

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERHCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département : Génie de l'Environnement

Mémoire de fin d'études  
en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en :  
Génie de l'Environnement

Présenté par: M<sup>elle</sup> HAMADACHE Latifa Amina

## Thème

***Bioremédiation d'un sol pollué par les  
hydrocarbures par procédé biopile***

*Soutenu le : 27/06/2012, devant le jury composé de :*

<b>Président:</b>	Mr. N. MAMERI	Professeur ENP
<b>Examineur:</b>	Mr. H. GRIB	Professeur ENP
<b>Promotrices :</b>	Mme. N. ABDI Mme. R. CHEMLAL	Professeur ENP Doctorante ENP

Alger 2012

# **Remerciements**

*Le présent travail a été réalisé au laboratoire des biotechnologies et génie des procédés (BioGeP) au département du Génie de l'Environnement à l'école nationale polytechnique et fait partie de la thèse de Doctorat de Mme Chemlal Radia.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude à l'ensemble des professeurs du département BioGeP pour leur sympathie et leur omniprésence pour les étudiants, en particulier :*

*Mes deux promotrices : Madame ABDI pour sa disponibilité, son assistance, ses orientations et conseils, Madame CHEMLAL Radia pour m'avoir assisté tout au long de mon projet, m'avoir appris à être méticuleuse et soigneuse dans mon travail ainsi que pour la patience et l'attention qu'elle m'a accordée.*

*Je remercie Monsieur MAMERI pour avoir accepté de présider le jury et surtout pour sa sympathie et sa bonne humeur qui a rendu agréable notre période de travail.*

*Je remercie également Monsieur GRIB pour avoir accepté d'examiner ce travail et Monsieur LOUNICI pour sa présence et ses conseils.*

*Je salue tous mes amis et camarades avec qui j'ai passé mon cursus et je remercie en particulier Louisa et Hadjer pour m'avoir soutenu et encouragé.*

*Je tiens à exprimer mes remerciements au directeur de l'HURBAL, Monsieur MAKHOUKH pour m'avoir accepté au sein de son établissement ainsi que l'ensemble du personnel des laboratoires Aliments et Eau, me permettant de mener à bien mon étude.*

*Enfin, par-dessus-tout, je remercie mes chers parents et mes chères sœurs Majda et Hasna pour leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de mon travail, mais surtout  
**MERCI MAMAN !***

## **Tables des matières :**

Introduction générale .....	1
<b>CHAPITRE I : Synthèse bibliographique</b>	
I-1 Le sol .....	3
I-1-1 Définition et genèse.....	3
I-1-2 Les constituants du sol.....	3
I-1-2-1 Phase liquide.....	4
I-1-2-2 Phase gazeuse.....	4
I-1-2-3 Phase solide.....	4
* Fraction minérale .....	4
* Fraction organique.....	4
- Les matières organiques.....	5
- La biomasse .....	5
I-1-3 Rôle des êtres vivants dans les sols.....	6
I-1-4 Propriétés physico chimiques des sols .....	6
I-1-4-1- Propriétés physiques.....	6
* Texture .....	6
* Structure .....	6
- Structure élémentaire ou particulaire .....	6
- Structure fragmentaire .....	7
- Structure compacte ou massive .....	7
* Porosité.....	7
* Perméabilité .....	7
* Capacité de rétention .....	8
I-1-4-2- Propriétés chimiques.....	8
* Le pH.....	8
* Potentiel Redox.....	8
I-2 Les hydrocarbures.....	8
I-2-1 Définition et formation .....	8
I-2-2 Importance des hydrocarbures .....	9
I-2-3 Classification des hydrocarbures .....	9
I-2-4 Le gasoil.....	10
I-3- Pollution du sol .....	11
I-3-1 Pollution par les hydrocarbures .....	11
I-3-2 Pollution du sol par le gasoil.....	12
I-3-3 La dépollution .....	12

I-3-4 Biodégradation des hydrocarbures .....	13
I-4 Techniques de remédiation des sols pollués.....	13
I-4-1 Les techniques In-Situ.....	13
I-4-1-1 Procédés physicochimiques .....	13
* Lavage in situ (lessivage) .....	13
* Pompage.....	14
* Venting.....	14
* Sparging .....	14
* Slurping .....	15
* Stripping.....	15
* Oxydation.....	15
* Solidification et stabilisation .....	16
I-4-1-2- Procédés thermiques .....	16
* Volatilisation .....	16
* Vitrification .....	16
I-4-1-3 Procédés biologiques.....	16
* Biodégradation aérobie .....	16
* Bioventing .....	17
* Traitement de confinement.....	17
- Recouvrement de la surface .....	17
- Enceinte de confinement.....	17
- Barrière hydraulique .....	17
* Phytoremédiation .....	18
I-4-2 Procédés de traitements Ex-Situ.....	18
I-4-2-1 Procédés physicochimiques .....	19
* Dépollution par lavage.....	19
I-4-2-2 Procédés thermiques.....	19
* La désorption thermique.....	19
* L'incinération.....	19
* La réduction thermique .....	19
I-4-2-3 Procédés d'oxydation avancés.....	19
* Principe .....	20
* Type de pollution traitée.....	20
I-4-2-4 Procédés biologiques (bioremédiation) .....	20
* Epanchage contrôlé et compostage.....	21
* Biodégradation en andains .....	21
- Biostimulation .....	21
- La bioaugmentation.....	21
* Biodégradation en réacteur .....	22
* Biopile.....	22
* Facteurs influençant la biodégradation .....	22

## CHAPITRE II : Matériel et méthodes

II-1 Matériel utilisé.....	23
II-2 Méthodes d'analyse.....	23
II-2-1 Echantillonnage.....	23
II-2-2 Caractérisation physico-chimique du sol .....	23
* Dosage du Phosphore « P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ».....	23
* Dosage du carbone organique total (COT) .....	24
* Dosage de l'azote total (NT <sub>k</sub> ) .....	24
.....	24
* Extraction et dosage des hydrocarbures (HC) .....	24
* Mesure de l'humidité.....	25
* Mesure du pH.....	25
* Granulométrie .....	25
II-2-3 Caractérisation microbiologique .....	25
II-2-4 Nutriments et humidité.....	25
II-3 Description de la biopile.....	26
* Biopile couplée au POA.....	27
II-4 Conduite de la bioremédiation .....	29
II-4-1-1 Production du sol enrichi.....	29
II-4-2 Traitement en biopile.....	29

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

III-1 Caractérisation du sol.....	30
III-1-1 Caractérisation granulométrique.....	30
III-1-2 Caractérisation physico-chimiques.....	31
III-1-3 Caractérisation microbiologique.....	32
III-2 Cinétique de dégradation des hydrocarbures.....	34
III-2-1 Cinétique de croissance bactérienne.....	37
III-2-2 Couplage de la biopile au POA.....	42
III-2-3 Effet du surfactant sur la biopile couplée.....	45
Conclusion générale.....	46

## Liste des tableaux

Tableau I : Proportions des diamètres du sol.....	30
Tableau II : Caractérisation physico-chimique du sol.....	31
Tableau III : Caractérisation microbiologique du sol.....	33

## Liste des figures

Figure I : Schéma du dispositif biopile.....	28
Figure II : Pourcentages des diamètres du sol.....	30
Figure III : Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B <sub>0</sub> ».....	34
Figure IV : Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B <sub>1</sub> ».....	34
Figure V – Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B <sub>2</sub> » .....	35
Figure VI – Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B <sub>3</sub> ».....	35
Figure VII – Abattement des HC dans les biopiles.....	37
Figure VIII - Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B <sub>0</sub> ».....	38
Figure IX – Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B <sub>1</sub> ».....	38
Figure X – Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B <sub>2</sub> ».....	39
Figure XI – Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B <sub>3</sub> ».....	39
Figure XII – [HC] des biopiles avant et après POA <sub>1</sub> .....	43
Figure XIII - [HC] des biopiles avant et après POA <sub>2</sub> .....	43
Figure XIV - [HC] des biopiles avant et après POA <sub>3</sub> .....	44
Figure XV - [HC] des biopiles avant et après POA <sub>4</sub> .....	44

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

L'accroissement démographique, économique et urbain est à l'origine des différentes sources de pollution environnementales (pollution atmosphérique, pollution des eaux de surface et souterraine, pollution du sol...), et ce, en particulier dans les pays en voie de développement moins préoccupés et moins sensibilisés par rapport aux risques sanitaires et environnementaux.

De plus, cette croissance entraîne de fortes demandes, sans cesse en hausse, d'énergies électriques, de ressources en eau et en carburants pour alimenter les habitations, les industries et les moyens de transport, ce qui implique l'accumulation de déchets liés à ces activités et par conséquent la dégradation de notre environnement.

Un exemple de la pollution du sol est celle engendrée par les hydrocarbures en particulier dans leur phase d'exploitation, de transport et de stockage où les accidents de déversements sont les plus enregistrés.

Les conséquences de ces accidents affectent directement le sol et vont jusqu'à atteindre les eaux souterraines par infiltration à long terme. Ceci est donc un problème sérieux auquel il faut remédier de façon efficace et définitive.

La dépollution ou décontamination des sols consiste principalement à rendre ces derniers aptes à un nouvel usage industriel, voire dans des cas extrêmes à un retour à l'activité agricole après qu'ils aient été pollués suite à une activité industrielle. Les conséquences néfastes de ces pollutions peuvent apparaître à moyen et à long terme sur la faune et la flore, mais aussi sur la chaîne alimentaire dont l'homme en constitue le maillon final.

Il faut donc trouver une solution à ces dégâts de manière à ne pas se contenter de déplacer la pollution et la générer autre part, et de manière intéressante pour les gouvernements et industriels dans le plan économique. Il serait donc déterminant de penser à des techniques allant dans le sens du développement durable.

Plusieurs procédés de décontamination des sols pollués ont été mis au point, chacun visant une gamme de polluants déterminée. Les techniques utilisées en premier étaient essentiellement de type physico-chimique où l'on traitait la pollution avec des produits de synthèse chimique. Ces méthodes étaient onéreuses pour les investisseurs et engendraient parfois des sous produits de la décontamination, même à faibles teneurs, toujours est-il une autre pollution se créait quelque part. On a donc pensé à développer d'autres techniques plus rentables du point de vue décontamination : ce sont les procédés biologiques.

Les procédés biologiques font appel aux capacités de la microflore présente naturellement dans le sol à dégrader ces polluants car ces derniers sont des composés organiques et peuvent par conséquent être métabolisés- parfois totalement- par les microorganismes.

## Introduction générale

---

Nous nous proposons donc, dans le cadre de notre travail, d'étudier un procédé de remédiation biologique des sols contaminés par les hydrocarbures (dans notre cas le Gasoil) à l'échelle semi-pilote : c'est la technique de la Biopile.

Dans une première partie, nous étudierons la capacité de la microflore autochtone à dégrader le polluant, puis évaluerons les rendements d'élimination et temps d'opération du procédé afin d'apprécier l'aptitude du procédé à être mis en œuvre à l'échelle industrielle.

# **Synthèse bibliographique**

**I-1 Le sol :****I-1-1 Définition et genèse :**

Le sol est un milieu complexe. Le terme « sol » se rapporte à la couche extérieure de la surface terrestre qui s'est fragmentée par altération au cours des âges.

Le sol s'est formé initialement par désintégration et décomposition des roches dans des processus physiques et chimique et est influencé par l'activité et l'accumulation des résidus de nombreuses espèces biologiques.

Un sol doit être meuble et suffisamment friable pour permettre le développement des racines sans empêchement mécanique.

Les pores du sol doivent avoir un volume et une distribution qui assurent le mouvement de l'eau et de l'air.

Le sol est un système hétérogène, poly phasique, finement divisé, dispersé et poreux dans lequel la surface inter faciale par unité de volume peut être très grande. Le sol est normalement subdivisé (définition du « sol » d'après la nomenclature pédologique) en une couche supérieure (horizon A, aussi appelé *humus*) et une couche inférieure (horizon B) qui surmonte la roche mère (non altérée) (horizon C).

La formation du sol est très lente, on estime sa formation entre 0,1 à 1 mm tous les 10 ans.

Milieu très particulier, cette couche est déterminée par l'environnement et est en mutation permanente. Elle comporte de l'eau, de l'air, des organismes vivants, des matières organiques à divers stades de décomposition et d'élaboration, des éléments minéraux.

Comme support de la biosphère, les sols jouent un rôle important dans la circulation des composés vitaux (ou néfastes) et dans la biodisponibilité de ces composés pour les organismes vivants. Il assure ainsi le maintien de sa fertilité et, de ce fait, de nombreux cycles biogéochimiques s'y déroulent : cycle de l'eau, de l'azote, du soufre, du phosphore et du fer.

[1]

**I-1-2 Les constituants du sol :**

Les constituants du sol sont dans un état de division assez fine et intimement entremêlés qu'il est difficile de les séparer les uns des autres d'une manière satisfaisante. [2]

## **I-1-2-1 Phase liquide :**

La fraction liquide du sol est particulièrement connue pour sa fonction de transport des substances et de solubilisation de celles-ci.

La teneur en eau d'un sol dépend fortement de sa texture donc de sa capacité de rétention, des remontées capillaires ainsi que des facteurs climatiques tels que les précipitations, l'évapotranspiration [1]. Cette eau est en interaction permanente avec l'atmosphère (infiltration des précipitations, échange avec les plantes, évapotranspiration...) [3]

## **I-1-2-2 Phase gazeuse :**

Le sol étant un milieu poly-phasique, l'air occupe les pores abandonnés par le trajet de l'eau lors de son retrait et cette quantité de gaz dépend, elle aussi de l'humidité et de la texture du sol. Les gaz contenus dans le sol sont essentiellement de l'air et du gaz carbonique issu des activités biologiques du sol. [4].

## **I-1-2-3 Phase solide :**

Cette dernière comprend la fraction minérale et organique :

### ➤ **Fraction minérale**

Les constituants minéraux du sol sont soit primaires, c'est-à-dire issus directement de l'altération de la roche mère, soit secondaires issus de la transformation physique et/ou chimique de ces minéraux primaires.

Ce complexe résulte des sels (des carbonates de calcium ou de magnésium), des silicates (micas), et des colloïdes comme les hydroxydes de fer ou d'aluminium. Ainsi, ces éléments confèrent au sol une texture et une structure proportionnelle à la répartition de la taille des grains. [4].

### ➤ **Fraction organique**

Cette partie du sol comprend la matière organique et la matière biologique (biomasse)

#### - Les matières organiques :

Le sol prend naissance après installation de la moindre vie végétale ou animale dans les premiers débris de décomposition d'une roche.

La mort des êtres vivants, leurs déchets et leurs sécrétions constituent la matière organique du sol qualifiée de fraiche avant qu'elle ne se transforme en humus. L'humus est la terre fertile formée par la décomposition de cellules d'espèces végétales et animales et de produits du métabolisme (principalement des substances organiques) transformés, décomposés par les organismes vivant dans le sol et mélangés à des sédiments provenant des substances inorganiques des roches, par exemple l'argile. L'argile mélangée à des particules d'humus forme ce qu'on appelle le *complexe argilo-humique*. [1].

Les produits de décomposition des êtres vivants s'incorporent au sol, se mélangent aux substances minérales et représentent donc la matière organique « MO » du sol.

Ces « MO » sont multiples et se transforment sans cesse, puisque leur devenir est de redonner les substances ayant servi à les construire, pour servir à nouveau à l'édification de nouvelles MO. [5]

- La biomasse :

Le sol est un milieu vivant et c'est là une caractéristique essentielle qui le différencie d'une roche, où les êtres vivants ne sont présents qu'en surface, dans la croûte d'altération. L'abondance des êtres vivants dans le sol est considérable et peut étonner les non initiés. On estime alors les bactéries à plus de 10 millions d'individus par gramme de sol, les champignons et les actinomycètes (micro-organismes très proches des bactéries) à pas loin de d'un million par gramme. Les algues (végétaux eucaryotes chlorophylliens) sont par contre moins abondantes. Il faudrait, pour compléter le panorama de ce que l'on appelle la microflore des sols, rajouter les lichens surtout en surface du sol, les champignons mycorhiziens qui vivent en symbiose avec les racines des plantes et les virus qui sont particulièrement mal connus.

