

**UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA**  
**FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE**  
**DEPARTEMENT DES SCIENCES BIOLOGIQUES**



**Projet de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme de**

## **Licence**

**Domaine** : Sciences de la nature et de la vie

**Filière** : Biologie

**Spécialité** : Microbiologie fondamentale et appliquée

### *Thème*

# **Les méthodes de traitement des sols pollués par les hydrocarbures pétroliers**

**Présenté par:**

**ABBIA Sabrina.**

**GUITOUN Loubna**

**Encadreur : M<sup>lle</sup> BOUDERHEM Amel Maitre assistante B U.K.O.Ouargla**

**Examinatrice : M<sup>me</sup> BENAISA Atika Maitre assistante B U.K.O.Ouargla**

**Année universitaire : 2013/2014**

## Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions Dieu « Tout Puissant » de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens à fin de pouvoir accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions chaleureusement Mademoiselle BOUDRHEM Amel maître assistante, chargé de cours à l'université de Kasdi Merbah-Ouargla d'avoir proposé ce thème et accepté de nous encadrer et pour son aide, ses orientations, ses conseils et ses corrections sérieuses pour ce travail.*

*Nous tenons à remercier Mme BENAÏSSA Atika doctorante à l'université Kasdi Merbah-Ouargla a acceptée d'examiner notre travail.*

*Nous remercions également les personnels de la bibliothèque.*

*Nous devons une mention particulière à Mr. BENSASSI, Mr. HAMDI Aïssa, M<sup>me</sup> KHELAF S, pour tous leurs conseils.*

*Nous remercions tous nos amis en particulier les étudiants de l'option de Microbiologie.*

*Enfin, un grand merci, à toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# DÉDICACES

Avant tout je remercie **ALLAH** pour les tout .

**Je dédie ce modeste travail :**

A mes très chers parents **MAMAN** et **PAPA** sources de tendresse et la force de courage d'étude.

Je vous remercie d'être toujours à mes coté de me soutenir ,aimer,protéger et pour tous ce que vous avez fait pour moi.

**A mes chères frères et ma sœur:**

**HAYAT** et ses petites filles **JOUMANA,WAFA**

**ELAIDE**

**ADEL**

**MOUNIRE**

**ABD ALHAKIM**

**A mes meilleurs amis:**

**KELTOUM**

**LOUBNA**

**BASMA,SABRINA,SALIMA,SHOMAYSA,NAIMA,KANZA,LATIFA,FATIMA,SABAH,,  
MASOUDA, IKRAM,MBARKA, KHAWLA , IMANE.**

**A tout les famille:**

**ABBA**

**BENMOUFFOKI**

**KAUDJA**

**A tout la promotion de MICROBIOLOGIE 2013/2014.**

**A tout les enseignants(e) et les étudiants(e) de L'ITAS .**

*Sabrina*

## Dédicaces

*Je dédie ce mémoire :*

*A mes très chers parents avec toute ma reconnaissance :*

*A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteins ce niveau et pour ses nombreux sacrifices consentis pour mon éducation et l'affection qui m'ont éclairé le chemin du succès.*

*A mon cher papa qui a su se montrer patient, compréhensif et encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand réconfort ; aucun mot ne peut suffire pour te remercier.*

*A mes sœurs : Hayat, Habiba, Sana, Malika, Fayza, Sadika, Salha.*

*A mes chers frères : Lotfi, Fathi et ses femmes Ilham et chahira, Ahmed, Cherif.*

*Sans oublier BENLMNAOUR Sofiane pour leur aide et surtout leur soutien moral et physique et son fils Ahmed Djad.*

*A celle qui je passe avec elles les bonnes heures et je porte avec elles que les bonnes souvenirs à mes amies intimes : Basma , Sabrina , Keltoum ,Loubna , Amel , Zahra, kawther, Meriem, Soumia ,Lina ,Massouda, Mbarka, Khawla , Imane. Moufida.*

*A toute la famille : GUITOUN.*

*A toute la promotion de Microbiologie 2013/2014.*

*A tous ceux qui me connaissent de loin ou de près.*

*Loubna*

# Liste des abréviations

**HC** : Hydrocarbures.

**HAP** : Hydrocarbures aromatiques polycycliques.

**HCP** : Hydrocarbure pétrolier.

**MO** : Microorganismes.

**pH** : Potentiel d'Hydrogène.

**Ppb** : Partie par milliard.

# Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Structure chimique des hydrocarbures pétroliers (COLOMBANO, 2008).	5
<b>Figure 2</b> : Triangle de la biodégradation(SUTHERSAN, 1997).	7
<b>Figure 3</b> : Famille de techniques de dépollution des sols par lieu de traitement (COLOMBANO,2010).	15
<b>Figure 4</b> :Schéma de principe de la solidification/stabilisation in situ (Mélange mécanique in situ (COLOMBANO,2010).	17
<b>Figure 5</b> :Représentation schématiques d'un pompage et traitement avec injection de tensioactif (COME et DUCREUX, 2001).	18
<b>Figure 6</b> : Schéma de principe du pompage-écrémage (COLOMBANO,2010).	19
<b>Figure 7</b> : Schéma de principe de la désorption thermique ex situ ou on site (COLOMBANO,2010).	21
<b>Figure 8</b> :Présentation des différents types de phytoremédiation(COLOMBANO,2010).	27

# Liste des tableaux

<b>Tableau I</b> ; Synthèse des principaux traitements de dépollution (BALLRINI, 1999 ; COLIN,2000).	27
<b>Tableau II</b> ; Avantage et inconvénients de chaque méthode (GIRARD et al 2005).	28

# Sommaire

<b>Remerciement</b>	
<b>Liste des abréviations</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Hydrocarbures pétroliers</b>	
<b>I.1. Généralité sur le pétrole</b>	<b>2</b>
<b>I.1.1. Définition</b>	<b>2</b>
<b>I.1.2. Origine du pétrole</b>	<b>2</b>
<b>I.2. Hydrocarbures pétroliers</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1. Définition</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2. Classification</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2.1. Hydrocarbures saturés</b>	<b>3</b>
• <i>Alcanes linéaires</i>	<b>3</b>
• <i>Alcanes ramifiés</i>	<b>4</b>
• <i>Cycloalcanes</i>	<b>4</b>
<b>I.2.2.2. Hydrocarbures aromatiques</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2.3. Composés polaires</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2.4. Asphaltènes</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3. Devenir et mobilité des hydrocarbures dans l'environnement</b>	<b>5</b>
<b>I.2.3.1. Evaporation</b>	<b>5</b>

<b>I.2.3.2.. Solubilisation</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.3..Emulsification</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.4..Sédimentation</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.5.Photo-oxydation</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.6.. Biodégradation</b>	<b>7</b>
<b>I.2.4. Toxicité des hydrocarbures</b>	<b>8</b>

## **Chapitre II :Remédiation des sols pollués par les hydrocarbures pétroliers**

<b>I- Pollution</b>	<b>9</b>
<b>I. 1 .Définition</b>	<b>9</b>
<b>I .2. Différents types de pollutions</b>	<b>9</b>
<b>I.3.Pollution des sols</b>	<b>9</b>
<b>I.4.Pollution du sol par les hydrocarbures</b>	<b>10</b>
<b>I.4.1.Origines de pollution</b>	<b>10</b>
<b>I.4.2.Types de polluants</b>	<b>10</b>
<b>I.5.Biodépollution</b>	<b>11</b>
<b>I.5.1.Quatre types de procédés</b>	<b>11</b>
<b>I.6.Biorémediation</b>	<b>11</b>
<b>I.6.1.Organismes effectuant la bioremédiation</b>	<b>12</b>
<b>I.6.2.Organismes utilisés</b>	<b>12</b>
• <b>Bactéries</b>	<b>12</b>
• <b>Champignons</b>	<b>12</b>
• <b>Plantes</b>	<b>13</b>
<b>II. Méthodes de traitement de la pollution de sol par les Hydrocarbures</b>	<b>13</b>
<b>a. In situ</b>	<b>14</b>
<b>b.Sur site</b>	<b>14</b>
<b>c. Hors site</b>	<b>15</b>



<b>II.1.Dépollution par remplacement</b>	<b>16</b>
<b>II.2.Techniques physiques</b>	<b>16</b>
<b>II.2.1.Procédés physiques par piégeage</b>	<b>16</b>
<b>II.2.2.Procédés par évacuation</b>	<b>17</b>
<b>II.2.3. Technique du pompage –écrémage</b>	<b>19</b>
<b>II. 3. Procédés thermiques</b>	<b>19</b>
<b>II.3.1.Incinération</b>	<b>20</b>
<b>II.3.2.Vitrification</b>	<b>20</b>
<b>II.4. Traitements chimiques</b>	<b>21</b>
<b>II.4.1.Méthodes de mobilisation et d'extraction</b>	<b>21</b>
<b>II.4.2. Réactions chimiques</b>	<b>22</b>
<b>II.5.Méthodes biologique</b>	<b>23</b>
<b>II.5.1. Biodégradation par traitement in situ</b>	<b>23</b>
<b>II.5.2.Traitement en réacteur</b>	<b>24</b>
<b>II.5.3. Biotertre et Landfarming</b>	<b>25</b>
<b>II-5-4- Phytoremédiation</b>	<b>26</b>
<b>Conclusion</b>	<b>30</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

# *Introduction*

L'exploitation humaine des gisements de pétrole n'a cessé d'augmenter depuis le début du siècle dernier. L'extraction, le transport, et l'utilisation de cette source d'énergie entraînent des risques de pollution (accidentelle et chronique) pour l'environnement pouvant influencer l'équilibre écologique et parfois entraîner la destruction de l'écosystème (SOLTANI, 2004).

La dépollution des sites contaminés est une préoccupation majeure, en raison d'une part, de l'impact de cette pollution sur l'environnement et la santé, liée notamment à la propagation des molécules dangereuses dans le milieu et leur transfert dans les nappes phréatiques et dans la chaîne alimentaire, et d'autre part des coûts exorbitants engendrés par les projets de réhabilitation qui exigent souvent l'excavation des sols et le transport onéreux des terres vers les installations de dépollution ( GABET,2004).

Les traitements mis en œuvre pour dépolluer les sols sont nombreux et depuis des années déjà, de nouvelles technologies sont en développement. Sur le terrain, les techniques de traitement thermiques et physico-chimiques sont les plus répandues, tandis que les procédés de traitement biologiques sont souvent considérés comme réservés à une catégorie restreinte de composés comme les hydrocarbures pétroliers légers ou adaptés à des conditions particulières.

Le présent travail est un support bibliographique se subdivise en deux parties. Le premier exposé les données relatives aux hydrocarbures (sources, nature, toxicité,...), à leur devenir dans , les sols (dégradation...) suivi par une deuxième partie présentent les différentes techniques de traitement des sols pollués par les hydrocarbures pétroliers.

# *Chapitre I*

## *Hydrocarbures pétroliers*

## I. Pétrole

### I.1. Définition

Le mot pétrole veut dire huile et du latin « Pétra oléum »; c'est le nom donné dans le langage courant à des composés chimiques comportant essentiellement des atomes de carbone (C) et des atomes d'hydrogène (H) que les chimistes appellent les hydrocarbures (R.E .1, 2004). Les pétroles bruts sont des liquides dont la couleur va de l'ombre clair au noir opaque (brut asphalté nique). Ils peuvent être d'un vert fluorescent (paraffiniques) ou bleu (naphténique). La présence de composés sulfureux leur donne une odeur déplaisante (R.E 2, 2006). Leur viscosité varie en fonction de leur teneur en fractions légères. Ils sont hautement inflammables (point d'éclair inférieur à 30°C) leur densité varie entre 0,750 (bruts paraffiniques) (R.E2, 2006). Le pétrole est un mélange complexe d'hydrocarbures, principalement utilisé comme source d'énergie ; il contient des hydrocarbures saturés, à chaînes linéaires, ramifiés ou cycliques, ainsi que des traces de soufre, d'azote, d'oxygène, d'eau salée et de métaux (Fer, nickel). On le trouve en grandes quantités dans des gisements enfouis sous la surface des continents ou au fond des mers (SALLES et DEBYSER, 1976).

