

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES

Faculté des sciences

Département de Biologie

## Mémoire de fin d'étude

Spécialité : Biotechnologie Microbienne

En vue de l'obtention du diplôme de Master

### Thème

**Caractérisation des activités bactériennes des sols  
pollués aux hydrocarbures pétroliers**

**Réalisé par :**

Mme BOULKIS Chahrazed et

Mme MEZDAOUET Khadoudja

**Jury d'évaluation**

Mme SAYAH Amna	MAA (UMBB)	Présidente
Mme ALOUACHE Lamia	MAA (UMBB)	Promotrice
Mme AKROUM -AMROUCHE Dahbia	MCB (UMBB)	Examinatrice

**Promotion : 2019/2020.**

## *Remerciements*

*Nous remercions tout d'abord le bon Dieu qui nous a aidé et donné la volonté pour la réalisation de ce travail ;*

*Nos vifs remerciements accompagnés de tout notre profond respect s'adressent à notre promotrice Mme ALOUACHE Lamia pour son suivi et son engagement lors de l'élaboration de ce travail, nous la remercions pour les orientations et les conseils qui nous ont été bénéfiques;*

*Nous remercions vivement la présidente du jury Mme SAYAH Amna et l'examinatrice Mme AKROUM-AMROUCHE Dahbia qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail ;*

*Finalement, nous remercions tous ceux qui nous ont aidé et ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## *Dédicace*

*Avec l'aide de dieu, le tout puissant, ce travail est achevé je dédis  
A ceux qui me sont les plus chère au monde, aux deux êtres qui  
éclairent ma vie :*

*J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en  
signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts  
rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue.*

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté et de fierté,  
de sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui  
je dois de l'amour et la reconnaissance. A ma chère mère et mon cher  
père.*

*A mon mari qui était toujours avec mes cotés n'a jamais cessé  
de me soutenir et de m'encourager*

*A ma fille Alaa Rahman qui comble notre bonheur .*

*A mes chères sœurs : Meriem et Zakia ;*

*A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation  
tout au long de ma vie d'étude .*

*A toute la promotion biotechnologie microbienne 2019-2020*

*Et à tous ceux qui m'aiment.*

**Chahrazed**

## *Dédicace*

*Je dédie ce projet aux être les plus chères à mon cœur : La meilleur de toutes les mères Hissoum Karima, qui m'a soutenu durant toute ma vie, qui m'a aidé durant mes années d'études, qui m'a appris à aimer le travail et le bon comportement, pour son amour infini et sa bienveillance jour et nuit .*

*Je souhaite prouver mon grand remerciement qui ne sera jamais suffisant à lui Que j'espère le rendre fière par ce travail mon très cher père Mohamed Pour être le bon exemple de père par son soutien ses encouragements et aides des mes premiers d'études jusqu'à ce jour, mon chère marie, Slimane Hissoum mes chères sœurs (Kaouther Sihem Ibtihaj Ghoufrane ) je t'aime beaucoup Mes chers frères Mossa et sa famille , Abd Razak , Nasradine ma chère tante Razika et sa famille ce travaille je le dédie aussi pour tous ma familles MEZDAOUET et mes chers amis qui me connaissent et je la remercie d'avoir participé à ce travail.*

***Khadoudja***

## الملخص

لطالما كان تلوث التربة بالملوثات العضوية مثل الهيدروكربونات البترولية مشكلة للبيئة لأنها تعتبر ملوثات ضارة للغاية لكل من البشر و البيئة. حيث يمكن أن تشكل خطر كبير بسبب قوتها المسببة للطفرات أو المسرطنات .

لذلك من الضروري البحث عن حلول من أجل تحطيم الهيدروكربونات البترولية. هناك عدة طرق للحد من الهيدروكربونات البترولية , من بين هاته الطرق نحن مهتمون باقتباسات المعالجة الحيوية التي هي موضوع دراستنا .

نظرا للظروف الحالية ( فيروس كورونا) لم تكن لدينا فرصة للقيام بالتدريب العملي كجزء من أطروحة الدراسة , لذلك ركزنا على 4 مقالات حديثة لإجراء بحث حول النشاط البكتيري في التربة الملوثة بالهيدروكربونات البترولية.

المقال الأول مبني على تقييم النشاط البكتيري من خلال ثلاثة مناهج للمعالجة الحيوية للتربة الملوثة بالهيدروكربونات البترولية :

التوهين الطبيعي , زراعة الأراضي و زراعة الأراضي + الزيادة الحيوية بعد إجراء مقارنة بين هذه الأساليب لتحديد الطريقة الأكثر فعالية (زراعة الأراضي – الزيادة الحيوية).

المقال الثاني , تقييم القضاء على الهيدروكربونات البترولية من خلال تحسين ظروف نمو السلالات ( وقت الحضانه , درجة الحموضة و درجة الحرارة) .

المقال الثالث , قاموا بتحسين التحلل الحيوي لمزارع الأراضي عن طريق إضافة العناصر الغذائية في شكل تربة غير ملوثة أما في المقال الرابع قاموا بتطبيق سلالتين جديدتين من البكتيريا الشعاعية التي أثبتت فعاليتها في المعالجة الحيوية للتربة الملوثة بتركيزات عالية من الهيدروكربونات البترولية.

**الكلمات المفتاحية :** التوهين الطبيعي , الزيادة الحيوية , التحفيز الحيوي , زراعة الأراضي , المعالجة الحيوية ,  
*Actinobactérie, Pseudomonas*

## Résumé

La pollution des sols par des polluants organiques tels que les hydrocarbures pétroliers (HP) a longtemps été une problématique pour l'environnement car ils sont considérés comme des polluants très nocifs et aussi bien pour l'homme que pour l'environnement certains d'entre eux peuvent présenter une grande toxicité du fait de leurs pouvoirs mutagènes et/ou cancérogènes donc il faut chercher des solutions dans un but de dégrader ces HP. Il existe plusieurs méthodes pour la dégradation des HP, parmi ces méthodes on s'intéresse à la bioremédiation qui fait l'objet de notre étude.

A cause des circonstances actuelles (virus corona) nous n'avons pas la chance d'effectuer le stage pratique dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, de ce fait nous sommes focalisés sur 4 articles récents pour réaliser des recherches sur l'activité bactérienne dans les sols pollués par les hydrocarbures pétroliers.

Le 1<sup>er</sup> article (Guarino et *al.*, 2017) ont basé sur une évaluation de l'activité bactérienne par trois approches de biorestauration d'un sol contaminé par des HPT : atténuation naturelle (AN), landfarming (L) et landfarming + bioaugmentation (LB). Ensuite une comparaison a été faite entre ces approches pour déterminer la méthode la plus efficace (Landfarming-Bioaugmentation).

Le 2<sup>ème</sup> article réalisé par (Wang, 2020), évalue de l'élimination des HP par l'optimisation des conditions de croissance des souches (temps d'incubation, pH, Tm).

Pour le 3<sup>ème</sup> article par (Chikere et *al.*, 2019) les recherches ont amélioré la biodégradation de landfarming par l'ajout des nutriments sous forme de sol non pollué mieux que d'ajouter des nutriments sous forme d'engrais inorganique. Dans le

4<sup>ème</sup> article (Josef, et *al.*, 2018), deux nouvelles souches actinobactériennes ont prouvé leur efficacité pour la bioremédiation des sols contaminés par fortes concentrations des HP.

**Mots clés :** atténuation naturelle, bioaugmentation, biostimulation, landfarming, HPT, bioremédiation, *Actinobactérie*, *Pseudomonas*.

## Abstract

The pollution of soils by organic pollutants such as petroleum hydrocarbons (HP) has been a problem for the environment for a long time because they are considered to be very harmful pollutants and both for humans and for the environment some of them. they can present a great toxicity because of their mutagenic and / or carcinogenic powers so it is necessary to seek solutions in order to degrade these HP. There are several methods for the degradation of HP, among these methods we are interested in bioremediation which is the subject of our study.

Due to the current circumstances (corona virus) we do not have the chance to do the practical internship as part of our end of study thesis, therefore we focused on 4 recent articles to carry out research on the bacterial activity in soils polluted by petroleum hydrocarbons.

The 1st article (Guarino et al., 2017), are based on an assessment of bacterial activity by three approaches to bioremediation of soil contaminated by HP: natural attenuation (AN), landfarming (L) and landfarming + bioaugmentation (LB) . Then a comparison was made between these approaches to determine the most efficient method (Landfarming-Bioaugmentation).

The 2nd article by (Wang, 2020) evaluates the elimination of HP by optimizing the growth conditions of the strains (incubation time, pH, Tm).

For the 3rd article by (Chikere et al .,2019) , research has improved the biodegradation of landfarming by adding nutrients as unpolluted soil better than adding nutrients as inorganic fertilizer .

In the 4th article (Josef, et al., 2018), two new actinobacterial strains have proven their effectiveness for the bioremediation of soil contaminated by high concentrations of HP.

**Key words:** natural attenuation, bioaugmentation, biostimulation, landfarming, HPT, bioremediation, *Actinobacteria*, *Pseudomonas*.

**Liste des tableaux**

Tableau 1: Propriétés et toxicités de quelques HAP prioritaire selon L'EPA( Florence , 2011)  
..... 10

Tableau 2 Principales souches bactériennes aérobies qui participent à la dégradation des  
HAP(Chadli, 2015)..... 24

Tableaux 3 : Principaux résultats d'élimination des hydrocarbures pétroliers totaux selon le  
traitement utilisé(Guarino  
,2017).....37

Tableau 4: Résumé de l'efficacité de biodégradation des isolats et de sa température préférée  
(Wang, 2020)..... 39

### Liste des figures

Figure 1 : Représentation des principales familles d'hydrocarbure et autres composés d'un pétrole avec quelque exemples de molécules (Persaud , 1993). .....	4
Figure 2 : Présentation 16 HAP classés prioritaires par USEP(Tarantini, 2009). .....	6
Figure 3 : Devenir des HAP dans les écosystèmes(Dorine, 2011). .....	13
Figure 4 : Schéma de principe de l'incinération(Bouzid, 2019). .....	18
Figure 5: Principe de désorption thermique ex-situe (Dufresne, 2013). .....	18
Figure 6: Procédé de traitement des sols par lavage ex-situe(Colombano, 2010). .....	19
Figure 7: Voies catabolique proposées pour le naphthalène et phénanthrène par des bactéries aérobies du genre pseudomonas(Sylvain , 2005). .....	23
Figure 8: La voie réductrice proposée a la biodégradation du naphthalène(Chadli, 2015). .....	25
Figure 9: Présentation schématique de l'expérience avec différents traitements herbe(G), vers de terre(E) et consortium bactérien(B) et leurs combinaison en serre(Rodriguez-Campos, 2019). .....	29
Figure 10:Schéma de principe de Land farming (Colombano , 2010).....	30
Figure 11:Schéma simplifié du processus de compostage(Aboulam, 2005). .....	32
Figure 12: Courbe théorique d'évolution de température au cours du compostage(Cédric, 2003). .....	33
Figure 13: Compostage en andains(Jean-Michel et <i>al.</i> , 2010).....	34
Figure 14: Compostage en canal(Jean-Michel et <i>al.</i> , 2010).....	34
Figure 15: Compostage en bioréacteur(Jean-Michel, Michel et <i>al.</i> , 2010).....	35
Figure 16: Efficacité de la biodégradation pour les souches isolées dans le milieu MS(A) et le nombre de colonies dans différentes conditions de croissance: temps d'incubation (B), température (C) et valeurs de PH(D) (Wang, 2020) .....	38
Figure 17: Concentration résiduelle de HPT dans les sols en utilisant les souches isolées (Wang, 2020).....	40
Figure 18: (A) site avant la remédiation (B) site pendant la remédiation (Chikere et <i>al.</i> ,2019).....	42

### Liste des abréviations

AN : Atténuation naturelle.

BMBF : Le ministère fédéral de la recherche Allemagne

BTEX: Benzène , Toluène, Ethylbenzène et xylène.

BUH : Bactéries utilisant les hydrocarbures.

CO<sub>2</sub> : Dioxyde se carbone.

CUTEC: Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Allemagne

EFSA : Agence européenne de sécurité des aliments .

EPA : Agence américaine de protection de l'environnement.

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique.

HP : Hydrocarbures pétroliers.

HPT : Hydrocarbure pétrolier totaux.

H<sub>2</sub>O : Monoxyde de dihydrogène.

L : Landfarming.

LB : Landfarming-Bioaugmentation .

MFC: Pile à combustible microbienne

MPPS : Système de phytoremédiation multi processus.

OGM : Organisme génétiquement modifié.

POP: Polluants organiques persistants .

SBE : Système bioélectrochimique.

T<sub>m</sub> : Température.

## Liste des abréviations

---

pH : Potentiel hydrogène.

## Sommaire

### Résumé

### Liste des tableaux

### Liste des figures

### Liste des abréviations

### Sommaire

Introduction .....	1
<b>Chapitre I. Définition et origine des hydrocarbures</b> .....	<b>3</b>
I.1.Définition .....	3
I.2.Origine des hydrocarbures .....	3
I.3.Utilisations des hydrocarbures.....	4
I.4.Classification des Hydrocarbures.....	4
I.4.1.Hydrocarbures saturés .....	5
I.4.2. Hydrocarbures aromatiques .....	6
I.4.3 Hydrocarbure aromatique polycycliques(HAP) .....	6
I.4.4.Composés polaires .....	7
I.4.5.Les asphaltènes.....	7
I.4.6.Les métaux.....	7
I.5.Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures .....	8
I.5.1.Densité.....	8
I.5.2.La solubilité.....	8
I.5.3.Polarité.....	8
I.5.4.Viscosité .....	8
I.6.1.La pollution des sols par les hydrocarbures aromatiques polycycliques .....	8
I.6.2.La toxicité par les hydrocarbures aromatiques polycycliques .....	9
I.6.3.L'impact de la pollution pétrolière .....	11
a) L'impact sur les humains .....	11
b) L'impact sur l'environnement .....	11
b.1. Sur le sol .....	11
b.2.L'impact sur la qualité d'eau.....	11
b.3.L'impact sur la qualité de l'air ambiant.....	12
I.7.Provenance et devenir des hydrocarbures dans l'environnement .....	12

## Sommaire

---

I.7.1. La transformation abiotique.....	13
I.7.1.1. Evaporation .....	13
I.7.1.2. Solubilisation .....	14
I.7.1.3. Emulsification.....	14
I.7.1.4.Sédimentation .....	14
I.7.1.5. Photo-oxydation.....	14
I.7.1.6.L'hydrolyse.....	15
I.7.2.La transformation biotique ou la biodégradation .....	15
I.8. Les hydrocarbures en Algérie.....	15
I.8.1.Problématique liée aux hydrocarbures pétroliers en Algérie .....	16
<b>Chapitre II: Processus de Réhabilitation des sols contaminés par les hydrocarbures Pétroliers.....</b>	<b>17</b>
II.1 Méthodes physico-chimiques de traitement des hydrocarbures.....	17
II.1.1.Traitement thermique .....	17
II.1.1.1. Incinération .....	17
II.1.1.2.Désorption thermique .....	18
II.1.2.Traitement chimique.....	18
II.1.2.1.La réduction chimique.....	18
II.1.2.2.L'oxydation chimique .....	18
II.1.2.3.Lavage des sols in-situ .....	19
II.1.3. Techniques physiques.....	19
II.1.3.1.Les procédés physiques par piégeage.....	19
II.1.3.2. Les procédés physiques par évacuation.....	20
II.2. Limitations des méthodes de traitement des hydrocarbures pétroliers.....	20
II.3. Techniques biologiques (Bioremédiation) pour le traitement des hydrocarbures :.....	21
II.3.1. La bioremédiation.....	21
II.3.1.1.Description :.....	21
II.3.1.2.Le principe .....	21
II.3.1.3.Les agents debioremédiation .....	21
a) Les algues et les cyanobactéries.....	21
b)Les bactéries .....	22
c)Les champignons .....	22
d)Les plantes.....	22
II.3.1.4.Les types de bioremédiation .....	23
a)La bioremédiation aérobie .....	23
b)Labioioremédiation anaérobie .....	24

## Sommaire

---

II.3.1.5. Les nouvelles techniques de bioremédiation .....	25
a) Couplage bioremédiation (rhizosphère) / phytoremédiation .....	25
b) Couplage bioaugmentation / phytoremédiation .....	26
c) Couplage phytoextraction / valorisation énergétique de la biomasse .....	26
d) Système de phytoremédiation multiprocess (MPPS).....	27
e) Génie génétique.....	27
f) Système bioélectrochimique.....	27
g) Combinaison de trois techniques phytoremédiation/bioaugmentation/verméremédiation .....	28
II.4. Landfarming.....	29
II.4.1. Définition.....	29
II.4.2. Principe.....	29
II.4.3. Applicabilité.....	30
II.4.4. Paramètres de suivi .....	30
II.4.5. Efficacité.....	31
II.4.6. Avantages .....	31
II.4.7. Inconvénients .....	31
II.5. Compostage.....	32
II.5.1. Définition et principe du compostage .....	32
II.5.2. Description.....	33
II.5.3. Les quatre phases du compostage.....	33
II.5.4. Les techniques de compostage .....	33
II.5.5. Les avantages du compostage.....	34
II.5.6. Les inconvénients du compostage .....	35
<b>Chapitre III : Discussion.....</b>	<b>36</b>
III.1. Évaluation de trois approches de biorestauration (Atténuation Naturelle, Landfarming et Bioaugmentation – Landfarming Assistée) pour un sol contaminé aux hydrocarbures pétroliers totaux .....	36
III.2. Biodégradation des hydrocarbures pétroliers totaux dans le sol: isolement et caractérisation des souches bactériennes du sol contaminé par l'huile .....	37
III.2.1. Efficacité de la biodégradation des souches isolées en milieu BP .....	38
III.2.2. Optimisation des conditions de croissance des souches isolées en milieu BP.....	38
III.2.3. Identification des souches isolées.....	39
III.2.4. Détermination de l'efficacité de biodégradation des souches isolées exposées aux sols indigènes.....	40
III.3. L'amélioration de la biodégradation microbienne des hydrocarbures (HAP) de sol contaminé par le pétrole brut pendant landfarming.....	41

## Sommaire

---

III.4.La biodégradation de hautes concentrations des Hydrocarbures Aliphatique dans le sol d'une raffinerie de pétrole: Implications pour l'applicabilité du nouvelles Souches d'actinobactéries.....	45
Conclusion générale .....	46
Références Bibliographiques	
Glossaire	

### Introduction

Les produits pétroliers représentent toujours une source d'énergie majeure pour la vie quotidienne et l'activité industrielle (Guarino et *al.*, 2017).