Les bactéries sont les micro-organismes les plus abondants et elles tirent en général leur énergie à partir de réactions chimiques, on les dénomme chimiotrophes.

Pour une grande partie d'entre elles, la rupture des liaisons C-H présents dans les composés organiques constitue la base de leur énergie, mais toutes les réactions d'oxydo-réduction peuvent également être source d'énergie d'où l'importance des bactéries dans les cycles d'azote, du fer, du soufre...

**I-1-3 Rôle des êtres vivants dans les sols :**

Les êtres vivants jouent un rôle essentiel à la fois dans la formation du sol et dans son fonctionnement. On peut dire que grâce à la quantité et à la diversité de ces êtres présents, le sol va constituer un véritable réacteur biologique. L'un des processus principal concerne évidemment la dégradation de la matière organique et les cycles qui en dépendent directement comme celui du carbone et de l'azote, mais les êtres vivants participent aussi à la dégradation des roches et des minéraux et à la réalisation d'associations organo-minérales qui structurent le sol à différentes échelles [6]

**I-1-4 Propriétés physico chimiques des sols :****I-1-4-1 Propriétés physiques :****➤ Texture :**

La texture précise la proportion des divers éléments physiques du sol. Le triangle des textures (sable – argile – limon) indique à quel type appartient le sol considéré. Cette analyse se fait par granulométrie qui est restreinte à un diamètre < 2mm, les fractions supérieures à ce diamètre sont considérées comme cailloux et gravier

La détermination de la texture du sol se fait par référence à :

Les sables fins : de 2 mm à 50 µm ;

Les limons : de 50 µm à 2 µm ;

La fraction argileuse : < à 2 µm [4]

**➤ Structure :**

La structure traduit la façon dont les particules terreuses sont disposées les unes par rapport aux autres. Elle résulte de la force de cohésion de l'argile et de l'humus qui tendent à agglomérer entre elles les particules. On peut distinguer à la vue et au toucher divers types de structures :

- Structure élémentaire ou particulaire

Le sol est formé en majeure partie par des éléments du squelette non associés entre eux, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de cohésion. Le sol est très meuble et ces particules peuvent être simplement des minéraux : cendreuses, poudreuses, sableuses, granuleuses ou pierreuses et elles peuvent être aux contraire organiques et se distinguent alors par leur forme fibreuse (racines) ou feuilletées (feuilles superposées) [5].

### - Structure fragmentaire

Les constituants solides sont rendus solidaires par le complexe argilo-humique, ils constituent des agrégats plus ou moins gros, entre lesquels se trouvent des vides permettant la circulation de l'air et de l'eau ainsi que la pénétration des racines. Le complexe joue le rôle de réserve d'eau et de d'éléments nutritifs. C'est la structure des meilleures terres de culture.

### - Structure compacte ou massive

Aucun vide n'existe entre les particules qui forment un bloc uni et les éléments massifs se distinguent d'après la dimension de leurs constituants en :

\* Ciment formé d'éléments très fins

\* Grès où les éléments sableux sont entourés d'éléments très fins

\* Pouding ou brèche où les éléments de taille des graviers sont noyés dans un ciment fin. [6]

#### ➤ **Porosité :**

Les particules élémentaires et les agrégats que renferme le sol laissent des espaces lacunaires causés par des fissurations spontanées, le trajet des racines, de l'eau et des vers et dont la grandeur et la proportion varient avec l'architecture interne du sol, c'est-à-dire sa texture et sa structure. On désigne sous le nom de porosité le volume des espaces lacunaires remplis d'eau ou d'air exprimé en % du volume total du sol. [6]

#### ➤ **Perméabilité :**

On appelle perméabilité l'aptitude d'un sol à laisser passer l'eau vers les couches inférieures ; elle dépend de la texture et de la structure. Sa détermination est nécessaire au calcul des réseaux de drainage et on distingue deux types de roches du point de vue hydrogéologique :

\* Roche à perméabilité d'interstices, comme les sables et les graviers

\* Roche à perméabilité de fissures, c'est le cas de la roche calcaire.

C'est les colloïdes du sol argileux et de l'humus qui possèdent le pouvoir absorbant le plus élevé et donc la moindre perméabilité d'où le nom du complexe absorbant attribué au complexe argilo-humique. [1]

➤ **Capacité de rétention :**

C'est la quantité d'eau retenue par le sol, elle représente l'humidité totale et se calcule par la différence de poids d'un échantillon avant et après séchage à 105°C. Ce paramètre dépend également de la structure et texture du sol.

**I-1-4-2 Propriétés chimiques :**

➤ **Le pH :**

L'eau étant entièrement dissociée en ions OH<sup>-</sup> et H<sup>+</sup>, chaque variation d'une unité de pH traduira une variation de concentration de H<sup>+</sup> d'un facteur 10 vers les valeurs acides de pH <7 ou de valeurs alcalines de pH >7.

Le pH des sols est une propriété chimique essentielle qui détermine le comportement des éléments chimiques, mais aussi le comportement des êtres vivants (microflore et végétation).

[6]

➤ **Potentiel Redox :** Il est réparti en quatre domaines selon [4]

- De 800 à 450 mv : L'oxygène est fortement présent et la nitrification est active
- De 450 à 0 mv : Le milieu devient pauvre en oxygène, ce qui ralentit la décomposition de la matière organique
- de 0 à -200 mv : Le milieu est anoxique, la matière organique se décompose par fermentation anaérobie et les sels ferreux s'accumulent
- de -200 à -300 mv : La réduction de sulfure d'hydrogène est totale, la matière organique fermente avec dégagement de méthane.

**I-2 Les hydrocarbures :**

**I-2-1 Définition et formation :**

Les hydrocarbures sont des substances organiques contenant essentiellement des atomes de carbone et d'hydrogène, ils sont issus de la décomposition de la matière organique des plantes et d'animaux en particulier des couches de plancton se trouvant dans les océans, entraînées par les courants d'eau jusqu'aux nappes profondes du sous-sol, et ce, il y a des dizaines de millions d'années. D'autre part, en s'enfouissant dans le sol, la roche mère est soumise à des températures de plus en plus fortes et la matière organique qui la

compose se retrouve écrasée par le poids des sédiments qui s'accumulent, la pression augmentant de 25 bars par 100 mètres, à un kilomètre sous terre, il fait déjà 50 °C pour une pression de 250 bars ! Dans ces conditions physiques, la matière organique évolue peu à peu.

- les atomes de carbone et d'hydrogène se réorganisent et s'associent avec l'oxygène encore présent dans la roche ;
- les atomes d'azote, de soufre et de phosphore, autres éléments essentiels du vivant, finissent par disparaître.

Ainsi, la matière organique se transforme en kérogène. Il s'agit d'un matériau intermédiaire composé d'eau, de CO<sub>2</sub>, de carbone et d'hydrogène, qui se changera ensuite en pétrole ou en gaz. À 2 200 mètres de profondeur, lorsque la température du sous-sol atteint 100 °C, le kérogène commence à générer des hydrocarbures :

- entre 2 200 et 3 800 mètres, il se change en pétrole. Cet intervalle de profondeur est appelé fenêtre à huile, "huile" étant ici l'autre nom du pétrole ;
- quand l'enfouissement de la roche mère se poursuit entre 3 800 et 5 000 mètres, la production d'hydrocarbures liquides atteint un pic. Les liquides produits deviennent de plus en plus légers et passent à l'état gazeux : ils donnent du gaz méthane, le plus léger des hydrocarbures. Cet intervalle de profondeur se nomme fenêtre à gaz. [6] [7]

### **I-2-2 Importance des hydrocarbures :**

Les hydrocarbures sont utilisés sous toutes leurs formes et ont une place prépondérante dans l'économie. En effet, ils sont utilisés comme principale source d'énergie (carburant) pour tous types de moteurs et leur dérivés (huiles, graisses) sont destinés à leur entretien.

### **I-2-3 Classification des hydrocarbures :**

La composition du pétrole brut varie avec les origines géographiques. Il est essentiellement constitué d'hydrocarbures dont les molécules sont une association de carbone (83 à 88%) et d'hydrogène (11 à 14%) auxquels viennent s'ajouter des composés oxygénés (0.1 à 0.5%), azotés (0.05 à 0.5%) et soufrés (0.01 à 6%). Enfin, il renferme aussi des traces de métaux en particulier du vanadium. [8] [9] [10] [11]

Les hydrocarbures constituant le pétrole se rangent en trois grandes familles :

- Les paraffines : ce sont des composés aliphatiques saturés d'un enchainement d'atomes de carbone auxquels sont attachés des atomes d'hydrogène, leur formule générale est :  $C_nH_{2n+2}$ .

Les paraffines comportant jusqu'à 4 atomes de carbone sont gazeuses à température ambiante. Celles ayant entre 5 et 20 atomes de carbone sont liquides et enfin, celles à plus longues chaînes sont solides.

Quant aux températures d'ébullition, plus le nombre d'atomes de carbone est grand plus la température est élevée.

- Les naphthalènes : composés aliphatiques insaturés comportant des atomes de carbone arrangés en cycles, sur lesquels peuvent se greffer des chaînes linéaires, leur formule brute est :  $C_nH_{2n}$ .
- Les aromatiques : molécules ayant des cycles dérivés du benzène, de formule générale :  $C_nH_{2n-6}$ .

Sur ce cycle se greffent une large variété de substituant, on cite :

- Les radicaux hydrocarbures aliphatiques (méthyle, éthyle, ...) qui forment l'essentiel de ce groupe ; par exemple le toluène ;
- Le chlore et autres halogènes donnant la famille des chlorobenzènes ;
- L'alcool qui forme le phénol ;
- Les nitrates qui confèrent des propriétés explosives
- Un second cycle de benzène qui va donner les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) pouvant également comporter des ramifications au niveau des noyaux de type alkyles, atomes de soufre, azote, oxygène... [12]

#### **I-2-4 Le gasoil :**

Le gasoil, tenant son nom de l'association gaz et huile (gas-oil), est l'un des premiers et principaux produits de distillation du pétrole. Composé d'hydrocarbures saturés à environ 60% et aromatiques à 40% selon l'origine, la proportion de carbone dans le gasoil s'estime à 86,27% et celle de l'hydrogène à 13,38%. [13] [14] [15]

Le nom du gasoil reflète aussi son appartenance à la catégorie intermédiaire entre les hydrocarbures légers et lourds, il est aussi utilisé à grande échelle comme carburant des moteurs Diesel. Ses principales caractéristiques sont :

- Couleur jaune clair
- masse volumique à 15 °C :  $820 < \rho < 860 \text{ kg/m}^3$ ,
- viscosité dynamique 32,6 SUS - 40,1 SUS (à 37,7 °C) [17]
- température d'ébullition entre 190 et 300°C

### **I-3 Pollution du sol :**

On parle de pollution d'un sol quand, par l'apport d'éléments de l'extérieur, ses caractères changent dans telle mesure que son utilisation normale est limitée.

Un sol est donc pollué lorsque :

- Il contient des éléments ou des facteurs nuisibles au sol lui-même, il ne peut plus assurer sa fonction de milieu de croissance des végétaux, c'est-à-dire sa fertilité chimique et/ou physique est atteinte.
- Il contient une substance agissant de façon néfaste sur la plante.
- Il contient une substance causant une pollution des eaux de surface (érosion chimique : entraînement des corps dissous par lessivage ou par ruissellement)

### **I-3-1 Pollution par les hydrocarbures :**

Les hydrocarbures sont, des substances indispensables au quotidien des populations et comme tout composé organique fossile, il n'est pas spontanément biodégradable, il s'accumule dans la nature et génère ainsi des pollutions importantes et différentes à tous ses stades d'utilisation c'est-à-dire de son exploitation à son rejet après usage et le gasoil en fait bien évidemment partie.

Cette pollution touche toutes les parties de l'écosystème : le sol, l'eau et l'air.

La pollution du sol par ces substances se manifeste généralement suite à :

- une infiltration à long terme dans les espaces de stockage et les stations services (mauvaise étanchéité)
- déversement accidentel de pétrole dans les bases d'exploitation ou lors du transport par camion-citerne ou dans le cas d'une rupture d'oléoduc...

**I-3-2 Pollution du sol par le gasoil :**

Le gasoil est un important dérivé du pétrole du point de vue usage, il est donc produit en grandes quantités et par conséquent, les accidents dus à sa manipulation particulièrement les déversements au niveau des plates-formes d'exploitation du pétrole et les différents modes de son transport engendrent une contamination des sols et de l'eau qu'il faudra maîtriser de manière la plus faisable et la plus efficace.

**I-3-3 La dépollution :**

La décontamination est un ensemble de procédés consistant à épurer ou tout au moins à isoler un milieu ayant été exposé à une pollution chronique ou récurrente qui l'a rendu inutilisable pour des activités domestiques, agricoles ou industrielles. Le traitement concerne des terres excavées ou des sols et nappes phréatiques encore en place.

Opération difficile et généralement coûteuse, la mise en œuvre de la filière est liée à la nature du polluant et au degré de contamination, et l'assainissement d'un sol doit commencer par une étude préalable approfondie car il faut bien évaluer les avantages et les inconvénients des diverses méthodes.

Chaque site mérite donc un traitement spécifique avec pour objectif de rendre le risque identifié acceptable et/ou de restaurer une ressource. On transforme ainsi un site pollué ou contaminé en un site réhabilité.

Pour résoudre un problème de décontamination d'un sol, il n'existe pas de solution exclusive. Le traitement à mettre en œuvre est souvent une combinaison de plusieurs techniques.

La phase de traitement comprend :

- la fixation d'objectifs de dépollution en fonction de l'usage ultérieur du site ;
- l'étude de faisabilité d'un traitement adapté ;
- le choix et la mise en œuvre d'un traitement ;
- l'évaluation de l'impact résiduel

A l'issue de cette phase, le site traité pourra soit être banalisé, soit faire l'objet de mesures de surveillance ou d'une restriction d'usage compte tenu de la pollution résiduelle. [1]

**I-3-4- Biodégradation des hydrocarbures :**

La dégradation biologique des hydrocarbures rejetés dans l'environnement dépend du caractère de biodégradabilité intrinsèque du polluant mais aussi de l'existence de microorganismes dans les sols et les eaux souterraines capables d'effectuer ce processus [18]

On a depuis longtemps attribué la faible dégradation des contaminants à leur persistance. Mais depuis le début des années 90, ce phénomène est plutôt expliqué par leur faible solubilité dans l'eau et par conséquent la limitation et la difficulté de leur catabolisme [19]

**I-4 Techniques de remédiation des sols pollués :**

On distingue dans ces procédés :

- les traitements in situ
- les traitements ex situ (sur et/ou hors site)

Et dans les deux cas, il existe des traitements physico-chimiques et biologiques.

**I-4-1 Les techniques In-Situ :**

Les procédés de traitement du sol *in-situ* offrent l'avantage que le volume de sol à décontaminer reste en place et donc l'excavation n'est pas nécessaire. Quant au polluant, il est soit extrait et traité en surface, soit dégradé dans le sol ou encore fixé dans le sol.

Nous donnerons dans ce qui suit, quelques exemples types de traitement du sol in situ ayant donné de bons rendements

**I-4-1-1 Procédés physicochimiques :****➤ Lavage in situ (lessivage) :**

Cette technique est développée par l'industrie des mines et du pétrole et convient pour toutes sortes de polluants (organiques et inorganiques).

Le lessivage consiste à asperger le sol d'une solution qui s'infiltre dans le sol et collecte le polluant. La solution chargée de polluant est ramenée à la surface par pompage dans des puits ou des drains enterrés, placés en limite aval de la zone polluée. Comme d'importantes quantités d'effluent contaminé sont souvent générées, il est nécessaire pour des raisons économiques, de recycler, après purification le solvant pendant l'extraction. Ainsi le cycle peut se dérouler en continu durant de très longues périodes.

Bien que la technique donne des résultats appréciables, l'introduction dans le sol des solutions susceptibles d'avoir des effets toxiques alarme les utilisateurs car ça pourrait avoir des conséquences sur l'équilibre physico-chimique du sol traité. [1]

➤ **Pompage :**

La technique de pompage est employée surtout pour les polluants organiques liquides (hydrocarbures et huiles) surnageant à la surface de la nappe phréatique. Elle consiste en un pompage direct par le biais de pompes d'aspiration et à travers des forages, de la phase organique présente dans le sol et flottant à la surface de la nappe d'eau. La pollution extraite subit ensuite le traitement adéquat.

