

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie des Procédés**



**Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : Génie de l'environnement**

Intitulé du mémoire

**TRAITEMENT DE SABLE POLLUE EN  
HYDROCARBURES PAR LA DESORPTION  
THERMIQUE : BIOREMEDIATION COMME  
ALTERNATIVE**

Présenté par :

ASSAD KARIMA

BENAMIROUCHE OUISSEM

Encadré par :

Pr. BADIS ABDELMALEK

Année universitaire 2019/2020

## **REMERCIEMENT**

*En préambule de ce modeste mémoire, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé, la force et le courage pour achever ce travail.*

*Nous tenons tout d'abord à remercier l'administration du département de génie des procédés d'avoir été compréhensible et souple en ces moments difficiles (covid-19).*

*Permettez-nous d'exprimer notre plus vive gratitude à notre promoteur, notre deuxième père Professeur Badis et à l'enseignant exemplaire professeur Boras pour leur encadrement, leur temps et tous leurs efforts pour nous transmettre leur savoir scientifique afin de bien nous diriger.*

*Notre reconnaissance aux membres du jury, docteur Taoualit et docteur amara d'avoir répondu présentes à notre soutenance et d'avoir pris le temps de corriger ce travail et d'avoir donné des remarques constructives pour le valoriser.*

*Et pour finir, un grand merci pour nos chères parents, frères et sœurs, pour leur patience, leur soutien et encouragement tout au long de notre cursus et pour toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin.*

## ملخص

تم القيام بهذا العمل بهدف إيجاد عملية بيئية, بديلة عن عملية الابتزاز الحراري التقليدي من اجل تطهير التربة الملوثة بالهيدروكربونات.

قمنا باجراء دراسة مقارنة لعدة أعمال حول عمليات المعالجة الحيوية البيولوجية من أجل إعادة تأهيل المواقع الملوثة بالهيدروكربونات.

الكلمات المفتاحية : التربة، الهيدروكربونات، التلوث، الامتصاص الحراري، المعالجة البيولوجية.

## Résumé

Le présent travail a été réalisé dans le but de trouver un procédé écologique, alternatif au procédé conventionnel de désorption thermique pour décontaminer le sol pollué par les hydrocarbures.

Nous avons réalisé une étude comparative de plusieurs travaux réalisés, sur des procédés biologiques de bioremédiation afin de réhabiliter les sites pollués par les hydrocarbures.

Mots clés : sol, hydrocarbures, pollution, désorption thermique, bioremédiation.

## Abstract

The present work was carried out with the aim of finding an ecological process, alternative to the conventional thermal desorption process to decontaminate soil polluted by hydrocarbons.

A comparative study was made of several works carried out on biological bioremediation processes in order to rehabilitate sites polluted by hydrocarbons.

Key words: soil, hydrocarbons, pollution, thermal desorption, bioremediation.

# TABLE DE MATIERE

Remerciement	
Résumé	
Liste des figures	
Liste d'abréviation	
Partie théorique	
Introduction général	1
Chapitre I : pollution de l'écosystème	3
I.1. Ecosystème	3
I.2. Pollution	3
I.2.1. Pollution du sol par les hydrocarbures	4
Chapitre II: Réhabilitation des sites pollués par les hydrocarbures	8
II.1. Méthodes de dépollution des sites pollués par les hydrocarbures	8
II.1.1. Démarche d'une action de dépollution	8
II.1.2. Description de l'unité de désorption thermique à ourhoud	12
Chapitre III : Bioremediation des sols pollués par les hydrocarbures	15
III.1. Bioremediation	15
III.2. Dégradation des hydrocarbures par les microorganismes	17
III.3. Facteurs influençant la biodégradation	17
III.4. Techniques de bioremediation	19
III.4.1. Bioremediation In-situ	19
III.4.2. Bioremediation Ex-situ	22
Partie synthèse bibliographique	
Synthèse bibliographique	26
Conclusion générale	34
Référence bibliographique	
Annexe	

# Liste des figures

<b>Liste des figures</b>	<b>pages</b>
Figure I.1 : photographie montrant les différentes sources de pollution par les hydrocarbures	5
Figure I.2 : photographie montrant les bourbiers de forage de champ d'ourhoud	7
Figure II.1 : schéma du procédé d'incinération de soles polluées	10
Figure II.2 : schéma du procédé de désorption thermique	11
Figure II.3 : photographie montrant l'unité de désorption thermique à ourhoud	13
Figure II.4 : photographie montrant la plateforme de stockage	13
Figure III.1 : dégradation d'un hydrocarbures en milieu aérobie et en milieu anaérobie	16
Figure III.2 : Principe du bioventing	20
Figure III.3 : Principe de la biosparging	21
Figure III.4 : technique de bioremediation	25

## Liste des abréviations

A: coefficient

d'abondance BaP:

Benzo[a]pyrene

BTEX: Benzene, Toluène , Ethylbenzene et

Xylenes C: Carbone

COV: Composés organiques volatils

EPA: Environmental Protection

Agency Fr: Frequence

HAP: Hydrocarbures aromatiques

polycycliques N: Azote

OBM: Oil Based Muds

PET: Polyéthylène

PCB: Polychloroliphényles

USEPA: United states environmental protection

agency WBM: Water Based Muds

## Introduction générale

---

Toute activité de production ou de consommation dans le monde, génère des déchets, qui sont souvent associés à la détérioration de l'environnement, ces déchets ont de multiples risques pour la santé humaine, et ils sont responsables de toute dégradation ou modification de la qualité des écosystèmes et de la biodiversité aquatique ou terrestre [1] .

Certes, l'industrie de production Algérienne par ses différents secteurs est considérée comme un moteur essentiel de la croissance économique et de la compétitivité [2], mais en parallèle, il est reconnu qu'elle a une part de responsabilité dans la pollution globale du pays, elle participe indirectement dans la pollution par l'utilisation inefficace de ses ressources, la gestion inappropriée de ses déchets et rejets, et les émissions de gaz à effet de serre [3].

L'industrie pétrolière génère de son côté, des rejets lors des opérations de forage, d'exploitation et de transport, présentant un problème majeur dont elle doit résoudre, ces rejets rentrent en contact avec le sol qui devient par la suite contaminé soit par des hydrocarbures ou d'autres polluants [4].

Le sable pollué par les hydrocarbures de façon accidentelle ou intentionnelle est considéré en Algérie comme déchet spécial dangereux et des taxes annuelles croissantes sont exigés sur le stockage de ce dernier en quantités énormes, s'il ne passe pas par un traitement spécifique afin de le décontaminer [5].

Face aux nuisances causées par le procédé de désorption thermique sur l'environnement, la santé humaine et l'écosystème, notre inquiétude nous a mené à réaliser ce travail pour but de remplacer le procédé conventionnel qui s'est avéré très coûteux, ne détruits pas totalement les polluants, et émit des fumées toxiques de combustion, par une technique biologique alternative, propre avec moins de dépenses et de dégâts [6].

Le présent travail s'articule en deux parties, la première partie se divise en trois chapitres dont le premier comporte des données bibliographiques essentielles pour la compréhension du phénomène de la pollution du sol par les hydrocarbures en général et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) en particulier.

Le deuxième chapitre présente les différentes méthodes de réhabilitation des sites pollués par les hydrocarbures ainsi que les procédés de traitement existants et le procédé thermique

## **Introduction générale**

---

---

en particulier.

Le troisième chapitre englobe les différents procédés biologiques de bioremédiation pour la bioréhabilitation des sites pollués.

Alors que la deuxième partie du travail présente une discussion et interprétation de plusieurs études dans le monde sur la bioremédiation des sols pollués par les hydrocarbures et les hydrocarbures aromatiques polycyclique (HAP), et on finira par une conclusion.

# **PARTIE THEORIQUE**

## **Chapitre I : Pollution de l'écosystème**

### **Introduction**

La dégradation progressive de l'environnement par les hydrocarbures a un impact direct ou indirect sur notre mode de vie actuel et futur.

Dans ce chapitre nous allons, dans un premier temps, présenter les différents types de pollution, leurs sources et leurs impacts.

Par la suite, nous nous focaliserons sur la pollution du sol par les hydrocarbures, tout particulièrement celle engendrée par les fluides de forage des sites pétroliers de l'entreprise nationale Sonatrach. Celle-ci a mis en place, en effet, un programme de lutte contre cette source de pollution depuis 1990.

### **I.1. Ecosystème**

On considère l'écosystème comme un système formé par un environnement dans lequel un organisme fonctionne. Il est constitué d'un biotope qui est le milieu de vie et d'une biocénose qui est composée d'êtres vivants (végétal et/ou animal) pouvant vivre en interaction directe entre eux ou non mais partagent le même biotope et permettant une biodiversité riche sur terre.

### **I.2. Pollution**

Selon la Législation Européenne, la pollution est définie comme étant l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substance ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres [7].

Ces dernières décennies ont vu émerger une prise de conscience sur les problèmes environnementaux à l'échelle locale et régionale et même jusqu'à l'échelle planétaire. Il existe différents types de pollution [8].

## Partie bibliographique

---

- **Pollution d'origine humaine** : Cette pollution est locale, diffuse, ponctuelle, accidentelle. Elle est liée aux activités industrielles ou urbaines.
- **Pollution d'origine naturelle** : Cette pollution peut être causée par des:
  - phénomènes naturels comme une éruption volcanique ;
  - pollution de l'eau par des animaux morts.

Cette pollution touche les trois compartiments (Air, Eau et Sol). Dans ce qui suit, nous nous limiterons à présenter uniquement la pollution du sol en relation directe avec la thématique traitée de ce sujet de mémoire.

**I.2.1.Pollution du sol par les hydrocarbures** : Le sol qui est un écosystème sensible, à structure granuleuse, contient des cavités vides remplis d'air ou d'eau et se caractérise par une épaisseur variable et une biomasse diversifiée. Selon Grans et al, un gramme de terre contiendrait plus d'un million de génomes différents [9].

Dans ce contexte, il est utile de bien connaître les différentes propriétés physiques et chimiques des sols à étudier car il est capable de retenir certains composés toxiques inorganiques et/ou organiques et préservant ainsi la nappe phréatique ou, au contraire, laisser passer ces composés toxiques et contaminer la nappe phréatique.

Selon Riser Roberts, La pollution résulte le plus souvent d'accidents industriels, de dépôts ou du transport des matières dangereuses.

Les hydrocarbures sont parfois associés sur le même site à d'autres polluants métalliques ou organiques qui confèrent à la pollution des caractéristiques spécifiques, ainsi le type de polluants le plus fréquemment rencontré avec les hydrocarbures sont les polluants de la famille des solvants chlorés, classés dans la catégorie de COV (composés organiques volatils), qui sont plus solubles dans l'eau que les hydrocarbures et qui ont la propriété d'être plus denses que l'eau, donc susceptibles de s'infiltrer dans le sol à l'état de phase organique jusqu'au substratum d'une nappe phréatique[8].

## Partie bibliographique

### I.2.1.1. Pollution en algérie

En Algérie, le problème de la contamination du sol et du sous sol par les hydrocarbures est dû surtout aux rejets des raffineries comme celle d'Alger qui a contaminé les zones agricoles de la région de Mitidja [10], et aux rejets d'industries pétrolières, gazières...etc.

### I.2.1.2. Pollution du sable du site d'OURHOUD

Une des conséquences de la pollution du sol au site pétrolier d'Ourhoud est la contamination du sable par les hydrocarbures.

Suite au stage que nous avons effectué en juillet 2019 au site d'OURHOUD (Sud-Est de Hassi Messaoud), nous avons été interpellés par la méthode de traitement thermique du sable pollué et la façon de son stockage après traitement.

Fuite dans un arrêt de l'usine



Lits de séchage



Fuite d'une conduite d'eau huileuse



Fuite dans une conduite de brut



**Figure. I.1:** Photographies montrant les différentes sources de pollution par les hydrocarbures.

### **I.2.1.3.Pollution par les boues de forage (fluides de forage)**

Le fluide de forage, appelé aussi boue de forage, est un système composé de différents constituants liquides (eau, huile) et/ou gazeux (air, gaz naturel) contenant en suspension d'autres additifs minéraux et organiques (argiles, polymères, tensioactifs, déblais, ciments, etc...)[11]. La boue ne doit pas être ni corrosive pour l'équipement ni toxique pour le personnel et elle ne doit pas représenter des risques d'incendie.

Les boues de forage sont utilisées pour :

- Faciliter le forage en lubrifiant et en refroidissant le trépan ;
- Equilibrer les pressions sur les parois du trou de forage ;
- Maintenir les déblais en suspension lors d'un arrêt de circulation en empêchant leur sédimentation afin de redémarrer le forage sans coincement.

### **I.2.1.4.Bourbier de forage**

Le bourbier est une excavation à ciel ouvert avec une moyenne de 30 à 60 mètres de largeur, 50 à 100 mètres de longueur et 1 à 3 mètres de profondeur. Son fond est généralement imperméabilisé par une géomembrane composée d'un filtre synthétique en polyéthylène (PET) et une couche en bentonite. Il fonctionne comme un bassin récepteur des rejets de forage [11].

Par ailleurs, les rejets changent en volume et en nature, en fonction des différentes phases de forage. Parfois, les bourbiers sont utilisés comme option de disposition (ou dépôts) finale des boues. Dans de telles conditions, la phase liquide est, soit pompée ou, soit évaporée naturellement. Quand les conditions d'ensoleillement le permettent, les solides restants sont recouverts par le sol. Cependant, cette option présente un risque considérable de pollution de la nappe, de noyade et intoxication pour certains animaux, en particulier les oiseaux [12].

A Hassi-Messaoud depuis quelques années, les bourbiers qui se situent sur les zones où le toit de la nappe du Miopliocène est de 30 à 60 mètres sont systématiquement imperméabilisés avec la géomembrane [13].

## Partie bibliographique

---

Le stockage provisoire dans le borbier dure des mois voire des années avant de procéder à son réhabilitation. Durant cette période, les hydrocarbures s'évaporent, s'infiltrent, s'adsorbent et peuvent causer de néfastes effets [11].

Le déversement et le dégagement de certains produits solides et/ou liquides dans le borbier peut entraîner une altération des propriétés physico-chimiques des compartiments naturels de ces milieux en diminuant leur capacité d'aération et en induisant des effets portant atteinte à la santé de l'homme de façon directe ou indirecte, et à l'environnement de manière globale [11],[14],[15].



**Figure I.2:** Photographie montrant le borbier de forage du champ d' Ourhoud .

Les borbiers à ciel ouvert présentent des risques potentiels de toxicité pour la faune et la flore, qui sont caractérisées par une faible biodiversité contenant 1000 espèces dans tout le Sahara d'une superficie de 2.000.000 km<sup>2</sup>[16].