Les hydrocarbures pétroliers sont toxiques pour la flore, la faune, les humains et les organismes bénéfiques du sol. Ils sont classés par leur cancérigènes, mutagénèse et tératogénèse par l'agence américaine de protection de l'environnement (USEPA 1986) et plusieurs auteurs considèrent ces hydrocarbures comme polluants de l'environnement en priorité. (Rodriguez-Campos, 2019).

Ces derniers temps, les polluants pétroliers dans le sol sont un problème répandu dans le monde entier et surviennent souvent à divers stades de l'exploration du pétrole, des accidents, du transport et des fuites. Par conséquent, la pollution des sols par le pétrole brut est un problème environnementale mondiale qu'il est nécessaire de résoudre immédiatement (Baoune, 2019).

Plusieurs approches et stratégies, notamment physiques et chimiques, ont été développées, optimisées et utilisées pour atténuer les effets de ces contaminants et assainir les sites pollués. Leur coût élevé et le manque d'acceptation par le public et la plupart des techniques sont invasives et ne font que déplacer le problème de contamination vers un site différent, nécessitant souvent une gestion plus poussée des déchets (Alegbeleye, 2017).

Au cours des dernières décennies, différentes technologies d'assainissement ont été appliquées et d'autres émergents. Ils ont tous des degrés de réussite différents. Cependant, les technologies biologiques (ou bioremédiation) se sont avérées plus rentables que les technologies chimiques, thermiques ou, physiques (Rodriguez-Campos, 2019).

Dans ce travail on se focalise sur la capacité des microorganismes indigènes ou exogènes à dégrader les hydrocarbures pétroliers et de comparer l'efficacité de plusieurs techniques de bioremédiation : atténuation naturelle, bioaugmentation par l'ajout de consortium microbien, landfarming par l'aération et l'ajout des nutriments et une approche de combinaison landfarming-bioaugmentation et nous avons effectuée une recherche sur

## **Introduction**

---

l'isolement des souches microbiennes qui ont la capacité de dégrader les hydrocarbures pétroliers par l'optimisation des conditions de croissance (Tm , pH , temps d'incubation ) et la capacité hydrocarbonoclaste d'Actinobactéries à dégrader les HP.

Nous avons structuré notre mémoire en trois chapitres. Le premier et second chapitre représentent une synthèse bibliographique .Un troisième chapitre décrivant une discussion générale des recherches précédentes concernant notre thème, suivi d'une conclusion.

## Chapitre I. Définition et origine des hydrocarbures

### I.1. Définition

Un hydrocarbure est un composé organique contenant exclusivement des atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H) .

Le terme « Hydrocarbures » est une appellation générique qui désigne le pétrole sous toutes ses formes (pétrole brut, le fuel-oil, les résidus d'hydrocarbures et les produits raffinés, « condensats », huiles minérales, gasoils et essences,...etc.),(Cabane, 2012).

La formule brute :  $C_nH_m$ , où n et m sont deux entiers naturels. Ils sont, selon les conditions de température et de pression, solides (paraffine), liquides (essences, pétrole, etc.) ou gazeux (méthane, butane,...etc.). Les hydrocarbures peuvent aussi comprendre des atomes d'oxygène, d'azote et de soufre et des métaux à l'état de traces (nickel, vanadium, etc.) (Hassaine, 2016).

### I.2. Origine des hydrocarbures

Les hydrocarbures sont émis dans l'environnement par des processus naturels ou anthropiques. Selon leur origine, les hydrocarbures sont regroupés en trois catégories : pyrolytiques, pétrogéniques et diagénétiques :

- **Pyrolytique** : Formation par combustion incomplète de matière organique d'origine naturelle (feux, volcanisme) ou anthropique (activité domestique ou industrielle) . Cette source est responsable de la majorité des émissions des hydrocarbures dans l'atmosphère.
- **Pétrogénique** : Formation à partir des produits pétroliers ou des dérivés des produits pétroliers. Cette source est responsable d'émissions plus localisées chroniques (activité portuaire, raffinerie, lessivage des infrastructures routières) .
- **Diagénétique (ou biogéniques)** : Transformation par les organismes vivants (plantes , bactéries)(Hassaine, 2016).

Les sources anthropiques représentent la majorité des hydrocarbures et regroupent les processus de transformation, tels que la raffinerie du pétrole(Gabet, 2004).

### I.3. Utilisations des hydrocarbures

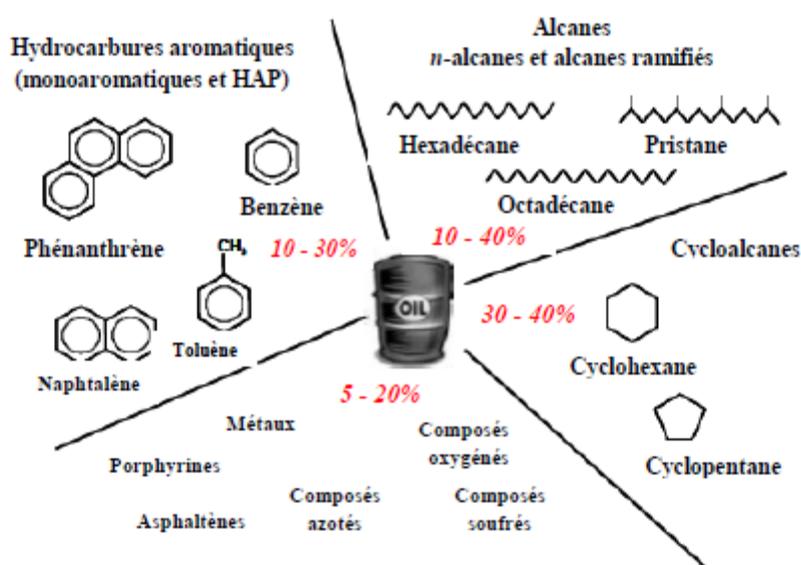
Les hydrocarbures sont essentiellement utilisés comme :

- \*Carburants.
- \* Combustibles et pour la fabrication des huiles lubrifiantes.
- \*Ils constituent aussi la matière première des synthèses pétrochimiques.
- \*Ils sont utilisés comme source de carbone pour la culture des microorganismes (Lefebvre, 1986), et se différencient fondamentalement des sucres par l'absence d'oxygène (Adrian, 1974).

### I.4. Classification des Hydrocarbures

Les hydrocarbures constituent la fraction la plus importante d'un pétrole brut, ils représentent entre 65 et 95 % de la plupart des pétroles bruts. Ces derniers peuvent être classés en quatre familles principales en proportions variables selon leur origine:

- Les hydrocarbures saturés (30 à 70 %) ;
- Les hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques (20 à 40 %) ;
- Les composés polaires (5 à 25 %) et les asphaltènes ;
- Les résines et les métaux (0 à 10 %)(Benchouk, 2017).



**Figure 1 :** Représentation des principales familles d'hydrocarbure et autres composés d'un pétrole avec quelques exemples de molécules (Persaud, 1993).

### I.4.1. Hydrocarbures saturés

On distingue les alcanes linéaires, les alcanes ramifiés, les cycloalcanes des molécules cycliques (cyclanes) . Ils sont la famille des molécules composées uniquement de carbone et d'hydrogène.

Dans l'environnement, les alcanes présentent une stabilité élevée, précisément les alcanes ramifiés dont le carbone tertiaire ou quaternaire conduit à une certaine récalcitrance vis-à-vis des micro-organismes. Cependant, grâce à leur faible solubilité et leur tendance à se lier à la phase solide du fait de leur hydrophobicité, les alcanes ne se trouveront qu'en faible quantité dans la phase aqueuse et seront stabilisés dans les sédiments de l'aquifère.

Parmi ces hydrocarbures, on distingue :

**\*Les alcanes linéaires** (*n*-alcanes,  $C_nH_{2n+2}$ ), dont la longueur de chaîne varie de 7 à 40 atomes de carbone, parmi les classes les plus abondantes (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier) (Hassaine, 2016).

**\*Les alcanes ramifiés :**

- Les iso-alcanes : Ils sont les plus abondants ,(groupement méthyle en position 2) .
- Antéiso :composés ramifiés (groupement méthyle en position3) ou polyramifiés tels que les isoprénoides (exemple :pristane, phytane) sont beaucoup moins nombreux (Hassaine, 2016).

**\* Les cycloalcanes :** Composés cycliques (ramifiés ou non) de formules générales  $C_nH_{2n}$ , ces derniers sont appelés paraffines dans l'industrie pétrolière(Colmbano, 2014), renferment des composés cycliques (à 5 ou 6 atomes de carbone) . Quelques dérivés polycycliques sont aussi présents et certains d'entre eux tels les stéranes et les triterpanes sont caractéristiques d'un pétrole brut. Cette famille représente entre 30 et 50 % des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut (Hassaine, 2016).

Ils peuvent être saturés , non saturés ou substitués . Grâce à leur grande résistance aux différents phénomènes de dégradation dans le milieu, ils servent également pour le suivi d'une pollution pétrolière (Rouidi, 2014).

### I.4.2. Hydrocarbures aromatiques

Ils sont moins abondants que les alcanes, représentent 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier. Les composés alkylés sont, la plupart du temps, plus abondants que les molécules parentales dont ils dérivent. Certains cycles aromatiques peuvent être associés à des noyaux (cycle à 5 ou à 6 atomes de carbone) saturés (naphtéoaromatiques) (Rouidi, 2014).

### I.4.3. Hydrocarbure aromatique polycycliques(HAP)

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont une famille de molécules constituées uniquement de carbone et d'hydrogène dont la structure comprend au moins 2 cycles aromatiques fusionnés, chacun est composé de 5 ou 6 atomes de carbone, et pouvant être substitués. Le HAP le plus simple, composé de deux cycles aromatiques fusionnés, est le naphthalène. Dans l'environnement, les HAP composés de 2 à 7 noyaux aromatiques sont les plus présents et les plus mobiles(Mazeas, 2004).

Les HAP proviennent essentiellement de la combustion incomplète des hydrocarbures et surtout du diesel et du charbon (Rouidi, 2014).

Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont un groupe de persistance, semi-volatiles, les polluants organiques qui sont omniprésente dans l'environnement et pénètrent dans les matrices environnementales(Alegbeley, 2017).

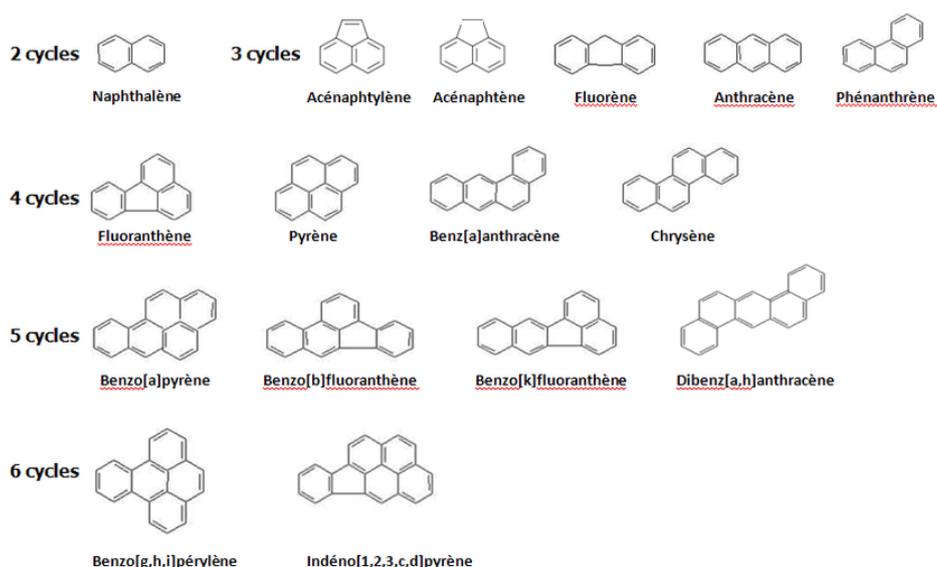


Figure 2 : Présentation 16 HAP classés prioritaires par USEP(Tarantini, 2009).

#### I.4.4. Composés polaires

Les composés polaires correspondent à des molécules hétérocycliques, telle que :

**Composés oxygénés** : présentent des structures chimiques plus complexes que les composés soufrés. Un grand nombre de ces composés sont faiblement acides. Il s'agit principalement des acides naphténiques, une famille complexe d'acides carboxyliques saturés, acycliques ou cycliques phénols, alcools, aldéhydes,...etc.

**Composés soufrés** : Le soufre est principalement retrouvé dans les hydrocarbures pétroliers sous forme de composés organiques soufrés. Ces derniers peuvent être acides, tels que les thiols et les mercaptans, ou non acides, comme les thiophènes, les sulfures et les disulfures. De façon générale, ils sont associés aux résines et aux asphaltènes, en particulier dans les hydrocarbures lourds tels que les bitumes mercaptans, sulfures, disulfures,...etc.

**Composés azotés**: Les composés azotés organiques se retrouvent dans les pétroles bruts sous une forme simple hétérocyclique, comme la pyridine ( $C_5H_5N$ ) et le pyrrole ( $C_4H_5N$ ), ou dans une structure plus complexe comme les porphyrines (Gruyer, 2015).

#### I.4.5. Les asphaltènes

Les asphaltènes correspondent à une classe de composés de hauts poids moléculaires, insolubles dans le pentane ou l'hexane. La structure de ces composés est mal connue du fait de leur composition chimique complexe (à base de cycles aromatiques condensés, de naphtéoaromatiques, de ramifications et d'hétéroatomes comme l'oxygène, l'azote et le soufre) (Soltani, 2004).

#### I.4.6. Les métaux

Sont présents, mais à l'état de traces. Les plus abondants sont le vanadium et le nickel, mais du fer, du cuivre et de l'uranium ont également été détectés (Soltani, 2004).

## **I.5. Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures.**

### **I.5.1. Densité**

Elle correspond à la masse par unité de volume.. Elle tend à diminuer lors des processus d'altération des hydrocarbures : augmentation de la température, évaporation des fractions plus légères, ou interaction avec les particules du sol (Mbogne, 2017). Presque tous les hydrocarbures sont plus légers que l'eau, pour les produits les plus courants la densité varie de 0.7 à 0.9 (Fattal, 2008).

### **I.5.2. La solubilité**

La solubilité est la capacité d'une substance à se dissoudre dans la colonne d'eau. Elle est de l'ordre de :  $\mu\text{g/l}$  (solubilité faible) ;  $\text{mg/l}$  (solubilité moyenne) ;  $\text{g/l}$  (solubilité importante). En général, les HAP ont une faible solubilité, comprise entre 30  $\text{mg/l}$  pour les composés légers et 10 – 4  $\text{mg/l}$  pour les plus lourds (Hassaine, 2016).