### I.2. Origine de pétrole

Il y est mentionné qu'«il y a plusieurs millions d'années, les restes de nombreux organismes marins se sont déposés au fond des océans. Avec le temps, ils se sont accumulés et se sont mélangés à la boue et au limon (le limon est une classe texturale de particules plus petites que le sable) pour former des couches de sédiments riches en matière organique : le kérogène.» Il est concentré dans la roche mère qui est une masse minérale et il a la forme de petits filets, très graduellement, à cause des mouvements des plaques tectoniques qui forment la croûte terrestre, les sédiments s'enlisent dans le sol. Avec l'effet de la forte compression qu'il y a dans les profondeurs, ces strates de sédiments se sont alors métamorphosées en roche. Le pétrole brut se forme lorsque ces couches de sédiments qui épaisissent avec le temps subissent une augmentation de la température causée par les apports de chaleur issus de l'énergie interne de la terre (chaleur géothermique). Suite à ces pressions et à l'élévation de la température, les matières organiques se décomposent en substances plus simples se sont les hydrocarbures. Cette décomposition d'origine géothermique se nomme la pyrolyse. (SALLES et DEBYSER, 1976).

Le pétrole brut est relativement léger. Il peut donc refaire lentement le chemin inverse de celui que les couches de sédiments ont parcouru à travers les couches géologiques poreuses. Ainsi, il a tendance à remonter de façon naturelle vers la surface de la Terre. Quand il rencontre des roches imperméables, il se forme une accumulation sous celles-ci. C'est d'ailleurs ce qui a donné le nom d'origine du pétrole (SALLES et DEBYSER, 1976).

## I.2. Hydrocarbures pétroliers

### I .2.1.Définition

Les hydrocarbures sont des composés organiques contenant exclusivement des atomes de carbones (C) et d'hydrogènes (H) (FRNENNEC et al , 1998).

Le terme « hydrocarbure pétrolier » (HCP) est un terme générique qui désigne les mélanges de composés organiques présents dans des matières géologiques comme l'huile, le bitume et le charbon ou dérivés de ces matières (STANDARDS et PANCANADIENS, 2008).

### I.2.2.Classification

Les hydrocarbures constituent la fraction la plus importante d'un brut pétrolier, ils représentent entre 65 et 95 % de la plupart des pétroles bruts (NEFF, 1979).

Les pétroles bruts sont constitués de différentes familles de composés dont la composition chimique varie énormément selon leur origine géographique et géologique (TISSOT et WELTE, 1984).

Les composés pétroliers peuvent être classés en quatre familles principales qui sont présentés en proportions variables selon l'origine: les hydrocarbures saturés (30 à 70 %), les hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques (20 à 40 %), les composés polaires (5 à 25 %) et les asphaltènes (0 à 10 %) (SOLTANI, 2004) (Figure 1).

Selon (SOLTANI, 2004) Les hydrocarbures pétroliers sont classés comme suit :

#### I.2.2.1. Hydrocarbures saturés

Parmi lesquels, on distingue :

- *Alcanes linéaires*

(*n*-alcanes,  $C_nH_{2n+2}$ ), dont la longueur de chaîne varie de 7 à 40 atomes de carbone, constituent l'une des classes les plus abondantes (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier) (SOLTANI, 2004).

- **Alcanes ramifiés**

Les plus abondants sont les iso-alcanes (groupement méthyle en position 2), les autres composés ramifiés antéiso (groupement méthyle en position 3) ou polyramifiés tels que les isoprénoïdes (exemple: pristane, phytane) sont beaucoup moins nombreux.

Ces composés se trouvent dans le pétrole brut dans des proportions sensiblement égales à celles des *n*-alcanes (SOLTANI, 2004).

Par contre le pétrole brut d'origine fossile ne contient en générale pas d'alcènes (SOLTANI, 2004).

- **Cycloalcanes**

Les cycloalcanes renferment des composés cycliques (à 5 ou 6 atomes de carbone) saturés et le plus souvent substitués. Quelques dérivés polycycliques sont aussi présents et certains d'entre eux tels que les stéranes et les triterpanes sont caractéristiques d'un pétrole brut. Cette famille peut représenter entre 30 et 50 % des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut (SOLTANI, 2004).

### **I.2.2 .2.Hydrocarbures aromatiques**

Les hydrocarbures aromatiques sont des hydrocarbures cycliques polyinsaturés. La présence dans leur formule d'au moins un cycle à trois doubles liaisons conjuguées leur confère des propriétés remarquables (WAUQUIER, 1994).

Plusieurs familles d'hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques dont le nombre de noyaux varie de 2 à 6 sont présentes dans les pétroles bruts. Ces composés sont dominés par des composés mono-, di- et tri-aromatiques (SOLTANI, 2004).

En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier (SOLTANI, 2004).

### **I.2.2.3. Composés polaires**

Cette fraction correspond à des molécules hétérocycliques, telles que:

- Les composés oxygénés: phénols, acides carboxyliques, alcools, aldéhydes,...
- Les composés soufrés: mercaptans, sulfures, disulfures,...
- Les composés azotés: pyridines, quinoléines,...
- Les dérivés soufrés sont dans la plupart des cas plus abondants que les composés oxygénés ou azotés. (SOLTANI, 2004).

### **I.2.2.4.Asphaltènes**

Les Asphaltènes sont des composés de hauts poids moléculaires. Ils sont constitués d'une accumulation de feuillets aromatiques condensés très riches en carbone reliés par

des chaînes saturées. Ces feuilles sont disposés en empilement qui peut acquérir un débit d'organisation graphique. De ce fait, les Asphaltènes se prêtent à des études structurales par diffraction aux rayons X. Isolés, ils forment des solides noirs et brillant insolubles dans les alcanes légers comme déjà mentionné (ROUSSEL et BOULET, 1994 ; TISSOT et WELTE, 1984).

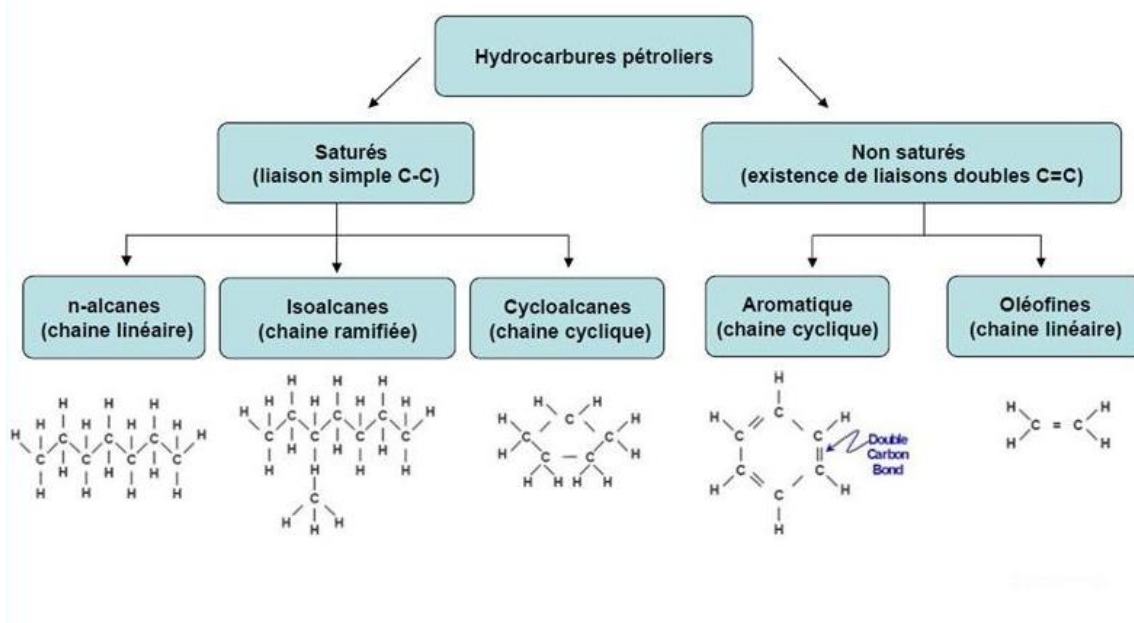


Figure 1. Structure chimique des hydrocarbures pétroliers. Tiré de (Colombano *et al*, 2008).

### I.2.3. Devenir et mobilité des hydrocarbures dans l'environnement

C'est par des processus physiques, chimiques et biologiques qu'un hydrocarbure va pouvoir être déplacé, transformé ou éliminé, après avoir été réparti dans l'environnement. Parmi les différentes altérations que peut subir un hydrocarbure, on citera les facteurs environnementaux qui sont (R.E1, 2004) :

#### 1. 2.3.1. Evaporation

Qui se produit dans les quelques heures qui suivent un déversement. Les fractions de faible poids moléculaires ; les plus volatiles des hydrocarbures déversés se perdent dans l'atmosphère à un taux qui est déterminé par le type d'hydrocarbure ; la vitesse du vent et la température ambiante. La plupart des pétroles bruts déversés perdent jusqu'à 40% de leur volume dans les premières 48 heures alors que les fuels moins lourds ; qui contiennent peu de composés volatils ; s'évaporent très peu ; même après plusieurs jours (R.E1, 2004).



### **1.2.3.2. Solubilisation**

Bien que les hydrocarbures soient des composés insolubles dans l'eau ; certains d'entre eux peuvent partiellement se dissoudre (hydrocarbures aromatiques et hydrocarbures à faible nombre de carbone) (**BERTRAND et MILLE, 1989**).

Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée (**SOLTANI, 2004**).

Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour l'environnement ; ils sont difficiles à éliminer et sont adsorbés par la faune et la flore (**SOLTANI, 2004**).

### **1. 2.3.3.Emulsification**

Deux types d'émulsions peuvent se former :

- Huile dans eau : si la surface de l'eau est turbulente ; les hydrocarbures peuvent se fragmenter en gouttelettes qui ensuite restent en suspension dans l'eau. Ces émulsions facilitent l'élimination des hydrocarbures (**R.E1, 2004**).
- L'eau dans huile appelée « mousse chocolat » Ce type d'émulsion ; que l'on qualifie également d'émulsion inverse ; peut se produire en l'espace de quelques heures ; et contient jusqu'à 90% d'eau .Le résultat est une augmentation de la densité et de la viscosité ; aussi que des volumes à traiter ou à enlever (**R.E1, 2004**).

Les émulsions eau dans huile sont constituées par des hydrocarbures de haut poids moléculaires (**SOLTANI, 2004**).

### **1.2.3.4. Sédimentation**

C'est le passage du pétrole de la surface vers le fond .Ce phénomène concerne les résidus goudronneux constitués de la fraction pétrolière la plus lourde et dont la densité est supérieure à celle de l'eau de mer. (**VANDECASTEEL, 2005**).

La sédimentation conduit à la constitution de haute densité difficilement dégradable par voie naturelle (**VANDECASTEEL, 2005**).

### **1.2.3.5. Photo-oxydation**

Photo-oxydation est observée au niveau de la surface de l'eau ou l'air (oxygène) et la lumière (radiation solaires) sont présents pour la transformation des hydrocarbures. Etant donné la réduction rapide de la diffusion de la lumière dans les couches épaisses

d'hydrocarbures ; la photo-oxydation affecte essentiellement les couches minces ou la surfaces des couches épaisses d'hydrocarbures (BERTRAND et MILLE, 1989).

