



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimy B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



UNIVERSITE MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI
BORDJ BOU ARRERIDJ

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences biologiques

Spécialité : Microbiologie Appliquée

Intitulé :

**Etude bibliographique sur
Les mécanismes de bioremédiation des déchets industriels
chez les bactéries.**

Présenté par :

KHIER Manal & BOUCHELAL Dahia & BENSOUCHA Achouak

Soutenu le 25/6/2022, Devant le Jury:

	Nom & Prénom	Grade	Affiliation / institution
Président :	Mme ZERROUG Amina	MCB	Université de Bordj Bou Arreridj
Encadrant :	Mme IRATNI Nadjat	MAA	Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur :	Mme SOUAGUI Yasmine	MCB	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2022/2023

Résumé

Le développement de l'industrie est une cause d'accumulation des déchets industriels qui présentent un problème environnemental majeur qui entraîne des conséquences néfastes sur les écosystèmes et la santé humaine. La bioremédiation est l'une des techniques qui a été utilisée pour résoudre ce problème, dans cette étude nous avons parlé sur la bioremédiation de quelques types des déchets industriels (hydrocarbures, plastiques et déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)) par les bactéries. Les bactéries ont une capacité importante de dégradation et de transformation de ces contaminants en forme moins toxiques, plus précisément nous avons focalisé sur les mécanismes impliqués par ces bactéries pour réaliser la bioremédiation. Selon les résultats montrés par les chercheurs ces mécanismes reposent principalement sur leur capacité métabolique, par sécrétion d'enzymes spécifiques dégradants de ces polluants et la production des biosurfactants.

Mots clés:

Bactéries, bioremédiation, déchets industriels, hydrocarbures, déchets plastiques, DEEE, mécanismes de bioremédiation, capacité métabolique, enzymes, biosurfactants.

Abstract

The development of industry is a cause of the accumulation of industrial waste, which presents a major environmental problem with harmful consequences for ecosystems and human health. Bioremediation is one of the techniques that has been used to solve this problem, and in this study we focus on the bioremediation of some types of industrial waste (hydrocarbons, plastics and waste electrical and electronic equipment (WEEE)) by bacteria. Bacteria have an important capacity to degrade and transform these contaminants into less toxic forms, and we have focused on the mechanisms involved in bioremediation by these bacteria. According to the results shown by the researchers, these mechanisms rely mainly on their metabolic capacity, through the secretion of specific enzymes degrading these pollutants and the production of biosurfactants.

Keywords

Bacteria, bioremediation, industrial waste, hydrocarbons, plastic waste, WEEE, bioremediation mechanisms, enzymes, biosurfactants.

Remerciement

Nous remercions **Allah** de nous avoir donné la santé, la volonté, et la patience d'entamer et de terminer ce travail.

On tient de remercier notre encadrante **IRATNI Nadjet** pour nous avoir suivis et conseillés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

On remercie les membres du jury, la présidente **ZERROUG Amina**, l'examinatrice **SOUAGUI Yasmine** et l'encadrante **IRATNI Nadjet**, pour leur présences, pour leur lecture attentive de notre mémoire ainsi que pour les remarques qu'ils nous adresseront lors de cette soutenances afin d'améliorer notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Table des matières

Introduction	1
Chapitre I : Les bactéries	
I.1.Généralités	
I.1.1.Nutrition	3
I.1.2.Respiration	3
I.1.3.Reproduction	4
I.1.4.Mobilité	4
I.1.5.Distribution	4
I.2.Structure des bactéries	4
I.3.Classification	5
I.4.Nomenclature	6
I.5.Croissance	7
I.6.Importance	8
Chapitre II: Déchet industriels et bioremédiation	
II.1.Les déchets industriels	
II.1.1.Définition	10
II.1.2.Les types des déchets industriels	
II.1.2.1.Les hydrocarbures	10
II.1.2.2.Les déchets plastiques	10
II.1.2.3.Les déchets d'équipements électriques et électroniques	11
II.2.La bioremédiation	
II.2.1.Définition	11
II.2.2.Principe	11
II.2.3.Techniques de bioremédiation	
II.2.3.1.La bioaugmentation	12
II.2.3.2.Les biofiltres	12
II.2.3.3.Les bioréacteur	13
II.2.3.4.La biostimulation	13
II.2.3.5.La bioventilation	14
II.2.3.6.Le compostage	14
II.2.3.7.Le land farming	14
II.2.3.8.Le bioempilage	14
II.2.4.Les avantages et les désavantage	
II.2.4.1. Les avantages de bioremédiation	15

II.2.4.2. les désavantages de bioremédiation.....	15
II.2.5. Les facteurs affectant la bioremédiation	
II.2.5.1. Facteurs nutritionnels.....	16
II.2.5.2. Activité de l'eau.....	16
II.2.5.3. l'oxygène.....	16
II.2.5.4. pH.....	17
II.2.5.5. Température.....	17
Chapitre III : Les mécanismes de bioremédiation des déchets par les bactéries	
III.1. Les hydrocarbures.....	18
III.2. Les déchets plastiques.....	23
III.3. Les déchet d'équipements électriques et électroniques.....	26
Conclusion	29
Références bibliographiques	31

Liste des figures

Figure 1: structure générale d'une bactérie.....	5
Figure 2: courbe de croissance bactérienne.....	8
Figure3: Schéma d'un système de biofiltration présentant la place des microorganismes et leur fonction dans le traitement.....	13
Figure 4: la biodégradation du pyrène par <i>Mycobacterium</i>	20
Figure 5: La représentation schématique des mécanismes de biodégradation aérobie et anaérobie.....	21
Figure 6: Implication du biosurfactant (rhamnolipide) produit par <i>Pseudomonas</i> sp dans l'absorption des hydrocarbures.....	22
Figure 7: Mécanisme de biodégradation par les bactéries.....	23
Figure 8: organigramme illustrant l'action enzymatique.....	25
Figure 9 : Voie de biodégradation de l'éther diphenylique par <i>Sphingomonas</i> sp. Souche SS3, <i>Sphingomonas</i> sp. <i>Pseudomonas cepacia</i> et <i>Cupriavidus</i> sp en conditions aérobies.....	28

Liste des abréviations

BTEX: Benzène, Toluène, Xylènes

DEEE: Déchets d'équipements électriques et électroniques

FTIR : Fourier Transform Infra Red spectroscopy

LDPE: less Density polyethylene

LLDPE: linéaire less Density polyethylene

MHET : acide mono (2-hydroxyéthyl) téréphtalique

MHETase : acide mono (2-hydroxyéthyl) téréphtalique hydrolase

OS: Oily sludge

PBDE: Polybrominated diphenyl ethers

PCB: polychlorobiphenyls

PCL: Polycarbolactone

PE: polyethylene

PET: polythene téréphtalate

PETase: poly ethylene téréphtalate hydrolase

PHB : polyhydroxybutyrate

PVA: poly vinylalcohol

PVC : polychlorurure de vinyle

PWS: petroleum waste sludge

TPH : hydrocarbures pétroliers totaux

Introduction

Les industries sont les principaux moteurs de l'économie mondiale, mais elles sont aussi les principaux pollueurs en raison du rejet de déchets dangereux contenant des polluants organiques et inorganiques, qui entraînent une pollution de l'environnement (sol et eau) et de graves effets toxiques chez les êtres vivants. Technologie propre, peu coûteuse et respectueuse de l'environnement, la bioremédiation peut constituer une alternative durable aux technologies conventionnelles pour le traitement et la gestion des déchets industriels afin de protéger l'environnement et la santé humaine (**Gaurav et Ram, 2016**).

La bioremédiation offre plusieurs avantages par rapport aux techniques conventionnelles telles que l'enfouissement ou l'incinération. La bioremédiation peut être effectuée sur place, elle est souvent moins coûteuse et la perturbation du site est minimale, elle élimine les déchets de façon permanente, elle élimine la responsabilité à long terme, et elle est mieux acceptée par le public, avec l'encouragement de la réglementation, et elle peut être associée à d'autres méthodes de traitement physique ou chimique (**Boopathy, 2000**).

Par définition, la bioremédiation est l'utilisation des organismes vivants, principalement des microorganismes, pour dégrader contaminants environnementaux en des formes moins toxiques. Elle utilise des bactéries et des champignons ou des plantes d'origine naturelle pour dégrader ou détoxifier des substances dangereuses pour la santé humaine et l'environnement. Les microorganismes peuvent être indigènes à une zone contaminée ou ils peuvent être isolés d'ailleurs et amenés au les sites contaminés (**Mary, 2011**).

Le processus de bioremédiation dépend principalement de microorganismes qui attaquent enzymatiquement les polluants et les transformer en produits inoffensifs. Comme bioremédiation ne peut être efficace que là où les conditions environnementales le permettent la croissance et l'activité microbiennes, son application implique souvent la manipulation des paramètres environnementaux pour permettre la croissance et la dégradation microbiennes se déroulent à un rythme plus rapide (**Chandrakant et Shwetha, 2011**). La recherche dans le domaine de la bioremédiation est fortement concentrée sur les processus majoritairement du domaine bactérien, qui possèdent diverses applications de la bioremédiation. Dans de nombreuses applications où les bactéries sont connues pour être des acteurs clés de la bioremédiation (**Divjot et al., 2021**).

Donc, quels sont les mécanismes utilisés par les bactéries pour bioremedier les déchets industriels ?

Le présent document est consacré à une recherche bibliographique sur les mécanismes de bioremédiation des déchets industriels par les bactéries.

Il est composé de trois chapitres:

Le premier chapitre parle sur les bactéries (généralités, structure, classification, etc.....).

Le deuxième chapitre dédie à la bioremédiation (définition, principe, techniques de bioremédiation, les avantages et les désavantage, les facteurs affectant la bioremédiation) ainsi les déchets industriels (les hydrocarbures, les déchets plastiques, les déchets d'équipements électriques et électroniques).

Le troisième chapitre est consacré aux mécanismes de bioremédiation des déchets (les hydrocarbures, les déchets plastiques, les déchets d'équipements électriques et électroniques) chez les bactéries.

Chapitre I

Chapitre I: les bactéries

I.1.Généralités

Les bactéries sont des organismes microscopiques unicellulaires qui vivent en très grand nombre dans presque tous les environnements à la surface de la terre (**Kara, 2011**). Elles ne possèdent pas de noyau différencié ce qui les classe dans les procaryotes, mais un chromosome circulaire dépourvu d'une membrane nucléaire. Ce chromosome, qui constitué d'un double brin d'ADN (acide désoxyribonucléique) (**Dominique, 2009**).

Elles sont dépourvues de mitochondries, d'appareil de golgi, de plaste et de réticulum endoplasmique (**Trivedi et al., 2010**). Leur taille varie de 0.5 à 2 μ m de diamètre et d'environ 1 à 10 μ m de long (**Frank, 2009**). Leur forme peut être sphérique (cocci), en bâtonnet (bacilles), incurvée (vibrions) ou spiralée (spirochetes) (**Charles et Jean, 2005**).

Les bactéries peuvent être globalement divisées en deux groupes principaux, bactérie à Gram positif et bactérie à Gram négatif, en fonction de la structure de leur paroi cellulaire (**Geoffrey et Norman, 2013**).

Une bactérie est douée de métabolisme (ensemble des modifications chimiques afin de subvenir à ses besoins énergétiques et à la formation et l'entretien de ses structures). Elle est capable de croître et de se multiplier en présence de substances nutritives (**François, 2003**).

I.1.1.Nutrition

Certaines bactéries peuvent survivre sur de simples composés minéraux. D'autres ont des besoins alimentaires très complexes. Les bactéries autotrophes peuvent fabriquer des nutriments organiques des composés tels que les glucides, les protéines et les vitamines à partir de simples substances inorganiques telles que le soufre, l'eau et le dioxyde de carbone dans l'air. Les bactéries hétérotrophes doivent absorber les nutriments organiques de leur environnement. Ce groupe comprend les bactéries pathogènes ou pathogènes qui dépendent de leur hôte pour se nourrir, et les saprophytes, qui se nourrissent des restes en décomposition d'autres organismes (**Sherman, 2012**).

I.1.2.Respiration

Les bactéries peuvent également être classées en fonction de leurs besoins en oxygène pour le métabolisme et la production d'énergie. Les types de bactéries qui ont besoin d'oxygène pour métaboliser les nutriments afin de libérer de l'énergie sont appelées bactéries aérobies. Les anaérobies sont des bactéries qui n'ont pas besoin d'oxygène pour respirer. Ces derniers portent de l'oxygène et mourront s'ils sont conservés dans un environnement oxygéné. Dans les deux classes, il existe des bactéries aérobies et anaérobies obligatoires et facultatives. Les aérobies obligatoires ont besoin d'oxygène pour respirer car ils ne peuvent pas fermenter pour libérer de l'énergie, tandis que les anaérobies obligatoires sont

Chapitre I: les bactéries

empoisonnés par l'oxygène. Les anaérobies facultatifs peuvent respirer dans des conditions aérobies ou anaérobies, tandis que les microaerophile nécessitent un gradient d'oxygène spécifique pour la respiration (**Pikranjit, 2017**).

