

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POLULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE CHIMIE**



Domaine: **SCIENCE DE LA MATIERE**

Filière : **CHIMIE**

Spécialité : **CHIMIE DE L'ENVIRONNEMENT**

## **Mémoire de Master**

Thème

### **Traitements biologiques de sol polluer par les hydrocarbures**

Présenté par: **Mlle SALMI Ania**

**Mr HAMRANI Takfarines**

Soutenu le 13/07/2023, devant le Jury composé de:

<b>M<sup>me</sup> OUMESSAAD Ali</b>	<b>MCB</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Présidente</b>
<b>M<sup>me</sup> OUAMROUCHE</b>	<b>MCA</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Examinatrice</b>
<b>M<sup>me</sup> FERRAG Fatiha</b>	<b>MCA</b>	<b>UMMTO</b>	<b>Promotrice</b>

**Session 2022 / 2023**

## Remerciements

On remercie DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nous remercions également les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail à juste valeur et de nous faire part de leurs remarques sûrement pertinentes qui avec un peu de recul contribueront sans nul doute au perfectionnement du présent mémoire.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers madame **FERRAG** notre promotrice, pour son soutien inébranlable, pour son expertise et ses suggestions pertinentes qui ont enrichi ce travail de recherche, ses précieux conseils et son expertise qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. Sa disponibilité, son écoute attentive et ses encouragements ont été d'une aide inestimable tout au long de ce processus.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers l'équipe pédagogique de **UMMTO** pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de mon cursus universitaire.

Je suis reconnaissante envers ma famille pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements et leur compréhension tout au long de cette aventure académique.

Ce mémoire de fin d'études a été réalisé grâce à la contribution et au soutien de chacune de ces personnes, de lions comme de près.

## Dédicaces

À mes **CHERS PARENTS**, pour leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs sacrifices sans fin. Ce travail est dédié à vous deux, qui avez toujours cru en moi.

A **MON FRERE, MES SŒURS, MES NIECES et NEVEUX**. Ce travail est dédié à vous, en reconnaissance de la précieuse famille qui m'a entouré et m'a encouragé à atteindre mes objectifs. Que notre lien familial continue de prospérer et d'être une source de bonheur et de soutien mutuel pour les années à venir.

À **HMS**, pour sa patience infinie, son soutien indéfectible et son amour inconditionnel pendant les moments de stress et de doute. Ce travail est autant le vôtre que le mien.

À **MOI-MEME**, pour ma persévérance, ma détermination et ma capacité à surmonter les obstacles. Cette réussite est le résultat de mon travail acharné et de ma volonté de ne jamais abandonner, même lorsque les choses semblaient difficiles.

À la mémoire de mon frère **MADJID** ton absence laisse un vide immense, mais ton influence continue de guider mes pas. Ce travail est dédié à ta mémoire, en reconnaissance de l'impact profond que tu as eu sur ma vie. Tes valeurs, ton amour et ton soutien resteront à jamais gravés dans mon cœur. Puisses-tu reposer en paix.

À **MES PROFESSEURES**, dont la sagesse et les conseils ont éclairé mon chemin tout au long de ce parcours académique. Votre enseignement continuera à inspirer mes futures réalisations.

À **MON BINOME, AMIS et CAMARADES** de classe, pour les moments de camaraderie, les discussions stimulantes et le soutien mutuel tout au long de cette aventure académique. Nos souvenirs resteront gravés dans mon cœur.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je vous adresse ma plus sincère reconnaissance. Vos conseils, vos critiques constructives et votre support ont été essentiels à sa réussite.

**Ania**

# **Table des matières**

## Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des abréviations	
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le sol</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les constituants du sol.....	3
I.2.1 Phase liquide.....	4
I.2.2 Phase solide.....	4
I.2.3 Phase gazeuse .....	4
I.3 Propriétés physico-chimiques de sol .....	4
I.4 Texture.....	5
I.5 Perméabilité.....	6
I.6 Capacité de rétention : .....	6
I.7 Potentiel d'hydrogène PH:.....	6
I.8 Potentiel redox.....	6
I.10 Bactéries.....	7
I.11 Actinomycètes.....	7
<b>Chapitre II : Pollution de l'environnement liée aux Hydrocarbures</b>	
II.1 Introduction.....	9
II.2.1 Classifications des hydrocarbures .....	9
II.2.2 Le gasoil.....	10
II.3 Devenir des hydrocarbures pétroliers dans le sol.....	10
II.3.1 Volatilisation.....	10
II.3.2 Biodégradation .....	10
II.3.3 Adsorption .....	11
II.4 Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures.....	11
II.4.1 Viscosité.....	11
II.4.2 Solubilité.....	11
II.4.3 Pression de vapeur .....	11
II.4.4 Densité .....	11
II.4.5 Teneur en aromatique.....	12
II.5 Ecotoxicité des hydrocarbures .....	12
<b>Chapitre III : Techniques de réhabilitation de sol</b>	
III.1 Introduction.....	13
III.2 Les procédés de réhabilitation du sol.....	13
III.2.1 Les procédés physiques .....	13
III.2.2 Les procédés chimiques ou électrochimiques.....	13
III.2.3 Les procédés thermiques.....	14

III.2.4 Les procédés biologiques.....	14
III.3 La bioremédiation.....	14
III.3.1 Les techniques de bioremédiation.....	14
III.3.1.1 Biostimulation.....	15
III.3.1.2 Bioaugmentation.....	15
III.3.1.3 Phytoremédiation.....	15
III.3.1.4 Atténuation naturelle.....	16
III.3.2 Les facteurs influençant la bioremédiation.....	16
III.3.2.1. La structure du sol.....	16
III.3.2.2 Le potentiel d'hydrogène pH :.....	16
III.3.2.3 La température.....	17
III.3.2.4 L'humidité.....	17
III.3.2.5 L'oxygène.....	17
III.3.2.6 Les nutriments.....	18
III.3.2.7 La salinité.....	18
III.3.2.8 Les polluants.....	18
III.4 Les déchets valorisant la stimulation.....	18
III.4.1 Fumier de moutons.....	18
III.4.2 Sciure de bois.....	19
III.4.3 Les dattes séchées.....	19

## **Chapitre IV : Matériels et méthodes**

IV.1 Caractérisation des sols.....	21
IV.1.1 Analyse de la Granulométrie.....	22
IV.2 Acclimatation :.....	22
IV.2.1 Description du dispositif expérimental :.....	22
IV.2.2 Boue activée :.....	23
IV.3 Bouillon de dattes (Bdt) :.....	23
IV.3.1 Préparation de la solution de dattes :.....	23
IV.4 Fumier de mouton :.....	24
IV.5 Solution Bushnell-Haas (BH) :.....	24
IV.6 Préparation des bacs de traitements :.....	24
IV.6.1 Sol polluer (SP) :.....	24
IV.6.2 Sol moyennement polluer (SPmoy) :.....	25
IV.6.3 Sol artificiellement polluer (SPbio) :.....	25

## **Chapitre V : Résultats et discussions**

V.1 Caractérisation physico-chimiques des échantillons de sol pollué.....	27
V.2 Détermination de la demande chimique en oxygène des différents sols pollués (SP, SPmoy et SPbio).....	29
V.3 Etude cinétique de l'acclimatation de Ba.....	29
V.4 Etude de la bioremédiation.....	32

<b>V.4.1 Evolution du pH.....</b>	<b>32</b>
<b>V.4.2 Détermination du taux de dégradation des hydrocarbures :.....</b>	<b>34</b>
<b>V.4.3 Evolutions de CT et N et le UFC.....</b>	<b>38</b>
<b>V.4.4 Dosages des nitrates et nitrites .....</b>	<b>42</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>44</b>
<b>Bibliographie</b>	
<b>Annexes</b>	