### **I.5.3. Polarité**

Ils sont faiblement polaires avec des points d'ébullition et de fusion élevés. (Mazeas, 2004). Les HAP sont apolaires ou peu polaires (Benyahia, 2012).

### **I.5.4. Viscosité**

Elle est définie comme la résistance à l'écoulement d'un liquide. Des hydrocarbures pétroliers ayant une faible viscosité sont très fluides et se propagent rapidement, rendant leur confinement difficile. La viscosité est influencée par la température. En effet, plus la température est faible, plus la viscosité est élevée (Gruyer, 2015).

## **I.6.1. La pollution des sols par les hydrocarbures aromatiques polycycliques**

Les HAP : parmi les polluants susceptibles d'impacter les sols, sont des polluants organiques persistants (POP) qui constituent un problème ubiquiste dans les écosystèmes du fait de leur toxicité, leurs grandes persistance et leur bioaccumulations dans les chaînes alimentaires, cette Propriété s'explique par la structure chimique de ces molécules qui leur

confère une faible biodisponibilité une grande stabilité thermodynamique .En Europe 14 % de la pollution des sols résulte de l'industrie pétrolière et les HAP représentent près de 11% des contaminants des sols (Antoine, 2013).

### **I.6.2.La toxicité par les hydrocarbures aromatiques polycycliques**

L'exposition au goudron de houille et aux produits de la combustion du charbon est proportionnelle à l'apparition des cancers du poumon, larynx, peau scrotum et vessie chez les travailleurs des usines à gaz et cokeries et chez les ramoneurs.

Certains HAP sont immunotoxiques car l'exposition à ces produits aboutit à la suppression des composants du système immunitaire et certains sont l'origine de tumeurs par suite d'exposition prolongée par exemple le benzo pyrène est considéré comme le produit le plus dangereux ; outre son caractère cancérigène, il est également tératogène ,il est souvent utilisé comme indicateur de la toxicité éventuelle de sols pollués, un autre composé, le dibenzo pyrène, est estimé comme le HAP le plus cancérigène jamais testé .

L'organisation mondiale de la santé a choisis 6 HAP comme étant représentatifs de la toxicité de ces composés et significatifs de la présence plus large d'autres HAP dans les eaux : le fluoranthène, le benzo[b] fluoranthène, le benzo fluoranthène, le benzo pyrène, le benzo péryléne et l'indol pyrène (Magalie, 2000).

L'agence américaine de protection de l'environnement (EPA) et l'agence européenne de sécurité des aliments (EFSA) ont ainsi listé 16 HAP comme polluants prioritaires (tableau, 1) (Florence, 2011).

Tableau 1: Propriétés et toxicités de quelques HAP prioritaire selon L'EPA

HAP majoritaires	Formules chimiques	Masse molaire (g/mol)	Solubilité dans l'eau (mg/L)	Toxicité	Cancérogène ou mutagène	Commentaires	Sources
Naphtalène	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	128,16	30	Modérée	Non confirmée	Cancérogène chez les animaux	EPA-TSCA
Acénaphthylène	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	154,21	1,93	Modérée	Constaté		EPA-TSCA
Acénaphthylène	C <sub>12</sub> H <sub>18</sub>	154,20	3,93	Modérée	Constaté		EPA-TSCA
Fluorène	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	166,20	1,98	Faible	Constaté	Mutagène pour l'Homme	EPA-TSCA, IARC
Phénanthrène	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178,20	1,2	Modérée	Constaté	Photosensibilisateur de peau	EPA-TSCA, IARC
Anthracène	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	178,20	0,076	Modérée	Constaté	Cancérogène chez les animaux	EPA-TSCA, IARC
Fluoranthène	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202,26	0,26	Modérée	Constaté	Cancérogène/Retenu par la norme européenne relative à l'eau potable	EPA-TSCA, IARC
Pyrène	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	202,30	0,077	Modérée	Constaté	Dommages sur ADN, Mutagène pour l'Homme	EPA-TSCA, IARC
Benz a anthracène	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	228,90	0,01	Elevé	Confirmée	Cancérogène, Mutagène pour l'homme	EPA-TSCA, IARC
Chrysène	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	224,30	2,8 .10 <sup>-3</sup>	Elevé	Confirmée	Cancérogène chez les animaux Mutagène pour l'homme	EPA-TSCA, IARC
Benzo [b] Fluoranthène	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252,30	0,0012	Elevé	confirmé	Cancérogène chez les animaux	IARC
Benzo [k] Fluoranthène	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252,30	7,6 .10 <sup>-4</sup>	Elevé	Confirmée	Cancérogène chez les animaux	IARC
Benzo [a] Pyrène	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	252,30	2,3 .10 <sup>-3</sup>	Elevé	Confirmée	Cancérogène de l'humain, Mutagène pour l'Homme	EPA-TSCA, IARC
Benzo [g h i] perylène	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	276,34	2,6 .10 <sup>-4</sup>	Elevé	Constaté		IARC
Dibenzo [a h] anthracène	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	278,35	5 .10 <sup>-4</sup>	Elevé	Confirmée	Cancérogène chez les animaux, Mutagène pour l'Homme	EPA-TSCA, IARC

Sources : IARC : Centre International de Recherche sur le Cancer

EPA-TSCA : Environmental

Protection Agency-Toxic Substances Control Act Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques dans l'air ambiant, rédigé par Eva LEOZ GARZIANIA (Direction des Risques Chroniques) – Décembre 200

### **I.6.3.L'impact de la pollution pétrolière**

#### **a) L'impact sur les humains**

Les activités pétrolières peuvent avoir un impact marqué sur les humains, elle concerne notamment la santé humaine, parmi ces derniers : les conséquences toxicologiques sur la santé humaine, les atteintes à la sécurité des travailleurs, les conséquences sur la santé mentale, ainsi que les impacts sur la santé humaine liés à une dégradation des écosystèmes. Plus de 1100 accidents mortels survenus sur des plateformes de forage en mer depuis 1956(Sylvain & Jean-Patrick, 2016).

#### **b) L'impact sur l'environnement**

##### **b.1. Sur le sol**

La pollution des sols par les hydrocarbures résulte généralement de l'infiltration à partir de la surface ou de l'enfouissement de produits pétroliers ou de résidus hydrocarboné qui conduit à une pollution importante des sols et sous-sols par des mélanges complexes de substances organiques et inorganiques parmi lesquelles on retrouve les hydrocarbures, les solvants chlorés, les métaux,... etc. . Ces pollutions issues pour la plupart de déversements accidentels ou ponctuels résultant de comportements délibérés ou non, de fuites de réservoirs de stockage constituent un problème environnemental majeur notamment terme de risque de transfert d'hydrocarbures vers les nappes phréatiques, mais également un risque humain non négligeable (Benchouk, 2017).

##### **b.2.L'impact sur la qualité d'eau**

La contamination des eaux de surface et souterraines par l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures est la conséquence d'activités réalisées en surface : déversement accidentel de produits chimiques ou d'eaux usées, fuites de liquides provenant des équipements et véhicules, boues de forage, traitement inadéquat des eaux de fracturation et des eaux usées. La contamination peut aussi résulter de mécanismes souterrains pendant les phases de forage, fracturation hydraulique et exploitation de gaz (Lary *et al.*, 2011).

**b.3.L'impact sur la qualité de l'air ambiant**

Par exemple, l'impact des dispositifs de production sur la qualité de l'air. Outre les fuites de méthane dans l'atmosphère citées plus haut, une étude réalisée par l'Etat de New York en 2009 montre que le carburant consommé pour alimenter les sites de production ainsi que le brûlage du gaz à la torchère peuvent entraîner l'émission d'oxydes de soufre (SO<sub>x</sub>), d'azote (NO<sub>x</sub>), de particules, de même que de produits potentiellement toxiques (comme le benzène) autour des sites de production (Lary *et al.*, 2011).

**I.7.Provenance et devenir des hydrocarbures dans l'environnement**

Les hydrocarbures sont des composés issus de la transformation de la matière organique, principalement d'origine végétale. Naturellement émis dans l'atmosphère lors d'éruptions volcaniques, ou de feux de forêts, ils sont aussi contenus dans les combustibles fossiles comme le pétrole ou le charbon, donc ils sont des composés ubiquitaires qui contaminent l'air, les eaux douces ou marines, les sédiments et les sols, à des concentrations variables (Florence, 2011).

Lors de déversement des hydrocarbures au niveau du sol, ceux-ci sont soumis à différents processus d'altération physique, chimique et biologique qui vont déterminer leur devenir dans le milieu. Dépendent beaucoup des propriétés intrinsèques du sol, des conditions environnementales, de la composition chimique et des propriétés physiques des hydrocarbures. On observe des phénomènes biotiques sont ceux qui participent majoritairement à la dégradation des hydrocarbures lourds tandis que les phénomènes abiotiques agissent plutôt sur les plus légers (Pascal & Fokou, 2017).

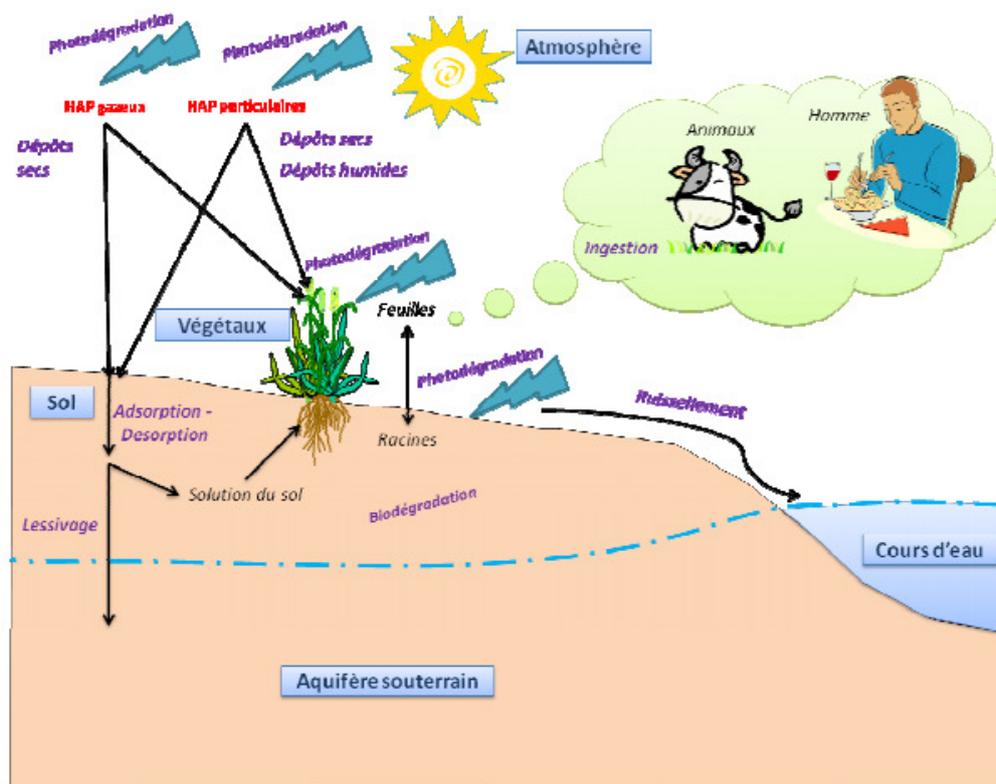


Figure 3 : Devenir des HAP dans les écosystèmes (Dorine, 2011).

### I.7.1. La transformation abiotique

L'action simultanée des différents facteurs abiotiques (physique et chimique) aboutira à l'élimination des hydrocarbures. Elles sont responsables de la perte de 20 % des hydrocarbures aromatiques (à 2 et 3 cycles) dans les sols (Benchouk, 2017). Les facteurs de transformation abiotique des hydrocarbures peuvent se traduire principalement par :

#### I.7.1.1. Evaporation

L'évaporation est un phénomène qui touche les fractions de faible poids moléculaire et dépend des conditions atmosphériques (vent, vagues, température,...). Les hydrocarbures les plus légers, ayant de 4 à 12 atomes de carbone ( $T_m < 270\text{ °C}$ ), qui représentent généralement près de 50 % des hydrocarbures totaux d'un brut moyen, sont éliminés rapidement dès les premiers jours, pouvant conduire à une pollution atmosphérique (Soltani, 2004).

**I.7.1.2. Solubilisation**

La solubilité des hydrocarbures dans l'eau de mer est très faible. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée. Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont les plus dangereux pour l'environnement. Ils sont difficiles à éliminer et sont adsorbés par la faune et la flore (Soltani, 2004)

**I.7.1.3. Emulsification**

Deux types d'émulsions peuvent se former : eau dans l'huile appelée "mousse Chocolat" et huile dans l'eau. Les émulsions eau dans l'huile sont constituées par des hydrocarbures de haut poids moléculaires. Ces émulsions difficilement dégradables sont les précurseurs des résidus goudronneux retrouvés sur les plages, alors que les émulsions huile dans l'eau facilitent l'élimination des hydrocarbures (Soltani, 2004).

**I.7.1.4.Sédimentation**

La sédimentation est le passage du pétrole de la surface vers le fond. Ce phénomène concerne les résidus goudronneux constitués de la fraction pétrolière la plus lourde et dont la densité est supérieure à celle de l'eau de mer. La sédimentation conduit à la constitution d'agrégats de haute densité difficilement dégradable par voie naturelle (Soltani, 2004).

**I.7.1.5. Photo-oxydation**

La photo- oxydation est observée au niveau de la surface de l'eau où l'air (oxygène) et la lumière (radiations solaires) sont présents pour la transformation des hydrocarbures. L'efficacité de ce phénomène dépend de la nature des hydrocarbures et de la présence de composés non hydrocarbonés. Ainsi, la photooxydation touche plus particulièrement les composés aromatiques qui sont plus photosensibles que les composés aliphatiques. Parmi ces derniers, les composés ramifiés sont plus facilement photo-oxydés que les n-alcanes (Soltani, 2004).

### **I.7.1.6.L'hydrolyse**

Processus de dégradation des molécules organiques sous l'action de l'eau, fortement influencé par le pH et la température du sol (Guermouche, 2014).

### **I.7.2.La transformation biotique ou la biodégradation**

Particulièrement intéressantes dans le cadre de dépollution de sites contaminés en hydrocarbures pétroliers, la bioremédiation est considéré comme une façon écologique de diminuer la teneur de ces polluants récalcitrants notamment les HAP.

Elle consiste en une attaque des molécules organiques par les micro-organismes du sol, les bactéries, champignons et algues peuvent en effet cataboliser les hydrocarbures d'origine pétrolière car ces micro-organismes produisent des enzymes qui vont réagir avec les molécules d'hydrocarbures pour les transformer en molécules généralement plus simples. Si la biodégradation est complète, les polluants sont entièrement décomposés en CO<sub>2</sub>, c'est la minéralisation.

L'importance de la biodégradation dans l'élimination du pétrole, les voies métaboliques d'oxydation des hydrocarbures par les bactéries et les paramètres qui peuvent influencer la biodégradation seront traitées plus loin (Guermouche, 2014).

## **I.8. Les hydrocarbures en Algérie**

Depuis la découverte en 1956, de pétrole à Hassi-Messaoud, à 106 km au sud-est d'Ouargla, l'importance de l'exploitation d'hydrocarbures en Algérie a considérablement augmenté dans l'économie jusqu'à représenter 95% des recettes d'exportation, 30 % du produit intérieur brut et 60 % des recettes budgétaires.

L'outil de raffinage en Algérie dispose actuellement de six raffineries en cours d'exploitation (Alger, Arzew, Skikda, Hassi-Messaoud et Adrar). La capacité de traitement annuelle s'élève à 27 millions de tonnes (Benchouk, 2017).

**I.8.1.Problématique liée aux hydrocarbures pétroliers en Algérie**

De nombreuses études ont permis d'observer l'apparition de problèmes de santé lors de la baignade ou de pratique de sports aquatiques en eau contaminées. Les plus fréquents sont des troubles digestifs et des infections cutanées.

Cette pollution a retenue l'attention de l'opinion mondiale et a suscité de nombreuses conventions nationales et internationales tel que la convention internationale de Londres du 12 mai 1954 la prévention de la pollution des eaux de la mer par les hydrocarbures et la convention internationale de Bruxelles de 1971 relative à la création d'un fonds international d'indemnisation pour les dommages dus à la pollution par les hydrocarbures. En mai 1974, l'Algérie porta ratification de la convention de Bruxelles, puis, elle adopta le décret n°94-279 du 17 septembre 1994, portant organisation de lutte contre les pollutions marines et institutions de plans d'urgence.