I.1.3.Reproduction

Elles ont la propriété de pouvoir se multiplier (reproduction asexuée) extrêmement rapidement lorsque les conditions de milieu sont favorables. Certaines d'entre elles sont capables de former des spores pour résister à des conditions de milieu défavorables (**Hurbert et Carole, 1998**).

I.1.4.Mobilité

Les bactéries peuvent se déplacer de différentes manières en fonction de leurs caractéristiques. Nombre d'entre elles possèdent une structure similaire appelée flagelle. Le flagelle tourne rapidement sur lui même et fait avancer la bactérie. D'autres bactéries se déplacent en produisant une couche de bave et en glissant. D'autres bactéries encore possèdent une série de filaments appelés fimbriae qui dépasse de la surface de la cellule. Les fimbriae permettent aux bactéries de s'accrocher aux surfaces et d'avancer plus facilement. Certaines bactéries contiennent de minuscules particules minérales sensibles au champ magnétique terrestre. Ces particules agissent comme une boussole et aident les bactéries à se déplacer dans une direction donnée (**Anne, 2014**).

I.1.5.Distribution

Les bactéries sont omniprésentes dans tout les environnements dans l'air, le sol, l'eau et dans le corps des humains et des animaux (**Chetana, 2013**).

I.2.Structure des bactéries

La structure fondamentale, plus simple que celle de la cellule eucaryote, est constituée d'éléments constants chez toutes les bactéries (paroi, membrane cytoplasmique, cytoplasme contenant le chromosome bactérien et les ribosomes) et de composants facultatifs qui n'existent que chez certaines bactéries (pili, inclusions, capsule, flagelles, spores, ADN extra chromosomique des plasmides) (**Dominique et al., 2013**).

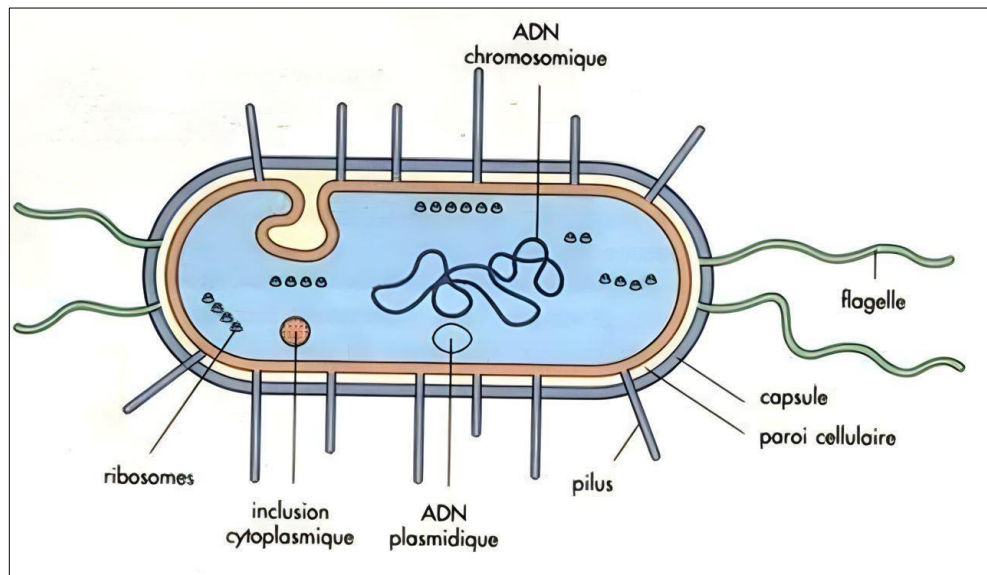


Figure 1: structure générale d'une bactérie (Tony et Poul, 1997).

I.3. Classification

La classification des organismes vivants s'appelle taxonomie. Le but de la taxonomie bactérienne est vraiment double. Premièrement, son but est de pouvoir distinguer différentes bactéries. Deuxièmement, et tout aussi important, son but est d'identifier les similitudes entre différentes bactéries afin que les relations phylogéniques puissent être déterminées. En raison de ces deux objectifs, les classifications des bactéries sont hiérarchiques; autrement dit, des groupes d'espèces étroitement apparentées sont organisés en genres, des genres similaires sont organisés en familles, des familles en ordres, et ainsi de suite (Francis, 2001).

La classification des bactéries (taxonomie) a d'abord été fondée sur l'étude de leurs caractères phénotypiques, puis de leurs caractères génotypiques:

Caractères phénotypiques

- Morphologie: forme de la bactérie, mobilité éventuelle traduisant la présence de flagelles, disposition des flagelles, présence éventuelle de spores, coloration de Gram, aspect des colonies, etc.
- Propriétés biochimiques: relation avec l'oxygène, utilisation de différentes sources de carbone, de différentes voies métaboliques (produits de fermentation, de dégradation enzymatique), besoin en facteurs de croissance.
- Nature des antigènes de surface.
- Sensibilité aux antibiotiques.

Chapitre I: les bactéries

-Plus rarement on utilise:

-la sensibilité à des bactériophages.

-l'analyse des constituants de la paroi.

-l'analyse chromatographique de constituants ou de métabolites de la bactérie (en phase gazeuse ou en phase liquide).

Caractères génotypiques:

Ils reposent sur l'étude du génome:

-La composition en bases de l'ADN (GC%) peut varier selon les espèces.

-La mesure du pourcentage d'homologie de l'ADN avec une souche de référence (déterminé par hybridation) est une méthode qui a été très utilisée en taxonomie. On considère que des souches ayant plus de 70% d'homologie appartiennent à la même espèce. Ce critère a conduit à modifier des classifications qui avaient été établies en fonction de caractères phénotypiques.

-Le séquençage du gène de l'ARN ribosomal 16S, gène qui comporte des régions conservées et des régions variables, est également très employé pour la classification des bactéries (Nauciel et vildé, 2005).

I.4.Nomenclature

La nomenclature est la branche de la taxonomie qui s'occupe de donner des noms scientifiques aux taxons, sur la base d'un système de classification particulier et conformément aux règles et conventions internationales convenues.

La nomenclature bactérienne suit également les mêmes règles que celles proposées par le botaniste suédois **Carl von Linné**, qui a inventé le système moderne de nomenclature binomiale.

Les noms scientifiques des niveaux taxonomiques supérieurs au genre sont toujours en majuscules, mais pas en italique. Par exemple, Phylum Proteobacteriae.

Dans le système de nomenclature binomiale, le nom scientifique d'une bactérie comprend un nom de genre (commençant par une majuscule) et un nom d'espèce. Le genre et l'espèce doivent être écrits en italique ou soulignés par exemple, *Staphylococcus aureus* ou Staphylococcus aureus.

Le genre est généralement un nom latin, tandis que l'espèce se réfère à un taxon défini d'organismes au sein d'un genre particulier.

Le genre et l'espèce sont créés sur la base d'une propriété de la bactérie, par exemple: *Staphylococcus aureus* doit son nom à sa disposition en grappe (Staphyle signifie grappe de

Chapitre I: les bactéries

raisin) et au type de pigmentation qu'il produit (aureus signifie jaune doré) (**Apurba et Sandhya, 2019**).

I.5.Croissance

La croissance bactérienne est définie comme une augmentation du nombre de cellules, elle est également appelée multiplication. Les cellules se divisent en un processus appelé fission binaire, au cours duquel chaque cellule se divise en deux cellules filles. À la génération suivante, chacune de ces cellules filles se divisent en deux cellules similaires et ainsi de suite jusqu'à ce que les conditions environnementales ne favorisent plus la croissance en raison d'un manque de nutriments, d'une accumulation de produits toxiques, de changements de pH, de température et de disponibilité de l'oxygène, ou de l'application d'agents physiques ou chimiques qui tuent les bactéries (**Chris, 2014**).

En laboratoire, les bactéries peuvent être satisfaites d'exigences environnementales et nutritives essentielles. De cette façon, leurs modèles de croissance peuvent être étudiés (**Joanna, 2013**).

Dans des conditions idéales, la croissance bactérienne peut être décrite par quatre phases différentes: la phase de latence, la phase exponentielle, la phase stationnaire et la phase de déclin. Cette croissance se produit dans un "système fermé" dans lequel aucun nutriment n'est ajouté en plus de ceux contenus dans le milieu initial et aucun déchet n'est éliminé ou neutralisé les conditions ne sont pas modifiées de l'extérieur au fur et à mesure de la croissance (**Karin et Robert, 2022**).

Phase de latence: elle peut durer quelques minutes ou plusieurs heures, car les bactéries ne se divisent pas immédiatement, mais subissent une période d'adaptation avec une activité métabolique vigoureuse.

Phase exponentielle: une division cellulaire rapide se produit, déterminée par les conditions environnementales.

Phase stationnaire: elle est atteinte lorsque l'épuisement des nutriments ou les produits toxiques entraînent un ralentissement de la croissance jusqu'à ce que le nombre de nouvelles cellules produites équilibre le nombre de cellules qui meurent. Les bactéries ont alors atteint leur densité cellulaire ou rendement maximal.

Phase de déclin: elle est marquée par une diminution du nombre de bactéries vivantes (**Lakshaman, 2012**).

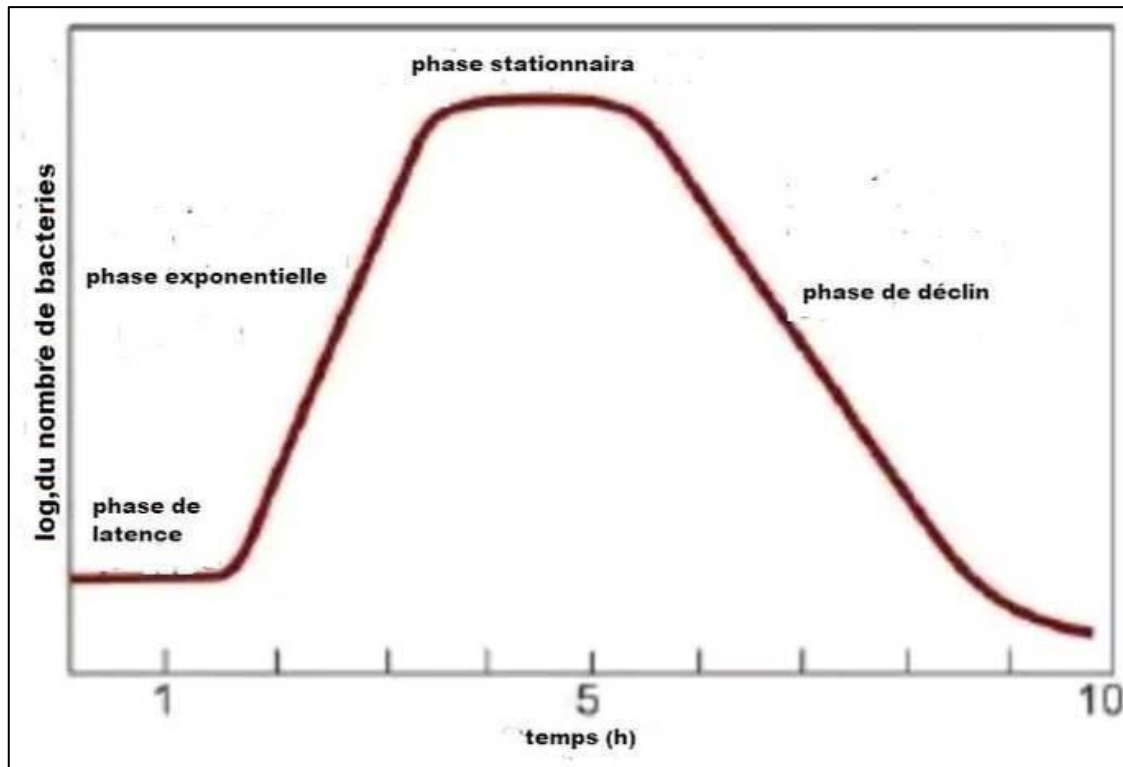


Figure 2: courbe de croissance bactérienne (Rajesh et Rattan, 2008)

I.6.Importance

Les bactéries sont importantes à tous les stades de la vie humaine. Elles sont idéales pour toutes sortes de recherches génétiques car elles ont la capacité de croître et de se multiplier en peu de temps. Elles sont à la fois nuisibles et utiles pour l'environnement et les animaux, y compris l'homme.

Voici quelques-uns des aspects bénéfiques des bactéries:

- Les bactéries contribuent à la fixation de l'azote dans le sol.
- Elles dégradent une variété de composés organiques et contribuent à l'élimination de la matière organique (Srajan, 2017).
- Les bactéries sont utilisées pour la biosynthèse de substances utiles dans l'industrie biotechnologique, pour la production de probiotiques en médecine et en agriculture, pour le traitement des eaux usées et l'assainissement des sols dans le domaine de l'ingénierie environnementale (Volodymyr, 2011).
- Les bactéries produisent des métabolites comme des enzymes, des antibiotiques, des acides organiques et d'autres produits de grande valeur (Pradeep, 2022).
- Les bactéries, par exemple les bactéries lactiques, telles que *Lactobacillus* et *Lactococcus*, sont utilisées depuis des milliers d'années dans la préparation d'aliments fermentés, tels que

Chapitre I: les bactéries

le fromage, les cornichons, la sauce soja, la choucroute, le vinaigre, le vin et le yaourt.