## Chapitre II : Réhabilitation des sites pollués par les hydrocarbures

### II.1. Méthodes de dépollution des sites pollués par les hydrocarbures

Les techniques recommandées de réhabilitation des sites et sols pollués par les hydrocarbures sont nombreuses. Elles sont destinées soit à limiter ou à empêcher la propagation de la pollution dans l'environnement [17].

Le choix de la méthode adéquate de dépollution dépend de plusieurs critères :

- Degré, la nature et la profondeur de la pollution dans le sol ;
- Diagnostic de l'état du site ;
- Concentration en éléments toxiques et la spéciation des contaminants ;
- Usage ultérieur du site pollué ainsi que les caractéristiques hydrogéologiques et physicochimique du site ;
- Cout de la technique ;
- Durée ;
- Délai de décontamination ;
- Risque sur les opérateurs ;
- Présence de structures (bâtiment ou autre).

#### II.1.1.Démarche d'une action de dépollution

L'intervention de dépollution s'effectue en quatre étapes :

- Diagnostic (bilan de l'exploitation antérieur) : c'est une étude historique et documentaire sur l'activité passée du site et des investigations sur le terrain ;
- Exécution d'un programme d'études techniques : Prélèvements effectués sur le terrain afin de faire des analyses physico-chimiques au laboratoire ;
- Détermination de la nature des polluants, leurs teneurs et localisation ;
- Le choix du procédé de traitement : Fixation des seuils à atteindre dans des délais donnés et des couts bien déterminés pour la réhabilitation du site en proposant les solutions de traitement (procédés) qui répondent à la fois aux exigences administratives et aux contraintes financières propres ;

## Partie bibliographique

---

- Travaux de réhabilitation : Exécution des travaux de dépollution selon les délais et les objectifs fixés [18].

Parmi les techniques de traitement utilisées, dont les détails sont présentés en Annexes, nous citons :

- Traitement par confinement (Annexe II)
- Traitement *ex-situ* (Annexe II) ;
- Traitement *in-situ* : Air sparging ; Venting (Annexe II);
- Méthodes d'immobilisation de la pollution dans le sol.

Il existe différents procédés de traitement des sols pollués par les hydrocarbures visant à immobiliser la pollution, d'autres à l'extraire ou à la détruire. Ces procédés de traitement sont classés généralement en quatre familles :

- 1) Procédés de traitement physique ;
- 2) Procédés de traitement chimique ;
- 3) Procédés de traitement biologique ;
- 4) Procédés de traitement thermique.

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à présenter uniquement les procédés de traitement thermique :

### 1) Procédés de traitement thermique

Le traitement thermique des terres peut se faire, soit dans un centre collectif de déchets, soit sur site. Le processus résulte d'un ensemble de réactions physicochimiques d'oxydoréduction à des températures plus ou moins élevées et a pour but de réduire les effets polluants des déchets et de réduire leur volume [19].

Il existe deux types de traitement thermique que nous présentons comme suite:

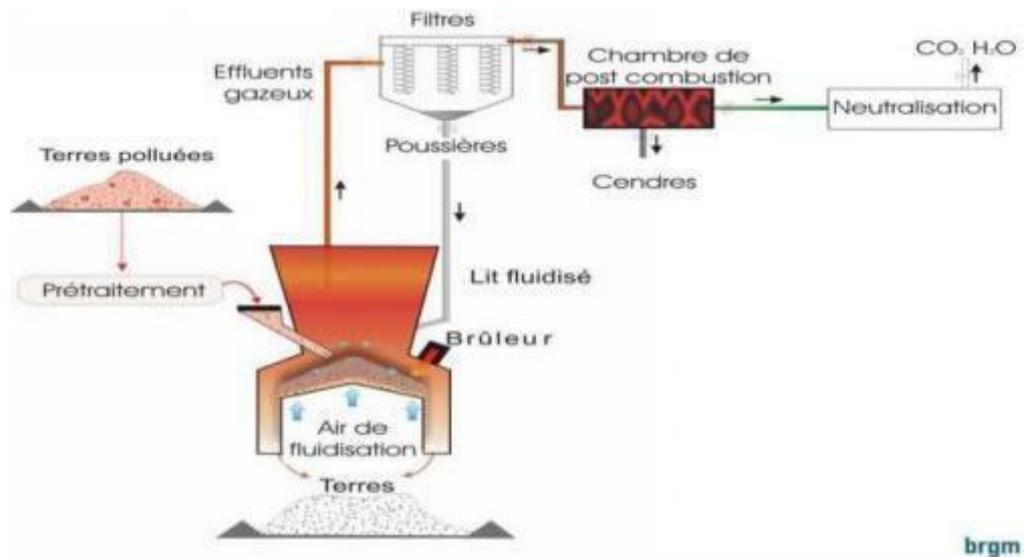
#### • Incinération

C'est un procédé de chauffage direct avec traitement des fumées. Ce procédé a été développé et amélioré au fil des années afin d'être adapté à une grande variété de polluants. L'incinération repose sur la combustion aérobie dans un four pouvant atteindre

## Partie bibliographique

plus ou moins 1000 °C. La température extrêmement élevée permet de détruire tous les polluants ou de les volatiliser [20].

En élevant fortement la température du sol pollué, les polluants sont convertis en dioxyde de carbone et vapeur d'eau, ainsi qu'en différents résidus de combustion et les métaux demeurent dans les cendres ou les vapeurs [21];



**Figure II.1** : Schéma du procédé d'incinération des sols pollués [20].

### • Désorption thermique

La technique de désorption thermique consiste à chauffer une terre polluée dans une enceinte sous atmosphère oxydante ou non, à une température donnée et pendant un temps de traitement suffisant pour vaporiser les polluants présents en surface ou dans les pores de la terre, et à les extraire de cette enceinte [22]. Ce traitement est utilisé dans la pratique industrielle de décontamination des sols le plus généralement dans un four rotatif et c'est le traitement de dernier recours [23].

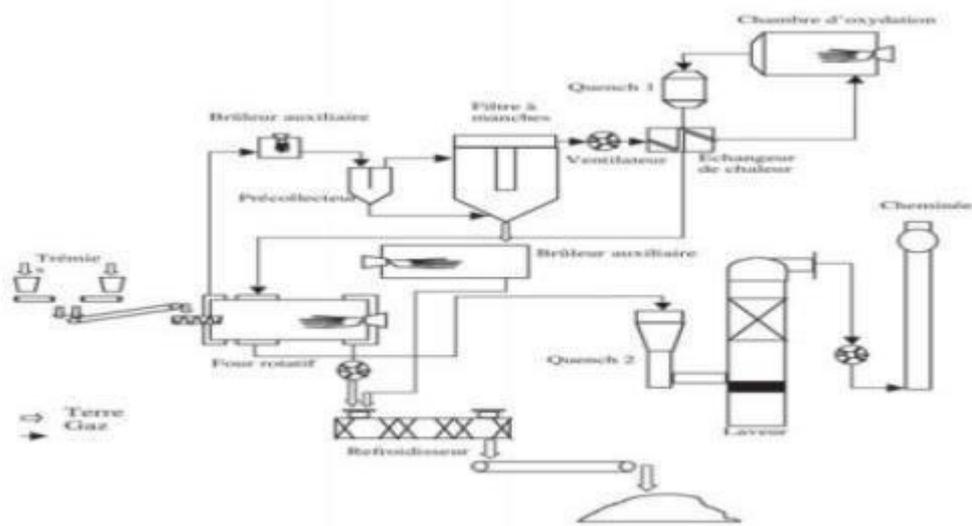


Figure II.2: Schéma du procédé de désorption thermique [22].

#### 1) Désorption thermique *In-situ*

La désorption thermique *in-situ* repose sur un chauffage du sol à l'aide soit d'une couverture chauffante (permettant de traiter à 1 m de profondeur) disposée à la surface du sol, soit d'éléments chauffants disposés en profondeur dans le sol (permettant de traiter à 300 m de profondeur). Le dispositif de chauffage est complété par la mise en place d'un système d'aspiration assurant le transport des polluants désorbés vers une station de traitement sur site. Le sol est porté jusqu'à 800 °C aux alentours des éléments chauffants. Une grande partie des contaminants est ainsi détruite *in-situ*. Les effluents gazeux sont traités par oxydation thermique sous une flamme à 1000 °C. Un filtre à charbon actif complète l'épuration des effluents gazeux [22].

### 2) Désorption thermique *Ex-situ*

C'est une technique conventionnelle ex-situ de traitement des sols pollués qui consiste à chauffer les terres excavés, afin de vaporiser les polluants en les séparant physiquement de la matrice [24].

L'objectif de la désorption thermique est d'appliquer de la chaleur aux sols excavés variant de 100 à 600 °C ce qui fait la différence entre la désorption thermique et l'incinération dans le but d'augmenter la pression de vapeur des contaminants et de les volatiliser [25].

En Algérie, l'organisation de Sonatrach a adopté ce type de traitement des sols pollués au sud, en suivant une politique de traitement réglementaire selon les normes.

Ourhoud est parmi les champs pétroliers de Hassi Messaoud qui se sont lancés dans la décontamination des terres excavées par voie thermique, plus précisément par la désorption thermique.

#### **II.1.2. Description de l'unité de désorption thermique à Ourhoud**

C'est un processus de purification des sols contaminés par les hydrocarbures (sable pollué) par désorption thermique avec récupération des vapeurs à un rythme allant jusqu'à 10 tonnes humides par heure (en fonction de l'humidité et le degré de contamination).

Le système est basé sur le concept de désorption thermique à combustion indirect, utilisant la chaleur pour augmenter la volatilité des contaminants dans un environnement anaérobie (moins ou pas d'oxygène) et équipé d'un capteur de surveillance d'oxygène pour surveiller son niveau dans le flux de vapeur.



**Figure.II.3:** Photographie montrant l'unité de désorption thermique à Ourhoud [26].

### II.1.2.1. Différentes étapes du processus

- La première étape consiste à transporter le sable pollué de la zone de stockage vers la zone de traitement pour éliminer toute sorte de déchet solides par tamisage électrique y compris le plastique, le bois et les pierres qui peuvent nuire les installations ou diminuer l'efficacité du traitement ;



**Figure II.4 :** Photographie montrant la plateforme de stockage [26].

- Après l'enlèvement des solides, le sable sera transporté par la suite vers le four à quatre brûleurs à gaz naturel par une trémie, et le convoyeur à vis monté sur le trou d'alimentation du four dépose le matériau directement sur le tambour chaud qui fournit la chaleur nécessaire pour amener la température des polluants au dessus du point d'inflammation automatique du mélange en assurant une température de fonctionnement de 2000 F (1093 °C), ce qui filtre les vapeurs et élimine les poussières.

## Partie bibliographique

---

- Une fois à l'intérieur du four, le sable avance lentement à travers ce dernier dans un mouvement en cascade pour faciliter le transfert optimal de chaleur de la paroi du four chaud au lit de matériau.

De l'azote est injecté dans le collecteur, situé sur le boîtier fixe du tambour, pour diluer tout oxygène qui s'est infiltré dans le tambour. Ceci permet de maintenir l'atmosphère du tambour sous la concentration minimale en oxygène pour éviter les conditions inflammables ;

- Au fur et à mesure que le sable passe dans le tambour en mouvement rotatif, Les vapeurs (les hydrocarbures vaporisés, la vapeur d'eau, l'azote et autres volatils) voyagent à contre-courant de l'écoulement des matières solides, pour encourager un transfert de masse maximal des contaminants;
- Une fois le solide atteint la fin du four, les vapeurs des hydrocarbures seront aspirées par un aspirateur IDFAN et filtrées pour être condensées en une phase liquide par deux condensateurs QUENCHE et CONDENSER, c'est un système de refroidissement pour récupérer les hydrocarbures à point d'ébullition élevé, les vapeurs restantes sont traitées et séparées par la suite à partir des réservoirs de séparation (huile \ eau), l'huile séparée dans l'étape précédente est utilisée dans la boue neuve ou comme carburant (Diesel) distribué via un cycle pour le fonctionnement des installations (bruleurs), alors que l'eau séparée au bout du traitement est utilisée pour réhydrater les déblais nettoyés ;
- A la fin du traitement le sable nettoyé sera transporté vers la plateforme de stockage. La société ESA s'occupera du nettoyage final du site [26].

### **Chapitre III : Bioremédation des sols pollués par les hydrocarbures.**

#### **Introduction**

Les activités industrielles sont la cause principale de nombreux problèmes fondamentaux de rejet de matières dangereuses organiques (peroxyde organique) ou inorganiques (métaux lourds) dans l'environnement chaque année.

Dans le présent chapitre nous allons nous intéresser aux biotechnologies, plus précisément la bioremédation des sols pollués par les hydrocarbures et la bio-réhabilitation de ces derniers à l'aide de microorganismes, agents dépolluants et de nombreuses techniques de dépollution efficaces pour la biodégradation d'un contaminant organique comme les hydrocarbures.

#### **III.1. Bioremédation**

Pour une entreprise pétrolière, la réhabilitation d'un site contaminé par les hydrocarbures est difficile et très coûteuse, d'où la nécessité de passer à une technique de dépollution plus verte.

La bioremédation est un processus par lequel les déchets organiques sont biologiquement dégradés dans des conditions contrôlées, en employant des organismes vivants pour éliminer les polluants industriels qui perturbent les cycles biogéochimiques des éléments naturels.

Cette méthode de bio-réhabilitation dépend des conditions du milieu, pH, Température, Humidité, Nutriment, Nature du polluant, Microorganismes et la nature de la contamination.

Cette technologie naturelle est considérée moins invasive pour l'environnement car elle propose de rendre le sol contaminé viable et fertile de manière plus écologique et plus économique en éliminant les composés pétroliers d'une manière définitive.

Il existe deux principaux types de bioremédation :

## Partie bibliographique

- Bioremédiation *In- Situ*: Le site contaminé est nettoyé sur place, utilise des bactéries autochtones pour le traitement, c'est la technique la moins cher et la plus efficace, elle est peut être utilisée de deux manières, soit intrinsèque qui veut dire aucune intervention humaine ou soit accélérée qui permet l'ajout de nutriments afin d'améliorer l'efficacité des bactéries à biodégrader le site pollué ;
- Bioremédiation *Ex - situ*: La terre contaminée est déplacé du site, cette méthode qui est coûteuse est utilisée en cas de nécessité extrême.

Un composé est biodégradable lorsqu'il est complètement transformé par les microorganismes en  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  avec renouvellement de la biomasse cellulaire.

Le processus de bioremédiation se fait selon une réaction d'oxydation en chaîne, où les hydrocarbures sont transformés par cassures successives en molécules de moins en moins complexes, jusqu'à l'obtention de sous produit simple [27],[28].