Bien que cette technique concerne des composés insolubles dans l'eau, la dissolution dans la phase aqueuse n'est cependant pas nulle, il se crée alors une couche de pollution dissoute entre la phase aqueuse et organique. Aussi, en plus de la pompe d'aspiration directe, la pollution dissoute est extraite par une pompe de rabattement et traitée en surface. [1]

➤ **Venting :**

Le venting est une opération d'injection d'air (ventilation) ou d'extraction de l'air du sol pour favoriser la volatilisation des composés organiques à extraire. Le puits d'extraction aspire les gaz qui se trouvent dans le sol dans un rayon déterminé et les molécules polluantes, volatilisées par la mise en dépression de la zone non saturée, sont entraînées dans le puits et subiront des traitements d'adsorption sur charbon actif ou d'incinération.

Ce traitement est intéressant pour récupérer les composés volatils comme l'essence, le kérosène, ou les solvants de l'industrie chimique. Néanmoins, il faudra prendre en compte le risque de remontée de la nappe phréatique résultant du procédé d'extraction sous vide, dans ce cas, l'installation sera équipée d'un dispositif de séparation eau/vapeur dans le cas de dépression engendrant l'aspiration de cette eau souterraine. [1]

➤ **Sparging :**

Par définition, le sparging est un processus d'élimination des gaz dissous dans un solvant par barbotage dans une solution de gaz inerte insoluble dans la phase tel que l'hélium ou l'azote. La méthode consiste à injecter de l'air en dessous du niveau de la nappe d'eau souterraine et le flux d'air est aspiré et traité en surface comme pour le venting. En parallèle, la dissolution de l'oxygène de l'air dans la phase aqueuse permettra de favoriser le développement d'une biomasse aérobie consommatrice de certains composés organiques. [1]

➤ **Slurping :**

Le slurping ou l'extraction triple phase (ETP) consiste à traiter simultanément les gaz du sol, le polluant en phase libre dans la frange capillaire et l'eau de la nappe. Son principe repose toujours sur l'aspiration de ces gaz dans les deux phases.

Le gaz aspiré par la pompe à vide passe dans un séparateur de condensats qui diminue la teneur en eau, puis est conduit vers un appareil d'absorption des polluants volatils, en général un échangeur à charbon actif ou un four à catalyse dans lequel le gaz est brûlé. Le liquide est quant à lui, dirigé vers un décanteur et l'eau décantée passe dans un filtre à charbon actif avant son rejet dans le milieu naturel. S'agissant souvent d'hydrocarbures, les liquides restant de la décantation sont évacués vers un traitement ultérieur. [1]

➤ **Stripping :**

Le stripping est utilisé pour le traitement des polluants vaporisables de type solvants chlorés, il diffère du sparging par l'équipement employé en surface et par le type de fluide injecté. Son principe consiste à chasser un soluté gazeux de l'eau où il est dissous, par l'action d'un fluide dit « gaz laveur » dont le rôle est de provoquer une chute de pression du polluant dans la phase gazeuse. [1]

➤ **Oxydation :**

Cette technique consiste en une injection sous forme liquide ou gazeuse dans le sol d'un oxydant qui va détruire les polluants présents dans le milieu. Cette oxydation peut aboutir à la destruction totale du polluant ou à sa transformation en un composé moins toxique et facilement biodégradable. Dans certains cas, le processus peut conduire à la minéralisation du polluant. [1]

Les oxydants fréquemment utilisés sont :

- Le permanganate ( $\text{MnO}_4^-$ )
- Le peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )
- Le réactif de Fenton ( $\text{H}_2\text{O}_2/\text{Fe}^{2+}$ )
- L'ozone ( $\text{O}_3$ )

➤ **Solidification et stabilisation :**

La stabilisation consiste à réduire la mobilité d'un polluant dans le sol. Les polluants ne sont pas détruits mais leur impact sur l'environnement est réduit. Ces techniques sont souvent utilisées pour les polluants non biodégradables (composés organiques ou métaux lourds).

Le principe consiste à limiter la solubilité du polluant par réaction chimique, il est donc moins mobilisable par lixiviation. On peut également rendre inerte le polluant en le mélangeant à de la chaux ou de la cendre. [1]

#### **I-4-1-2 Procédés thermiques :**

##### **➤ Volatilisation :**

Elle peut être obtenue par injection de fluide chaud (eau ou air) par chauffage à haute fréquence ou par une résistance électrique. Les polluants volatilisés (COV) subiront un des traitements des effluents gazeux déjà cités. [1]

##### **➤ Vitrification :**

Ce procédé est en fait une solidification/stabilisation par élévation de température. Dans la première phase de chauffage, les polluants sont volatilisés ou pyrolysés, ils passent alors sous forme gazeuse et sont récupérés à la surface pour traitement. Le sol contaminé est quant à lui, transformé en matériau fondu qui, une fois refroidi se vitrifie et encapsule les polluants, il est alors stable chimiquement. [1]

#### **I-4-1-3 Procédés biologiques :**

Dans les sites ayant régulièrement contaminés par les hydrocarbures par exemple, la densité des bactéries capables de les dégrader est de  $10^6$  à  $10^8$  par gramme de sol. On considère généralement qu'une concentration de  $10^5$  à  $10^6$  est suffisante pour induire la biodégradation de la plupart des substrats organiques. [1]

##### **➤ Biodégradation aérobie :**

Lente, avec un rendement limité, la biodégradation aérobie est une technique éprouvée sur les hydrocarbures aliphatiques, ses performances étant quelques peu inférieures pour les hydrocarbures polycycliques ou chlorés.

Une condition préalable pour la dégradation biologique des polluants dans un sol non excavé est la microflore active. L'activité de dégradation de celle-ci peut être augmentée au moyen des interventions extérieures, par exemple source artificielle d'oxygène. L'apport des nutriments nécessaires à la croissance (azote, phosphore) est généralement ajouté à des proportions C/N/P de 100/10/1. La durée de la bioremédiation in situ est généralement plus longue que celle hors site. [1].

➤ **Bioventing :**

Cette technique allie le principe de décontamination, la biodégradation et la ventilation. On réalise dans ce procédé une aération forcée dans le sol non saturé (au dessus du niveau de la nappe d'eau) et cet apport d'oxygène est accompagné par celui de nutriments (azote, phosphore) favorisant le développement de la microflore dégradante de la matière organique. [1]

➤ **Traitement de confinement :**

Lorsque la neutralisation des polluants n'est pas techniquement possible, des méthodes existent et consistent à isoler la couche de sol polluée pour éviter une contamination progressive des couches saines. On élimine ainsi le risque en créant des barrières entre le polluant et le milieu menacé. Ces méthodes sont généralement employées à titre de mesure d'urgence. [1]

Plusieurs types de confinement existent, on cite :

- Recouvrement de la surface :

Elle consiste à placer des structures imperméables (généralement des couches d'argile compactée ou d'une feuille de plastique destinée à cet usage) pour empêcher l'infiltration des eaux pluviales et des eaux de ruissellement dans le lieu contaminé, et d'empêcher la migration des contaminants hors du lieu.

- Enceinte de confinement :

La construction d'une enceinte fermée destinée à empêcher la dissémination des produits dangereux est la méthode optimale pour toute pollution complexe, en grande quantité et en grande profondeur.

- Barrière hydraulique :

Traitement d'urgence, parfois utilisé à titre provisoire avec de grands volumes d'eau mis en jeu, la barrière hydraulique concerne toute pollution de la nappe. Elle consiste en la modification du gradient d'écoulement par combinaison de puits d'injection et d'extraction pour que l'eau circulant de l'extérieur vers l'intérieur ne soit pas contaminée par le lessivat échappé de la zone recelant la pollution. [1]

**➤ Phytoremédiation :**

La phytoremédiation regroupe toutes les technologies utilisant les plantes pour transformer, dégrader, concentrer, stabiliser ou volatiliser des polluants tels que les composés organiques et les éléments métalliques présents dans le sol à condition que ceux-ci soient en surface.

Cette technique d'assainissement utilise des plantes herbacées ou essences ligneuses forestières pour la stabilisation ou l'extraction. [1]

Plusieurs types de phytoremédiation existent :

- La phytoextraction utilisant des plantes accumulatrices de polluants.
- La phytostabilisation utilisant des plantes réduisant la biodisponibilité, la mobilisation ou le lessivage des polluants.
- La rhizofiltration utilisant des racines pour absorber, concentrer ou précipiter les polluants dans les effluents liquides.

En plus de ces techniques, d'autres procédés sont en cours de développement, parmi lesquels :

- La phytovolatilisation consistant en l'extraction du polluant par la plante et sa volatilisation par évapotranspiration de celle-ci
- La phyodégradation par catalyse de la dégradation des substances absorbées et leur transformation en produits moins toxiques, et ce, par la production de certaines enzymes par la plante.

**I-4-2 Procédés de traitements Ex-Situ :**

Ce type de traitement, applicable à toutes les pollutions, consiste à extraire le polluant du milieu ou le polluant et son milieu (excavation du sol contaminé) avant de les traiter sur site ou hors site.

Les matériaux concernés sont les sols en tout type, les sédiments, les boues, les déchets solides et produits industriels (barils, hydrocarbures, pesticides...).

Les méthodes employées sont les mêmes que dans le cas des traitements in-situ, sauf que le sol est d'abord excavé puis transféré à l'unité de traitement adéquat (sur site ou hors site).

**I-4-2-1 Procédés physicochimiques :****➤ Dépollution par lavage :**

C'est en fait une technique d'extraction physico-chimique et de séparation concernant surtout les hydrocarbures légers, essence, BTEX, et HAP. Le procédé ne détruit pas la pollution mais la transfère dans une phase liquide en vue d'un traitement ultérieur, ce liquide peut être :

- Un solvant dans le cas des hydrocarbures (BTEX, PCB, HAP, essence...)
- Un fluide supercritique : c'est un gaz mis sous des conditions de température et de pression déterminées, pouvant, extraire les polluants (hydrocarbures ou métaux lourds) contenus dans le sol, par exemple le CO<sub>2</sub>.
- Hydrogénation : concerne la minéralisation des nitrates et des composés organochlorés présents dans les eaux souterraines, et ce, utilisant l'hydrogène. Ceci conduira à la transformation de ces polluants en azote et en HCl respectivement. [1]

**I-4-2-2 Procédés thermiques :**

Le traitement thermique est une option intéressante pour les post-traitements fortement chargés en polluants organiques, on distingue dans ce procédé :

- La désorption thermique : c'est le principe de la volatilisation du polluant (COV non chlorés) grâce à l'application de hautes températures, les gaz récupérés sont ensuite oxydés totalement en CO<sub>2</sub>.
- L'incinération : elle rejoint le même principe de traitement par la chaleur sauf que la température est plus élevée et conduit à la pyrolyse du polluant.
- la réduction thermique : la chaleur est appliquée sur le sol mais le gaz n'est plus de l'oxygène mais généralement de l'hydrogène, ce dernier va donc réduire les molécules organiques en produits moins toxiques. [1]

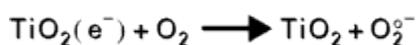
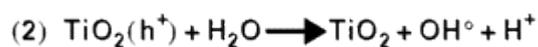
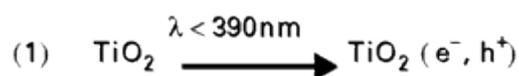
**I-4-2-3 Procédé d'oxydation avancé :**

La photo-oxydation sous ultraviolets est basée sur l'utilisation d'un rayonnement ultraviolet associé à un oxydant ou un photocatalyseur pour détruire les polluants par oxydation Elle permet de traiter les polluants organiques dissous dans les eaux et peut conduire à leur minéralisation (transformation en eau, gaz carbonique et sels). La photo-oxydation sous ultraviolets est utilisée pour le traitement d'eaux de nappe contaminées par des polluants organiques dissous.

➤ **Principe :**

La photo-oxydation sous ultraviolets consiste à oxyder les polluants organiques dissous dans l'eau à traiter par formation d'une espèce à haut fort pouvoir oxydant, le radical hydroxyle OH. Ce radical est capable d'oxyder la plupart des espèces organiques, pouvant aboutir à leur minéralisation (destruction en eau, gaz carbonique et sels). En pratique, le radical hydroxyle peut être formé par association d'une espèce oxydante et d'un rayonnement UV ou par association d'un photocatalyseur et d'un rayonnement UV. Trois grands procédés de photo-oxydation sont utilisés en traitement d'eau : le procédé H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, le procédé O<sub>3</sub>/UV et le procédé TiO<sub>2</sub>/UV. Le dernier procédé cité est basé sur l'utilisation d'un photocatalyseur, le dioxyde de titane TiO<sub>2</sub>.

Le mécanisme est le suivant :



➤ **Type de pollution traitée**

La photo-oxydation permet de traiter les polluants organiques dissous dans de l'eau de nappe. Un très large spectre de polluants organiques est traité par photo-oxydation sous ultraviolets : hydrocarbures, solvants chlorés, pesticides... Toutefois, dans le cas de molécules organiques complexes, il faut s'assurer que l'oxydation ne conduit pas à la formation de sous-produits plus toxiques que le produit de départ. Pour le procédé TiO<sub>2</sub>/UV, le dioxyde de titane est fixé sur un support approprié à l'intérieur du photoréacteur. [20]

**I-4-2-4 Procédés biologiques (bioremédiation):**

Les procédés de dépollution biologique visent la dégradation de la matière organique en favorisant l'activité des bactéries autochtones par adjonction de nutriments de croissance, ou de bactéries spécialement cultivées pour ce but. La technique concerne le nettoyage des sols

contaminés par l'infiltration d'hydrocarbures due à des fuites, à des accidents ou des problèmes de stockage et de transport.

Les principales substances visées par ces traitements sont :

- les hydrocarbures pétroliers (gasoils, fuels, essences, huiles minérales...)
- les déchets d'exploitation du pétrole (boues et résidus d'huile)
- les résidus de l'industrie chimiques (acides, alcools)
- composés organiques halogénés (pesticides, herbicides...)

➤ **Epandage contrôlé et compostage :**

Ce traitement consiste à étaler le sol contaminé sur de grandes surfaces imperméables où l'apport de fertilisants et d'aération mécanique sont effectués.

La durée du traitement est en général estimée à un ou deux ans au dépend des conditions de biodégradation et le principal risque à considérer est la migration du polluant dans le sol et sa lixiviation par l'eau libre. [1]

➤ **Biodégradation en andains :**

Cette technique traite les pollutions organiques imprégnées dans le sol, elle combine les deux principes de biostimulation et de bioaugmentation. [1]

- Biostimulation :

La biostimulation désigne la stimulation des microorganismes pour favoriser leur activité. En effet, cette opération est effectuée pour augmenter le taux de biodégradation du contaminant, et ce, par optimisation des conditions du milieu à savoir :

- La mise au point de l'aération et de l'humidité (pour les techniques aérobies) ;
- L'ajout de nutriments de croissance (azote et phosphore en particulier) à la microflore dégradante
- La bioaugmentation :

C'est une intervention consiste à ensemercer le milieu contaminé par une grande quantité de microorganismes (bactéries, enzymes...) spécialement cultivées et adaptées au polluant. Elle permet donc d'augmenter le rendement et de diminuer le temps de biodégradation (phase d'adaptation évitée).

## ➤ **Biodégradation en réacteur :**

Comme son nom l'indique, cette méthode consiste à réaliser la biodégradation dans un réacteur (bassin, colonne, cuve fermée...) en ajoutant les éléments nécessaires au bon fonctionnement du processus. Généralement employées pour des sols et des boues contaminés par des polluants peu biodégradables ou des sols argileux difficiles à traiter. [1]

## ➤ **Biopile :**

La méthode de la biopile réalise en fait une atténuation naturelle contrôlée. En effet, le dispositif est réalisé de façon à contrôler et à manipuler aisément les paramètres de la biodégradation.