-Les bactéries sont utilisées pour la bioremédiation des déchets industriels toxiques (prasanna et Dharani, 2018).

Chapitre II

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

II.1. Les déchets industriels

II.1.1. Définition

Les déchets industriels correspondent à l'ensemble des déchets produits par les entreprises industrielles, commerciales et artisanales, dont l'élimination incombe normalement à celles-ci. Ces déchets regroupent des catégories très différentes du fait de leur variété, de leur origine et de leur quantité les déchets industriels sont souvent considérés comme dangereux ou toxiques (**Olanrewaju et al., 2004**).

II.1.2. Les types des déchets industriels

II.1.2.1. Les hydrocarbures

Le terme hydrocarbures désigne des composés organiques, qui ne contiennent que du carbone et d'hydrogène (**Vishal et Kamlesh, 2013**). Les hydrocarbures sont les contaminants organiques les plus couramment trouvés dans les écosystèmes (**Emiliana et al., 2023**). La contamination par les hydrocarbures est l'un des problèmes environnementaux importants résultant des activités liées à la production et à l'utilisation de produits pétrochimiques (**Hassan et al., 2020**). La toxicité des hydrocarbures affecte les humains, les plantes, les animaux et les microorganismes avec des conséquences sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes. La contamination de l'environnement par les hydrocarbures et leurs dérivés a provoqué l'extinction locale de nombreuses espèces d'animaux et de plantes (**Emiliana et al., 2023**).

II.1.2.2. Les déchets plastiques

Les plastiques sont des polymères organiques contenant des molécules composées de longues chaînes de carbone formées par polymérisation, ils sont constitués de carbone et d'hydrogène, avec de l'azote, du soufre et d'autres matériaux organiques et inorganiques divers dérivés des combustibles fossiles. Les plastiques sont divisés en plastiques naturels, plastiques semi synthétiques, plastiques synthétiques, thermoplastiques et thermodurcissables (**Angga et al., 2021**). La production mondiale de plastique a augmenté au fil des ans en raison des vastes applications des plastiques dans de nombreux secteurs. La demande continue de plastiques a provoqué l'accumulation de déchets plastiques dans la décharge consommée beaucoup d'espaces qui ont contribué au problème environnemental (**Shafferina et al., 2016**).

La pollution plastique est l'augmentation du nombre de bouteilles en plastique et autres dans l'environnement terrestre, ce qui a des conséquences négatives sur les habitats de la faune et de la flore, ainsi que sur les êtres humains. Les plastiques qui agissent comme des polluants sont classés en micro, méso ou macro débris, en fonction de leur taille. Les plastiques sont peu coûteux et durables et, par conséquent, les niveaux de production de plastique par l'homme sont élevés cependant, la structure chimique de la plupart des plastiques les rend résistants à

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

de nombreux processus naturels de dégradation et par conséquent, ils sont lents à se dégrader. Ces deux facteurs ensemble ont conduit à une forte prééminence de la pollution plastique dans l'environnement. Cette pollution peut toucher la terre, les cours d'eau et les océans (Govind, 2019).

II.1.2.3. Les déchets d'équipements électriques et électroniques

Déchets électriques et électroniques, également appelés déchets électroniques ou déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) (Sachant, 2013). Les déchets électroniques sont définis comme des produits électroniques non désirés inutilisés ou démodés qui approchent de la fin de leur vie utile, les déchets électroniques sont considérés comme la catégorie de déchets solides dangereux qui connaît la croissance la plus rapide au monde (Kingsley et al., 2022). Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) deviennent un problème majeur pour le monde entier, leurs émissions toxiques se mêlant au sol et à l'air et provoquant des effets nocifs pour l'ensemble du biote, directement ou indirectement les impacts directs comprennent la libération d'acides, de composés toxiques, de métaux lourds, de produits chimiques cancérigènes et d'effets indirects tels que la bioamplification des métaux lourds (Sivakumaran, 2013).

II.2. La bioremédiation

II.2.1. Définition

La bioremédiation est le processus d'utilisation d'organismes vivants, de micro-organismes, pour dégrader les polluants et les contaminants de l'environnement et les transformer en une forme moins toxique (Anwasha et al., 2016).

II.2.2. Principe

La bioremédiation est définie comme le processus par lequel les déchets organiques sont dégradés biologiquement dans des conditions contrôlées jusqu'à un état inoffensif, ou à des niveaux inférieurs aux limites de concentration établies par les autorités réglementaires, pour que la bioremédiation soit efficace, les microorganismes doivent attaquer enzymatiquement les polluants et les convertir en produits inoffensifs. Comme la bioremédiation ne peut être efficace que lorsque les conditions environnementales permettent la croissance et l'activité microbiennes, son application implique souvent la manipulation des paramètres environnementaux pour permettre la croissance et la dégradation microbiennes à un rythme plus rapide. Les techniques de bioremédiation sont généralement plus économiques que les méthodes traditionnelles telles que l'incinération, et certains polluants peuvent être traités sur place, ce qui réduit les risques d'exposition pour le personnel chargé du nettoyage, ou une exposition potentiellement plus large à la suite d'accidents de transport. La bioremédiation étant basée sur l'atténuation naturelle, le public la considère comme plus acceptable que les

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

autres technologies. La plupart des systèmes de bioremédiation fonctionnent dans des conditions aérobies, mais un système fonctionnant dans des conditions anaérobies peut permettre à des organismes microbiens de dégrader des molécules autrement récalcitrantes (shilpi, 2012).

II.2.3. Techniques de bioremédiation

Selon le degré de saturation et d'aération d'une région, plusieurs approches sont utilisées. Le terme *in situ* se réfère aux procédures qui sont appliquées au sol et aux eaux souterraines sur place avec un minimum de perturbations. Les procédures *ex situ* sont celles qui sont utilisées sur le sol ainsi que sur les eaux souterraines qui ont été évacuées d'un endroit par excavation (sol) et pompage (eaux souterraines) (eau) (Namrata, 2019).

Techniques de bioremédiation *in situ*

Les techniques de bioremédiation *in situ* consistent à traiter les contaminants sur le site de la pollution, où ils peuvent être dégradés biologiquement dans des conditions naturelles. Cette technique ne nécessite pas d'excavation et implique donc beaucoup moins d'efforts de Transport et de déplacement physique que les techniques de bioremédiation *ex situ* (Oindrila et al., 2021).

Techniques de bioremédiation *ex situ*

Ces techniques consistent à extraire les polluants des sites pollués et à les transporter ensuite vers un autre site pour les traiter. Les techniques de bioremédiation *ex situ* sont généralement envisagées en fonction du coût du traitement, de la profondeur de la pollution, du type de polluant, du degré de pollution, de la localisation géographique et de la géologie du site pollué (Christopher et al., 2016).

Il existe plusieurs techniques de bioremédiation ; certaines d'entre elles sont énumérées ci- dessous:

Bioaugmentation, Biofiltres, Bioréacteurs, Biostimulation, Bioventilation, Compostages, Land farming traitement des terres /Bioréacteurs à lit préparé, Bioempilage (Rajendra, 2021).

II.2.3.1. La Bioaugmentation

L'ajout des microorganismes spécifiques au sol pollué est appelé bioaugmentation. Les polluants sont des molécules complexes et les microorganismes ne sont pas capables à eux seuls de dégrader certains polluants. Les exemples de tels polluants sont: les polychlorobiphényles (PCB), le trinitrotoluène (TNT), les hydrocarbures polyaromatiques (HPA) et certains pesticides. Il est désormais possible d'ajouter une combinaison de microorganismes, appelé consortium ou cocktail de microorganismes, pour réaliser la bioaugmentation (Pritee, 2019).

II.2.3.2. Les biofiltres

La technique du biofiltre est principalement utilisée pour éliminer les contaminants gazeux est réalisée à l'aide de colonnes contenant des microorganismes (Wurood et Zainab, 2022).

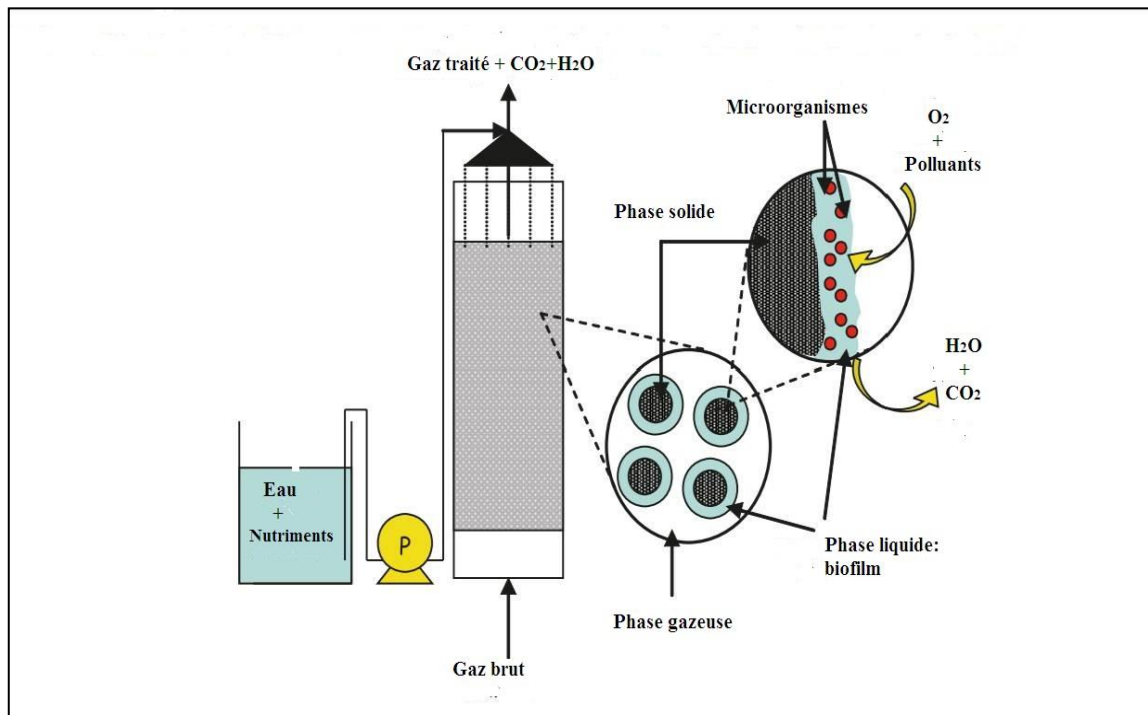


Figure3: Schéma d'un système de biofiltration présentant la place des microorganismes et leur fonction dans le traitement (Yves et al., 2009).

II.2.3.3. Les bioréacteurs

Le bioréacteur, comme son nom l'indique, est un récipient dans lequel les matières premières sont converties en produit(s) spécifique(s) à la suite d'une série de réactions biologiques. Il existe différents modes de fonctionnement des bioréacteurs : batch, fed batch, par batch séquencés, en continu et en multistage. Le choix du mode de fonctionnement dépend principalement de l'économie de marché et des dépenses d'investissement. Les conditions dans un bioréacteur soutiennent le processus naturel des cellules en imitant et en maintenant leur environnement naturel pour fournir des conditions de croissance optimales. Les échantillons pollués peuvent être introduits dans un bioréacteur sous forme de matière sèche ou de boue ; dans les deux cas, l'utilisation d'un bioréacteur pour traiter un sol pollué présente plusieurs avantages par rapport à d'autres techniques de bioremédiation *ex situ*. L'excellent contrôle des paramètres du processus biologique (température, pH, taux d'agitation et d'aération, concentrations du substrat et de l'inoculum) est l'un des principaux avantages de la bioremédiation en bioréacteur. La capacité de contrôler et de manipuler les paramètres du processus dans un bioréacteur implique que les réactions biologiques à

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

l'intérieur peuvent être améliorées pour réduire efficacement le temps de bioremédiation (Christopher et al., 2016).

II.2.3.4.La biostimulation

La biostimulation consiste à stimuler la croissance des microorganismes indigènes par l'ajout de facteurs de croissance tels que des nutriments comme le phosphore et l'azote. Parfois, il n'est pas possible, dans des circonstances normales, de procéder à une dépollution efficace par les microorganismes indigènes ; il faut donc les stimuler en ajoutant des nutriments, de l'O₂ ou d'autres agents oxydants. Les agents stimulants sont généralement appliqués sous terre au moyen de puits d'injection. Dans la plupart des systèmes côtiers fortement contaminés par les hydrocarbures, la disponibilité des nutriments est le facteur limitant de la biodégradation. Cette méthode présente le principal avantage d'impliquer des microorganismes autochtones qui sont bien adaptés et distribués dans l'environnement. Pour la même raison, même la géologie du site, lorsqu'elle est complexe, peut devenir un facteur limitant (Israel et al., 2020).

II.2.3.5.La Bioventilation

Dans cette technique, de l'oxygène est apportée aux zones non saturées, ce qui augmente l'activité des microbes indigènes pour une meilleure bioremédiation. Dans la bioventilation, l'humidité et les nutriments sont fournis pour augmenter la bioremédiation. La bioventilation a été prise en considération pour les zones contaminées par des produits pétroliers. Il est employé à grande échelle en raison de sa compatibilité. Afin d'augmenter le taux de dégradation des polluants, cette méthode s'associe au processus de ventilation physique (Divjot et al., 2021).