Lorsque l'oxydant est représenté par oxygène, on parle alors de conditions d'aérobiose. Dans le cas de l'anaérobiose, l'accepteur final de l'électron est un composé minéral ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ..., etc) [21].

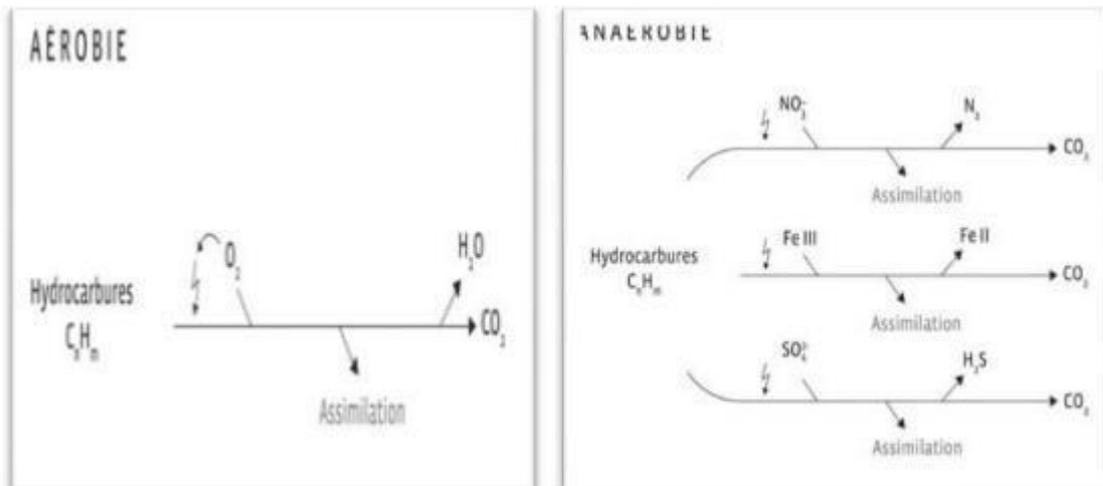


Figure III.1 : Dégradation d'un hydrocarbure en milieu aérobie et anaérobie [29].

## Partie bibliographique

---

La dégradation d'un hydrocarbure en milieu aérobie est oxydée, une partie est assimilée par la bactérie et une autre partie permet de produire de l'énergie (catabolisme), l'oxygène est nécessaire pour activer la réaction.

Pour le milieu anaérobie  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  jouent le rôle d'accepteurs d'électrons, c'est des mécanismes d'activation pour la dégradation des hydrocarbures [29].

### III.2. Dégradation des hydrocarbures par les microorganismes

Les microorganismes appelés << hydrocarbonoclastes >> sont les principaux agents d'atténuation naturelle des hydrocarbures [30]. Leur nombre est beaucoup plus important dans les zones polluées de façon chronique et s'accroît après un apport d'hydrocarbure dans les sites dépourvus de contamination [31],[32]. La capacité de se développer sur les hydrocarbures ne se limite pas uniquement aux bactéries puisque certains sites contaminés contiennent également de nombreux champignons et levures capables de les dégrader [33].

La plupart des microorganismes hydrocarbonoclastes sont des aérobies mésophiles, isolées à partir des sols des régions tempérées [34],[35]. A noter que certains anaérobies qui s'observent chez certains sulfato-réducteurs sont moins bien connus [36].

De nombreux genres bactériens ont été recensés et décrits comme aptes à dégrader les hydrocarbures [29].

Le détail de la dégradation des hydrocarbures aliphatiques, cycloalcanes et aromatiques par les microorganismes est présenté dans la partie Annexe.

### III.3. Facteurs influençant la biodégradation

Pour ne pas choisir la mauvaise méthode de traitement d'un polluant des précautions doivent être prises en compte :

### 1) Facteurs environnementaux

- **Facteurs liés à la structure du sol** : La structure du sol influe sur le transport des nutriments et de l'oxygène, qui seront plus accessibles à la flore autochtone responsable de la biodégradation [28],[37];
- **Influence de la température** : La température est un paramètre pouvant modifier l'état physique et la composition chimique des hydrocarbures ainsi que l'activité physiologique des microorganismes [14],[38];
- **Influence du pH** : Le pH du milieu peut affecter l'activité microbienne et sa sélection [15], l'efficacité de la biodégradation des hydrocarbures est généralement plus élevée sous des conditions de pH légèrement alcalin [36],[28];
- **Influence de l'humidité** : L'eau est indispensable à la vie des microorganismes, elle améliore le contact microorganismes/polluant comme elle favorise le processus de dégradation enzymatique [39],[40];
- **Influence de l'oxygène** : Pour une biodégradation aérobie des hydrocarbures, l'oxygène est vital à la croissance microbienne d'où la nécessité de fournir une bonne aération du milieu.

**2) Facteurs liés aux propriétés physico-chimiques du polluant** : En règle générale, la nature chimique de l'hydrocarbure détermine sa biodégradation. Les hydrocarbures à faible poids moléculaire sont plus facilement biodégradables que les grosses molécules. Sur le plan physique, les molécules les plus solubles sont plus biodégradables [14]. L'âge de la pollution influence sur la biodégradation, c'est-à-dire si la contamination est récente alors elle est plus facile à traiter.

### 3) Facteurs liés à l'apport du nutriment

Les substances nutritives à savoir source de carbone, d'azote, de phosphore, de soufre et certains oligoéléments, sont indispensables à la croissance microbienne [41].

### 4) Facteurs liés à la réponse de la microflore

Pour pouvoir dégrader les hydrocarbures, les microorganismes doivent être présents en concentration très importante dans le milieu, on utilise pour cela des composés appelés << Starters >> (ex- glucose) qui vont fournir une source de carbone et

d'énergie favorisant la croissance rapide des microorganismes, afin d'atteindre une concentration suffisante pour pouvoir attaquer ces hydrocarbures [42].

### III.4. Techniques de bioremédiation

Ce type de traitement permet de dégrader les polluants par l'action de microorganisme ou bien par des plantes dans le cas de la phytoremediation [11]. Il est considéré comme le plus efficace pour l'élimination des hydrocarbures [28].

#### III.4.1.bioremédiation *In-situ*

##### 1) Bioventing

C'est un procédé qui permet d'aérer la zone insaturée afin que les microorganismes du sol puissent mieux respirer et dégrader le polluant.

Cette technique consiste à renouveler l'air par dépression ou injection dans la zone insaturée, elle aide à stimuler la biodégradation aérobie de certains contaminants comme les BTEX [21].

Elle consiste à injecter de l'air au centre de la zone contaminé, par un ou plusieurs puits dont le diamètre n'excède pas 30 cm et à le faire circuler en pompant par plusieurs puits implantés en périphérie, le but est d'extraire le moins possible d'hydrocarbures volatils afin d'éviter l'installation d'une unité de traitement de gaz en surface [8].

Le débit d'air est ajusté pour fournir l'oxygène nécessaire à la biodégradation en fonction de l'activité biologique tout en minimisant l'extraction des volatils, il est recommandé de maintenir la pression de l'air injecté à des valeurs suffisamment faibles pour éviter que

l'air emprunte des chemins préférentiels ce qui nuit à la distribution uniforme de l'oxygène [8].

Le bioventing s'applique de façon optimale sur des composés organiques semi-volatils (gasoil), à la zone insaturée du milieu poreux, à des sols non fracturés [43]. Ce procédé présente des coûts de traitement très faibles et il est utilisé que pour des sols de grande perméabilité à l'air.

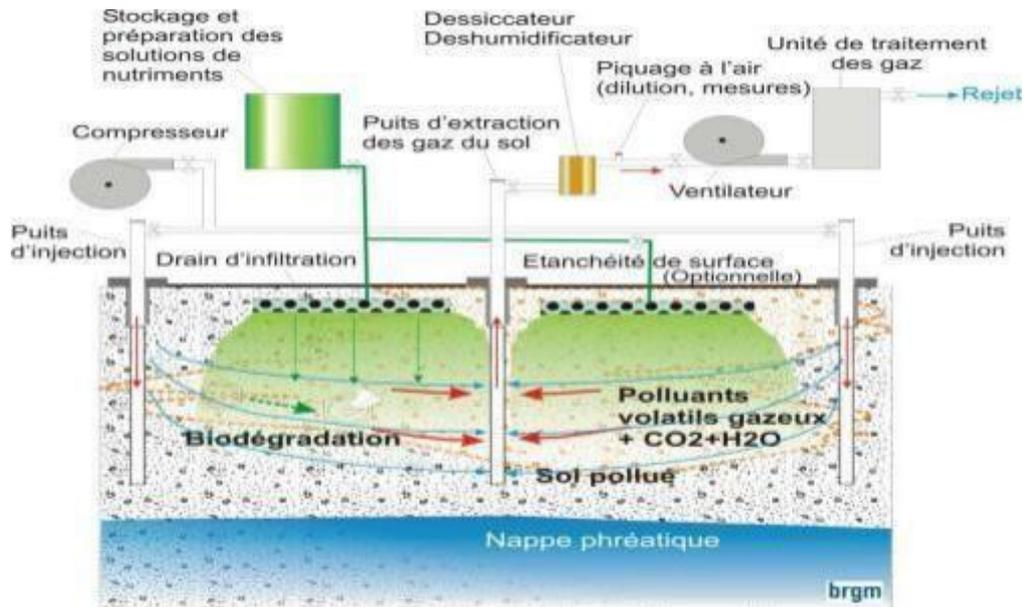


Figure III.2 : Principe du bioventing [44].

## 2) Biosparging

Air-sparging ou biosparging est une technique *in-situ* connue depuis une dizaine d'années, utilisée pour un sol qui présente une géologie simple. Ce traitement biologique aérobie consiste à stimuler la biodégradation dans la zone saturée à l'aide de l'air injecté qui stimule la multiplication de la population microbienne aérobie et qui facilite le contact air/eau et l'aquifère, ce qui favorise la désorption des polluants [21].

Le principe consiste à injecter un gaz (le plus souvent de l'air) au dessous du niveau de la nappe d'eau souterraine à traiter, ensuite l'air se propage à travers la zone saturée en créant des courants d'air. Ce dernier va mobiliser en vaporisant les contaminants dissous dans

l'eau ou piéger par capillarité dans les pores, la phase vaporisée va être à son tour emportée vers le haut en formant des bulles d'air et sera biologiquement dégradée dans le sol non saturé.

En instaurant cette interface air/phases du sol (air/eau, air/sol, air/produit), le biosparging favorise la volatilisation des substances chimiques volatilisables présentes dans la zone saturée, ainsi que celles présentes à l'état pur au dessus de la frange capillaire aqueuse. Le biosparging est utilisé pour traiter des contaminants volatils et des solvants chlorés et des hydrocarbures pétroliers volatils (essences, kérosène) [21].

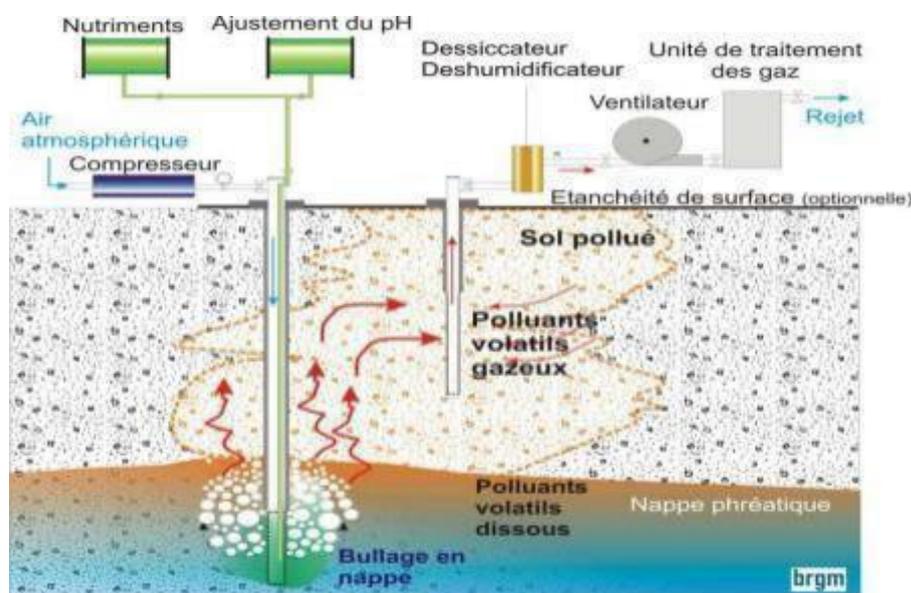


Figure III.3 : Principe de la biosparging[44].

### 3) Phytobioremédiation (Voir Annexe III)

La phytobioremédiation est une technique in-situ qui est adaptée pour une pollution faible sur une grande surface, qui nécessite une étude au cas par cas (choix des espèces et le type de sol).

Elle regroupe toutes les techniques utilisant les plantes, algues ou champignons pour transformer, dégrader, concentrer, stabiliser ou volatiliser des polluants, ce mode de traitement exige que les espèces utilisées tolèrent le polluant [45],[46], afin d'immobiliser naturellement les polluants des écosystèmes terrestres, aquatiques ou aériens, bien que

cette méthode soit principalement utilisée pour les métaux lourds et les radionucléides , elle peut aussi s'appliquer au traitement des polluants organiques trichloréthylènes (TCE) et perchloréthylènes (PCE ) [47].

### **III.4.2. Bioremediation *Ex-situ***

#### **1) Landfarming (épandage contrôlé)**

Le landfarming est une technique de bioremédiation ex-situ utilisée à grande échelle dans le but de contrôler le lessivage des contaminants, ce qui nécessite l'excavation des sédiments contaminés par le pétrole, les déblais de forage, les fluides de forage à faible teneur en saumure, les boues huileuses, les fonds de réservoirs et les boues de fosse.

Les bactéries présentes naturellement dans les sols sont mélangées aux déchets, afin de transformer les contaminants organiques en dioxyde de carbone, en eau et en biomasse.

Pendant la mise en décharge, les déchets sont généralement placés sous forme de couches sur la surface du sol avec une épaisseur variable, ensuite elle seront labourés ou retournés pour aérer les déchets [48],[49].

Des engrais tels que l'urée et le triple superphosphate (TSP) sont utilisés pour fournir de l'azote et le phosphate afin d'améliorer la biodégradation, une fois traité le sol peut être réutilisé à des fins de constructions ou agricoles.

Cette technique a pour avantage d'être économique et performante, facile à mettre en œuvre, et ayant démontré une grande fiabilité ainsi que des résultats extrêmement significatifs [46]. Elle s'est avérée la plus efficace dans le traitement des hydrocarbures pétroliers lourds, considérés très peu volatils, cette méthode de traitement biologique est convenable afin d'éviter des risques de contamination de l'air par évaporation.