Le dispositif biopile comporte :

- une cuve de matériau imperméable contenant le sol à traiter
- un système d'aération à la base de la cuve
- un système d'aspersion d'eau et de nutriments éventuellement
- un mécanisme d'homogénéisation du sol
- un système éventuel de recueil des lixiviats

Cette technique est employée dans le cas d'une pollution organique de moyenne concentration et le fait de contrôler les paramètres nécessaires à la biodégradation font que la méthode donne de meilleurs rendements à des temps relativement raisonnables par rapport à une atténuation non contrôlée.

## ➤ **Facteurs influençant la biodégradation :**

- la température : paramètre influant sur le taux de biotransformation, elle est optimale entre 20 et 40°C
- l'humidité du sol : facteur également nécessaire au bon développement de la microflore épuratrice
- la biodisponibilité : c'est-à-dire la tendance du polluant à être accessible aux microorganismes, par exemple : les sols argileux et humiques adsorbent les polluants et ces derniers deviennent inaccessibles aux bactéries.

# **Matériel et méthodes**

### **II-1 Matériel utilisé :**

- Appareil Ultra-sons : WiseClean – Wisd.
- Agitateur : J.P. Selecta - Vibromatic
- Pompe péristaltique : J.P. Selecta
- Agitateur mécanique : Janke & Kunkel – Ika labotechnik
- Pompe d'aquarium : Champion aquarium air pump
- Etuve : J.P. Selecta Digotonic
- Balance de précision : Ohaus Adventurer
- Bain-marie : Memmert Schutzart Din-40050 IP20
- pH mètre : Hanna pH 211- Microprocessor pH-meter

### **II-2 Méthodes d'analyse:**

Le but de notre travail est de restaurer un sol sujet à une pollution organique dans notre cas le gasoil et d'étudier le métabolisme bactérien qui s'en accompagne.

La technique de biorestauration mise en œuvre est la biopile dont le principe consiste à optimiser les conditions de biodégradation du polluant dans le sol après son excavation (technique ex-situ).

Pour ce faire, nous suivrons les étapes suivantes :

- Échantillonnage (excavation et préparation du sol) ;
- Caractérisation physico-chimique du sol ;
- Caractérisation des hydrocarbures ;
- Analyse microbiologique du sol ;
- Production du sol enrichi par bioréacteur ;
- Traitement du sol par biopile ;
- Suivi des paramètres de la biodépollution ;
- Traitement des rejets de la biopile.

#### **II-2-1 Echantillonnage :**

Pour mener notre travail, nous avons choisi une quantité de 80 kg de sable initialement non-pollué. Cet échantillon a été séché à l'air libre, tamisé (diamètre des mailles 2mm) afin d'en

éliminer les fractions rocailleuses puis stocké au sein du laboratoire à température ambiante en vue de son étude.

### **II-2-2 Caractérisation physico-chimique du sol :**

#### **➤ Dosage du phosphore ( $P_2O_5$ ) :**

La détermination de la teneur en phosphore du sol sous sa forme «  $P_2O_5$  » se fait suivant la norme [20] et dont le principe consiste à faire réagir le phosphore soluble avec une solution de bicarbonate de sodium.

#### **➤ Dosage du carbone organique total (COT)**

Le dosage du carbone organique du sol s'effectue suivant la norme (MA 405- C 1.0) Le principe de la méthode consiste à ajouter une solution de bichromate de potassium à l'échantillon en présence d'acide sulfurique. Après cette réaction, le dosage de la quantité de bichromate n'ayant pas réagi avec l'échantillon permettra de déduire la concentration du carbone organique total.

#### **➤ Dosage de l'azote total ( $N_T$ )**

La quantité d'azote contenue dans le sol est déterminée par la méthode Kjeldahl selon la norme [21]. Elle consiste à minéraliser l'azote organique par de l'acide sulfurique à température élevée en présence de catalyseur. L'azote ammoniacal résultant est titré par de l'acide borique.

#### **➤ Extraction et dosage des hydrocarbures (HC)**

L'extraction des hydrocarbures du sol se fait par sonication et le calcul de la teneur en hydrocarbures se fait par gravimétrie.

Le principe consiste à extraire les hydrocarbures de l'échantillon à l'aide de l'hexane (solvant organique) en présence de gel de silice et de sulfate de sodium anhydre pour éliminer respectivement d'autres molécules polaires comme les graisses pouvant interférer et l'humidité non désirée.

L'appareil Ultra-sons servira quant à lui, à favoriser la migration des hydrocarbures du sol dans le solvant grâce à ses ondes.

Le filtrat récupéré à la fin de l'extraction sera mis dans une étuve dans le but d'évaporer le solvant et la teneur en hydrocarbures sera estimée par gravimétrie.

➤ **Mesure de l'humidité**

Le calcul de l'humidité du sol s'effectue suivant le protocole de la norme [22] qui consiste à mettre une quantité connue du sol dans un creusé et à noter son poids avant et après séchage à l'étuve à 105°C pendant environs deux (2) heures. Le taux de matière sèche est déduit à partir de cette humidité.

➤ **Mesure du pH**

La détermination du pH du sol suit la norme [23] qui consiste à mesurer le potentiel hydrogène d'une solution aqueuse de l'échantillon de rapport massique (poids sol/ solution : 1/5) à l'aide d'un appareil pH-mètre.

➤ **Granulométrie**

La granulométrie du sol se fait à l'aide d'un tamiseur électrique contenant des tamis empilés de taille des mailles décroissante de haut en bas. Une quantité connue de sol est introduite dans le plus haut tamis et le tout est laissé à tamiser pendant 20min. La quantité que contiendra chaque tamis sera recueillie et pesée afin de déterminer les pourcentages des diamètres de ce sol.

### **II-2-3 Caractérisation microbiologique :**

Afin d'estimer le pouvoir auto-épurateur du sol, nous avons:

- dénombré les germes totaux (bactéries) sur gélose nutritive, après ensemencement de 1 ml de la suspension en profondeur (incubation à 30°C pendant 48h);
- dénombré les mycètes (champignons et levures) sur gélose Sabouraud, après ensemencement de 0.2 ml de la suspension en surface par étalement (incubation à 20°C pendant 5 jours).

Les microorganismes sont extraits par la mise en suspension de 1g de sol dans 10ml d'eau physiologique et ensemencés sur chaque milieu après dilutions successives (1/10<sup>ème</sup>).

Le dénombrement des colonies se fait à l'aide d'un compteur de colonies.

### **II-2-4 Nutriments et humidité :**

La croissance bactérienne nécessite une source de carbone, d'azote et de phosphore ainsi qu'une humidité favorable. Le carbone est fourni par les molécules du polluant hydrocarbure (gasoil), l'azote et le phosphore sont quant à eux, assurés par un apport en urée et en K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> respectivement.

Ces trois nutriments sont apportés selon un rapport C/N/P étudié de 100/10/1 [18].

L'eau est sans doute un facteur important pour une bonne croissance bactérienne, aussi l'eau qui aura servi à la dissolution des nutriments assurera dans un premier temps l'humidité du milieu.

### **II-3 Description de la biopile :**

Le but de notre travail est d'étudier la cinétique de dégradation microbienne du gasoil dans le sol, et ce, suivant les paramètres de croissance que nous contrôlons. Nous avons choisi d'introduire un élément qui favoriserait cette biodégradation, c'est le surfactant Tween 80.

Le surfactant est en fait un tensioactif, il agit donc entre deux phases pour favoriser la migration de l'hydrocarbure (molécules hydrophobes) de la phase solide qui est la matrice du sol où il est imprégné vers la phase liquide pour faciliter sa biodisponibilité.

Nous avons introduit ce surfactant à deux pourcentages différents pour observer son effet sur la biodégradation et sur la croissance bactérienne. Notre dispositif comprend quatre biopiles.

Tout d'abord, les éléments communs aux quatre biopiles sont :

- La quantité de sol à traiter
- Le taux d'humidité
- La quantité de nutriments ajoutés (selon le même rapport C/N/P)
- L'aération

Les paramètres qui diffèrent sont par contre :

- La présence ou non du surfactant
- Le taux de surfactant ajouté
- Le traitement ou non du lixiviat récolté

Nous avons organisé notre dispositif comme suit :

- La biopile « B<sub>0</sub> » : contient le sol à traiter sans surfactant et sans traitement du lixiviat (biopile témoin) ;
- La biopile « B<sub>1</sub> » : contient le sol à traiter sans surfactant et avec traitement du lixiviat ;
- La biopile « B<sub>2</sub> » : contient le sol à traiter avec 0.1% de surfactant Tween 80 ;
- La biopile « B<sub>3</sub> » : contient le sol à traiter avec 0.2% de surfactant Tween 80 ;

La quantité de sol à dépolluer sera répartie équitablement sur une série de quatre bacs de biopiles identiques composant notre dispositif, soit 20 kg de sol par bac. Ces derniers sont de matériau imperméable (plastique), disposés légèrement en pente afin de favoriser

l'écoulement des eaux de lixiviation à travers les drains de récupération prévus à cet effet. Ces lixiviats seront destinés à un traitement ultérieur.

L'aération est assurée par des canalisations perforées, fixées au fond des bacs et reliées à un compresseur à air fonctionnant en continu.

Les nutriments sont dissous dans l'eau qui sert à humidifier le milieu.

Ce dispositif nous permet d'évaluer les performances de la Biopile.

### ➤ **Biopile couplée au POA :**

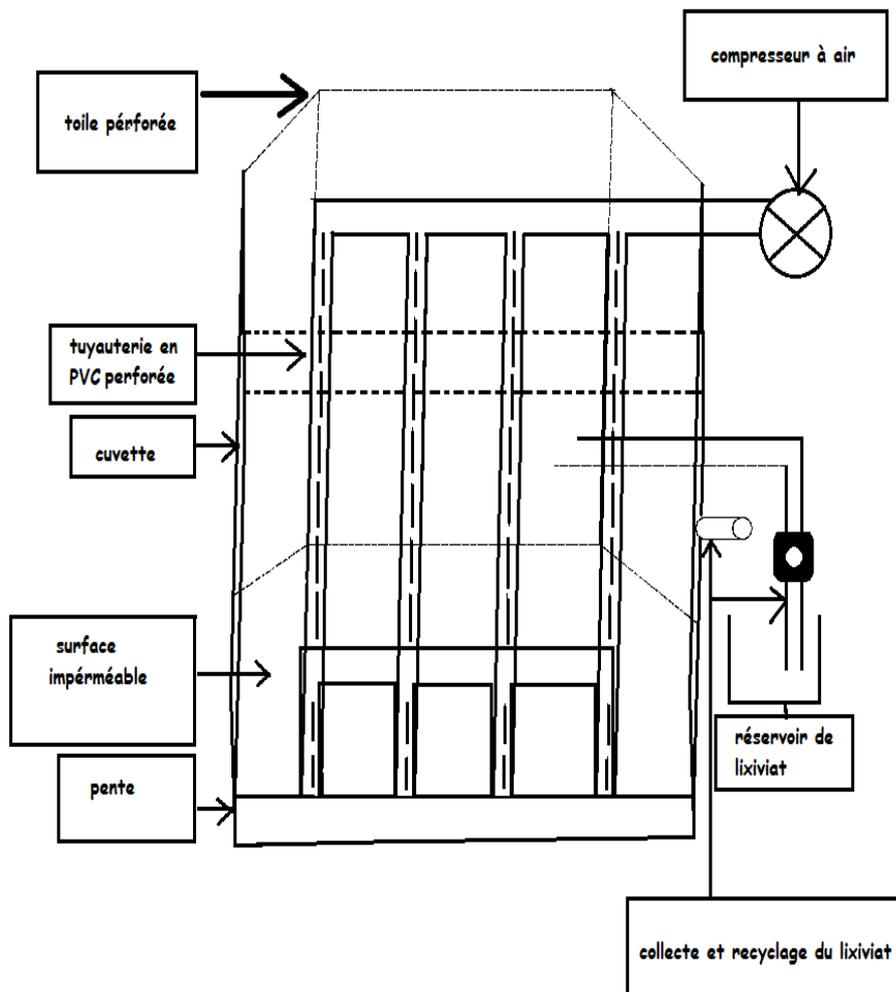
La biopile génère des lixiviats parfois chargés en hydrocarbures, un post-traitement consistant à dégrader ces derniers par le biais de la photocatalyse en présence d'UV.

Notre dispositif est composé :

- d'un récipient en amont du réacteur contenant l'effluent à traiter muni d'un système d'agitation mécanique ;
- du photoréacteur comportant les lampes UV et le catalyseur ( $\text{TiO}_2$ ) fixé sur un support approprié ;
- d'un récipient en aval du photoréacteur recevant l'effluent après son passage dans le réacteur ;
- d'une pompe péristaltique assurant la recirculation du lixiviat sorti du photoréacteur ;

L'avantage de ce procédé réside également dans son pouvoir désinfectant. En effet, les ultraviolets ont non-seulement la capacité de dégrader les composés organiques mais aussi de désinfecter l'effluent. On récupère donc un effluent désinfecté et contenant moins d'hydrocarbures.

Le schéma du dispositif biopile est illustré sur la Figure (I) ci-dessous :



*-Figure I- Schéma du dispositif biopile-*

#### II-4 Conduite de la bioremédiation :

Afin de réduire le temps de traitement du sol en biopile, nous avons procédé tout d'abord à son enrichissement biologique.

##### II-4-1 Production du sol enrichi:

L'inoculum est préparé à raison de 1% du poids total du sol contaminé, au quel nous rajoutons les nutriments selon le rapport C/N/P fixé à 100/10/1. Le tout est transféré dans un réacteur contenant de l'eau déminéralisée à raison de 10% (sol/eau). Les réacteurs sont incubés à 25°C, sous agitation pendant trois jours. Le sol enrichi de cette façon est ensuite mélangé au sol à traiter et va servir d'inoculum pour le traitement en biopile.

##### II-4-2 Traitement en biopile :

Le traitement en biopile-POA consiste en les opérations suivantes :

- 1) Ajout de nutriments (azote, phosphore), selon le rapport C/N/P fixé à 100/10/1 ;
- 2) Ajustement de l'humidité entre 25% à 85% de la capacité de rétention en eau [18] et récupération du lixiviat sortant ;
- 3) Injection d'air à travers le sol ;
- 4) Maintient de la température entre  $15^{\circ} < T^{\circ} < 40$  ;
- 5) Mélangeage du sol une ou deux fois par semaine

Au cours du traitement, certains de ces paramètres font l'objet d'un contrôle hebdomadaire :

- 1) Maintien de l'humidité entre 15% à 25% ;
- 2) Apport en nutriments si nécessaire, afin de conserver le rapport C/N/P.

Les paramètres de la biodégradation à contrôler sont :

- 1) La teneur en hydrocarbures dans le sol
- 2) Le nombre de microorganismes présents dans le sol

Les prélèvements du sol pour le suivi des paramètres de biodégradation sont effectués à des intervalles réguliers (tous les trois jours durant les deux premières semaines, puis une fois par semaine) pendant toute la durée du traitement.

le lixiviat récolté de chaque biopile fera aussi l'objet d'une évaluation de la teneur en hydrocarbures dans le lixiviat avant et après traitement par POA.

# **Résultats et discussions**

**III-1 Caractérisation du sol**

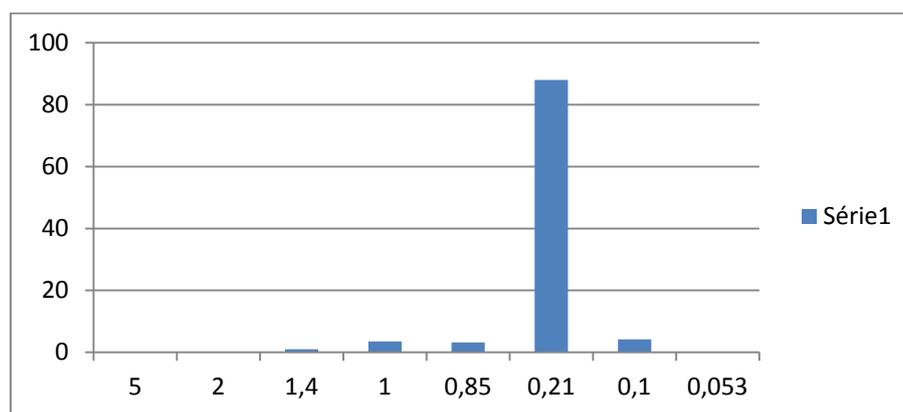
La caractérisation du sol est une première étude consistant en la caractérisation physico-chimique et microbiologique du sol considéré. Elle permet de définir les paramètres à ajuster afin de procurer de bonnes conditions pour la bioremédiation.