II.2.3.6.Le compostage

Il peut être utilisé pour les techniques de bioremédiation *ex situ* et *in situ*. Des matières organiques sont ajoutées au sol contaminé, ce qui améliore la porosité et la circulation de l'air dans le sol. L'énergie est libérée lors de la dégradation de la matière organique, ce qui entraîne une augmentation de la température qui stimule les activités des microorganismes mésophiles et thermophiles. Ceci a été soutenu par AdeOluwa et al. (2015), qui ont rapporté que le compost peut avoir des effets d'amélioration sur les sols pollués par le pétrole et que les effets augmentent avec l'augmentation du niveau d'amendement (Elizabeth et al., 2022).

II.2.3.7.Le land farming

Le but de cette méthode est de favoriser la croissance des microorganismes indigènes et de faciliter leur dégradation aérobie des contaminants. C'est une méthode simple où le sol contaminé est excavé et étalé sur une zone préparée, et labouré périodiquement jusqu'à ce que les contaminants soient dégradés. Des nutriments et minéraux sont incorporés pour favoriser

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

la croissance des espèces indigènes (Arpita et al., 2014).

II.2.3.8.Le Bioempilage

Dans le cas du bioempilage, les sols excavés sont mélangés à des amendements, placés sur une zone de traitement et bioremediés par une aération forcée. Les contaminants sont réduits en dioxyde de carbone et en eau. Les conditions telles que les niveaux d'humidité et de nutriments, la chaleur, l'oxygène et le pH sont contrôlées afin d'améliorer le processus de biodégradation (Divjot et al., 2022).

II.2.4.Les avantages et les désavantage

II.2.4.1. Les avantages de la bioremédiation

- La bioremédiation est un processus naturel et est donc perçue par le public comme un processus acceptable de traitement des déchets pour les matériaux contaminés tels que le sol. Les microbes capables de dégrader la contamination augmentent en nombre lorsque le contaminant est présent ; lorsque le contaminant est dégradé, la population biodégradant diminue (Arpita et al., 2014).

-Moins d'énergie est nécessaire par rapport aux autres technologies (Arpita et al., 2014).

-En théorie, la bioremédiation est utile pour la destruction complète d'une grande variété de contaminants. De nombreux composés légalement considérés comme dangereux peuvent être transformés en produits inoffensifs. Cela élimine le risque de responsabilité future lié au traitement et à l'élimination des matériaux contaminés (vidali, 2001).

-Au lieu de transférer des contaminants d'un milieu environnemental à un autre, par exemple, de la terre à l'eau ou à l'air, la destruction complète des polluants cibles est possible.

-La bioremédiation peut s'avérer moins coûteuse que d'autres technologies utilisées pour la dépollution des déchets dangereux (vidali, 2001).

-La bioremédiation peut souvent être effectuée sur le site, souvent sans causer de perturbation majeure des activités normales. Cela élimine également la nécessité de transporter des quantités de déchets hors du site et les menaces potentielles pour la santé humaine et l'environnement qui peuvent survenir pendant le transport (vidali, 2001).

II.2.4.2.Les désavantages de la bioremédiation

-Si la procédure n'est pas contrôlée, il est possible que les polluants organiques ne soient pas complètement décomposés, ce qui donnerait lieu à des sous produits nocifs qui pourraient être plus mobiles que la contamination initiale de l'environnement (Abdullateef et al., 2021).

-La période de traitement est généralement plus longue que celle des autres techniques d'assainissement de l'environnement (Abdullateef et al., 2021).

-Une surveillance sur le terrain est nécessaire pour suivre la vitesse de biodégradation des polluants organiques (Abdullateef et al., 2021).

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

-Elle est limitée aux composés biodégradables. Tous les composés ne sont pas susceptibles de se dégrader rapidement et complètement (**Endeshaw et al., 2017**).

-Les processus biologiques sont souvent très spécifiques. Facteurs importants du site nécessaires à la réussite comprennent la présence de populations microbiennes capables de métaboliser, des conditions environnementales de croissance, de nutriments et de contaminants (**Endeshaw et al., 2017**).

-Il est également très difficile d'extrapoler des études à l'échelle du laboratoire aux opérations sur le terrain (**chawala et al., 2013**).

II.2.5. Les facteurs affectant la bioremédiation

II.2.5.1. Facteurs nutritionnels

Les nutriments peuvent influencer la croissance et la reproduction microbiennes, ainsi que le taux et l'efficacité de la biodégradation. L'optimisation du rapport en CNP (Le carbone, le phosphore et azote) bactérien peut améliorer l'efficacité de la biodégradation, en particulier lorsque des nutriments essentiels tels que azote et le phosphore sont fournis. Le carbone, le phosphore et azote ne sont que quelques-uns des nutriments dont les micro-organismes ont besoin pour survivre. A faible concentration, la dégradation des hydrocarbures est également limitée. L'ajout de nutriments dans des environnements froids peut augmenter l'activité métabolique des microorganismes et donc le taux de biodégradation. La biodégradation en milieu aquatique est limitée par la disponibilité des nutriments. Les microbes mangeurs de pétrole ont besoin de nutriments pour se développer, ces nutriments essentiels se trouvent en petites quantités dans la nature (**Soraj et al., 2022**).

II.2.5. 2. Activité de l'eau

Les taux de biodégradation sont fortement influencés par la croissance microbienne et leurs activités biochimiques et enzymatiques qui sont directement liées à la quantité d'eau dans le sol. Une teneur en eau suffisante est nécessaire pour le transport des molécules de polluants solubles à travers la membrane des cellules microbiennes par absorption et les produits dégradés finaux. La bioactivité optimale pour une Bioremédiation aérobie efficace se produit lorsque l'humidité se situe entre 30% et 80% de la saturation (Capacité de rétention de l'humidité) disponible pour utilisation par les plantes. L'activité microbienne devient moins efficace lorsque la teneur en eau est inférieure à 10%. Cependant, il y a un problème d'engorgement si la capacité de rétention d'eau du sol dépasse la limite optimale, ce qui développe des conditions anoxiques et affecte gravement les taux de bioremédiation (**Riju et al., 2019**).

II.2.5.3. L'oxygène

Est particulièrement important pour une biodégradation aérobie plus efficace que les

Chapitre II: Déchets industriels et bioremédiation

conditions anaérobies, puisque le taux de biodégradation dans de telles conditions est limité aux composés aromatiques halogènes. L'oxygène moléculaire est nécessaire pour la dégradation des composants des boues à l'aide d'oxygénases, et une efficacité plus élevée est obtenue avec une disponibilité suffisante d'oxygène. Cela implique que la présence et la concentration d'oxygène sont importantes dans de tels processus. De plus, le manque d'aération dans le système peut être un paramètre limitant la vitesse de biodégradation et de catabolisme des hydrocarbures par les bactéries et les champignons (**Riju et al., 2019**).

II.2.5.4. pH

La bioremédiation peut être effectuée sur une large gamme de pH, cependant, un pH de 6,5 à 8,5 est généralement idéal pour la dégradation microbienne dans la plupart des systèmes aquatiques et terrestres. Le métabolisme des polluants est influencé par le type et la quantité de substances solubles présentes et le pH des écosystèmes terrestres et aquatiques (**Sharma et al., 2022**).

II.2.5. 5.Température

Le métabolisme microbien est considérablement affecté par la température. La plupart des microorganismes se développent bien entre 10 et 38°C. Techniquement, il est extrêmement difficile de contrôler la température des procédés *in situ*, et la température des procédés *ex situ* ne peut être que modérément influencée, parfois à grands frais. Bien que les températures dans les 10 premiers mètres du sous sol puissent fluctuer selon les saisons, les températures du sous sol jusqu'à 100 m restent généralement à moins de 1 à 2°C de la température de surface annuelle moyenne, ce qui suggère que la bioremédiation dans le sous sol se produirait plus rapidement dans les climats tempères (**Uqab et al., 2015**).

Chapitre III

III. Les mécanismes de bioremédiation des déchets par les bactéries

Les bactéries peuvent jouer un rôle important dans l'atténuation ou l'élimination des contaminants dans l'environnement, à la fois organiques et inorganiques. Leur métabolisme dépend de la disponibilité de donneurs et d'accepteurs d'électrons, de nutriments essentiels et d'ions nécessaires à la croissance. Les bactéries ont développé un large éventail de mécanismes pour l'absorption et la transformation des contaminants, ainsi que pour leur immobilisation ou mobilisation. La plupart des informations disponibles sur la biodégradation des contaminants organiques concernent la dégradation oxydative, les techniques de culture aérobie étant relativement simples par rapport aux méthodes de culture anaérobie. De plus, les processus aérobies sont considérés comme les plus efficaces et généralement applicables (**Blanca, 2010**).

III.1. Les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont des composés relativement récalcitrants et sont classés comme polluants prioritaires. Cependant, ces composés sont lentement dégradés par une grande variété de microorganismes. Les bactéries sont capables de dégrader les hydrocarbures aliphatiques saturés et insaturés via les voies aérobie et anaérobie. Les hydrocarbures ramifiés et les hydrocarbures cycliques sont également dégradés par les bactéries. Les bactéries aérobies utilisent différents types d'oxygénases, notamment monooxygénase, oxygénase dépendante du cytochrome et dioxygénase, pour insérer une ou deux atomes d'oxygène dans leurs cibles. Les bactéries anaérobies, d'autre part, emploient une variété de molécules organiques et inorganiques simples, y compris le sulfate, le nitrate, le carbonate et les métaux, pour l'oxydation des hydrocarbures (**Abbasian et al., 2015**).

La plupart des bactéries dégradant les hydrocarbures sont en revanche incapables de cataboliser tous les types de composés hydrocarbonés. Cela est dû au fait qu'elles possèdent des enzymes spécialisées dans la dégradation des hydrocarbures. Ainsi, certaines peuvent digérer les hydrocarbures aliphatiques, tandis que d'autres ne peuvent dégrader que les aromatiques (mono et/ou poly), et seuls quelques microbes possèdent des capacités métaboliques physiologiquement diversifiées. Pour les bactéries métaboliquement actives, les métabolismes aérobie et anaérobie des hydrocarbures sont étudiés. Pour les voies métaboliques aérobies, les bactéries dégradant les hydrocarbures sont connues pour utiliser des enzymes monooxygénase (incorporant un atome d'O) ou dioxygénase (incorporant deux atomes d'O) pour le métabolisme des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. La plupart des microorganismes utilisent des monooxygénase pour oxyder les alcanes par attaque terminale, biterminale ou subterminale pour la production d'alcool et l'oxydation ultérieure en

Chapitre III. Mécanismes de bioremédiation des déchets chez les bactéries

aldéhyde et en acide gras et enfin dans les cycles de Krebs via le processus d'oxydation. D'autres microorganismes potentiels utilisent des dioxygénase (3alkane monooxygénase, dioxygénase à anneau hydroxylant et catéchol dioxygénase) pour dégrader les hydrocarbures aromatiques en utilisant des mécanismes de fission d'anneau arthro ou méta, et les produits sont ensuite métabolisés en intermédiaires du cycle de l'acide tricarboxylique et tôt ou tard minéralisés en CO et H₂O. Pour les voies anaérobies, les contaminants hydrocarbures aliphatiques et aromatiques peuvent être oxydés en composés phénoliques ou en acides organiques, puis transformés en une longue chaîne d'acides gras volatils pour finir en méthane et en dioxyde de carbone. Par conséquent, les activités cataboliques microbiennes sont les principaux facteurs limitant ou favorisant la biodégradation en fonction du type de voies métaboliques dont bénéficient les microbes et de la nature des contaminants. En outre, le nombre de différents gènes bactériens est important pour juger du niveau de contamination et de la capacité de dégradation naturelle (**Gessesse et al., 2021**).

Mycobacterium était le genre le plus dominant pour minéraliser le pyrène. La minéralisation réussie du pyrène par les souches de *Mycobacterium* s'explique par leur capacité à produire plusieurs enzymes fonctionnelles capables de métaboliser les hydrocarbures aromatiques polycycliques de poids moléculaire élevé, tels que le pyrène. La dioxygénase est un système enzymatique complexe à plusieurs composants qui contient une oxygénase terminale, une réductase et une ferrédoxine contenant du fer et du soufre. Il a été rapporté que l'hydroxylation est l'étape biochimique initiale du processus de dégradation du pyrène. Elle introduit deux atomes d'oxygène dans les anneaux aromatiques du pyrène. La minéralisation complète du pyrène passe par différentes réactions enzymatiques telles que la dioxygénase, le dihydroxydiol, la déshydrogénase, la dioxygénase de clivage du cycle, l'époxyde hydrolase, l'alcool déshydrogénase, l'acétaldéhyde déshydrogénation et la décarboxylation. La figure 4 illustre la biodégradation du pyrène par le genre *Mycobacterium* (**Qutob et al., 2022**).