La photo-oxydation touche plus particulièrement les composés aromatiques qui sont plus photo-sensibles que les composés aliphatiques elle transforme les hydrocarbures en leurs homologues oxygénés généralement beaucoup plus solubles que les hydrocarbures de départ ; mais parfois beaucoup plus toxiques (BERTRAND et MILLE, 1989).

### I.2.3.6. Biodégradation

Biodégradation est le processus naturel le plus important dans la dépollution de l'environnement (SOLTANI ,2004) (Figure 2).

Les microorganismes en sont responsables ; en particulier les bactéries (SOLTANI ,2004).

L'importance de la biodégradation dans l'élimination du pétrole ; les voies métaboliques d'oxydation des hydrocarbures par les bactéries et les paramètres qui peuvent influencer la biodégradation. (SOLTANI ,2004).

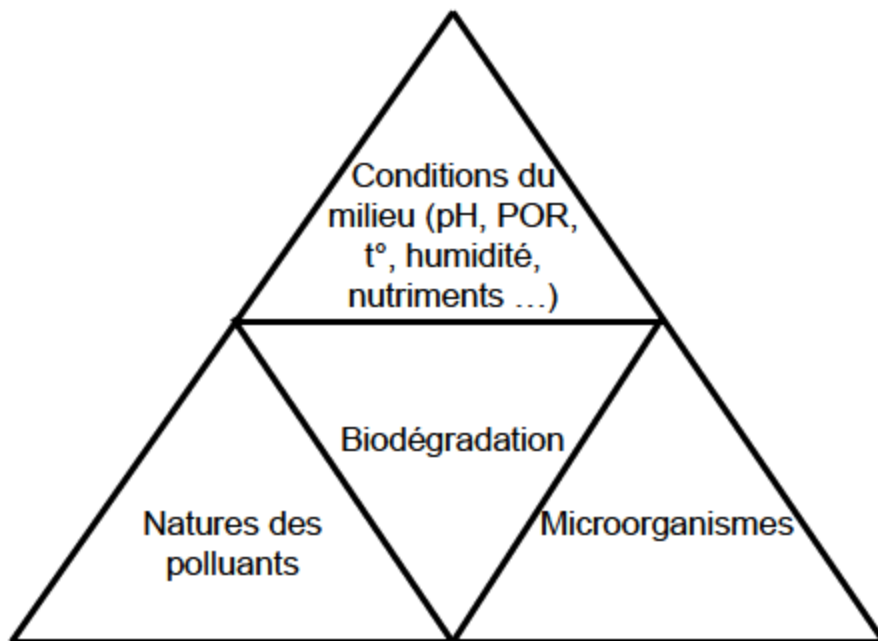


Figure 2: Triangle de la biodégradation (SUTHERSAN, 1997).

**I.2.4. Toxicité des hydrocarbures**

La notion de la pollution est toute relative .On peut considérer qu'il y a pollution par les hydrocarbures lorsque l'action de ceux-ci peut être considérée comme néfaste aux conditions de vie de l'homme directement, ou indirectement si elle affecte les populations animales et végétales qui lui sont utiles (**BRIANT et GATELIER ,1971**).

L'étude de la pollution des hydrocarbures nécessite des dosages très précis:200 ppb d'hydrocarbures dans l'eau sont suffisantes pour altérer son odeur. On constate que 10 ans peuvent s'écouler entre un déversement dans le sol et son arrivée dans une nappe aquifère (**BRIANT et GATELIER,1971**).

## **I- Pollution**

### **I. 1 .Définition**

Il y a des nombreuses définition qui en été données par les experts .Parmi celle-ci nous retiendrons la suivante publiée dans un rapport rédigé par le comité scientifique de la maison blanche intitulé < Pour restaurer la qualité de notre environnement > C'est une modification défavorable du milieu naturel qui apparait en totalité ou en partie comme un sous –produit de l'action humaine ,au travers d'effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux d'énergie .des niveaux de radiation ,de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes .Ces modification peuvent affecter l'homme directement ou au travers des ressources agricoles ,en eau et autres produits biologiques .Elles peuvent aussi l'affecter en altérant les objets physiques qu'il possède ,les possibilités du milieu ou encor en enlaidissant la nature **(EMILIAN K ,2004)**.

La définition de pollution est donc très large et elle permet de comprendre aussi bien des polluants d'origine naturelle que des polluants liés à l'activité humaine (anthropique). **(EMILIAN K, 2004)**.

### **I .2. Différents types de pollutions**

Les classifications des types des pollutions selon le milieu considéré : le sol, l'eau de lacs, les rivières et les mers (l'hydrosphère) **(HAMELIN et al, 2000)**.

- **Pollutions de l'hydrosphère** : les effluents d'une usine, les égouts d'une ville ou pétrolier accident **(HAMELIN et al, 2000)**.
- **Pollutions de l'atmosphère** : est un ensemble encore plus vaste **(HAMELIN et al, 2000)**.
- **Pollution du sol** : les sources responsables de ces pollutions résultent : d'épandage d'engrais, ou de pesticides, décharge publique et les déchets industrielles **(HAMELIN et al, 2000)**.

### **I.3.Pollution de sol**

La pollution des sols et des sous-sols résulte des conséquences des diverses activités humaines (industrielles, agricoles ...) cumulées au cours des temps **(JEANNOT et al ,2001)**.

Ces pollutions négligées jusqu'à une époque relativement récente deviennent aujourd'hui, environnementales et socio-économiques (JEANNOT et al ,2001).

Il y a contamination lorsqu'une telle substance potentiellement dangereuse est introduite artificiellement dans un milieu naturel, qu'elle que soit sa teneur (contaminant). Il y a pollution quand la teneur est potentiellement dangereuse, ou lorsqu'elle atteint les valeurs limites fixées par les normes (valeur guides) (JEANNOT et al ,2001).

On distingue deux types de pollution du sol:

**Pollutions ponctuelles :** dépôt ou épandage de polluants sur une surface restreinte, que l'on peut assimiler à une source (JEANNOT et al ,2001).

**Pollutions diffuses:** épandage ou retombée de sur une grande surface (JEANNOT et al ,2001).

#### I.4.Pollution du sol par les hydrocarbures

L'exploitation des hydrocarbures nécessite et engendre des opération et activités importantes qui perturbent notre environnement provoquant des effets néfastes pour la santé humain. (ARBAOUI et AFFANE, 2005).

Les hydrocarbures consistent les éléments essentiels des pétroles; leurs molécules ne contiennent que du carbone et de l'hydrogène, elles se divisent en plusieurs familles chimiques selon leur structure (WAUQUIER, 1994).

Toutes ces structures sont basées sur le carbone (WAUQUIER, 1994).

Les enchainements moléculaires carbonés -carbone peuvent être : soit réunis par une simple liaison -C-C- (suffixe ANE) soit par liaisons multiples : Doubles C=C (suffixe ENE) ou triples C≡C (suffixe YNE) (WAUQUIER, 1994).

**I.4.1.Origines de pollution :** on distingue deux origines de pollution :

- **Pollutions accidentelles :** ou une grande quantité de polluant est déversée en fonction du temps (déversement ou dépôt ponctuel de polluants).
- **Pollutions chroniques :** dont les effets cumulés peuvent être plus importants que ceux d'une pollution accidentelle (JEANNOT et LEMIERE ,2001).

#### I.4.2.Types de polluants

Les groupes de composés pétroliers polluants pour lesquelles la biodépollution est possible sont :

- Les hydrocarbures pétroliers (gasoils, fuel, kérosène, huiles minérales).

- Les déchets d'exploitation du pétrole (boues et résidus d'huiles goudrons) (**BLIEFERT et PERRAVD, 2004**).

### **I.5. Biodépollution**

Une méthode plus pratique pour épurer les environnements contaminés par des produits dangereux est la biorémediation ou la dépollution biologique (**DAVID, 2005**).

Il s'avère que le traitement des terres polluées se fait majoritairement à l'aide de techniques biologiques qui s'appliquent préférentiellement hors site, dans des installations spécialisées recevant des terres de plusieurs origines. Suivent les techniques de biodépollution des sols in situ puis la biodégradation des polluants des terres mises en andain sur le site. Ces techniques se basent sur le fait que les micro-organismes qui se développent dans un sol pollué y trouvent des conditions favorables et se nourrissent notamment du polluant présent qui est alors dégradé. En modulant des paramètres comme l'oxygène, l'humidité, la température et les éléments nutritifs, la croissance des micro-organismes dépollueurs peut être optimisée. (**DAVID .C, 2005**).

L'ensemble des procédés d'élimination de polluants, organiques ou minéraux, présents dans les milieux naturels par l'action de microorganismes (**DAVID, 2005**).

#### **I.5.1. Quatre types de procédés:**

• **Biodégradation:** Décomposition d'un substrat organique, par action de microorganismes vivants.

• **Bioréduction:** Réduction des composés oxydés (nitrates, oxydes métalliques) par voie biologique

• **Biolixiviation:** Extraction des métaux contenus dans une boue, un sol, un sédiment ou un minerai par solubilisation provoquée par des microorganismes.

• **Biofixation/Biosorption:** "Fixation" de polluants, la plupart du temps, métalliques, présents dans un effluent liquide sur des microorganismes

### **I.6. Biorémediation**

La biorémediation est définie par l'utilisation d'organismes vivants pour détruire les polluants environnementaux.

La bioremédiation est une technique de traitement biologique des sols pollués qui emploie des microorganismes en tant qu'agents de dégradation de la pollution.

La bioremédiation est définie par l'utilisation d'organismes vivants pour détruire les polluants environnementaux. Elle a été appliquée au traitement de contaminations inhabituelles (**PERR, 2001**) par l'activité des bactéries l'action de leur condition de prolifération (**KOLLER, 2004**).

### I.6.1. Organismes effectuant la bioremédiation

L'évolution a permis l'émergence d'une grande variété de micro-organismes présentant des capacités de biodégradation larges et flexibles. Ils peuvent survivre et détruire ou détoxifier des composés chimiques dans une grande variété de niche environnementales (chaleur, froid, PH bas, avec ou sans oxygène, etc.). Les organismes les mieux adaptés pour la bioremédiation sont souvent les espèces indigènes d'un habitat pollué particulier. Les microorganismes indigènes par définition survivent et se multiplient en présence de substances toxiques (**PERRY, 2001**).

### I.6.2. Organismes utilisés

La dépollution de sols contaminés par hydrocarbures en utilisant les microorganismes appelés hydrocarbonoclastes a été mise en évidence dès 1946 par ZoBell (**SOLTANI, 2004**).

Les microorganismes impliqués dans cette biodégradation peuvent être : des bactéries, des archées, des algues ou encore des champignons. On dénombre après un siècle d'études 200 genres de ces microorganismes, représentant plus de 500 espèces et souches décrites (**TERRAT, 2001**).

Depuis cette date le nombre d'espèces bactériennes identifiées possédant cette propriété n'a cessé d'augmenter. En se basant sur la fréquence d'isolement, les genres

bactériens prédominants sont *Pseudomonas*, *Acinetobacter*, *Alcaligènes*, *Vibro*, *Flavobacterium*, *Achromobacter*, *Micrococcus*, *Corynebacteria*, et *Nocardia*. Ces organismes dégradant les hydrocarbures sont ubiquistes (**SOLTANI, 2004**).

#### a. Bactéries

Dans le sol, les bactéries sont les micro-organismes les plus abondants et les plus actifs. En fonction des propriétés physico-chimiques du sol ; tous les types physiologiques bactériens sont représentés dans la microflore tellurique : Autotrophes et hétérotrophes, thermophiles et psychrophiles, aérobies, anaérobies facultatifs et anaérobies très répandus, les actinomycètes jouent un rôle important dans la décomposition de la matière organique. Certaines espèces d'actinomycètes du genre *Streptomyces* produisent la géosmine, un composé volatil qui donne au sol son odeur terreuse caractéristique (**BOUSSEBOUA, 2005**).

