



Biotraitement *in vitro* des hydrocarbures aromatiques polycycliques d'un sol de garage

In vitro biotreatment of polycyclic aromatic hydrocarbons in garage soil

Hadiaratou KONATÉ¹, Vital TRAORÉ², Souleymane KONÉ^{1*}, Fotigui YAWETTA^{1*},
Drissa KEÏTA³, Arouna DEMBÉLÉ⁴, Fallaye KANTÉ^{1#}, Mohamed S. MAÏGA⁵.

¹ **Hadiaratou KONATÉ**, Doctorat Unique, Enseignante-Chercheuse,
Laboratoire de Microbiologie des Sols, Département de Biologie, Faculté des Sciences et Techniques (FST),
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B), République du Mali.
Rue : Colline de Badalabougou ; BP : E 3206 Bamako, Mali. E-mail : hadiaratk@gmail.com

^{1*} **Souleymane KONÉ**, Doctorat Unique, Maître de Conférences,
Laboratoire de Microbiologie des Sols, Département de Biologie, Faculté des Sciences et Techniques (FST),
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B), République du Mali.
Rue : Colline de Badalabougou ; BP : E 3206 Bamako, Mali. E-mail : souleymanekone65@yahoo.fr

^{1#} **Fallaye KANTÉ**, Doctorat Unique, Professeur Titulaire, Membre de la Commission Scientifique Nationale
Laboratoire de Microbiologie des Sols, Département de Biologie, Faculté des Sciences et Techniques (FST),
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B), République du Mali.
Rue : Colline de Badalabougou ; BP : E 3206 Bamako, Mali. E-mail : fallayesagakante@gmail.com

^{1*} **Fotigui YAWETTA**, Master en Sciences Biologiques, Assistant,
Laboratoire de Microbiologie des Sols, Département de Biologie, Faculté des Sciences et Techniques (FST),
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B), République du Mali.

² **Vital TRAORÉ**, Pn.D, Maître de Conférences,
Laboratoire de Chimie Analytique et Laboratoire de Microbiologie du Sol, Faculté des Sciences et Techniques,
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako, République du Mali
Rue : Colline de Badalabougou ; BP : E 3206 Bamako, République du Mali.. E-mail : vitaltraore9@gmail.com

³ **Drissa KEÏTA**, Infirmier d'Etat, Assistant,
Association Santé Communautaire Kalaban Coura ACI (ASACO-KALA-ACI), Rue 578, Bamako, République
du Mali. E-mail: keitazb12@gmail.com

⁴ **Arouna DEMBÉLÉ**, Master en Sciences Biologiques, Assistant,
Commission Nationale pour l'UNESCO au Mali. E-mail : arissouna@yahoo.fr

⁵ **Mohamed S. MAÏGA**, Doctorat Unique, Professeur Titulaire, Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique,
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Environnement, Faculté des Sciences et Techniques (FST),
Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B), République du Mali.
Tél: (00223) 20 22 32 44 ; E-mail : pamaiga@yahoo.fr
Auteur correspondant : E-mail : vitaltraore9@gmail.com

Résumé

Objectifs : Cette étude visait à biotraitier un sol de garage de réparation d'automobiles à l'aide de deux de bactéries (*Burkholderia*, *Pseudomonas*) pollué par des HAP. Elle a consisté spécifiquement à (i) déterminer la teneur en HAP contenus dans le sol de garage, enfin (ii) décontaminer *in vitro* le sol de garage. **Méthodes :** La teneur du sol en HAP a été déterminée à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie en masse. L'expérimentation a été conduite dans des boîtes de Pétri au laboratoire. Le *Pseudomonas* sp. a été isolé, puis ensemencé sur le milieu King B et la souche ORS 1518 de *Burkholderia* sur le milieu YEMA. Chaque boîte a reçu 1 mL de la solution mère du sol de garage. Trois traitements ont été considérés (solution du sol de garage + *Pseudomonas* ; solution du sol de garage + *Burkholderia*, solution du sol de garage + *Pseudomonas* + *Burkholderia*). **Résultats :** Nos résultats ont montré que le biotraitement des HAP varie avec la source de carbone, la texture du sol, sa température, son pH, sa richesse et en nutriments. Dans l'ensemble, la combinaison de *Burkholderia* + *Pseudomonas* a été la plus efficace lors du traitement en boîtes de Pétri. **Conclusion :** Ces essais ont permis d'évaluer la croissance et les performances de dégradation de deux bactéries après trois semaines de traitement, car cette étude pourrait constituer un espoir dans la traitabilité en serre et la réhabilitation *in situ* d'un sol contaminé par des HAP.

Mots-clés : Biotraitement; *in vitro*; hydrocarbures aromatiques polycycliques; sol de garage.

