., 2008), incubées à 28 ± 1 °C pendant 48 heures. Les colonies bactériennes ont été dénombrées à l'aide d'un compteur numérique de colonies, et l'UFC 1g de la racine a été calculée.

3.12.4 Identification des isolats bactériens

Les isolats de bactéries ont été identifiés en utilisant le système d'identification BiologVR, qui est un type d'identification phénotypique basé sur l'utilisation de différentes sources de carbone. On a effectué une séquence 16S rRNA sur 8 isolats. La procédure a été la suivante : les colonies ont été prélevées à l'aide d'un toothpick stérilisé, suspendues dans 0.5 ml de saline stérile dans un tube centrifuge de 1,5 ml, puis centrifugées à 10,000 rpm pendant 10 minutes. (Voir tableaux 11 dans annexe)

3.12.5 Essai en pot sur un sol artificiellement enrichi sous contrôle conditions de lumière et de température

Le sol de texture grossière artificiellement pointu a été placé dans des pots en PVC, purifié trois fois pour éliminer les microorganismes locaux, puis laissé refroidir sous laminar flow. Il n'y a pas eu de croissance des microorganismes après 72 heures. Le crude d'olive légère a été filtré,

purifié et utilisé pour l'amélioration du sol. Le sol a été bien mélangé, les graines inoculées ont été plantées à une petite profondeur de 0,5 mm, et deux centimètres de sable argileux standard ont été placés sur les graines afin d'assurer une germination optimale.

Dans les expériences en pot, le sol contaminé était laissé intact, les plantes étaient cultivées dans le sol, et les plantes étaient à la fois inoculées avec des hydrocarbures de pétrole ou non. On a réalisé une série de traitements où des isolats de bactéries ont été utilisés sans *alfalfa* afin d'évaluer l'effet unique des isolats de bactéries sur la dégradation des hydrocarbures de pétrole. On enregistra les données lors de la collecte afin d'évaluer l'impact des hydrocarbures de pétrole sur la croissance des plantes.

3.13 Matériel et méthodes de la Treizième expérience Selon Yang et al., (2023)

3.13.1 Échantillons d'huile et milieux de culture

L'étude a utilisé des boues de pétrole lourd provenant d'installations pipelinaires à Tahe Oilfield, au Xinjiang, en Chine, avec un pH de 7,79, une teneur en sel de 13,78 g L⁻¹, une teneur en eau de 11,10 %, une teneur en phase solide de 61,98 % et des (TPH) La teneur en hydrocarbures pétroliers a été extraite des boues d'huile selon la méthode (Othman et al., 2022). Du pétrole brut léger a été collecté dans le champ pétrolifère de Kelamayi, au Xinjiang, avec des teneurs moyennes en saturats, aromatiques, résines et asphaltées. Un milieu basal minéral a été préparé, complété par des boues d'huile, et le milieu de biodégradation a été préparé avec de l'huile légère ou des hydrocarbures. Tous les milieux ont été ajustés à pH 7,0 et stérilisés avant utilisation.

3.13.2 Isolement, identification et optimisation du milieu des champignons dégradant les hydrocarbures

Des champignons ont été repérés à l'aide d'observations de colonies et de microscopie électronique. On a observé la condition et la morphologie conidionale. Afin de sélectionner les sources optimales de carbone et de nitrogène, le milieu de sélection a été enrichi de six sources de carbone différentes et de cinq sources de nitrogène différentes.

3.13.3 Essai de biodégradation des hydrocarbures

La culture de champignons a été transférée dans une bouteille d'Erlenmeyer de 250 ml avec 100 ml de milieu de biodégradation et incubée à 30°C pendant 30 jours. On a évalué la vitesse de

dégradation du TPH par gravimétrie. Le TPH restant a été filtré dans un autre flacon avec du coton absorbant, enveloppé dans de l'n-hexane, filtré à nouveau, rincé à plusieurs reprises avec de l'n-hexane, puis évaporé à la rotation. On a calculé le taux de dégradation (VRm%) et l'abondance relative des composants hydrocarbonés (VRa%).

3.13.4 Test de biorestauration simulée

Le taux de dégradation du TPH a été calculé gravimétriquement. Après biodégradation, le résidu TPH a été filtré dans un autre flacon d'Erlenmeyer avec absorbent coton, puis il a été éliminé complètement avec n-hexane selon le principe de la solubilité des paramètres étroits. et on a calculé la relative abondance des composés hydrocarbonés gasifiables pour les résidus TPH dissous dans 15 mL de n-hexane.

3.14 Matériel et méthodes de la quatorzième expérience Selon (Steliga & Kluk, 2020)

3.2.1 Spécification du sol

Des échantillons de sol ont été prélevés sur deux sites en Pologne et fusionnés avec l'engrais minéral « Azofoska » afin de générer un échantillon de sol caractérisé par des niveaux élevés des métaux lourds et d'hydrocarbures pétroliers. Des analyses ont été effectuées pour évaluer les variations de la toxicité des sols contaminés par le plomb, le nickel, le cadmium et les hydrocarbures pétroliers au cours des procédures de phytoremédiation.

3.14.2 Sélection des plantes, description de l'expérience

Festuca arundinacea a fait l'objet d'une expérience de culture en pot en laboratoire d'une durée de 6 mois dans le but d'assainir les sols contaminés par des métaux lourds et des hydrocarbures pétroliers. Des échantillons ont été prélevés pour l'extraction des polluants avant et après la culture. Par la suite, la matière végétale a été soumise à des processus de minéralisation afin de quantifier les niveaux de plomb (Pb), de nickel (Ni) et de cadmium (Cd) présents.

3.14.3.1 Essais physiques et chimiques du sol et de la biomasse

La teneur en humidité du sol utilisé pour la procédure expérimentale a été déterminée en identifiant la réduction de poids attribuée à l'évaporation de l'eau pendant le processus de séchage à une température de 105 °C. Par la suite, l'échantillon de sol restant a été ajusté à l'état séché à l'air et tamisé à l'aide d'un maillage de 1 mm. Par la suite, Après l'extraction des échantillons, une série d'évaluations physiques et chimiques a été effectuée.

3.14.3.2 Extraction des analyses du sol et de la biomasse et méthodes utilisées pour déterminer des analyses.

L'étude visait à établir l'existence des dans le sol en utilisant une technique qui implique l'extraction de composés organiques de la matrice du sol, la minéralisation dans une solution concentrée de HNO₃ et la digestion à l'aide d'un minéralisateur à micro-ondes. L'extrait aqueux a fait l'objet d'une évaluation de ses caractéristiques physiques et chimiques, notamment du pH, de la conductivité, ainsi que des cations et des anions. Les constituants du sol obtenus par minéralisation ont été examinés pour leurs niveaux de calcium, de magnésium, de silicium et d'aluminium, en plus des métaux lourds. En outre, la matière végétale récoltée a fait l'objet d'une évaluation de sa teneur en plomb, en nickel et en cadmium. Calcul des paramètres du processus de phytoremédiation. L'efficacité de la technique d'assainissement des sols par phytoremédiation a été évaluée en examinant divers facteurs chez *Festuca Arundinacea*. Ces facteurs comprenaient la biomasse végétale, la teneur globale en métaux des tissus végétaux, les facteurs de translocation et les facteurs de bioconcentration.

3.14.4 Essais toxicologiques du sol

Pour évaluer l'efficacité des techniques de phytoremédiation dans la décontamination des sols, des essais toxicologiques ont été réalisés. L'évaluation a porté sur l'utilisation de divers tests tels que PhytotoxkitTM, Ostracodtoxkit FTM, Microtox[®] Solid Phase et MARA, qui impliquaient des organismes représentant trois niveaux trophiques différents.

3.14.5 Analyse statistique

Les résultats des tests chimiques, chromatographiques et toxicologiques ont été examinés à l'aide de techniques analytiques et graphiques. Les analyses statistiques comprenaient une analyse de variance unidirectionnelle et le test post hoc de Tukey.

3.15 Matériel et méthode de la quinzième expérience Selon Eze et al., (2022)

3.15.1 Conditions d'échantillonnage, d'enrichissement et de croissance du sol

On a prélevé des échantillons de terre de surface provenant d'une huilerie très polluée à Wietze, en Allemagne, et on les a ajoutés à un flacon d'Erlenmeyer contenant 100 mL de liquide de milieu minéral. La culture a été cultivée à 30 °C avec une rotation continue à 110 rpm

3.15.2 Extraction de l'ADN, séquençage du méta génome, assemblage et analyse

On a extrait le L'ADN de cellules microbiennes et on séquencé à l'aide d'un système Illumina HiSeq 2500. Les lectures ont été traitées à l'aide du système Trimmomatic et rassemblées à l'aide de metaSPAdes, et la notation fonctionnelle des séquences de données codantes a été réalisée comme mentionné précédemment (Eze Michael O. et al., 2020) .

3.15.4 Inoculation bactérienne et croissance des plantes

Des cellules microbiennes ont été collectées et inoculées dans des souches enrichies en diesel fuel afin d'évaluer leurs effets sur la croissance des plantes et le changement des hydrocarbures. Le sol a été séché pour éliminer de grandes particules, et du diesel a été ajouté et homogène. Les graines de *M. sativa* . ont été plantées dans des pots contenant 150 g de sable diesel-contaminant et ont été arrosées tous les trois jours pendant deux semaines. Après 60 jours, les plantes ont été récoltées et cuites à l'ovin.

3.15.5 Analyse géochimique organique de la biodégradation

À la fin de l'expérience, les sols ont été homogénéisés, congelés séchés et extraits avec n-hexane. Des analyses de GC-MS ont été effectuées sur une Thermo Scientific Trace 1300 Series GC couplée à une thermo-scientifique Quantum XLS Ultra MS avec une colonne capillaire Phenomenex Zebron ZB-5MS.

3.15.6 Paramètres de biodégradation

Pour déterminer la nature et l'étendue de la biodégradation, les rapports de pristane, de phytane et du mélange complexe non résolu ont été obtenus.

3.15.7 Analyse statistique

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées en utilisant R.L'ANOVA unidirectionnelle a été utilisée pour comparer la biomasse sèche moyenne des traitements

"*M. sativa*" et "*M. sativa* + *Consortium*".

Chapitre 4

Résultats et discussions

Synthétique

Chapitre 4. Résultats et discussions

4.1 Résultats et Discussion de la première expérience Selon Li et al.,(2023)

4.1.1 État d'infection mycorhizienne et effets des traitements de biorestauration sur la concentration des HAP dans le sol

Après 90 jours d'inoculation AMF dans un sol contaminé par les HAP, *F. mosseae* a eu le taux d'infection le plus élevé sur les racines de saule, suivi de *L. etunicatum* et de *R. intraradices*. La phytoremédiation assistée par l'AMF a amélioré l'efficacité d'élimination du phénanthrène et du pyrène, tout en réduisant les concentrations de benzo (α) pyrène. Biodégradation du benzo (α) pyrène, du phénanthrène et du pyrène par la colonisation MA a suggéré des possibilités de phytoremédiation mycorhizienne arbusculaire des sols pollués par les HAP.