**III-1-1 Caractérisation granulométrique :**

Les résultats de l'analyse granulométrique sont illustrés dans le tableau (I) ci-après :

**Tableau I:** Proportions des diamètres du sol

Diamètre du tamis (mm)	Poids du sol retenu dans le tamis (g)	Pourcentage du diamètre du sol (%)
5	0	0
2	0.5	0.05
1.4	10	1
1	35	3.5
0.85	32	3.2
0.21	880	88.0
0.1	42	4.2
0.053	0.4	0.04

**-Figure II -**Pourcentages des diamètres du sol-

D'après le tableau I et la figure II, il apparaît clairement que le sol présente une texture sableuse à 88% en sable fin et 7.7% en sable grossier [24]. On conclue donc que notre sol est un sable fin. Selon **Samson (1994)** [25], l'analyse granulométrique nous renseigne sur la

texture du sol et son pouvoir d'adsorption des contaminants. Il est évidemment plus facile de traiter un sol sablonneux qu'un sol argileux car la circulation des nutriments et des bactéries ainsi que la biodisponibilité du polluant dans ce sol est plus facile. Des auteurs affirment que la teneur élevée en argile rend la remédiation difficile [26].

### III-1-2 Caractérisation physico-chimique :

L'étude physico-chimique permet de conclure si le sol fournit un environnement favorable au développement des microorganismes [25].

- *Tableau II : Caractérisation physico-chimique du sol*

PARAMETRES	VALEURS
pH	7.04
Humidité	0.78%
Matière sèche	99.22%
TPH	13.5 g/Kg de sol
Azote total	0.06 g/Kg de sol
Matière organique	2.76 %
Carbone organique total (COT)	1.6 %
Phosphore [P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ]	0.027 g/Kg de sol

D'après les résultats du Tableau II on observe un taux d'humidité insuffisant sachant que pour une bonne dégradation biologique en biopile, ce taux doit être compris entre 15 et 25% [18]. En effet, une teneur faible en eau constitue un facteur limitant dans la biodégradation [27].

Le pH de notre sol (pH=7.04) est compris dans l'intervalle  $5 < \text{pH} < 9$  citée par plusieurs auteurs, entre autres : [28] [18]. A ce pH, l'activité de la flore autochtone dégradante d'hydrocarbures est optimale.

Le sol sableux présente une grande perméabilité assurant une bonne circulation de l'eau et une activité biologique intéressante.

Les résultats de l'analyse chimique (Tableau II) révèlent un déficit en éléments azote et phosphore, éléments nécessaires à toute activité bactérienne. Selon [29], la pollution des sols par les hydrocarbures a comme conséquence un déficit en azote par rapport au carbone (le rapport C/N est supérieur à 250/1) dans notre cas il est de 266/1.

### III-1-3 Caractérisation microbiologique :

Les résultats de l'analyse microbiologique du sol après pollution par le gasoil sont représentés dans le **Tableau III**.

*Tableau III - Caractérisation microbiologique du sol -*

Microorganismes	Valeurs (UFC/g de sol)
Germes totaux à 30°C (48heures)	$1.05 \cdot 10^5$
Levures à 20°C (5jours)	$2 \cdot 10^4$
Champignons à 20°C (5jours)	0

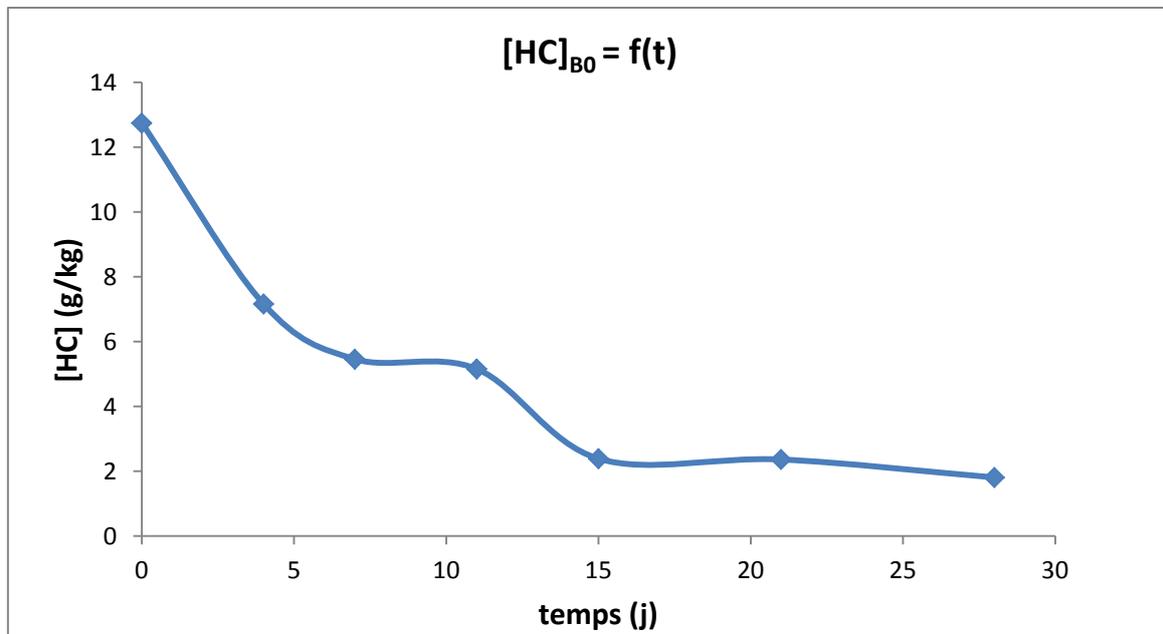
Les résultats précédents montrent que le sol présente une microflore autochtone de  $1.10^5$  UFC/g de sol. La norme pour toute biodégradation exige une teneur en germes d'au moins  $10^6$  UFC/g. [28]. Cependant, Stapleton et al 1998 a débuté son traitement biologique avec une microflore initiale de  $1,1.10^4$  UFC/g de sol. Cela nous affirme donc que ce sol peut être traité par procédé biologique en utilisant les microorganismes autochtones.

### Conclusion

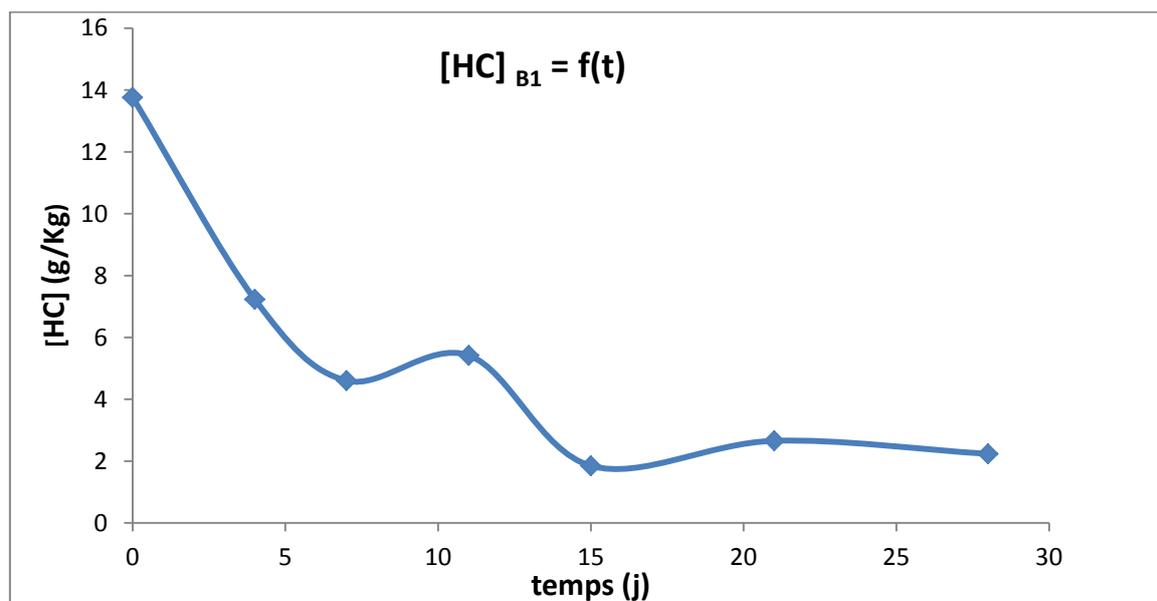
La caractérisation physicochimique, granulométrique et microbiologique de notre sol pollué s'est révélée favorable à l'application du procédé biopile comme technique de bioremédiation.

**III-2 Cinétique de dégradation des hydrocarbures :**

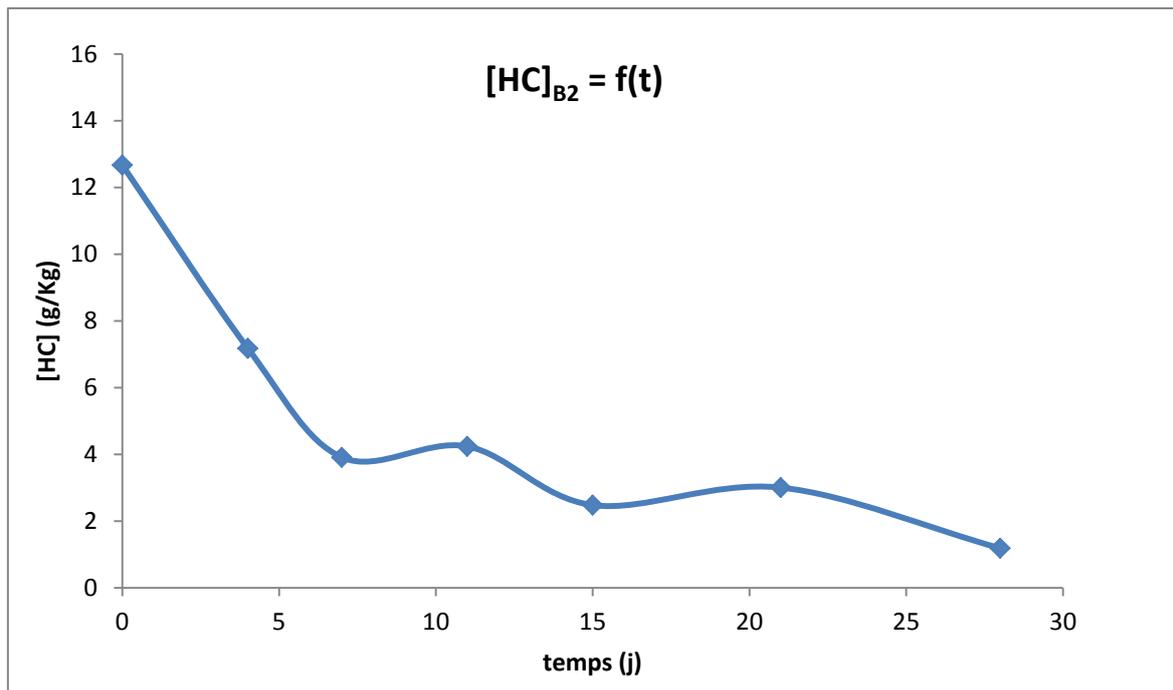
Les Figures suivantes III, IV, V, VI représentent l'évolution du gasoil dans les quatre biopiles durant une période de 28 jours.



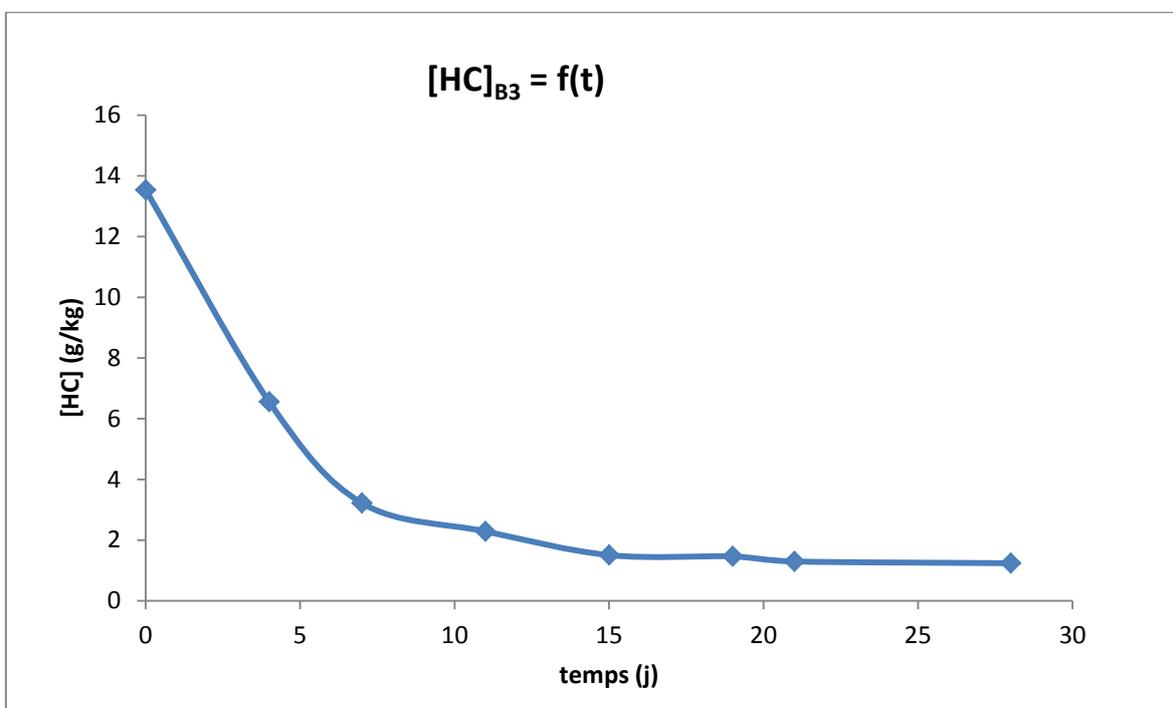
**Figure III** – Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B<sub>0</sub> » -



**Figure IV** – Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B<sub>1</sub> » -



- **Figure V** – Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B<sub>2</sub> » -



- **Figure VI** – Courbe de dégradation des HC dans la biopile « B<sub>3</sub> » -

Les courbes présentent la même allure pour les quatre biopiles. Elles sont subdivisées en 3 parties distinctes : Pendant la première semaine du traitement ; on observe une diminution accrue de la quantité du gasoil dans le sol; le palier est atteint au bout du 15<sup>ème</sup> jours pour les trois biopile B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub> et B<sub>2</sub>. Pour la Biopile B<sub>3</sub>, on observe une diminution progressive et assez régulière.

Ayant démarré d'une teneur en gasoil moyenne de 13.5 g/Kg de sol dans les quatre bacs, nous observons, comme cité plus haut, une diminution très rapide du polluant telle que, au 4<sup>ème</sup> jour du traitement, les concentrations passent :

- de 12.74 g/Kg à 7.16g/Kg dans la « B<sub>0</sub> » soit un abattement de 44 %
- de 13.75 g/kg à 7.23 g/Kg dans la « B<sub>1</sub> » soit un abattement de 47 %
- de 12.67 g/Kg à 7.18g/Kg dans la « B<sub>2</sub> » soit un abattement de 43 %
- de 13.53 g/Kg à 6.55 g/Kg dans la « B<sub>3</sub> » soit un abattement de 51 %

Ces taux d'abattement sont considérables et se poursuivent jusqu'à la fin de la première semaine. On observe à partir du 7<sup>ème</sup> jour, une diminution progressive et assez régulière au niveau de la biopile « B<sub>3</sub> ». Les phénomènes précédents d'abattements et de fluctuations du polluant seront expliqués ultérieurement en comparaison avec la croissance bactérienne.

➤ Le rôle de la biopile est mis en évidence dans la phase de dégradation où les fractions réfractaires du gasoil nécessitent une aération et une microflore apte pour être éliminées. Ces conditions sont réunies dans la biopile et on obtient des rendements significatifs preuve d'une grande activité microbienne. **Margesin et Schinner [27]** démontrent que la biostimulation du sol par addition de nutriments a pour conséquence une dégradation considérable d'hydrocarbures. Cette hypothèse sera confirmée en étudiant la croissance microbienne.