## **Liste des figures**

## Liste des figures

---

<b>Figure 01</b> : Sol moyennement polluer .....	21
<b>Figure 02</b> : Sol polluer.....	21
<b>Figure 03</b> : Sol artificiellement polluer .....	21
<b>Figure 04</b> : Dispositif expérimental de l’acclimatation.....	23
<b>Figure 05</b> : Solution de dattes.....	24
<b>Figure 06</b> : Préparation des bacs de traitement .....	26
<b>Figure 07</b> : Les bacs dans l’étuve.....	26
<b>Figure 01</b> : Evolution de la DCO et turbidité au cours de l’acclimatation par BA .....	31
<b>Figure 02</b> : Suivi du pH au cours de l’acclimatation par BA .....	31
<b>Figure 03</b> : Evolution du pH des échantillons de SP en fonction du temps .....	32
<b>Figure 04</b> : Evolution du pH des échantillons de SPmoy en fonction du temps.....	33
<b>Figure 05</b> : Evolution du pH des échantillons de SPbio en fonction du temps.....	33
<b>Figure 06</b> : Le taux de dégradation des HPT dans le SP.....	34
<b>Figure 07</b> : Evolutions des DCO dans SP .....	35
<b>Figure 08</b> : Le taux de dégradation des HPT dans le SPmoy.....	35
<b>Figure 09</b> : Evolution de la DCO dans le SPmoy.....	36
<b>Figure 10</b> : Le taux de dégradation des HPT dans le SPbio.....	36
<b>Figure 11</b> : Evolution de la DCO dans le SPbio.....	37
<b>Figure 12</b> : Histogramme de dégradation de CT des échantillons SP.....	38
<b>Figure 13</b> : Histogramme de consommation d’Azote des échantillons SP .....	38
<b>Figure 14</b> : Histogramme de dégradation de CT des échantillons SPmoy.....	39
<b>Figure 15</b> : Histogramme de consommation d’Azote des échantillons SPmoy .....	39
<b>Figure 16</b> : Histogramme de dégradation de CT des échantillons SPbio.....	40

## Liste des figures

---

<b>Figure 17</b> : Histogramme de consommation d'Azote des échantillons SPbio .....	40
<b>Figure 18</b> : Histogramme de la croissance bactérienne (UFC) des échantillons de sol .....	41
<b>Figure 19</b> : Histogramme de l'évolution des nitrates et nitrites pour SP .....	42
<b>Figure 20</b> : Histogramme de l'évolution des nitrates et nitrites pour SPmoy .....	42
<b>Figure 21</b> : Histogramme de l'évolution des nitrates et nitrites pour SPbio .....	43

## **Liste des tableaux**

## Liste des tableaux

---

<b>Tableau III.1</b> : Biostimulation à l'aide des nutriments organiques .....	20
<b>Tableau IV.1</b> : Préparation des bacs de traitement .....	24
<b>Tableau IV.2</b> : Préparation des bacs de traitement .....	25
<b>Tableau IV.3</b> : Préparation des bacs de traitement .....	25
<b>Tableau V.1</b> : Résultats d'analyses physico-chimiques des échantillons du sol étudiés SP, SPmoy, SPbio.....	27
<b>Tableau V.2</b> : Valeur en DCO de <b>SP, SPmoy et SPbio</b> .....	29
<b>Tableau V.3</b> : Caractérisation initiale des différents consortiums Ba, Fm, BH, et Bdt .....	30

## **Liste des abréviations**

## Liste des abréviations

---

- Ba** : Boue activée
- BH** : Bushnell-Haas
- Bdtt** : Bouillon de dattes
- BTEX** : Benzène Toluène Ethylbenzène et Xylène
- C** : Carbone
- CE** : Conductivité Electrique
- CEC** : Capacite d'échange ionique
- COV** : Compose Organique Volatile
- CT** : Carbone total
- D** : Densité
- DCO** : Demande Chimique en oxygène
- ED** : Eau distille
- Fm** : Fumier
- GN** : Gélose Nutritive
- H** : Humidité
- HAP** : Hydrocarbures Aromatiques Polycyclique
- HC** : Rendement dissipation
- HPT** : Hydrocarbures pétroliers totaux
- N** : Azote
- PH** : Potentiel Hydrogène
- SB** : Sciure de bois
- SP** : Sol pollue
- SPbio** : Sol biologique
- SPmoy** : Sol pollue moyen
- T** : Température
- Turb** : Turbidité
- TPH** : Hydrocarbures Pétroliers Totaux
- UFC** : Unité Formant Colonies

# **Introduction générale**

L'homme a toujours été fasciné par la nature et ses merveilles, mais il en est également le principal responsable de sa dégradation. Parmi les problèmes environnementaux majeurs auxquels nous sommes confrontés aujourd'hui, la pollution des sols par les hydrocarbures constitue un défi complexe qui nécessite une attention particulière.

En effet, l'utilisation intensive des ressources énergétiques fossiles au cours des dernières décennies a entraîné une augmentation significative de la contamination des sols par les hydrocarbures. Face à cette situation préoccupante, il est impératif de trouver des solutions durables pour restaurer ces sols pollués et préserver notre environnement.

La présente étude s'est concentrée sur la remédiation des sols pollués par les hydrocarbures dans la région de **Hassi Messaoud**, où se trouve la base pétrolière de **SONATRACH**. Les sols de cette zone ont été contaminés en raison de déversements de pétrole et de ses dérivés lors des opérations de forage et de transport, ce qui représente un risque élevé de pollution des eaux souterraines. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude sur le traitement biologique comme alternative prometteuse pour remédier à ce problème écologique majeur.

Dans notre travail nous avons procédé avec la méthode de bioremédiation, en utilisant les techniques de bioaugmentation et de biostimulation. Cette approche offre plusieurs avantages non négligeables. Elle est respectueuse de l'environnement, économiquement viable (parmi les moins coûteuses), et potentiellement applicable à grande échelle.[1]

Dans un premier temps, nous avons effectué une analyse détaillée des sols pollués, en examinant des paramètres tels que le pH, le carbone organique, l'azote, et d'autres encore. Cette évaluation nous a permis de mieux comprendre l'étendue de la pollution et de déterminer les besoins spécifiques des sols en matière de traitement. Par la suite, nous avons entrepris le traitement des échantillons de sol en utilisant la technique de bioaugmentation, en introduisant les boues activées (**BA**) acclimatées de consortiums de microorganismes spécifiquement sélectionnés pour leur capacité à dégrader les hydrocarbures présents. Parallèlement, nous avons également appliqué la méthode de biostimulation en ajoutant des fertilisants organiques tels que le bouillon de dattes (**Bdtt**), le fumier de mouton (**Fm**) et la solution BUSHNELL-HAAS (**BH**), pour favoriser la croissance des microorganismes décomposeurs.

## **Introduction générale**

---

Comme le disait si justement Rachel Carson, pionnière de la protection de l'environnement: "Dans chaque grain de sol, il y a une histoire du monde". Ainsi, en comprenant mieux les mécanismes biologiques impliqués dans la dégradation des hydrocarbures présents dans les sols pollués, nous pourrions contribuer à écrire une nouvelle page d'espoir pour notre planète."

Notre travail est structuré en cinq chapitres, les trois premiers sont consacrés à une bibliographique.

Dans le quatrième chapitre, nous avons présenté les procédés expérimentaux mis en œuvre au cours de cette étude, ainsi que les techniques de mesure employées pour évaluer les divers paramètres étudiés.

Les résultats obtenus sont discutés en détail dans le dernier chapitre.