4.1.2 Activité enzymatique dans le sol de rhizosphère et corrélation de l'élimination des HAP

Cette étude a étudié les effets de l'inoculation de CMA sur la dégradation des HAP dans le sol. Les résultats ont montré que les activités PPO, laccase et déshydrogénase étaient significativement plus élevées dans les traitements PM et PE que dans les autres traitements, et corrélées positivement avec les taux d'élimination des HAP. mais les corrélations avec l'élimination des HAP n'étaient pas significatives. (voir annexe tableaux 2)

4.1.3 Effet de l'inoculation AMF sur les métabolites de la rhizosphère de *S. viminalis*

L'ajout d'acides gras racinaires au sol peut accélérer l'élimination des HAP ou du pétrole. De plus, certaines espèces microbiennes dégradant les HAP peuvent produire des biosurfactants qui aident à éliminer les polluants d'hydrocarbures des sols contaminés.(Wang et al., 2020)

4.2 Résultats et discision de deuxième expérience D'après Y.-Y. Lee et al.,(2023)

4.2.1 Dégradation des TPH dans le sol co-contaminé

La température moyenne de l'air à Séoul, variait de 17,4-30,2 °C. La température diminue après 117 jours, atteignant un minimum de -18.5 °C. Les précipitations quotidiennes étaient caractéristiques du climat sud-coréen, De 0 à 117, la concentration de TPH résiduel dans le sol contaminé a baissé, avec des efficacités de réparation respectivement de 44,7 % et de 23,0 à 30,6 %. La teneur en TPH

résiduelle a diminué à $35,375 \pm 1927$ mg-TPH·kg-sol⁻¹ après une nouvelle contamination avec du diesel, avec des efficacités de élimination de 11,0 % et 40,8 %.

4.2.2 Absorption des métaux lourds par la haute fescue

Le *fescue* de grande taille était capable d'absorber des éléments lourds, avec des concentrations de Cu, Pb et Cd bio accessibles de 230.8 ± 2.0 , 140.8 ± 5.5 et $26,2 \pm 0.3$ mg·kg-sol respectivement le jour 0. Après une nouvelle contamination, ces concentrations augmentèrent respectivement à $522,4 \pm 9,2$, 367.4 ± 4.0 et $30,5 \pm 0.1$ mg·kg-sol. La concentration des métaux lourds bio accessible dans les racines et les feuilles était de $146,9 \pm 8.6$ et $52,5 \pm 2.0$ mg·kg-biomasse respectivement pour le cuivre, de $76,5 \pm 7.6$ et $30,3 \pm 0.0$ mg·kg-biomasse respectivement pour le plomb, et de 11.2 ± 0.2 et 5.8 ± 0.0 mg·kg-biomasse respectivement pour le cadmium. Les BCFs et TFs pour chaque métal étaient respectivement de 0.42 ± 0.02 , 0.40 ± 0.03 et 0.58 ± 0.01 pour Cu, Pb et Cd. *Tall fescue* est un puissant attaqueur de métaux lourds, avec des taux de BCF et de TF pour Cd bien supérieurs à ceux de Cu et de Pb.

4.3.Résultats et discussion de la Troisième expérience Selon Urana et al., (2023)

L'inoculation en PGPR est une stratégie efficace pour la dégradation des PAH, avec une analyse Meta génomique qui révèle une richesse microbienne accrue dans le sol rhizosphérique de *Trigonella foenum-graecum*. L'efficacité de biodégradation des sols pollués par le PAH a été significativement améliorée grâce à l'inoculation de rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR). Cependant, les microbes autochtones ne pouvaient pas rivaliser, et la plupart avaient disparu après près de 4 semaines.

4.4. Résultats et discussions de la Quatrième expérience Selon Meištininkas et al., (2023)

4.4.1 Dynamique de croissance des plantes

L. corniculatus, *M. sativa*, *M. albus* et *P. sativum* étaient les plus réceptifs à la pollution par (HF), tandis que *P. vulgaris*, *G. orientalis*, *O. viicifolia* et *L. culinaris* étaient les plus touchés par la pollution par (HF) (Voir annex tableaux 4)

4.4.2 Production de Biomasse Plante

La pollution par HF a eu un impact significatif sur le poids sec de sept des huit espèces de plantes testées, avec *L. culinaris* (LEC) affichant la plus forte diminution (70,04%) et *M. sativa* (MS) affichant la moins importante (17,02%). *G. orientalis* (GO), *M. sativa* (MS) et *P. sativum*

(PS) ont montré une croissance améliorée sous HF 1, tandis que *L. culinaris* (LEC) et *P. vulgaris* (PV) ont été les plus résistants. TI a considérablement diminué pour GO et PS pendant HF2.

4.4.3 L'efficacité de l'élimination du carburant lourd

Après 90 jours, les concentrations d'HF dans les sols testés plantés avec des plantes végétales étaient nettement inférieures, passant de 84,93% à 95,86% d'efficacité d'élimination. *P. sativum* (PS), *L. corniculatus* (LC) et *M. sativa* (MS) présentaient la meilleure efficacité de séparation, tandis que *G. orientalis* (GO) présentait la moins efficace. Il n'y a pas eu de différence significative entre l'efficacité de l'élimination de l'HF en fonction de la concentration initiale d'HF dans le sol, à l'exception d'*O. vicifolia* (OV) et de *P. sativum* (PS) (Voir tableaux 11 annexe)

4.4.4 Changements des concentrations d'éléments nutritifs dans le sol

La réhabilitation des sols contaminés par des plantes légumineuses avec du HF a considérablement augmenté la teneur en NH₄-N et en phosphore inorganique, tandis que la teneur en NO₃⁻ était significativement inférieure dans la plupart des cas par rapport aux valeurs initiales. *P. sativum* (PS) augmenta le taux de NO₃⁻ dans le traitement de contrôle, tandis que *P. vulgaris* (PV), *L. corniculatus* (LC) et *M. albus* (MA) contribuèrent à maintenir les niveaux de nitrates proches de ceux initiaux dans le sol contaminé par HF1. On a observé la plus forte augmentation de la concentration en P inorganique dans le traitement HF1 d'*O. vicifolia* (OV), tandis que la plus faible (-2,64%) a été observée dans le traitement HF1 de *L. corniculatus* (LC). (Voir tableaux 12 annexe).

4.5 Résultats et discussions de cinquième expérience Selon Gabriele et al., (2023)

Les plantes de *C. sativa L.* ils ont testé la résistance de différentes espèces de des HM L'étude a révélé que les concentrations de PHE étaient significativement inférieures à celles de PYR dans les sols plantés et non plantés. Des études antérieures ont montré que la biodégradation des PAH à faible masse moléculaire (LMW) est plus rapide et plus simple que celle des composés à haute masse moléculaire (HMW). En outre, *C. sativa L.* a montré un potentiel d'élimination de Cu, avec une efficacité d'enlèvement plus élevée observée dans des conditions de concentration de PAH plus faible. La croissance en biomasse de *C. sativa L.* a été affectée par la présence de PAH et de Cu dans le sol, avec des concentrations plus élevées conduisant à une diminution de la hauteur des plantes et de la croissance des racines (voir tableaux 5 dans annexe)

4.6 Résultats et discussions de la sixième expérience D'après Ologidi et al.,(2023)

Les caractéristiques initiales du sol, des éclats de roche et de la combinaison du sol et des éclats ont révélé que les niveaux des métaux lourds étaient inférieurs au Department of Petroleum Resources (DPR) et à la limite de pollution du sol de la FAO. Une diminution significative du taux d'hydrocarbure de pétrole entre la période de plantation et de récolte a été observée dans les contaminations de 25% et 50%. *A. compressus* a montré la diminution la plus importante en pourcentage, tandis que *H. contortus* et *P. maximum* ont enregistré la diminution la plus faible. L'élimination des hydrocarbures de pétrole de 25% des sols traités avec des plantes jeunes *A. gayanus* et *C. virgata* et matures *P. purpureum* n'a pas été significativement différente. Le facteur de bioconcentration (BCF) de TPH dans les racines d'espèces d'herbes cultivées dans 25 % et 50 % de sols traités par OBDCs était de moins de 1, tandis que le factor de translocation (TF) du TPH chez les sols cultivés avec *A. gayanus*, *C. virgata*, *H. contortus*, *P. maximum* mature et *P. purpureum* mature était de plus de 1, ce qui indique les processus de phytodégradation et de rhizomédication. Young *A. compressus*, *A. gayanus*, *C. virgata* et mature *P. purpureum* sont recommandés pour la phytoréhabilitation des sols pollués par les OBDCs, car 50% de la dose de traitement était toxique pour les espèces de plantes grasses, à l'exception d'*A. compressus*, dont le potentiel phytoréhabilitation était relativement inférieur à 50% de la contamination par des déblais de forage.

4.7 Résultats et discussions de la septième expérience Selon Mandaresu et al., (2023)

Le test de greenhouse surveillait les paramètres de croissance des plantes et leur analyse statistique. La hauteur des plantes augment dans tous les substrats jusqu'à 102 jours, puis diminue dans l'UNAM, mais continue à croître dans le GARD et le WCAM. La valeur du GARD était nettement supérieure à celle de l'UNAM à partir de 158 jours. Le diamètre de la couronne restait constant dans l'UNAM jusqu'à 112 jours, puis il a diminué, tandis qu'il augmenta dans le GARD et le WCAM. Le diamètre de la base de la tige a augmenté dans toutes les conditions, avec la croissance la plus rapide du GARD. La survie des plantes était de 93 % dans l'UNAM et de 100 % dans le GARD et le WCAM, avec une biomasse épiquée très supérieure dans le GARD. Le substrat UNAM a montré une diminution du pH et une augmentation des taux viables de champignons et de bactéries. La concentration de l'humidité du substrat, le pH et l'activité DHase étaient plus élevés dans le WCAM que dans l'UNAM. Les teneurs en TPH étaient inférieures

dans le WCAM par rapport à l'UNAM dans les substrats bruts et profonds, mais plus élevées dans la rhizosphère. L'analyse PCA a révélé des différences entre l'UNAM et le WCAM en se basant sur différentes variables. Dans l'ensemble, les facteurs environnementaux différaient considérablement entre les conditions testées (voir tableaux 6 dans annexe) .

En Discussions l'espèce *Helichrysum microphyllum subsp. tyrrhenicum* ont montré une grande résistance à la contamination âgée dans un substrat de raffinerie, mais sa croissance a été entravée. Copeaux de bois ont favorisé la survie, la croissance et l'élimination des contaminants, probablement en raison de leur communauté microbienne, des nutriments et d'une meilleure humidité du substrat. De plus, les copeaux de bois ont augmenté la présence de microbes et leur activité dans le substrat de masse, ainsi que leur mobilité des contaminants dans la rhizosphère. On a prouvé que *H. tyrrhenicum* est adapté pour la phytoremediation de sites pollués par des hydrocarbures oxydés. Les résultats obtenus dans cette étude pourraient servir de base à d'autres tests de la technologie dans des conditions de laboratoire.

4.8.Résultats et discussions de huitième expérience Solon Martínez-Rabelo et al.,(2023)

4.8.1 Caractérisation des sols

Il a été constaté que le sol présentait une forte teneur en argile, un pH neutre et une forte teneur en matières organiques. Après 112 jours, les teneurs en matières organiques et en carbone diminuèrent en raison de l'activité microbienne, tandis que les teneurs en métaux lourds étaient dans les limites autorisées. Il crée une contrainte physique à l'absorption d'oxygène et d'eau par les graines , également de phytotoxicité propre aux hydrocarbures (Eze et al., 2021).

4.8.2 Élimination des hydrocarbures

4.8.2.1 Alcanes

Après 75 jours, la réduction des alcalins dans le traitement BIO était de 46%, tandis que dans le traitement NA, elle était de 16%. Après 112 jours, la libération d'alcanes dans le traitement BIO était nettement supérieure à 76% par rapport au traitement NA avec seulement 24%.

4.8.2.2 Élimination des hydrocarbures aromatiques polycycliques

Quatorze PAH ont été quantifiés au début de l'expérience, et l'élimination dans le traitement de NA était de 19%. L'élimination dans le traitement bio était significativement élevée, 68% (Cofield et al., 2008) ont rapporté que *Panicum virgatum* a retiré 78 % d'un mélange de 15 PAH

de 3 à 6 anneaux de sol contaminé avec 4540 mg kg⁻¹ après un an, probablement en raison de la libération d'acides organiques et de phénols, qui augmentent la solubilité du PAH, ce qui les rend plus facilement assimilables par les plantes. (S.-H. Lee et al., 2008) ont rapporté que *Panicum sulcatum* a éliminé 80% du pyrène du sol, et Garc a rapporté une (García-Sánchez et al., 2018) que *Zeamays L.* et *Crucibulum* ont supprimé 47% du PAH en 180 jours.