**2) Bioslurry (bioreactors) Le bioréacteur (fermenteur ou propogateur):** est un appareil dans lequel on multiplie des microorganismes (levures, bactéries, champignons microscopiques, algues, cellules animales et végétales) pour la production de biomasse ou pour la production d'un métabolite.

Le slurry phase est un bioréacteur utilisé pour le traitement des sols, des sédiments des boues, le solide contaminé est excavé et tamisé afin de conserver que les fractions fines, ces dernières sont mélangées à l'eau et à d'autres substrats de telle sorte que le traitement biologique soit effectué dans des conditions saturées et avec une suspension presque homogène .

Dans des conditions contrôlées cette technique permet d'augmenter la surface de contact entre les contaminants présents dans la matrice ciblée et les microorganismes responsables de leur biodégradation.

Les sols résultant du traitement et les boues provenant du réacteur sont récupérés et remis sur le site ou disposés hors site selon la nature de ces rejets [49]. C'est le traitement le plus coûteux, il consiste en l'emploi de réacteur agité, pour des sols généralement difficiles à traiter, par d'autres procédés biologiques, dans le cas où les microorganismes ont des difficultés de se développer dans des conditions non contrôlées, et si la concentration en polluant est trop élevée (entre 2.5 et 250 g par kg de sol ) [28],[43].

### 3) Bio-augmentation

La bioaugmentation est une technique utilisée en ex-situ ou in-situ, elle consiste à ajouter des microorganismes indigènes génétiquement modifiés ou étrangères du site contaminé dans le but de rendre possible ou d'améliorer la biodégradation d'un polluant dans le sol contaminé par les hydrocarbures [21].

Il existe des souches idéales à la biodégradation des hydrocarbures comme les souches appartenant aux genres *Pseudomonas*, *Bacillus*, ces souches peuvent s'adapter à n'importe quel environnement naturel et artificiel à condition qu'il y ait une concentration adéquate en substrat, nutriments et oxygène pour leur métabolisme [50].

La réduction d'un composé peut être due à son utilisation directe par le métabolisme de ces cellules ou indirecte par le Co-métabolisme *via* des réactions enzymatiques non spécifiques . Cette méthode a été utilisée notamment dans la bioaugmentation des sols [51]. Le procédé de bioaugmentation est envisagé lorsque les microorganismes autochtones du sol sont rares

ou ne sont pas physiologiquement capables d'effectuer le processus de purification ou dans la situation d'un contaminant présentent des concentrations toxiques pour les microorganismes autochtones.

Cette technique est peut être réalisée dans de bonnes conditions, selon des paramètres bien strictes [21]:

- Les propriétés du sol : Taux d'humidité, taux de matière organique, pH, capacité d'échange cationique (CEC) ;
- Les propriétés des contaminants : Biodisponibilité, concentration, toxicité pour les microorganismes dégradants les polluants ;
- L'écosystème microbiologique : Présence de prédateurs, compétition intraspécies.

#### 4) Bio-stimulation

La biostimulation consiste à stimuler au moyen d'adjuvants chimiques ou biochimiques la dégradation des polluants par les microorganismes indigènes [21].

Appelée aussi atténuation naturelle assistée, elle ne comprend pas l'addition de microorganismes dans le sol, mais uniquement le contrôle des conditions favorables au développement de la microfaune indigène, elle est donc largement utilisée en mode in-situ [52].

Ce là se fait par l'apport de nutriments et par ajustement des conditions de milieu (potentiel d'oxydoréduction, humidité...).

La forme la plus courante de biostimulation est l'addition d'éléments nutritifs, principalement l'azote, le phosphore, le potassium, nécessaires aux bactéries indigènes du sédiment du sol ou de l'eau souterraine afin d'accélérer la dégradation des contaminants et par l'ajout des sources de carbone comme le glucose, des oligoéléments, des protéines, des enzymes et des hormones parfois, pour fournir l'énergie nécessaire aux microorganismes et assurer leur survie [53].

## Partie bibliographique

Cette technique est influencée par plusieurs paramètres environnementaux comme le pH, l'humidité, la température, l'oxygène (pour le mode aérobie), le potentiel oxydoréduction ainsi que la physiologie environnementale qui influence également le taux de biostimulation. [52], [54].

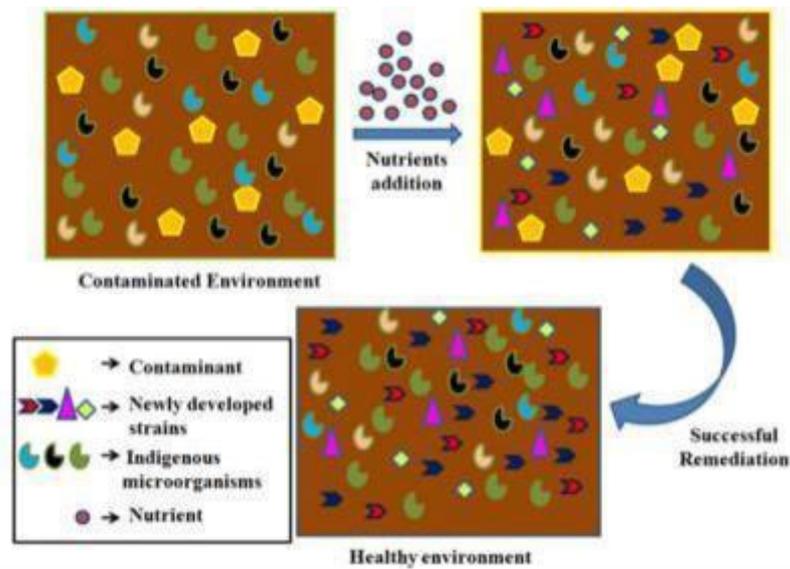


Figure III.4 : Technique de biostimulation[54].

**PARTIE SYNTHÈSE  
BIBLIOGRAPHIQUE**

### **Introduction**

Dans l'intérêt d'enrichir le mémoire et améliorer la recherche bibliographique, neuf articles universitaires ont été résumés dans une synthèse bibliographique comme un appui de ce qui est cité avant, décrivant plusieurs études sur la bioréhabilitation des sites pollués par les hydrocarbures en utilisant des techniques efficaces et robustes de la bioremédiation des sols, avec comparaison et analyse des résultats les plus intéressants.

Cette partie du travail est divisée en deux parties : en premier lieu on parlera sur les procédés utilisés pour la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures, en second lieu on présentera les différents procédés utilisés pour la décontamination des sols pollués, notamment, par les hydrocarbures aromatiques polycycliques.

### **Partie I : Les procédés utilisés pour la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures**

La production pétrolière à long terme et l'utilisation successive de ses dérivées, ont causé une contamination importante pour l'air, le sol ainsi que les eaux souterraines et surfaciques, et ont engendré des répercussions difficiles à réparer, ce qui a fait appel à des techniques de réhabilitation telle que la désorption thermique dans le cas des sols contaminés.

Le décret exécutif n° 06-104 du journal officiel de la république Algérienne N° 13 a classé les sols contaminés par les hydrocarbures comme déchets spéciaux dangereux, pour cette raison **Saadaoui et al.** en 2013 [69] ont pris l'initiative d'étudier l'efficacité du NSR city pour le traitement *in-situ* des couches flottantes d'hydrocarbures sur un site Bruxellois, en installant un pilote pour trois puits de contrôles de (1m, 2m et 3m) et un puits central installé sur une surface de 5.3m<sup>2</sup>, puis observer l'évolution de la température du sol traité ensuite étudier l'évolution de la couche flottante, et enfin analyser les échantillons du sol et des eaux souterraines (d'une profondeur de trois mètres ), les résultats obtenus démontrent l'efficacité de la désorption thermique *in-situ* pour le traitement des sols pollués en présence d'une couche flottante .

Le teste pilote a duré au total et sans intervention 70 jours, et a montré une élimination totale de la couche des polluants d'une épaisseur de 50cm, en plus de la couche flottante.

Les analyses effectuées révèlent la présence d'huile minérale, des BTEX et des HAP dans le liquide et la quantité la plus élevée est celle de l'huile minérale qui est de 6.40 mg/Kg.ms.

L'entraînement par vapeur d'eau venant de la nappe et la création d'une zone de haute température près des tubes ont permis ce traitement.

Le besoin de remédier l'environnement de son état pollué vers un autre plus écologique et sain, a mené au développement d'un nombre important de technologies biologiques tels que la bioréhabilitation des sols par la technique de bioremédiation comme une solution la plus adaptée aux critères économiques.

Et c'était le but de **Juc et al. [70]** de définir une solution optimale de réhabilitation de deux sites (Vatra et Orhei) pollués par des produits pétroliers à la Moldavie en choisissant la voie biologique.

L'étude s'intéresse à comparer la faisabilité des biotraitement des sols pollués par des hydrocarbures, ceci à l'aide de cinq bioréacteurs et en appliquant des méthodes adaptées aux critères économiques de la Moldavie.

Les trois premiers réacteurs sont chargés par un sol homogénéisé pollué par de l'essence et du gasoil, issu de la région de Vatra, du fumier est ajouté au premier réacteur avec arrosage à l'eau permutée.

Une souche bactérienne est ajoutée au deuxième réacteur avec arrosage à une solution nutritive, alors que le troisième est arrosé par une solution nutritive seulement.

Les deux derniers réacteurs sont chargés du sol pollué par des huiles naturelles de la région d'Orhei, le quatrième est similaire au deuxième réacteur tandis que le dernier diffère des autres réacteurs qui sont alimentés en oxygène, ce réacteur n'est pas aéré et contient un surfactant Rhodasurf IDO70 de la formule chimique :  $C_xH_{2x+1}O(CH_2CH_2O)_7H$ .

En comparant l'efficacité des méthodes de biotraitement appliquées, le fumier comme étant un additif naturel riche en microorganismes a marqué un rendement idéal égal à 100%, d'une durée de 26 jours pour la dégradation totale de l'essence et 32 jours pour la dégradation du gasoil.

Les résultats ont montré que la technique dans le dernier réacteur est difficilement applicable *in situ*, mais elle est faisable avec une aération et un mélange de terre avec ou sans addition de bactéries ou d'autres nutriments naturels.

Cette étude a montré aussi que l'ajout de souches bactériennes en général, donne des résultats positifs supérieurs à 90%, ceci est justifié par l'augmentation de la quantité des microorganismes identiques dans le sol, mais le problème qui reste à résoudre est la dégradation des petites quantités des hydrocarbures.

Ce problème inquiétant est confirmé en 2020 par l'étude de **Rahbal *et al.* [71]**, ces derniers ont étudié l'évaluation de l'impact d'un substrat organique (boue activé) dans la décontamination des sols pollués par des hydrocarbures, provenant d'une décharge propre de la société d'industrie et de raffinerie SAMIR au Maroc.

L'étude est basée sur le principe de compostage d'où les chercheurs ont effectué des mélanges de sols contaminés avec de la boue activé, cette dernière vient de la station d'épuration des eaux usées de la même industrie, elle est considérée comme déchet organique riche en éléments nutritifs, et contient des microorganismes aptes à dégrader les hydrocarbures.

Les mélanges (B, C, et D) sont préparés en pourcentages différents (sol\ boue activé : 6\4, 7\3 et 8\2) respectivement, plus d'un système de contrôle A (100% sol) avec contrôle de paramètres physicochimiques (pH, conductivité électrique, humidité, concentration en hydrocarbures...) et biologiques.

Parmi les paramètres suivis, et en comparant les trois mélanges différents, le mélange idéal était (sol\ boue activé B : 6\4), ce dernier a marqué une augmentation de la température jusqu'à atteindre 55 °C dans la phase thermophile et une dégradation en hydrocarbures égale à 58% pour les six premières semaines et 91% dans douze semaines. Ceci est justifié par la charge microbienne élevée et la forte teneur en azote en raison du taux élevé de la boue activé dans le composte, avec enregistrement de la dominance de genres : *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Serratia*, *Klyvera* et *Escherichia coli*.

Le principal avantage de ce système de compostage provient de l'origine indigène des microorganismes présents dans le mélange et qui s'adapte avec les conditions du milieu en

dégradant la matière organique, sauf qu'après la croissance de ces derniers, et après consommation des composés les plus facilement dégradables, leur nombre diminue jusqu'à atteindre de nouveau la taille d'une population normale.

Cette technique de mélange *via* le processus de compostage est faisable avec des propriétés physicochimiques acceptables, considérée comme voie écologique pour l'élimination des hydrocarbures et utile pour une stratégie de gestion de déchets.

Les procédés de bioréhabilitation sont variables, tous font appel aux mécanismes de bioaugmentation et/ou biostimulation et optimisés grâce aux différents additifs (nutriments).

Le principe du Biopile ressemble au composte dans le mécanisme, il est connu par son pouvoir de détruire les hydrocarbures par le procédé de biostimulation, **Martinez *et al.* [72]**, ont réalisé une étude comparative des résultats obtenus à partir de deux processus de biostimulation sur le terrain en utilisant deux essais de 0,5 tonnes de biopiles à la station Carlini pour deux années successives afin d'analyser les facteurs qui peuvent avoir un impact sur l'efficacité du procédé dans les régions froides.

Le premier essai (biopile I) qui a duré une année est arrivé à dégrader 75% des hydrocarbures, alors que le deuxième (biopile II) dans la deuxième année n'est arrivé à dégrader que 55% des hydrocarbures totaux.

Les mêmes analyses physicochimiques et biologiques sont réalisées statistiquement pour les deux essais et pendant les deux années pour identifier la raison de cette différence.

Après analyse et interprétation des résultats, le nombre total d'heures d'ensoleillement est avéré être le facteur clé de l'efficacité de l'élimination des hydrocarbures dans le traitement en augmentant la température du sol à l'intérieur du biopile ce qui affecte sur le nombre de bactéries ainsi que leur activité dans le sol.

Pas seulement les microorganismes, même les plantes sont caractérisées comme outil efficace pour la remédiation des métaux lourds et polluants divers, ce qui a été démontré **Pulchérie *et al.* en 2017 [73]** par leur étude de contribution à la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures en utilisant la technique de phytoremédiation.

L'étude consiste à planter une variété d'espèces de plantes, répertoriée dans 26 sites potentiellement pollués par des hydrocarbures, représentés en trois modalités (Tn : sols non pollués plantés, To : sols pollués non plantés, sols pollués plantés) dans les quatre villes de Cameroun (Yaoundé, Kribi, Limbé, Douala).

Les chercheurs ont marqué une biodiversité des sites pollués (106 espèces, 76 genres et 30 familles) moins élevé que celle des témoins (sites non pollués).