Ce mémoire est achevé par une conclusion.

# **Chapitre I : Généralités sur le sol**

## I.1 Introduction

Le sol est un volume qui s'étend depuis la surface de la Terre jusqu'à une profondeur marquée par l'apparition d'une roche dure ou meuble, peu altérée, ou peu marquée par la pédogenèse. L'épaisseur du sol peut varier de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres, ou plus. Il constitue, localement, une partie de la couverture pédologique qui s'étend à l'ensemble de la surface de la Terre. Il comporte le plus souvent plusieurs horizons correspondant à une organisation des constituants organiques et/ou minéraux (la terre). Cette organisation est le résultat de la pédogenèse et de l'altération du matériau parental. Il est le lieu d'une intense activité biologique (racines, faune et micro-organismes)[2].

## I.2 Les constituants du sol

Les constituants du sol sont généralement classés en trois catégories principales : les minéraux, la matière organique et l'eau.

- **Minéraux** : les minéraux constituent la principale composante solide du sol et proviennent de la décomposition des roches et des minéraux primaires. Parmi les minéraux couramment présents dans le sol, on trouve le quartz, les argiles, les feldspaths, les micas, les oxydes de fer et les carbonates [3].
- **Matière organique** : la matière organique est composée de restes de plantes et d'animaux en décomposition. Elle fournit des nutriments, améliore la structure du sol et favorise l'activité biologique. La matière organique du sol se présente sous diverses formes, telles que les débris végétaux, les excréments animaux, les microorganismes et les substances humiques[4].
- **Eau** : l'eau joue un rôle primordial dans la composition du sol en remplissant les espaces entre ses particules. Elle se trouve à disposition des plantes et des organismes présents dans le sol. On peut distinguer trois types d'eau dans le sol : l'eau gravitationnelle (drainée par la gravité), l'eau capillaire (retenue dans les pores du sol) et l'eau hygroscopique (retenue à la surface des particules du sol)[5].

Il est important de souligner que la composition du sol peut être significativement différente en raison de divers facteurs tels que le type de sol, les conditions climatiques, la présence de végétation et l'influence des activités humaines.

## I.2.1 Phase liquide

La phase liquide du sol, également connue sous le nom d'eau de sol, est l'eau contenue dans les pores du sol. Elle est essentielle à de nombreux processus du sol, comme le transport des nutriments, l'approvisionnement en eau des plantes et l'activité biologique[6].

## I.2.2 Phase solide

La composante solide du sol est principalement composée de particules minérales, de matière organique en décomposition et de microorganismes. Elle joue un rôle essentiel dans le maintien de la structure, de la fertilité et de la santé du sol[7].

## I.2.3 Phase gazeuse

La phase gazeuse du sol correspond à l'état où les composants volatils sont présents sous forme gazeuse. Lorsque les éléments solides et liquides du sol s'évaporent, ils se transforment en gaz et remplissent les espaces poreux entre les particules du sol[8].

## I.3 Propriétés physico-chimiques de sol

Les sols présentent une grande variété de propriétés physiques et chimiques qui peuvent varier en fonction de plusieurs facteurs tels que le type de sol, le climat et l'utilisation des terres. Voici quelques-unes des propriétés courantes des sols :

- a) La texture du sol se réfère à la composition relative des particules de différentes tailles (sable, limon, argile). Elle joue un rôle dans la rétention d'eau, l'aération et la capacité de rétention des éléments nutritifs.
- b) La structure du sol fait référence à l'arrangement des particules de sol en agrégats. Une structure solide favorise la circulation de l'eau, de l'air et des racines dans le sol.
- c) Le pH du sol mesure son acidité ou son alcalinité. Il influe sur la disponibilité des nutriments pour les plantes et l'activité des microorganismes du sol.
- d) La capacité d'échange cationique (CEC) désigne la capacité du sol à retenir et à échanger des cations tels que les nutriments essentiels pour les plantes. Elle affecte la fertilité du sol.
- e) La teneur en matière organique indique la quantité de matière organique présente dans le sol, résultant de la décomposition des matières végétales et animales. Elle contribue à la fertilité du sol, à la rétention d'eau et à la structure du sol[9].

**I.4 Texture**

La texture du sol se réfère à la taille des particules minérales présentes dans le sol et à leur agencement. Voici quelques termes couramment utilisés pour décrire la texture du sol, ainsi que des références récentes en français :

- a) **Sableux** : contient une proportion élevée de particules de sable, ce qui lui confère une texture légère et granuleuse. Ils sont des grains de taille relativement grossière, entre 0,05 et 2 mm[10].
- b) Une capacité de rétention d'eau supérieure. ils sont des particules de taille intermédiaire, entre 0,002 et 0,05 mm[11].
- c) **Argileux** : contient une proportion élevée de particules d'argile, ce qui lui confère une texture lourde et collante. Ils sont des particules fines, inférieures à 0,002 mm[12].
- d) **Sablo-limoneux** : présente une combinaison de sable, de limon et d'argile, offrant une texture équilibrée et une bonne capacité de rétention d'eau[13].
- e) **Structure**: La structure du sol se réfère à l'organisation des différentes couches constituant le sol, ainsi qu'à leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. Ces couches sont appelées horizons et sont classifiées en fonction de leurs caractéristiques distinctives.

Voici une description de la structure du sol :

- a) **Horizon O** : C'est la couche supérieure du sol, composée principalement de matière organique en décomposition, de feuilles et de débris végétaux. Elle joue un rôle crucial dans le maintien de la fertilité du sol[14].
- b) **Horizon A** : Cette couche est également appelée horizon de surface et contient un mélange d'humus (matière organique partiellement décomposée) et de minéraux. C'est là que se produisent la plupart des processus biologiques du sol[15].
- c) **Horizon B** : Cette couche se situe en dessous de l'horizon A et contient une accumulation de minéraux et d'autres matériaux déplacés depuis l'horizon supérieur. Elle peut présenter des caractéristiques distinctives telles que des argiles, des oxydes de fer ou des carbonates[16].
- d) **Horizon C** : Cet horizon est principalement composé de matériaux rocheux non altérés et se trouve en dessous de l'horizon B. Il peut s'agir de matériaux parentaux tels que des roches ou des sédiments non modifiés[17].
- e) **Porosité** : La porosité du sol fait référence à la quantité d'espace poreux présent dans le sol, c'est-à-dire la proportion d'espaces vides qui peuvent être remplis d'eau, d'air et

d'autres substances. La porosité est un paramètre clé pour comprendre la capacité du sol à retenir l'eau, à permettre la circulation de l'air et à fournir un environnement favorable à la croissance des plantes.

### I.5 Perméabilité

La perméabilité est la capacité d'un matériau à permettre le passage d'un fluide (liquide ou gaz) à travers lui. On mesure généralement cette capacité en évaluant le débit de fluide qui traverse une unité de surface du matériau pendant une unité de temps.

La perméabilité est souvent exprimée en utilisant des unités spécifiques au domaine d'application. Par exemple, en géologie, la perméabilité peut être quantifiée en utilisant les darcys (D). Les darcys représentent le débit de fluide en  $\text{cm}^3/\text{s}$  qui traverse un matériau de  $1 \text{ cm}^2$  sous une différence de pression de  $1 \text{ atm}$ [18].

### I.6 Capacité de rétention

La capacité de rétention, également appelée mémoire de rétention ou capacité de stockage, est la capacité d'un système à conserver et à se souvenir des informations qui lui sont présentées sur une période donnée[19].