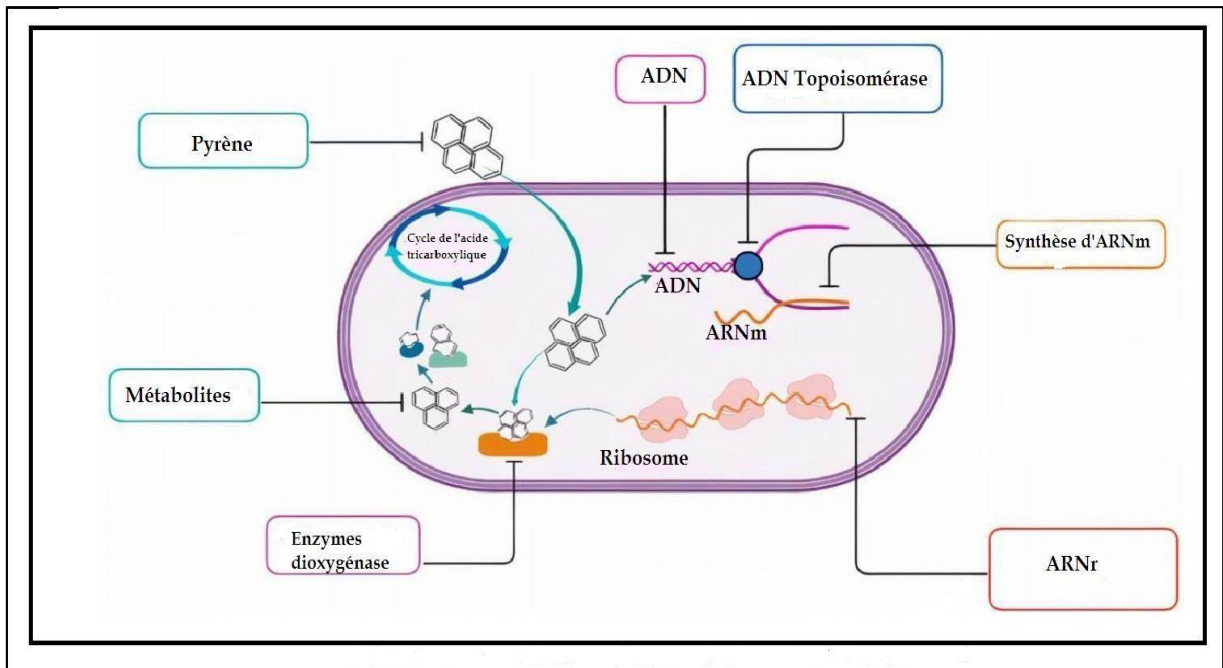


Figure 4: la biodégradation du pyrène par *Mycobacterium* (Qutob et al., 2022).

La dégradation des hydrocarbures peut se produire par des mécanismes complexes impliquant des activités microbiennes associées à la conversion des hydrocarbures complexes en formes plus simples (figure 5). Les principales voies empruntées par les microorganismes aérobies et anaérobies sont l'activation enzymatique et la catalyse en formes plus simples dans des conditions expérimentales optimisées. La souche KA2 d'*Acinetobacter radioresistens* a été isolée à partir de boues de déchets pétroliers et a appliqué des méthodes en deux étapes. L'expérience a permis d'éliminer jusqu'à 80 % des hydrocarbures pétroliers totaux (TPH) en 16 semaines. La technique a permis d'assainir le pétrole brut avec succès. Dans une autre étude, la souche KA5 d'*A. radioresistens* et la souche KA6 d'*Enterobacter hormaechei* ont été isolées à partir de boues de déchets pétroliers (PWS) et des bioremédiation en deux étapes menées pendant trois mois ont permis d'éliminer les TPHS de 84 % en 16 semaines. Les contaminants des boues huileuses (OS) ont été dégradés à l'aide d'un milieu de culture composé de la souche KA6 d'*E. Hormaechei*. L'expérience en cuve a été menée pendant une période de quatre mois, et le taux d'élimination du TPH s'est avéré atteindre 80 % (Arathi et al., 2023).

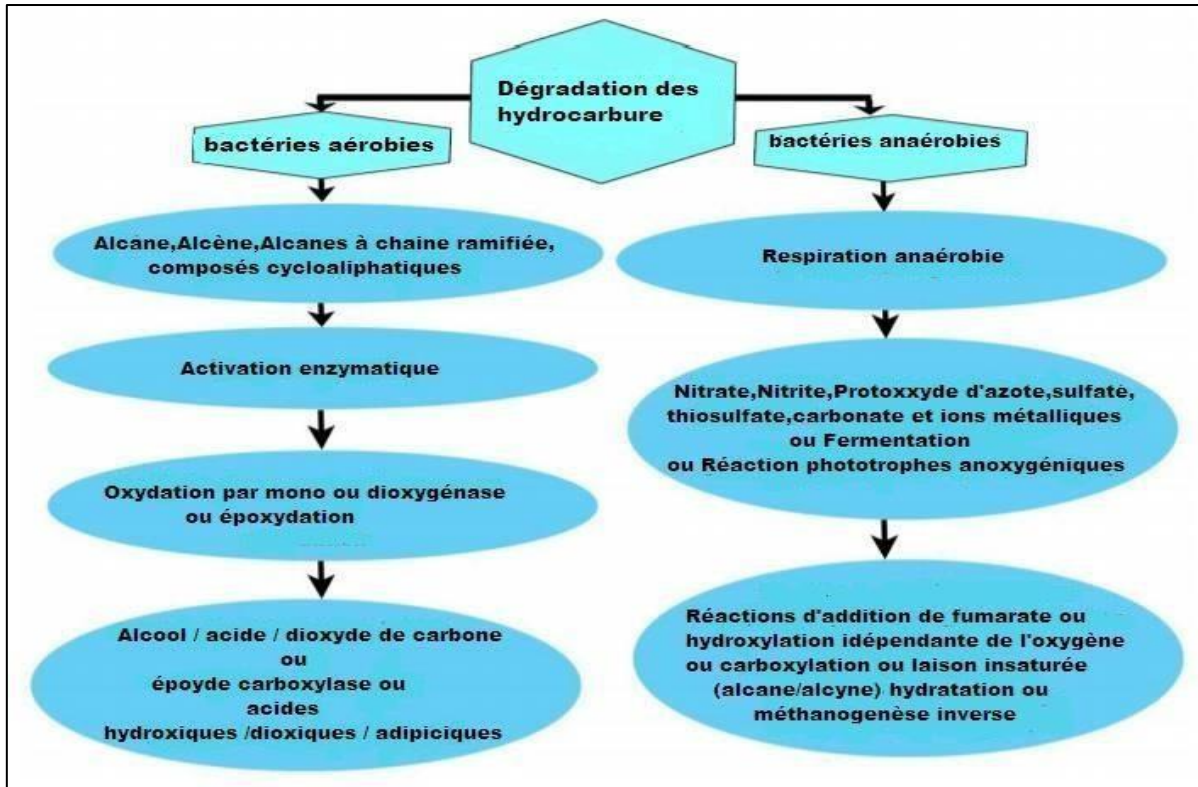


Figure 5: La représentation schématique des mécanismes de biodégradation aérobie et anaérobie (Arathi et al., 2023).

Les *Pseudomonas* sont les bactéries les plus connues capables d'utiliser les hydrocarbures comme sources de carbone et d'énergie et de produire des biosurfactants. Parmi les *Pseudomonas* *P. aeruginosa* est largement étudiée pour la production de biosurfactants de type glycolipide. Cependant, les biosurfactants de type glycolipide ont également été rapportés par d'autres espèces comme *P. putida* et *P. chlororaphis*. Les biosurfactants augmentent la surface de l'huile et cette quantité d'huile est réellement disponible pour que les bactéries puissent l'utiliser. Les biosurfactants peuvent agir comme des agents émulsifiants en diminuant la tension de la surface et en formant des micelles. Les microgouttelettes encapsulées dans la surface hydrophobe des cellules microbiennes sont absorbées et dégradées. La figure 6 montre l'implication du biosurfactant (rhamnolipides) produit par *Pseudomonas* sp et le mécanisme de formation de micelles dans l'absorption des hydrocarbures (Nilanjana et Preethy, 2010).

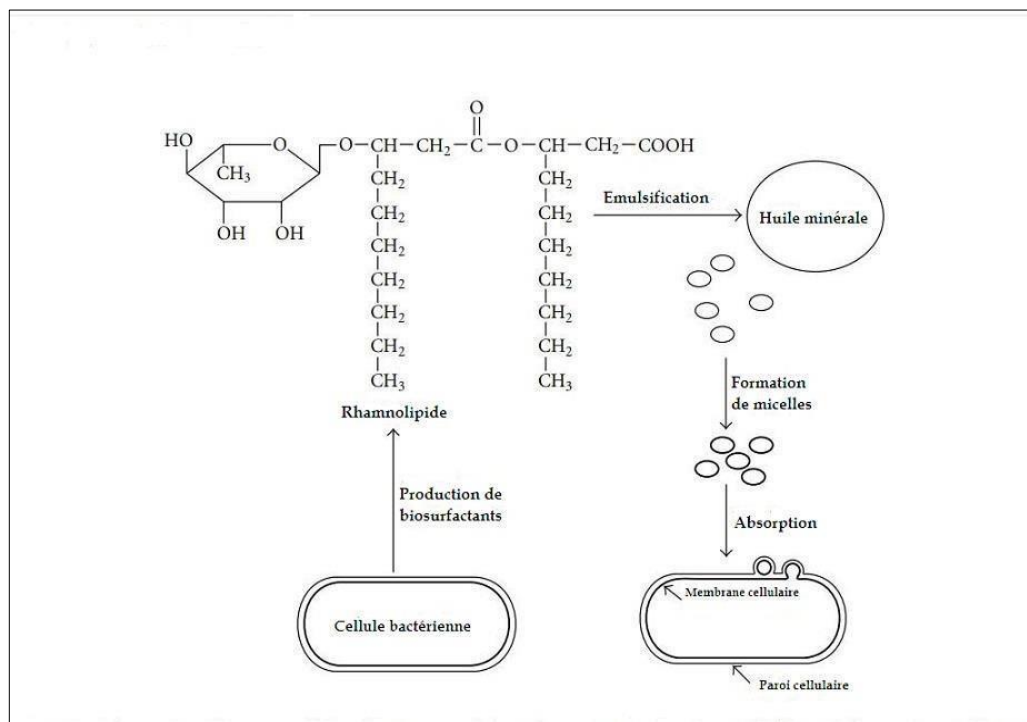


Figure 6: Implication du biosurfactant (rhamnolipide) produit par *Pseudomonas* sp dans l'absorption des hydrocarbures (Nilanjana et Preethy, 2010).

De nombreuses bactéries isolées ont la capacité de minéraliser complètement des hydrocarbures pétroliers chimiquement simples, tels que les alcanes linéaires, tant que ces bactéries possèdent toutes les enzymes pour le substrat ciblé. Cependant, peu de bactéries peuvent minéraliser complètement des composés complexes tels que les résines et les asphaltènes en raison de l'absence de certaines enzymes. Les avantages des communautés microbiennes sont présentés car il existe une variété de gènes cataboliques dans un consortium bactérien et les effets synergiques de ces gènes sont bénéfiques pour la purification des polluants. Un consortium bactérien composé de cinq bactéries cultivables a été construit par **Wanapaisan et al. (2018)**. Les chercheurs ont constaté que ces cinq bactéries présentaient une dégradation synergique du pyrène en raison des aspects suivants: (1) La souche *Bacillus* a amélioré la biodisponibilité du pyrène en produisant un biosurfactant. (2) deux souches de *Mycobacterium* ont contribué à l'initiation de la dégradation du pyrène, et (3) *Novosphingobium* et *Ochrobactrum* ont dégradé efficacement les intermédiaires du pyrène. Compte tenu de la complexité des composants du pétrole, la construction d'un consortium bactérien fonctionnel minimal ou l'ingénierie génétique des bactéries pour la bioremédiation de l'huile de pétrole est devenue une tendance dans ce domaine (**Xingjian et al., 2018**).

III.2. Les déchets plastiques

Les bactéries apparaissent comme un excellent agent de dégradation des plastiques. Des études ont montré que des bactéries capables de dégrader les plastiques, telles que *Moritella* sp., *Pseudomonas* sp., *Psychrobacter* sp. et *Shewanella* sp., dégradent le polycaprolactone (PCL). *Vibrio alginolyticus* et *Vibrio parahaemolyticus* ont été signalés pour la dégradation de l'alcool polyvinylique (PVA)-polyéthylène à base densité linéaire (LLDPE). **Singh et al., (2012)** ont signalé que *Bacillus* sp, *Pseudomonas* sp. et *Staphylococcus* sp. dégradent le polyéthylène. *Bacillus* sp, *Klebsiella* sp. et *Pseudomonas* sp. ont été signalés comme dégradant le plastique synthétique polyéthylène (**Harpreet et al., 2023**).

Certaines bactéries peuvent se développer sur la surface solide des matières plastiques et les utilisent comme source de carbone pour leur développement et former un biofilm autour d'elles. Ces bactéries clivent le polymère synthétique en monomères grâce à leurs enzymes spécialisées. Le processus de biodégradation a été influencé par le poids moléculaire, l'hydrophobie, la température et les propriétés chimiques et physiques du polymère. Le mécanisme de biodégradation du plastique par les bactéries est illustré à la figure 7 (Jeyaraj et al., 2021).