4.8.2.3 Total des hydrocarbures de pétrole (TPH)

L'élimination de TPH dans le traitement BIO a augmenté de 31% avec une élimination cumulative de 76% après 112 jours, tandis que l'enlèvement au traitement NA a diminué de 24% au bout de 112 jours. Ce qui n'a pas été significativement différent de la teneur initiale. Les vers de terre jouent un rôle vital dans la bio réparation en fractionnant le sol par digestion, en facilitant la dégradation du TPH par les micro-organismes, et en améliorant les conditions du sol en fournissant l'aération, la libération de nutriments dans leur dépôt et en stimulant l'activité microbienne.

4.8.3 Développement de l'herbe *P. maximum*

L'herbe *P. maximum* n'a pas été affectée par la contamination par les hydrocarbures après 112 jours en raison de sa synergie avec le consortium bactérien appliqué augmentant la disponibilité des nutriments et la production de métabolites actifs, tels que les phytohormones. La hauteur de l'herbe de *P. virgatum* n'a augmenté d'aucune différence significative entre le début et la fin de l'expérience, et la moyenne de la biomasse totale a augmenté de manière significative (97,3%) lors du traitement BIO par rapport à la journée initiale (voir tableaux 7 dans annexe)

4.8.4 Identification de la végétation secondaire

Au total, 907 individus de 21 espèces végétales ont été enregistrés dans le système pilote, le traitement BIO montrant une plus grande diversité que le traitement NA. *Bidens pilosa* et *Taraxacum officinale* avaient la plus grande abondance, et *Lamium album* et *Mimosa ervendbergii* avaient l'abondance la plus faible.

4.8.5 Changements dans la mésofaune

Quatorze taxes de mésofaune ont été trouvées dans un champ de pétrole de novembre 2019 à février 2020. L'abondance d'Acari et de Collembola a augmenté de manière significative à 112 jours dans les deux traitements, tandis que l'abondance de fourmis était plus élevée dans le

traitement NA. trois taxis supplémentaires ont été trouvés dans le traitement BIO, ce qui suggère la récupération du sol après la bioréparation.

4.8.6 Changements dans la macrofaune

Treize groupes taxonomiques de macrofaunes ont été identifiés dans les premiers jours de deux traitements (BIO et NA), le ver de terre *Protozapotecia australis* étant le plus abondant. Après 112 jours, l'abondance relative et la biomasse de *Protozapotecia australis* ont diminué dans le traitement bio, tandis que *Coleoptera*, *Chilopoda* et *Hemiptera* ont augmenté en abondance. La survie de *P. corethrurus* endogène natif a été observée et démontrée par la présence de cocons dans le traitement BIO.

4.8.7 Changements dans la diversité bactérienne du sol

Six phyla bactériens ont été identifiés dans deux traitements (BIO et NA), les *Actinobactéries* étant les plus abondantes. *Pseudomonas sp.*, *Burkholderia sp.*, et *Sphingomonas Sp.* étaient des dégradants du TPH, tandis que *Bacillus sp.* Était présent en plus grande abondance dans le BIO que dans le traitement NA. La combinaison de trois technologies a considérablement augmenté l'élimination des hydrocarbures, la biomasse de l'herbe et le nombre d'éruptions, et a induit le développement d'autres plantes et une plus grande diversité d'espèces herbacées. Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour assurer la sécurité lors de la mise en œuvre des technologies évaluées.

4.9. Résultats et discussion de la neuvième expérience D'après (Yuan et al., 2023)

4.9.1 Croissance des plantes dans le sol contaminé par le pétrole

On a constaté que *l'alfalfa*, *le ryegrass* et *le tall fescue* ont survécu et poussé dans des sols contaminés par (TPH). Cependant, lorsque la teneur en TPH augmente de 0,5 à 2,0 g kg⁻¹, la biomasse de la plante diminue progressivement. La biomasse des feuilles et des racines de ces plantes a considérablement augmenté au cours de la période de croissance de 90 jours. Les niveaux de chlorophylle dans les feuilles de ces plantes ont diminué de 43,67%, 44,62% et 51,22% par rapport au traitement de contrôle. les niveaux de chlorophylle ont considérablement augmenté de 0 à 90 jours. Ainsi que TPHs étaient éliminés par la réhabilitation des plantes, les vitalités des racines augmentaient.

Un système racinaire robuste est essentiel pour la phytoremédiation car il facilite la croissance des bactéries rhizosphériques. La contamination par le TPH a réduit la teneur en chlorophylle des plantes et la photosynthèse des plantes, en particulier à une concentration plus élevée de TPH, ce qui concorde avec les résultats de (Salehi-Lisar & Deljoo, 2015).

4.9.2 Effets de la dégradation du TPH sur les propriétés du sol

Le pH du sol contaminé par le TPH était généralement inférieur à celui du sol non contaminé, et le pH était le plus élevé dans le traitement de contrôle (0 g kg⁻¹). Les CEC du sol de *l'alfalfa*, du *ryegrass* et de la haute femelle dans les traitements de 2 gkg⁻¹ TPH étaient inférieurs à ceux du contrôle et le CEC des sols a diminué de manière significative par rapport à celui du contrôle. La TOC du sol a progressivement diminué avec l'augmentation du temps de réparation. Les réactions des plantes à la pollution par le pétrole dépendent de leur état de croissance et des conditions du sol. Le pH a diminué au fur et à mesure que la contamination par les TPH a augmenté, tandis que l'EC et le TOC ont augmenté en raison du métabolisme microbien, de la voie de biodégradation de la déshydrogénation et du processus d'humidification. La consommation de nutriments par les micro-organismes et les exsudats de racine/matériau apoplastique augmente également la teneur en éléments nutritifs.

4.9.3 Élimination des hydrocarbures pétroliers dans le système plante-sol

Après réparation, les taux d'élimination de diverses fractions de TNA et de PAH ont été calculés pour *l'alfalfa*, le *ryegrass* et le haut de la mâchoire. Les taux d'élimination des PAH de 3 et de 4 anneaux étaient plus élevés que ceux des 5 et 6 anneaux.

4.10 Résultats et discussion de la dixième expérience

D'après (M. He et al., 2022) L'impact de la texture du sol et des exsudats racinaires est significatif pour déterminer l'efficacité de la phytoremédiation du sol. Plus précisément, les sols argileux présentent une plus grande affinité pour la pollution au cadmium, tandis que la présence d'acide citrique peut potentiellement augmenter l'accumulation de cadmium chez *S. sudanense*, *F. arundinacea* et *L. perenne*. De plus, *L. perenne* possède une capacité remarquable de dégradation des hydrocarbures totaux présents dans le pétrole, démontrant ainsi son potentiel pour l'assainissement des champs pétrolifères contaminés.

4.10.1 Effet des exsudats de racine sur l'élimination du cadmium dans le sol dans différentes conditions du sol

4.10.1.1 Effets des différents types de sols sur la biomasse de *Sorghum sudanense*

Le tableau 8 (voir Tableaux 8 annexe) figurant les propriétés physico-chimiques et la teneur en contaminants des échantillons de sol. Le tableau 9 (voir Tableaux 9 annexe) montre que l'ajout d'exsudats de racine a augmenté la biomasse de *S. sudanense*, l'acide citrique étant le plus efficace. Le sol de argileux était le plus adapté à la croissance. L'effet de la racine sur le cadmium dans le sol varie, le sol argileux étant plus propice à la croissance des plantes en raison de la distribution uniforme des composants, du teneur des nutriments et de la rétention d'eau. L'ajout de substances contenant de la racine, comme l'acide citrique, peut améliorer l'extraction des métaux lourds et réduire la toxicité des métaux. La texture du sol influe également sur l'efficacité de la phytoremédiation, les sols plus grossiers permettant aux plantes d'être actives et aux contaminants d'être moins nombreux. Les substances à faible poids moléculaire contenant de la racine peuvent augmenter la dégradation des polluants organiques dans le sol.

4.10.1.2 Effets des différents types de sols sur la concentration et translocation de cadmium dans les racines de *Sorghum sudanense*

L'étude a montré que l'ajout d'extraits de racine augmente de manière significative les concentrations de cadmium dans les plantes de *S. sudanense*. Cependant, les taux de translocation diminuent avec la concentration de cadmium. L'étude a également montré que la glycine et le maltose augmentaient les taux de transfert du cadmium de 84,85%, 51,52% et 36,36%, respectivement. L'acide citrique a eu le meilleur effet sur le transfert du cadmium des racines vers les feuilles et les tiges.

4.10.3 Taux d'élimination du cadmium dans différents types de sols

Les taux d'élimination du cadmium dans *S. sudanense* étaient les plus élevés dans le sol de sablonneux, suivi du sol de pâle et du sol d'argileux. Les trois centres ont éliminé efficacement tous les hydrocarbures pétroliers, les taux de dégradation les plus élevés étant observés dans le sol de Sablonneux. L'effet des extraits de racine sur le cadmium dans le sol est influencé par les conditions du sol. Les sols agrégés sont plus propices à la croissance des plantes en raison de la distribution uniforme des composants, du teneur des nutriments et de la rétention d'eau.

4.10.4 Effet d'élimination des exsudats de racine sur le total des hydrocarbures de pétrole dans des conditions de sol différentes

La texture du sol affecte la réduction des hydrocarbures pétroliers totaux, ce qui a un impact sur l'efficacité de la phytoremédiation. Les sols agrégés sont plus difficiles à éliminer que les sols sableux et limoneux en raison d'une meilleure adhésion moléculaire et des hydrocarbures pétroliers. Le sol sablonneux a une structure flexible, permettant aux microbes d'obtenir facilement de l'oxygène et de l'énergie. Les rhizomes et les caractéristiques des plantes influencent également l'absorption des nutriments.

4.11 Résultat et discussion de l'onzième expérience Solon Liu, Wang, Wang, et al., (2023)

4.11.1 Tolérance de *S. spectabile*

Sedum spectabile a montré une forte tolérance à la pollution PHC, et la plupart des traitements améliorés ont amélioré cette tolérance. La biomasse de cette plante a augmenté après la plupart des traitements nano-SiO₂ et nano-CeO₂, et la capacité photosynthétique des plantes a également augmenté.

4.11.2 Absorption de *S. spectabile* par les HAP

Nano-SiO₂ améliore l'absorption et la translocation du PAH par *S. spectabile*, avec des valeurs de TF jusqu'à 71,49.

4.11.3 Dissipation des HAP dans les sols

La plantation de *S. spectabile* a augmenté les taux de dissipation du PAH et du TPH dans le sol, avec des taux maximaux de 79% et 61%, respectivement, observés sous le traitement T + P + S5. Les traitements renforcés par nano-SiO₂ et nano-CeO₂ ont également favorisé la dissipation des alcanes de poids moléculaire moyen.

4.11.4 Accumulation et translocation de Si/Ce par *S. spectabile*

Il a été constaté que les concentrations de Si et de Ce dans la plante augmentaient avec l'augmentation des additifs du sol appliqués, et que les TF des Si et du Ce diminuaient avec la concentration accrue de l'additif.

4.11.5 Communauté bactérienne de la rhizosphère

La communauté bactérienne dans le sol de la rhizosphère de *S. spectabile* a été évaluée, et Actinobacteria était la bactérie dominante. L'ajout de Nano-SiO₂/CeO₂ a augmenté l'abondance des Acidobactéries, les genres liés à la dégradation du PAH, et l'abondance relative totale des quatre genres a été la plus élevée dans les traitements renforcés par les nanomatériaux. Le groupe de traitement combiné a été divisé pour calculer les taux de contribution des différents rôles, et l'ordre d'amélioration des effets pour l'élimination du PAH était de planter *S. spectabile* et d'ajouter des nanomatériaux > planting *S. Spectabile* > en ajoutant des nanomatériaux aux sols. Ce système combiné de phytoremédiation a le potentiel d'applications pratiques, et le coût de l'application doit être pris en considération.