### I.7 Potential d'hydrogene PH

D'après (Duchaufour) le PH du sol concerne l'eau interstitielle, selon sa valeur on distingue :

- Les sols acides dont le  $\text{pH} < 7$
- Les sols neutres dont le  $\text{pH} = 7$
- Les sols basiques dont le  $\text{pH} > 7$

### I.8 Potentiel redox

Le potentiel redox du sol désigne sa capacité à subir des réactions d'oxydation et de réduction, qui sont influencées principalement par l'humidité et l'aération. Un sol bien aéré et bien drainé a généralement un potentiel redox élevé, favorisant les réactions d'oxydation. En revanche, un sol mal aéré et saturé en eau présente un potentiel redox faible, favorisant les réactions de réduction.

Le potentiel redox du sol joue un rôle essentiel dans de nombreux processus biogéochimiques du sol, tels que la disponibilité des nutriments, la dégradation des matières organiques, la formation de minéraux et la toxicité des métaux[20].

## I.9 La microbiologie des sols

La microbiologie des sols se concentre sur l'étude des micro-organismes qui peuplent le sol, tels que les bactéries, les champignons, les protozoaires et les virus, ainsi que sur leurs interactions avec l'environnement et leur contribution aux processus biologiques dans le sol.

Ces micro-organismes jouent un rôle essentiel dans de multiples fonctions du sol, notamment la décomposition des matières organiques, la fixation de l'azote atmosphérique, la transformation des éléments nutritifs, la dégradation des contaminants et la régulation de la structure et de la fertilité du sol[21].

## I.10 Bactéries

Les bactéries sont des organismes unicellulaires de petite taille, classés comme procaryotes. Elles se trouvent dans une grande variété d'environnements terrestres tels que le sol, l'eau, l'air, et même à l'intérieur des êtres vivants. Les bactéries ont une structure cellulaire simple, dépourvue de noyau et d'organites membranaires. Leur génome est constitué d'ADN circulaire et elles se reproduisent rapidement par division cellulaire binaire. Les bactéries jouent un rôle crucial dans les écosystèmes en participant à des processus tels que la décomposition de la matière organique, la fixation de l'azote et la production d'oxygène. Toutefois, certaines bactéries peuvent aussi causer des maladies chez les plantes, les animaux et les humains. Par ailleurs, certaines bactéries sont utilisées dans des domaines tels que l'industrie alimentaire, la production d'antibiotiques et d'autres produits chimiques[22].

## I.11 Actinomycètes

Les actinomycètes sont des microorganismes procaryotes largement répandus et principalement aérobies. Ils se trouvent dans divers environnements et sont capables de s'adapter à des conditions extrêmement hostiles [23]. Les actinomycètes jouent un rôle crucial dans l'industrie pharmaceutique, mais certains peuvent également être pathogènes et causer des nuisances[23].

Les actinomycètes sont des bactéries filamenteuses qui appartiennent au phylum Actinobacteria et à l'ordre Actinomycetales. La plupart des actinobactéries sont saprophytes,

avec une coloration Gram positive et un pourcentage élevé en G+C. Elles préfèrent un pH neutre ou légèrement alcalin. Elles sont mésophiles, mais certaines espèces sont également thermophiles, tolérant des températures allant jusqu'à 60°C [24]. Les actinomycètes sont des bactéries hétérotrophes, bien que certaines espèces soient également chimio-autotrophes.

# **Chapitre II : Pollution de l'environnement liée aux Hydrocarbures**

## II.1 Introduction

Les hydrocarbures sont des composés organiques constitués uniquement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Ils possèdent une formule brute du type  $C_nH_m$ . Ces composés naissent dans des conditions bien particulières. En effet, ils sont formés par la décomposition d'organismes enfouis et accumulés [25]. Ils présentent une grande importance commerciale. Ils sont utilisés comme carburants, combustibles, huiles lubrifiantes et produits de base en synthèse pétrochimique [26]. De par leur abondance naturelle, ils font partie des produits chimiques les plus importants pour l'humanité et sont notamment utilisés comme source d'énergie primaire [27].

## II.2 Définition des Hydrocarbures

Le mot hydrocarbure désigne un composé contenant des atomes de carbone et des atomes d'hydrogène [28].

Les atomes de carbone ont la possibilité de former des liaisons en chaîne ou en cycles. La formule brute générale des hydrocarbures est  $C_nH_m$ . Une exception toutefois concerne certains hydrocarbures cycliques comportant dans leurs cycles des atomes autres que C et H, et appelés hydrocarbures hétérocycliques. Le classement des hydrocarbures applique différents critères de structures [29].

### II.2.1 Classifications des hydrocarbures

On peut les classer en trois familles principales, compte tenu de la tétravalence de l'atome de carbone et de la monovalence de l'atome d'hydrogène :

- Les hydrocarbures aliphatiques saturés : ce sont des composés de chaîne linéaire (n-alcane) de formule générale  $C_nH_{2n+2}$ , de chaîne ramifiée (iso alcane) se caractérisent par des branchements qui les rendent résistants à la dégradation, de chaîne cyclique (Cyclo alcane).
- Les hydrocarbures insaturés : Ce sont des composés issus principalement du craquage du pétrole, ont pour formule générale  $C_nH_{2n}$ , contenant une double liaison (alcène), triple liaison (alcyne) constitue la troisième grande famille d'hydrocarbures aliphatiques. [30]
- Les hydrocarbures aromatiques : ce sont des unes substances dont les molécules possèdent un cycle insaturé à 6 atomes de carbone. On distingue, les aromatiques simples (benzène, toluène, éthyl-benzène et xylène (BTEX) et les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) qui ont été inscrits en 1976 dans la liste des polluants prioritaires.

**II.2.2 Le gasoil**

C'est l'un des principaux produits de distillation du pétrole brut. Il est composé d'hydrocarbures saturés (n-alcanes, naphènes) à plus de 60% et de composés aromatiques entre 10 et 30% selon l'origine. C'est un produit jaune clair, légèrement visqueux, distillé habituellement entre 190°C et 300°C et utilisé comme combustible dans les moteurs Diesels rapides [31].

Le gasoil est soumis à des contraintes qui lui sont spécifiées. Sa densité par exemple ne doit pas trop s'écarter d'une valeur moyenne fixée à 0,850, car dans le cas contraire il résulterait un mauvais fonctionnement des moteurs. Les principales caractéristiques de gasoil sont :

- La densité à 15,5°C :  $0,820 < d < 0,860$
- La teneur en soufre  $\leq 0,9$  % en poids ;
- La teneur en eau  $\leq 0,9$  % en poids ;
- Acidité minérale est nulle ; [32]

**II.3 Devenir des hydrocarbures pétroliers dans le sol**

Dès que les hydrocarbures se déversent dans le milieu terrestre, ils sont soumis à différents processus d'altération physico-chimique et biologique qui vont fixer leur devenir dans le milieu [33]. Il n'est pas évident de déterminer le comportement d'un polluant au niveau du sol, car celui-ci est un grand système dynamique et hétérogène, ce dynamisme vivant dépend des propriétés intrinsèques du sol, des propriétés physiques et de la composition chimique des hydrocarbures. D'après [34]. Les différents processus naturels d'altération des hydrocarbures sont la volatilisation, la biodégradation, l'adsorption.

**II.3.1 Volatilisation**

Concerne essentiellement les composés organiques volatils (COV). C'est un processus qui induit la plus grande perte de masse pour les hydrocarbures légers [35]. Ce processus d'évaporation est influencé par la température.

**II.3.2 Biodégradation**

D'après [36] ainsi que [37] la biodégradation est le processus le plus énergétique et le plus efficace pour rompre les liaisons des hydrocarbures, Elle dépend notamment de la présence suffisante de micro-organismes adaptés, de la température, et de la quantité d'oxygène ou d'autres accepteurs d'électrons (nitrates,  $Fe^{3+}$ ) dans le sol [38].