➤ **Whyte et al [30]** stipulent que les alcanes à courtes chaînes de carbone sont dégradés plus facilement que les alcanes à longues chaînes.

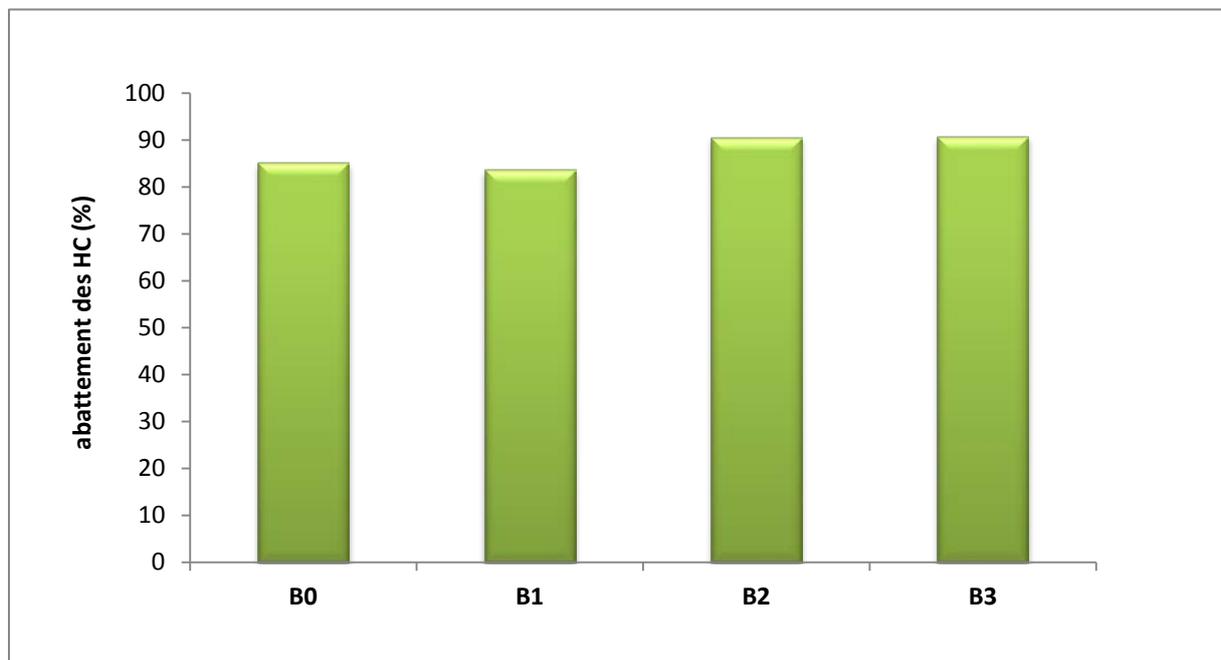
➤ **Mohn et Stewart [31]**, indiquent que les hydrocarbures branchés sont plus récalcitrants que ceux linéaires dans une culture microbienne mixte.

➤ **Marchal et al [32]** indiquent que le taux de dégradation peut être quasi-total si les alcanes linéaires sont abondants. Les hydrocarbures persistants sont les cycloalcanes et les alcanes ramifiés.

➤ **Eriksson et al [33], Namkoong et al [34]** considèrent que le déclin des hydrocarbures du Diesel (gasoil) dépend du déclin des n-alcanes.

➤ **Børresen et al (2003) [31]**, stipule que les alcanes à nombre de carbone supérieur à 18 représentent les fractions persistantes du diesel et il serait probable qu'à la fin de la dégradation, ce sont ces composés qui persisteront.

Les abattements par rapport aux teneurs initiales en gasoil à la fin du traitement biopile (après 4 semaines) sont illustrés dans l'histogramme suivant :



*-Figure VII – Abattement des HC dans les biopiles –*

Les teneurs en hydrocarbures passent de :

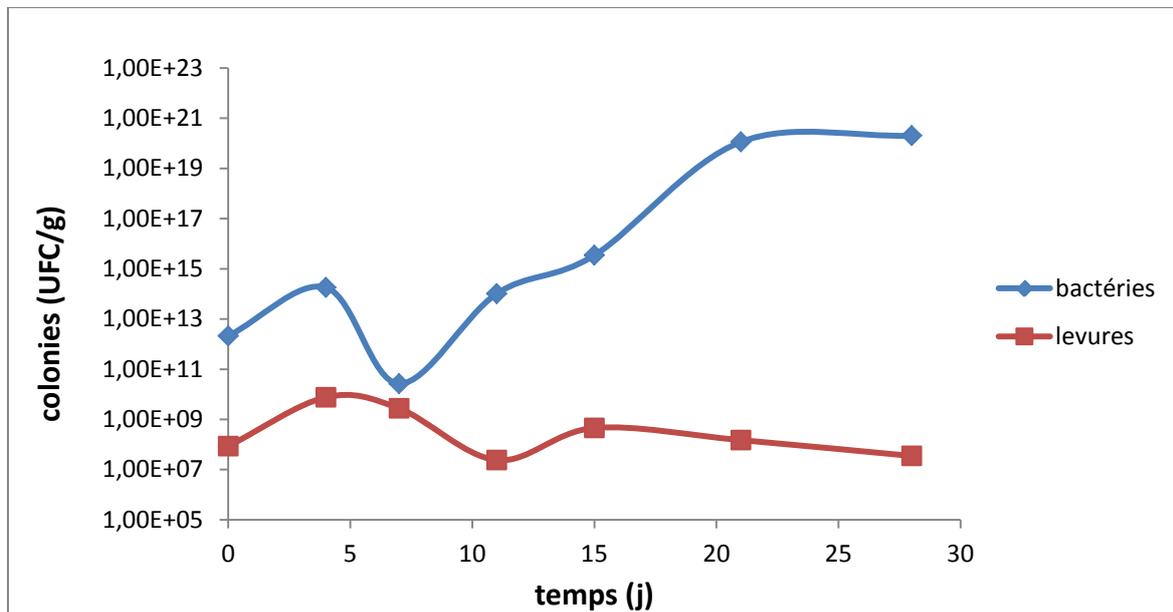
- 12.74 g/Kg à 1.80 g/kg dans la « B<sub>0</sub> » soit un taux de dégradation de 85 %
- 13.75 g/Kg à 2.23 g/Kg dans la « B<sub>1</sub> » soit un taux de dégradation de 83 %
- 12.67 g/Kg à 1.18 g/Kg dans la « B<sub>2</sub> » soit un taux de dégradation de 90 %
- 13.53 g/Kg à 1.24 g/Kg dans la « B<sub>3</sub> » soit un taux de dégradation de 91 %

L'Algérie a fixé des normes de rejets des eaux industrielles et en particulier des huiles, mais à nos jours, les normes des seuils de contamination des sols et des eaux souterraines n'ont pas encore été établies. Nous nous sommes donc référés à la politique canadienne de protection des sols fixant un taux de réduction de 80% de la concentration initiale pour les produits pétroliers (C10 – C15) [35]. Dans notre traitement, nous avons atteint des pourcentages d'abattement du gasoil supérieurs à 80% dans les quatre biopiles. On peut donc estimer que le traitement par Biopile est efficace.

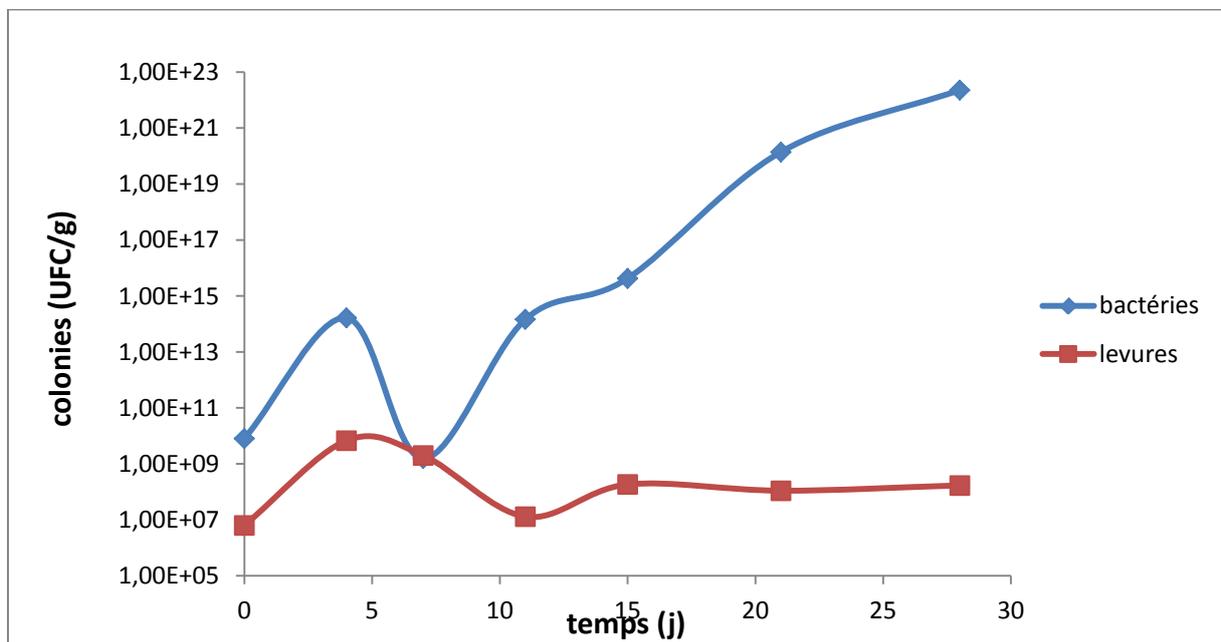
### **III-2-1 Cinétique de croissance bactérienne :**

Les résultats de la cinétique de croissance bactérienne sont représentés dans les Figures VIII ,IX, X, et XI. Nous avons choisi d'illustrer les courbes de croissance des bactéries et

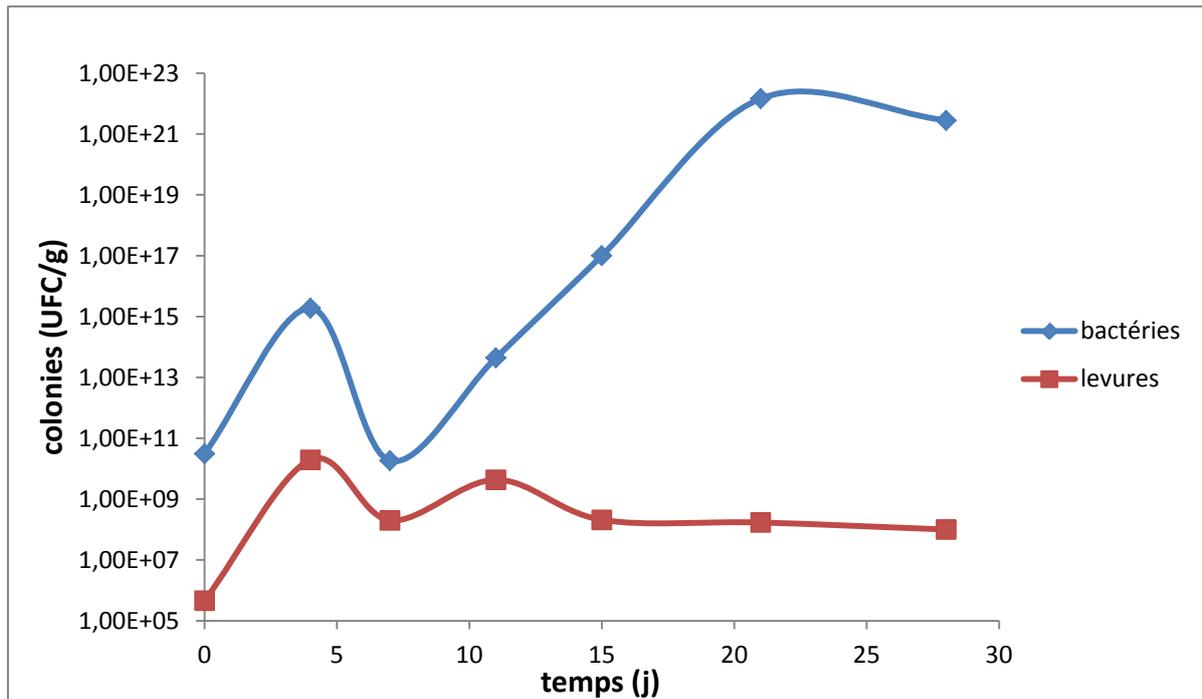
levures dans le même graphe, et ce pour les quatre biopiles. Ceci nous aidera à mieux observer l'évolution de ces deux populations microbiennes.



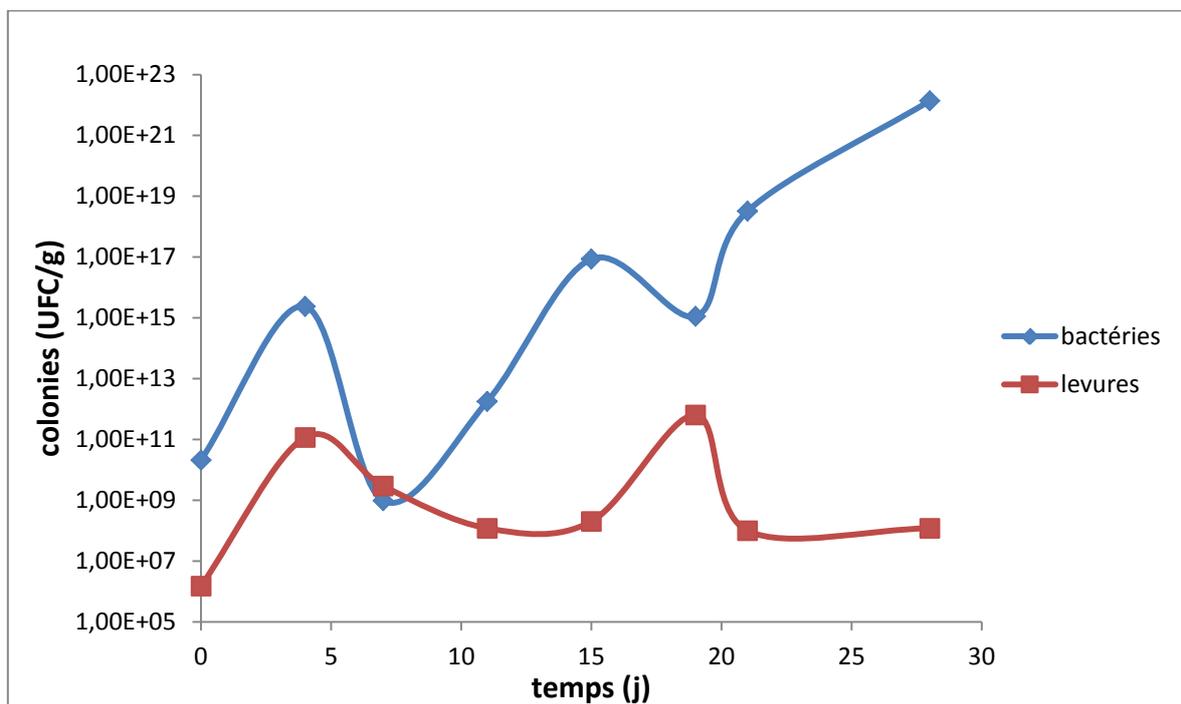
- Figure VIII - Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B<sub>0</sub> » -



- Figure IX – Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B<sub>1</sub> » -



- Figure X – Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B<sub>2</sub> » -



- Figure XI – Courbes de croissance des bactéries et levures dans la biopile « B<sub>3</sub> » -

Nous avons lancé notre traitement biopile avec une biomasse de :

- $2.10^{12}$  UFC/g de bactéries et  $8,6.10^7$  UFC/g de levures pour la biopile « B0 »
- $8.10^9$  UFC/g de bactéries et  $6,3.10^6$  UFC/g de levures pour la biopile « B1 »
- $3.10^{10}$  UFC/g de bactéries et  $4,5.10^5$  UFC/g de levures pour la biopile « B2 »
- $2.10^{10}$  UFC/g de bactéries et  $1,5.10^6$  UFC/g de levures pour la biopile « B3 »

Ces quantités initiales de microorganismes sont nettement supérieures à celles estimées durant la caractérisation microbiologique du sol. Ceci est dû au fait que nous avons effectué une bioaugmentation (pré-culture des microorganismes en bioréacteur) et avons ensemencé les biopiles avec cet inoculum pour but d'accélérer le processus de biodégradation.