Enfin, le 05 février 2002 la loi algérienne n°02-02 relative à la protection et à la valorisation du littoral est promulguée. Théoriquement la législation protège la baie algérienne, cependant la réalité est toute autre.

Les textes de la loi restent inappliqués, puisque sur le terrain rien n'est respecté. Les rejets des déchets riches en hydrocarbures émanant des zones industrielles se déversent directement dans la grande bleue et sans parler de ceux émanant des bateaux poubelles et les navires de ballastage qui traversent quotidiennement la côte, En attendant l'application de ces textes et la concrétisation de ces projets, seule l'état de la faune et la flore pourra témoigner de la triste vérité (Guermouche, 2014)

## Chapitre II: Processus de Réhabilitation des sols contaminés par les hydrocarbures Pétroliers.

### II.1 Méthodes physico-chimiques de traitement des hydrocarbures

Les technologies disponibles pour la remédiation des hydrocarbures peuvent être regroupées de plusieurs manières comme suit (Cole, 2018) :

- (a) Basé sur une catégorie générale - Traitement (technologies qui détruisent ou traitent les contaminants pétroliers dans l'environnement) et confinement (technologies conçues uniquement pour contenir le mouvement ou la sortie des hydrocarbures) .
- (b) En fonction du lieu d'application - In situ (assainissement sur site ,technologies de traitement qui ne nécessitent pas l'élimination du milieu contaminé) et ex situ (assainissement hors site ,technologies de traitement qui nécessitent l'excavation du sol) .
- (c) En fonction du type de processus - Physique (processus de traitement qui modifient la forme physique des contaminants pétroliers afin de les éliminer du milieu contaminé), chimique (processus de traitement qui impliquent des réactions chimiques qui altèrent ou détruisent les hydrocarbures présents dans l'environnement), thermique (processus de traitement utilisant de l'énergie pour détruire ou détoxifier les HP) et biologique (processus de traitement utilisant des agents biologiques pour minéraliser les HP présents sur les sites contaminés) .

#### II.1.1.Traitement thermique

##### II.1.1.1. Incinération

Les températures utilisées sont généralement assez élevées provoquant ainsi la minéralisation des composés sous forme de CO<sub>2</sub>, de vapeur d'eau et de cendres .L'incinération est une technique utilisée sur du sol excavé ou in situ. En mode ex situ, elle consiste à brûler les sols contaminés dans un four atteignant des températures extrêmes allant de 870à 1200°C, induisant alors leur destruction .Elle est applicable sur une large gamme de contaminants ,mais les plus visés sont les composés organiques (Bouزيد, 2019).

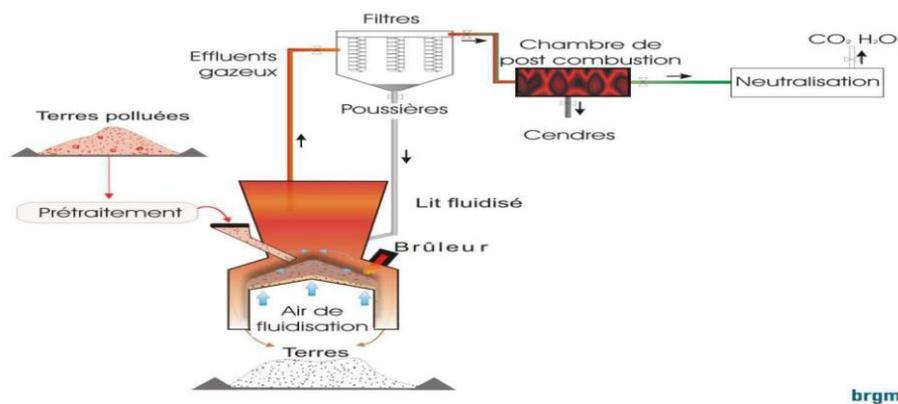


Figure 4 : Schéma de principe de l'incinération (Bouزيد, 2019).

### II.1.1.2. Désorption thermique

Le principe de désorption thermique ex-situ consiste à mettre les sols contaminés dans une unité de désorption (four) qui atteint des températures comprises entre 150 et 540°C. Ceci permet aux contaminants adsorbés aux particules du sol de s'en détacher et favorise la volatilisation des composés qui seront par la suite récupérés sous forme gazeuse.

Le principe de désorption thermique in-situ consiste à injecter de la vapeur dans la zone contaminée, à chauffer le sol par résistance électrique (courant électrique), à chauffer par micro-ondes ou encore avec un puits thermique (Dufresne, 2013).

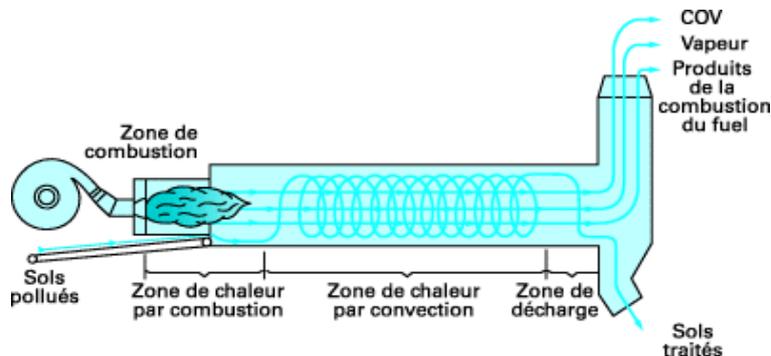


Figure 5: Principe de désorption thermique ex-situ (Dufresne, 2013).

### II.1.2. Traitement chimique

**II.2.1. La réduction chimique** in situ consiste à injecter un réducteur, donneur d'électrons, dans les sols, pour transformer les polluants.

**II.1.2.2. L'oxydation chimique** in-situ consiste à injecter dans le sol un agent oxydant, accepteur d'électrons, pour dégrader les polluants. L'usage d'oxydants forts a pour but d'éliminer la récalcitrance des composés chimiques et de les minéraliser en sous-produits

inoffensifs ( $\text{CO}_2$ , eau, nitrate...). Ce procédé permet donc d'aboutir à la destruction des polluants (aboutissant à la transformation en eau, gaz carbonique et sels) ou à la formation de sous-produits de dégradation généralement plus biodégradables (Bouزيد, 2019).

### II.1.2.3. Lavage des sols in-situ

Les contaminants adsorbés sur les sols s'accrochent aux solvants ou à l'eau, dépendamment du type de lavage, permettant aux sols d'être réutilisés sur le site.

Le lavage à l'eau nécessite préalablement un tri granulométrique, permettant de séparer les particules fines des particules grossières. Lorsque les contaminants adsorbés aux sols en sont séparés, la solution aqueuse est ensuite traitée. Pour augmenter l'efficacité du traitement à l'eau, des agents chélatants et surfactants sont ajoutés à la solution liquide, de même que des acides et des bases, de l'eau chaude et de la vapeur (Colombano, 2010).

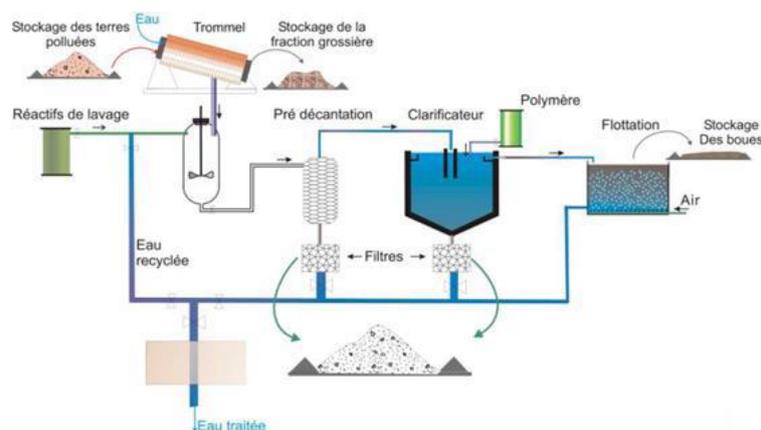


Figure 6: Procédé de traitement des sols par lavage ex-situ (Colombano, 2010).

### II.1.3. Techniques physiques

Elles constituent la majorité des techniques mises en œuvre actuellement. Elles consistent à transférer les polluants, sans les modifier ou les détruire vers des points de récupération.

#### II.1.3.1. Les procédés physiques par piégeage

Ces procédés peuvent être effectués par deux (02) méthodes différentes, qui sont :

Le confinement qui consiste à isoler la source de pollution à l'aide de matériaux qui sont utilisés en couverture ou en parois verticales et horizontales ;

La solidification et la stabilisation qui s'appliquent principalement sur des sols excavés ; (Benyahia, 2012).

### **II.1.3.2. Les procédés physiques par évacuation**

Ces procédés s'effectuent par différentes méthodes qui sont :

**L'excavation** : Cette méthode consiste à extraire les terres polluées, les envoyer vers un centre de traitement spécialisé ou vers un centre d'enfouissement technique. Mais cette méthode présente un risque d'étendre la pollution (Benyahia, 2012).

**Le pompage** : Permettent de confiner hydrauliquement les contaminants, la nappe peut être alimentée en polluants par l'intermédiaire du sol. L'efficacité du pompage dépend des caractéristiques du milieu et du comportement du polluant. Cette méthode est surtout utilisée pour les phases de contamination liquides et organiques à la surface de la nappe phréatique (Benyahia, 2012).

**Le « venting »** : Cette méthode consiste à aspirer les polluants contenus dans un sol en envoyant un flux d'air par l'intermédiaire d'une série de forage localisée en bordures de la zone à traiter, et à pomper au sein de la zone contaminée l'air chargé de gaz polluants. En sortie, les gaz polluants sont traités à leur tour avant leur rejet dans l'atmosphère (Benyahia, 2012).

## **II.2. Limitations des méthodes de traitement physico-chimiques des hydrocarbures**

Les processus physico-chimiques sont coûteux, non écologiques, complexes, conduisent à la modification des caractéristiques du sol et ne conduisent pas toujours à la dégradation complète des polluants, la bioremédiation est une alternative précieuse pour la désintoxication et l'élimination de la substance toxique, en raison de leur rentabilité, leur respect à l'environnement, leur simplicité technologique et la conservation de la texture et des caractéristiques du sol (Agarry, 2012).

## **II.3. Techniques biologiques (Bioremédiation) pour le traitement des hydrocarbures :**

### **II.3.1. La bioremédiation**

#### **II.3.1.1. Description**

La bioremédiation consiste soit à extraire des polluants par l'utilisation d'êtres vivants ayant une aptitude particulière à les bioconcentrer dans leur organisme soit, mieux encore, à faire dégrader les contaminants in situ afin de les neutraliser par les micro-organismes et parfois par les plantes supérieures. L'efficacité de la bioremédiation est conditionnée par la texture du sol, elle est plus facile à mettre en œuvre sur des sols légers ou riches en sable, donc très perméables que sur des sols argileux, comme c'est un processus aérobie, elle implique une teneur en eau des sols qui n'excède pas 60 à 70 % de leur capacité de rétention afin que l'aération soit permise par la présence d'air dans les lacunes (Ramade, et *al.*, 2011).

#### **II.3.1.2. Le principe**

La bioremédiation est une méthode biologique, fait usage à cette fin d'organismes variés : micro-organisme, végétaux supérieurs, voire invertébré présent naturellement (indigènes) ou introduite dans le milieu contaminé (exogènes) par exemple : des bactéries comme *pseudomonas putider* ou des champignons comme *phanerochaete chrysosporium* dans le but à dégrader les HAP (Ramade, et *al.*, 2011).

#### **II.3.1.3. Les agents de bioremédiation**

De nombreux organismes, procaryotes ou eucaryotes, possèdent la capacité de dégrader les HAP. Parmi ceux-ci, les bactéries et les champignons sont les plus étudiés et semblent les plus efficaces. En fonction du bagage enzymatique de l'organisme considéré, plusieurs voies peuvent être empruntées pour la métabolisation des HAP (Anthony et *al.*, 2004).

##### **a) Les algues et les cyanobactéries**

Il ya des algues vertes, rouges et brunes ainsi que des cyanobactéries ont la capacité de dégrader les HAP, cette capacité se limite aux HAP de faible poids moléculaire, même si quelques travaux ont prouvé la capacité d'une algue verte (*Selanastum capricornutum*) à dégrader le benzo[a]pyrène (Anthony et *al.*, 2004).

**b) Les bactéries**

Les bactéries ont été le groupe de microorganismes le plus étudié et leur aptitude à dégrader les hydrocarbures a été démontrée depuis plus de 50 ans.

Les différents genres bactériens fréquemment décrits pour leur capacité à dégrader les HAP sont : *Acinetobacter*, *Alcaligenes*, *Beijerinckia*, *Gordona*, *Micrococcus*, *Mycobacterium*, *Nocardia*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Sphingomonas* (Anthony et al., 2004).

**c) Les champignons**

De nombreuses études en sols ont démontré l'utilité et l'efficacité des champignons pour la bioremédiation des sols pollués par les HAP grâce à leur capacité à se propager dans les sols par leur mycélium et à produire des enzymes extracellulaires à large spécificité de substrats par rapport aux bactéries ex : *Phanerochaete*, *Pleurotus sp* (Anthony et al., 2004).

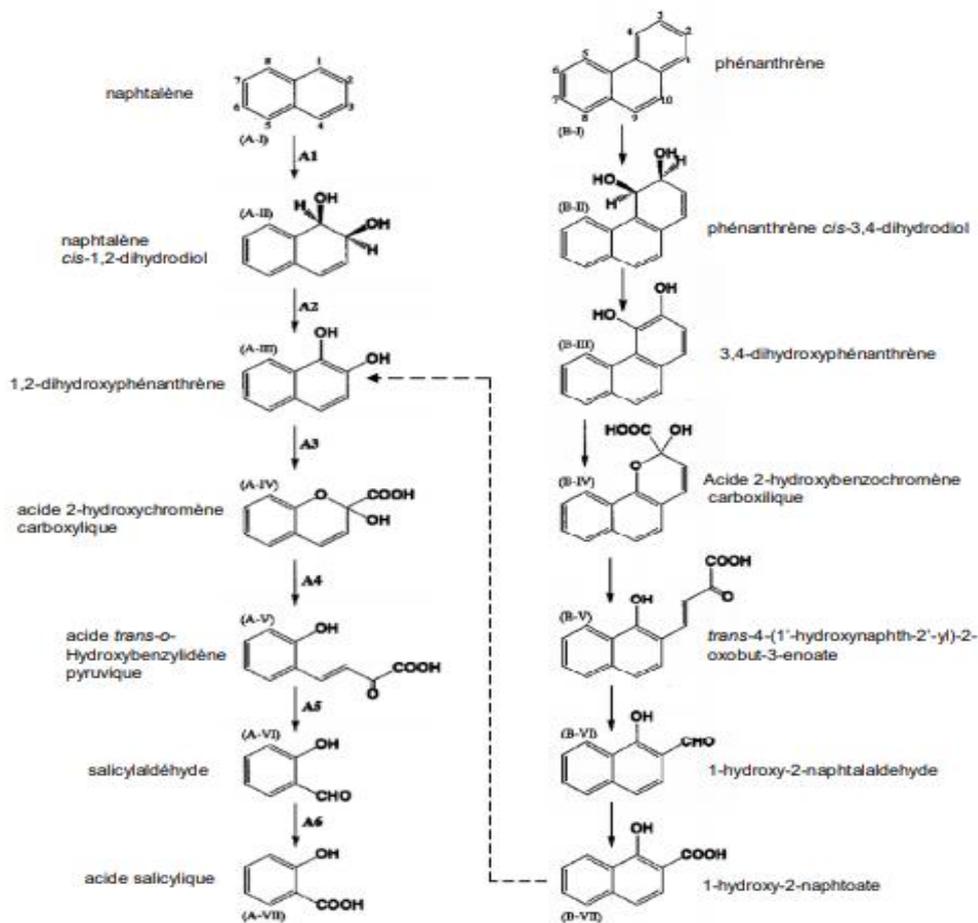
**d) Les plantes**

Plusieurs aspects caractérisent l'intérêt des plantes pour la décontamination des sols pollués : la phytostabilisation (les polluants seraient directement immobilisés par les végétaux ou indirectement par leur présence, en limitant la dispersion de la pollution par le vent ou par l'érosion du sol), la phytodégradation (capacités dégradatives vis-à-vis de divers polluants) et la phytoextraction (mise en évidence par les propriétés hyper-accumulatrices des plantes vis-à-vis des métaux lourds), les plantes ont l'avantage, par rapport aux microorganismes, de présenter une meilleure acceptation par l'opinion publique lors de leur utilisation pour le traitement d'un sol pollué (Anthony et al., 2004).