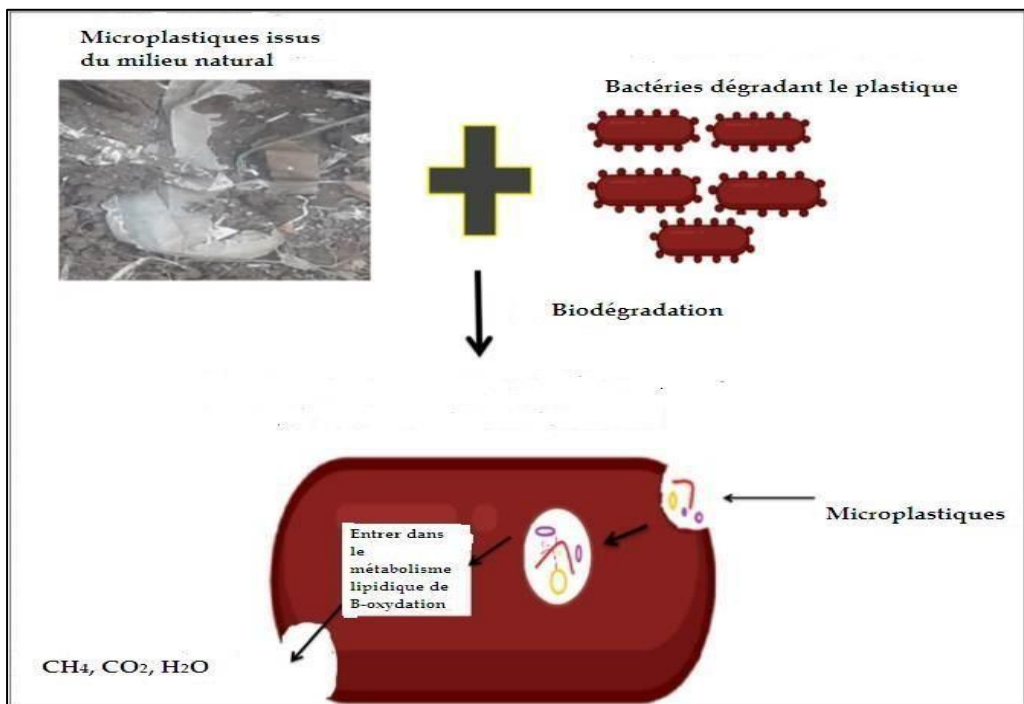


Figure 7: Mécanisme de biodégradation par les bactéries (Jeyaraj et al., 2021).

Chapitre III. Mécanismes de bioremédiation des déchets chez les bactéries

La capacité des actinobactéries à dégrader les déchets plastiques a également été signalée par certains chercheurs. Certains actinobactéries dégradant le polyéthylène à basse densité (LDPE), dont *Streptomyces coelicoflavus* NBRC 15399T, *Streptomyces* SSP2, *Streptomyces* SSP4 et *Streptomyces* SSP14, sont des agents potentiels de dégradation des déchets plastiques. Ils sont également considérés comme capables de produire un bioémulsifiant. Le bioémulsifiant est une molécule produite par les microorganismes lors de la dégradation des polymères plastiques. Les microorganismes utilisés dans cette étude étaient capables de produire des biosurfactants qui sont également importants dans la dégradation des plastiques. Les actinobactéries produisent différents types de métabolites qui jouent un rôle essentiel dans la dégradation des plastiques (Angga et al., 2021).

Une autre actinobactérie dégradant le plastique est *Streptomyces lydicus* MM10. Cette bactérie filamenteuse produit une polyhydroxybutyrate (PHB) dépolymérase, une enzyme qui décompose le polymère de PHB. D'autres bactéries dégradant le PHB sont *Azotobacter* et *Bacillus*. Par ailleurs, *Moritella* sp. *Shewanella* sp. *Psychrobacter* sp. et *Pseudomonas* sp. jouent un rôle dans la dégradation du PCL. Dans des conditions et des environnements appropriés, divers types de bactéries peuvent accumuler du polyhydroxybutyrate (PHB) dans leurs cellules, puis décomposer ce polymère catalysé par le PHB dépolymérase (Angga et al., 2021).

Dégradation de plastique par *I. sakaiensis*: une bactérie à Gram négatif, aérobie, en forme de bâtonnet, du genre *Ideonella* et de la famille des Comamonadaceae, a été capable de dégrader et de consommer le PET comme seule source carbone et de production d'énergie. La bactérie n'a pas la capacité de former des spores. La température optimale requise était de 15 à 42 °C et le pH optimal de 5,5 à 9,0. C'est pourquoi elle a été baptisée (bactérie mangeuse de plastique). Après la dégradation initiale par *I. sakaiensis*, on a observé que la colonie microbienne convertissait 75 % du PET dégradé en CO₂ (Shadma et al., 2021).

La bactérie *I. sakaiensis* contient deux enzymes exclusives qui catalysent l'hydrolyse du polyéthylène téréphtalate (PET). La polyéthylène téréphtalate hydrolase (PETase) sépare le PET en acide mono (2-hydroxyéthyl) téréphtalique (MHET), et la MHET hydrolase (MHETase) sépare le MHET (mono hydroxyéthyl téréphtalate hydrolase) en acide téréphtalique (TPA) et en éthylène glycol (EG). La figure 8 montre, à l'aide d'un organigramme, comment le PET est converti en TPA et en EGA (Shadma et al., 2021).

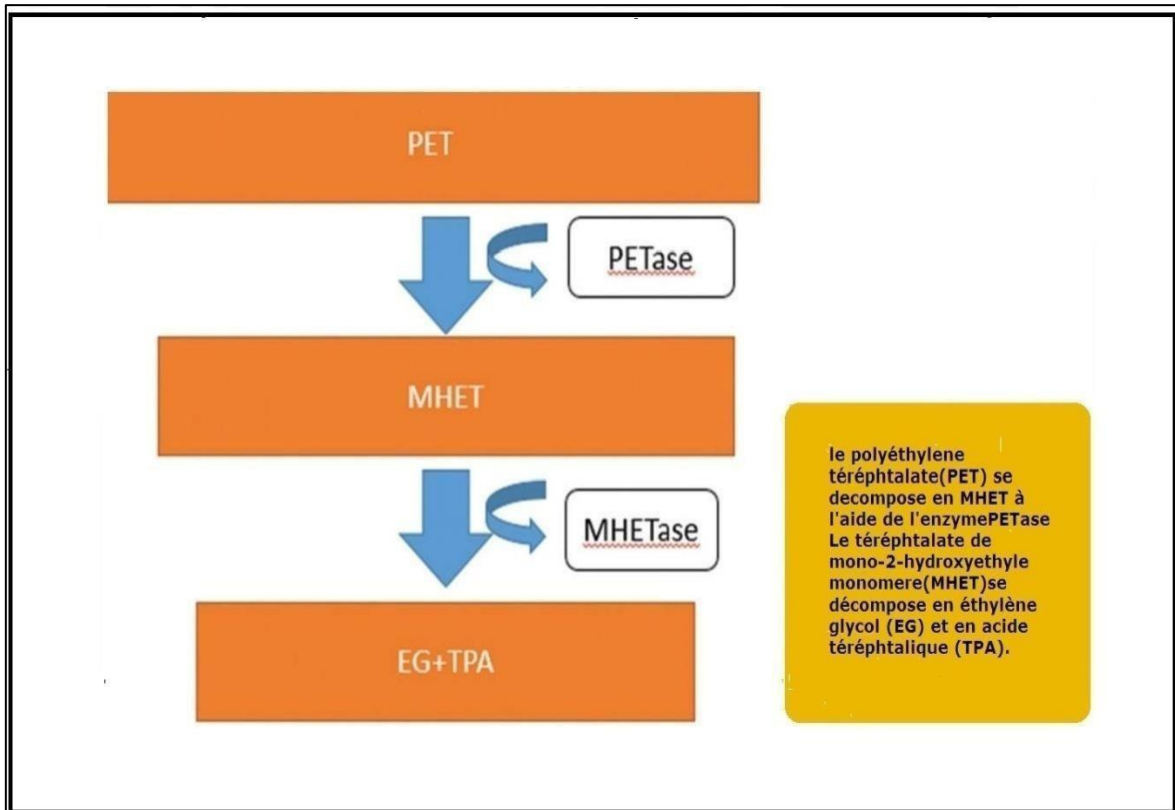


Figure 8: Organigramme illustrant l'action enzymatique (Shadma et al., 2021).

Santo et al. (2013) ont isolé *Rhodococcus ruber* C208, qui dégrade le polyéthylène en sécrétant de la laccase extracellulaire. L'enzyme laccase nécessite la présence d'ions de cuivre pour son induction et son activité. La biodégradation du polyéthylène a eu lieu en raison de l'oxydation des régions amorphes des films PE par la laccase, qui a entraîné la formation de groupes carbonyles facilement accessibles, ce qui a été confirmé par analyse de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) et une diminution du poids moléculaire du film de polyéthylène (Sonal et al., 2022).

Plus de 20 genres bactériens se sont révélés capables de dégrader différents types de PE. Il s'agit notamment de diverses espèces à Gram négatif et à Gram positif appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Ralstonia*, *Stenotrophomonas*, *Klebsiella*, *Acinetobacter*, etc. et *Rhodococcia*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Streptomyces*, *Bacillus*, etc. La plupart des souches de ces bactéries ont la capacité de détériorer la surface et/ou de former un biofilm sur le PE. Des études sur diverses activités du genre *Pseudomonas* ont été menées afin d'examiner leur capacité à dégrader et à métaboliser une variété de polymères plastiques synthétiques et leurs sous-produits. Les espèces de *Pseudomonas* ont la capacité unique de dégrader et de métaboliser les polymères avec des activités enzymatiques extracellulaires oxydatives et/ou hydrolytiques, qui facilitent l'absorption et la dégradation des fragments de polymères et

Chapitre III. Mécanismes de bioremédiation des déchets chez les bactéries

contrôlent l'interaction entre les biofilms et les surfaces de polymères. Une dégradation complète du PE dans l'eau a été observée après un traitement avec *P. fluorescens* en présence d'un biosurfactant suggérant leur importance dans l'oxydation et la biodégradation des polymères (Ghatge et al., 2020).

La biodégradation aérobie du PE par les bactéries se déroule en quatre étapes: 1) la biodétérioration, qui se définit comme la formation de groupes carbonyles par l'action d'enzymes oxydantes libérées par les microorganismes ou induites par des agents extérieurs, comme l'exposition à la lumière du soleil (ultraviolets). L'oxydation ultérieure réduit le nombre de groupes carbonyles et génère des acides carboxyliques, 2) la biofragmentation, qui implique l'hydrolyse et/ou la fragmentation des chaînes carbonées du polymère et la libération de produits intermédiaires, sous l'action d'enzymes sécrétées par des microorganismes, 3) la bioassimilation, par laquelle de petits fragments d'hydrocarbures libérés par la biofragmentation sont absorbés et métabolisés par des bactéries ou des champignons et 4) la minéralisation, qui transfère les produits de l'hydrolyse dans la paroi cellulaire, la conversion intracellulaire des produits de l'hydrolyse en biomasse microbienne avec la libération associée de dioxyde de carbone et d'eau excrétée par la cellule. Bien que plusieurs groupes aient fait état de la biodétérioration et de la biofragmentation, les études sur la bioassimilation et la minéralisation complète du PE sont très limitées (Nisha et al., 2020).

Très peu d'espèces bactériennes comme *Kluyveromyces* sp., *Bacillus* sp., *Rhodotorula aurantiaca* et *Aureobasidium pullulans* ont été signalées comme colonisant et biodégradant le PVC. De même, d'autres études ont également montré que *Pseudomonas fluorescens* FS1, *Mycobacterium* sp. et la bactérie *Coryneform* étaient capables de bioremedier le contenu plastifiés du polychlorure de vinyle (PVC). Pour la biodégradation des plastiques, l'établissement d'un biofilm est une étape nécessaire qui réduit la nature hydrophobe des plastiques et augmente la charge bactérienne sur la surface, ce qui entraîne une modification des propriétés physiques et chimiques. En outre, la sécrétion d'enzymes extracellulaires est également nécessaire à la biodégradation du plastique qui dégrade la chaîne principale de polymère en produits intermédiaires de faible poids moléculaire. Ces produits de faible poids moléculaire sont assimilés par les microbes et conduisent à la reminéralisation du PVC par évolution du CO₂ (Shrikant et al., 2021).

III.3. Déchets d'équipements électriques et électroniques

Les substances organiques toxiques présentes dans les déchets électroniques, telles que les polychlorobiphényles (PCB) et les polybromodiphényléthers (PBDE), sont extrêmement toxiques et récalcitrantes par nature, ce qui rend difficile la croissance de la plupart des microorganismes en leur présence. Cependant, certains microorganismes,

Chapitre III. Mécanismes de bioremédiation des déchets chez les bactéries

grâce à leurs mécanismes de tolérance uniques, sont capables de se développer et de dégrader ou transformer ces substances toxiques en formes non toxiques (Amrik et khare, 2016).