En effet, d'après **Ulfig et al [36]**, l'introduction de l'inoculum dans le sol augmente l'assimilation des hydrocarbures et améliore la bioremédiation.

Ce qui est remarquable à première vue, ce sont des courbes de croissance bactériennes présentant une allure similaire dans les quatre biopiles. On remarque une succession de deux phases de croissance exponentielle, et ce, concernant les germes totaux et les levures.

Les bactéries observent une première croissance exponentielle dont le maximum est atteint au 4<sup>ème</sup> jour du traitement, suivie immédiatement d'un déclin de celles-ci jusqu'à atteindre les plus faibles quantités à la fin de la première semaine.

Une deuxième phase de croissance démarre au 7<sup>ème</sup> jour mais celle-ci est nettement plus lente que la première. Les bactéries suivent une multiplication de leurs colonies jusqu'à atteindre un deuxième maximum au bout du 21<sup>ème</sup> jour pour les biopiles « B<sub>0</sub> » et « B<sub>2</sub> » soit une phase exponentielle étalée sur 15 jours, et un maximum observé au 28<sup>ème</sup> jour concernant les deux autres biopiles « B<sub>1</sub> » et « B<sub>3</sub> ».

L'existence de ces deux phases distinctes de croissance indique clairement que l'on assiste au développement de deux espèces bactériennes différentes ; l'une s'étant multipliée pendant les 4 premiers jours puis déclinée au bout du 7<sup>ème</sup>, et la deuxième ayant commencé sa croissance juste après le déclin des précédentes.

Par ailleurs nous avons observé que :

- De 0 à 4 jours : La chute la plus importante des hydrocarbures dans le sol (dans un intervalle de 4 jours) concorde avec un taux et une vitesse de croissance maximaux pour les bactéries ; ceci explique que cette catégorie de bactéries est responsable de la dégradation de la première fraction du gasoil

➤ De 4 à 7 jours : les hydrocarbures continuent à diminuer mais avec une moindre vitesse que la précédente. En parallèle, la phase de déclin est observée chez les bactéries et ce ci explique pourquoi la dégradation est lente à cette période.

➤ De 7 à 28 jours : le début d'une deuxième phase de croissance bactérienne est mise en évidence qui utiliserait comme substrat la deuxième fractions des HC. A partir du 11<sup>ème</sup> jour ; les teneurs en hydrocarbures diminuent progressivement contre une croissance bactérienne en phase exponentielle mais à vitesse de croissance toujours moins importante que la croissance précédente. Enfin, la phase stationnaire de la courbe de croissance coïncide avec l'atteinte du palier de concentration des hydrocarbures.

Pour les levures, on remarque que la croissance des levures suit la même allure que celle des bactéries, et ce, dans les quatre biopiles. On réalisera donc une étude comparative de ces allures avec celles des bactéries de façon représentative des quatres biopiles.

On distingue une phase de croissance des levures simultanément avec celle des bactéries dans la première semaine.

➤ Comme évoqué précédemment lors de l'évaluation des courbes de dégradation du gasoil ; le palier commence à apparaitre au bout de 21jours de traitement et se poursuit jusqu'au dernier. Ce palier pourrait être expliqué par :

- Le fait que les concentrations en polluant qui est la source d'énergie soient diminuées, les performances de la microflore dégradante s'arrêtent et certains microorganismes maintiennent leur vie sur la base des produits de l'autolyse des autres.
- Le fait qu'il y ait des fractions complexes de polluant résistantes à la dégradation.

La première phase de croissance décrit la biodégradation des fractions simples du gasoil à savoir les composés aliphatiques (n-alcane). Dans cette même phase de croissance, on assiste à un phénomène de co-métabolisme (synergie) entre les bactéries et les levures, et ce, pour la dégradation de ces fractions simples. Plusieurs auteurs ont évoqué le co-métabolisme en l'occurrence [37] [38] [39] [32][40]. Le phénomène est décrit par l'intervention des levures qui commencent à dégrader les chaînes d'hydrocarbures les rendant plus facilement accessibles pour les bactéries qui interviennent juste après pour terminer cette dégradation. Les levures jouent donc un rôle intermédiaire dans la dégradation de ces composés.

- A l'épuisement de ces fractions, le déclin est observé pour la population des bactéries. Aussitôt un autre groupe bactérien dont la phase de latence se déroulait pendant la

première phase de croissance apparait et se charge de la biodégradation des fractions complexes du polluant. Cette phase pourrait être caractéristique des hydrocarbures ramifiés et aromatiques complexes.

**Conclusion :**

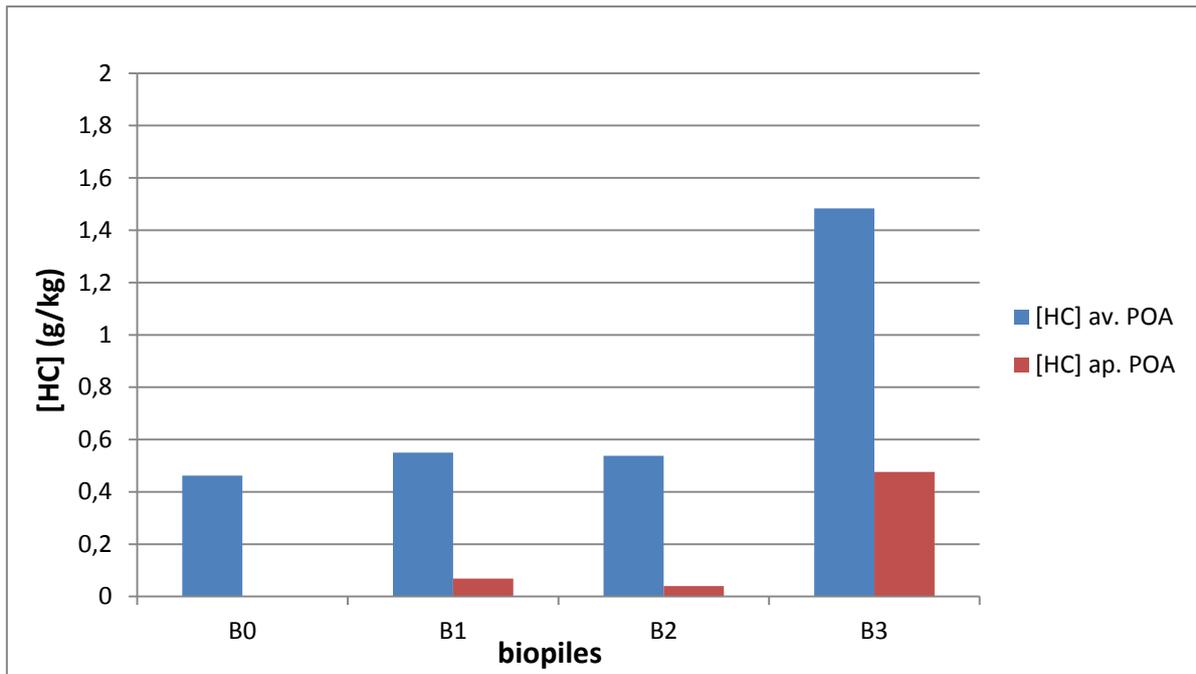
- La dégradation des hydrocarbures est optimale pendant les 3 premières semaines du traitement en biopile ;
- Les microorganismes dégradants des hydrocarbures sont à prédominance bactérienne
- Le co-métabolisme a été enregistré entre la famille des bactéries et des levures ;
- Les fractions simples des hydrocarbures sont assimilées en premier, suivies des fractions plus complexes ;

**III-2-2 Couplage de la biopile au POA :**

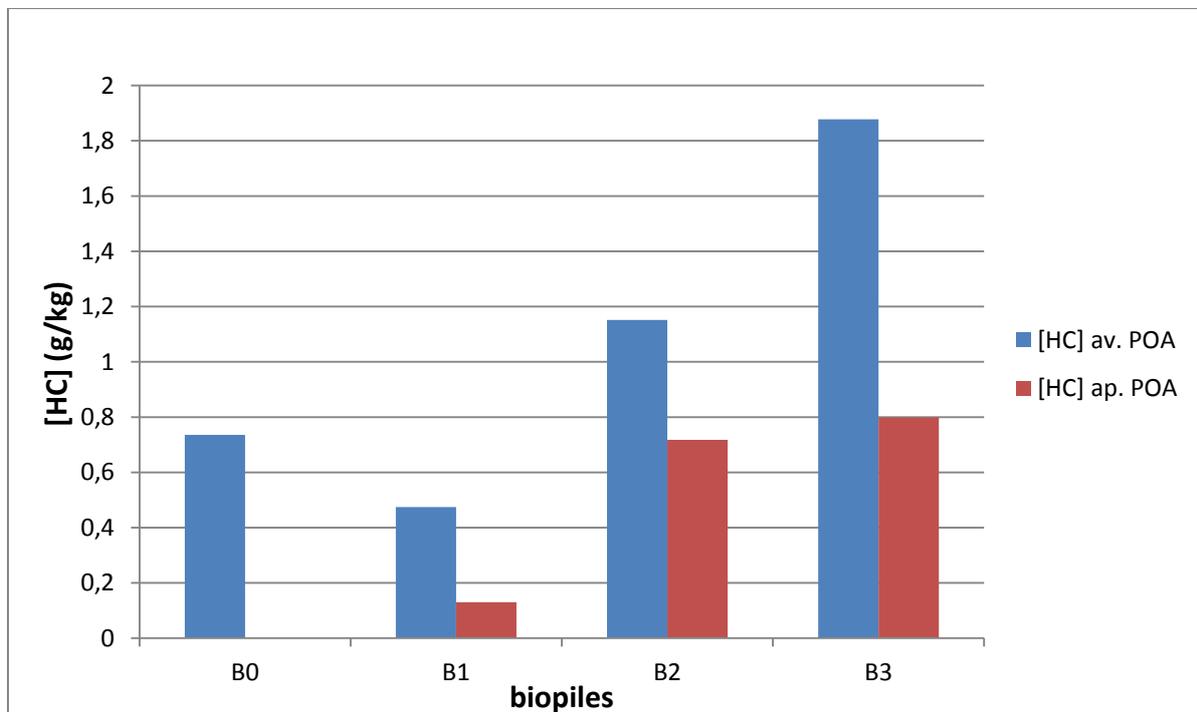
Les résultats du traitement des lixiviats des biopiles concernées à savoir « B<sub>1</sub> », « B<sub>2</sub> » et « B<sub>3</sub> » sont représentés dans les histogrammes suivants (Fig. XIII, XIV, XV et XVI).

On représentera le traitement de chaque semaine par les termes : POA<sub>1</sub> POA<sub>2</sub> POA<sub>3</sub> POA<sub>4</sub>

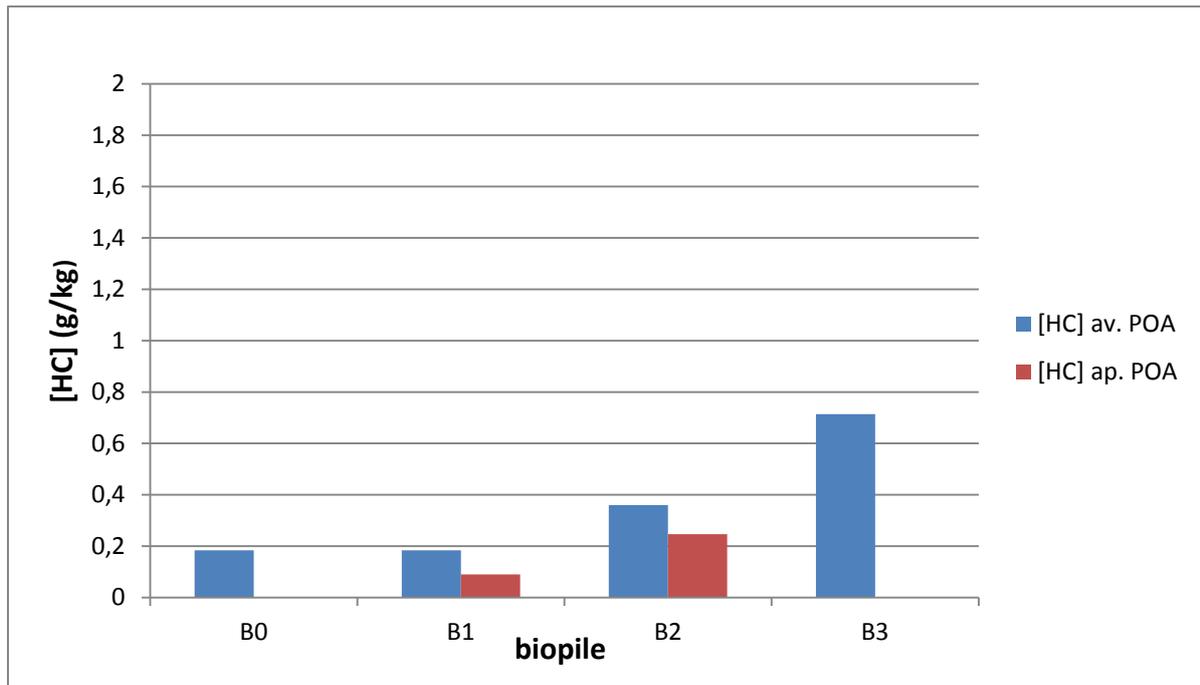
Le traitement s'étant étalé sur une période de quatre semaines (à raison d'une lixiviation par semaine due à l'ajustement de l'humidité), nous obtenons après extraction du gasoil, la concentration du polluant dans l'eau :



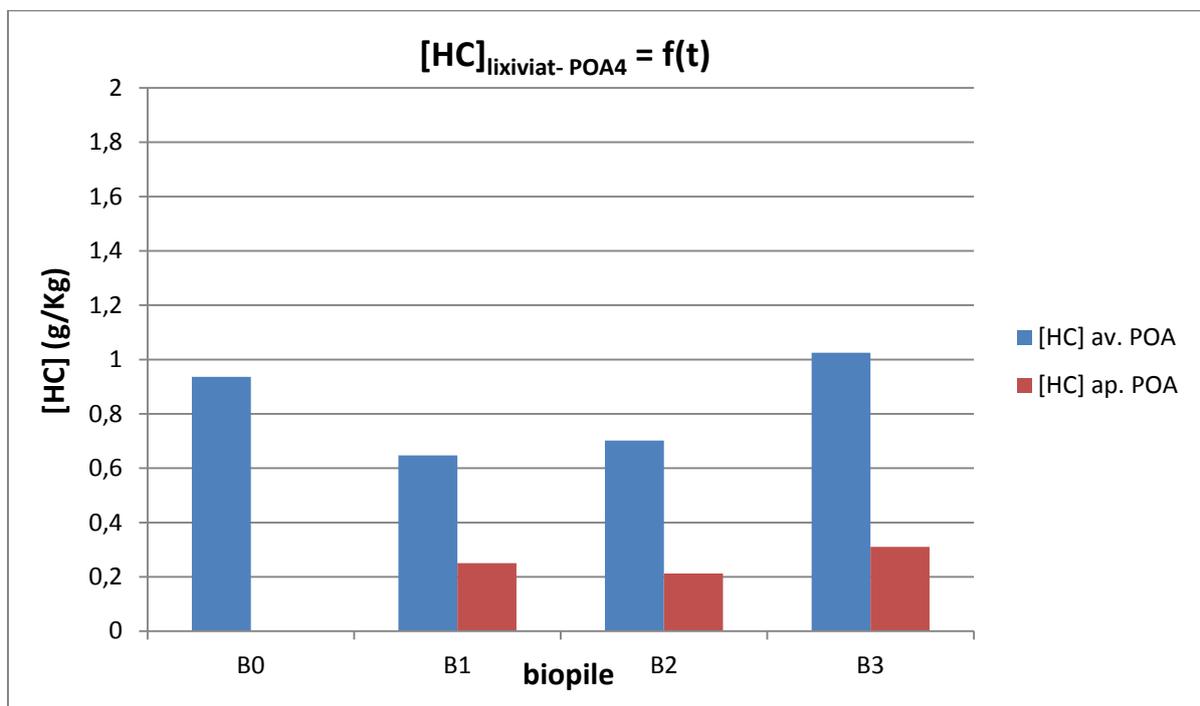
- *Figure XII* – [HC] des biopiles avant et après POA<sub>1</sub>. -



- *Figure XIII* - [HC] des biopiles avant et après POA<sub>2</sub> -



- *Figure XIV - [HC] des biopiles avant et après POA<sub>3</sub>* -



- *Figure XV - [HC] des biopiles avant et après POA<sub>4</sub>* -

Le traitement par oxydation photocatalytique des lixiviats a été mis au point afin d'apprécier la capacité de celui-ci à atténuer les polluants organiques présents dans un effluent industriel.