#### b. Champignons

Les champignons semblent plus résistants que les bactéries dans les conditions de très faible humidité et sont relativement plus abondants (**SASSON, 1967**).

Les principaux responsables de la dégradation des résidus organique du sol. (SASSON, 1967).

Tels que *Exophiala jeanselmi* (COX et al, 1993) sont également capables de dégrader certains produits aromatiques comme le styrène. Pour des polluants difficilement biodégradables, il peut être intéressant d'inoculer le filtre avec des micro-organismes spécialement adaptés (ERGAS et al ,1994).

### **C. Plantes**

De nombreuses plantes sont capables de fixer dans leurs cellules les métaux lourds, radionucléides, composés organiques polluants et autres produits indésirables; certaines plantes produisent des enzymes qui dégradent ces polluants en des produits moins toxiques ou non-toxiques. Elles peuvent également être accompagnées d'une mycorrhizosphère se chargeant du travail de fixation et / ou de transformation, dont l'étude visant aux applications à l'échelle industrielle est en plein essor. Ces propriétés en ont fait des candidates d'avenir à la dépollution des sols. Les plantes sont aussi sélectionnées selon leur taille et aptitude à faire plonger leurs racines profondément dans le sol, de manière à atteindre les couches polluées profondes (quelques mètres), et selon le type de polluant qu'elles sont capables d'emprisonner ainsi. (COLOMBANO et al ,2010).

En pratique on peut aussi excaver la terre et l'épandre sur une membrane imperméable sous serre, de manière à isoler la matière polluante et contrôler précisément les paramètres influant sur la croissance des plantes sélectionnées. Cela retire toutefois un des bénéfices majeurs de la phytoremédiation, à savoir son coût d'opération peu élevé (COLOMBANO et al ,2010).

L'un des avantages de la phytoremédiation est la possible revalorisation des polluants recyclables, aussi appelé **phytominage**. Ainsi, les plantes dites hyperaccumulatrices, qui stockent le polluant dans leurs tiges et leurs feuilles peuvent être récoltées puis incinérées en vue de récupérer les métaux parmi les cendres et les réutiliser en métallurgie (COLOMBANO et al ,2010).

## **II. Méthodes de traitement de la pollution de sol par les Hydrocarbures**

Les HAP sont connus pour représenter un risque certain pour la santé humaine et les écosystèmes, si leur concentration et leur mobilité sont trop importantes. Afin d'éviter la diffusion des HAP des sites contaminés vers les profondeurs des sols, des mesures doivent être prises en considération .Le choix d'une méthode particulière de dépollution va dépendre, au préalable, de certains paramètres comme le type de polluant et de la variabilité de son comportement (volatilité, adsorbabilité, polarité...), de la diversité des



conditions locales (nature du sol, de la nappe, accessibilité, disponibilité, de surfaces utilisables à proximité, zone urbaine ou non), de voire s'il s'agit d'une pollution récente ou ancienne, de son étendue ou non. En plus, les exigences économiques et administratives sont à préalable, un diagnostic (**BALLERINI et VANDECASTEELE, 1999**).

En fonction de ces différents aspects, trois catégories d'actions peuvent être menées :

- Le confinement qui consiste à isoler la pollution à l'aide d'ouvrages étanches.
- Les méthodes ex situ qui consistent en l'excavation des sols contaminés .On parlera de méthode « hors site » si le sol est évacué vers un center de traitement spécialisé, ou de méthode « sur site » si le sol excavé est redéposé sur le site pour être traité (**Figure 3**).
- Les méthodes in situ pour lesquelles l'opération de dépollution s'effectue sans excavation du sol. Cette option est souvent choisie pour traiter des sites en activité ou lorsque la zone polluée est trop étendue pour avoir recours à l'excavation (**BALLERINI et VANDECASTEELE, 1999**).

#### **a. In situ**

Le sol est laissé sur place, les polluants peuvent être extraits et traités en surface, dégradés dans le sol lui-même ou fixés dans le sol. Les eaux souterraines polluées sont généralement traitées sur place. Cette approche nécessite des techniques de pompage, d'extraction sous vide, de confinement et de lavage. Elle peut mettre en œuvre des biotechnologies (biorémédiation) (**R.E .3, 2012**).

Quelques traitements : ventilation forcée des sols, traitement biologique, stabilisation physico-chimique in situ, confinement in situ, lavage in situ, phytoextraction, phytostabilisation (**R.E .3, 2012**).

#### **b. Sur site**

Les terres et/ou les eaux polluées et excavées sont traitées sur le site au moyen d'installations spécifiques. Une fois traitée, la terre peut être remise en place ou évacuée (**R.E .3, 2012**).

Quelques traitements : traitement biologique par biotertre sur site, ventilation forcée des sols en tertre, lavage sur site, désorption thermique sur site, stabilisation physico-chimique sur site, confinement sur site (**R.E .3, 2012**).

### c. Hors site

Les déchets ou terres polluées sont excavés et évacués vers un centre de traitement ou d'élimination externe (incinération, traitement physico-chimiques, centre d'enfouissement technique). Le coût est élevé (R.E .3, 2012).

Quelques traitements : installation de traitement biologique, installation de stockage de déchets dangereux, installation de désorption thermique, installation d'incinération, lavage de terres, installation de stockage de déchets non dangereux, cimenterie (R.E .3, 2012).

La dépollution peut être mise en œuvre en utilisant les techniques suivantes :

- Techniques physiques.
- Techniques chimiques qui font appel à un principe réactionnel (action d'un solvant, oxydation...) pour transformer le polluant en un composé moins toxique et inerte vis-à-vis de l'environnement.
- Techniques thermiques qui consistent à chauffer le matériel contaminé pour en extraire le polluant et le détruire.
- Techniques biologiques qui favorisent la biodégradabilité de produits (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

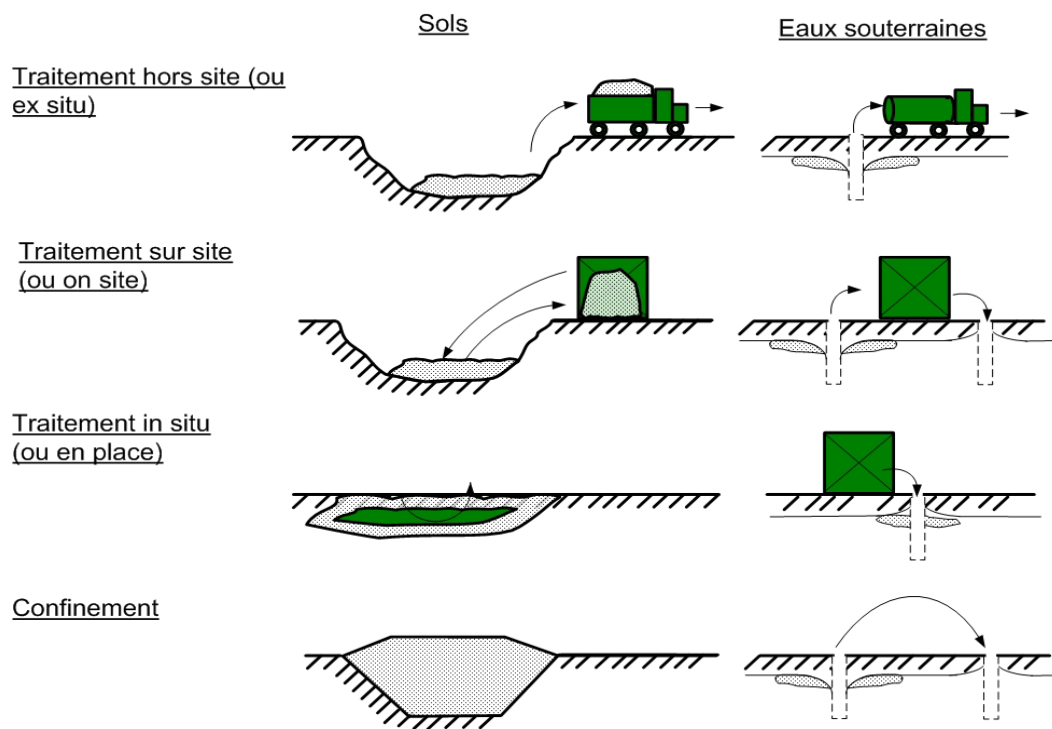


Figure 3: Famille de techniques de dépollution des sols par lieu de traitement.

(COLOMBANO et al ,2010).

### **II.1. Dépollution par remplacement**

Historiquement ; il s'agit de la première méthode employée : on décape le sol contaminé sur toute l'épaisseur polluée et on remplace la terre polluée par la terre saine prélevée ailleurs (**LECOMTE, 1998**).

Outre les coûts de transport que cela induit ; les couts liés au retraitement ou au stockage de la terre contaminée sont proportionnels au volume déplacé ; qui dépend directement de la surface et de la profondeur de la zone polluée (**LECOMTE, 1998**).

### **II.2. Techniques physiques**

Actuellement, elles constituent la majorité des techniques mises en œuvre. On distingue deux types de méthodes : celles par piégeage et celles par évacuation (**AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009**).

#### **II.2.1. Procédés physiques par piégeage :**

- **Le confinement** consiste à isoler la source de pollution à l'aide de matériaux argileux et /ou synthétiques. Ils sont utilisés en couverture, en parois verticales et horizontales, en injections dans le sol ou en enrobage des déchets (encapsulation). En règle générale, le site est recouvert de manière à éviter le lessivage et reste sous surveillance à l'aide de piézomètres (**AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009**).
- **La solidification-stabilisation** s'applique principalement sur des sols excavés. Les polluants sont piégés dans une matrice formant un matériau solide, peu perméable et non réactif. La stabilisation à chaux ou par des argiles est employée pour des pollutions liée à la créosote ou des déversements de pétrole (naufrages de pétroliers). Cette technique est aujourd'hui délaissée au profit de techniques de traitement plus efficaces (**COLIN, 2000**) (**Figure 4**).

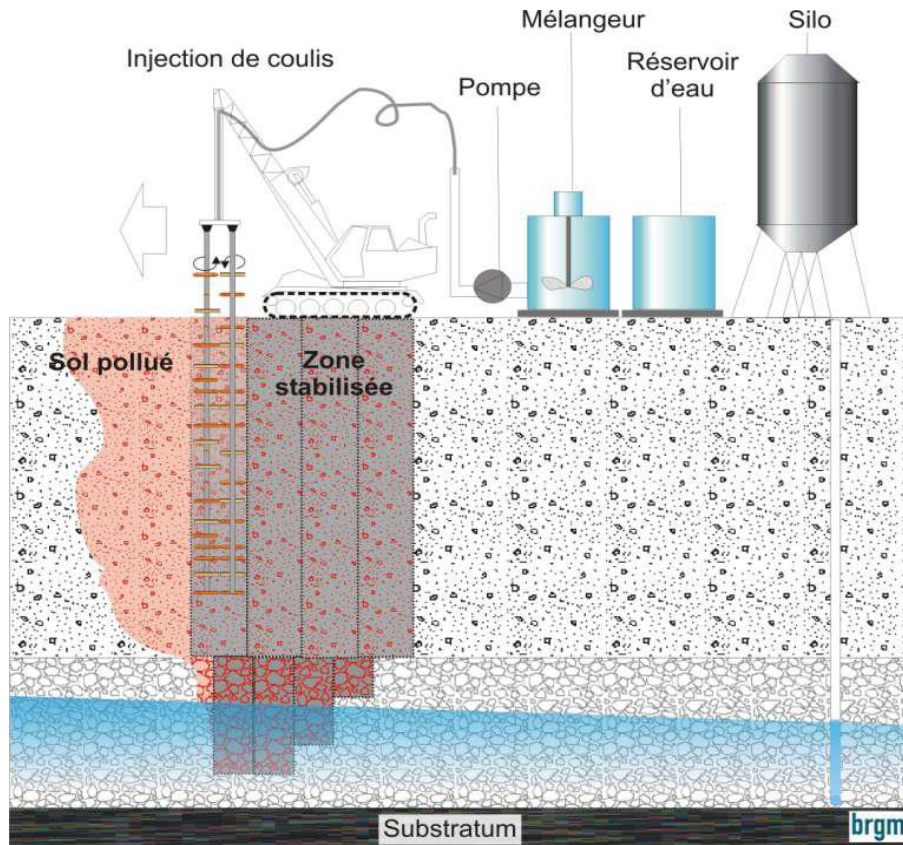


Figure 4: Schéma de principe de la solidification/stabilisation in situ (Mélange mécanique in situ) (COLOMBANO et al ,2010).