La plupart des recherches sur la dégradation des PCB signalées étaient concentrées sur les souches à Gram négatif, tandis qu'un peu d'études se sont concentrées sur les bactéries à Gram positif, y compris les espèces de *Rhodocoques*. De plus, il est important de noter que les rhodocoques cataboliquement actifs ont été isolés de différents environnements et il y a une croyance générale que ces bactéries jouent un rôle crucial dans la biodégradation de différents polluants dans le sol. Ces faits et les caractéristiques suivantes font de la bactéries du genre *Rhodococcus* candidates prometteuses pour la bioremédiation des sols contaminés par les PCB: (i) leur cellules sont hydrophobes, ce qui permet la dégradation des polluants hydrophobes tels que les PCB en permettant aux cellules d'adhérer aux interfaces huile / eau, (ii) ils peuvent persister dans le sol même dans des conditions de famine, (iii) *Rhodocoques* produisent habituellement des tensioactifs qui diminuent la tension interfaciale entre les phases, facilitant l'entrée du composé hydrophobe dans la cellule microbienne, et (iv) ces bactéries présentent de multiples homologues d'enzymes, améliorant ainsi leur polyvalence métabolique (Ines et al., 2007).

Les processus de dégradation des PBDE dans des conditions aérobies comprennent l'adsorption sur la surface des cellules, l'assimilation dans les cellules, la décomposition du cycle aromatique, puis la minéralisation. Les PBDE ont été catalysés et minéralisés par diverses enzymes, puis transformés en dioxyde de carbone inoffensif et en eau par le biais du cycle de l'acide tricarboxylique (cycle TCA). Le 4-bromophénol et le 4-bromocatéchol ont été extraits de la dégradation du BDE-3 par *Sphingomonas* sp. SS3 et *Cupriavidus* sp. Le BDE-3 peut même être dégradé en acide 2-hydroxymuconique par *Sphingomonas* sp. PH-07. Le 2,4-dibromophénol a été identifié comme le produit de la dégradation aérobie du BDE-7 et du BDE-28. Le BDE-15 a été hydroxylé par la 2,3-dioxygénase et a produit le 2',3'-dihydroxy-4,4'- dibromodiphényl éther en présence de *Sphingomonas* sp. PH-07, et a été débromé en 4-bromophénol et 4-bro- mocatechol par *Sphingomonas* sp. SS3. Ces intermédiaires sont des preuves solides de la voie de clivage du cycle pour la dégradation des PBDE. Cependant, à ce jour, la littérature concernant cette voie est encore très limitée et les voies de dégradation de l'éther diphénylique sont souvent utilisées comme référence pour la dégradation du PBDE. Les voies proposées pour la biodégradation des diphényléthers sont présentées dans la figure 9 (Chenghao et al., 2018).

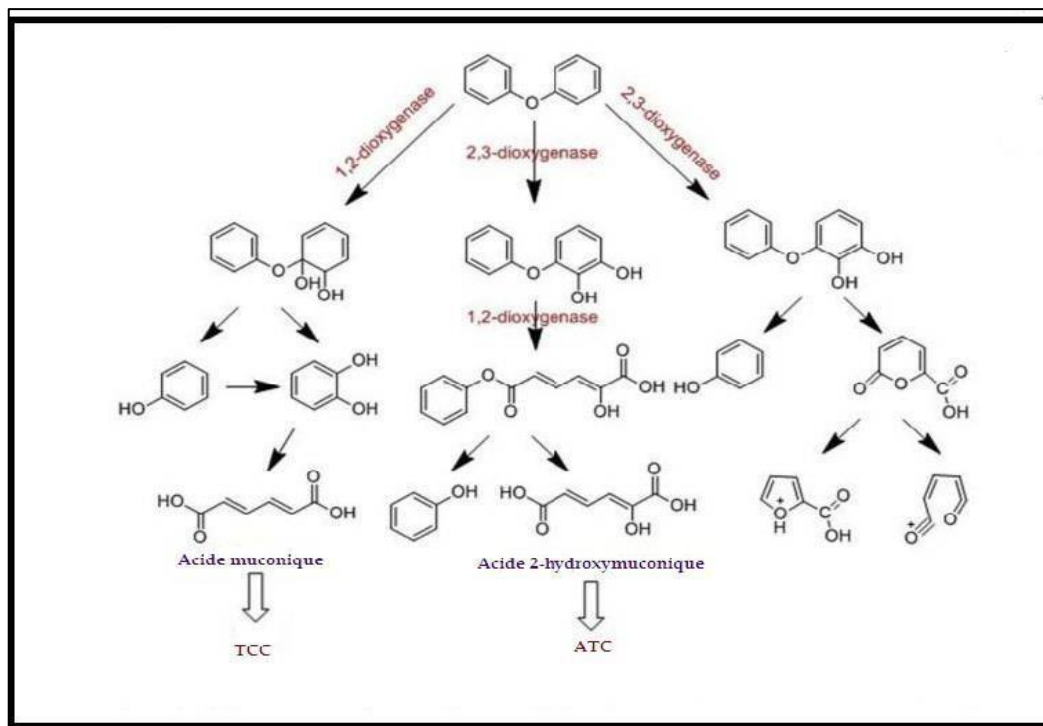


Figure 9: Voie de biodégradation de l'éther diphenylique par *Spingomonas* sp. Souche SS3, *Spingomonas* sp. *Pseudomonas cepacia* et *Cupriavidus* sp. en conditions aérobies (Chenghao et al., 2018).

Bien que les PCB ne soient pas facilement biodégradables, certaines espèces de bactéries, telles que *Vibrio cholera*, *Acinetobacter Iwoffnii*, *Aeromonas hydrophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Rhodococcus* sp. *Bacillus* sp. et *Burkholderia* sp. ont joué un rôle dans la biodégradation de ces composés. Ceci peut être réalisé grâce à un cométabolisme et à la minéralisation et à l'utilisation d'une voie métabolique similaire chez toutes ces bactéries, qui comprend quatre étapes catalysées par les enzymes BphA, BphB, BphC, et BphD. Selon Petric et al., (2007), la voie est initiée par l'insertion de deux atomes d'oxygène aux positions 2 et 3 d'un anneau aromatique. Cette insertion est suivie d'une déshydrogénation, d'un méta-cleavage et d'une hydrolyse qui aboutissent à la formation d'un composé à 5 carbones, ce qui constitue la voie catabolique du biphenyle. En raison de la fraction hydrophobe des PCB, la présence de surfactants s'est avérée essentielle pour la biodégradation (Mathews et al., 2014).

Conclusion

Les bactéries ont une capacité importante dans l'élimination et la transformation des déchets industriels (tel que: les hydrocarbures, les déchets plastiques et les déchets d'équipements électriques et électroniques) en forme moins nocifs, pour cela elles présentent un outil promoteur dans la bioremédiation de ces déchets. Plusieurs études ont été réalisées afin de comprendre leurs mécanismes impliqués sur ces polluants lors de Bioremédiation. Selon les résultats montrés leurs mécanismes dépend principalement sur leur capacité métabolique.

La production des enzymes spécifiques qui peuvent catalyser des réactions chimiques qui convertissent les polluants en formes moins toxiques tel que l'eau et le CO₂, par exemples chez les hydrocarbures, le *Mycobacterium* a été montré comme le genre le plus dominant pour minéraliser et dégrader le pyrene (hydrocarbure polycyclique aromatique) grâce à leur capacité de produire d'enzyme dioxygénase capable de métaboliser les hydrocarbures aromatiques polycycliques de points moléculaire élevé. Aussi pour les déchets plastiques, des résultats montrent la capacité de *Rhodococcus rubber* de dégradation des polyéthylène (plastique synthétique) par la sécrétion d'enzyme de laccase et dans la présence d'ions de cuivre qui catalyse l'oxydation des régions amorphes des films polyéthylène, et entraîne la formation des groupes carbonyles facilement accessibles, pour les déchets d'équipements électriques et électroniques, la biodégradation des polychlorobiphényles (PCB) par certaines espèces de bactéries, telles que *Vibrio cholera*, *Acinetobacter Iwoffnii*, *Aeromonas hydrophila*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas putida*, *Rhodococcus sp.*, *Bacillus sp.* et *Burkholderia sp.* peut réaliser par un cométabolisme et une minéralisation catalysée par les enzymes BphA, BphB, BphC et BphD.

La production des biosurfactants, les biosurfactants sont des molécules produites par les bactéries qui ont la capacité de réduire la tension superficielle des liquides. Ces substances aident à émulsionner et à solubiliser les contaminants présente dans les déchets leurs actions facilitent l'accès des bactéries aux polluants et leur dégradation en formes moins toxiques, comme exemples des résultats montrés par les chercheurs concernant ce mécanisme, les *Pseudomonas* sont les plus connue d'utilisation des hydrocarbures comme source de carbone et d'énergie. *Pseudomonas aeruginosa* est largement étudié par la production des biosurfactants de type glycolipids qui agit comme agents émulsifiants qui facilite l'absorption et la dégradation des hydrocarbures pour les utiliser. *Streptomyces coelicoflavus* NBRC 15399, *Streptomyces SSP2*, *Streptomyces SSP4* et *Streptomyces SS14* sont considérées comme des agents potentiels de dégradation des déchets plastiques est ça s'explique par leur

capacité de produire des bioémulsifiants qui jouent un rôle important dans cette dégradation.

Des interactions entre différentes espèces bactériennes peuvent entraîner une coopération et un cométabolisme qui favorisent également l'élimination et la transformation des déchets. Un consortium bactérien composé de cinq bactéries *Bacillus* et deux souches de *Mycobacterium*, *Novosphingobium* et *Ochrobactrum* est signalé par les chercheurs qu'il peut réaliser la dégradation du pyrene par les effets synergiques entre ces bactéries.

Perspective:

- Des recherches approfondies sur les mécanismes de la bioremédiation bactérienne donneront un aperçu de la manière dont les bactéries sont utilisées pour décomposer les déchets toxiques. Cette connaissance approfondie permettra de concevoir des technologies de bioremédiation plus efficaces et spécifiques pour différents types de polluants industriels.
- Faire des recherches pour identifier des combinaisons optimales des bactéries qui peuvent travailler ensemble pour dégrader efficacement les substances toxiques présentes dans les déchets.
- Découvrir de nouvelles souches avec différents mécanismes qui peuvent être plus efficace dans la bioremédiation des déchets.

Références bibliographiques

Abdullateef Abdullahi Ibrahim., Usman Abubakar khalifa., Abbas Sani., Ali Mustapha Gado., Gambo Ismail., Muhammad Abdullahi Ibrahim. , Usama Daoud Adam. (2021). bioremediation: A biological tool for environmental .research journal of Modernization in engineering technology and science 3, 649-655.

Amrik Bhatta charya ., S.k khare. (2016). Sustainable options for mitigation of major toxicants originating from electronic wastes.Current Science 111, 1946-1954.

Angga puja Asiandu., Agus wahyudi., Septi widiya Sari. (2021). A Review: plastic waste Biodegradation using plastics degrading bacteria.Journal of Environmental treatment technique 9, 148-157.

Anne wanjie. (2014). the basics of microbes. Resent publishing. New York. P19.

Anwasha Banerjee., Atarm Roy., Suvakshan Dutta ., sandhimita Mondal. (2016). Bioremediation of hydrocarbons. International journal of Advanced research 4,1303-1313.

Apurba Sastry., Sandhya Bhat. (2019). Essentials of Medical Microbiology .2 ème édition. Jaypee Brothers Medical Publishers. P 8.

Arathi Radhakrishnan., Pandiyan Balaganesh., Mangottiri Vasudevan., Narayanan Natarajan., Abhishek Chauhan., Jayati Arora., Anuj Ranjan., Vishnu D. Rajput., Svetlana Sushkova., Tatiana Minkina., Rupesh Kumar Basniwal., Rajkishor Kapardar ., Rajpal Srivastav. (2023). Bioremediation of Hydrocarbon Pollutants: Recent Promising Sustainable Approaches, Scope, and Challenges.Sustainability 15 ,1-18.

Arpita kulshreshtha., Ranu Agrawal., Shilpi saxena. (2014). A review of heavy Metals in contaminated water. IOSR journal of environmental science, toxicology and food technology (IOSR-JESTFT) 8, 44-50.

Blanca Antizar-Ladislao. (2010). Bioremediation : working with bacteria.Elements 6, 389-394.

Chandrakant S. Karigar., Shwetha S. Rao. (2011). Role of Microbial Enzymes in the Bioremediation of Pollutants: A Review. Enzyme Research 2011, 1-11.

Charles Nauciel. Jean -louis vildé. (2005). Bacteriologie Médicale. Deuxième édition. Elsevier Masson. Paris. P 5 a 16.

Chawla Niti., Suneja Sunita., kukreja Kamlesh., Kumar Rakesh. (2013).bioremediation, An emerging technology for remediation of pesticides. Research journal of chemistry and environment 17, 88-105.

Chenghao Zhao, Ming Yan., Hua Zhong., Zhifeng Liu., Liangsheng Shi., Ming Chen.,Guangming Zeng., Biao Song., Binbin Shao., Haopeng Feng. (2018). Biodegradation of polybrominated diphenyl ethers and strategies for acceleration: A review. International Biodeterioration & Biodegradation 129, 23-33.

Chetana Vaishnavi. (2013). infections of the gastrointestinal system. Jaypee brothers medical publishing. India. P13.

Chris H. MILLER. MS. PhD. (2014). Infection control: and Management of hazardous Materials for the dental team. 5^{ème} edition. ELSEVIER Mosby. P10-11.