Notre procédé biopile a été couplé au procédé d'oxydation avancé par photocatalyse UV dans le but de dégrader les hydrocarbures évacués avec l'eau d'humidification car le but d'une remédiation est d'éliminer le polluant sans pour autant le déplacer dans une autre phase ou un autre endroit.

Nous allons réaliser une étude qualitative de l'effet de la photocatalyse car nous avons extrait, pour une même biopile des quantités d'hydrocarbures différentes à chaque lixiviation.

Nous observons après passage de l'effluent dans le photoréacteur, une diminution notable des teneurs en hydrocarbures exprimant un abattement entre 30 et 70 % dans la plupart des traitements. Ce qui confirme le bon fonctionnement du procédé photocatalytique.

A noter que le lixiviat de la biopile « B<sub>3</sub> » (Figure XIV) n'a pas été traité à défaut d'une récolte suffisante, il a été représenté dans le but d'apprécier l'effet du surfactant uniquement.

### **III-2-3 Effet du surfactant sur la biopile couplée :**

Dans les histogrammes précédents (Fig. XII, XIII, XIV et XV), nous observons que l'extraction des hydrocarbures du lixiviat avant son passage dans le photoréacteur exprime des valeurs relativement supérieures dans les biopiles « B2 » et « B3 » où le surfactant a été introduit, et remarquons que la biopile « B3 » ayant reçu un ajout de Tween 80 supérieur à celui de la biopile « B2 » enregistre une teneur en hydrocarbures supérieure à la « B2 ».

Ceci est sans doute expliqué par la fonction principale du surfactant qui n'est autre qu'un tensio-actif consistant à diminuer la tension superficielle de l'eau et donc à favoriser la migration du polluant organique vers la phase liquide, effet qui se traduit aussi par l'atteinte de la biopile « B3 » des plus faibles teneurs en hydrocarbures dans le sol.

D'autre part, on ne pourrait négliger l'effet du lessivage d'hydrocarbures dans les biopiles particulièrement dans la « B2 » et « B3 », mais ce ci n'affecte en aucun cas notre procédé puisqu'un dispositif de post-traitement (POA) est prévu pour pallier à ce souci de migration du polluant dans l'eau.

Néanmoins, l'abattement enregistré dans les biopiles ayant reçu un ajout de surfactant n'est pas très loin de ceux enregistrés dans les biopiles sans surfactant, on ne peut donc pas

conclure quant à sa nécessité dans le couplage mais il faudrait peut être considérer l'aspect cout économique de cet ajout.

### **Conclusion :**

- Le couplage biopile –POA présente de bons rendements d'élimination du gasoil dans les eaux de lixiviation ;
- Le surfactant Tween 80 augmente la migration du gasoil dans la phase aqueuse et ne présente pas de toxicité pour les microorganismes dégradants ;
- L'ajout de 0.2 % de surfactant Tween 80 présente des rendements relativement meilleurs d'élimination du polluant dans le sol.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

Dans notre travail, nous avons utilisé la technique de la biopile comme procédé d'atténuation biologique contrôlée d'un sol sableux pollué volontairement par du Gasoil commercial.

L'étude physicochimique et microbiologique préliminaire du sol pollué a donné des résultats encourageant la mise en œuvre du procédé biopile.

Le suivi des cinétiques de dégradation du Gasoil et de la croissance bactérienne (bactéries et levures) réalisées simultanément et sur une période de quatre semaines ont démontré qu'il y a eu un abattement significatif des teneurs en polluant dans le sol. D'autre part, l'ajout d'un surfactant à deux biopiles a démontré son efficacité par rapport à la favorisation de la migration du polluant dans la phase liquide (lixiviat généré par la biopile). Cette dernière a subi un post-traitement par procédé d'oxydation avancé à savoir la photocatalyse (UV/TiO<sub>2</sub>) et les résultats du traitement se sont avérés convaincants quant à son application en couplage avec la biopile.

Enfin, ce travail nous aura permis d'une part, de nous familiariser avec les équipements et matériels de laboratoire, de maîtriser les méthodes et les techniques d'analyse et d'autre part, d'apporter en résultat : une solution concrète pour un type de pollution environnementale importante consistant en l'élimination accélérée des hydrocarbures d'un sol pollué.

Afin de compléter cette étude, il aurait été enrichissant d'étudier quelques paramètres supplémentaires ; à savoir : l'identification microbiologique des souches bactériennes responsables de la dégradation des différentes fractions du gasoil, l'étude détaillée du mécanisme d'assimilation et de métabolisme de ce polluant, le suivi de la consommation des nutriments par les microorganismes et enfin, le suivi dans le temps des profils chromatographiques du gasoil dans le sol afin d'observer la disparition des différentes liaisons C-H confirmant la dégradation des fractions simples et complexes de l'hydrocarbure.

## **Références bibliographiques :**

**[1] : Emilian Koller**

« Traitement des pollutions industrielles » edt Dunod, Paris, 2009.

**[2] : Buckman H. O. et Brady N. C.,**

“ les sols nature et propriétés précis d'édaphologie ”, Intercontinental éditions, INC, New York, 1965, p. 498.

**[3] : Lemièrre B., Seguin J.J., Le Guren C., Guyonnet D., Baranger Ph., Darmendrail D., Conil P.,**

“Guide sur le comportement des polluants dans le sol et les nappes”, document du BRGM 300, éditions BRGM, 2001, p. 119.

**[4] : Duchaufour P.,**

« Pédologie, Sol, Végétation, Environnement abrégé » Masson, (1998), 5<sup>ème</sup> édition.

**[5] : Cours 5<sup>ème</sup> année pollution du sol (ENP 2011/2012)**

**[6] : Robert M.**

« le sol, interface dans l'environnement, ressource pour le développement, edt Masson... »

**[7] : Laurent D . , “ Le pétrole ”, 2004, Université de Mons Hainaut, Belgique,**

[http://www.umh.ac.be/~ichim/docs/studs02-03/le\\_petrole.html](http://www.umh.ac.be/~ichim/docs/studs02-03/le_petrole.html).

**[8] : Lalumière J. S. et Richard A., “ Le pétrole : l'or noir du XX<sup>ème</sup> siècle”, remis à Kairos Université du Québec à Montréal – UQAM, Montréal, 15 mai 2002, p. 63.**

**[9] : Favennec J. P., “ Le raffinage du pétrole : exploitation et gestion de la raffinerie”, Tome 5, édition Technip, Paris, 1998, p. 575.**

**[10] : Enspm, “ Méthodes et techniques analytiques appliquées aux hydrocarbures et à leurs dérivées : Détecteurs spécifiques pour le dosage des composés soufrés et azotés dans les coupes pétrolières (par chromatographie en phase gazeuse)”, NAFTEC, 1993, p. 25.**

**[11] : Mémoire de magister magister Chemlal R. ENP (2004-2005)**

**[12] : K. A. T. Berry, D. L. Burton "Natural attenuation of diesel fuel in heavy clay soil" Canadian Journal of soil science (1997).**

**[13] : D. Brinkmann, J. Röhrs and K. Schügerl**

"Bioremediation of diesel fuel contaminated soil in a rotating bioreactor" Chem. Eng. Technol, vol. 21, pp168-172 (1998).

**[14] : J. P. Wauquier**

"Pétrole brut : produits pétroliers, schémas de fabrication" edt, Technip, Paris (1994)

**[15] : Entrée du numéro CAS « 68476-34-6 » dans la base de données de produits chimiques GESTIS de la IFA (organisme allemand responsable de la sécurité et de la santé au travail) ([allemand](#), [anglais](#)), accès le 1 novembre 2008**

[16] : **Solano-Serena F., Marchal R., et Vandecasteele J. P.**, “Biodégradabilité de l'essence dans l'environnement : de l'évaluation globale au cas des hydrocarbures récalcitrants”, *Oil & Gas Science and Technology- Rev. IFP*, Vol. 56, No. 5, 2001, p. 479-498.

[17]: **Comeau Y.**, “ Biorestauration des sols contaminés” cours professé à l' Ecole Polytechnique de Montréal, Etudes supérieures en génie de l'environnement, 1999.

[18] : VERDU (J.). — *Différents types de vieillissement chimique des plastiques*, AM3152 (1-2002).

[20]: **AFNOR norme X 31- 116**, “ Qualité des sols : Détermination du phosphore” , AFNOR, Nov 1984, p. 86- 99.

[21] : **AFNOR norme X 31- 111**, “ Qualité des sols : Détermination de l'azote total -Méthode par distillation après minéralisation (Kjeldahl)” , AFNOR, Juil 1983, p. 72- 75.

[22] : **AFNOR norme X 31- 102**, “ Qualité des sols : Détermination de l'humidité résiduelle d'échantillons de sols préparés pour analyse” , AFNOR, Juin1981, p. 31- 32.

[23] : **AFNOR norme X 31- 103**, “ Qualité des sols : Mesure du pH (H<sub>2</sub>O)- méthode électrométrique ” , AFNOR, Juin1981, p. 33- 34.

[24]: **Norme française NF P18-560**

[25] : **Samson R.**, “ Biorestauration des sites contaminés: les technologies in-situ et ex-situ ”, Cahier technique réalisé pour le CQVB (centre québécois de valorisation de la biomasse),1994

[26] : **Penberthy J. et Weston R. F.**, “Remediation of Diesel and Fuel Oil Hydrocarbons in high clay content soils: A field comparison of amendment performance conducted at the Mare Island Naval Shipyard ”, 2005, <http://www.Environmental-expert.com/consulting/weston/penberthy.pdf>.

[27] : **Margesin R. et Schinner F.**, “ Bioremediation (Natural Attenuation and Biostimulation) of Diesel-Oil-Contaminated Soil in an Alpine Glacier Skiing Area”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 67, No. 7, July 2001, p. 3127-3133.

[28]: **Battelle et NFESC**, “Biopile operations and maintenance manual”, Technical Memorandum TM-2190-ENV, 1996, p. 65.

[29]: **Eckford R., Cook F. D., Saul D., Aislabie J., and Foght J.**, “Free-Living Heterotrophic Nitrogen-Fixing Bacteria Isolated from Fuel-Contaminated Antarctic Soils”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 68, No. 10, 2002, p. 5181–5185.

[30] : **Jeannot R., B. Lemièrre, S. Chiron**, avec la collaboration de F. Augustin, D. Darmendrail, “Guide méthodologique pour l'analyse des sols pollués”, document du BRGM 298, éditions BRGM, 2001, p. 101.

**[31]: Mohn W. W. et Stewart G. R.**, “Limiting factors for hydrocarbon biodegradation at low temperature in Arctic soils”, *Soil Biology & Biochemistry*, 32, 2000, p. 1161 – 1172.

**[32] : Marchal R., Penet S., Solano-Serena F., Vandecasteele J.P.**, “Gasoline and Diesel Oil”, *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP*, Vol. 58, No. 4, 2003, p. 441-448.

**[33] : Eriksson M., Ka J. O., and Mohn W. W.**, “Effects of Low Temperature and Freeze-Thaw Cycles on Hydrocarbon Biodegradation in Arctic Tundra Soil”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 67, N°11, Nov 2001, p. 5107 – 5112.

**[34]: Namkoong W., Hwang E. Y., Park J. S., and Choi J. Y.**, “Bioremediation of dieselcontaminated soil with composting”, *Environmental Pollution*, Vol. 119, No. 1, 2002, p. 23- 31.

**[35] : Comeau Y.**, “ Biorestauration des sols contaminés” cours professé à l’ Ecole Polytechnique de Montréal, Etudes supérieures en génie de l’ environnement, 1999.

**[36] : Ulfig K., Plaza G., Tien A. J., Worsztynowicz A., Hazen T. C., Altman D.**, “Microbiological Aspects of Bioremediation”, *International Containment & Remediation Technology*, June 2001 in Orlando, Florida.

**[37] : Solano-Serena F., Marchal R., et Vandecasteele J. P.**, “Biodégradabilité de l'essence dans l'environnement : de l'évaluation globale au cas des hydrocarbures récalcitrants”, *Oil & Gas Science and Technology- Rev. IFP*, Vol. 56, No. 5, 2001, p. 479-498.

**[38] : Kanaly R. A., Bartha R., Watanabe K., Harayama and S.**, “Rapid Mineralization of Benzo[a]pyrene by a Microbial Consortium Growing on Diesel Fuel”, *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 66, No. 10, Oct. 2000. p. 4205 – 4211

**[39] : Vandecasteele J. P., Fayolle F., Marchal R., Chauvaux S., Beguin P., Monot F.**, “Biodégradation des produits pétroliers. Le cas des essences et des éthers - carburants”, *Bull.Soc.Fr.Microbio.*, Vol. 16, No. 3, oct 2001, p. 184- 189.

**[40] : Xu R. et Obbard J. P.**, “Biodegradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Oil-Contaminated Beach Sediments Treated with Nutrient Amendments”, *J. Environ. Qual*, 2004, Vol. 33, p.861-867.

## **Résumé :**

Cette étude porte sur la bioremédiation d'un sol pollué par les hydrocarbures (Gasoil) en mettant en œuvre le procédé dans des conditions aérobies et à température ambiante et ce, à échelle semi-pilote. Par ailleurs, nous avons couplé la biopile à un procédé d'oxydation avancé afin d'altérer les hydrocarbures lessivés par le lixiviat généré.

Nos résultats ont été obtenus par le suivi des cinétiques simultanées de la biodégradation du gasoil présent dans le sol et dans le lixiviat, ainsi que de la croissance bactérienne (bactéries et levures).

Nous avons obtenu, au bout de quatre semaines de traitement, des rendements d'atténuation appréciables et avons conclu quant aux performances du procédé.

**Mots-clés :** sol, bioremédiation, biopile, biodégradation aérobie, POA, croissance bactérienne.

## **Abstract :**

This study is about bioremediation of a soil polluted by gasoil by implementing the process biopile under aerobic conditions and room temperature, the whole at semi-pilot scale. Furthermore, we coupled the biopile to advanced oxidation process to alter the hydrocarbon leachate generated by the leaching.

Our results were obtained by monitoring the kinetics of simultaneous biodegradation of gasoil in soil and in leachate, and also bacterial growth (bacteria and yeasts).

We obtained, after four weeks of treatment, significant yields mitigation and so we concluded on our process performance.

**Keywords:** soil, bioremediation, biofuel cell, aerobic biodegradation, POA, bacterial growth.

ملخص  
هذه الدراسة تركز على المعالجة الحيوية للتربة الملوثة بالنفط (ديزل) من خلال تنفيذ عملية وتقنية لتخفيف طبيعية رصدها في ظل ظروف جوية وعند درجة حرارة الغرفة، و نطاق شبه التجريبية. وعلاوة على ذلك، إلى جانب biopile عملية أكسدة متقدمة لتغيير الراسخ الهيدروكربونية الناتجة عن الرشح. وقد تم الحصول على النتائج التي حققناها من خلال رصد حركية من التحلل البيولوجي في وقت واحد من زيت الديزل في التربة والحصارة، ونمو البكتيريا (البكتيريا والخمائر). بعد أربعة أسابيع من العلاج، حصلنا على نتائج هامة لتخفيف وخلص فيما يتعلق بأداء هذه العملية.

**كلمات البحث:** التربة، والمعالجة البيولوجية، وخبلة الوقود الحيوي، والتحلل البيولوجي الهوائي، يرجى الاتصال بنا، نمو البكتيريا