Abstract

Objectives : This study was to use biological treatment to remediate garage soil of car repair using two bacteria (*Burkholderia*, *Pseudomonas*) contaminated with PAHs. It specifically consisted to (i) determine PAHs content in garage soil, and (ii) *in vitro* decontamination of garage soil. **Methods:** The PAHs content in soil was determined using gas chromatography-mass spectrometry. The experiment was conducted in Petri boxes in laboratory. *Pseudomonas* sp. strain was isolated and inoculated on King B medium and *Burkholderia* ORS 1518 strain on YEMA medium. Each box received 1 mL of garage soil stock solution. Three treatments were considered (garage soil solution + *Pseudomonas*; garage soil solution + *Burkholderia*, garage soil solution + *Pseudomonas* + *Burkholderia*). **Results:** Our results showed that the bioprocessing of PAHs varies with carbon source, soil texture, temperature, pH, nutrient richness and overall. *Burkholderia* + *Pseudomonas* combination was the most effective from treatment on Petri boxes. **Conclusion :** These trials allowed the growth and degradation performance of two bacteria to be evaluated after three weeks of treatment, as this study could offer hope for the in-greenhouse treatment and *in situ* remediation of soil contaminated with PAHs.

Keywords : Biotreatment; *in vitro*; polycyclic aromatic hydrocarbons; garage soil.

Digital Object Identifier (DOI): <https://doi.org/10.5281/zenodo.23257905>

1. Introduction

Les sols constituent l'écosystème le plus précieux au monde, leur rôle dans la production et la qualité des aliments, la régulation du climat, la fourniture de matières premières et de services sont largement reconnus (Pepper et al., 2009). Mais, la qualité d'un sol peut être affectée suite à la présence en son sein des éléments dangereux, dont les polluants, parmi lesquels, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), qui sont des polluants ubiquistes détectés dans tous les écosystèmes, des régions polaires aux tropiques (Wilcke, 2007). Trente et trois de ces HAP, du fait de leur caractère ubiquitaire, leur forte toxicité et leur potentiel cancérigène, mutagène immunotoxique et reprotoxique, sont prioritaires dans les sols (Antoine, 2013 ; Sparfel, 2018 ; Mélodie, 2021). Les HAP sont d'origines naturelles (diagenèse, biogenèse) (Bensabath, 2017) ou anthropiques (phénomènes de pyrolyse-pyrosynthèse de la matière organique, combustions incomplètes) (Bensabath, 2017). L'accumulation de ces contaminants dans le sol présente des effets néfastes sur les composantes abiotiques de l'environnement (air, eau, sol) et la santé animale et humaine (WHO, 2012 ; FAO & ITPS, 2015 ; Mélodie, 2021). La pollution constitue l'une des principales menaces, qui pèsent sur les sols et les services écosystémiques qu'ils fournissent (FAO & ITPS, 2015 : 90). La contamination des sols favorise la propagation des molécules dangereuses dans le milieu et leur transfert dans les nappes phréatiques et dans la chaîne alimentaire (Mehraz & Ouali, 2019). Malgré les nombreuses études (Swartjes, 2011 ; FAO & ITPS, 2015 ; Ohanessian, 2019) menées sur la pollution des sols peu de ressources économiques sont mobilisées pour minimiser ce phénomène et inciter l'engagement public et privé dans cette pollution/décontamination.

La caractérisation des sols contaminés par les hydrocarbures met généralement en évidence la présence des hydrocarbures légers (fuel, essence, gazole) et lourds (lubrifiants, huiles lourdes, pétrole brut) (Ohanessian, 2019).

La troisième session de l'Assemblée des Nations Unies sur l'Environnement (UNEA3), tenue en décembre 2017 a adopté une résolution appelant à l'accélération des actions et de la collaboration pour gérer la pollution des sols. La principale exigence concernant la résolution est de prendre les mesures nécessaires aux niveaux national et régional, afin de bien comprendre l'étendue de la pollution des sols dans les pays et de renforcer les politiques de prévention, de réduction et de gestion de la pollution des sols (PNUE, 2017a).

La décontamination des sols consiste principalement à atténuer la concentration en polluants au niveau d'un seuil ne représentant ni un risque pour la santé humaine, ni un danger

environnemental. Les techniques de traitement utilisent des méthodes physiques, chimiques et biologiques (Ohanessian, 2019) visant à concentrer, transformer, voire éliminer les contaminants. L'application de ces techniques dépend principalement du type de pollution (organique et/ou inorganique) et des caractéristiques du polluant (accessibilité, biodégradabilité, persistance). Le choix du procédé de traitement dépend aussi des paramètres intrinsèques des techniques (spécificités de mise en œuvre, coût, rendement de dépollution) et des contraintes spécifiques au site à traiter (Abdurramane et al., 2022).