## II.2.2. Procédés par évacuation

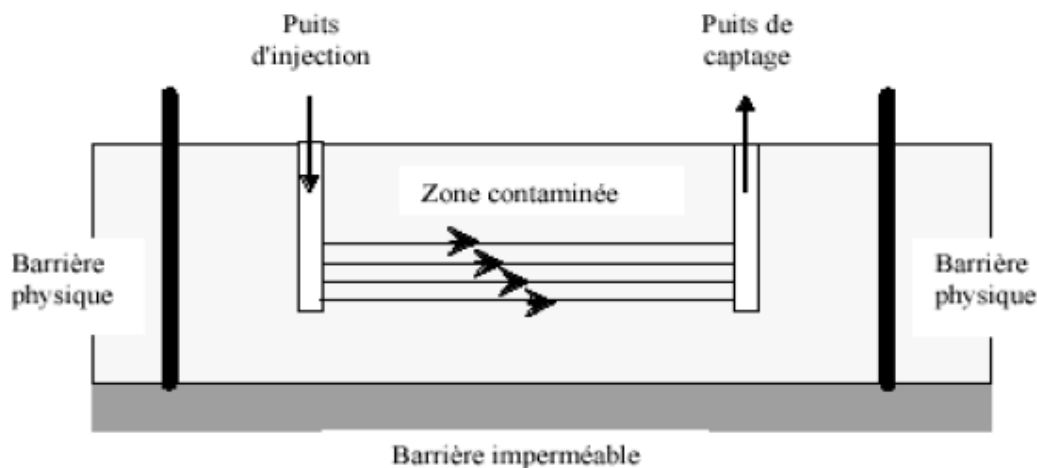
L'**excavation** est la méthode la plus simple à mettre en œuvre et qui permet de supprimer rapidement une source de pollution locale. Généralement, les terres excavées sont acheminées vers un centre de traitement spécialisé ou vers un centre d'enfouissement technique. Un schéma classique de traitement consiste à tamiser le sol à sec afin d'éliminer la fraction la plus grossière (diamètre > 4-5 mm). Ensuite, de l'eau est ajoutée et le mélange sol-eau est homogénéisé puis tamisé en plusieurs fractions (COME et DUCREUX, 2001).

Les sables sont séparés des limons et des argiles. Les polluants se concentrent dans les fractions les plus fines que l'on fait flocculer puis passer à l'épaississeur et ensuite dans un filtre presse pour être finalement traités. Le système fonctionne en circuit fermé. Pour améliorer la récupération des HAP, des tensioactifs sont ajoutés au fluide de lessivage, permettant ainsi la dispersion des polluants dans la phase liquide (COME et DUCREUX, 2001).

Le « **pompage et traitement** » permettent de confiner hydrauliquement la pollution et de procéder à une décontamination en surface de l'eau pompée afin de pouvoir la réinjecter (COME et DUCREUX, 2001) (Figure 5).

Cette technique nécessite souvent l'ajout d'un tensioactif pour favoriser la désorption des HAP (COME et DUCREUX, 2001). En effet, de nombreux auteurs (THIEM et al,1997) ; (LAFRANCE et LAPOINTE, 1998); (BORDAS et LAFRANCE, 2001) .Cette technique reste la plus classique est parfaitement maîtrisée (COLIN, 2000). Les principaux intérêts de cette méthode sont une mise en œuvre assez rapide et une durée de traitement variant de 3 à 18 mois, dans des conditions optimales. Cependant, le risque de dissémination de la pollution peut être important si l'ouvrage est mal implanté, ce qui attirera la pollution vers une zone non contaminée.

Il est possible d'améliorer le « pompage et traitement » en utilisant des conditions techniques différentes. En effet, une étude réalisée par (DADKHAH et AKGERMAM, 2002), a montré qu'il est possible d'utiliser une extraction par injection de vapeur (230 à 270 °C), en la combinant à une oxydation chimique ( $O_2$  ou  $H_2O_2$ ). Les rendements obtenus dépassent largement ceux obtenus avec la technique habituelle, et de plus ; les HAP sont transformés en composés moins toxiques.



**Figure 5 : Représentation schématiques d'un pompage et traitement avec injection de tensioactif (COME et DUCREUX, 2001).**

### II.2.3. Technique du pompage –écrémage

Une autre méthode, est celle du **pompage –écrémage** qui est basée sur le pompage sélectif d'un produit flottant .Cette technique s'applique donc pour des produits organiques en phase flottante au toit de la nappe, comme les hydrocarbures. Cette méthode est en général couplée à un rabattement de nappe (méthode passive à l'aide d'une tranchée ou fossé de drainage, ou méthode active à l'aide de pompes) qui facilite l'écoulement du toxique vers le point de captage (COLIN, 2000) (Figure 6).

L'intérêt principal de cette méthode repose sur l'élimination rapide d'une grande quantité de polluant et, si le rabattement n'est pas trop fort, elle n'induit pas de pollution en

profondeur supplémentaire. Cette technique ne s'emploie pas seul et est toujours couplée à des méthodes permettant de traiter le polluant restant, qui représente en moyenne 50% de la quantité initiale contenue dans le sol (COLIM, 2000). Cet auteur indique que les coûts globaux, hors pompage de rabattement, se situent entre 23000 et 76000 € pour une opération moyenne typique, par exemple une station service.

D'autres techniques, comme l'extraction sous vide et la ventilation (« venting ») existent mais sont peu applicables aux HAP, qui sont peu volatils.

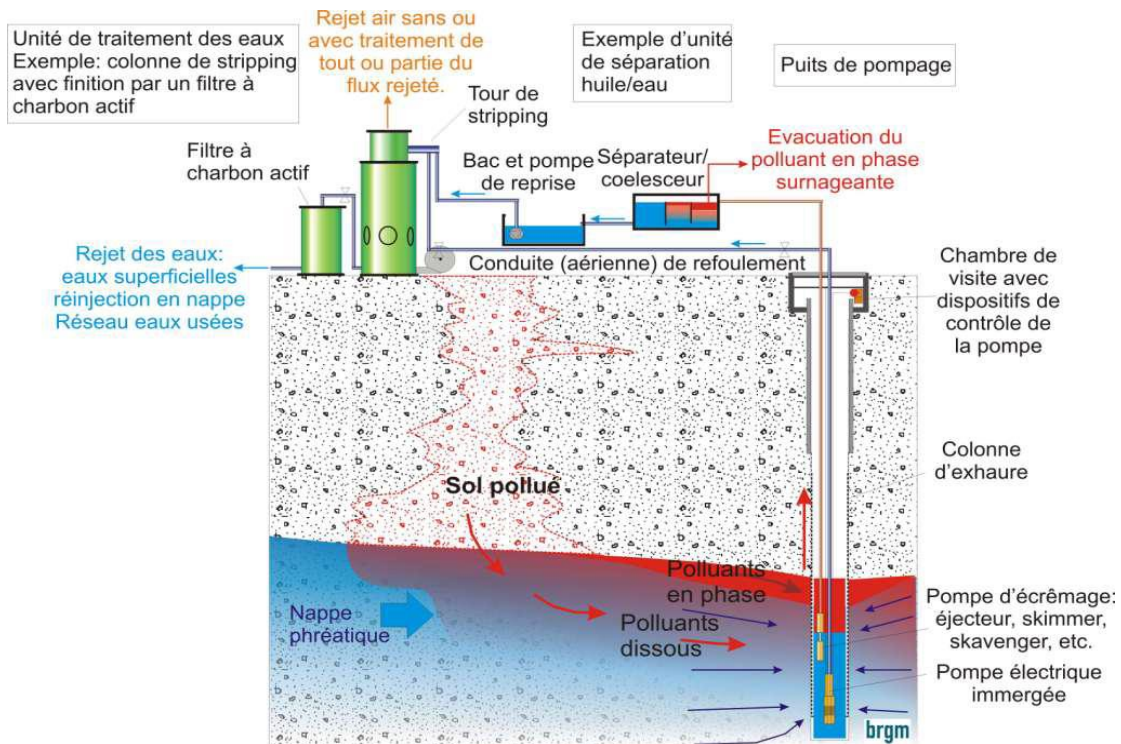


Figure 6 : Schéma de principe du pompage-écrémage (COLOMBANO et al ,2010).

### II. 3. Procédés thermiques

Deux techniques ex situ sont utilisées, **l'incinération** et **désorption thermique**. Elles sont employées pour la décontamination des sols pollués par les produits organique. Ces technologies consistent à utiliser les hautes températures pour réduire les polluants en CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O (LECOMTE ,1995) (Figure 7).

#### II.3.1.Incinération

L'incinération est la seule technique qui détruit réellement les polluants. Cependant cette technique est extrêmement coûteuse (380 €.t-1) et les fumées toxiques qui se dégagent lors de la combustion nécessitent d'importants engendrant ainsi des surcouts (DADHAH et AKGERMAN, 2002).

L'incinération se réalise en deux étapes. La première à 400°C, dite de volatilisation et une seconde dite de destruction se produisant à une température supérieure à 1 000°C.

La méthode la plus largement utilisée est celle du désorbeur ou four rotatif (**LECOMTE, 1995 ; COLIN, 2000**).

Selon cette méthode , le sol débarrassé des fractions grossières,est porté à une température suffisamment élevée pour permettre la désorption de l'humidité et des contaminants. Il est bien adapté aux sols contaminés par des hydrocarbures (**LECOMTE, 1995 ; COLIN, 2000**).

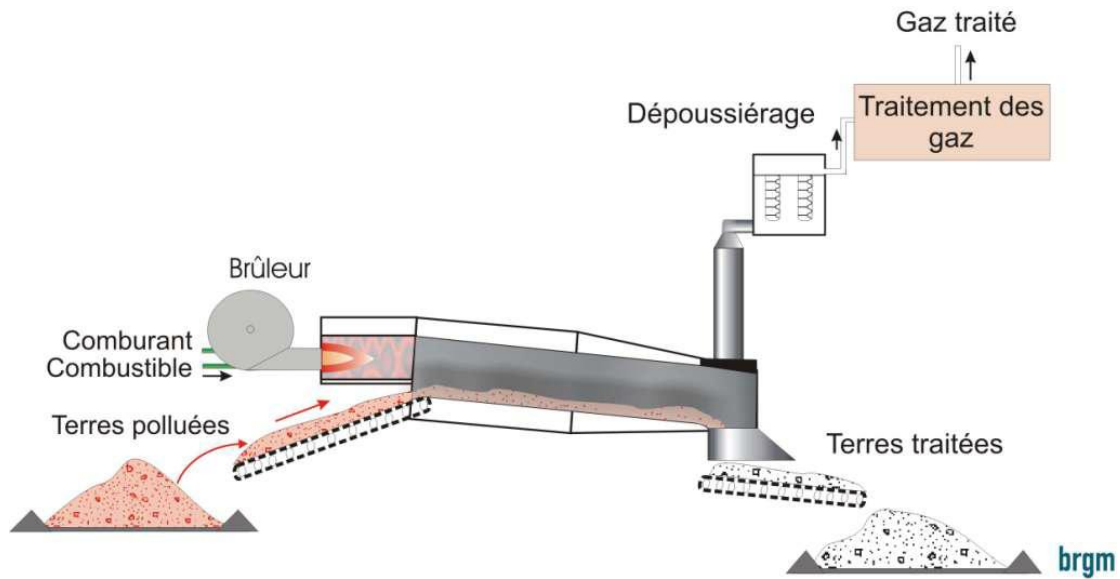
### **II.3.2. Vitrification**

La **vitrification** consiste à transformer par élévation de température. Un sol contaminé en un matériau fondu inerte .C 'est donc une méthode thermique in situ se rapprochant de la stabilisation. Cette méthode est utilisée sur des sites difficiles à traiter par d'autres méthodes (**LECOMTE, 1995 ; COLIN, 2000**).