Quinze espèces tropicales de la biodiversité des sols pollués (des 106 espèces) ont marqué une fréquence ( $Fr_i > 10\%$ ) et un coefficient d'abondance ( $7 < A < 10\%$ ) les plus élevés, six d'entre elles sont retenues comme espèces générales majeures et les neuf restantes comme potentielles majeures.

Afin d'étudier la potentialité des six espèces végétales identifiées sur les sites potentiellement pollués, ils ont mélangé 330 ml de fioul domestique pour quatre grammes de sol, seules trois des six espèces testées ont survécu et donc qualifiées comme espèces polluo-tolérantes : deux plantes appartiennent à la famille des Poaceae (Eleusine Indica, Gaertn et Cynodon, Dactylon, Pers) alors que la troisième plante (Alternanthera sissilis R.Br.ex Dct ) de la famille des amarnt haceae).

### **Partie II : Les procédés utilisés pour la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures aromatiques polycycliques**

Les HAP sont des polluants ubiquistes prioritaires et persistants, dont certains posent de réels problèmes, depuis 1980 les techniques de décontamination des sols ont fait l'objet de nombreuses études de recherche, en 2001 **Risoul et al. [74]** ont décidé de réaliser une étude sur la désorption thermique en faisant une analyse thermogravimétrique sur des petites quantités de sols pollués artificiellement, dans le but de déterminer les mécanismes fondamentaux en jeu lors du traitement thermique, la deuxième partie de cette étude est de confirmer les masses les plus élevées en utilisant des sols réels à l'aide d'un pilote de décontamination thermique de laboratoire et enfin pour valider l'ensemble des résultats, un pilote semi-industriel fonctionnant en continu a été utilisé.

Les mécanismes mis en jeu lors du traitement thermique sont : l'évaporation, désorption, et transfert des polluants à travers la matrice poreuse du sol, on a pu constater que la température idéale pour la décontamination de l'argile gonflante est de 450 °C, le cas des HAP peut atteindre les 750 °C où habituellement la désorption thermique est limitée à 500°C.

L'ensemble de l'étude à l'échelle du laboratoire a prouvé qu'à la température de 450 °C, la contamination résiduelle est inférieure à 2 ppm pour le sol pollué par des polychlorobiphényles (PCB) et inférieur à 1 ppm (partie par million) pour le sol pollué par des HAP, ces valeurs correspondent à une efficacité de décontamination supérieur à 99%.

La décontamination est favorisée par une température de traitement élevée et un débit d'air de balayage important, c'est les deux paramètres de choix pour optimiser la désorption thermique.

Les produits pétroliers et les solvants organiques et volatils sont les principaux polluants de l'air, du sol et des eaux souterraines traités par excavation et pompage classique, mais voilà le traitement thermique est trop coûteux et pas très efficace [69], d'où l'initiative de **Siméo et al.** [75] de publier en 2008 un article qui comporte des études sur les différents conditions expérimentales en laboratoire afin de dégrader efficacement les HAP de haut poids en utilisant différents substrats organiques (composte de crevette, lisier de porc, boues municipales) pour la dégradation des HAP dans un sol industriel en ajoutant la paille comme agent de texture ou surfactant pour améliorer la biodisponibilité des microorganismes, ces substrats organiques ont été utilisés pour deux tests, le premier teste c'est l'acclimatation des microorganismes pour observer leur prolifération et déterminer le meilleur composé.

Le deuxième test a été fait en milieu liquide en culture agitée dans le but de tester l'effet des boues et du Ratio C/N du milieu sur la biodégradation des HAP, tous a en utilisant les techniques du compostage et du landfarming.

Les chercheurs ont conclu après étude que l'acclimatation des microorganismes est recommandée par mis en contact avec la matrice contaminée, une biodégradation de 60% a été obtenue dans les conditions suivantes : 75% de sol noir de Québec, 10% d'inoculum (Boues municipales et lisiers de porc) utilisé pour améliorer la biodégradation, 10% de

boues de la station d'épuration, 3% de paille, pour cette condition les HAP lourds ont été éliminés à hauteur de  $68\% \pm 16\%$ .

L'étude de l'effet du rapport C/N en cultures agitées à 150r/min (rotation par minute) à 38 °C montre qu'il n'est pas pertinent d'ajouter des substrats azotés ou carbonés pour obtenir une bonne biodégradation seule importe le ratio C/N du sol.

La faible solubilité des HAP dans l'eau rend l'action des microorganismes limités d'où l'intérêt d'étudier des microorganismes produisant des molécules d'agent de surface par **Mesbaiah *et al.* [76]**, en 2016 elle et son équipe ont examiné la capacité de production de biosurfactant de l'espèce *Paenibacillus popilliae* extraite à partir d'un sol contaminé de la région de HASSI – MESSAOUD, Algérie, ils ont caractérisés le biosurfactant produit par la souche 1C et déterminer sa capacité à dégrader les hydrocarbures et d'évaluer son efficacité potentielle pour une application éventuelle dans la bioremédiation.

Cet essai a prouvé que la capacité de la souche bactérienne 1C peut dégrader les hydrocarbures polyaromatiques et a la capacité de produire un biosurfactant en utilisant l'huile d'olive comme source de carbone et source d'énergie.

Ce biosurfactant a montré une stabilité intéressante sur une large gamme de pH (2-10), de température (4 à 70 °C) et de salinité (0-15% NaCl, P/V) et possède une activité antimicrobienne significative contre *Staphylococcus aureus* et peut aussi être utilisé pour améliorer les teneurs en HAP, le biosurfactant produit a une importante réduction de la tension superficielle qui est de 32 mN/m et une activité d'émulsification de 76.36%.

La biodégradation des HAP à l'aide de microorganismes n'est pas toujours possible à cause de la persistance des HAP à poids moléculaire lourd, de nombreuses études ont mis en évidence l'aptitude des champignons de type lignolytiques à dégrader les HAP, cependant l'origine non tellurique de ces champignons les rends peu compétitifs par rapport à la microflore endogène du sol, dans l'optique de bioremédiation **Rafin *et al.* [77]** ont entamé des travaux dans le but d'utiliser le potentiel de *Fusarium solani*, ils ont pu faire une collection de souches fongiques isolées à partir de sols contaminés artificiellement par le fioul et faire une étude de l'aptitude de ces isolats à croître en présence de Benzo[a]Pyrène (BaP) comme seule source de carbone puis poursuivre avec

l'étude cinétique de la minéralisation du BaP par *Fusarium solani* en fermenteur et enfin faire une identification des métabolites de BaP.

Après étude et observation des souches fongiques isolées cités comme suite : *Zygomycotina*, *Ascomycotina*, *Deuteromycotina*, un isolat de *Fusarium solani* a été sélectionné apte à dégrader en culture liquide le Benzo[a]Pyrène, HAP de haut poids moléculaire.

Le BaP marqué par le  $^{14}\text{C}$  a permis de mettre en évidence l'aptitude de la souche *Fusarium solani* à minéraliser le Benzo[a]Pyrène avec des taux moyens de minéralisation d'environ 65  $\mu\text{g/g}$  de biomasse/jour, qui est comparable aux taux obtenus avec le champignon de la pourriture blanche qui est un champignon très étudié en biodégradation.

Cet article montre que le *Fusarium solani* est un champignon ayant la capacité à mobiliser et à incorporer le BaP qui est une molécule connue pour être peu biodégradable.

En fin de fermentation, ils ont obtenu des quantités suffisantes de métabolites permettant l'identification de deux principaux métabolites : 1,6-Benzo[a]Pyrène Quinone et la 3,6-Benzo[a]Pyrène Quinone.

## Conclusion générale

---

Au fil du temps l'accumulation et la persistance de plusieurs polluants toxiques ont rendu le sol saharien Algérien contaminé et la nappe phréatique presque inexploitable.

La pollution du sable par les hydrocarbures de la région d'Ourhoud (Hassi Messaoud) est l'une des catastrophes environnementales les plus dangereuses de cette région, l'infiltration facile de ces déchets spéciaux dangereux dans ce matériau perméable contamine les nappes phréatiques et entraînent donc des conséquences néfastes sur la santé humaine et l'environnement d'où la nécessité de bien connaître la composition chimique du sol et de diagnostiquer sur le site pollué afin d'y remédier.

La réhabilitation d'un site pollué est une opération complexe qui intègre plusieurs étapes, le choix d'une technique de réhabilitation repose principalement sur la nature du sol, les polluants présents, les délais imposés et les objectifs à atteindre, de plus, Pour résoudre un problème de décontamination d'un sol, il n'y a pas de solution exclusive. Le traitement à mettre en œuvre est souvent une combinaison de plusieurs techniques de décontamination reposant sur des procédés physiques, chimiques, thermiques ou biologiques.

La désorption thermique est utilisée actuellement à Ourhoud comme solution pour traiter le sable contaminé par les hydrocarbures. Néanmoins, ce dernier modifie les propriétés physico-chimiques et biologiques du sol et ne détruit pas l'ensemble des polluants, très coûteux et pollue l'atmosphère. C'est pourquoi, on s'oriente vers le choix d'un procédé plus écologique, économique et qui ne génère pas de déchets.

Les traitements biologiques sont en plein expansion, et de plus en plus adaptés dans le monde. Ils présentent de nombreux avantages par rapport aux autres traitements physicochimiques et thermiques.

La bioremédiation est une technique biologique qui fait appel à des microorganismes déjà existants dans le site pollué, qui peuvent agir en aérobie ou en anaérobie selon les deux mécanismes de bioaugmentation et biostimulation, en tenant compte des paramètres physicochimiques et biologiques du milieu, d'où le besoin de spécialistes en géologie, en génie des procédés et en microbiologie afin de donner les meilleures conditions (nutriments, oxygène ...etc.) Pour de meilleurs résultats.

## Conclusion générale

---

D'après l'interprétation des résultats de la partie synthèse bibliographique, il s'est avéré que les procédés de bioremédiation cités sont très efficaces marquant des rendements de traitement très optimistes, écologiques fonctionnant avec des microorganismes et des plantes agissant sur la dégradation des hydrocarbures, et économiques en dépensant moins d'argent comparant aux autres procédés coûteux.

En parallèle, quelques inconvénients peuvent limiter le bon fonctionnement des procédés de bioremédiation et qui restent comme axes d'étude pour les améliorer, parmi ces facteurs limitant on cite : la concentration élevée en contaminants toxiques que les bactéries ou autres se trouvent dans l'incapacité d'y remédier, la dégradation de petites quantités des hydrocarbures restantes, ajustement de paramètres physicochimique (Température, Ph, humidité, rapport C/N...etc) pour l'adaptation de la bactérie dans un milieu favorable, le manque d'un guide détaillé de la bioremédiation des sols, la durée du traitement...etc.

Mais certes, la technique de bioremédiation reste une biotechnologie alternative simple, rentable, et qui respecte l'environnement.

Afin d'améliorer le rendement du traitement biologique, on propose l'idée de notre travail qu'on allait faire au centre de recherche de Sonatrach, c'est de coupler les deux mécanismes de bioremédiation : une bioaugmentation pour le sol pollué à fin d'améliorer la croissance bactérienne des hydrocarbonoclastes qui ont la même fonction de biodégradation que la souche bactérienne ajoutée, et une biostimulation du milieu pollué pour la prolifération des microorganismes endogènes et créer un milieu favorable pour ces derniers.

Ces deux techniques ensemble, permettront à la fois d'enrichir le milieu contaminé en éléments nutritifs, et indispensables au développement de la microflore, ces éléments sont présents dans le substrat naturel qu'on allait préparer au laboratoire de Microbiologie de Professeur Badis.

En même temps la bioaugmentation par la souche bactérienne isolée par Professeur Badis et ses collaborateurs de la région de Hassi Messaoud qui est connue par sa tolérance à

## **Conclusion générale**

---

---

hautes températures et son pouvoir dégradant intéressant, rentre en jeu dans la variété, la croissance, l'activité et le développement naturel automatiques des bactéries autochtones.

## Références bibliographiques

---

[1] : dégradation des déchets, impacte sur l'environnement. Extrait du site internet [www.laraiecreative.fr](http://www.laraiecreative.fr). Consulté en septembre 2020.

[2] : la relance de la production, extrait du site internet de la République Algérienne démocratique et populaire ministère de l'industrie de production. Extrait du site internet [www.mdipi.gov.dz](http://www.mdipi.gov.dz) . Consulté en septembre 2020.

[3] : la politique environnementale en Algérie : réalités et perspectives. Extrait du site internet déchets science [www.lodel.irevues.inist.fr](http://www.lodel.irevues.inist.fr). Consulté en septembre 2020.

[4] : Loukil.L, Senouci, les effets des rejets pétroliers sur la région de Hassi Messaoud. Article de la revue algérienne d'économie et de gestion. 9(3) : 164-184.

[5] : décrets du journal officiel de la république Algérienne N°26.

[6] : désorption thermique sur site, hors site, fiche de synthèse. Extrait du site internet [www.selecdepol.fr](http://www.selecdepol.fr). Consulté en Septembre 2020

[7] : Directive 2000/60/CE . [www.actu-environnement.com](http://www.actu-environnement.com). Consulté en juin 2020.

[8] : Bocard C.2011.Marées noires et sols pollués par des hydrocarbures : Enjeux environnementaux et traitement des pollutions. Edition Techni.ISBN10: 2-7108-0832-3.1:14.

[9] : Militon C.2012.Caractérisation des communautés procaryotiques impliquées dans la bioremediation d'un sol pollué par des hydrocarbures et développement d'outils d'analyse à haut débit .These de doctorat , spécialité : Genomique et ecologie microbienne.HAL Id: tel-00718551.np 8.

[10] : Ali Ahmed S.2011.Essai de réhabilitation d'un sol contaminé par les hydrocarbures à l'aide de tensioactifs obtenus par voie biologique.[www.dspace.ensa.dz](http://www.dspace.ensa.dz). Consulté juiet 2020.

[11] : Khodja M.2008.Fluide de forage :Etudes des performances et considérations environnementales.Institut national polytechnique de toulouse.288.