Christopher Chibueze Azubuike., Chioma Blaise Chikere., Gideon Chijioke Okpokwasili. (2016). Bioremediation techniques classification based on site of application : principles, advantages, limitations and prospects. world journal of microbiology and Biotechnology 32,162-180.

Dominique Blancard. Collaboration de : H .laterrot.G.Marchoux, T.candresse.(2009)."Les maladies de la tomate : identifier, connaître, maîtriser". Quae 525.

Dominique Barbier., Jean- Jacques Bléas., Michel Botineau., François- Xavier Boulet., Michel Boulouard., Annie Canu et al. (2013). Le préparateur en pharmaci. 2eme edition. Lavoisier. Paris.P278.

Elizabeth Temitope Alori., Alhasan Idris Gabasawa., Chinyere Edna Elenwo ., Oluwadolapo Ololade Agbeyegbe. (2022). Bioremediation techniques as affected by limiting factors in soil environment. Frontiers in Soil Science 2, 1-13.

Emiliana pandolfo., Anna Barra Caracciolo., Ludovica Rolando. (2023). Recent Advances in bacterial degradation of Hydrocarbons. Water 15, 1-18.

Endeshaw Abatenh., Birhanu Gizaw., Zerihun Tsegaye., Misganaw wassie. (2017). The role of Microorganisms in Bioremediation A review. open journal of environmental biology 1(1), 38-46.

Fairouz Abbasian., Robin lockington., Megharaj Mallavarapu., Ravi Naidu. (2015). A comprehensive Review of Aliphatic Hydrocarbon biodegradation by bacteria. Applied biochemistry and Biotechnology 176., 670-699.

Francis H., Chapelle. (2001). Ground Water Microbiology and Geochemistry. 2^{ème} édition. WILEY. P46.

François perbret. (2003). maladies infectieuses : toutes les pathologies des programmes officiels des études médicales ou paramédicales. heures de France. Paris. P 58.

Frank R Spellman. (2009). Hand book of : water and wastewater treatment plant operation. 2eme edition. CRC press Taylor & Francis group. p48.

Gaurav Saxena., Ram Naresh Bharagava. (2016). Ram Chandra: advances in biodegradation and bioremediation of industrial waste. Clean Techn Environ Policy 18, 979-980.

Geoffrey Hanlon., Norman Hodges. (2013). Essential Microbiology for pharmacy and pharmaceutical sciences. Wiley Blackwell. India. P21.

Gessesse Kebede., Tekle Tafese., Ebrahim M. Abda, M. Kamaraj., Fassil Assefa3. (2021). Factors Influencing the Bacterial Bioremediation of Hydrocarbon, Contaminants in the Soil: Mechanisms and Impacts. Journal of Chemistry 2021,1-17.

Govind Singh Chauhah., Saba wanf.(2019). Plastic pollution:A Major Environmental Threat. International Journal of Innovative Research in technology6, 43-46.

Harpreet Kour., Sofia Shareif Khan., Divjot Kour., Shafaq Rasool., Yash Pal Sharma., Pankaj Kumar Rai., Sangram Singh., Kundan Kumar Chaubey., Ashutosh Kumar Rai., Ajar Nath Yadav. (2023). Microbes mediated plastic degradation: A sustainable approach for environmental sustainability. Journal of Applied Biology & Biotechnology 11, 9-19.

Hart Tony., Shears Paul. (1997). Atlas de poche de microbiologie. 1ere edition. Medicine sciences Flammarion. Paris. P72.

Hassan Alsberi., Asmaa A.Hamad., Mohamed M .Hassan. (2020). Biodegradation of petroleum Hydrocarbons Using Indigenous Bacterial and actinomyces culture. Pakistan journal of biological sciences 23, 726-734.

Hurbert Germain. Carole Arogoul. (1998). santé animal: bovins. Ovins caprine .2eme edition. P 141.

Ines Petric., Dubravka Hrsak., Sanja Fingler., Ernest Voncina., Helena cetkovic., Ana Begonja Kolar., Nikolina Udikovic Kolic.(2007). Enrichment and Characterization of PCB Degrading Bacteria as Potential Seed Cultures for Bioremediation of Contaminated Soil. Food Technology and Biotechnology 45, 11-20.

Israel Gonçalves Sales da Silva., Fabiola Carolina Gomes de Almeida., Nathalia Maria Padilha da Rocha e Silva., Alessandro Alberto Casazza Attilio Converti., Leonie Asfora Sarubbo. (2020). Soil Bioremediation: overview of technologies and trend. Energies 13, 1-25.

Jeyaraj Jeyavani., Ashokkumar Sibiya., Sivakumar Shanthini., Cyril Ravi Sekar Vijayakumar., Durairaj Karthick Rajan., Baskaralingam Vaseeharan. (2021). A Review on Aquatic Impacts of Microplastics and Its Bioremediation Aspects 7.286-299.

Joenna kotcher Fuller. (2013). Surgical technology: principles and practice. 6 ème edition. ELSEVIER Saunders. Canada. P157.

Kara, Rogers. (2011). "Bacteria and viruses" 1ere edition .Britannica. p03.

Karin C. Vanneter., Robert J Hubert. (2022). Microbiology for the health care professionnel. Elsevier ,3 ème édition. P 81.

Kingsley kema Ajekwene., Edwin Enaholo Aibokhan., Oluwatobi Elijah Akindele., Moses Ebiowei Yibowei., Friday Patrick Momoh., Ugo Kingsley Ugonna. (2022).Electronic waste (E-waste) : Sources, prolifération, Effects & management in Developing Nations.IOSR Journal of Engineering 12, 12-27.

M.vidali. (2001).Bioremediation an overview. Pure and Applied Chemistry 73, 1163-1172.

Marshall Cavendish Corporation. (2006). Growing Up with Science. 3 ème edition. Mc Marshall Cavendish. P 155.

Mohammad Qutob., Mohd Rafatullah., Syahidah Akmal Muhammad., Abeer M. Alosaimi., Hajer S. Alorfi., Mahmoud A. Hussein. (2022). A Review of pyrene bioremediation Using Mycobacterium strains in a different Matrix Fermentation 8 ,1-27.

Namrata Arya. (2019). A study of Bioremediation and its avantages or disadvantages, Journal of emerging technologies and Innovative research (JETIR) 6, 988-993.

Nilanjana Das et Preethy Chandran. (2010). Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview. Biotechnology Research International 2011, 1-13.

Nisha Mohanan., Zahra Montazer., Parveen K. Sharma., David B. Levin. (2020). Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. Frontiers in Microbiology 11,1-22.

Oindrila PAUL., Amrita JASU., Dibyajit LAHIRI., Moupriya NAG., Rina Rani RAY. (2021).In situ and Ex situ Bioremediation of heavy Metals: the present scienario.Journal of environmental engineering and landscape management 29, 454-469.

Olanrewaju B.smith., Paule Moustier., Luc J.A.Mougeot., Abdou fall.(2004). Development durable de l'agriculture Urbaine en Afrique Francophone : Enjeux, concept et méthodes.CIRAD CRDI .P 147.

Parasna V Dharani Aiyer. (2018). Introduction to Microbiology. Volume1. Idea. P19.

Pikranjit Basu. (2017). Biomaterials Science and Tissue Engineering: Principles and Methods. Cambridge university press. (Cambridge IISc Series). P358.

Pradeep Verma. (2022). Industrial Microbiology and Biotechnology. Springer. P67.

Pritee Alhat chimote. (2019). use of Bioremediation to clean the environment.Internationaljournal of Research and Analytical review (IJAR) 6, 192-196.

Rajan SV., ANDHARE P., Marchawala F., Bhattacharya I., Apadhya.D. (2021). Bioremediation: Mode Technique and Application .International Journal of Biology, pharmacy and Allied sciences (IJBPAS) 10, 375-380.

Rajesh Bhatia., Rattan Lal Ichhpujani. (2008). Essentials of Medical Microbiology. 4 èmeedition. Japyeer Brothers Medical Publishers. P25.

R. Boopathy. (2000). Review paper factors limiting bioremediation technologies. Bioresource Technology 74, 63-67.

Riju Chandra Saha¹, Auchib Reza¹, Muhammad Sakib Hasan ., Piash Saha. (2019).A review Bioremediation of oil sludge contaminated soil.E3S Web of conferences 96, 1-6.

S. Mathews., N.P. Sithebe.(2014).The Role of Bacteria in the Breakdown of CarcinogenicSubstances (PCBs) in Wastewater for Safe Recycling Purposes - A Review .International. Journal of environmental ans sustainability 3, 20-27.

S.Rajan. (2017). Médical Microbiology. M J P. P127.

Sachan Ritu., Agarwal Shalini. (2013). Knowledge of E-waste among young adults.International journal of Engineering science invention 2, 39-41.

Santo, M., Weitsman, R., Sivan, A. (2012). The Role of the Copper-Binding Enzyme Laccase In the Biodegradation of Polyethylene by the Actinomycete Rhodococcus Ruber. International Biodeterioration & Biodegradation 84, 1-7.

Saroj Bala., Diksha Garg., Banjagere Veerabhadrapa Thirumalesh., Minaxi Sharma., Kandi Sridhar., Baskaran Stephen Inbaraj ·Manikant Tripathi. (2022).Recent Strategies for Bioremediation of Emerging Pollutants:A Review for a Green and Sustainable Environment.Toxics 10, 1-24.

Shadma Khan., Nidhi Mishra., Laiba Siddiqui., Madhurima Tiwari. (2021). Role of Ideonella sakaiensis in Reducing Plastic Waste: Current Updates and Future Prospects. IndianJournal of Advances in Chemical Science 9(4) ,422-425.

Shafferina Dayana Anuar Sharuddin., Faisal Abnisa., wan Mohdwan Mohd Ashri wanDaud., Mohamed kheireddine Aroua. (2016). A Review on pyrolysis of plastic wastes. Energy conversation and management 115, 308-326.

Singh G., Singh AK., Bhatt K. (2016). Biodegradation of polythenes by bacteria isolated from soil. International Journal of Research and Development in Pharmacy and Life Sciences.5, 2056-2062

- Sharma.P., Singh.S.P., Parakh. S.K., Tong.Y.W. (2022).** Health hazards of hexavalentchromium (Cr (VI)) and its microbial reduction. *Bioengineered* 13, 4923-4938.
- Sherman Hollar. (2012).** introduction to biology: à Closer look at bacteria. Algae andprotozoa. New York. P 19.
- Shilpi Sharma. (2012)** .Bioremediation features, strategies and applications.Asian journal ofpharmacy and life science 2, 202-213.
- Shrikant D. Khandare., Doongar R. Chaudhary ab., Bhavanath Jha. (2021).**Bioremediation of polyvinyl chloride (PVC) films by marine bacteria. *Marine Pollution Bulletin* 169,1-11.
- Sivakumaran Sivaramanan. (2013).** E waste management, Disposal and its impact on the environment.Universal Journal of environment Research and technology 3, 531-537.
- Sonal Thakur, Shivangi Mathur, Saumya Patel and Biswaranjan Paital. (2022).**Microplastic Accumulation and Degradation in Environment via Biotechnological Approaches.*Water* 14,1-21.
- Sunil Ghatge., Youri Yang Jae-Hyung Ahn., Hor-Gil Hur. (2020).** Biodegradation of polyethylene: a brief review. *Applied Biological Chemistry* 63, 1-14.
- Trivedi.Sonalipandey.SeermaBhadauna. (2010).**"Textbook of microbiology " .1ereedition. Aavishkar. P 72.
- Uqab Ali., Syeed Mudasair., saleemm Farooq., Ruqueya Nazir. (2015).** Factors affecting Bioremediation. *Journal of Research development* 15, 102-109.
- Vishali Patel., Kamlesh Shah. (2013).**Petroleum hydrocarbon pollution and it's biodegradation. *International journal of Chemtech Application* 2, 63-80.
- V. MARY KENSA. (2011).** BIOREMEDIATION-AN OVERVIEW. *Jr of Industrial Pollution Control* 27, 161-168
- Voldymyr Ivanov. (2011).** environmental Microbiology for engineers. CPC press Taylor &Francis Group. P8.
- Wanapaisan, P., Laothamteep, N., Vejarano, F., Chakraborty, J., Shintani, M., Muangchinda, C., et al. (2018).** Synergistic degradation of pyrene by five culturable bacteria in a mangrove sediment-derived bacterial consortium. *Journal of Hazardous Materials*342, 561-570.
- Wurood Hamza Muttaleb., Zainab Haider Ali. (2022).**Bioremediation An eco-friendly method for Admistration of environmental contaminants, *Minar. International journal of applied sciences and technology* 4, 21-32.

Xingjian Xu, Wenming Liu., Shuhua Tian., Wei Wang, Qige Qi ., Pan Jiang., Xinmei Gao., Fengjiao Li ., Haiyan Li., and Hongwen Yu. (2018). Petroleum Hydrocarbon- Degrading Bacteria for the Remediation of Oil Pollution Under Aerobic Conditions: A Perspective Analysis. *Frontiers in Microbiology* 9 ,1-11.

Yves Andres., Eric Dumont., Claire Gerente. (2009). Characterization techniques of packing material colonization in gas biofiltration processes. *Canadian Journal of Civil Engineering* 36, 1895-1902.