La fusion du sol est obtenue en enfonçant dans le sol des électrodes jusqu'à une profondeur nécessaire pour le traitement, et en provoquant, par un courant électrique, une intense augmentation de température, de l'ordre de 2000°C.A cette température, la matrice du sol entre en fusion et est transformée par pyrolyse en un verre silicaté, où tous les composés présents sont fondus ou vaporisés (**LECOMTE, 1995 ; COLIN, 2000**).

Cette méthode évite l'excavation et le déplacement de composés hétérogènes. Elle minimise le risque l'exposition aux contaminants, tout en durable. De plus, sa vitesse d'exécution est rapide : 3 à 5 tonnes par heure. Le produit obtenu à un taux de lessivage très bas (**COLIN ,2000**), Cependant, il existe quelque inconvénient à cette méthode, comme la position des électrodes qui limite la profondeur et la surface à traiter. De plus, il peut se produire un dégagement de gaz toxiques, devant alors être traités (**COLIN ,2000**).

Elle nécessite également un potentiel important et coûteux : la consommation est évaluée à 750 kWh .t-1, enfin, bien que permettant une bonne stabilité, cette méthode présente l'inconvénient d'empêcher la réapparition d'un tapis végétal (**LECOMTE, 1995 ; COLIN, 2000**).



**Figure 7 : Schéma de principe de la désorption thermique ex situ ou on site.**  
(COLOMBANO et al ,2010).

#### II.4. Traitements chimiques

Ils ont pour but de détruire le polluant ou de le transformer en une forme moins nocive pour l'environnement; et ceci par l'intermédiaire de réactions chimiques se produisant entre le polluant et le réactif ajouté. Ils peuvent être applicables in situ ou après excavation des sols. La majorité des procédés exigent que les sols soient sous forme de boues ou que les contaminants soient mobilisés dans le milieu liquide (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

##### II.4.1. Méthodes de mobilisation et d'extraction

Les applications in situ se font par une solution chimiquement réactive (ex : tensioactif) qui va s'infiltrer dans le sol et mobiliser le polluant. La solution chargée de polluant est ramenée en surface par des pompes dans des drains ou des pompes dans des puits. Ensuite, elle est purifiée et recyclée pour une nouvelle aspersion. Le cycle peut ainsi fonctionner en continu, sur de très longues périodes, avec des apports de solution neuves en cas de pertes (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

La principale difficulté de cette technique est la surveillance du panache qui ne doit pas migrer hors de la zone de récupération. De plus, cette technologie est inopérante pour des sols à granulométrie fine (type argiles et limons fins), car elle altère l'état du sol et provoque des colmatages. De surcroît, ces sols peu perméables présentent une faible conductivité hydraulique qui limite la récupération des polluants mobilisés en phase aqueuse (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).



Ainsi, dans le cas d'utilisation de surfactant, les tensioactifs anionique seront préférés aux tensioactifs cationiques qui sont reconnus pour se sorbe au sol et provoquer les colmatages des ouvrages (**WEST et HARWELLA, 1992**). Le surfactant choisi doit être préférentiellement non toxique envers les micro-organismes du sol et être biodégradable. Ainsi, l'utilisation de tensioactifs biologiques semble être conseillée. En effet, leur efficacité à été démontrée dans le cadre de plusieurs travaux (**MCCRAY et BRUSSREAU, 1998**).

Dans le cas d'une application sur site, le sol est excavé et traité par la technique du "soil flushing " expliqué au paragraphe 1,2. Les avantages de cette méthode sont d'une part, sa facilité de mise en place et son coût peu élevé (dans la mesure où la solution de lessivage l'est). Et d'autre part, son rendement intéressant. Les principaux inconvénients à prendre en compte concernent l'état du sol après traitement : les lessivages par des solutions toxiques et l'effet de colmatage plus ou moins prononcé peuvent altérer l'état des sols de façon irréversible. A cela s'ajoute un risque de migration non contrôlée de la pollution, soit latéralement ou vers des couches plus profondes de l'aquifère et ceux dans le cas d'un traitement in situ (**AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009**).

#### **II.4.2. Réactions chimiques**

Elles permettent de transformer les polluants en des composés moins toxiques et de mobilité différente. Ce type de traitement est habituellement appliqué sur site. L'oxydation est la seule méthode applicable aux HAP car la réduction ne se fait que sur des produits halogénés (**AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009**).

En pratique ; peu d'oxydants peuvent être utilisés car ils sont très sensibles au PH, et la forme sous laquelle ils sont disponibles n'est pas nécessairement compatible avec un traitement à grande échelle. Les plus utilisés pour traiter les HAP sont l'azone ( $O_3$ ) et le peroxyde d'hydrogène ( $H_2O_2$ ). Dans tous les cas les oxydants n'ont pas une action spécifique. Et une partie sera consommée par des réactions avec la MO des sols, altérant ainsi ces derniers. Ces réactions induisent un coût supplémentaire (**AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009**).

L'azone sert à traiter les effluents liquides mais peut être utilisée in situ. En effet, (**MASTEN et DAVIES, 1997**) ont obtenu des rendements de plus de 95% d'élimination du phénanthrène pour une durée d'ozonation de 2,3 heures et un flux d'ozone de 250 mg-1. Des rendements plus faibles ont été obtenus avec l'anthracène (50%). Ces auteurs indiquent que cette technique était applicable car la demande en azone (taux de dégradation) du sable étudié était faible.

L'eau oxygénée est utilisée pour dégrader directement les composés organiques complexes et réfractaires à la biodégradation. Son action peut être catalysée par l'action des rayons ultraviolets ou du fer ferreux (Réactif de Fenton), qui va activer la décomposition du peroxyde d'hydrogène en radicaux OH. Ces derniers réagissent avec les composés organiques et provoquent leur décomposition en produits inoffensifs comme H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>. (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

L'utilisation commerciale de l'eau oxygénée permet de traiter les zones saturées (BALLERINE et VANDECASTEELE, 1999), mais présente de nombreux inconvénients. En effet, ce processus, bien qu'efficace, n'est pas spécifique.

(KAWAHARA et al, 1995) ont montré une augmentation importante (de 13 56 %) de l'extractabilité des HAP sur un site d'utilisation de composés de composés de Préservation du bois (créosote), et ceci après 1 heure de traitement d'un sol argileux par le réactif de Fenton. (BAGAN et SULLIVAN, 2003) ont obtenu des résultats similaires, mais en ajoutant en plus de l'huile végétale (biodégradable) dans le sol. En effet, l'huile va permettre d'introduire une phase organique qui va faciliter la dissolution des HAP dans cette phase.

## II.5. Méthodes biologiques

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action de microorganismes (bactéries, champignons...). Ils peuvent être utilisés seuls ou en complément d'une autre technique. La décontamination par voie biologique consiste donc à stimuler un phénomène naturel pour en augmenter le rendement afin de détruire le polluant organique qui sera utilisé comme source de carbone (COLIN, 2000).

La décontamination se fait in situ en introduisant dans le sol les éléments nécessaires au développement de la biomasse ou bien ex situ en traitant le sol excavé pour la dégradation des hydrocarbures, différents micro-organismes sont utilisés tels que *Arthrobacter*, *Novacardia* ou *Pseudomonas*, Si la flore locale est inadaptée à la dégradation des polluants ou est peu abondante, des souches bactériennes performantes allochtones peuvent être ajoutées au sol (COLIN, 2000).

### II.5.1. Biodégradation par traitement in situ

Cette technique fait appel au pompage et injection de l'oxygène sous forme gazeuse (O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) ou liquide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) avec injection de nutriments nécessaires à l'activité microbienne. La source d'oxygène est le principal inconvénient de ce système, car l'injection d'eau saturée en air n'est pas suffisante. L'apport d'oxygène s'effectue de plus en phase liquide surtout à partir de peroxyde d'hydrogène. Cependant, cette source d'oxygéné

trois inconvénients majeurs : son coût, le caractère corrosif de  $H_2O_2$ , qui attaque les puits d'injection (COLIN, 2000) et le pouvoir désinfectant de  $H_2O_2$  si celui-ci est utilisé à de fortes concentrations.

Du fait de la lenteur du processus de dégradation des HAP, notamment attribuable à leur forte adsorption au sol, il peut être nécessaire d'augmenter la biodisponibilité des HAP par ajouts de tensioactifs. En effet, (KOSARIC, 2001) a observé une réduction significative de la concentration en HAP après 22 jours de bioremédiation et ajout de bio tensioactif.

### **II.5.2. Traitement en réacteur**

Le principe de ce traitement consiste à réaliser et faciliter la biodégradation dans un contenant installé sur le site, en ajoutant au sol les nutriments nécessaires aux micro-organismes (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

Le sol excavé va subir diverse opération de broyage, de tamisage et d'homogénéisation. Il sera ensuite mélangé à de l'eau, généralement en proportions de 30% en poids / volume et introduit dans le réacteur par pompage. Différents modes de fonctionnement sont possibles soit en ou en discontinu (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

La plupart des dispositifs sont constitués de plusieurs réacteurs en chaîne, ce qui permet de transférer la boue d'un réacteur à l'autre. Les quantités de nutriments, calculées en fonction de la quantité initiale de polluant, sont ajoutées régulièrement afin de maintenir un rapport optimum entre les taux de carbone, d'azote et de phosphore. Des micro-organismes peuvent également être ajoutés pour maintenir en biomasse. Des chaque réacteur, un brassage assure un contact et un transfert de masse maximum entre le polluant et les bactéries (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

Une aération complète le dispositif. Les gaz produits sont traités à l'aide de filtres à charbon actif. Après séparation du solide et de l'eau, la terre recueillie est stockée puis remise sur site et l'eau contenant les micro-organismes sont recyclés (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

Cette technique s'adresse à des sols pollués par des substances peu biodégradables, types d'hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), et pour des sols généralement difficiles à traiter comme les sols argileux. L'ADEME (1999) indique que la technique est efficace pour des polluants présents à des concentrations comprises entre 2,5 et 250  $g.kg^{-1}$ .

Pour des HAP à trois noyaux aromatiques, le taux d'élimination est de 98-99% ; il diminue à 85-95% pour ceux à quatre noyaux et à 55-85% pour ceux à plus de quatre noyaux (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

Les principaux atouts de cette technique sont d'un cote, sa facilité à contrôler et maintenir les conditions optima de traitement et de l'autre, les durée de mises en œuvre sont plus courtes et n'excèdent généralement pas 6 à 9 mois. Enfin, la structure du sol n'est pas trop altérée et sa réutilisation est envisageable pour des reconstructions paysagées (AKMOUCI-TOUMI SIHAM, 2009).