## Références bibliographiques

---

- [12] : Ramirez P.2000.Wildlife mortality risk in oil field waste pito U.S fish and wildlife service region 6 contaminants information bulletin.université USTHB. 8.
- [13] : Dhina O.,Aroun M C.2004.Environmental preservation in oil and gas stream activities in algeria .Difficulties and sustainable development challenge .19<sup>th</sup> world.Energy congress. Sydney Australia 204: 5-9.
- [14] : Atlas R.M.1984.Petroleum microbiology. Edition Macmillan publishing company.685.
- [15] : Scriban R.1999. Biotechnologie. 5ème Edition, TEC&DOC Paris.96-865.
- [16] : Rapport national sur l'état de la biodiversité pour l'alimentation et l'agriculture en Algérie. [www.Fao.org](http://www.Fao.org). Consulté en juin2020
- [17] : Dépollution des sols. [Assainissement.ooreka.fr](http://Assainissement.ooreka.fr). Consulté en juin 2020.
- [18] : Mougin C, Chaplain V, Gaillardon P, Sohier L, Mercier R.,Sigoillot J.C, Laugero C, Asther M.1996.Le traitement biologique des sols pollués par des composés organiques l'intérêt des champignons filamenteux. Courrier de l'environnement, de l'INRA. article.28(28) :49-56
- [19] : Costesj M.,Druelle V.1997.Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement: La réhabilitation des anciens sites industriels. Article de la revue de l'institut français du pétrole.52(4) : 425-440
- [20] : Charbonneau S, Corriveau J.,Lallier C, Maillefort L.2017.Étude de cas Traitement des sols contaminés aux hydrocarbures pétroliers. Dans le cadre du cours Génie environnemental GCH 532.Université de Sherbrooke.
- [21] : Roudier P. 2015. Techniques de réhabilitation des sites et sols pollués. Fiches de synthèse [Technique de l'ingénieur.C5582v1](#).

## Références bibliographiques

---

- [22] : Roth E, Fabre B, Gunkel P.2005.les techniques mises en œuvre pour le traitement des sols pollués par les isomères et les résidus de l'hexachlorocyclohexane (HCH). Revue bibliographique. Déchets science et techniques. (38) :8-14
- [23] : Picard R.2015.Traitement des sols contaminés aux hydrocarbures C10-C50 et aux métaux lourds Cu Pb, Zn. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique de Montréal.
- [24] : HAEMERS J, Odile SIMONNOT M, 2018.Traitement des sols par désorption thermique conventionnelle. Article à partir du site internet [technique de l'ingénieur](#).
- [25] : Duchesne A.2013. Recommandation pour la réhabilitation des sols contaminés d'un ancien site de traitement du bois. Thèse de doctorat. Université de Sherbrook.
- [26] : Rapport de fin de traitement d'ourhoud. Traitement des sables pollués. Contrat N° C13/16 23636-992
- [27] : Cherid S.1995. Biodégradation des hydrocarbures. Technique de bioréhabilitation, Ed Elseviers, Amesterdam.431.
- [28] : Lecomte P.1998. Les sites pollués : Traitement des sols et des eaux souterraines, 2<sup>ème</sup> éditions.Lavoisier Paris.130-160.
- [29] : Gaudu F.2014.bioremediation des sols pollués au hydrocarbures : les hydrocarbures aromatiques et les alcanes.Université de rennes 1. 9-15-16.
- [30] : Soltani M.2004.Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram-négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat de l'université de Paris 6. Spécialité chimie analytique.284.
- [31] : Bartha R, Atlas R.M.1977. The microbiology of aquatic oil spills. Advances in Applied Microbiology.22: 225-266.
- [32] : Floodgate D.F.1984.The fat of petroleum in the marine ecosystems. In: A.W. Bourquin and P.H. Pritchard (Eds.).Proceeding Workshop.Microbial degradation of

## Références bibliographiques

---

pollutant in marine environment. EPA-660/9-79-012. Environmental research Laboratory, Gulk-Bruze, Flor.

[33] : Yamada-Onodera K, Mukumoto H, Katsuyama Y, Tani Y.2002. Degradation of long chain alkanes by a polyethylene- degrading fungus, *Penicellium simplicissimum* YK. Enzyme and Microbial Technology article. 30(6): 828-831.

[34] : Champagnat A., Adrian J.1974.Pétrole et protéines.Ed Doin.19-40.

[35] : Vandecasteele J.P.2005. Microbiologie pétrolière : Concepts implication environnementales, Applications industrielles, Ed Technip.Vol 1.np 412. Vol 2.516786.

[36]: Pelmont J.2005. Biodégradations et métabolismes : les bactéries pour les technologies de l'environnement, Ed EDP Science.798.

[37] : Leahy J.G, Colwell R.R..1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment Microbiological .Reviews 54:305-315.

[38] : Cooney J.J.1986. The fate of petroleum in freshwater ecosystems, in petroleum microbiology. R.M. Ed Atlas, mémoire de master 2 université de boumerdes.30.

[39] : Leclerc H, Mossel D, Bernier J.J.1995. Microbiologie générale : la bactérie et le monde bactérien, Ed Doin, paris.université de bouberdes.38.

[40] : Rosenberge E, 1993. Exploiting microbial growth on hydrocarbons, New market. TIBTECH.trend in biotechnology article.11(10): 419-424.

[41] : Berwick G.1984. Physical and Chemical condition of microbial oil degradation; Biotechnology, Bioenergy.1294-1305.

[42] : Ballerini D.1999. Traitements biologiques des sols : technique de l'ingénieur, traité de l'environnement. G 2 620.1-6.

[43] : Photographie du principe bioventing et du biosparging.[Selecdepol.fr](http://Selecdepol.fr). Consulté en septembre 2020.

## Références bibliographiques

---

- [44] : Vogel T.M.1998.bioremediation des sols. Technique de l'ingénieur.traité de génie des procédés.RF :J3982.
- [45] : Colombano S.A, Saada V, Guerin P, Bataillard G, Bellenfant S, Beranger D, Hube C, Blanc C, Zornig I.2010. Quelles techniques pour quels traitement -Analyse coût – bénéfices.Rapport final BRGM-RP-58609-FR.
- [46] : Vavasseur A, Richaud P, Misson-Pons J.2009.Des plantes pour dépolluer ou stabiliser des éléments toxiques dans les sols et les eaux. n p.38.Article extrait du site [toxcea.fr](http://toxcea.fr). consulté en septembre 2020.
- [47] : Passage extrait du site : [www.enviro.wiki](http://www.enviro.wiki).consulté en septembre 2020
- [48] : Passage extrait du site : [grtr.gov](http://grtr.gov). Consulté en septembre 2020.
- [49] : Passage extrait du site : [gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca](http://gost.tpsgc-pwgsc.gc.ca). Consulté en septembre 2020.
- [50] : Semer S. 2014.Bioaugmentation fongique des boues activées élimination carbamagépine .thèse de doctorat Université de rennes 1
- [51] : Belley-vezinaV.2014.Vers un traitement durable des sols au Quebec/possibilités et perspectives des traitements in situ des sols contaminés aux hydrocarbures. Essai. université de SHERBROOK .
- [52] : Louati H Ep KHADRAOUI,2013.Etude de bioremediation de sédiments contaminés par des hydrocarbures aromatiques polycycliques :impact écologique sur la Microflore et la micro faune de la lagune de Bizerte, Thèse de doctorat, université de MontpellierII.
- [53] : Tribedi P, GoswamiM, Chakraborty P, Mukherjee K, Mitra G,Bhattacharyya P, Dey S.2018. Bioaugmentation and biostimulation: potential strategy for environmental remediation.Mini review, journal of microbiology experimentation.university of india, 6(5):223-231. DOI10.15406/jmen.2018.06.00219.
- [54] : Lounis S, Daoud I.2005. Analyse microbienne et physico-chimique des sols contaminés par les hydrocarbures à Hassi-Messaoud. Mémoire ingénieur d'état.

## Références bibliographiques

---

- [55] : Esnault-File A, Soyez B.A .2006.le confinement des sites pollués. Article extrait du site technique de l'ingénieur. Consulté en Août 2020 .
- [56] : Simonnot M.,Croze V.2008.Procédés de traitements physiques et chimiques des sols pollués. article à partir du site internet technique de l'ingénieur.
- [57] : GMEP, dépollution des sols. Extrait du site internet www.hellopro.fr .consulté en septembre 2020 .
- [58] : Site internet environnement. Brussels.consulté en Août 2020.
- [59] : Bouras O .pollution du sol.Cours master 2 .
- [60] : La phytostabilisation.www.hawaii.edu. Consulté en septembre 2020.
- [61] : Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution et des mesures constructives extrait du site internet : www.selecdepol.fr. Consulté en septembre 2020.
- [62] : la phytoremediation,ou comment soigner le sol par les plantes . Site internet Reflexions.uliege.be. Consulté en aout 2020.
- [63] : photographie montrons la technique de fonctionnement du landfarming provenant du site internet: Researchgate.net. Consulté en aout 2020.
- [64] : dictionnaire environnement site internet actu-environnement.com. Consulté en septembre 2020.
- [65] : Dufresne M.2013.Les technologies de traitement des sols contaminés : les quelles sont durable ?. Essai. université de sherbrooke.
- [66] : Rhbal H, Souabi S, Safi M.,Terta M, Arad M, Anouzla A, Hafidi M . 2020.Décontamination des sols pollués par les hydrocarbures.Université Hassan II.
- [67] : Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution et des mesures constructives : le compostage.fiche technique extrait du site www.selecdepol.fr. Consulté en septembre 2020.

## Références bibliographiques

---

- [69] : Saadaoui H, Haemers J, Denecheau P.2013,Utilisation de la désorption thermique pour l'élimination in situ des couches flottantes d'hydrocarbures. Comité technique215.
- [70] : Juc D, Carré J ,Blanchard.M.J.2002, Etude comparative de la faisabilité de biotraitement des sols pollués par des produits pétroliers, revue francophone d'écologie industrielle Déchets.N°27
- [71] : Rahbal H, Souabi.S ,Safi.M, Arad.M, Anouzla.A et Hafid M. 2020. décontamination des sols pollués par les hydrocarbures, scientific study and research. 21(1) : 001-016.
- [72] : Martinez Alvarez L.M, Ruberto L.A.M, Gurevich J.M, Mac Cormack.W.P.2020. environmental factors affecting reproductibility of bioremediation field assay in Antractica, journal of cold regions science and technology.169: 102915.
- [73] : Pulchérie Matsodoum N, Guy valeria Djumyom W, Pierre françois D, Ives Magloire kengne N, Adrian Wanko N.2017. Phytoremédiation de sols pollués par les hydrocarbures-évaluation des potentialités de six espèces végétales tropicales. Revue de science de l'eau.30 (1) : 13-19.
- [74] : Risoul V, RenauldV, Fraysse G.2001.Etude de la faisabilité de la désorption thermique pour les sols pollués par des molecules organiques.déchets- revue francophoned'écologie industrielle-N° 22.
- [75] : Simeon N, Mercier G, Blais J.F ,Ouvrard S ,Cebron A , Leyval C, Goergen J.Let Guedon E.2008.Decontamination de sols pollues par les hydrocarbures aromatiques polycycliques par biodegradation en presence de substrats organiques supplementaires,Rev. genie sci. environ. 7 : 467-479 .
- [76] : Mesbaiah F.Z, Eddouaouda K, Badis A, Chebbi A, Hentati D, Sayadi S, Chamkha M.2016.Preliminary characterization of biosurfactant produced by a PAH-degrading Paenibacillus sp.under thermophilic conditions,Environ Sci Pollut Res.DOI 10.1007/s11356-016-6526-3.

## Références bibliographiques

---

---

[77] : Rafin C, Veignie E., Woisel P , Cazier F .2004.Intret des champignons telluriques dans des processus de bioremediation de sols pollués par des hydrocarbures .déchets- revue francophone d'écologie-N°33.

### ANNEXE I

On peut trouver des hydrocarbures naturels d'origines biogénique( produits par des organismes vivants) dans les tissus de cellules chez certains animaux et plantes par exemple des paraffines (alcane linéaire) dans la peau de certains fruits comme la pomme ou de certaines plantes comme le cactus[8].



**Figure I.1:** Formation des hydrocarbures [29].

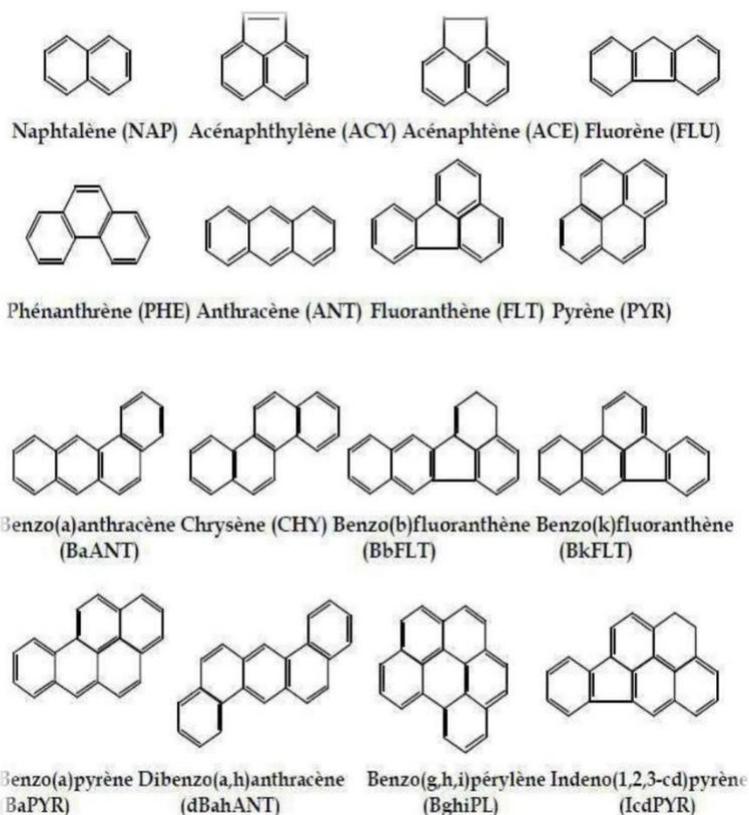
Les pétroles sont des mélanges extrêmement complexes de composés hydrocarbonés on cite trois types d'hydrocarbures :

- **Les hydrocarbures saturés** : constitués d'une part les paraffines normales (linéaires) et les isoparaffines (ramifiés) et d'autre part par les cycloparaffines appelées aussi naphènes .
- **Les hydrocarbures insaturés** : Font parti de la famille des hydrocarbures et sont beaucoup plus réactifs avec eux-mêmes et assez peu réactifs avec la plupart des autres atomes
- **Les hydrocarbures aromatiques** : La famille des hydrocarbures aromatiques comprend les monoaromatiques (benzène et dérivés monoalkylés polyalkylés et cycloparaffiniques ) et les polyaromatiques de 2 à 7 cycles environ ( associés à des hydrocarbures BTEX ou alcanes ) , dont les molécules noyaux condensés constituent essentiellement les HAP qui peuvent contenir en outre des cycles paraffiniques et des groupements alkyles branchés sur les noyaux .

**Tableau I.1:** composition élémentaire des pétroles bruts[8].

Composants	% poids
Carbone	84 à 87
Hydrogène	11 à 14
Soufre	0 à 6
Azote	0 à 1
Oxygène	0 à 8

Aux ETATS UNIS, l'Environnemental Protection Agency (USEPA) a retenu 16 molécules comme polluants prioritaires (on parle donc des 16 HAP de la liste EPA) et 6 HAP retenus dans la norme Européenne relative à la qualité des eaux, sans qu'il soit fait référence à leur proportion dans l'ensemble des HAP.