**II.3.3 Adsorption**

L'adsorption est un procédé physico-chimique, naturel et passif d'accumulation des matières organiques, ce phénomène se fait par les interactions qui retiennent l'adsorbat sur la surface de l'adsorbant, qui peut être réversible (si adsorption physique) ou irréversible (si adsorption chimique). C'est un phénomène qui dépend des conditions environnementales (pH, température, taux d'humidité, etc.), des caractéristiques du polluant (solubilité, masse moléculaire, l'ancienneté du polluant, etc.), de la nature du sol (granulométrie, sa charge en matière organique, etc.). Elle se fait préférentiellement au niveau de la fraction organique du sol [39] ou sinon, au niveau de la fraction minérale [40].

Lorsque la teneur en matière organique dans les sols est supérieure à 1%, l'adsorption est très couramment décrite comme un simple équilibre de partage du composé organique entre la phase aqueuse et la matière organique du sol [32].

**II.4 Propriétés physico-chimiques des hydrocarbures****II.4.1 Viscosité**

Elle est considérée comme étant la mesure de la résistance d'un fluide lors de son écoulement. Elle dépend fortement de la température. En effet, plus la température est basse, plus la viscosité est élevée et moins les hydrocarbures pétroliers ont tendance à s'évaporer ou à se propager rapidement au niveau du sol [41].

**II.4.2 Solubilité**

C'est la capacité d'une substance à se dissoudre dans une autre substance. Les hydrocarbures légers sont plus solubles que les hydrocarbures lourds, donc les pétroles sont moins solubles lorsque leur fraction en hydrocarbures lourds est plus importante [42].

**II.4.3 Pression de vapeur**

La pression de vapeur est la pression exercée par la phase gazeuse d'une substance à l'équilibre avec sa phase liquide à une température donnée, c'est la pression à laquelle la substance s'évapore et se condense dans des conditions Spécifiques, elle dépend de la température et des propriétés physico-chimiques de la substance.

**II.4.4 Densité**

Elle représente le rapport entre la masse et le volume, elle permet donc de faire la différence entre les hydrocarbures lourds et légers. Elle augmente lorsque le rapport atomique

H/C diminue et diminue dans les cas suivants : interaction des molécules d'hydrocarbure avec le sol, évaporation des composés volatils et augmentation de la température. La densité du pétrole varie de 0,7 à 1 et peut aussi être exprimée en degrés APIo (American petroleum institute). Dans ce cas elle varie de 5 à 70 [42].

#### **II.4.5 Teneur en aromatique**

La teneur en aromatique est un indicateur sur la toxicité de produit. Cette peut varier en fonction de leur source et de leur processus de raffinage.

### **II.5 Ecotoxicité des hydrocarbures**

La pollution par les hydrocarbures pose d'importants problèmes dans l'environnement vis-à-vis des microorganismes, des plantes, des animaux et de la santé humaine. En raison de leur caractère liposoluble, ils peuvent s'accumuler dans la faune et la flore et tout au long de la chaîne trophique [43].

Les émissions d'hydrocarbures dans l'environnement peuvent polluer l'air, le sol, eaux souterraines, en particulier contamination de la chaîne alimentaire biologique [44].

La présence de fluide de forage dans les flaques de boue n'est pas en soi dangereuse, des risques surviennent une fois que ce polluant est mobilisé et devient polluant, il peut atteindre les eaux souterraines, la végétation de surface et les espèces animales vivant aux alentours, permanente ou temporaire [45].

La pollution peut avoir des impacts économiques sur le tourisme et les industries extractives ressources marines. Par exemple, la marée noire de Deepwater Horizon a affecté Tourisme balnéaire et pêche sur la côte du Golfe, les parties responsables doivent Indemnisation des victimes financière[46].

Plusieurs effets sur la santé peuvent être liés aux fluides de forage et à leur toxicité Leur structure, leurs propriétés physico-chimiques, leur qualité et leur quantité [47].

# **Chapitre III : Techniques de réhabilitation de sol**

### III.1 Introduction

La réhabilitation des sols a pour objectif de redonner la qualité et les fonctions initiales à un site contaminé [48]. En fonction du degré de contamination des sols et des risques qu'ils représentent directement la santé humaine et les écosystèmes, des techniques spéciales de décontamination doivent être mises en œuvre pour éliminer les polluants ou réduire leur toxicité. Il n'existe aucune méthode de remédiation « universelle » applicable à tous les sols pollués [49].

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

- Les méthodes **ex situ** qui consistent en l'excavation des sols contaminés. On parlera de méthode "**hors site**" si le sol est évacué vers un centre de traitement spécialisé, ou de méthode "**sur site**" si le sol excavé est redéposé sur le site pour être traité,
- Les méthodes **in situ** pour lesquelles l'opération de dépollution s'effectue sans excavation du sol. Cette option est souvent choisie pour traiter des sites en activité ou lorsque la zone polluée est trop étendue pour avoir recours à l'excavation [50].

### III.2 Les procédés de réhabilitation du sol

#### III.2.1 Les procédés physiques

Les traitements physiques in-situ utilisent des fluides (eau, gaz), présents dans les sols ou injectés, comme vecteur pour transporter la pollution vers des points d'extraction ou pour l'immobiliser [51]. Elles comprennent le confinement, la stabilisation, le lavage à l'eau et l'extraction par volatilisation (par exemple : venting qui consiste à extraire des polluants organiques volatils (hydrocarbures légers, BTEX...) par mise en dépression de la zone non saturée [52].

#### III.2.2 Les procédés chimiques ou électrochimiques

Les méthodes chimiques utilisent des réactifs chimiques pour détruire les polluants, les transformer en des composés moins toxiques ou/et plus facilement biodégradables ou modifier leurs caractéristiques (mobilité, toxicité...). Il s'agit par exemple d'oxydation chimique, de lavage par solvants ou tensioactifs [52].

**III.2.3 Les procédés thermiques**

Le traitement thermique des sols (désorption thermique, incinération) implique le transfert des polluants de la matrice du sol vers la phase gazeuse en introduisant de l'énergie thermique. Le chauffage peut être direct ou indirect, et le sol sera précédé d'un prétraitement (homogénéisation, broyage, décoagulation, tamisage, etc.). Le Traitement thermique se compose de deux étapes principales, chauffant le solide jusqu'à ce que les contaminants s'évaporent. Les vapeurs sont ensuite traitées dans une unité de post-traitement, en fonction des propriétés du gaz à traiter (condensation et/ou adsorption sur charbon actif, combustion, oxydation catalytique, filtres ...) [53].

**III.2.4 Les procédés biologiques**

Contrairement aux techniques physico-chimiques qui se contentent parfois de transférer des polluants d'une phase à une autre, les procédés de traitement biologique offrent la possibilité d'une dégradation complète des polluants en produits soit inoffensifs, soit moins polluants et moins toxiques.

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action des organismes (bactéries, champignons, levures, plantes). Ils peuvent être utilisés seuls ou en complément d'une autre technique. La décontamination par voie biologique consiste donc à stimuler un phénomène naturel pour en augmenter le rendement afin de détruire le polluant organique qui sera utilisé comme source de carbone [54].