Dans le principal inconvénient de cette méthode étant le coût par rapport aux autres techniques biologiques accompagné d'une efficacité moindre pour des HAP de masse élevée. Dans ce cas, l'ajout de tensioactif va rendre ces polluants plus accessibles aux micro-organismes et va donc, améliore les rendements. Un autre inconvénient à l'utilisation de cette technique peut être la toxicité des sous-produits formés au cours du processus de bioremédiation (DUBOURGUIER, 2000).

En France, ce procédé a déjà été utilisé couplé à une oxydation chimique (réactif de Fenton). Les travaux menés par (HERVIONet al, 2000) ont été utilisé sur deux types de sols pollués par des HAP lourds. Les auteurs ont obtenu des rendements de biodégradation de 29 et 41 % suivant le type sol, avec le coût de l'opération évaluée à 107 €.t<sup>-1</sup>. Ces deux paramètres font qu'actuellement cette technique n'est pas économiquement viable.

### II.5.3. Biotertre et Landfarming

Le **biotertre** et le **landfarming** regroupent toutes les applications mettant en œuvre des lots de terres contaminées de différentes hauteurs, y compris ceux auxquels ont été additionnés des matières végétales (composts) (LECOMTE, 1995).

Pour se faire, le sol est étalé après excavation sur une grande surface imperméable, sur une épaisseur de quelques dizaines de centimètres. Ensuite la terre est retournée avec d'éventuels ajouts favorisant la biodégradation. Les couts sont de l'ordre de 45 à 80 €.t<sup>-1</sup> et la durée du traitement variant de 12 à 24 mois pour les HAP, avec un taux moyen d'élimination de 80% (le rendement varie selon la molécule) (LECOMTE, 1995).

Lorsque le taux d'élimination n'est pas suffisamment élevé, la biostimulation peut être effectuée par ajout de nutriments spécifique, ou bio augmenté par ajout de bactéries adaptées à la pollution. (STRAUBE et al, 2003) ont constaté une réelle amélioration des taux de dégradation des HAP après avoir ajouté de l'azote (augmentation de 10% du taux de biodégradation). De même, (JUHASZ et NAIDU, 2000) suggèrent que la bio-

augmentation est une solution pour favoriser la dégradation des HAP lourds (benzo[a]pyrène) ou le traitement des sols fortement contaminés (JUHASZ et NAIDU, 2000).

Pour des sols pollués contenant des contaminations volatils en quantités non négligeables, ou dans des pays où la législation interdit le traitement de dépollution à l'air libre (Québec par exemple), l'utilisation de la « biopile » est nécessaire (JUHASZ et NAIDU, 2000).

Les réacteurs à l'air libre sont alors remplacés par des réacteurs où les flux de gaz et de liquide sont parfaitement contrôlés. On réalise une pile de plusieurs mètres de hauteur que l'on place sur une couche drainante. Un système d'aspersion et un système de rigole sont mis en place. Pour les gaz, le procédé utilise ou d'injecter de l'air frais. Une couverture étanche (géo membrane) vient recouvrir l'ensemble (JUHASZ et NAIDU, 2000).

Cette technique est utilisée pour traiter les HAP. (LECOMTE, 1995) indique qu'après 9 mois de traitement, 80% en masse des HAP ont été dégradés.

#### II-5-4- Phytoremédiation

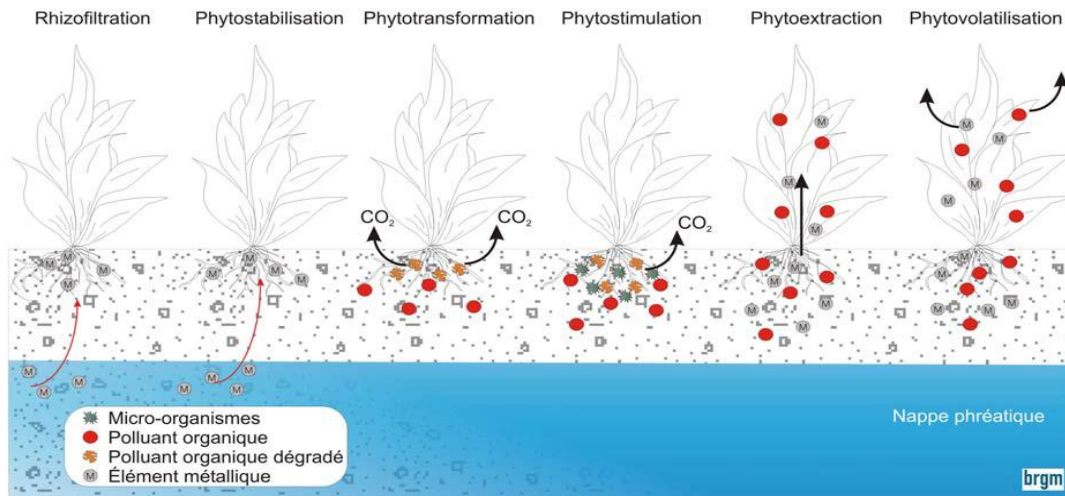
Certaines plantes permettent de transformer (phytoremédiation) ou de stabiliser (phytostabilisation) les polluants dans les sols. En effet les racines de celles-ci sont étroitement associées à une microflore bactérienne et fongique qui va aider ou faciliter la dégradation des COH (LISTE et ALEXANDER, 2000). Longtemps, la phytoremédiation était restée essentiellement appliquée aux métaux lourds, mais de récentes études ont montré que cette technique est utilisable pour les HAP (BALLERINI, 1999). Cependant, les mécanismes mis en jeu sont encore mal connus (BINET et al, 2000).

La phytoremédiation peut être réalisée à l'aide de diverses espèces végétales comme l'avoine, le lupin, le colza (LISTE et ALEXANDER, 2000), le ray-grass (BINET et al, 2000). Dans la plupart des cas, la phytoremédiation a été étudiée sur des sols riches en argile. (BALLERINI, 1999) indique que le système fibreux racinaire de l'herbe facilite à la fois l'accessibilité des contaminants et le métabolisme microbien (Figure 8).

Les rendements d'élimination varient avec le nombre de cycles des HAP.

(BINET et al, 2000) ont observé une augmentation de la dissipation ou de la biotransformation de plusieurs HAP, incluant ceux de cinq et six noyaux aromatiques. Cependant, ces auteurs indiquent que les meilleurs taux d'élimination sont obtenus pour les HAP de trois cycles, comme le phénanthrène ou l'anthracène. Par ailleurs, (LISTE et ALEXANDER, 2000) ont obtenu en 8 semaines, 74% d'élimination du pyrène sur un sol

avec des plantes. Alors que les rendements chutent à moins de 40% pour un sol sans plantes.



**Figure8 : Présentation des différents types de phytoremédiation (S.COLOMBANO et al ,2010).**

Les différentes techniques de traitement de la pollution par les hydrocarbures aromatiques polycycliques sus citées sont résumées dans le tableau I.

**Tableau I: Synthèse des principaux traitements de dépollution**

(BALLRINI, 1999 ; COLIN, 2000)

Technique	Principe du traitement	Estimation du cout (€.t <sup>-1</sup> )	Avantage et Inconvénient	Durée de traitement	Rendements
Pompage – écémage	Pompage des produits flottants sur la nappe	20 à80	Elimination rapide de la pollution	Durée brève	50 %
Pompage et traitement	Entrainement des polluants avec l’eau	20 à160	Risque de dissémination de la pollution	3 à 18 mois	Varie avec la solution lavante
Confinement	Excavation et mise en décharge	600 à1000	Isole la pollution, Dégradation du sol		
Stabilisation	Injection de produits liants pour fixer la pollution	20 à 200	Technique désuète Dégradation du sol		
Incinération	Incinération en four tournant à haute	270 à 1100	Téchnique efficace mais couteuse et toxicité des		Jusqu’à 99 %

	température		fumées émises		
Vitrification	Fusion du sol	180 à 400	Pas de réapparition de tapis végétal	Rapide : 3à5 t.h <sup>-1</sup>	
Traitement chimique	Ajout d'oxydants pour les transformer en espèces moins nocives	10 à 100	Procéde non spécifique		50 à 95% suivant le HAP
Bioslurry	Biodégradation	85 à 230	Facile à mettre en œuvre et à contrôler.	2à3 semaines	Jusqu'à 95% suivant le HAP
Bioterre et Landfarming		45 à 80	Facile à mettre en œuvre et contrôler, mais peu rapide	12 à 24 mois	Jusqu'à 80% suivant le HAP

**Tableau II : Avantage et inconvénients de chaque méthode (GIRARD et al 2005).**

Type de dépollution	Explications	Avantages et Inconvénient
Dépollution par remplacement	Décapage du sol contaminé sur toute l'épaisseur polluée puis remplacement de la terre enlevée par de la terre saine.	Coût de l'opération élevée. La terre polluée est considérée comme un déchet industriel à partir du moment où elle est déplacée.
Dépollution physico- chimique	Injection d'un liquide ou d'un gaz sous pression dans le but de dissoudre les polluants	Traitement sur place. On doit connaître le polluant.
Extraction par aspiration	Traitement par pompe à vide. Vapeurs traitées par oxydation catalytique absorption par du charbon actif.	Uniquement sur terrains sableux.
Extraction par injection	Injection sous pression d'air, d'azote ou de vapeur.	Traitement possible uniquement sur terrains perméables à l'air.

Extraction électrique	<p>Implantation d'électrodes poreuses dans le but :</p> <p>De générer un courant électrique</p> <p>De déloges les vers les électrodes de charge opposées.</p> <p>La récupération des polluants se fait par pompage.</p>	<p>Uniquement pour les polluants ionisés :</p> <p>Métaux lourds, Ions organiques.</p>
Extraction par chauffage ou désorption thermique	<p>Consiste à chauffer la terre à des températures variant de 80°C à 450 C dans le but d'évaporer les polluants.</p>	<p>Adaptée à tous les polluants en dehors des métaux lourds.</p> <p>Très avantageux : résultat garanti en un temps très court (quelques semaines).</p>
Lavage du sol	<p>Le lavage peut être fait :</p> <p>à haute pression.</p> <p>à pression normale.</p>	Dépollution limitée
Dépollution biologique	<p>Mode de dépollution basé sur des filtres biologique.</p>	<p>Inconvénients : risque de prolifération des micro-organismes.</p> <p>Inopérant sur les pollutions trop importantes.</p>
Dépollution par les plantes	<p>Certaines plantes sont capables de stabiliser dans leurs cellules :</p> <p>Les métaux lourds, les composés organiques polluants.</p> <p>Dépollution grâce à des enzymes ; ces plantes sont choisies en fonction de :</p> <p>Leur taille</p> <p>La capacité qu'a leur racine à s'enfouir profondément dans le sol pour atteindre les couches polluées</p>	<p>Avantage: très écologique.</p>



La contamination des sols et des eaux souterraines par des déversements d'hydrocarbures pétroliers est fréquente. Elle entraîne des risques pour l'environnement et la santé humaine. Souvent, la contamination est associée aux défaillances des réservoirs de stockage souterrain dans les stations de service. Lorsque les substances dangereuses contenues dans les hydrocarbures sont près des activités humaines, elles peuvent altérer l'eau potable et les sols agricoles et causer des odeurs désagréables.

La dépollution ou décontamination des sols consiste à rendre le sol, le sous-sol, et les eaux souterraines pollués par d'anciens dépôts de déchets ou par l'infiltration de substances polluantes, aptes à un nouvel usage (agricole, résidentiel ou industriel). Pour ce faire, différents types de traitements peuvent être envisagés :

La pollution par les hydrocarbures pose d'importants problèmes d'élimination ; les voies d'élimination chimiques et physiques ont leurs limites du fait de leur coût ou de leur impact secondaire sur l'environnement. La voie biologique est actuellement en plein essor et suscite de très nombreux travaux de part le monde entier.