Il existe plusieurs types de techniques de dépollution pouvant être classées en fonction de leurs mises en œuvre (Ohanessian, 2019 ; Abdurramane et al., 2022) :

- Le traitement hors site (*ex situ*) consiste à excaver ou à extraire le milieu pollué (déchet, sol, eau) et à l'évacuer vers un centre de traitement adapté ;
- Le traitement sur site (on site) consiste à excaver puis à traiter sur site, le milieu pollué ;
- Le traitement en place (*in situ*) consiste à dégrader, fixer ou extraire le polluant du milieu sans excavation ;
- Le confinement (*in situ*) consiste à empêcher ou à limiter la migration des polluants.

Des méthodes d'assainissement physique de plus en plus coûteuses, comme la décontamination physique ou la séquestration dans les décharges, sont remplacées par des méthodes biologiques (Rodríguez-Eugenio et al., 2018).

Les méthodes biologiques exploitent les propriétés d'un organisme vivant, dont les microorganismes (bactéries, champignons). Cet organisme agit sur le composé polluant par divers mécanismes (détoxification, transformation, dégradation, digestion). Ces mécanismes permettent soit de rendre le contaminant moins toxique, ou soit de le diluer plus. L'avantage de ces mécanismes réside dans leur facilité d'application *in vitro* (Pillon-Smits, 2005).

Les bactéries des genres *Burkholderia* et *Pseudomonas* jouent un rôle important dans la dépollution des sols (Kanté et al., 2016 ; Konaté, 2022).

Cette étude vise à biotraitier des HAP contenus dans un sol de garage de réparation d'automobiles contaminé par les hydrocarbures aromatiques polycycliques par l'utilisation de deux bactéries (*Burkholderia*, *Pseudomonas*). Il s'agissait spécifiquement de :

- Déterminer la teneur du sol de garage en HAP ;
- Décontaminer *in vitro* le sol de garage ;
- Évaluer le taux de dégradation des HAP contenus dans ce sol d'étude.

2. Matériel et Méthodes

2.1. Zone et site d'étude

2.1.1. Zone d'étude

Le District de Bamako est situé sur le 7° 59' de longitude ouest et le 12° 40' de latitude nord sur les deux rives du fleuve Niger. Il s'étend d'Ouest en Est et du Nord au Sud sur 12 km, pour une superficie de 267 km² (MA, 2016). Il comprend six communes. Selon MA (2016), les sols de la ville de Bamako peuvent être classés en trois catégories :

- Les sols sablonneux, qui sont des sols très pauvres, d'usage difficile ;
- Les sols ferrugineux, qui sont des sols latéritiques avec par endroit constitution de carapaces, qui sont les conséquences d'une érosion pluviale et éolienne, assez forte dans les endroits où le couvert végétal s'amenuise ;
- Les sols ferralitiques, qui sont pauvres, profonds et lessivés, avec une infiltration facile des eaux, qui emportent souvent tous les éléments nutritifs (MA, 2016).

2.1.2. Sites d'étude

Les travaux ont été conduits au Laboratoire de Microbiologie du Sol (LMS) et au Laboratoire de Chimie Analytique (LCA), tous de la Faculté des Sciences et Techniques/Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTT-B) et au Laboratoire de PROSLABS, sis à Dialakorobougou, situé entre 12°48'49" N et 7°39'43" W et trouvant à 23,1 km de Bamako.

2.2. Matériel

2.2.1. Matériel physique

Le sol pollué par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) a été utilisé.

2.2.2. Souches microbiennes

La souche 1585 de *Burkholderia* choisie dans la collection du LMS et le *Pseudomonas* isolé à partir du sol d'étude ont été utilisés.

2.2.3. Milieux de culture utilisés

Les milieux de culture utilisés ont été : Yeast Extract Mannitol (YM) (Vincent, 1970), Yeast Extract Mannitol Agar (Vincent, 1970) et King B (King et al., 1954).

2.3. Méthodes

2.3.1. Échantillonnage de sol

Deux échantillons de sol ont été prélevés, en dix points distincts choisis aléatoirement, à l'aide d'une tarière de 5 cm de diamètre à une profondeur de 25 cm dans un garage de réparation d'automobiles de dimensions 20 m x 15 m, situé entre 12° 08' 46" Nord et 6° 56'

16" Ouest et se trouvant en Commune VI du District de Bamako. Un (01) kg de sol a été prélevé à chaque point. Ces échantillons ont été mélangés pour constituer un échantillon composite. Cet échantillon composite a été mis dans un sac d'échantillonnage stérile et transporté sous glace (à 4° C) au laboratoire.