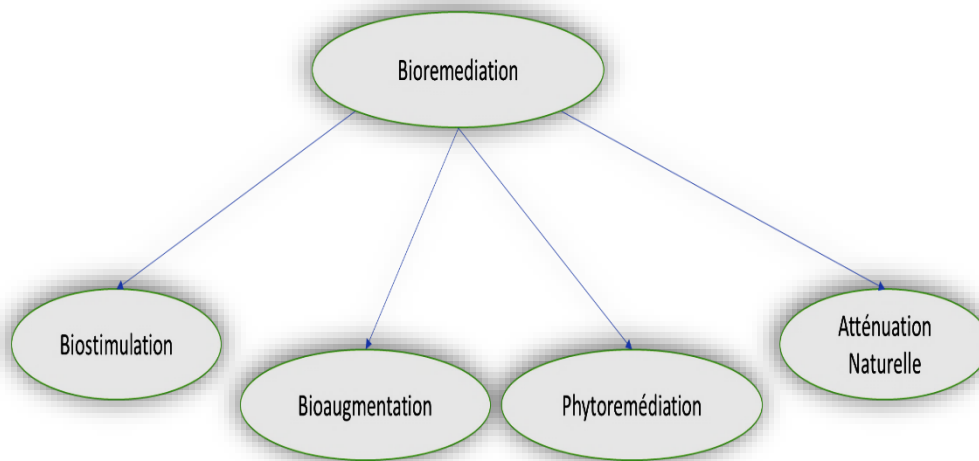
De plus, les traitements biologiques ont généralement des coûts d'exploitation inférieurs à ceux des procédés physiques et chimiques.

**III.3 La bioremédiation**

Le terme « bioremédiation » réfère à l'ensemble des stratégies biologiques utilisées pour éliminer ou transformer les déchets toxiques de l'environnement [55]. Des bactéries, des protistes, des plantes, des champignons et même des animaux peuvent être utilisés dans différentes approches de bioremédiation [56].

**III.3.1 Les techniques de bioremédiation**

Les techniques de bioremédiation sont : la biostimulation, la bioaugmentation, la phytoremédiation et l'atténuation naturelle chema 1.



**Figure 01 :** Techniques de bioremédiation.

### III.3.1.1 Biostimulation

Il s'agit de stimuler l'activité du microbiote natif du sol grâce à des adjuvants chimiques ou biochimiques. Parmi ces composés, les nutriments sont principalement l'azote, le phosphore, le potassium et les conditions environnementales (potentiel redox, humidité, etc.) [57]. L'ajout de ces catalyseurs accélère la vitesse de biodégradation des hydrocarbures et c'est l'une des techniques les plus utilisées en raison du très faible coût de mise en œuvre [58]. Pour une biodégradation réussie, certains paramètres doivent être contrôlés et optimisés. Dans le cas contraire, la dégradation est partielle et forme dans certains cas des produits intermédiaires plus toxiques que les polluants initiaux [59].

### III.3.1.2 Bioaugmentation

La bioaugmentation consiste à inoculer au sol des souches spécifiques de micro-organismes exogènes pour optimiser l'activité des micro-organismes natifs responsables de la biodégradation des polluants organiques [60].

Elle est utilisée lorsque les microorganismes présents dans les sols ne sont pas capables de dégrader les polluants [61]. La sélection des souches est fondée sur le principe que certains micro-organismes sont mieux adaptés que d'autres à certaines activités cataboliques et certains environnements [62].

### III.3.1.3 Phytoremédiation

La phytoremédiation est une technique de bioremédiation in situ qui utilise les plantes et les microorganismes qui leur sont associés pour éliminer, transformer ou immobiliser divers

contaminants organiques et inorganiques qui se retrouvent dans l'air, dans l'eau ou dans le sol [63]. La phytoremédiation est particulièrement appréciée et jouit d'une popularité auprès du grand public en tant qu'alternative verte et propre [64].

#### **III.3.1.4 Atténuation naturelle**

L'atténuation naturelle, définie comme la dégradation des sols contaminés par un ensemble de processus chimiques, biologiques ou physiques naturels (sorption, dilution, biodégradation...), est connue pour prendre beaucoup de temps aux basses températures de l'Arctique [65].

Par conséquent, les effets néfastes chroniques des polluants d'hydrocarbures sur l'environnement arctique pourraient persister encore plus de 20 ans [66].

Après sept ans d'atténuation naturelle, la concentration des HAP dans un sol de friche industrielle de cokerie a ainsi été réduite de moitié [67]. Dans ce cas, les propriétés des sols ne sont pas affectées et une recolonisation biologique (végétale, faune) spontanée est généralement observée.

#### **III.3.2 Les facteurs influençant la bioremédiation**

La biodégradation des hydrocarbures dépend de nombreux paramètres. L'apport de nutriments ainsi que la disponibilité en oxygène peuvent faciliter la biodégradation des hydrocarbures [68]. D'autres Conditions environnementales du site importantes à prendre en compte pour les applications de bioremédiation incluent le pH avec un optimum dans la plage de 6-8 [69], la structure du sol, la température, la teneur en eau, la salinité, l'oxygène, la disponibilité des nutriments et le potentiel redox.

##### **III.3.2.1. La structure du sol**

Selon [70] la structure du sol affecte le transport des nutriments et de l'oxygène, qui seront plus accessibles à la flore indigène responsable de la biodégradation, d'autant que le milieu est perméable.

[71] a observé que les agrégats de sols réduisaient la biodégradation.

##### **III.3.2.2 Le potentiel d'hydrogène pH**

Le pH du milieu affecte l'activité des micro-organismes et leur sélection. En effet, tout micro-organisme a une région de pH où son taux de croissance est optimal. Au-dessous et au-dessus de cette région, la croissance peut être fortement réduite voire inhibée [72].

L'efficacité de la biodégradation des hydrocarbures sont généralement plus élevés à un pH légèrement alcalin.

La plupart des bactéries sont capables de se développer dans un intervalle de pH allant de 5 à 9, avec un optimum se situant aux alentours de 7 [73].

### **III.3.2.3 La température**

La température a un effet considérable sur la capacité des microorganismes à dégrader les hydrocarbures [74].

Elle affecte directement le taux métabolique microbien, affectant ainsi l'activité microbienne dans l'environnement. Le taux de biodégradation, dans une certaine mesure, augmente avec l'augmentation de la température et ralentit avec la diminution de la température [75].

L'intervalle de température favorable à la bonne activité microbienne se situe entre 20 et 37°C. [76]

### **III.3.2.4 L'humidité**

La présence d'eau est évidemment nécessaire pour le bon déroulement des processus biologiques, mais l'humidité assure également un rôle protecteur car elle permet de diluer la concentration du polluant et donc d'atténuer sa toxicité directe pour les microorganismes [77].

Pour une croissance et une prolifération optimale, les microorganismes nécessitent 12% à 25% d'humidité[78].

### **III.3.2.5 L'oxygène**

C'est le plus important des facteurs, à savoir la disponibilité en accepteurs d'électrons qui constitue, dans la majorité des situations, l'élément limitant au développement des processus microbiologiques, dans les sols [79].

L'oxygène moléculaire est un facteur limitant dans la biodégradation aérobie des hydrocarbures, puisque l'étape initiale de ce processus est l'oxydation de la fraction pétrolière par les monooxygénases [80] l'oxygène nécessaire à la croissance microbienne doit être fourni au cours de l'aération [81].

En général, les taux de conversion et les cinétiques de biodégradation dans des conditions aérobies sont considérablement plus élevés que ceux dans des conditions anaérobies [82].

### **III.3.2.6 Les nutriments**

Nécessaire à la croissance et à la division des cellules microbiennes [83]. La quantité appropriée d'oligo-éléments pour à la croissance microbienne est généralement présente, mais les nutriments peuvent être ajoutés sous une forme utilisable ou par Amendements de substrat organique [84], également disponibles en tant que donneurs L'électronique qui stimule la bioremédiation.