**II.3.1.4. Les types de bioremédiation****a) La bioremédiation aérobie**

En condition aérobie les bactéries oxydent initialement les hydrocarbures aromatiques polycycliques par l'incorporation de deux atomes d'oxygènes moléculaires dans le substrat pour former des dihydrodiols de configuration Cis. Cette réaction est catalysée par une enzyme, la dioxygénase.

Diverses espèces de *Pseudomonas* oxydent les HAP à 2-3 cycles tels que le naphthalène pour aboutir dans un premier temps à un radical cis-dihydrodiol. Le radical cis-dihydrodiol va donner le 1,2-dihydroxynaphtalène qui sera métabolisé en dérivé salicylé (figure 4). Les voies métaboliques des HAP à plus de 4 cycles ressemblent à celles du naphthalène avec incorporation initiale d'une molécule de dioxygène par une dioxygénase suivie d'une dégradation en chaîne des cycles benzénique (Céline, 2006).



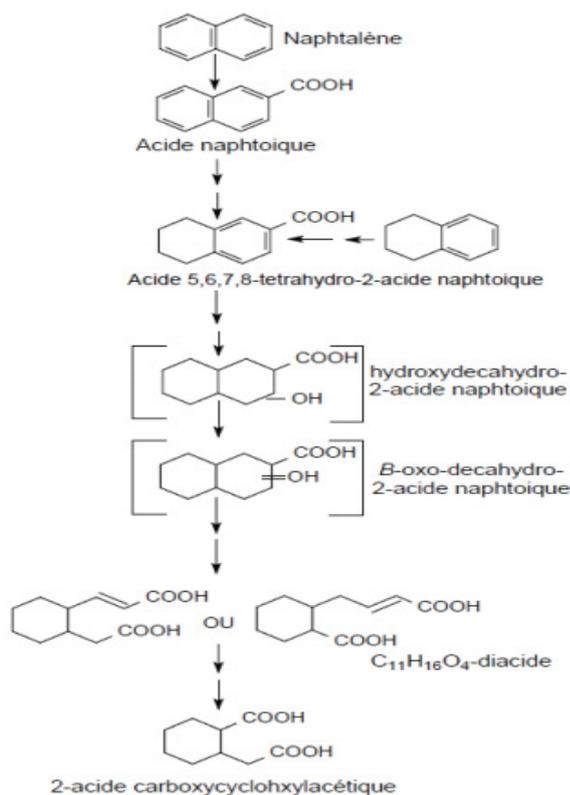
**Figure 7:**voies catabolique proposées pour le naphthalène et phénanthrène par des bactéries aérobies du genre pseudomonas (Sylvain, 2005).

**Tableau 2** : Principales souches bactériennes aérobies qui participent à la dégradation des HAP(Chadli, 2015)

Composés	Micro-organisme
Naphhtéle	<i>Pseudomonas sp</i>
	<i>Acinetobacter calcoaceticus</i>
	<i>Mycobacterium sp</i>
	<i>Rhodococcus sp</i>
Fluoréne	<i>Pseudomonas sp</i>
	<i>Rhodococcus sp et mycobacterium sp</i>
	<i>Staphylococcus auriculans</i>
Anthracéne	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
	<i>Rhodococcus</i>
Phénanthrène	<i>Pseudomonas sp</i>
	<i>Pseudomonas paucimobilis et P. Fluorescens</i>
Fluoranthéne	<i>Pseudomonas paucimobilis et alcaligenes denitrificans</i>
Pyréne	<i>Mycobacterium spp</i>
Benzo[a]anthracéne	<i>Deijerinckia sp</i>
Chryséne	<i>Rhodococcus</i>
Benzo[a]pyréne	<i>Beijeirinckia et pseudomonas spp</i>

#### b) Labioremediation anaérobie

En condition anaérobie deux étapes initiales ont été proposées dans le mécanisme de dégradation anaérobie : la carboxylation et l'hydroxylation .Néanmoins, les HAP lourds tels que le Pyrène, le Benzo(a)Anthracène et le Benzo(a)Pyrène semblent difficilement dégradables en conditions anaérobies(Céline, 2006).



**Figure 8:** La voie réductrice proposée à la biodégradation du naphthalène(Chadli, 2015).

### II.3.1.5. Les nouvelles techniques de bioremédiation

Les techniques biologiques les plus innovantes développées en laboratoire et prometteuses du point de vue de leur application sur le terrain ont été identifiées. Elles concernent principalement la combinaison de procédés existants et bien connus :

#### a) Couplage bioremédiation (rhizosphère) / phytoremédiation

Parmi les micro-organismes retrouvés dans le sol, certains vivent en symbiose ou mutualisme avec les végétaux, c'est-à-dire en association à bénéfices réciproques. Dans ces associations, les micro-organismes peuvent être classés en 2 catégories :

- les ectosymbiontes qui constituent les micro-organismes colonisant l'extérieur de la racine (la rhizosphère) Parmi ces micro-organismes des bactéries telles que *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Enterobacter* et des champignons (*Trichoderma*).

Les bactéries de ce type sont alors définies comme des rhizobactéries

- les endosymbiontes qui regroupent les micro-organismes vivant à l'intérieur des cellules de

la plante hôte. Le plasmalemme peut également être transpercé, ceci étant l'œuvre de bactéries dites endophytes.

Ces bactéries, appartenant principalement aux genres *Rhizobium* et *Frankia*, peuvent alors former des nodules racinaires, et ceci sur les racines des légumineuses et des ligneuses. En raison de leurs caractéristiques rhizosphériques et endophytiques, les bactéries ont retenu l'attention au cours des dernières années pour promouvoir l'établissement des plantes dans des conditions défavorables, en favorisant les processus de phytoremédiation.

Ces bactéries peuvent être isolées à partir de plantes vivant sur des sols contaminés par des métaux ou des composés organiques (Mohamed & Abdelmajid, 2016).

### **b) Couplage bioaugmentation / phytoremédiation**

Inoculation de micro-organismes spécifiques (bio-augmentation) dans des matrices poreuses (sols, sédiments), capables : de dégrader des molécules organiques (des pesticides notamment) ou d'augmenter le stock de métaux disponibles pour les plantes utilisées pour la phytoextraction (avec des micro-organismes producteurs de sidérophores par exemple).

En conséquence, la croissance des micro-organismes inoculés est améliorée par l'approvisionnement de nutriments exsudés par les racines des plantes utilisées pour la phytoextraction (Mohamed & Abdelmajid, 2016).

### **c) Couplage phytoextraction / valorisation énergétique de la biomasse**

En 2003, le ministère fédéral de la Recherche (BMBF) de l'Allemagne a lancé un programme visant à mettre en place un réseau interdisciplinaire sur la thématique "Energies renouvelables à partir de biomasse issue de la phytoextraction des sols contaminés".

Ce programme est piloté par l'Institut CUTEC (Clausthaler Umwelttechnik-Institut, Allemagne) pour une durée de deux ans. Dans le cadre de ce programme, neuf projets ont été menés qui visent à réaliser les objectifs suivants : i) la mise en place d'un réseau d'experts permettant de faire l'état des lieux de la science et de la technique dans le domaine de l'utilisation de biomasse provenant de sols décontaminés par phytoextraction .

ii) l'évaluation des possibilités et des limites de ce procédé .iii) la conception de projets prioritaires .

Actuellement, ce réseau se compose de 35 experts issus de divers secteurs scientifiques et

industriels et qui travaillent sur des thématiques telles que: la récupération des métaux lourds dans les plantes ; les différentes techniques disponibles actuellement; les meilleures méthodes pour l'utilisation énergétique des plantes (Ex : la combustion); les limites des procédés actuels et les nouvelles solutions envisageables. (Mohamed & Abdelmajid, 2016).

#### **d) Système de phytoremédiation multiprocess (MPPS)**

Combinaison de diverses techniques de bioremédiation autour d'un système de phytoremédiation pour décontaminer les sols pollués par des hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) persistants. Les techniques impliquées dans le système sont:

le landfarming (aération) ;  
la bioremédiation (bactéries) ;  
la phytoremédiation (Mohamed & Abdelmajid, 2016).

#### **e) Génie génétique**

L'OGM est capable de dégrader les HP rapidement dans un délai plus court. L'utilisation de gènes qui codent pour la voie de biosynthèse du biosurfactant pourrait améliorer le taux de dégradation biologique en augmentant la biodisponibilité des HP dans l'écosystème naturel. De plus, les gènes conférant une résistance aux facteurs de stress critiques améliorent à la fois la survie et les performances des OGM sur de véritables sites contaminés (Dua, 2002).

Les plantes transgéniques sont également utilisées pour assainir les sites contaminés par les HP comme celui des OGM. Les plantes transgéniques contiennent généralement des transgènes responsables du métabolisme des HP (Seth, 2012).

#### **f) Système bioélectrochimique**

Le système bioélectrochimique (SBE) est l'un des nouveaux procédés de biorestauration à énergie positive pour un assainissement amélioré et accéléré. Le SBE est une technologie de plate-forme émergente et est également connu sous le nom de système électrochimique microbien. Les réacteurs SBE traditionnels se composent d'une anode, d'une cathode et d'un séparateur en option(Wang, 2013).

Les substrats de type donneur d'électrons sont oxydés par des micro-organismes dans la chambre d'anode pour générer un flux d'électrons (courant) vers la cathode, où les électrons

dans la chambre de cathode sont utilisés pour la production directe d'électricité (pile à combustible microbienne ou MFC) ou utilisés pour réduire les électrons type d'acceptant du contaminant et produisent des produits moins toxiques ou à valeur ajoutée (cellules d'électrolyse microbienne ou électrosynthèse microbienne) (Logan, 2012).

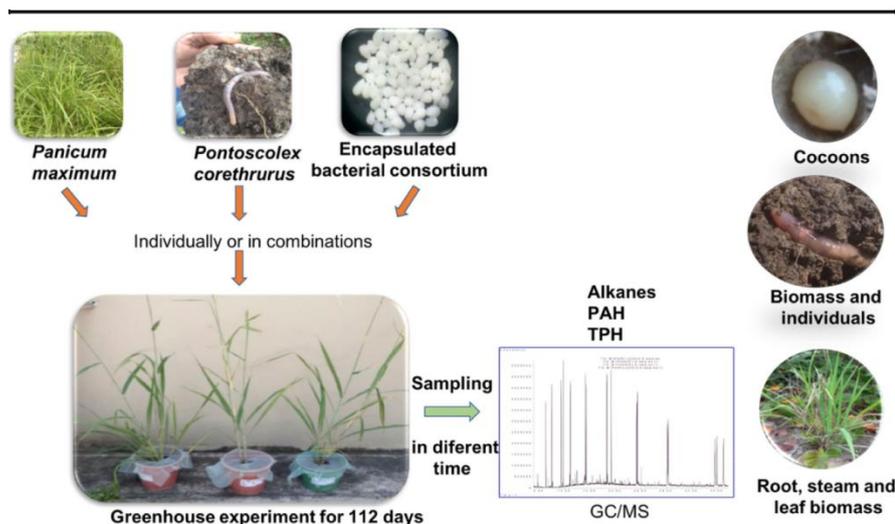
**g) Combinaison de trois techniques  
phytoremédiation/bioaugmentation/verme ré médiation**

Trois technologies sont utilisés individuellement et en combinaison: (i) vermire médiation avec le ver de terre endogéique *Pontoscolex corethrurus* (ver solivore), (ii) bioaugmentation avec un consortium bactérien encapsulé, et (iii) une graminée (*Panicum maximum*) trouvée dans un site contaminé.

La combinaison du ver de terre *P. corethrurus* et du consortium bactérien avait une efficacité d'élimination plus élevée pour le HPT (86,4%), les alcanes (> 92%) et le HAP (> 77%), suivie de la combinaison de trois technologies (ver de terre + herbe + bactériale), qui a éliminé 82,7% des HPT, > 94% des alcanes et > 65% des HAP en 112 jours.

Le consortium bactérien a amélioré les effets des vers de terre et de l'herbe sur l'élimination des hydrocarbures. L'utilisation de vers de terre endogéiques et d'espèces végétales provenant du même champ contaminé peut être une alternative efficace à l'augmentation de l'élimination des hydrocarbures.

Cependant, d'autres essais sur le terrain ou pilotes sont nécessaire pour faire évoluer le système vers des conditions non contrôlées où les interactions entre les vers de terre, les racines et les communautés bactériennes devraient être meilleures (Rodriguez-Campos, 2019).



**Figure 9:** Présentation schématique de l'expérience avec différents traitements herbe(G), vers de terre(E) et consortium bactérien(B) et leurs combinaison en serre (T)(Rodriguez-Campos, 2019).

## II.4.Landfarming

### II.4.1.Définition

Landfarming est un traitement dans lequel des déchets dangereux sont déposés sur ou dans le sol, où ils se dégradent naturellement par le mécanisme des micro-organismes.

Les conditions du sol sont contrôlées en surveillant la teneur en eau et en nutriments, la fréquence de l'aération et la valeur du pH du sol afin d'optimiser le taux et l'efficacité de la dégradation des contaminants.

### II.4.2.Principe

Le principe de ce processus est l'utilisation de communautés microbiennes pour éliminer les contaminants organiques principalement par leur conversion en  $\text{CO}_2$  et en eau. L'agriculture terrestre consiste à appliquer du sol contaminé par les HPT excavés en une mince couche(30cm) à travers le sol (Hejazi, 2003).

Des minéraux, des nutriments, de l'humidité et de l'air sont ensuite ajoutés à la fine couche de sol contaminé pour stimuler les micro-organismes indigènes qui utilisent le PH comme unique source de carbone et les convertissent en dioxyde de carbone et en eau ce qui favorise une dégradation aérobie.

Les terres polluées doivent être étalées sur des supports imperméables afin d'éviter toute pollution des sols. Les TPH du sol lors de l'élevage sont en grande partie éliminés par volatilisation, biodégradation ou adsorption (Hejazi, 2003). Les surfaces ainsi décontaminées peuvent être utilisées ultérieurement comme terrain agricole (Ali Ahmed, 2011).

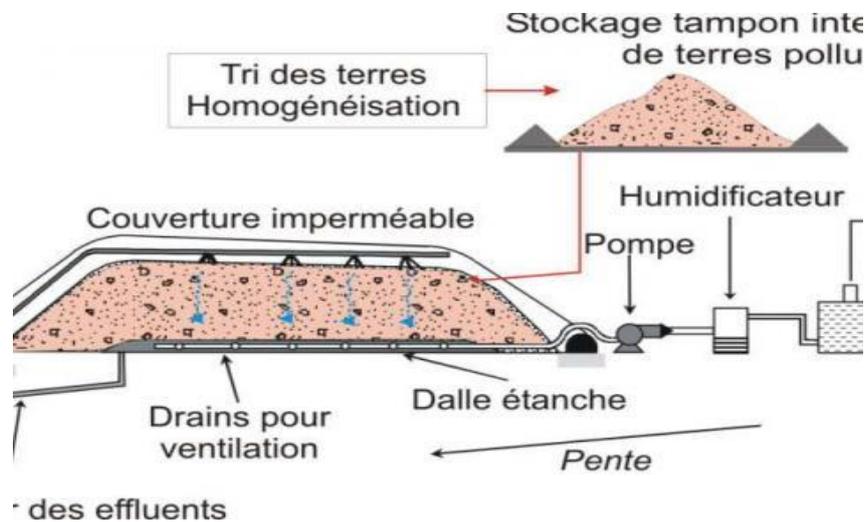


Figure 10: Schéma de principe de Landfarming (Colombano, 2010).

#### II.4.3. Applicabilité

Le Landfarming est efficace pour traiter les sols souillés par les composés monoaromatiques (BTEX), phénols, HAP (les plus légers de type Naphthalène et phénanthrène), hydrocarbures pétroliers (essence, diesel, lubrifiants légers, huiles).

Certaines expériences positives ont été démontrées sur les pentachlorophénols, les hydrocarbures lourds et certains pesticides (Colombano, 2010).

#### III.4.4. Paramètres de suivi

Les paramètres relatifs au bon développement des bactéries :

- le pH, la température, la conductivité, le potentiel redox,
- l'humidité,
- le ratio C/N/P/K, les teneurs en éventuels additifs et en compost,
- si nécessaire le dénombrement bactérien dans les sols et dans l'eau,
- les concentrations en polluants dans les sols et les gaz des sols (suivi de la production de CO<sub>2</sub> notamment), (Colombano, 2010).