2.3.2. Préparation des milieux de culture

Les milieux de culture ont été préparés séparément. Les produits composites solides des différents milieux ont été pesés à l'aide d'une balance sensible (Balance Mettler P 1 200). Les produits composites en solution ont été mesurés avec une pipette graduée. Un agitateur magnétique a été utilisé pour bien homogénéiser les différents milieux. Le pH des différents milieux a été ajusté à l'aide du pH-mètre. Les milieux ont été ensuite répartis dans des flacons de 500 mL à raison de 250 mL par flacon. Ces flacons ont été bien fermés avec la feuille d'aluminium, puis stérilisés avec leur contenu à l'autoclave. Après stérilisation, les flacons ont été retirés de l'autoclave et placés sous la hotte préalablement bien nettoyée, jusqu'à refroidissement. Après refroidissement, les milieux YMA et King B ont été coulés dans des boîtes de Pétri de 60 mm de diamètre à raison de 15 mL par boîte. Le milieu YM a été gardé dans les flacons. Il convient de souligner que 500 mL ont été préparés par milieu.

2.3.3. Détermination des hydrocarbures (HAP) contenus dans le sol de garage

La teneur en HAP a été déterminée à l'aide de la chromatographie. La chromatographie est une méthode, qui permet de séparer les constituants d'un mélange en phase homogène liquide ou gazeux. Le principe de la chromatographie consiste à entraîner l'échantillon à l'aide d'un éluant (gazeux ou liquide) appelé phase mobile (PM), qui se déplace au contact d'une seconde phase fixée sur un support (colonne ou surface plane). Celle-ci, dite stationnaire (PS), est insoluble dans la première. La teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) disponibles a été déterminée par la méthode d'extraction : la sonication. Ainsi, l'extraction par soxhlet est la méthode choisie par la norme AFNOR NF V 08 010 de 2019 pour réaliser le dosage des HAP dans un sol pollué, la durée de l'extraction varie entre 4 et 8 heures selon le type de sol. La sonication est une méthode d'extraction des composés plus rapide. Elle fait l'objet d'une procédure normalisée aux États-Unis (US-EPA, Method 35 508). L'échantillon de sol prétraité est extrait 1 heure à 35° C par sonication (1 g de sol pour 10 mL d'acétonitrile). Pour nos essais, un bain à ultrasons Branson 2210 (Branson, 47 kHz, 70 W) a été utilisé. Les dimensions de la cuve (240 x 140 x 100 cm) permettent d'extraire 8 à 10 échantillons simultanément. L'étape de séparation sol - extrait est réalisée par centrifugation à l'aide d'une centrifugeuse Hettig de type Mikroliter 221 (15 minutes, 13 000 g). Le surnageant

est ensuite récupéré et dilué à 10 mL avec le solvant d'extraction. La sonication d'un mélange étalon des 16 HAP dans les conditions de l'extraction (1 heure, 35° C) n'a révélé aucun changement de composition, ce qui est normal puisque la sonde d'ultrasons n'est pas en contact avec la solution et ne produit pas de réactions parasites. Les résultats obtenus (exprimés en µg/kg de sol) par analyse HPLC après extraction par sonication (1 heure, 35° C) sont consignés dans le tableau 1.

2.3.4. Dégradation *in vitro* du sol de garage

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Microbiologie des sols (LMS) de la Faculté des Sciences et Techniques (FST) de Bamako. Avant de procéder à la dégradation des HAP, on a isolé les *Pseudomonas* sur le milieu spécifique King B à partir de la dilution du sol contaminé conformément à la norme AFNOR NF V 08 010 de 2019 et décrit dans les travaux de Fotigii (2023). L'expérimentation a été conduite dans des boîtes de Pétri contenant les milieux King B et YEMA. La souche de *Pseudomonas* a été ensemencée sur le milieu King B et la souche ORS 1518 de *Burkholderia* sur YEMA. Après ensemencement, chaque boîte recevra 1 mL de la solution mère du sol de garage. Trois traitements ont été considérés (solution du sol de garage + *Pseudomonas* ; solution du sol de garage + *Burkholderia*, solution du sol de garage + *Pseudomonas* + *Burkholderia*). Le nombre de boîtes par traitements était de trois. Toutes les boîtes ont été incubées à 30° C pendant 30 jours dans une étuve (Kanté et al., 2016).

2.3.5. Évaluation du taux de dégradation des HAP contenus dans ce sol d'étude

Le pourcentage des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dégradés a été déterminé à partir de la formule suivante (Hock et al., 2018) :

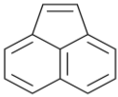
$$\% \text{ de dégradation} = (a-b) / a \times 100$$

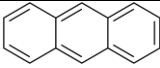
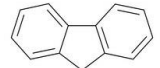
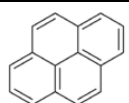
a : poids des HAP, du pétrole, diesel ou l'huile usagée résiduel dans le témoin ;

b : poids des HAP, du pétrole, diesel ou l'huile usagée résiduel dans la culture.