La biorémédiation est une technologie qui utilise les micro-organismes, pour réduire la toxicité des matières organiques à risques ou pour les transformer en matières non toxiques. Elle peut-être réalisée « in situ » ou « ex situ » Il existe deux types de bioremédiation : la biorémédiation intrinsèque et la biorémédiation augmentée. La bioremédiation intrinsèque s'appuie sur un microorganisme qui est déjà présent dans le sol, et qui se nourrit des contaminants. Cette technique implique une stimulation des bactéries pour cibler la contamination grâce à différentes techniques. La biorémédiation augmentée ou bio augmentation utilise un consortium de microorganismes sélectionnées pour leur capacité à transformer les contaminants. Les bactéries sont introduites dans la zone contaminée et leur métabolisme est supporté grâce à des nutriments ajoutés.

A

**1-AKMOUCI- TOUMI SIHEM, (2009).**Contribution à l'étude des boues de forage : Isolement et évaluation de la capacité de quelques souches microbiennes à dégrader le gasoil. Université M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.

**2-ARBAOUI NASREDDINE et AFFANE Ben Ahmed. (2005).**Traitement des rejets pétroliers en Algérie. P4.

B

**3-BALLERINI et KANDECASTEELE (1999).**Traitements biologique des sols .Technique de l'ingénieur, traité Environnement, G 2 620 : 1- 6 .

**4-BALLERINI et VANDECASTEELE, (1999).** La restauration par voie microbiologique des sols contaminés par les polluants organiques. Biotechnologie, coordinateur R. Scriban, 5ème édition, Edition Tech et Doc, pp, 835-865.

**5-BERTRAND A .R.BRIANT J., CASTELA A., DEGOBERT P., et GATELLIER C., MASSON M. OUDIN J.-L. et J.POTIER., (1971).**Prévention et lutte contre la pollution au cours des opérations de forage et de production en mer. Oil and Gas Energy Booksellersince.

**6-BERTRAND J.C.et MILLE G., (1989).**Devenir de la matière organique exogène. Un modèle : les hydrocarbures. In : BIANCHI M., MARTY D., BERTRAND J.C., et GAUTHIER M.J. (Eds.), Microorganismes dans les écosystèmes océaniques. Masson (Paris), chapitre 13 :343-385.

**7-BLIFERT et PERRAUD, (2004).** Chimie de l'environnement air, eau, sols, déchet. De Boeck université. P (369 ,372-375).

**8-BINET P., PORTAL J.M. et LEYVAL C. ;(2000).** Dissipation of 3-6 ring polycyclique aromatic.

**9-BOUSSABOUA H., (2005)-** Elément de microbiologie.

**10-BORDAS F.et P.LAFRANCE, (2001).** Utilisation de biosurfactants (rhamonolipides) pour le traitement d'un sol sableux contaminé par le pyrène \_ Essais en colonne de sol, Etude et gestion des sols, 8(3) : 181\_188.

C

**11-COLIN F, (2000).** Pollution localisée des sols et des sous –sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés, Académie des sciences, rapport n° 44, Edition Tec & Doc .417.

**12-COME. J.M.et J. DUCREUX, (2001),** Dépollution par injection de tensioactifs d'un forage d'alimentation en eau potable contaminé par du fioul domestique. L'eau, l'industrie, les nuisances, 240:41-47.

**13-COX et al, (1993).** Growth of the black yeast *Exophiala jeanselmei* on styrene and styrene-related compounds. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 39,372-376.

D

**14-DADKHAH A.A et A. AKGERMAN, (2002).** Hot water extraction with in situ oxidation: PAHs removal from soil. *Journal of Hazardous Material*, 93: 307-320.

**15-DUBOURGUIER H .C. (2000).**From the laboratory to industrial scale: Composting of polluted soils from former coal industry and gas plants: future research needs, NATO Advanced Research Workshop the Utilization of Bioremediation to Reduce Soil Contamination: Problems and Solutions. Liblice Castle, Czech republic, June.14-19.

**16-DAVID.C,(2005).**HST,Risque biologique et biodepollution des sol.

E

**17-EMILIA KOLLER, (2004).** Traitement des pollutions industrielles : Eau, Air, Déchets, Sols, Boues.

**18-ERGAS et al, (1994).**Characterization of a compost biofiltration system degrading dichloromethane. *Biotechnol.*44, 1048-1054.

F

**19-FRANAENEC J.P. ; LEPRINCE P. ; TREMBOUZE P. ; FAVENNEC J.P. ; EDERN Y, (1998).** Le raffinage de pétrole. Pétrole brut –produit pétrolier-schéma de fabrication tom5 .technip . *Fuel. Applied and Environmental Microbiology ;* 66(10) :4205 – 421.

G

**20-GABET S, (2004).** Remobilisation d'hydrocarbures Aromatiques polycycliques (HAP)présents dans les sols contaminés à l'aide d'un tensioactif d'origine

biologique .Thèse n° 12-2004 de doctorat de l'université de Limoges , spécialité Chimie et Microbiologie de l'Eau .177 .

**21-GIRARD M et al, (2005).** WALTER C, REMY C, BERTHERLIN, MOREL, sols et environnement, exercices et études de cas, Dunod .p . 799.

**22-G.PERRY, (2001).** Microbiologie cours et questions de révision. PCEM. PCEP. 1 er Cycle /Licence. 2 éme Cycle / Master. pp (849-853).

H

**23-HAMELIN R, LAPRTE J.et PTC A, (2000)** – Environnement et nuisances Edition Clartés. P 157.

**24-HERVIOU P, H. BONIN, S.DUFAY et G.RIGAUD, (2000).**HAP lourds: traitement par voie biologique, .L'Eau, L'Industrie, Les Nuisances 230 : 51-55.

J

**25-JUHASZH A.L et R. NAIDU, (2000).** Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo [a] pyrene. International Biodeterioration & Biodegradation, 45, 57-88.

K

**26-KOSARIC N, (2001).** Biosurfactants and their application for soil bioremediation. Food Technol .Biotechnol.39 (4):295-304.

L

**27-LAFRANCE P.et M.LAPOINTE ,(1998)** .Mobilization and co-transport of pyrene in the presence of Pseudomonas aeruginosa UG2 biosurfactants in sandy soil columns Ground Water Monitoring and Remediation ,18 (4) :139-147.

**28-LECOMTE P, (1995).** Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. Edition Lavoisier, TEC & DOC .198.

**29-LECOMTE, (1998)** .Les sites pollués : traitement des sols et des eaux souterraines. 2eme edition Paris.

**30-LISTE H. et ALEXANDER M, (2000).** Plant- promoted pyrene degradation in soil .Chemosphere. 40:7-10.

M

**31-MASTEN S. J. et S.H.R .DAVIES, (1997)**,Efficacy of in-situ ozonation for the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soils, J. Contam. Hydrol. 28:327-335.

**32-MCCRAY J.E et M.L. BRUSSEAU, (1998)**. Cyclodextrin-enhanced in situ flushing of multiple-coponent immiscible organic liquid contamination at the field scale: mass removal effectiveness. Environ. Sci. Technol. 32, (9), 1285-1293.

**33-M.C. GIRARD., C. WALTER., J.C. REMY., J. BERTHELIN., J.L. MOREL. (2005)**. Sols et environnement. DUNOD, les sols en milieu urbain – traitement des sols urbains pollués. Pollution organiques agricoles, urbaine ou industrielle : cas des hydrocarbures aromatiques polycycliques – traitement des sites contaminés. 75, 436.

**34-MORGAN P., WATKINSON R.J et RATLEDGE C, (1994)**. Biodegradation of components of petroleum .In: Biochemistry of microbial degradation .Ed Kluwer Academic Publishers.1-31.

N

**35-NEFF J.M, (1979)**. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment, source, fate and biological effect, applied science, Essex, England, 262.

R

**36-R .JEANNOT, B.LEMIERE, S.CHIRON** avec la collaboration de : F. Augustin, D.Darmendrail, (2001)- Guide méthodologique pour analyse des sols pollués (Document du BRGM 298).Editions BRGM.

**37-RODIA G, (1998)** Guide à la décision pour le choix d'une technique de dépollution des sols. Edition Entreprise Rhodia ESC service, Paris. P.P.413-421.

S

**38-SALLE C, DEBYSER J, (1979)**.Formation des gisements de pétrole, étude des phénomènes géologique fondamentaux .Technip, p.1.

**39-SASSON A, (1967)**-Recherche ecophysiologique sur la flore bactérienne du sol des régions arides du Maroc, RABAT, 1967, p277.

**40-S. COLOMBANO, A.SAADA, V.GUERIN, P.BATAILLARD, (2010) :** Rapport Final de Quelles techniques pour quels traitements – Analyse coûts –bénéfices, BRGM-58609-FR.

**41-SCOW K.M, (2003).**Rate of biodegradation, in: W.J .Lyman, W.F.Rosenblatt, (Eds.) Handbook of Chemical Property Estimation Methods, McGraw-Hill, New York.

**42-SCRIBAN R, (1999).** Biotechnologie : restauration par voie biologique des sols contaminés par les polluants organique 5eme édition, Ed lavoisi.

**43-SOLTANI M, (2004).** Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat de l'université Paris 6, spécialité chimie analytique.284.

**44-STRAUBE W.L., C .C. NESTLER, L.D. HANSEN, D.RINGLEBERG, P.H. P RITCHARD et J. JONES-MEEHAN, (2003).** Remediation of polycyclic hydrocarbons (PAHs) through Landfarming with Biostimulation .Acta Biotechnol. 23, (2-3): 179-196.

T

**45-TERRAT, S ,(2001),** Nouveaux design de sondes pour biopuces AND fonctionnelles et caractérisation des capacité de biodégradation des communautés bactériennes de sol pollués par des hydrocarbures , thèse de doctorat ,université Blaise Pascal, Ecole doctorale des sciènes de la vie et de la sante, p41.

**46-THIEM a, M.STIEBER, P.WERNER et F.H.FRIMMEL, (1997).**SURFACTANT-enhancedmobilization and biodegradation of polycyclic-aromatic hydrocarbons in manufactured gas plant soil.Envrion .Sci.Technol. 31, (9):25706-2576.

**47-TISSOT B .P., WELTE D. H, (1984),** Petroleum formation and occurrence, Springer, Berlin.9.

**48-TOREN Orr E., Y. PAITAN, E. Z. RON and E. ROSENBERG, (2002).** The Active Component of the Bioemulsifier Alasan from Acinetobacter radioresistens KA 53 Is an OmpALiKe Protein. Journal of Bacteriology, 184(1):165-170.

V

**49-VANDECASTEELE J .P,( 2005).** Microbiologie pétrolière, Ed technip .Volume 2.

**50-VOGEL T M., (2001).**Biorémediation des sols. Technique de l'ingénieur .Traité de génie de procédés .J 3982.

W

**51-J P.WAUQUIER, (1994) ., LEPRINCE P., TREMBOUZE P., FAVENNEC J., EDERN Y.**, Le raffinage de pétrole : exploitation des gisements de la raffinerie. Tome 5. Ed technip.

**52-WEST C.C et J.H.HARWELL, (1992).** Surfactants and subsurface remediation, Environ. Sci. Technol. 36 (12) ,2324-2330.

**Site électroniques :**

<http://> Les traitement biologique des sols et des eaux souterraines.

R.E.1.[www.fr.encarta.msn.com/encyclopédie](http://www.fr.encarta.msn.com/encyclopédie) ,2004 .

R.E.2.[www.wikipedia.org/wiki](http://www.wikipedia.org/wiki) : hydrocarbures, 2006.

R.E.3.[http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Quelle technique quel traitement-brgm-v-final.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Quelle_technique_quel_traitement-brgm-v-final.pdf) ,2012.

Site du l'ADEME ,1999.

BRGM/RP-58609-FR, (2010). Rapport Final : Quelles techniques pour quels traitements - Analyse coûts –bénéfice.