Dans discussions Analyse de la contribution de *S. spectabile* et/ou des additifs du sol à la réduction de PAH dans le sol . Promotion de nano-SiO₂/CeO₂ sur la croissance de *S. spectabile* Les systèmes de réparation à base de plantes utilisent les plantes pour absorber les polluants, et les traitements nano-SiO₂/CeO₂ ont été trouvés pour augmenter la biomasse au-dessus du sol de *S. spectabile*. Ceci est probablement dû à une teneur accrue en chlorophylle, ce qui améliore la photosynthèse. Promotion de nano-SiO₂/CeO₂ sur l'absorption des HAP de *S. spectabile* et d'un éventuel mécanisme de conduite. Les nanomatériaux peuvent adsorber des polluants organiques dans le sol afin de réduire leur disponibilité et de compenser les effets de la bioréparation. On montré que le nano-SiO₂/CeO₂ favorisait l'absorption du PAH par *S. spectabile*, alors que le Na-MMT ne l'a pas fait.

Dans cette étude, l'ajout de nano-SiO₂/CeO₂ au système de phytoremédiation à base de *S. spectabile* a considérablement amélioré les taux d'élimination des PAH et des TPH dans les sols, et les effets de nano-siO₂ ont été supérieurs à ceux de la nano-CeO₂. Toutefois, l'application à grande échelle de cette approche dans des situations réelles sur le terrain nécessite une étude plus approfondie.

4.12 Résultat et discussion de la Douzième expérience d'après Rafique et al., (2023)

4.12.1 Caractéristiques des sites d'échantillonnage

Des échantillons de sol ont été prélevés à partir de divers sites avec différents polluants, la texture du sol, la température locale et le vieillissement des hydrocarbures de pétrole. Les

échantillons de sol ont été examinés pour les TPH et les températures moyennes annuelles de L1, L2, L3 et L5 étaient les mêmes (Voir tableaux 11 dans annexe) .

4.12.2 Caractéristiques des isolats microbiennes

Des isolats microbiennes présentant un potentiel de bioréparation élevé et une activité élevée en ACC-déaminase ont été utilisés pour le dépistage ultérieur en fonction de l'activité favorisant la croissance des plantes dans des conditions exemptes de stress et axéniques.

4.12.3 Élimination des TPH par des isolats bactériens en association à la luzerne

Bien qu'il ne soit pas aussi efficace que l'inoculation bactérienne, *l'alpha* a la capacité de nettoyer la contamination du pétrole. Mais en combinaison avec l'inoculation bactérienne, *l'alfalfa* a démontré une promesse significative pour réduire la contamination par le pétrole.

4.12.4 Élimination des TPH par des isolats bactériens indépendants d'association végétale

Sous des réglages d'éclairage et de température soigneusement contrôlés, le potentiel des isolats bactériens pour la bioréparation des hydrocarbures de pétrole a été évalué. De tous les isolats bactériens, celui qui nettoyait les hydrocarbures de pétrole le plus efficacement était le PM32Y.

4.12.5 Dégradation des hydrocarbures de la gamme diesel

36% du pétrole brut utilisé dans l'étude était le diesel, 34% l'essence et 30% le naphtha lourd. L'analyse GC a été utilisée pour évaluer la dégradation des hydrocarbures de la gamme diesel (C10-C16), et une ligne standard a été créée en calculant les zones de pic et les rapports de pic entre les TPH et les normes internes. *Alfalfa* a rendu les choses plus faciles bioremédiation par des isolats bactériens est la plus significative parmi les cultures. PM32Y était l'isolat bactérien le plus efficace dans la dégradation des hydrocarbures de l'aire de répartition du diesel en association avec la luzerne.

4.12.6 Corrélation entre les TPH et la biomasse sèche des racines

Les racines des plantes jouent un rôle important dans la dégradation des hydrocarbures pétroliers car elles fournissent de l'oxygène aux bactéries. La réduction de la teneur en TPH a diminué linéairement avec l'augmentation de la biomasse sèche des racines, mais les isolats bactériens SM73 et WZ3S3 ont moins contribué à la croissance des plantes.

4.12.7 Identification des isolats bactériens

Toutes les bactéries utilisées dans cette étude appartiennent à la Genre *Bacillus* basé sur le séquençage de l'ARNr 16S (voir annexe tableaux 10)

Les bactéries qui dégradent les hydrocarbures sont présentes dans presque tous les habitats et sont des agents actifs de divers polluants. Les hydrocarbures de pétrole et de HAP de poids moléculaire élevé sont difficiles à dégrader par les bactéries, mais celles qui sont exposées à une telle contamination peuvent s'adapter à la dégradation des composés résiduels. Les racines végétales sont nécessaires à la dégradation des hydrocarbures de poids moléculaire élevé par la population bactérienne. Les bactéries ayant à la fois un potentiel de stimulation de la croissance et de biorestauration peuvent être plus efficaces pour promouvoir la croissance des plantes et augmenter la dégradation des hydrocarbures de poids moléculaire élevé. La luzerne combinée à des souches bactériennes a amélioré la dégradation de la contamination par le pétrole comparativement aux unités expérimentales où seules des bactéries ont été inoculées. L'isolat bactérien le plus efficace PM32Y a été identifié comme *Bacillus subtilis* lors du séquençage de l'ADN. (Voir tableaux 11 dans annexe)

4.13 Résultat et discussion de Treizième expérience Selon (Yang et al., 2023)

4.13.1 Dépistage et identification des champignons dégradant les hydrocarbures :

On a obtenu deux fungi hydrocarbon-dégradants grâce à une culture d'enrichissement de sable d'huile provenant du gisement d'huile de Tahe, dans le Xinjiang. On les a identifiés comme *Purpureocillium* et *Penicillium* en se basant sur leurs caractéristiques morphologiques et leur semblance de série avec *P. lilacinum* et *P. chrysogenum*, respectivement.

4.13.2 Optimisation des sources de carbone et d'azote

Les polluants organiques à haut poids moléculaire ne peuvent pas être facilement biodégradés dans des conditions naturelles. L'incorporation de matières organiques exogènes comme sources d'énergie et de carbone peut faciliter la dégradation biologique des polluants organiques. Le mannitol et le sable soluble ont été choisis comme sources de carbone optimales pour *P. lilacinum* HF et *P. chrysogenum* HQ dans le test de biodégradation.

4.13.3 Capacité de biodégradation des champignons sélectionnés

P. lilacinum HF et *P. chrysogenum* HQ ont montré des taux de dégradation différents des hydrocarbures dans le sable d'huile, avec la variante HF affichant des taux de dégradation significativement plus élevés.

L'analyse GC-MS des hydrocarbures d'origine et de résidus d'huile/pétrole extraits des échantillons d'huile de sable a révélé une dégradation totale des n-alkanes (100%), suivie des iso-alkanes (43.52%), des alkenes (40.45%) et des cycloalkanes (33.42%). Le taux de dégradation des aromatiques était le plus faible avec 28,38%.

P. lilacinum HF et *P. chrysogenum* HQ ont réussi à dégrader biologiquement le sable d'huile avec une dégradation modérée des composants hydrocarbonés. Le taux de dégradation des cycloalkanes atteint 100% lors de la thérapie avec la strain HF, suivi de celui des n-alkanes, des aromates et des isoalkanes.

4.13.4 Enlèvement et biodégradation des hydrocarbures dans les boues de pétrole :

P. lilacinum HF et *P. chrysogenum* HQ sont des bioremediateurs potentiels pour les sols contaminés par des résidus d'huile. HF a une efficacité de retrait plus élevée que HQ. On a analysé les fractions d'alcane n dans le sable d'huile par GC-MS. Strain HF a entraîné une diminution variable de tous les C9-26 n-alkanes, tandis que strain HQ a entraîné une augmentation des C19-26 n-alkanes.

En Discussion, Le co-métabolisme avec le micro-organisme est une stratégie efficace pour lutter contre les composés organiques réfractaires en termes d'économie et de technologie. L'amidon soluble et l'extrait de levure ont été sélectionnés comme substrats de co-métabolisme pour *P. lilacinum* HF et *P. chrysogenum* HQ dans le test de biodégradation. Les taux de dégradation du TPH dans les boues de pétrole par *P. lilacinum* HF (14,04 %) et *P. chrysogenum* (10,06 %) se situaient entre 7,92 et 25,60 %. Les bactéries et les champignons, comme *Acinetobacter sp.* et *Alternaria sp.*, mais étaient inférieurs à ceux de l'huile légère. *P. lilacinum* HF et *P. chrysogenum* HQ ont été isolés des boues de pétrole lourd et ont montré une bonne capacité à dégrader les hydrocarbures pétroliers. Cela ouvre de nouvelles possibilités pour le traitement des boues d'huile à l'aide d'un consortium de *P. lilacinum* HF et *P. chrysogenum* HQ, qui tire parti de différents mécanismes de biodégradation.

4.14 Résultat et discussion de la quatorzième expérience Selon Steliga & Kluk, (2020)

4.14.1 Analyses du sol

Les niveaux de pH observés dans les extraits aqueux obtenus à partir des sols examinés varient entre 5,8 et 6,1, parallèlement à une concentration variable d'hydrocarbures pétroliers (TPH). Compte tenu de la forte présence (TPH) dans les sols, il est recommandé de les soumettre à des procédures de biorestauration.

4.14.2 Évaluation de l'efficacité du processus de phytoremédiation des sols

L'expérience menée pendant six mois a démontré que la combinaison de fertilisation et de phytoremédiation peut accélérer la libération de métaux lourds et d'hydrocarbures de pétrole des sols contaminés. Le C12-C18 fraction a connu la diminution la plus importante, avec 41,4-70,6%, tandis que C6-C12 (31,2-40,5%) et C18-C25 (34,2-49,2%) ont connu une diminution légère.

4.14.3 Analyse des matières végétales

L'étude de phytoremediation à l'aide de *Festuca arundinacea* a révélé une absorption de Ni > Pb > Cd en descendant. La bioconcentration des métaux était supérieure à une, ce qui suggère une accumulation principalement dans les racines. Les hydrocarbures de pétrole ont diminué l'accumulation dans les parties supérieures du sol et augmenté dans les racines.

4.14.3.2 Essais toxicologiques du sol

4.14.3.1 Phytotoxkit™

Les tests phytotoxiques ont révélé que *Festuca arundinacea* diminuait les caractéristiques toxiques du sol, augmentant le volume des semences germinées et réduisant l'inhibition de la croissance des racines. La réduction a été la plus importante au cours des deux derniers mois du processus de phytoremédiation.

4.14.3.3 Ostracodtoxkit F™

Un test toxicologique a révélé que l'AF et le CF étaient les plus toxiques pour les *Heterocypris incongruens*, avec une mortalité de 43,2-71,6 % et une inhibition de croissance de 56,2-79,8%. Après un processus de phytoremédiation du sol de six mois, la mortalité a diminué de 38,4-62,3% et l'inhibition de la croissance a diminué de 29,4-47,1%.

4.14.3.4 Microtox®SPT

Les résultats des tests montrent que tous les sols utilisés dans l'expérience sont toxiques pour les bactéries *Vibrio fischeri*. Le processus de phytoremédiation de six mois a permis une diminution graduelle de la contamination jusqu'à atteindre un niveau significatif d'inhibition de la luminescence de *Vibrio fischeri*.

4.14.4 Test MARA

Les résultats du test MARA ont révélé une augmentation des concentrations microbiennes toxiques observées pour les échantillons de sol A, B et C, avec les niveaux les plus élevés observés dans le sol CF-6. Les souches n° 9 et 11 ont été les plus sensibles, tandis que les souches n° 4, 5, et 6 ont été les plus immunes.