**Figure I.2** Les HAP constituent une classe particulière au regard de leur persistance et de leurs effets toxiques potentiels sur les organismes vivants et sur la santé humaine due à leur génotoxicité (cancérogénicité) au moins celle reconnue de certains d'entre eux. [8].

La méthode de forage consiste à creuser un trou en utilisant des trépan , le trépan est un outil de forage rotatif et l'avantage principal de cette technique est de pouvoir faire circuler en continu un fluide de forage <<boue>> dans le trépan pour emporter les débris de roches à la surface à l'aide d'un courant ascensionnel , le fluide de forage mélangé avec les débris, passe par le tamisage, dilution et ajout de produits afin de réajuster ses caractéristiques physico-chimiques à leurs valeurs initiales [11], les boues sont réutilisées et les débris sont stockés dans une grande excavation ( borbier) [55].

Les boues de forage sont classées en trois catégories selon le fluide de base utilisé dans leur préparation : l'air, l'eau ou l'huile, on distingue [11].

**Tableau I.2 : Types et spécificités des boues de forage.**

Types de boue de forage	Spécificité
<b>Fluides de forage à base d'eau</b> ("Water-Based Muds" ou WBM)	<p>○</p> <p>Ils sont dans la plupart des cas constitués par des suspensions de bentonites dans l'eau (30 à 60 g/L) (<b>Herzhaft, 2001; Peysson, 2004</b>).</p>
<b>Fluides de forage à base d'huile</b> ("Oil-Based Muds" ou OBM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sont des fluides dont la phase continue est une huile minérale (pétrole brut, fuel, gasoil, etc.), et la phase dispersée est de l'eau, la phase continue la plus utilisée jusqu'à ces dernières années était le gasoil (<b>Lummus <i>et al.</i> 1986</b>).</li> </ul>
<b>Fluides de forage gazeux</b>	<p>○</p> <p>Ce sont des fluides dont la phase continue est du gaz, mélangé avec de l'eau en proportions variables, le gaz peut être de l'air ou du gaz naturel, et peut appartenir à une mousse ou à un brouillard (<b>Abid, 1995</b>).</p>

### ANNEXE II

On distingue plusieurs types de techniques de traitement des sols contaminés par les hydrocarbures dans les quelles on retrouve les différents procédés.

On peut classer ces techniques en trois grandes familles :

1) **Le traitement par confinement :**

Le confinement consiste à isoler la terre à dépolluer grâce à une barrière étanche (généralement géomembrane) [37].

Cette technique de réhabilitation des sites pollués permet de stopper la propagation des polluants dans les nappes souterraines, elle se décline en trois types, le confinement de surface, le confinement vertical et le confinement horizontal profond, il s'applique donc à une problématique de nappes polluées ou l'on cherche à contrôler le vecteur de propagation des polluants [6].

La technique de confinement consiste à empêcher toute pénétration d'eau par l'extérieur et à limiter toute migration de vapeurs du milieu pollué vers l'extérieur grâce à la couverture étanche rendant la surface imperméabilisée [57].



**Figure II.1:**travaux de confinement d'un site pollué [58].

### 2) Le traitement ex-situ

C'est le traitement des terres excavées, dit ex situ, ce type de traitement se fait sur site après l'excavation du sol «on site», ou bien on site «off site» si le sol excavé est évacué vers un centre de traitement approprié ou une décharge contrôlée.

L'excavation est pratiquée pour tous types de contaminants. Ce procédé est souvent utilisé pour supprimer une source de pollution ou résoudre une contamination difficilement traitable par d'autres techniques (contaminants récalcitrants, par exemple) [59].

L'excavation s'applique aux contaminations peu profondes (typiquement 5 mètres de profondeur). Il est possible d'excaver plus profondément mais le coût et la durée de chantier s'en trouvent considérablement augmentés [21].

Basée sur le même principe d'excavation que la technique « off site », la méthode « on site » permet, en effet, de limiter les coûts et l'impact environnemental de l'assainissement.

### 3) Technique de traitement in-situ

C'est le traitement sur site sans excavation, il s'agit d'extraire les polluants par des techniques bien précises, puis de traiter éventuellement la nappe polluée par pompage, épuration en station locale et réinjection de l'eau épurée.

Une étape de stabilisation physique viendra de suite pour compléter les opérations, une neutralisation chimique des terres et un traitement biologique activant la dégradation biologique des résidus [17].

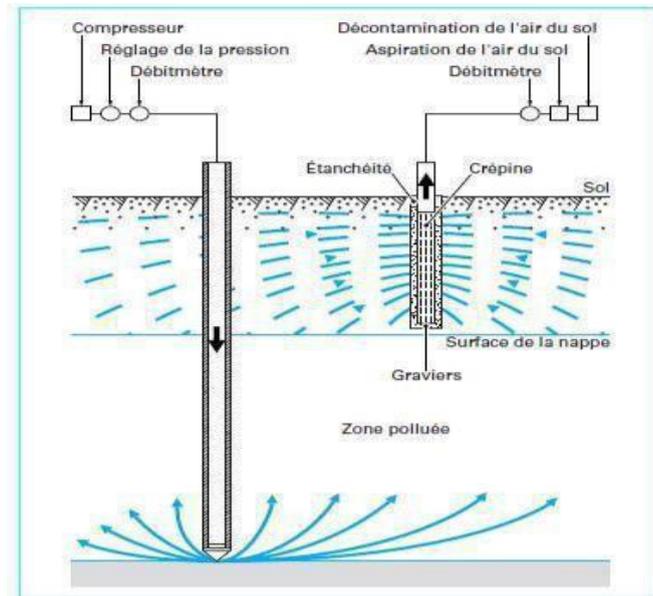
Le sol est laissé en place. Le polluant est soit extrait et traité en surface, soit dégradé dans le sol ou encore fixé dans le sol. Les eaux peuvent être également traitées in situ [37].

On fait appel au traitement in situ pour traiter les sites pollués construits ou encore en activités ou quand la pollution est profonde ou s'étend sur de grandes surfaces, ces éléments faisant que l'excavation des terres est rendue impossible et/ou trop coûteuse [43].

- Air sparging : ou barbotage in situ, c'est une technique utilisée depuis des dizaines d'années dans le cas où le sol présente une géologie simple.

C'est un procédé permettant de traiter localement la zone saturée (dissoute, adsorbée)[57].

Le air sparging est basé sur l'injection de gaz, plus souvent de l'air à forte pression, Cette injection a lieu au-dessous du niveau de la nappe d'eau souterraine à traiter. Ensuite, l'air se propage à travers la zone saturée ZS en créant des canaux d'air [60].



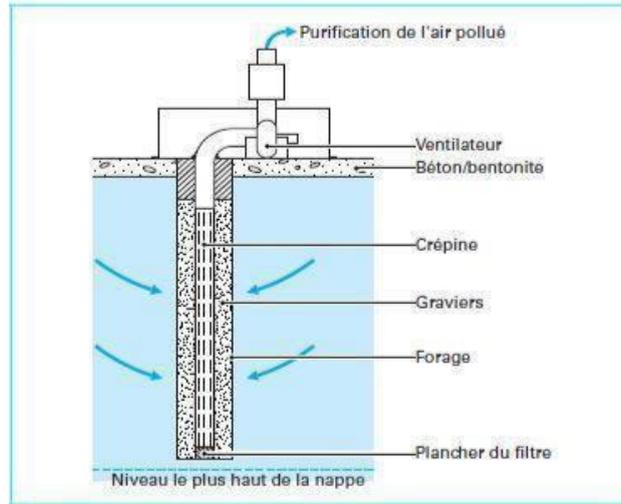
**Figure II.2 :** principe du air sparging[60].

- Venting : ou soil vapor extraction, cette technique s'intéresse à l'extraction de l'air du sol pollué par des contaminants volatils comme le benzène et les hydrocarbures.

Le venting est la technique la plus utilisée et s'applique le plus souvent pour la réhabilitation de sites pétroliers ou pétrochimiques (stations essence, dépôts, stockages...), Cette technique consiste à mettre en dépression la zone insaturée et à induire des circulations d'air centrées sur et en direction de chaque point d'extraction.

Les vapeurs sont récupérées dans les points d'extraction sous vide et éventuellement traitées en surface [57].

Il existe deux variantes de venting basées sur le même concept mais visant à accroître l'efficacité de l'extraction des polluants : le venting thermique par injection de l'air et le venting électrothermique.



**Figure II.3** : principe du venting[60].

#### **4) Méthodes d'immobilisation de la pollution dans le sol**

Les méthodes d'immobilisation consistent à empêcher le transfert des polluants vers les autres compartiments du milieu naturel, sans pour autant les dégrader [57].

Ces méthodes consistent à prévenir la propagation de la pollution, à réduire la mobilité des polluants dans le sol traité et donc à réduire les risques pour l'environnement.

Parmi les techniques connus dans le monde on distingue : la solidification, la stabilisation par traitement chimique, immobilisation par procédé physique et vitrification.

#### **Les avantages et les inconvénients de la méthode de désorption thermique :**

Ce processus de désorption par chaleur indirecte est conçu pour être polyvalent et robuste à la fois, il apporte beaucoup d'avantages :

- Assainissement complet et recyclage des boues;
- Possibilité de récupération des phases fluides;
- Traitement de nombreux polluants notamment les composés semi-volatils et peu volatils ;

- Traitement des sols fortement pollués par les hydrocarbures ;
- Technique efficace même pour des sols argileux et hétérogènes ;
- Traitement sur site possible grâce à des unités mobiles ;
- Solution de décontamination rapide ;

En parallèle cette méthode présente assez d'inconvénients et de facteurs limitant sont les suivants :

- La technique de désorption ne permet pas de détruire les polluants ;
- Le procédé nécessite l'excavation des sols ;
- Le traitement en site nécessite une surface importante ;
- Les rejets atmosphériques doivent faire l'objet d'un traitement poussé et coûteux ;
- Les gaz doivent la plupart du temps être refroidis afin de protéger les unités de traitements en aval ;
- Les débouchés de terres traitées doivent être considérés dès le départ du projet car ils peuvent poser des problèmes non négligeables ;
- Les températures réellement atteintes au cœur de la désorption influent le rendement épuratoire ;
- Les coûts de production de température (coûts d'exploitation) sont souvent importants et sont souvent un frein à l'application de ce procédé ,notamment ceux générés pour la vaporisation de l'eau
- Les particules d'une taille supérieure à 5cm ne sont pas admises :il faudra soit procéder à une ségrégation soit à un broyage ;
- Les sols présentant un taux d'humidité supérieur à 20% doivent faire l'objet d'un prétraitement par chauffage .

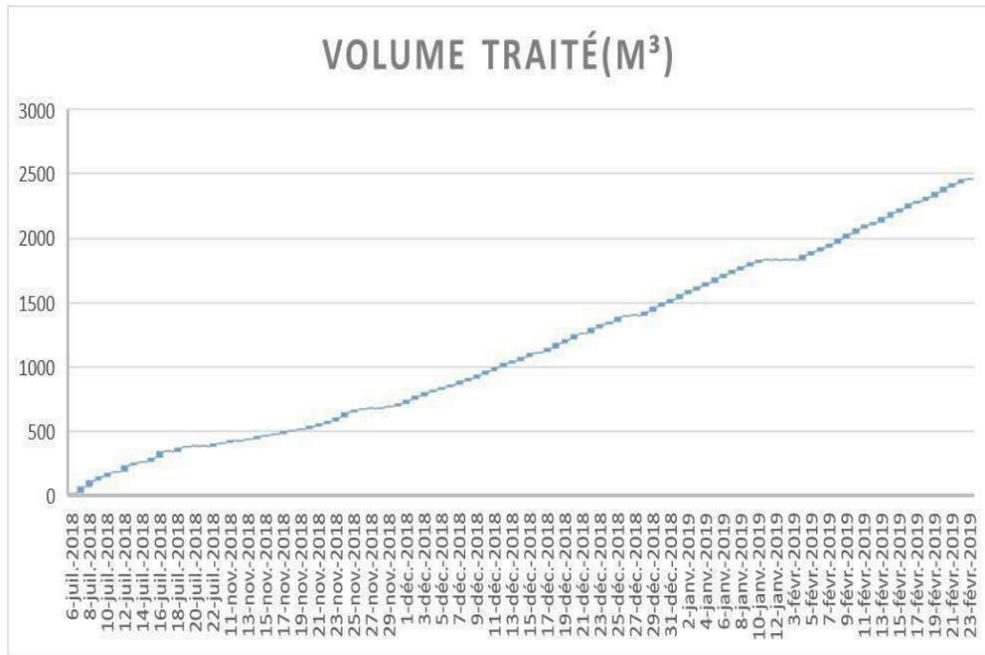


Figure II.4 Graphe volume du sable traité par désorption thermique à Ourhoud [26].



Figure II.5 : Photographie de trois échantillons du sable, non pollué, pollué, et traité par désorption thermique.

### ANNEXE III

De nombreux genres bactériens ont été recensés et décrits comme aptes à dégrader les hydrocarbures [29]:

-Aeromonas ; - Brevibacterium ; - Burkholderia ; - Acetobacter ; Achromobacter ;  
- Acinetobacter ; - Actinomyces ; - Alcaligenes ; - Alcanivorax ; Bacillus ; - Beneckea ; -  
Corynebacterium; - Cycloclasticus ; - Cytophaga ; - Erwina ; Flavobacterium ; - Klebsiella  
; - Lactobacillus; - Leucothrix; - Micrococcus ; - Moraxella ; Mycobacterium; -  
Myxobacterium ; - Nocardia ; - Peptococcus ; - Pseudomonas ; Rhodococcus ; - Sarcina; -  
Serratia ; - Shewanella ; - Spherotilus ; - Xanthomonas .

Les micro-organismes capables d'oxyder les hydrocarbures aliphatiques sont essentiellement des bactéries et diverses levures presentes en abondance dans le sol [36]:

- 1) Les alcanes :** Dans le cas du gasoil , les alcanes à longue chaîne (  $C_{10}$  ,  $C_{20}$  ) sont très bien utilisés par les micro-organismes , plus rapidement que les alcanes moyens [29].Les bactéries capables de dégrader ce substrat appartiennent en particulier aux genres Corynebacterium , Mycobacter et Nocardia , notamment au genre Rhodococcus , mais aussi à des groupes Gram négatifs tels que Pseudomonas et Alcaligenes[35];
- 2) Lies iso – alcanes :** la dégradation des iso – alcanes est habituellement effectué par les bactéries [35], les chaînes ramifiées des iso paraffines sont moins facilement attaquées , et leur caractère récalcitrant augmente avec le nombre de ramifications , et les positions des groupements alkyles[29].