3. Résultats

Tableau 1. Teneur (mg/kg) en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) contenus dans le sol de garage

HAP	Structure chimique	N° CAS	Limites de détection (mg/kg de sol)	Teneur calculée (mg/kg de sol)	Norme OMS (2020) (mg/kg de sol)
Acénaphthylène		208-96-8	1,0	59, 80	0,01

Anthracène		120-12-7	1,0	208,66	0,01
Fluorène		86-73-7	1,0	28,87	0,01
Pyrène		129-00-0	1,0	117,56	0,01

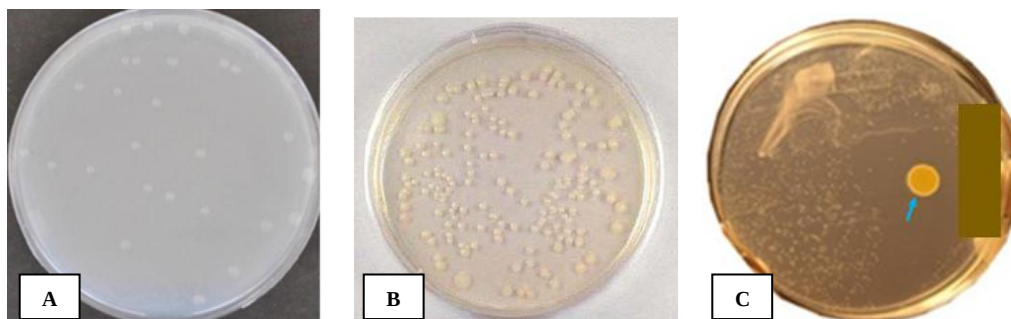
Source : élaboration des co-auteurs

Ces résultats obtenus ont montré que le sol de garage est pollué, car il renferme en son sein la forte teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et nécessite d'être assaini pour réduire les risques de santé.



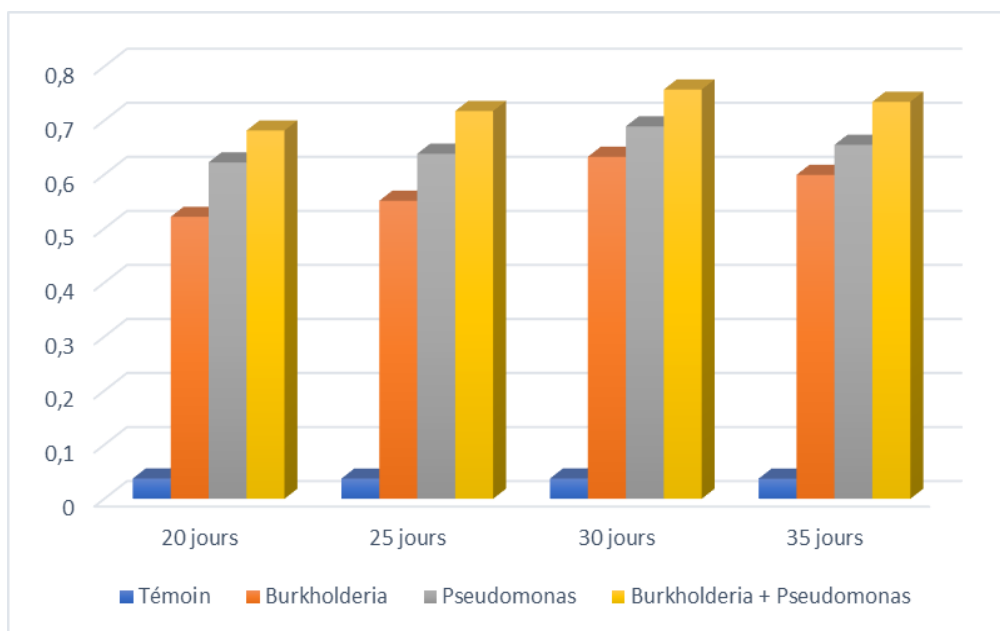
Figure 1. Title of figure.

Figure 1. Croissance et décontamination *in vitro* du sol de garage pollué par des HAP



Source : élaboration des co-auteurs

Ces résultats obtenus sur boîtes de Pétri montrant le témoin (A), la poussée de 30 à 35 colonies témoigne la présence de d'autres bactéries dans le sol d'étude, le traitement (B) prouve la capacité des deux bactéries à croître dans un sol contaminé par des HAP et le traitement (C) avec la zone de dégradation des composés organiques par les bactéries *Burkholderia* et *Pseudomonas*, ce qui démontre que ces deux bactéries pourraient dépolluer/décontaminer ces contaminants chimiques.

Figure 2. Taux de dégradation des HAP contenus dans ce sol d'étude

Source : élaboration des co-auteurs

Il ressort des résultats représentés dans la figure 2, après 30 jours d'incubation dans une étuve régulée à 30° C que le meilleur taux de biodégradation des HAP oscillerait entre 30 et 35 jours. Ce préférendum thermique (30° C) a été confirmé dans les travaux antérieurs de Traoré et al. (2017) et ceux de la FAO (2009). Aussi, le meilleur taux de biodégradation des HAP a été obtenu avec la combinaison des souches ORS 1518 et 1585 de *Burkholderia* et le *Pseudomonas* sp. (Kanté et al., 2016). Enfin, il ressort de ces résultats acquis que le consortium des bactéries naturellement présentes ou stimulées ou bioaugmentées dégradent plus les HAP par rapport aux différentes souches de bactéries utilisées séparément dans le traitement du sol de garage.