### III.4.5.Efficacité

Le rendement de ce procédé varie fortement en fonction des conditions du milieu ; il peut dans certains cas atteindre 90%. Les concentrations résiduelles faibles sont difficiles à obtenir. La cinétique de biodégradation est le facteur limitant le plus contraignant (Colombano, 2010).

### III.4.6.Avantages

- Landfarming est une approche intéressante de traitement par biorestauration pour les sols contaminés par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), car elle est moins coûteuse et plus respectueuse de l'environnement que les autres méthodes d'assainissement des sols
- Méthode simple et économique pour assainir les sols contaminés accidentellement par des marées noires (Hejazi, 2003)
- technique éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs,
- procédé destructif,
- technique utilisée pour les sols hétérogènes et facilement biodégradables,
- technique permettant un meilleur contrôle que les traitements biologiques *in situ* (et donc de meilleurs rendements épuratoires),
- applicabilité à de nombreux polluants, (Colombano, 2010)

amélioration des qualités physiques des sols (taux de matière organique notamment).

### III.4.7.Inconvénients

Cette technique présente aussi certains inconvénients :

- technique nécessitant l'excavation des sols,
- technique nécessitant un prétraitement conséquent,
- technique nécessitant de grandes surfaces de terrain imperméables,
- le labourage génère des poussières,
- le Landfarming est une technique de biodégradation plus lente et moins performante que le Bioterre et le Compostage,

- le Landfarming« classique » (sans couverture) doit être de préférence utilisé pour les polluants facilement biodégradables et peu volatils (ex. : gasoil) pour éviter les risques de contamination de l'air par évaporation,
- le devenir des sols excavés doit être examiné avec attention (une fois excavés, les sols pollués sont considérés comme des déchets),
- les sols contenant de l'argile et un taux de matière organique élevé engendrent une grande adsorption des polluants sur la matrice solide, ce qui diminue les rendements épuratoires, (Colombano, 2010).

## II.5.Compostage

### II.5.1.Définition et principe du compostage

Le compostage est un processus contrôlé de dégradation des constituants organiques d'origine végétale et animale, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobies, entraînant une montée en température, et conduisant à l'élaboration d'une matière organique humifiée et stabilisée. Le produit ainsi obtenu est appelé compost (Cédric, 2003).

Le compost est le résultat d'un processus de transformation des déchets putrescibles en produit stable et basé sur le principe schématisé par la figure 11.

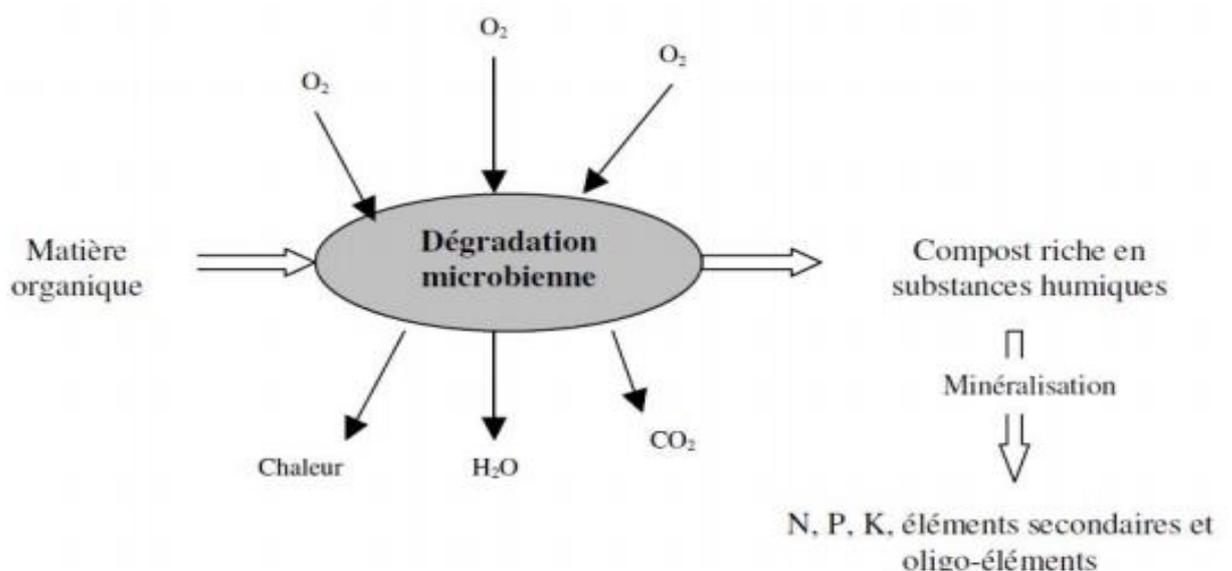


Figure 11:Schéma simplifié du processus de compostage(Aboulam, 2005).

### II.5.2. Description

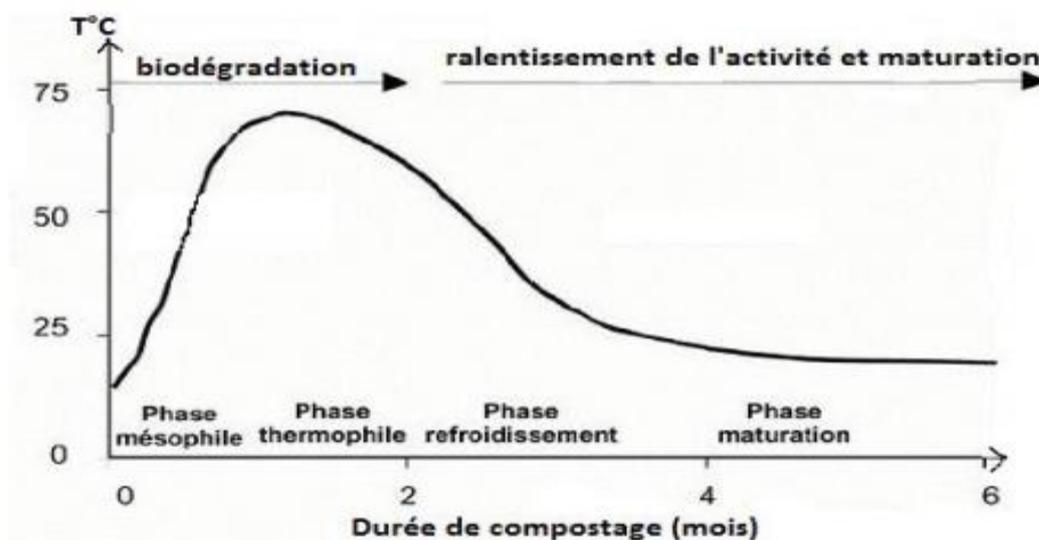


Figure 12: Courbe théorique d'évolution de température au cours du compostage (Cédric, 2003).

### II.5.3. Les quatre phases du compostage

\*Phase mésophile : la dégradation des composés facilement biodégradables par des bactéries mésophiles et la production du gaz et minéraux ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}_3$ )

\*Phase thermophile: la dégradation de la matière organique ne s'effectue plus que grâce aux bactéries et aux actinomycètes thermophiles, une part importante de la matière organique est perdue sous forme de  $\text{CO}_2$  (environ 50%) et l'assèchement du compost est lié à l'évaporation de l'eau.

\*Phase refroidissement: une diminution de la quantité de matières organiques facilement dégradables ce qui provoque un ralentissement de l'activité microbienne. Ceci favorise un refroidissement du compost.

\*Phase de maturation: maturation du compost et synthèse d'humus (Naïma, 2013).

### II.5.4. Les techniques de compostage

Le compostage individuel : proche de la décomposition naturelle de la litière. Il permet à la faune édaphique de s'y établir et de participer à sa maturation (Jean-Michel et al., 2010).

Le compostage en andains : un procédé relativement simple et économique (figure 13) (Jean-Michel et al., 2010).



**Figure 13:** Compostage en andains

Le compostage en canal : est une variante plus sophistiquée du compostage en andains ; le compost disposé dans des canaux de béton est remué par des appareils se déplaçant le long de ces rigoles (figure 2) (Jean-Michel et *al.*, 2010).



**Figure 14:** Compostage en canal

Le compostage en bioréacteur : le plus intensif de tous mais il implique des investissements élevés ; ils occupent des surfaces réduites et leur impacte environnemental est faible (figure 3) (Jean-Michel et *al.*, 2010).



**Figure 15:** Compostage en bioréacteur

### **II.5.5. Les avantages du compostage**

Procédé destructif et éprouvée ayant démontré une grande fiabilité et des résultats extrêmement significatifs, utilisée pour les sols hétérogènes et facilement biodégradable, permettant d'accélérer les traitements biologiques ex-situ classiques et un meilleur contrôle que les traitements biologiques in situ (et donc de meilleurs rendements épuratoires), traitement des contaminants relativement récalcitrants dans d'autres conditions et surtout la surface au sol est moins importante que celle nécessaire au landfarming, amélioration des qualités physiques des sols (taux de matière organique notamment) (Colombano, et *al.*, 2010).

### **II.5.6. Les inconvénients du compostage**

Le compostage « classique » doit être de préférence utilisé pour des polluants facilement biodégradables et peu volatils (ex. : gasoil) pour éviter les risques de contamination de l'air par évaporation, technique nécessitant l'excavation des sols et un prétraitement conséquent et une surface au sol parfois conséquente, la biodégradation plus lente, le devenir des sols excavés doit être examiné avec attention (une fois excavés, les sols pollués sont considérés comme des déchets), le fait de rajouter parfois des agents structurants augmente le volume de sols (Colombano, et *al.*, 2010).

## Chapitre III : Discussion

Vu les circonstances actuelles du corona virus, nous n'avons pas pu réaliser la partie pratique, et pour cela nous avons opté pour une recherche sur des études similaires précédentes mais récentes.

### III.1. Évaluation de trois approches de biorestauration (Atténuation Naturelle, Landfarming et Bioaugmentation – Landfarming Assistée) pour un sol contaminé aux hydrocarbures pétroliers totaux

(Guarino *et al.*,2017) ont fait cette étude pour évaluer trois approches de biorestauration pour les sols contaminés par des niveaux d'hydrocarbures pétroliers totaux.

Une série d'essais sur le mésocosme, ont durés 90 jours avec différentes conditions expérimentales: Naturel Atténuation (AN), Landfarming (L) et Landfarming + bioaugmentation (LB), ont révélé que le LB était plus efficace dans la diminution de la teneur en TPH dans tous les échantillons de sol. Inversement, l'effet de l'atténuation naturelle était toujours plus faible.

Les pourcentages d'élimination des hydrocarbures de pétrole total (HPT) après 90 jours d'expérience ont été calculés pour trois traitements de biorestauration: Atténuation naturelle - AN : 45-70% (moyenne: **57%**); Landfarming - L : 43-97% (moyenne: **70%**) et Landfarming + Bioaugmentation - LB : 75-98% (moyenne: **86%**). La combinaison du traitement Landfarming et de la bioaugmentation (LB) a donné des meilleurs résultats d'élimination de TPH 86% .

Ils ont observés une forte diminution des concentrations des HPT pendant les traitements au Landfarming-bioaugmentation a été observé pour tous les échantillons de sol par rapport au traitement individuel landfarming (70%).

**Tableaux 3** : principaux résultats d'élimination des hydrocarbures pétroliers selon le traitement utilisé.

Traitement	Pourcentage d'élimination
Atténuation naturelle	57%
Landfarming – Bioaugmentation	86%
Landfarming assisté	70%

Ces résultats montrent que les microorganismes autochtones présents dans le sol sont adaptés et fonctionnels pour la dégradation des HP. Donc on peut émettre l'hypothèse que l'augmentation observée de l'élimination du HPT lors de l'inoculation du sol est due à la présence des espèces différentes de *Pseudomonas* (*brassicacearum*, *mandelii*, *frederiksbergensis*, *putida*) et la présence de *Sphingobium abikonense* qui ont la capacité de dégradation des hydrocarbures pétroliers.

Par conséquent, les traitements L et LB se sont révélés efficaces dans la réduction des contaminants qui en résulte à environ 74% par rapport au traitement LB de 85% tandis que le AN de 61%. En conclusion, à 90 jours, la tendance suivante des trois traitements pour l'élimination du TPH a été obtenue: AN < L < LB.

### III.2. Biodégradation des hydrocarbures pétroliers totaux dans le sol: isolement et caractérisation des souches bactériennes du sol contaminé par l'huile

D'autre part (Wang, 2020) ils ont réalisés un isolement de sept souches bactériennes du sol autour d'une station pétrolière et constaté que tous les échantillons présentaient une «bioaugmentation» plus élevée, qui peut effectivement dégrader les polluants du HPT, ensuite une optimisation des conditions de croissance température-PH – temps d'incubation .

Après ils ont évalués le taux de biodégradation des HPT par une analyse de chromatographie en phase gazeuse avec un détecteur à ionisation (GC) et une identification des souches isolés a été réalisé .

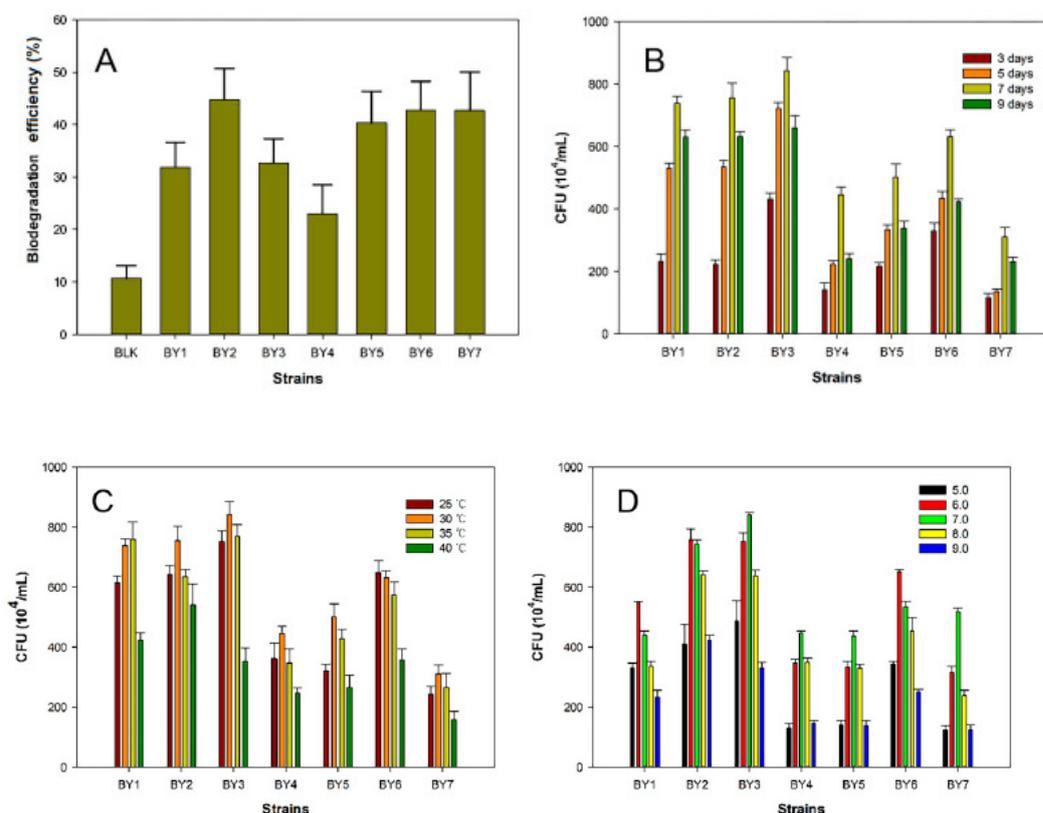
### III.2.1. Efficacité de la biodégradation des souches isolées en milieu BP

Toutes les souches ont pu dégrader la HPT ; BY2 exposé le taux de biodégradation HPT le plus élevé (44,7%). En revanche, la concentration de HPT a naturellement diminué de 10,6% sur la même période. Ces résultats suggèrent que les sept souches isolées étaient, capable de biodégradation des polluants HPT présents dans le sol.

**Tableau 4:** Résumé de l'efficacité de biodégradation des isolats et de sa température préférée.

Isolates	BY1	BY2	BY3	BY4	BY5	BY6	BY7
Biodegradation Efficiency (%)	32.1	44.7	33.2	24.5	38.2	42.3	42.1
Most Favored Temperature (°C)	35	30	30	30	30	25	30
Most Favored pH	6.0	6.0	7.0	7.0	7.0	6.0	7.0

### III.2.2. Optimisation des conditions de croissance des souches isolées en milieu BP



**Figure 16:** Efficacité de la biodégradation pour les souches isolées dans le milieu MS(A) et le nombre de colonies dans différentes conditions de croissance: temps d'incubation (B), température (C) et valeurs de pH(D).