En discussion La fertilisation à base de nitrate peut améliorer la croissance des plantes et contribuer à la détoxification des métaux lourds dans les sols pollués. Il a été démontré que la fertilisation avec du nitrate peut favoriser l'accumulation des métaux lourds dans des plantes telles que *Nicotiana tabacum* et *Pentas lanceolata*. L'utilisation de *Festuca arundinacea* dans la phytoremédiation de sols contaminés par des métaux lourds peut également contribuer à l'accumulation de métaux dans les racines des plantes. Dans le cas de la contamination par le pétrole hydrocarbure (TPH), il est crucial d'augmenter le nombre de microorganismes locaux grâce à l'amélioration des nutriments, et le rapport C:N:P devrait être de 100:10:1. Il est nécessaire de mener davantage d'études afin d'approfondir notre compréhension de la répartition et du rassemblement des métaux lourds et des TPH dans les plantes et le sol.

4.15 Résultat et discussion de la quinzième expérience Selon Eze et al., (2022)

4.15.1 Effet de l'inoculation bactérienne sur la croissance des plantes et la biomasse production

L'inoculation du sol avec le consortium isolé a entraîné une augmentation de la croissance et de la production de biomasse de *M. sativa*, et la biomasse sèche moyenne était significativement plus élevée (p 0,001) que le témoin non oculaire.

4.15.3 Effet de l'inoculation sur la biodégradation des hydrocarbures pétroliers

L'inoculation microbienne des sols a amélioré la biodégradation des hydrocarbures pétroliers. Les interactions synergiques entre *M. sativa* et le *consortium* ont conduit à une efficacité de dégradation nettement supérieure.

4.15.4 Paramètres de biodégradation

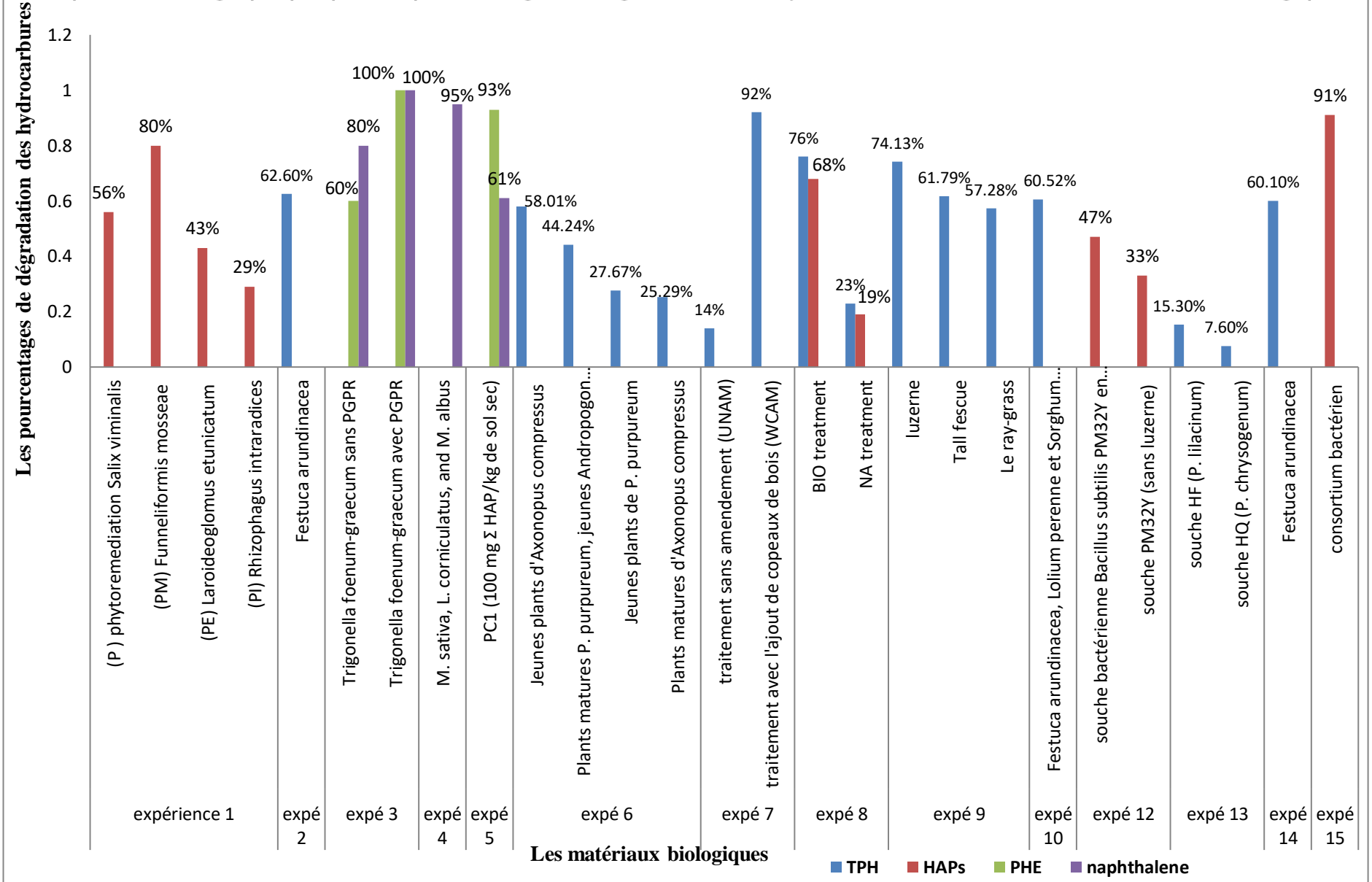
Les niveaux de biodégradation les plus élevés ont été observés dans les sols plantés et inoculés, avec 26 classes enzymatiques potentiellement impliquées dans les activités favorisant la croissance des plantes. La plupart des gènes étaient affiliés à *Acidocella aminolytica* et *Acidobacterium capsulatum*.

Dans Discussion, L'utilisation de plantes pour l'assainissement des sites contaminés est efficace, mais les hydrocarbures pétroliers peuvent être toxiques pour les plantes. Par conséquent, l'isolement de consortiums microbiens qui peuvent améliorer la croissance des plantes et dégrader les contaminants est important. Dans cette étude, un consortium bactérien a été trouvé pour améliorer la croissance de *Medicago sativa* (luzerne) et dégrader les hydrocarbures dans les sols contaminés. Le consortium a été plus efficace pour la dégradation des hydrocarbures que *M. sativa* seul. La présence de gènes spécifiques dans les données du méta génome a indiqué que le consortium a favorisé la croissance des plantes par des processus tels que la fixation de l'azote, la solubilisation du phosphate et la production de phytohormones. Le consortium a également montré un potentiel de biodégradation des hydrocarbures aliphatiques et aromatique (Othman et al., 2022) .

Synthèse de tous les résultats des 15 expériences

Pour analyser les valeurs des résultats de l'histogramme graphique pour le pourcentage de dégradation des hydrocarbures en fonction des matériaux biologiques et ; En synthétisant les expériences sur la dégradation des hydrocarbures, nous résumons que :

Réprésentation graphique pour le pourcentage de dégradation des hydrocarbures en fonction des matériaux biologiques



D'après les résultats de la première expérience elle a montré que le traitement NA dégrade complètement 100 % des HAP, le traitement PM est le plus efficace avec 80 % de dégradation, et la phytoremédiation sans traitement AMF est la deuxième plus efficace, avec 56 %. Le traitement par inoculation AMF a considérablement amélioré la dégradation de la PAH, en particulier pour les composés plus résistants comme le benzo (A) pyrène.

Ensuite, l'expérience 2 a révélé qu'une phytoremédiation à long terme d'un sol co-contaminé par des HAP de pétrole et des métaux lourds a montré une dégradation maximale de (TPH) à 62,6 % et une absorption élevée de métal lourd par *Festuca arundinacea*, le cadmium ayant la plus haute efficacité d'absorption. Avec un facteur BFC 0,58.

Dans l'expérience 3 Pour le phénanthrène, la dégradation globale de *Trigonella foenum-graecum* est d'environ 60 % sans PGPR et 100 % avec PGPR. Pour le naphthalène, est d'environ 80 % sans PGPR et de 100 % avec PGPR. Par ailleurs, l'expérience 4 Les 3 espèces de légumineuses qui ont démontré la plus grande efficacité en phytoremédiation, en éliminant jusqu'à 95 % de la contamination par HF, sont *M. sativa*, *L. corniculatus* et *M. albus.*, mais aussi pour maintenir ou améliorer la teneur en nutriments du sol pendant le processus de phytoremédiation. (Meištinkas et al., 2023) En outre, l'expérience 5 avec *cannabis sativa L.* a montré un bon potentiel de phytoremédiation pour dégrader les HAP, avec des taux de dégradation élevés, pour le phénanthrène. L'extraction du cuivre était plus limitée, atteignant un maximum de 58 mg/kg de sol.

De plus, dans l'expérience 6, les jeunes plants d'*Axonopus compressus*, *Andropogon gayanus*, *Chloris virgata* et les plants matures de *Pennisetum purpureum* sont recommandés pour la réduction des TPH dans les sols contaminés à 25 % par les OBDCs. Les jeunes plants de *P.purpureum* et les plants matures d'*Axonopus compressus* peuvent aussi être utilisés pour atteindre une réduction de 25 à 27 % des TPH.

Aussi, l'expérience 7. Le traitement avec les copeaux de bois a permis une dégradation beaucoup plus importante des hydrocarbures pétroliers, avec seulement 3 à 14 % de la quantité initiale restante, contre 3 à 92 % dans le traitement sans amendement. L'ajout de l'amendement organique (copeaux de bois) en combinaison avec la plante *Helichrysum microphyllum subsp. tyrrhenicum* a donc significativement amélioré l'élimination et la dégradation.

De même, l'expérience 8 La dégradation (HAP) et de (TPH) après 112 jours entraîne un produit biodégradable de 68 % et 19 %, respectivement.

Démontrer l'expérience 9 *Alfalfa* a atteint le taux d'élimination de TPH le plus élevé de 74,13 %, suivi par les hautes mâchoires (61,79 %) et le *ryegrass* (57,28 %). Les alcanes à chaîne plus courte et les PAH à anneau inférieur ont été plus facilement dégradés que les alcanes à anneaux plus longs et ceux à anneau supérieur.

Décrire l'expérience 10 Les taux de dégradation des HAP étaient élevés, jusqu'à 60 % dans le sol sableux.

En plus l'expérience 11 l'ajout des nanomatériaux (nano-SiO₂, nano-CeO₂, Na-MMT) a permis d'augmenter significativement le transfert et l'accumulation des HAP des racines vers les parties aériennes de la plante *Sedum spectabile*. Exposer l'expérience 12 : les pourcentages clés de dégradation des hydrocarbures pétroliers sont 47 % avec la combinaison bactéries + luzerne, et 33 % avec les bactéries seules, par rapport au sol contaminé initialement.

l'expérience 13 a montré les deux souches fongiques *Purpureocillium lilacinum* et *Penicillium chrysogenum* ont montré leur potentiel pour la bioremédiation des sols contaminés par des boues pétrolières, avec des taux de dégradation variant selon les types d'hydrocarbures.

Démontrer l'expérience 14 les expériences de phytoremédiation à l'aide de *Festuca arundinacea*, le processus de phytoremédiation assisté par fertilisation a permis de réduire les niveaux des métaux lourds (Pb, Ni, Cd) de 18,7 à 46,7 % et les hydrocarbures totaux de pétrole de 49,4 à 60,1 % . Finalement, l'expérience 15 pour consortiums bactériens a permis une réduction de 91 % des concentrations en hydrocarbures de diesel dans le sol en 60 jours.