4. Discussion

Nos résultats ont montré que les sols des deux zones agroécologiques du Mali renferment des HAP (acénaphthylène, anthracène, fluorène, pyrène) et d'origine anthropique. L'atténuation naturelle est considérée comme un « procédé » de traitement *in vitro* par l'US-EPA (1984). Elle est présentée comme une méthode moins coûteuse et alternative dans la réhabilitation de site pollué. Elle a été utilisée pour traiter des sols contaminés par des hydrocarbures (Picard, 2015). Fauches (2017) et Picard (2015) ont noté que le traitement naturel nécessiterait en effet un suivi à long terme du site, car l'abattement de la pollution est très lent. Plusieurs études (Kanté et al., 2016 ; Konaté, 2022) ont démontré que la bioremédiation des HAP s'effectue via la dégradation à l'aide des bactéries ou la transformation de ces contaminants en

métabolites (intermédiaires ou finaux) moins mobiles et moins toxiques. La bioremédiation de sols contaminés par des HAP s'accompagne d'une baisse significative de leur concentration après enrichissement de ce sol en nutriments (phosphore, azote, potassium et sels minéraux) et source de carbone pour stimuler l'activité des microorganismes. De plus, l'humification du sol apparaît donc comme un procédé d'immobilisation, de biodisponibilité, de réduction de la toxicité dans les sols et de transport des HAP soit par volatilisation, soit par absorption par les microorganismes. Le biotraitement varie avec la texture du sol. Nos résultats ont montré que les HAP sont principalement adsorbés sur le sol argileux ou argilo-limoneux, composé de particules fines. La dégradation microbienne des HAP conduit à la formation de produits hydroxylés très réactifs. Ces composés sont incorporés dans les substances humiques par formation de liaisons éther, ester et C - C par des processus catalysés par des enzymes. Ces liaisons éther et C - C étant relativement stables chimiquement, un relargage potentiel des HAP semblerait peu probable. En termes d'efficacité de traitement, on observe un abattement d'environ 50 % dans les deux premières semaines de traitement, ce qui correspond essentiellement à la dégradation des HAP de 2 à 3 cycles (naphtène, acénaphthylène, anthracène, fluorène) grâce à leur caractère léger (se volatilisent vite). Néanmoins, une certaine récalcitrance du pyrène au traitement biologique s'installerait au-delà des deux semaines. Ce phénomène, à notre avis, serait lié au fait que les HAP « lourds » réfractaires (4 cycles et plus) à leur l'hydrophobicité, leur rémanence (Fauches, 2017), leur comportement dans l'environnement et leur évolution seraient tributaires de leur structure et leur masse moléculaire. Il apparaît donc nécessaire de connaître la distribution par famille (nombre de cycles). Contrairement à nos résultats obtenus, Nesrine (2017) a démontré que le pyrène était biodégradable dans les boues d'épurateurs sous conditions aérobies. Cette biodégradabilité du pyrène pourrait être due à l'activité des microorganismes et à la présence de fluorures, de calcium et de poussières d'alumine. Des études antérieures (Traoré et al., 2017) conduites sur les sols de la région de Bougouni (Mali) ont montré que la dégradation de plusieurs composés organiques serait rapide, lorsque la fluctuation de la température serait de 20 à 30° C. Ainsi, cet optimum thermique a été confirmé par les travaux de Thacharodi et al. (2023). Aussi, cette dégradation serait maximale quand la valeur moyenne du pH du sol serait comprise entre 6,8 et 7,3, légèrement inférieure à celle enregistrée par les travaux antérieurs de Traoré et al. (2017). Dans l'ensemble, la combinaison de deux bactéries de *Burkholderia* et de *Pseudomonas* a été plus efficace, car elle a montré une diminution de la concentration globale en HAP après 20 jours de traitement sur boîtes de Pétri. Boudierhem (2018) ont démontré que

ces différentes souches isolées appartiennent souvent à un nombre plus restreint de taxons, comprenant surtout les *Pseudomonas* et *Burkholderia*, ayant plusieurs traits écophysiologiques communs, qui leur confèreraient un avantage adaptatif face aux conditions oligotrophiques dans les sols contaminés. Ces résultats ont été confirmés par les travaux de Kanté et al. (2016) et ceux de Traoré et al. (2012) menés sur les sols agricoles de la Zone CMDT et de la Zone Office du Niger au Mali. Ces essais menés au laboratoire ont permis d'évaluer les performances de dégradation de deux bactéries après deux semaines de traitement et constitueraient un espoir dans la traitabilité en serre ou la réhabilitation *in situ* d'un sol contaminé par des HAP et des métaux lourds.