Lorsque différents temps d'incubation (3, 5, 7 et 9 j) ont été étudiés, les nombres de colonies des sept souches ont atteint leur niveau maximal après 7 jours d'incubation (Figure 1 B).

De plus l'effet de différentes températures d'incubation (25, 30, 35 et 40 ° C) dans un milieu BP montre qu'une température de 30 ° C a donné les unités le plus formant des colonies pour la majorité des souches (Figure 1C) à l'exception de BY6, qui a montré une croissance optimale à 25 ° C.

Comme le montre la figure 1D, BY1, BY2 et BY6 ont présenté une croissance optimale à des valeurs de pH d'environ 6, tandis que BY3, BY4, BY5 et BY7 ont donné les unités formant le plus de colonies à pH 7.

Le résumé de l'efficacité de la biodégradation, de la température et du pH favorisés de sept souches sont énumérés dans le tableau 3.

### III.2.3. Identification des souches isolées

La majorité des souches étaient Gram-négatives, à l'exception de BY1 et BY2, qui étaient Gram-positifs, les souches ont été identifiées par séquençage du gène de l'ARNr 16S.

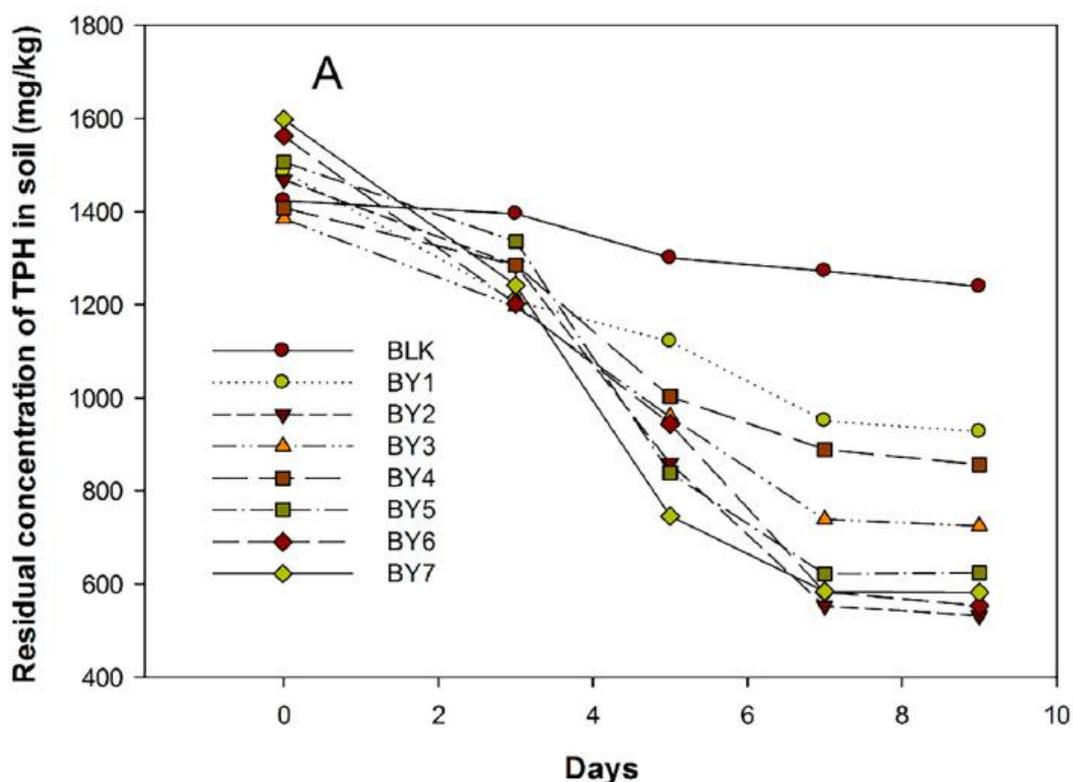
BY1 et BY6 appartenait au genre *Bacillus*, tandis que BY4 et BY7 étaient des espèces de *Pseudomonas*.

Ces genres contiennent des bactéries capables de dégrader des composés organiques.

BY4 a été identifié comme *Pseudomonas mandelii*.

BY7 a été identifié comme *Pseudomonas frederiksbergensis*, elle n'a pas été signalé auparavant comme possédant la capacité de dégradation du pétrole.

### III.2.4. Détermination de l'efficacité de biodégradation des souches isolées exposées aux sols indigènes



**Figure 17:** Concentration résiduelle de HPT dans les sols en utilisant les souches isolées

L'efficacité de dégradation de la HPT de fond était encore diminué en raison de l'effet des souches indigènes présentes dans le sol, avec l'augmentation du temps, la concentration de TPH de BY1–7 a progressivement diminué, puis, l'équilibre est apparu.

Toutes les souches ont présenté une efficacité de biodégradation optimale au jour 7. Ils ont constatés que les concentrations résiduelles de HPT dans le sol diminuaient à moins de 600 mg / kg.

### **III.3. L'amélioration de la biodégradation microbienne des hydrocarbures (HAP) de sol contaminé par le pétrole brut pendant landfarming**

(Chikere et al., 2019) Ont fait cette étude pour évaluer la dégradation, la diversité et la dynamique de la communauté microbienne après la remédiation par landfarming d'un site pollué par le pétrole brut dans le delta du Niger.

Le pH du site pollué avant la remédiation (6,56–6,92) presque neutre et donc permit la prolifération microbienne et les concentrations de HAP et de métaux lourds dans le site du déversement étaient inférieures aux valeurs réglementaires et n'auraient pas pu influencer sur le taux de la dégradation des hydrocarbures

Pendant la période de remédiation, les HPT et HAP continuellement réduits (Figure18) à des valeurs inférieures aux limites d'intervention.

Landfarming est une stratégie de remédiation efficace largement utilisée pour la remédiation dans le delta du Niger en raison de condition d'environnement favorable tel que la présence d'une grande population d'hydrocarbures dégradants, les pluies tropicales abondantes et moins de besoins en infrastructures pour sa mise en œuvre.

La réduction du HPT positivement corrélé avec les hydrocarbures en utilisant des comptages microbiens pendant la période de 56 jours. Cela indique que la communauté microbienne a joué un rôle important dans la réduction de la concentration de TPH des jours 0 à 56 et que landfarming modifié les conditions du sol en introduisant des populations bactériennes qui ont amélioré la dégradation des hydrocarbures.

Une Corrélation positive significative des abondances microbiennes plus élevées et des abondances de gènes fonctionnels avec réduction de la HPT ont été démontrés dans des recherches antérieures.



**Figure 18:** (A) site avant la remédiation (B) site pendant la remédiation

L'augmentation des bactéries utilisant les hydrocarbures BUH est une preuve de leur réponse aux conditions favorables fournies par landfarming.

Le processus qui a conduit à l'augmentation des nutriments et la réduction de la concentration de HPT fournit généralement l'amélioration nécessaire pour que les dégradeurs de pétrole indigènes prospèrent, dans cette étude, il a été mis en évidence par la forte corrélation positive significative observée entre l'augmentation de BUH et réduction des concentrations de HPT.

L'enrichissement en pétrole brut des échantillons lors de la culture bactérienne a conduit à la prolifération du BUH par rapport à l'enrichissement en paraffine et l'utilisation du transfert de phase vapeur. Plusieurs chercheurs ont montré que la méthode d'enrichissement du pétrole brut conduit à une amélioration du HUB et des gènes responsable de la dégradation du pétrole

La plupart des espèces bactériennes récupérées appartenaient au phylum Protéobactéries : *Pseudomonas*, *Bacillus* et *Providencia* ont été systématiquement récupérés pendant la bioremédiation. Ce groupe d'organismes est présents dans les environnements pollués par les hydrocarbures et sont des acteurs clés de dégradation des hydrocarbures, Ils ont étudié le potentiel de *Bacillus subtilis* et *Pseudomonas aeruginosa* pour influencer le taux de dégradation des hydrocarbures et ils ont noté que les deux organismes ont considérablement influencé la réduction de la concentration de HPT.

Dans une autre étude qui étudié la diversité des gènes aromatiques hydroxylants de la dioxygénase : *Pseudomonas* était le plus dominant basé sur l'occurrence taxinomique et l'abondance des gènes de dégradation des HAP. D'autres genres bactériens également isolés tels que *Burkholderia*, *Achromobacter*, *Stenotrophomonas*, *Alcaligenes* et *Acinetobacter* Il a

également été démontré qu'ils jouent un rôle clé dans la dégradation des deux fractions saturées et aromatiques des hydrocarbures.

*Acinetobacter*, *Staphylococcus* et *Myroides* ont été isolés uniquement par l'enrichissement en cire de paraffine. *Acinetobacter* est un genre dégradant et certaines espèces ont été associées à la dégradation des seuls alcanes à longue chaîne allant du décane (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>) à tétracontane (C<sub>40</sub>H<sub>82</sub>) comme seule source de carbone.

Dans une étude portant sur plusieurs bactéries dégradant les alcanes à longue chaîne, découvert que les espèces d' *Acinetobacter* ne pouvaient dégrader les alcanes à longue chaîne contrairement aux espèces de *Rhodococcus* et *Gordonia* qui dégradait à la fois les *n*- alcanes à chaîne courte et les alcanes à longue chaîne et ça explique clairement pourquoi *Acinetobacter* sp. a été récupéré de la culture enrichie en paraffine. *Myroides* est également un genre de dégradation des hydrocarbures largement étudié et est connu par leur capacité d'augmenter et d'améliorer le processus de biodégradation grâce à la production de biosurfactants.

Lors le criblage de dégradation par la méthode colorimétrique, ils ont observé que *Pseudomonas aeruginosa* était le plus efficace pour la biodégradation des hydrocarbures et plusieurs espèces de *Pseudomonas* ont été démontrées jouer un rôle majeur dans l'atténuation naturelle des polluants environnementaux.

Les champignons jouent un rôle important dans la biodégradation de plusieurs polluants organiques. Ils sont également connus pour leur polyvalence dans les environnements pollués par le pétrole brut.

Dans cet article, toutes les classes de champignons récupérés au cours de Landfarming sont des dégradateurs d'hydrocarbures connus, *Fusarium proliferatum* faisait partie des espèces fongiques récupérées d'une étude de biorémédiation stimulée à l'aide de nutriments organiques et inorganiques amendements.

Ils ont récupéré plusieurs espèces d'*Aspergillus* et de *Fusarium proliferatum* des sols pollués par le pétrole brut dans le sud de l'Iran. La voie de dégradation et enzymes impliquées dans la dégradation des hydrocarbures par la levure *Candida* et sont connus pour jouer rôle principal dans la dégradation des *n*- alcanes.

Dans une autre étude *Meyerozyma guilliermondii* et *Candida rugosa* étaient parmi les espèces fongiques dominantes lors de la biorémediation de sols pollués par les hydrocarbures.

Cet article a démontré que la technique landfarming pour la biorémediation de sol pollué par le pétrole brut dans le delta du Niger est une option de traitement viable car il a déclenché une augmentation des micro-organismes dégradant les hydrocarbures et une réduction simultanée des HPT dans les 56 jours. L'ajout de sol non pollué et le labour fourni les conditions environnementales nécessaires pour une biodégradation améliorée la biodégradation qui a éliminé le besoin d'ajouter des nutriments sous forme de engrais inorganique pouvant entraîner une contamination secondaire.

*Pseudomonas aeruginosa* et *Enterobacter xiangfangensis* démontré efficacité supérieure en ce qui concerne la dégradation des hydrocarbures (Chikere et *al.*, 2019).

#### III.4. La biodégradation de hautes concentrations des Hydrocarbures Aliphatique dans le sol d'une raffinerie de pétrole: Implications pour l'applicabilité du nouvelles Souches d'actinobactéries

Les expériences décrites ont été initiées par le besoin de bioremédiation de sols fortement pollués par les hydrocarbures pétroliers de l'ordre de milliers de tonnes. Avant une telle bioremédiation, l'essai des expériences à petite échelle sont nécessaires.

Dans ce cas, ils ont commencé par une bioaugmentation répétitive massive par *Ochrobactrum sp. et Bacillus sp* Consortium microbien couramment utilisé lors de la bioremédiation et la biostimulation à l'aide de Milieu de sel bactérien BSM (expérience A). Cette expérience, malgré sa longue période (455 jours), a prouvé cette approche inapplicable pour la biorémediation car aucune diminution d'hydrocarbures n'a été détectée dans l'un des variantes. Les raisons de l'échec de la candidature d'un consortium par ailleurs retenu ne peuvent être que spéculé sur, une concentration et un âge trop élevés de la contamination par le pétrole avec la présence inhibitrice de métaux lourds, cela confirme que la croissance microbienne sur les hydrocarbures pétroliers comme seule source de carbone et d'énergie dans les milieux liquides n'implique pas biodégradation dans les sols réels. Au moins les activités microbiennes tout au long du test ont suggéré un effet positif sur la régénération de la fonction du sol.

Par conséquent, ils ont dû essayer différentes approches, en particulier en testant de nouvelles souches d'actinobactéries *G. rubripertincta CWB2 et R. erythropolis S43* (expérience B). Dans ce cas, une diminution significative des hydrocarbures aliphatiques a été atteinte dans plusieurs variantes malgré une période expérimentale plus courte (45 jours). Le positif de résultat ne peut pas être expliqué par une quantité différente de bactéries bioaugmentés, car l'expérience A a été bioaugmentée périodiquement avec de grandes quantités de bactéries dégradantes, tandis que l'expérience B était inoculé une seule fois au début. Les résultats de l'expérience B suggèrent que le *G. rubripertincta CWB2 et le R. erythropolis S43* sont des souches clairement prometteuses pour des applications dans la biorestauration des sols contaminés par le pétrole.

Les actinobactéries ont longtemps été considérées comme des candidats appropriés pour les études de biodégradation en raison à leur capacité métabolique élevée. Deux propriétés en particulier sont pertinentes dans ce cas, (a) le nombre et la diversité des voies de dégradation

des hydrocarbures, (b) la production de métabolites secondaires tels que les biosurfactants et sidérophores. Ces propriétés permettent aux actinobactéries d'adapter et survivre dans un large éventail de conditions environnementales, ou même changer les conditions locales en sécrétant des métabolites, les sidérophores semblent clairement agir comme un facteur favorisant la dégradation des hydrocarbures.

Les deux souches d'actinobactéries étudiées dans cet article sont des producteurs avérés de sidérophores, qui se lient au  $Fe^{3+}$  et aux autres métaux trivalents et les mobilisées.

Les sidérophores ont un effet positif clair sur la biostimulation de la microflore autochtone et leur activité de biodégradation et des observations ont également été rapportées pour les sidérophores d'une souche de *Rhodococcus*, qui peuvent stimuler la croissance d'autres organismes bactériens.

Dans l'ensemble, ces analyses indiquent que non seulement les deux souches d'actinobactéries testées se sont biodégradées hydrocarbures mais qui peuvent également avoir contribué à la biostimulation de la biodégradation par microflore indigène. La production de sidérophores, la mobilisation du fer peuvent tous ont contribué à la biostimulation. Alors que les deux souches actinobactériennes testées ont entraîné une diminution des hydrocarbures après 45 jours de bioaugmentation, et *G. rubripertincta* CWB2 semble être légèrement mieux que *R. erythropolis* S43.

Deux tentatives de biodégradation à haute concentration d'hydrocarbures pétroliers dans le sol d'une raffinerie de pétrole ont été réalisées dans des expériences en pot à long terme.

Alors que la bioaugmentation d'un mélange de *Bacillus sp.* et *Ochrobactrum sp.*, capables de croître sur le diesel comme seule source de carbone et d'énergie n'a pas entraîné de diminution significative des hydrocarbures même après 455 jours et l'utilisation de *Gordonia rubripertincta* CWB2 ainsi que de *Rhodococcus erythropolis* S43 a entraîné une diminution significative des hydrocarbures même après 45 jours. Les résultats montrent l'applicabilité de ces souches actinobactériennes pour la bioremédiation des sols contaminés par de fortes concentrations des hydrocarbures pétroliers (Josef, et al., 2018).

### Conclusion

Les hydrocarbures pétroliers se présentent comme un mélange complexe d'hydrocarbures. Leur dégradation implique une microflore diversifiée du fait de la spécificité des fonctions dégradantes.

L'objectif de notre travail est de contribuer à la biodégradation des HP à partir des souches bactériennes isolés de sol.