La phytoremédiation est une méthode visant à éliminer les contaminants du sol causés par les hydrocarbures. Les plantes absorbent les polluants par leurs racines, tandis que leurs exsudats encouragent les bactéries qui augmentent les hydrocarbures. La dégradation des hydrocarbures lourds par des plantes comme *M .ativa*, *M. albus* et *Lotus corniculatus* a été démontrée avec une efficacité de 95%. La phytoremédiation réduit la propagation de polluants dans l'atmosphère, mais son efficacité à long terme nécessite des recherches et des améliorations supplémentaires. De nouvelles technologies, mais nécessitent une étude plus approfondie dans différentes conditions environnementales.

Conclusion Générale

Dans notre étude synthétique, 15 études ont été examinées dans le but d'apporter une solution à la pollution des sols par le déversement des hydrocarbures. Ces derniers ont mis l'accent sur la phytoremédiation autant qu'une méthode de traitement de dépollution à travers la masse biologique.

Notre vision à travers ce travail synthétique est de contester la faisabilité d'installer les stations de la phytoremédiation au près des unités industrielles appropriées.

À la lumière des résultats de notre recherche, nous pouvons conclure que :

une stratégie efficace pour utiliser AMF-assisté *S. viminalis* pour réduire les sols pollués par des PAHs, et les résultats ont confirmé les rôles essentiels des acides organiques et des enzymes du sol dans la réduction combinée des PAHs entre les plantes et l'AMF.

Les résultats tirés de la surveillance à long terme de la phytoréhabilitation à l'échelle pilote, fournissent des informations précieuses sur le comportement des polluants et les dynamiques de la communauté bactérienne, qui peuvent être utilisées dans le développement de stratégies de phytoréhabilitation pour les sols contaminés par le diesel et les métaux lourds.

Étant donné que la bio-rémediation de ces polluants se produit avec une diminution significative de leur toxicité, ce genre de consortium est utilisé pour la bio-rémediation de sols.

La réhabilitation de l'HF par les légumineuses a entraîné une augmentation des niveaux d'ammonium et de phosphore inorganique dans le sol, avec une croissance significative de *L. corniculatus* et *d'O. viciifolia*. *Phaseolus vulgaris* et *M. albus* ont été les plus efficaces pour supprimer la Hf.

Cette étude a démontré que *C. sativa* L. peut se développer dans des conditions de stress causées par les PAHs et le Cu dans le sol, en éliminant le PHE et le PYR.

Ainsi, les jeunes *A. compressus*, *A. gayanus*, *C. virgata*, et les jeunes *P. purpureum* sont recommandés pour réduire le TPH dans 25% des sols OBDC contaminés. On peut utiliser *P. purpureum* jeune et *A. compressus* mature pour obtenir une réduction de 25% à 27% du TPH.

Il a été prouvé que *H. tyrrhenicum* convient pour la phytoremédiation de sites pollués avec une contamination par hydrocarbure Weathered. Cette étude a permis de poser les bases pour de futurs tests de la technologie dans des conditions de terrain.

L'étude a évalué et validé l'élimination des hydrocarbures du sol à l'aide de technologies de bioaugmentation, de phytoremédiation et de vermiremediation avec un consortium de bactéries, *Panicum maximum* grass, et *P. corethrurus lombric*, ont été évaluées.

Alfalfa présentait la meilleure réduction des TPH (74,13%), suivie de *Tall Fescue* (61,79%) et de *Ryegrass* (57,28%). L'étude a révélé que les alcanes à chaîne courte et (PAH) ont des taux de dégradation significativement plus élevés que ceux de chaînes longues et haute, ce qui fournit des informations précieuses sur les stratégies efficaces de décontamination du pétrole dans les environnements salant-alkalin.

La texture du sol et les exsudats des plantes influencent significativement l'efficacité de la phytoremédiation. Le sol argileux est plus propice à la pollution par le cadmium tandis que l'acide citrique peut faciliter l'accumulation de cadmium dans des plantes comme *S. sudanense*, *F. arundinacea* et *L. perenne*.

Le système de réparation *S. spectabile* avec l'aide de deux nanomatériaux a été efficace pour éliminer les PAHs du sol, et le transfert des PAHs vers des parties .

L'étude a démontré que quatre souches bactériennes, la souche *Bacillus subtilis* PM32Y, la Souche *bacillus céréus* WZ3S1, la SM73, et la WZ 3S3, lorsqu'elles sont combinées avec l'alpha, ont augmenté de manière significative les hydrocarbures de pétrole. La biodégradation la plus importante a été observée dans l'unité expérimentale avec inoculation PM32Y.

Les résultats fournissent des preuves empiriques pour l'utilisation de *P. lilacinum* HF et *P. chrysogenum* HQ en tant que candidats hydrocarbure dégradés dans la bioremediation des sols contaminés par des sables d'huile.

L'étude montre une diminution de la toxicité du sol due à la phytoremédiation avec la fécondation de *Festuca arundinacea*, ce qui réduit l'abondance d'impuretés non autochtones dans les sols traités.

L'inoculation de *M. sativa* avec le consortium a entraîné une augmentation de 66 % de la biomasse des plantes et une diminution de 91 % des concentrations d'hydrocarbures diesel dans le sol en 60 jours.

Peu importe le nombre d'expériences réalisées et la diversité des espèces végétales testées, la phytoremédiation des sols contaminés a toujours été bénéfique et rentable.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- Alaidaroos, B. A. (2023). Advancing Eco-Sustainable Bioremediation for Hydrocarbon Contaminants: Challenges and Solutions. *Processes*, *11*(10).
<https://doi.org/10.3390/pr11103036>
- Alchimia,. (2016). *La phytoremédiation: Du Cannabis pour nettoyer les sols*. Blog Growshop Alchimia.
<https://www.alchimiaweb.com/blogfr/phytoremediation-cannabis->
- Alexander, M. (1983). Most Probable Number Method for Microbial Populations. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 815–820). John Wiley & Sons, Ltd.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.2.2ed.c39>
- Baize, D. (2016). *Petit Lexique de pédologie* (Christel Desmaris).
- Benguenab, A. (2022). *Bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures avec des champignons telluriques* [Thesis, l'Université de Mostaganem].
<http://e-biblio.univ-mosta.dz/handle/123456789/20517>
- Bortoloti, G. A., & Baron, D. (2022). Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach. *Environmental Advances*, *8*, 100204.
<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100204>
- Bouyoucos, G. J. (1962). Hydrometer Method Improved for Making Particle Size Analyses of Soils1. *Agronomy Journal*, *54*(5), 464–465.
<https://doi.org/10.2134/agronj1962.00021962005400050028x>
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-Total. In *Methods of Soil Analysis* (pp. 1085–1121). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c37>
- Chaineau, C. H., & Morel J.L., Oudot J. (2000). *Biodegradation of fuel oil Hydrocarbons in the rhizosphere of maize*. *29*, pp: 569-578.
- Chen, J., Xia, X., Wang, H., Zhai, Y., Xi, N., Lin, H., & Wen, W. (2019). Uptake pathway and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in spinach affected by warming in enclosed soil/water-air-plant microcosms. *Journal of Hazardous Materials*, *379*, 120831.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120831>
- Cofield, N., Banks, M. K., & Schwab, A. P. (2008). Lability of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere. *Chemosphere*, *70*(9), 1644–1652.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.07.057>

- Cvetkovic, J. S., Mitic, V. D., Jovanovic, V. P. S., Dimitrijevic, M. V., Petrovic, G. M., Nikolic-Mandic, S. D., & Stojanovic, G. S. (2016). Optimization of the QuEChERS extraction procedure for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by gas chromatography-mass spectrometry. *Analytical Methods*, 8(7), 1711–1720. <https://doi.org/10.1039/C5AY03248B>
- Dechamps, C., & Meerts, P. J. (2003). La phytoremédiation: Panacée pour l'environnement ou menace pour la biodiversité ? *Les naturalistes belges*, 84, 135–148.
- Europe, W. H. O. R. O. for. (2021). *Human health effects of polycyclic aromatic hydrocarbons as ambient air pollutants: Report of the Working Group on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons of the Joint Task Force on the Health Aspects of Air Pollution*. World Health Organization. Regional Office for Europe. <https://iris.who.int/handle/10665/350636>
- Eze, M. O., Hose, G. C., George, S. C., & Daniel, R. (2021). Diversity and metagenome analysis of a hydrocarbon-degrading bacterial consortium from asphalt lakes located in Wietze, Germany. *AMB Express*, 11(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13568-021-01250-4>
- Eze, M. O., Thiel, V., Hose, G. C., George, S. C., & Daniel, R. (2022). Enhancing rhizoremediation of petroleum hydrocarbons through bioaugmentation with a plant growth-promoting bacterial consortium. *Chemosphere*, 289, 133143. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133143>
- Eze Michael O., Lütgert Stephan A., Neubauer Hannes, Balouri Angeliki, Kraft Alina A., Sieven Anja, Daniel Rolf, & Wemheuer Bernd. (2020). Metagenome Assembly and Metagenome-Assembled Genome Sequences from a Historical Oil Field Located in Wietze, Germany. *Microbiology Resource Announcements*, 9(21), 10.1128/mra.00333-20. <https://doi.org/10.1128/mra.00333-20>
- Fan, S., Li, P., Gong, Z., Ren, W., & He, N. (2008). Promotion of pyrene degradation in rhizosphere of alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Chemosphere*, 71(8), 1593–1598. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.10.068>
- FATAL. (2008). *Pollution des cotes par hydrocarbures*. Edition Presse universitaire de Rennes.
- Gabriele, I., Bianco, F., Race, M., Papirio, S., & Esposito, G. (2023). Phytoremediation of PAH- and Cu-Contaminated Soil by *Cannabis sativa* L.: Preliminary Experiments on a Laboratory Scale. *Sustainability*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/su15031852>
- García-Rincón, J., Gatsios, E., Lenhard, R. J., Atekwana, E. A., & Naidu, R. (Eds.). (2024). *Advances in the Characterisation and Remediation of Sites Contaminated with Petroleum Hydrocarbons*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-34447-3>
- García-Sánchez, M., Košnář, Z., Mercl, F., Aranda, E., & Tlustoš, P. (2018). A comparative study to evaluate natural attenuation, mycoaugmentation, phytoremediation, and microbial-assisted phytoremediation strategies for the bioremediation of an aged PAH-polluted soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 147, 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.012>

- Ge, X., Selby, D., Liu, J., Chen, Y., Cheng, G., & Shen, C. (2021). Genetic relationship between hydrocarbon system evolution and Carlin-type gold mineralization: Insights from ReOs pyrobitumen and pyrite geochronology in the Nanpanjiang Basin, South China. *Chemical Geology*, 559, 119953. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119953>
- Gitipour, S., Sorial, G. A., Ghasemi, S., & Bazyari, M. (2018). Treatment technologies for PAH-contaminated sites: A critical review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), 546. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6936-4>
- He, D., Wang, X., Yang, Y., He, R., Zhong, H., Wang, Y., Han, B., & Jin, F. (2021). Hydrothermal synthesis of long-chain hydrocarbons up to C24 with NaHCO₃-assisted stabilizing cobalt. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 118(51), e2115059118. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115059118>
- He, M., Li, Z., Chen, C., & Mei, P. (2022). Impact of soil types and root exudates on cadmium and petroleum hydrocarbon phytoremediation by *Sorghum sudanense*, *Festuca arundinace*, and *Lolium perenne*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.1036765>
- Ilić, P., Nišić, T., & Farooqi, Z. U. R. (2021). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contamination of Soil in an Industrial Zone and Evaluation of Pollution Sources. *Pol. J. Environ. Stud.*, 30(1), 155–162. <https://doi.org/10.15244/pjoes/119095>
- Imron, M. F., Kurniawan, S. B., Ismail, N., 'Izzati, & Abdullah, S. R. S. (2020). Future challenges in diesel biodegradation by bacteria isolates: A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119716. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119716>
- Landmeyer, J. E. (2012). *Introduction to Phytoremediation of Contaminated Groundwater: Historical Foundation, Hydrologic Control, and Contaminant Remediation*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1957-6>
- Lee, S.-H., Lee, W.-S., Lee, C.-H., & Kim, J.-G. (2008). Degradation of phenanthrene and pyrene in rhizosphere of grasses and legumes. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1), 892–898. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.041>
- Lee, Y.-Y., Lee, S. Y., & Cho, K.-S. (2023). Phytoremediation and bacterial community dynamics of diesel- and heavy metal-contaminated soil: Long-term monitoring on a pilot scale. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 183, 105642. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2023.105642>
- Li, X., Kang, X., Zou, J., Yin, J., Wang, Y., Li, A., & Ma, X. (2023). Allochthonous arbuscular mycorrhizal fungi promote *Salix viminalis* L.-mediated phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons characterized by increasing the release of organic acids and enzymes in soils.