5. Conclusion

Ces résultats obtenus ont montré que le sol de garage est pollué, car il renferme en son sein la forte teneur en hydrocarbures aromatiques polycycliques (acénaphthylène, anthracène, fluorène, pyrène) et nécessite d'être assaini pour réduire les risques de santé. La présence de ces quatre HAP dans le sol d'étude n'entrave pas la croissance de la bactérie de *Pseudomonas* naturellement présente dans ce sol et celle de la souche ORS 1585 de *Burkholderia* utilisées. Le taux de dégradation des polluants varie selon la texture du sol, la température, l'humidité, le pH du sol, les sources de carbone et d'énergie et surtout de la performante des bactéries utilisées. Dans l'ensemble, la combinaison de deux bactéries de ORS 1585 de *Burkholderia* et de *Pseudomonas* sp. a montré un bon rendement dépassant plus de 70 % de dégradation des HAP après 20 jours de traitement en boîtes de Petri.

REFERENCES

- [1] Abdurramane, R.C. Labiod, I. Ouarzedine, R. & Meliani, K. (2022). Les agents responsables de la bioremédiation de l'environnement. Master en Sciences de la Nature et de la Vie. Département d'Écologie et Génie de l'Environnement de l'Université 8 Mai 1945 Guelma, Spécialité : Microbiologie Appliquée, Algérie, 96 p.
- [2] AFNOR NF V 08 010 (Association Française de Normalisation / Norme Française) (2019). Microbiologie des aliments- Règles générales pour la préparation des dilutions en vue de l'examen microbiologique. Paris : AFNOR Editions, France, 51 p.
- [3] Antoine, F. (2013). Étude des mécanismes intervenant dans la biodégradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques par les champignons saprotrophes telluriques en vue d'applications en bioremédiation fongique de sols pollués. Thèse de Doctorat de l'École Doctorale des Sciences de la Matière, du Rayonnement et de

l'Environnement, Filière Ingénierie des Fonctions Biologiques. Université du Littoral de la Côte d'Opale, France, 205 p.

- [4] Bensabath, T. (2017). Approche préventive pour une réduction des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) dans les fours à pyrolyse : application à la cémentation gazeuse à basse pression. Lorraine : Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine, Spécialité : Génie des Procédés et des Produits, France, 295 p.
- [5] Boudershem, A. (2018). Utilisation des souches bactériennes telluriques sahariennes dans la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures pétroliers. Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie de l'Université Kasdi Merbah-Ouargla, Spécialité : Biologie, Algérie, 133 p.
- [6] FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture). (2009). Évaluation de la contamination des sols : manuel de référence. Rome : Edition FAO, Italie, 198 p.
- [7] FAO & ITPS (Food and Agriculture Organization / The Intergovernmental Technical Panel on Soils) (2015). Carbone organique du sol Une richesse invisible. Rome : Edition FAO, Italie, 90 p.
- [8] FAO/OMS (Food and Agriculture Organization/Organisation Mondiale de la Santé) (2016). Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires. Commission du Codex Alimentarius. Rome : Édition FAO, Italie, 286 p.
- [9] Fauches, R. (2017). Transfert des hydrocarbures aromatiques polycycliques à l'échelle des bassins versants : caractérisation de sources par l'isotopie moléculaire. Paris : Thèse de Doctorat. Université de Recherche Paris Sciences et Lettres, Spécialité : Chimie, Environnement et Santé, France, 254 p.
- [10] Fotigii, Y. (2024). Étude de la croissance *in vitro* des bactéries *Burkholderia* et *Pseudomonas* dans un sol de garage contaminé par des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Bamako : Mémoire de Master. Faculté des Sciences et Techniques de l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako, Spécialité : Biotechnologie Microbienne, Mali, 58 p.
- [11] Hock, O.G. Cheng, H.C. Fang, V.L.B. Yong, W.Y. & Shing, W.L. (2018). Isolation and identification of potential fungal species for spent engine lubrication oil remediation in Peninsular Malaysia. Remediation Journal, 28 (3) : 91-95.