La dégradation des cycloalcanes dans l'environnement est un cas intéressant, de rares souches de Nocardia et Pseudomonas sont capables de le minéraliser directement [35].

La capacité de dégrader les hydrocarbures aromatiques, ne peut pas être clairement assigné à un genre microbien, ceci est du à la présence chez une même souche d'une ou de plusieurs voies cataboliques. Cette diversité microbienne peut être liée à plusieurs facteurs écologiques [35].

Plusieurs formes de phytoremédiation ont vu le jour :

- **La rhizodégradation** : Il s'agit de la dégradation enzymatique de polluants organiques en molécules moins ou non toxiques par les micro-organismes de la rhizosphère, ce processus est activé par la production d'exsudats racinaires qui vont favoriser les activités microbiennes (Phytostimulation ) [47].
- **La phytotransformation ou la phytodégradation** : C'est l'équivalent du processus décrit –ci-dessus, au niveau des parties racinaires et aériennes des plantes , certaines plantes produisent des enzymes (déhydrogénase , oxygénase ,...) qui catalysent la transformation des substances toxiques abordées [47];
- **Phytostabilisation** : Le développement du système racinaire des végétaux et le couvert végétal permettent de réduire la mobilité des contaminants en limitant l'érosion et en diminuant les écoulements souterrains vers l'aquifère [61];
- **La phytoextraction** : Consiste à cultiver sur les sites contaminés des végétaux qui peuvent puiser, accumuler les polluants au niveau de leurs tissus aériens, cette méthode semble plus efficace pour réhabiliter les sites contaminés, néanmoins elle peut être limitée par plusieurs facteurs comme la biodisponibilité des polluants, le prélèvement par la racine, la mobilité à travers la plante et l'efficacité du stockage et de la détoxification au niveau de ses parties aériennes [62];
- **La phytovolatilisation** : en association entre certaines plantes avec leur microflore rhizosphérique la phytovolatilisation permet d'accélérer la volatilisation du polluant des sols, comme par exemple du mercure et du sélénium [47];
- **La phytostimulation** : connu aussi par la biodégradation améliorée de la rhizosphère , elle permet la décomposition des contaminants organiques dans le sol via à une activité microbienne accrue dans la zone racinaire de la plante ou la rhizosphère , l'activité microbienne est stimulée dans la rhizosphère de plusieurs manières tel que utiliser des composés comme les sucres , glucides, acides aminés ...etc . Cette méthode est utile pour éliminer les contaminants organiques ( pesticides , HAP ...etc ), mais cette technique mise en œuvre doit s'appliquer pour un niveau de profondeur de la contamination faible [63].

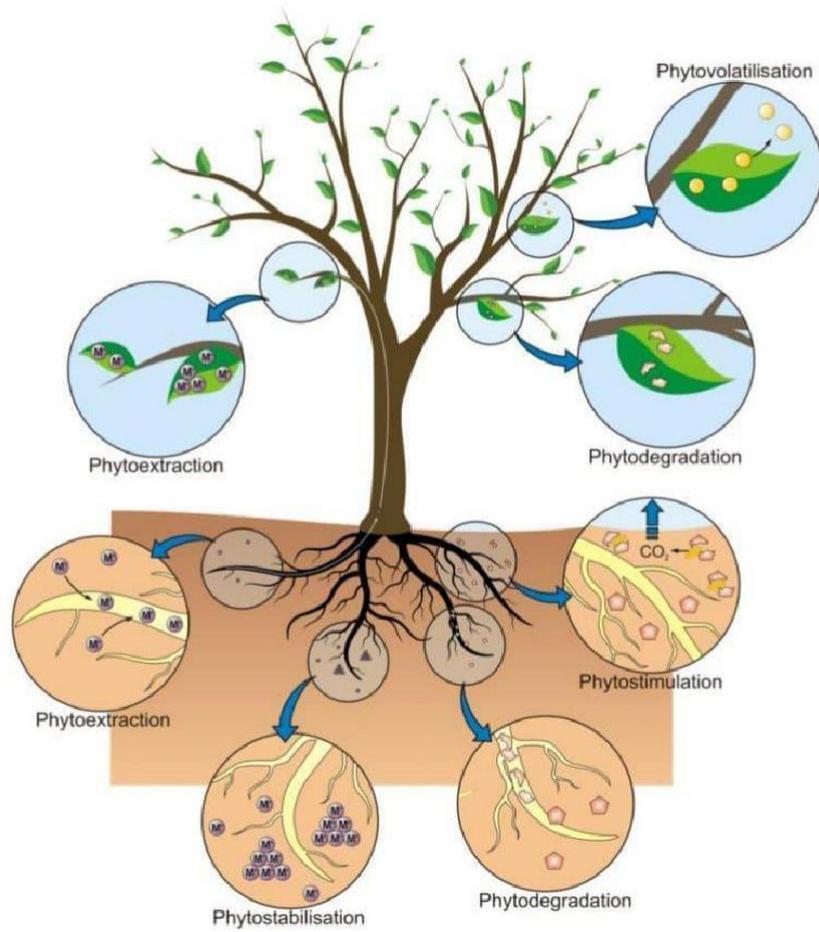


Figure III.1 :Représentation schématique des différents types de phytoremédiation[63].

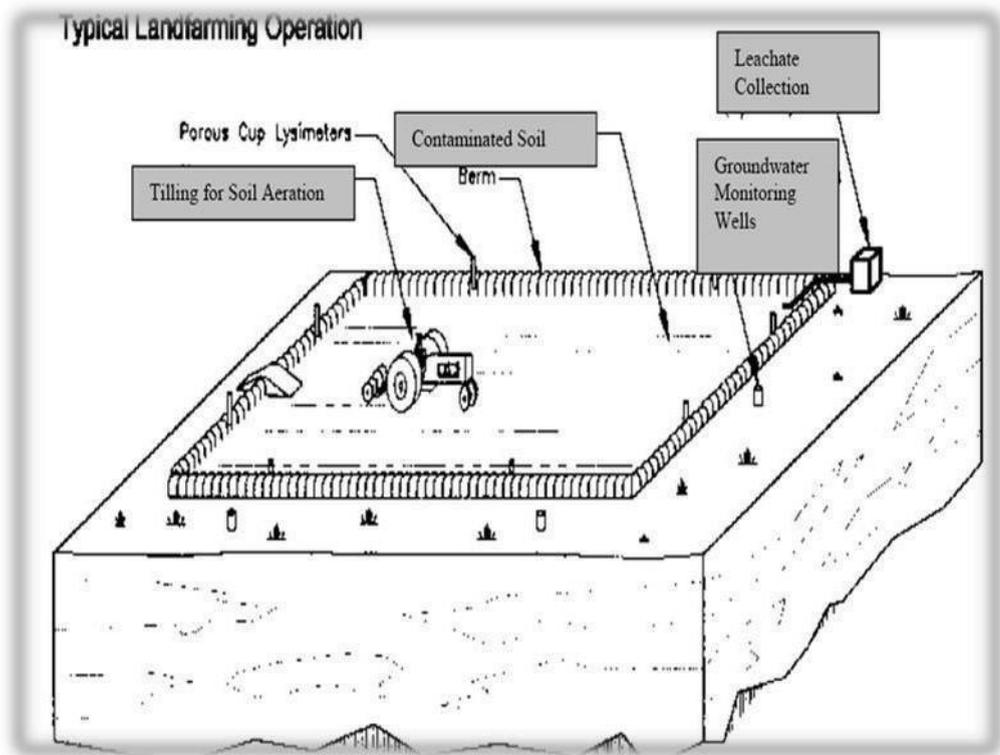


Figure III.2 : technique de fonctionnement du landfarming[64].

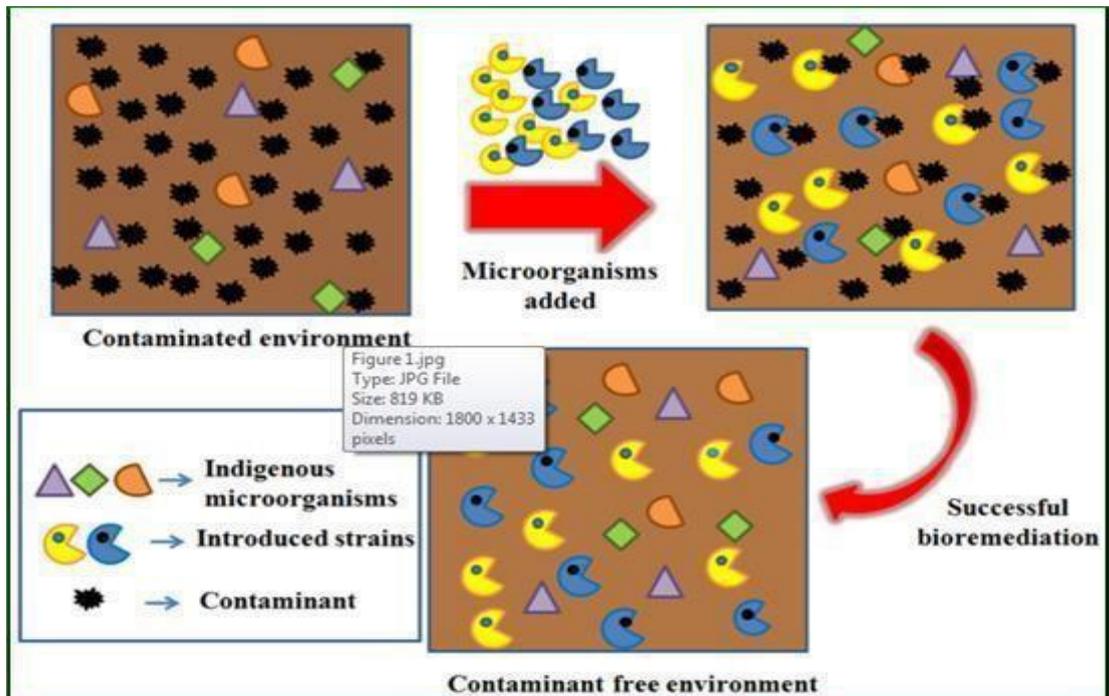


Figure III.3 : Technique de bioaugmentation [54].

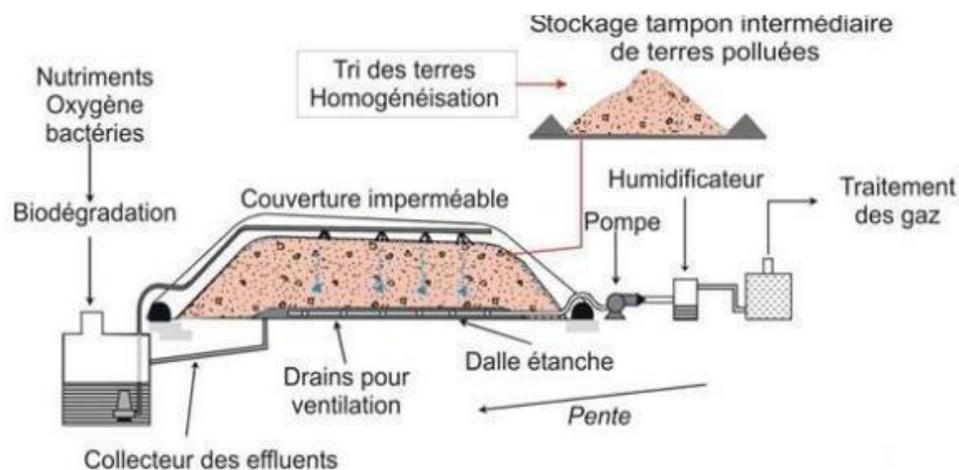
### Le Biotertre (Biopile)

C'est une technique de traitement de sites et sols pollués : c'est la mise en tas du sol puis en son traitement biologique par bioaugmentation ou biostimulation [66].

Elle consiste à réduire la concentration des constituants pétroliers dans les sols excavés par biodégradation, en impliquant une méthode de collecte et transfert des sols contaminés vers un site mis en place afin de stimuler l'activité microbienne aérobie par l'aération et/ou l'ajout de minéraux, de nutriments et d'humidité[66].

Les sols contaminés excavés sont traités dans une installation spécifiquement conçue pour le traitement. L'installation peut se situer sur le terrain même ou dans un centre spécialisé. Les sols excavés sont la plupart du temps recouverts d'une membrane imperméable (géomembrane)

Les lixiviats ainsi que les rejets atmosphériques créés par la dégradation des polluants sont récupérés et traités avant d'être rejetés dans l'environnement. Tel que présenté sur la figure, plusieurs équipements sont requis pour effectuer ce traitement [67].



**Figure III.4 :** Technique de traitement par Biopile [66].

### Le composte

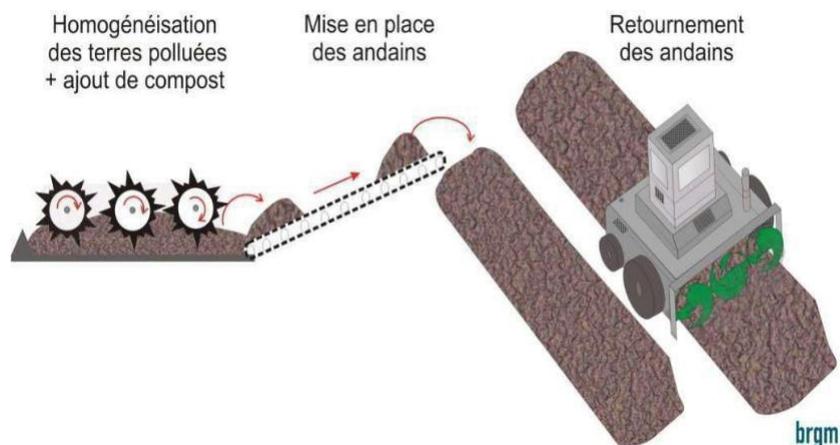
C'est un procédé ex situ qui consiste à mélanger des terres contaminées avec un composte adapté à fin de favoriser la dégradation des contaminants et de matières organiques naturelles xénobiotiques qui peuvent être d'origine animale ou végétale.

La technique de compostage est basée sur trois points principaux [21]:

- le besoin de structurant pour mieux aérer le sol,
- les besoins en nutriment des micro-organismes,
- la croissance des micro-organismes.

Le compostage peut aider dans la dégradation des hydrocarbures, c'est un processus contrôlé, de dégradation des constituants organiques, par une succession de communautés microbiennes évoluant en condition aérobiques et entraînant une montée de température.[67].

Certains compostes ne fonctionnent pas de manière identique, dont leur nature varie énormément en qualité, enfin, certains ont des actions spécifiques. Cette technique est souvent utilisée pour les sols contaminés par des hydrocarbures [21].



**Figure III.5** : Principe du compostage[68].