- Ecotoxicology and Environmental Safety*, 249, 114461.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114461>
- Liu, J., Wang, L., Chen, F., Hu, W., Dong, C., Wang, Y., & Han, Y. (2023). Molecular Characterization of Hydrocarbons in Petroleum by Ultrahigh-Resolution Mass Spectrometry. *Energies*, 16(11).
<https://doi.org/10.3390/en16114296>
- Liu, J., Wang, Y., Wang, M., Feng, X., Liu, R., Xue, Z., & Zhou, Q. (2023). Improving the uptake of PAHs by the ornamental plant *Sedum spectabile* using nano-SiO₂ and nano-CeO₂. *Science of The Total Environment*, 870, 161808. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161808>
- Mandaresu, M., Dessì, L., Lallai, A., Porceddu, M., Boi, M. E., Bacchetta, G., Pivetta, T., Lussu, R., Ardu, R., Pinna, M., Meloni, F., Sanjust, E., & Tamburini, E. (2023). *Helichrysum microphyllum* subsp. *Tyrrhenicum*, Its Root-Associated Microorganisms, and Wood Chips Represent an Integrated Green Technology for the Remediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soils. *Agronomy*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030812>
- Martínez-Rabelo, F., Gómez-Guzmán, L. A., García-Segura, D. R., Villegas-García, E., Rodríguez-Campos, J., Velázquez-Fernández, J. B., Hernández-Castellanos, B., Barois, I., & Contreras-Ramos, S. M. (2023). Hydrocarbon bioremediation in a pilot-scale: A combination of bioaugmentation, phytoremediation, and vermiremediation. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103210. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103210>
- Meištininkas, R., Vaškevičienė, I., Dikšaitytė, A., Pedišius, N., & Žaltauskaitė, J. (2023). Potential of Eight Species of Legumes for Heavy Fuel Oil-Contaminated Soil Phytoremediation. *Sustainability*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/su15054281>
- Miralles, G. (2007). *Devenir d'une contamination pétrolière dans des sédiments côtiers infralittoraux et son impact sur les communautés bactériennes* [These de doctorat, Aix-Marseille 2].
<https://theses.fr/2007AIX22059>
- Ologidi, C. G., Tanee, F. B. G., & Agbagwa, I. O. (2023). Petroleum hydrocarbons reduction by selected tropical grass species in oil-based drill cuttings contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 25(6), 728–736. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2104808>
- Othman, A. R., Ismail, N. S., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Kurniawan, S. B., Sharuddin, S. S. N., & Ismail, N. 'Izzati. (2022). Potential of indigenous biosurfactant-producing fungi from real crude oil sludge in total petroleum hydrocarbon degradation and its future research prospects. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107621.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107621>

- Oulaf. (2015). *Etude comparative de l'efficacité de trois techniques de remédiation (phytoremédiation, biostimulation, bioaugmentation) sur des sols pollués par les carburants*. Mémoire de Magister. U.M.M.T.O.90p.
- Pandolfo, E., Barra Caracciolo, A., & Rolando, L. (2023). Recent Advances in Bacterial Degradation of Hydrocarbons. *Water*, 15(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/w15020375>
- Peixoto, J. R. O., Silva, G. C., Costa, R. A., de Sousa Fontenelle, J. res L., Vieira, G. H. F., Filho, A. A. F., & Vieira, R. H. S. dos F. (2011). *In vitro* antibacterial effect of aqueous and ethanolic *Moringa* leaf extracts. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 4(3), 201–204. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(11\)60069-2](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(11)60069-2)
- PILON-SMITS, E. (2005). *Phytoremédiation: Vol. Vol. 56* (Annual Review of Plant Biolog).
- Rafique, H. M., Khan, M. Y., Asghar, H. N., Ahmad Zahir, Z., Nadeem, S. M., Sohaib, M., Alotaibi, F., & Al-Barakah, F. N. I. (2023). Converging alfalfa (*Medicago sativa* L.) and petroleum hydrocarbon acclimated ACC-deaminase containing bacteria for phytoremediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 25(6), 717–727. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2104214>
- Salehi-Lisar, S. Y., & Deljoo, S. (2015). The physiological effect of fluorene on *Triticum aestivum*, *Medicago sativa*, and *Helianthus annuus*. *Cogent Food & Agriculture*, 1(1), 1020189. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1020189>
- SOLTANI, m. (2004). *Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone*. Thèse de doctorat de l'université Paris 6, spécialité chimie analytique.284. <https://pastel.hal.science/tel-00009276>
- Steliga, T., & Kluk, D. (2020). Application of *Festuca arundinacea* in phytoremediation of soils contaminated with Pb, Ni, Cd and petroleum hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194, 110409. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110409>
- Sun, F., Littlejohn, D., & David Gibson, M. (1998). Ultrasonication extraction and solid phase extraction clean-up for determination of US EPA 16 priority pollutant polycyclic aromatic hydrocarbons in soils by reversed-phase liquid chromatography with ultraviolet absorption detection1Presented in part at FACSS, the 23rd Annual Conference of the Federation of Analytical Chemistry and Spectroscopy Societies, Kansas City, MO, USA, 29 September–4 October 1996.1. *Analytica Chimica Acta*, 364(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(98\)00186-X](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(98)00186-X)
- Urana, R., Yadav, J., Panchal, S., Sharma, P., & Singh, N. (2023). Phytoremediation of PAH compounds by microbial communities in sodic soil. *International Journal of Phytoremediation*, 25(11), 1501–1509. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2170321>

-
- Varjani, S. J. (2017). Microbial degradation of petroleum hydrocarbons. *Bioresource Technology*, 223, 277–286. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.037>
- Wang, Q., Hou, J., Yuan, J., Wu, Y., Liu, W., Luo, Y., & Christie, P. (2020). Evaluation of fatty acid derivatives in the remediation of aged PAH-contaminated soil and microbial community and degradation gene response. *Chemosphere*, 248, 125983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125983>
- Watt, E. A., Laycock, D. P., Michael, E., Tobin, R. C., Kelly, S., & Johnston, M. N. (2022). Hydrocarbon charge and petroleum system evolution of the Montney Formation: A multidisciplinary case study of the Blueberry sub-play in Northeast British Columbia, Canada. *Bulletin of Canadian Energy Geoscience*, 69(1), 21–50. <https://doi.org/10.35767/gscpgbull.69.1.021>
- Yang, S., Zhang, J., Liu, Y., & Feng, W. (2023). Biodegradation of hydrocarbons by *Purpureocillium lilacinum* and *Penicillium chrysogenum* from heavy oil sludge and their potential for bioremediation of contaminated soils. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 178, 105566. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2023.105566>
- Yuan, L., Wu, Y., Fan, Q., Li, P., Liang, J., Liu, Y., Ma, R., Li, R., & Shi, L. (2023). Remediating petroleum hydrocarbons in highly saline–alkali soils using three native plant species. *Journal of Environmental Management*, 339, 117928. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117928>
- Zhang, B., Zhang, L., & Zhang, X. (2019). Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. *RSC Advances*, 9(60), 35304–35311. <https://doi.org/10.1039/C9RA06726D>

ANNEXE

ANNEXE

Tableau 1 Coefficient de corrélation entre les activités enzymatiques et l'élimination des HAP efficients (Li et al., 2023)

var	Phénanthrène	Pyrène	Benzo (α) pyrène
Uréase	0,5344	0,1163	0,03896
Laccase	0,5109	0,8789**	0,9087**
PPO	0,7240**	0,5401	0,6510
Catalase	0,3927	0,5470	0,5507
Déshydrogénase	0,6998**	0,6854**	0,7800**

Remarque : ** représente $P < 0,01$.

Tableau 2 Caractérisation physico-chimique du sol (Urana et al., 2019)

Sr. no.	Caractérisation	Sol	PGPR amended sol
1	Type de sol	Sol limoneux sableux	Sol limoneux sableux
2	Texture du sol	85,09 % (sable) + 10,71 % (limon) + 4,20 % (argile)	
5	pH (suspension d'eau solide 1:10)	8.35	7.95
6	Conductivité électrique (CE) ms (extrait d'eau du sol 1:10)	852	733
7	Capacité d'échange de cations (cmol/kg)	5.29	3.35
8	Total organique C (mg kg)	0.896	0.468
9	Total Ca (mole kg ⁻¹)	29.2	17.4
10	Total Cu (mg kg ⁻¹)	0.0043	0.0040
11	Total Mn (mg kg ⁻¹)	0.0313	0.0192
12	Total Zn (mg kg ⁻¹)	0.0037	0.0045
1	Total Fe (mg kg ⁻¹)	0.0032	0.0037

ANNEXE

Tableau 3 Taux de croissance estimé de huit espèces de plantes cultivées dans le sol témoin et amendé en HF (HF1, HF2) pendant douze semaines. (Meištininkas et al., 2023)

Espèces végétales	Traitement		
	C	HF1	HF2
PV	2.019 a	1.962 a	1.356
GO	5.678 a	5.455 a	4.293
OV	3.133 a	2.965 a	2.025
LEC	7.647 a	7.285 ab	6.203
LC	6.893 a	6.950 a	6.204
MS	9.603 a	9.928 a	10.854
MA	8.209 a	8.196 a	8.696
PS	6.103 a	7.068 a	6.273

différentes lettres indiquent une différence significative ($p < 0,05$) entre les traitements (déterminée par test Z)

Tableau 4 L'efficacité de l'élimination du mazout lourd (%) après 45 et 90 jours dans les cas de contamination par HF(HF1—2,5 g kg⁻¹, HF2—4 g kg⁻¹) le sol, où huit espèces végétales (*P.vulgaris* (PV), *G. orientalis* (GO), *O. viicifolia* (OV), *L. culinaris* (LEC), *L. corniculatus* (LC), *M. sativa* (MS), *M. albus* (MA), *P. sativum* (PS)) ont grandi. (Meištininkas et al., 2023)

Espèces végétales	Traitement			
	HF1		HF2	
	Après 45 jours	Après 90 jours	Après 45 jours	Après 90 jours
PV	45.33 ± 3.53 a	93.20 ± 1.06 *	62.50 ± 1.44 b	93.42 ± 0.22 *
GO	52.00 ± 6.93 a	84.93 ± 10.47 *	55.00 ± 5.20 a	86.25 ± 1.04 *
OV	40.00 ± 6.11 a	91.87 ± 1.16 *	47.50 ± 3.82 a	81.17 ± 1.12 **
LEC	42.67 ± 11.39 a	86.53 ± 1.75 *	54.75 ± 2.63 a	83.83 ± 1.42 *
LC	40.00 ± 10.58 a	95.60 ± 0.46 *	54.58 ± 0.42 a	95.33 ± 0.22 *
MS	41.33 ± 3.53 a	94.80 ± 0.46 *	55.00 ± 6.29 a	94.42 ± 0.65 *
MA	46.67 ± 8.11 a	94.27 ± 0.74 *	42.50 ± 7.64 a	94.67 ± 0.51 *
PS	36.00 ± 4.62 a	95.87 ± 0.35 *	45.00 ± 3.82 a	84.58 ± 3.61 **