- [12] Kanté, F. Coulibaly, A. Traoré, V., Samaké, D. Keïta, K. & Yattara, I.I. (2016). Biodegradation of pollutants contained in the agricultural soils of Bougouni and Niono (Mali); Cahiers du CBRST, 10 : 60-79.
- [13] King, E.O. Ward, M. & Raney, D.E.J. (1954). Two simple media for the demonstration of pyocyanin and fluorescin; Journ. Lab. Clin. Méd, 44: 301 p.
- [14] Konaté, H. (2022). Biotraitement d'un sol contaminé par le cadmium (Cd) et le plomb (Pb) par l'utilisation des bactéries et des plantes légumineuses. Bamako ; Thèse de Doctorat. Faculté de Sciences et Techniques de l'Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako, Spécialité : Microbiologie Appliquée, Mali, 101 p.
- [15] MA (Ministère de l'Agriculture). (2016). Plan de campagne agricole 2016-2017. Bamako : Édition Ministère de l'Agriculture, Mali, 110 p.
- [16] Mehraz, Z. & Ouali, S. (2019). Contribution à l'atténuation de la pollution aux carburants d'un sol d'une station-service par phytoremédiation. Tizi-Ouzou : Master en Ecologie et Environnement. Département de Biologie de la Faculté des Sciences Biologiques et des Sciences Agronomiques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Spécialité : Biodiversité et environnement, Algérie, 75 p.
- [17] Mélodie, V. (2021). Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) : effets sur la santé et évaluation du risque cancérogène. Thèse de Doctorat. Faculté de Médecine Générale de l'Université Grenoble Alpes, Spécialité : Médecine Interne, France, 124 p.
- [18] Nesrine, F. (2017). Essais d'isolement et d'identification des souches bactériennes à pouvoir auto-épurateur vis-à-vis des hydrocarbures. Annaba : Thèse de Doctorat. Département de Biochimie de la Faculté des Sciences de l'Université Badji Mokhtar-Annaba, Spécialité : Microbiologie Appliquée, Algérie, 159 p.
- [19] Ohanessian, K. (2019). Optimisation de filières de traitement des eaux résiduaires industrielles par couplage de procédés physico-chimiques, thermiques et biologiques. Marseille : Thèse de Doctorat. Faculté des Sciences et Techniques de l'Université d'Aix-Marseille, Spécialité : Génie des Procédés, France, 254 p.
- [20] Pepper, I.L. Gerba, C.P. Newby, D.T. & Rice, C.W. (2009). Soil : a public health threat or savior? Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 39 (5): 416-432.
- [21] Pillon-Smits, E. (2005). Phytoremediation. Annual Review of Plant Biology, 56 : 15-36.

- [22] Picard, F. (2015). Traitement des sols contaminés aux hydrocarbures C₁₀-C₅₀ et aux métaux lourds Cu, Pb, Zn. Montréal : Thèse de Doctorat. École Polytechnique de Montréal. Université de Montréal, Spécialité : Génie Chimique, Canada, 110 p.
- [23] PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). (2017a). Assemblée des Nations Unies pour l'environnement du Programme des Nations Unies pour l'environnement : Gestion de la pollution des sols pour parvenir à un développement durable. Nairobi : Édition PNUE Troisième session, Kenya, 3 p.
- [24] Rodríguez-Eugenio, N. McLaughlin, M. & Pennock, D. (2018). Soil Pollution: a hidden reality. Rome : Edition FAO, Italie, 142 p.
- [25] Sparfel, L. (2018). Effets immunotoxiques des hydrocarbures aromatiques polycycliques. ANSES - Les Cahiers de la Recherche - Santé, Environnement, Travail, 12 ; 29-31.
- [26] Swartjes, F.A. (2011). Introduction to Contaminated Site Management. Dealing with Contaminated Sites: 3-89.
- [27] Thacharodi, A. Hassan, S. Singh, T. Mandal, R. Khan, H. A. Hussain, M. A. & Pugazhendhi, A. (2023). Bioremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons: An updated microbiological review. Chemosphere, 328 : 138-498.
- [28] Traoré, V. Coulibaly, A. Samaké, D. & Maïga, M.S. (2017). Dégradation des contaminants chimiques des sols de Bougouni (Mali) par les facteurs abiotiques de l'environnement. Annales de l'Université Abdou Moumouni, TomeXXII-A, Niamey, Niger, 144-159.
- [29] Traoré, V. Kanté, F. Yattara, II. Samaké, D. Keïta, K. Coulibaly, A. Polykova, O.V. & Kotelevtsev, S.V. (2012). Establishment of a promotional program of the valorization of the arable lands by biological depollution in the ereas of Sikasso and Segou in Mali. ISESCO Journal of Science and Technology, Rabat, Morocco, 8 (13) : 9-24.
- [30] US-EPA (United States Environmental Protection Agency). (1984). Monitored Natural Attenuation: 3 p.
<https://archive.epa.gov/ada/web/html/mna.html> (Page consultée le 09 juin 2026).
- [31] Vincent, J.M. (1970). A manual for the practical study of root nodule bacteria. International Biological Programme Handbook 15 Blackwell Scientific Publications. London : Oxford and Edinburgh, 164 p.

- [32] WHO (World Health Organization). (2012). State of the assessment of endocrine disruptors, Final Report, International Program on Chemical Safety, IPCS. Geneva : Edition World Health Organization, Switzerland, 486 p.
- [33] Wilcke, W. (2007). Global patterns of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil. *Geoderma*, 141 (3-4) : 157-166.