La disponibilité des nutriments affecte les populations microbiennes présentes dans le sol. Les nutriments nécessaires à la croissance cellulaire sont N, P, K, S, Mg, Ca, Mn, Fe, Zn et cuivre. N et P sont les nutriments les plus déficients dans les environnements pollués par les hydrocarbures [85]. L'apport d'azote et de phosphore doit être suffisant pour établir des rapports C/N et C/P optimaux [86].

### **III.3.2.7 La salinité**

La salinité diminue le nombre de micro-organismes dans le sol [87]. Elle ralentit les processus de l'humidification et de la minéralisation des matières organiques.

### **III.3.2.8 Les polluants**

La vitesse de dégradation des composés organiques dépend de leur structure chimique. À titre d'exemple, dans la famille des hydrocarbures, ce sont les n-alcanes qui sont le plus rapidement métabolisés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques à nombre de cycles élevés ( $\geq 4$ ) sont plus résistants. Plus une molécule est substituée (chaîne longue et ramifiée), plus elle est difficile à dégrader [88].

## **III.4 Les déchets valorisants la stimulation**

### **III.4.1 Fumier de moutons**

Le fumier de mouton est sec et chaud. Le terme fumier est souvent utilisé pour désigner le fumier solide (injections et litière), le lisier (fumier présent sous forme liquide dû à la faible quantité ou à l'absence de litière), le purin (le liquide noirâtre qui s'écoule des amas de fumier solide) [89].

Le fumier est le produit de la digestion des végétaux ingérés par les bovidés. Les différents remaniements dans les « estomacs » puis le tube digestif de ces végétaux permettent une assimilation et une intégration d'une partie seulement des matières ingérées, le reste étant éliminé dans les bouses. C'est pour cette raison que la bouse représente une matière riche en différents éléments organiques notamment l'azote [90].

#### **III.4.2 Sciure de bois**

Lorsque nous observons le bois d'un point de vue microscopique, nous constatons qu'il est composé de Microfibrilles de cellulose liée entre elles par l'hémicellulose et la lignine, cette dernière confère une résistance mécanique globale, formant des fibrilles, qui forment elles-mêmes les fibres de bois.

L'hémicellulose et la cellulose forment l'holocellulose, constituée de polysaccharides de diverses natures. La lignine a une structure polyphénolique très complexe et variable [91].

Le comportement hygroscopique du bois est lié à l'absorption d'eau du bois. Groupes alcooliques des microfibrilles de cellulose et des hémicelluloses. En effet, ces molécules d'eau vont rentrer dans les micropores des parois cellulaires (interstices entre la matrice et les fibrilles) et faire gonfler celles-ci. Ce qui par la même occasion peut faciliter la dégradation du bois par l'entrée de micro-organismes ou de liquides [92].

#### **III.4.3 Les dattes séchées**

Les dattes séchées peuvent être utilisées de différentes manières dans le traitement biologique du sol. Elles sont riches en fibres, antioxydants, potassium, magnésium et fer. Elles peuvent être broyées ou réduites en poudre pour servir d'amendement organique, améliorant ainsi la structure du sol, sa capacité à retenir l'eau et les nutriments. Les dattes séchées peuvent également être ajoutées au compost pour enrichir le mélange en nutriments et accélérer sa décomposition. En les utilisant comme paillis organique, elles contribuent à réduire l'évaporation de l'eau, à maintenir une température constante du sol et à prévenir la croissance des mauvaises herbes. En mélangeant les dattes séchées à d'autres ingrédients organiques, elles peuvent être transformées en un engrais naturel qui nourrit les plantes et fournit des nutriments essentiels au sol.

**Tableau III.1 : Biostimulation à l'aide des nutriments organiques**

Nutriments ajoutés	Type de contaminant	TPH initiale	Rendement d'élimination	Duration (jours)	Commentaire	Références
La sciure de bois et boues d'épuration	Hydrocarbure de pétrole - pétrole brut 38,000 mg/kg	38,000 mg/kg	Élimination à 100%	570	Une élimination de 100% sur une période de 19 mois avec une croissance de la population microbienne	[93]
Fumier de vache	Marais de mangrove pollué par les hydrocarbures	Non indiqué	62,96%	70	Réduction observée des hydrocarbures	[94]
La bagasse de canne à sucre, Grappe de fruits de palmier à huile de palme	Pétrole brut d'hydrocarbures pétroliers	Non indiqué	100%	- Pour la bagasse de canne à sucre et jusqu'à 97% - Pour la grappe de fruits de palmier 20	Montrés importante biodégradation en utilisant ces suppléments pour stimuler la croissance microbienne	[95]

## **Chapitre IV : Matériels et méthodes**

Ce chapitre présente un aperçu des équipements utilisés ainsi que des méthodes d'analyse mises en œuvre pour caractériser le sol pollué en hydrocarbure. La description de la mise en place du protocole nécessaire pour la bioremédiation du sol et suivre l'évolution du traitement au cours du temps.

### **IV.1 Caractérisation des sols**

Dans le cadre de notre étude, nous avons prélevé des échantillons de sol pollué (SP, SPmoy) à différents emplacements au sein de la base pétrolière de SONATRAC, située à Hassi-Messaoud, dans le sud de l'Algérie. Cette base se trouve à une distance de 870 km au sud-est d'Alger et à 80 km à l'est d'Ouargla. Les sols prélevés étaient contaminés par des rejets de forage. Un des sols présentait une forte contamination, tandis que les autres sols ont été mélangés pour obtenir un sol moyennement pollué. De plus, nous avons créé un sol artificiellement pollué par le gasoil (sol récupéré d'un site de l'université de Tizi-Ouzou (UMMTO)).



**Figure 1** : Sol moyennement polluer



**Figure 2** : Sol polluer



**Figure 3** : Sol artificiellement polluer

Pour favoriser la biodégradation des hydrocarbures par traitement biologique de ces sols, nous avons utilisé une variété de déchets.

- Le fumier de mouton issu d'une ferme du village Ikhlidjen de Larbaâ Nath Irathen, Tizi-Ouzou.
- Les dattes sèches, acheté dans un magasin à Tizi-Ouzou.
- La sciure de bois provenant d'une menuiserie située à Larbaâ Nath Irathen, Tizi-Ouzou.

### IV.1.1 Analyse de la Granulométrie

L'analyse granulométrique effectuée sur une prise d'essai de terre fine ( $\phi < 2$  mm), a pour but de déterminer le pourcentage des différentes fractions de particules constituant les agrégats à savoir l'argile, les limons et le sable.

Les particules minérales peuvent être classées selon la classification d'ATTERBERG adoptée par l'association internationale de la science du sol [96]: Argile ( $< 2\mu\text{m}$ ), limon (2 - 50  $\mu\text{m}$ ), et sable (50  $\mu\text{m}$  - 2 mm).

La texture du sol a été déterminée par la méthode internationale de la pipette de Robinson [97]. Elle est basée sur l'élimination de la matière organique et le traitement de la terre fine par un réactif dispersant les agrégats, puis on procède après un temps de sédimentation variable avec la température au fractionnement des argiles et des limons à l'aide de la pipette de Robinson [98].

## IV.2 Acclimatation

### IV.2.1 Description du dispositif expérimental

L'adaptation a été réalisée dans trois réacteurs de capacité de 1L mis dans un bain thermostaté à 35°C. Ces réacteurs sont soumis à une agitation mécanique (150 tr/min) pendant une période de 15 jours.

Pendant cette période nous avons effectué des prélèvements afin de suivre l'évolution des paramètres suivants : la demande chimique en oxygène (DCO), la turbidité, le H et la conductivité électrique. Ces analyses ont été réalisées afin de monitorer les changements et les variations au fil du temps.