ANNEXE

Tableau 5 Biomasse e fraîche et sèche (g) des parties aériennes et des racines de *Cannabis sativa* L. après 50 jours de phytoremédiation dans les PC1, PC2 et PC3 (c.-à-d. 100, 200 et 300 mg ΣHAPs kg⁻¹). Les valeurs obtenues sont le moyen de trois analyses répétées et le RSD (écarts-types résiduels) (Gabriele et al., 2023)

Conditions	Parties aériennes	Racines	Total
Poids frais (g)			
PC0	3.59 ± 0.13	0.59 ± 0.02	2.10 ± 0.01
PC1	3.33 ± 0.14	0.29 ± 0.04	1.81 ± 0.01
PC2	1.20 ± 0.03	0.22 ± 0.01	0.71 ± 0.01
PC3	1.05 ± 0.07	0.12 ± 0.02	0.59 ± 0.05
Poids sec (g)			
PC0	0.37 ± 0.01	0.063 ± 0.01	0.43 ± 0.01
PC1	0.29 ± 0.01	0.031 ± 0.01	0.32 ± 0.01
PC2	0.12 ± 0.02	0.028 ± 0.01	0.15 ± 0.02
PC3	0.11 ± 0.02	0.016 ± 0.02	0.12 ± 0.02

Tableau 6 Survie et biomasses sèches de *Helichrysum microphyllum subsp. Tyrrhenicum* à la fin de la essai en serre. (Mandaresu et al., 2023)

Biomasse sèche (g sec w)			
Condition	survie des plantes	Tissus épigeaux	Tissus hypogaux
GARD	100.0%	40.9 ± 12.2 a	8.0 ± 4.2 ns
UNAM	93.3%	15.6 ± 4.3 b	5.6 ± 4.8 ns
WCAM	100.0%	14.4 ± 8.8 b	3.1 ± 2.7 ns

GARD : substrat de jardin commercial, UNAM : substrat contaminé sans amendement, WCAM : contaminé substrat modifié avec des copeaux de bois. Chaque valeur est la ±SD moyenne des mesures sur les cinq pots pour Différences significatives entre les conditions testées dans les comparaisons par paires ($p < 0,05$) sont représentées par différentes étiquettes minuscules.

ns : $p > 0,05$.

ANNEXE

Tableau 7 Panicum maximum variables recorded at the beginning and 112 days of bioremediation in the BIO treatment (Martínez-Rabelo et al., 2023)

	0 jour	112 jour
Pousses m -2	5a	97,3 ±11,8b
Hauteur (cm)	135.5± 9.0 a	121,6± 8,4un
Biomasse (g m -2)	33,2± 12,1a	323,1± 39,3b

Des lettres différentes signifient des différences significatives entre le jour initial et 112 jours.

Tableau 8 Caractéristiques physico-chimiques des sols expérimentaux (0–20 cm), y compris pH, sable, limon, argile, densité en vrac (BD), organique Matière (MO), azote total (N total), phosphore disponible (disponibleP), potassium échangeable (K échangeable), cadmium et total Hydrocarbures pétroliers (TPHs). (He et al., 2022)

Paramètre	Sol sableux	Sol limoneux	Sol argileux
pH	7.2 ± 0.1b	7.74 ± 0.2a	6.6 ± 0.1c
Sable g kg ⁻¹	834 ± 8a	416 ± 13b	90 ± 2c
limon g kg ⁻¹	108 ± 17c	436 ± 9a	273 ± 6b
Argile g kg ⁻¹	58 ± 5c	148 ± 11b	637 ± 14a
BD g cm ⁻³	1.56 ± 0.2a	1.32 ± 0.7b	1.13 ± 0.4c
OM g kg ⁻¹	10.3 ± 0.3b	7.2 ± 1.1c	34.1 ± 0.5a
Total N g kg ⁻¹	1.62 ± 0.1a	0.53 ± 0.2b	2 ± 0.1a
disponible P mg kg ⁻¹	6.3 ± 1c 7.2	7.2 ± 0.5b	14.6 ± 2a
échangeable K mg kg ⁻¹	127.5 ± 11c	136.8 ± 5b	154.9 ± 9a
Cadmium mg kg ⁻¹	0.21 ± 0.03a	0.16 ± 0.01a	0.14 ± 0.02a
TPHs mg kg ⁻¹	251.23 ± 23c	496.08 ± 18b	769.42 ± 9a

Les données sont moyennes SE. Les moyens suivis des mêmes lettres ne sont pas significativement différents à 5% selon le test de Duncan.

ANNEXE

Tableau 9 Effets des exsudats racinaires sur la biomasse des racines et des tiges foliaires de Sorghum sudanense sous différents types de sol (g) (He et al., 2022)

Type de sol	Partie végétale (g)	traitement					
		1	5	10	10-C	10-G	10-M
sol sablonneux	Racine	0.35±0.04Aab	0.32±0.09Ab	0.25±0.08Ab	0.49±0.12Aa	0.33±0.04Ab	0.32±0.05Bb
	Tige foliaire	1.74±0.12Ba	1.58±0.10Abc	1.26±0.10Ad	1.69±0.20Cab	1.56±0.08Cc	1.51±0.06Cc
Sol limoneux	Racine	0.32±0.04Ac	0.29±0.03Abc	0.23±0.02Abc	0.50±0.08Aa	0.38±0.03Ab	0.36±0.06ABb
	Tige foliaire	1.77±0.20Bbc	1.53±0.12Acd	1.29±0.13Ad	2.48±0.19Ba	2.32±0.18Ba	1.98±0.22Bb
Sol argileux	Racine	0.32±0.03Ac	0.28±0.02Acd	0.26±0.02Ad	0.48±0.0Aa	0.41±0.04Ab	0.39±0.04Ab
	Tige foliaire	1.89±0.23Abc	1.66±0.12Acd	1.38±0.08Ad	2.70±0.17Aa	2.59±0.24Aa	2.12±0.21Ab

Les données sont la moyenne de trois répliques \pm SE. Les différences indiquées par la lettre majuscule entre les types de sol et par la lettre minuscule sont liées aux Cd/exsudats. Les mêmes lettres ne sont pas significativement différentes à 5% selon le test de Duncan. Traitements : 1, 1mg kg⁻¹ Sol contaminé par des ions cadmium; 5, 5 mg kg⁻¹ Sol contaminé par ion cadmium; 10, 10mg kg⁻¹ ; 10-C, 10mg kg⁻¹sol contaminé par des ions de cadmium avec l'ajout de 20 ml de solution d'acide citrique à 50 mmolL⁻¹; 10-G, 10mg kg⁻¹ sol contaminé par des ions de cadmium avec ajout de 20 ml de solution de glycine à 50 mmolL⁻¹ ; 10-M, 10mg kg⁻¹10-M, 10mg kg⁻¹ sol contaminé par des ions de cadmium avec l'ajout de 20 ml de solution de maltose à 50 mmolL⁻¹; 10-M, 10mg kg⁻¹ de solution de maltose à 50mmolL⁻¹

ANNEXE

Tableau 10 Propriétés physicochimiques du sol utilisé pour l'expérience (Rafique et al., 2023)

Paramètre	valeur
Capacité maximale de rétention d'eau	26 ±2,00 %
Texture	Sand
Sable	90 ± 0.5%
Limon	4,5 1,00 %
Argile	4.5 ± 1.00%
EC	1.8 ± 0.5 dS m ⁻¹
Matière organique	0.2 ± 0.10%

Tableau 11 Caractéristiques du site d'échantillonnage et de la concentration des HPT-IR (Rafique et al., 2023)

Température ambiante							
Emplacement	Texture	Été	Hiver	Contaminants dominants	TPHs (g kg-1)	extractible (mg/L)	disponible P (mg/L)
L1	Sol sableux	45°C	20°C	Huile pour four	651	68	3.45
L2	Sol sablonneux	45°C	20°C	Diesel, essence	674	62	3.56
L3	Loam	45°C	20°C	Boues de pétrole	565	192	14.45
L3	Loam	35°C	10°C	Diesel vieilli et huile moteur	791	204	16.28
L4	Clay Loam	25°C	5°C	Haut indice d'octane, kérosène, diesel	650	236	21.39
L5	Loam to clay loam	40°C	15°C	Diesel, essenc	421	214	18.25

Les résumés

Résumés :

Notre étude synthétique a analysé les résultats d'articles scientifiques afin de déterminer la cohérence et la différence entre les différentes études. Parmi les polluants les plus dangereux du sol résultant de l'élimination des fluides pétroliers tels que le pétrole brut, le gaz naturel et les hydrocarbures, se trouve la pollution des sols. Les activités humaines ont utilisé des débris et des métaux lourds, qu'ils soient industriels, agricoles, ou ont produit depuis le début du développement industriel, des quantités croissantes de substances ou de déchets qui menacent la santé humaine et détruisent l'environnement. Les plantes offrent de nouvelles façons de traiter la terre. L'activité des racines vivantes aide à réduire les effets négatifs des polluants, où ils sont renforcés ou éliminés. La phytoremédiation est efficace pour réduire la propagation des polluants. Sur des terres déjà contaminées, les effets sont généralement évidents sur une courte période et peuvent être plus efficaces sur le long terme. Plusieurs espèces des végétaux et des microorganismes ont contribué afin d'assurer la dépollution avec des pourcentages bien déterminés tels que *M. sativa*; *M. albus*, *L. corniculatus* ont montré une efficacité de dégradation des gaz solides (HF) jusqu'à 95%. Luzerne a atteint le taux d'élimination de TPH, soit 74,13 %.

Mots clés : pollution, hydrocarbures pétroliers, phytoremédiation, Biodégradation,

Summaries

Our synthetic study analyzed the results of scientific articles to determine the consistency and difference between the various studies. Among the most dangerous soil pollutants from the disposal of petroleum fluids such as crude oil, natural gas, and hydrocarbons, is soil pollution. Since the beginning of industrial development, increasing quantities of substances or wastes have been produced, threatening human health and destroying the environment. Plants offer new ways of treating soil. Living roots' activity helps reduce the negative effects of pollutants, where they are reinforced or eliminated. Phytoremediation is effective in reducing the spread of contaminants. On already contaminated land, the effects are generally evident over a short period and can be more effective over the long term. Several plant species and microorganisms have contributed to ensuring depollution with well-determined percentages such as *M. sativa*, *M. albus*, and *L. corniculatus*, which have shown an effectiveness of degradation of solids (HF) up to 95%. Alfalfa achieved the TPH removal rate of 74.13%.

Keywords: pollution, petroleum, hydrocarbons, phytoremediation, Biodegradation

قامت دراستنا الموجزة بتحليل نتائج المقالات العلمية لتحديد مدى الاتساق والاختلافات بين مختلف الدراسات. من بين أخطر ملوثات التربة الناتجة عن التخلص من السوائل البترولية مثل النفط الخام والغاز الطبيعي والهيدروكربونات هو تلوث التربة. منذ بداية التطور الصناعي، تم إنتاج كميات متزايدة من المواد أو النفايات التي تهدد صحة الإنسان وتدمر البيئة. تقدم النباتات طرقاً جديدة لمعالجة التربة. يساعد نشاط الجذور الحية على الحد من الآثار السلبية للملوثات، حيث يتم تعزيزها أو القضاء عليها. المعالجة النباتية فعالة في الحد من انتشار الملوثات. وفي الأراضي الملوثة بالفعل، تظهر الآثار بشكل عام على مدى فترة قصيرة ويمكن أن تكون أكثر فعالية على المدى الطويل. وساهمت عدة أنواع من النباتات والكانتات الدقيقة في ضمان إزالة التلوث بنسب محددة بشكل جيد مثل *M. sativa* و *M. albus* و *L. corniculatus*، والتي أظهرت فعالية في تحلل المواد الصلبة (HF) تصل إلى 95%. وحقق البرسيم الحجازي معدل التخلص الهيدروكربونات بنسبة 74.13%

الكلمات الرئيسية: التلوث، الهيدروكربونات البترول، المعالجة النباتية، التحلل البيولوجي.