D'après les résultats obtenus, nous concluons qu'il a eu une biodégradation des hydrocarbures par l'utilisation de différents traitements de bioremédiation.

L'article 1 (Guarino et al., 2017) l'atténuation naturelle a donné un pourcentage d'élimination des HPT de 57 %, landfarming 70%, et la combinaison entre landfarming-bioaugmentation 86%. Les traitements L et LB se sont révélés efficace, qui en résulte environ 74% par rapport au traitement au Landfarming-bioaugmentation 85% et l'atténuation naturelle un pourcentage de 61% d'élimination des hydrocarbures pétroliers par la souche *Pseudomonas*.

D'après (Wang, 2020), l'isolement de sept souches dégradantes les hydrocarbures pétroliers totaux a révélé que les deux souches sont efficaces pour la dégradation des HPT.

L'optimisation des conditions de croissance des souches isolées a montré qu'il ya une croissance optimale des souches après 07 jours, ces derniers appartenaient aux genres *Bacillus* et *Pseudomonas Sphingobium*.

(Chikere et al., 2019) Ont prouvés que la technique landfarming pour la bioremédiation de sol pollué par le pétrole brut dans le delta du Niger est une méthode de traitement efficace, car il ya une augmentation de nombres des micro-organismes dégradant les hydrocarbures de 104 jusqu'à 107 UFC / g et une réduction des HPT à moins de 700 mg / kg au jour 56.

Ils ont déduite aussi qu'il vaut mieux d'ajouter le sol non pollué et le labour pour fournir les conditions environnementales nécessaires pour une biodégradation que d'ajouter des nutriments sous forme d'engrais inorganique, pour éviter une contamination secondaire.

Les souches les plus efficace sont : *Pseudomonas aeruginosa* et *Enterobacter xiangfangensis* pour la bioremédiation.

## Conclusion

---

(Josef, et *al.*, 2018) ont étudiés deux souches actinobactéennes utilisables pour la bioremédiation : *Gordonia rubripertincta* CWB2, *Rhodococcus erythropolis* S43, ils ont observés aussi que la production de sidérophores, la mobilisation du fer peuvent contribuer à la biostimulation des micro-organismes pour la bioremédiation (surtout la biodégradation des hydrocarbures aliphatiques)

On peut donc conclure que les différents constituants de pétrole sont intrinsèquement biodégradables, mais à des degrés variables selon les micro-organismes utilisées et leurs métabolites produites.

La souche *pseudomonas* a attiré notre attention parce qu'elle possède une efficacité très élevée pour la dégradation des hydrocarbures pétroliers.

Bien que la partie méthodologie prévue de ce travail n'a pas été réalisée en raison de la situation sanitaire actuelle, il serait particulièrement intéressant pour les futurs étudiants de l'aborder afin de mieux connaître le pouvoir dégradant des souches locales

### Références Bibliographiques

1. Aboulam, S. (2005). Recherche d'une méthode d'analyse du fonctionnement des usines de tri-compostage des déchets ménagers. fiabilité des bilans matière. thèse de doctorat, institut national polytechnique de toulouse, france.
2. Adeline, T. (s.d.). Modulation de la génotoxicité des HAP en mélange.
3. Adrian, C. A. (1974). Paraffin and proteins. pp. 32-35. France.
4. Agarry, S. E. (2012). «Box-Behnken design application to study enhanced bioremediation of soil artificially contaminated with spent engine oil using biostimulation strategy.».
5. Alegbeleye. (2017). «Hydrocarbures aromatiques polycycliques :examen environnementale et de la biorestauration». Environmental Management , P2-26.
6. Ali Ahmed, S. (2011). Essai de réhabilitation d'un sol contaminé par les hydrocarbures à l'aide de tensioactifs obtenus par voie biologique. Thèse de Magistère en science de sol.
7. Antoine, F. (2013). Etude 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, Ecole doctorale 104 Sciences de la Matière, du Rayonnement et de l'Environnement Filière Ingénierie des Fonctions Biologiques.
8. Anthony, V; Anissa, L. S; Roger, D.(2004). Les agents de la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures polycycliques aromatiques. Francophone d'écologie industrielle. P 30-37.
9. Baoune, H., Aparicio, J. D., Pucci, G., El Hadj-Khelil, A. O., & Polti, M. A . (2019). Biorestauration des sols contaminés par le pétrole à l'aide de Streptomyces sp. Hlh1. article scientifique.journal des sols et sédiments. P19(5).
10. Benchouk, A. (2017). Bioremédiation des sols pollués de pétrole par les microorganismes indigènes et amélioration génétique de leur pouvoir. thèse de doctorat, université d'ibn badis mostaganem, algérie.
11. Benyahia, M. (2012). La pollution des sols par les Hydrocarbures. En vue l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en écologie et environnement, Thèse de doctorat. université Abderahmane mira de Bejaia.

## Références Bibliographiques

---

12. Boudherhem, A. (2011). Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodétection et la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures. mémoire de magister, Université Kasdi Merbah-Ouargla, Algérie.
13. Bouzid, M. (2019). Développement et évaluation d'une méthode à base de mousse pour l'oxydation améliorée de sols insaturés contaminés par des hydrocarbures. thèse de doctorat. université Bourgogne Franche-comté, France.
14. Cabane. (2012). Lexique d'écologie, d'environnement et d'aménagement du littoral. P 342. Version 24. Ifremer.
15. Caroline, S. (2011). Ecologie des communautés bactériennes marines soumises à une pollution pétrolière influence des facteurs environnementaux, de la prédation et de la récurrence des pollutions. thèse de doctorat, école doctorale sciences de l'environnement d'île de France, France.
16. Cédric, F. (2003). Stabilisation de la matière organique au cours du compostage de déchets urbains : influence de la nature des déchets et du procédé de compostage - recherche d'indicateurs pertinents. thèse de doctorat, institut national agronomique Paris-Grignon école doctorale abies, Paris.
17. Céline, B. (2006). Etude de la matière organique contenue dans des lixiviats issus de différentes filières de traitement des déchets ménagers et assimilés. thèse de doctorat, université de Limoges école doctorale science – technique – santé.
18. Chadli, A. (2015). Isolement et caractérisation de bactéries biodégradantes d'hydrocarbures à partir de lixiviat du centre d'enfouissement technique d'Ain Temochent. thèse de doctorat, université d'Oran 1, Algérie.
19. Chitour. (1983). Raffinage de pétrole brut. p.34-39.
20. Chikere, C.B., Tekere, M., Adeleke, R. (2019). Enhanced microbial hydrocarbon biodegradation as stimulated during field-scale landfarming of crude oil-impacted soil. *Sustainable chemistry and pharmacy*, vol 14 n(100177), P11.
21. Cole. (2018). Évaluation et assainissement d'un site contaminé par le pétrole.
22. Colombano. (2014). Nature des produits pétroliers et origine des vieillissements : tentative de l'identification de la source via la prise en compte des impacts et l'analyse de l'âge approximatif des déversements. rapport de recherche, France.
23. Colombano, S., Saada, A., V. Guerin, P. Bataillard, G. Bellenfant, S. Beranger, . (2010). Quelles techniques pour quels traitements? Analyse coûts-bénéfices. BRGM/RP-58609-FR.

## Références Bibliographiques

---

24. Dorine, D. (2011). Contamination atmosphérique par les hydrocarbures aromatiques polycycliques : toxicité et devenir du phénanthrène dans des systèmes sol-plantemicroorganisme. thèse de doctorat, université de franche-comté, france.
25. Dua M, S. A. (2002). «Biotechnologie et bioremédiation: succès et limites». Appl Microbiol Biotechnol , P143-152.
26. Dufresne, M. (2013). les technologies de traitement des sols contaminés : lesquelles sont durables ?
27. Fattal, P. (2008). La pollution des cotes par les hydrocarbures. Presses universitaires de Rennes: PUR.
28. Fingas. (2010). Un aperçu de la combustion in situ, Dans: Fingas M (ed) Science et technologie des déversements d'hydrocarbures.
29. Florence, M. (2011). Exploration de la biodiversité bactérienne dans un sol pollué par les hydrocarbures : analyse par marquage isotopique du potentiel métabolique et de la dynamique des communautés impliquées dans la dégradation. thèse de doctorat, université de grenoble , france.
30. Gabet, S. (2004). Remobilisation d'Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine biologique. thèse de doctorat.
31. Gruyer. (2015). Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques,devenir et criminalistique environnementale,P 04-55.
32. Guarino, C., Spada, V., & Sciarrillo, R. (2017). Assessment of three approaches of bioremediation (Natural Attenuation, Landfarming and Bioaugmentation–Assistited Landfarming) for a petroleum hydrocarbons contaminated soil.Chemosphere , 170, 10-16.
33. Guermouche M'rassi, A. (2014). Caractérisation moléculaire des bactéries impliquées dans la biodégradation des hydrocarbures. thèse de doctorat, université d'oran, oran.
34. Hassaine. (2016). biodégradation des hydrocarbures (pétrole brut et kérosène) par la microflore microbienne des eaux de la région de skikda. thèse de doctorat, Annaba.
35. Hejazi RF, H. T. (2003). «Exploitation agricole des boues huileuses dans les régions arides - évaluation des risques humains ». P 287–302.
36. Jean-Michel, G., Michel, A., & Willy, M. (2010). Le Sol Vivant Bases de pédologie-Biologie des sols (éd. 3é édition revue et augmentée ). la Suisse: La presse polytechniques et l'université romande.
37. Jousse, F. (2016). Processus physico-chimiques à l'origine des différences d'efficacité des techniques de traitement de sols pollués aux hydrocarbures. thèse de doctorat.

## Références Bibliographiques

---

38. Josef T., Catherine, O. E., Sylvie, K., Pavel, K., Lenka, S., Petra, V.-D. ˇ., et al. (2018). Biodegradation of High Concentrations of Aliphatic Hydrocarbons in Soil from a Petroleum Refinery: Implications for Applicability of New Actinobacterial Strains. *journal applied sciences*, vol 8 (n1855), p12.
39. Kanaly, R., & Harayama. (2000). Biodegradation of high molecular-weight polycyclic aromatic hydrocarbons by bacteria. *J. Bacteriol* (182), 2059-2067.
40. Koler. (2004). Distribution and location of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and PAH-degrading bacteria within polluted soil aggregates.
41. Kumari B, S. D. (2016). l'applicati multiforme des nanoparticules dans le domaine de la biorestauration des hydrocarbure pétroliers. Une revue sur l'applicabilité multiforme des nanoparticules dans le domaine de la biorestauration des hydrocarbure pétroliers , 97: 98-105).
42. Kuppusamy S, P. T. (2016). Technologies d'assainissement ex situ pour les polluants environnementaux: une perspective critique.
43. Lary, L. d., Fabriol, h., Moretti, I., Kalaydjian, F., & .Didier, C. (2011). Maîtrise des impacts et risques liés à l'exploitation des hydrocarbures de roche-mère : enjeux, verrous et pistes de recherche. BRGM/RP-60312-FR.
44. Lefebvre. (1986). Notion de chimie du pétrole. *Ed, technique*, pp. 41. Paris: Technip.
45. Logan, B. E. (2012). « Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies». *science* , P686-690.
46. Louati, H. (2013). Etude de la bioremédiaion de sédiments contaminés par des hydrocarbures aromatique polycyclique : Impacte écologique sur la microflore et la microfaune de la lagune de Bizerte. thèse de doctorat.
47. Magalie, C. (2000). Diagnostic de sols pollués par des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) à l'aide de la spectrophotométrie uv. thèse de doctorat, institut national des sciences, lyon.
48. Mazeas, O. (2004). Evaluation de l'exposition des organismes aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans le milieu marin par le dosage des métabolites de HAP, géosciences, sciences de l'environnement. thèse de doctorat, Bordeaux1.
49. Mbogne, P. M. (2017). Biorémediation augmentée de sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organiques. 109p. Montréal.
50. Mohamed, N., & Abdelmajid, H. (2016). Les techniques de dépollution des sols contaminés par les métaux lourds. *Maghrebian Journal of Pure and Applied Science*, 2 (2), 47- 58.

## Références Bibliographiques

---

51. Naïma, T. D. (2013). Valorisation par compostage des résidus solides urbains de la commune de chlef, algérie. thèse de doctorat, universite de limoges ecole doctorale sciences et techniques, algérie.
52. Ogunleye, A. S. (2012). Box-Behnken design application to study enhanced bioremediation of soil artificially contaminated with spent engine oil using biostimulation strategy. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* , 3(31):1-14.
53. Pascal, M., & Fokou, M. (2017). biorémédiation augmentée de sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organiques. mémoire, école de technologie supérieure université du québec .
54. Persaud, D. J. (1993). Guidelines for the protection and management of aquatic sediment quality in Ontario.
55. Ramade, F., Quevauviller, P., Colonna, P., Mathieu, C., Pieltain, F., Faurie, C., et al. (2011). Introduction à L'ecochimie (éd. *Les Substances Chimiques A L'écosphère De L'homme*). (R. François, Éd.) Paris.
56. Rodriguez-Campos, (2019). (Rodriguez-Campos, J., Perales-Ga Bioremediation of soil contaminated by hydrocarbons with the combination of three technologies: bioaugmentation, phytoremediation and vermeremediation . *journal of soils and sediments* , P19(4).
57. Rouidi, S. (2014). Evaluation de la contamination par les hydrocarbures des sédiments superficiels (fluviaux et marins) de la région de Skikda (nord-est algérien). Analyse statistiques. thèse de doctorat, Mrseille.
58. Seth, C. S. (2012). A review on mechanisms of plant tolerance and role of transgenic plants in envi-ronmental clean-up. *Vol. 78 ( No. 1)*, P32-62.
59. Soltani. (2004). Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. 285P.
60. Sylvain, A., & Jean-Patrick, T. (2016). Risques et impacts associés à l'exploration et à l'exploitation des hydrocarbures dans le golfe du Saint-Lauren. *Le Naturaliste canadien.*, 140 (2), 35-40.
61. Sylvain, K. (2005). Caracterisation d'arene dioxygenases impliquees dans la biodegradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques chez mycobacterium sp. 6py1. thèse de doctorat , universite joseph fourier – grenoble i sciences et geographie .
62. Tarantini, A. (2009). modulation de la génotoxicité des HAP en mélange. thèse de doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.

## Références Bibliographiques

---

63. Tratnyek, P. G. (2006). Nanotechnologies for environmental cleanup. *Nano Today*.
64. Wang, H. &. (2013). « A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a plat-form technology». *Biotechnol Advances* , P1796–1807).
65. Wang, R. W. (2020). Biodegradation of Total Petroleum Hydrocarbons in Soil: Isolation and Characterization of Bacterial Strains from Oil Contaminated Soil. *Applied Sciences* , P 10(12), 4173.
66. Yeung. (2010). Technologies d'assainissement des sites contaminés , Dans: Chen Y, Zhan L, Tang X (eds) *Advances in Environmental Geotechnics*. (Z. L. che Y, Éd.)
67. Zhu X, T. S. (2012). Évaluation de la toxicité des nanoparticules d'oxyde de fer dans les stades précoces du poisson zèbre.

### Glossaire

**Bioaugmentation** : est un procédé pouvant s'appliquer à la fois in situ ou ex situ. Il consiste à ajouter des micro-organismes dans la zone polluée afin d'augmenter la biodégradation des contaminants.

**Biostimulation** : c'est une technique de traitement des sites et sols pollués : dégradation des polluants par les micro-organismes indigènes stimulés au moyen d'adjuvants chimiques ou biochimiques.

**Atténuation Naturelle** : regroupe tous les processus faisant intervenir des phénomènes de dispersion, dilution, adsorption, dégradation chimique ou biologique ayant pour effet de réduire la masse, le volume, la concentration, la disponibilité ou la toxicité d'une pollution.

**Sidérophores** : sont des chélateurs de fer, synthétisés et sécrétés notamment par les micro-organismes pour leur permettre de puiser le fer essentiel à leur développement. Ce sont des molécules de faibles poids moléculaires ayant une très forte affinité pour l'ion  $Fe^{3+}$ , sont des peptides capables de former des complexes [sidérophores  $Fe^{3+}$ ] qui permettront d'internaliser le fer nécessaire au fonctionnement de la cellule.

**Biosurfactants** : sont des molécules à haute énergie se répartissent à l'interface entre liquides non miscibles réduisant ainsi l'énergie libre du système et formant des microémulsions des solutions aqueuses ou des mélanges d'hydrocarbures sont des composés amphiphiles, Ils ont pour propriété de diminuer la tension interfaciale en s'adsorbant à l'interface entre deux composés immiscibles, solide-liquide, liquide-liquide ou gaz-liquide immiscibles.