**Figure 04** : Dispositif expérimental de l'acclimatation

#### **IV.2.2 Boue activée**

Dans un bécher d'une capacité de 1 litre, nous avons introduit 1 litre de boue concentrée. Cette boue est soumise à une agitation par un moteur placé dans un bain-marie maintenu à une température de 35 °C, pendant une période de 15 jours. Du gasoil a été ajouté tous les 5 jours de manière progressive en tant que source de carbone. Afin de favoriser une croissance optimale des microorganismes, de l'azote et du phosphore ont été ajoutés sous forme de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  et  $\text{KNO}_3$ . Les concentrations ont été fixées en se basant sur l'hypothèse de Rosenberg (1992), qui stipule qu'environ 150 mg d'azote et 30 mg de phosphore sont nécessaires pour dégrader 1 g d'hydrocarbures.

### **IV.3 Bouillon de dattes (Bdtt)**

#### **IV.3.1 Préparation de la solution de dattes**

Dans un bécher, nous avons mélangé 1 litre d'eau distillée stérile avec une concentration de 1,25 % de poudre de dattes. Le mélange a été agité pendant une période de 30 minutes. Au quel on ajoute les polluants suivants :

- Gasoil
- Sol



Figure 05 : Solution de dattes

#### IV.4 Fumier de mouton

On répartit une quantité équivalente de fumier sur quatre boîtes, auxquelles on ajoute les éléments suivants :

- Le sol, pour Fm1 et Fm2
- Le sol au fumier et du gasoil, pour Fm3 et Fm4

#### IV.5 Solution Bushnell-Haas (BH)

Pour préparer la solution on aura besoin les produits suivants :  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$  ;  $CaCl_2 \cdot 2H_2O$  ;  $KH_2PO_4$  ;  $NH_4NO_3$  ;  $FeCl_3$  et  $K_2HPO_4$

#### IV.6 Préparation des bacs de traitements

Une quantité de 250 g de sol est mise dans chaque bacs pour chaque type de sol.

##### IV.6.1 Sol polluer (SP)

Le sol pollué est reparti sur 06 bacs, chaque bac comprend une composition bien définie, comme le montre le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Elaboration des bacs de traitement

Bacs	Compositions
Bac 1 = SP1	SP + Fm <sub>1</sub> (20g) + 30mL (ED) +7g (SB)
Bac 2 = SP2	SP + Ba (20mL) + 25mL (ED) + 7g(SB)
Bac 3 = SP3	SP + Ba (25mL) + Fm <sub>1</sub> (20g) + 7g(SB) + 5ml (ED)
Bac 4 = SP4	SP + Bdt (25mL) +7g (SB)
Bac 5 = SP5	SP +Ba (12,5mL) + Bdt (12,5mL) +7g (SB)
Bac 6 = SP6	SP +Ba (12,5mL) +Bdt(12,5mL) (sans polluant) +7g(SB)

**IV.6.2 Sol moyennement polluer (SPmoy)**

Le sol moyennement pollué est reparti sur 4 bacs, comme l'indique le tableau ci-dessous :

**Tableau IV.2 : Préparation des bacs de traitement**

<b>Bacs</b>	<b>Compositions</b>
Bac 1 = SPmoy7	SPmoy + Bdt (25mL) +7g (SB)
Bac 2 = SPmoy8	SPmoy + BH (25mL) + 7g (SB)
Bac 3 = SPmoy9	SPmoy + Bdt (25mL) (sans polluant) + 7g (SB)
Bac 4 = SPmoy10	SPmoy + Bdt (12,5mL) (sans polluant) + 12,5mL (ED) +7g (SB)

**IV.6.3 Sol artificiellement polluer (SPbio)**

Le sol artificiellement pollué est reparti sur 05 bacs, comme le montre le tableau suivant :

**Tableau IV.3 : Elaboration des bacs de traitement**

<b>Bacs</b>	<b>Compositions</b>
Bac 1 = SPbio11	SPbio + Fm (12,5g) + ED 25mL +7g SB
Bac 2 = SPbio12	SPbio + Fm (25g) + ED 25mL +7g SB
Bac 3 = SPbio13	SPbio + Ba (25ml) + 7g SB
Bac 4 = SPbio14	SPbio + Ba (25ml) + Fm (25g) + ED 5mL + 7g SB
Bac 5 = SPbio15	SPbio + Fm(25g) + ED 25mL + 7g SB

La bioremédiation des sols a été suivie pendant une période de 66 jours, les bacs sont placés dans une étuve à une température constante de 35°C. Pendant cette période, chaque trois jours ces bacs sont remués, pesés et ajustés avec de l'eau distillée afin de maintenir une humidité constante au sein du bac. Des échantillons ont été prélevés chaque 12 jours durant la période de traitement, afin de déterminer les différents paramètres tels que la demande chimique en oxygène (DCO), le pH, les unités formant colonies (UFC), ... etc.

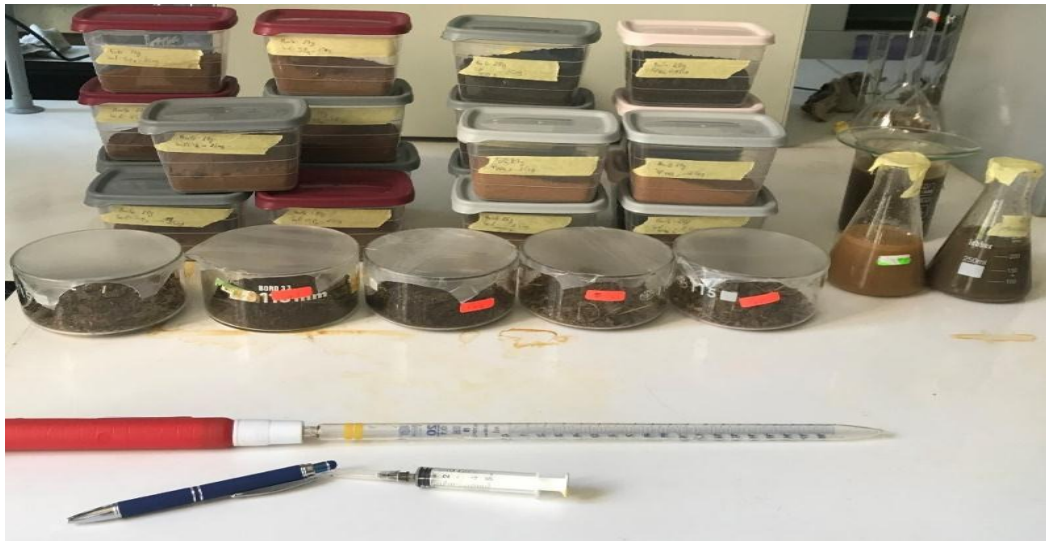


Figure 06 : Préparation des bacs de traitement



Figure 07 : Les bacs dans l'étuve

## **Chapitre V : Résultats et discussions**

Dans ce chapitre, la caractérisation physico-chimique des échantillons de sol pollué à savoir, la demande chimique en O<sub>2</sub> (DCO) des échantillons ciblés et la cinétique de l'acclimatation de Ba est examinée et enfin la bioremédiation des différents sols pollués est étudiée.

### V.1 Caractérisation physico-chimiques des échantillons de sol pollué

Les échantillons de sol pollués présentent une texture sableuse avec une forte odeur due probablement à la concentration élevée en hydrocarbure.

Plusieurs paramètres tels que : l'humidité, le pH, la conductivité électrique, les nitrites, les nitrates, l'azote, et la teneur en hydrocarbure, ont été déterminés pour les différents échantillons considérés initialement.

Le tableau V.1 regroupe les résultats obtenus, suite aux analyses effectuées sur les échantillons de sol pollué (SP, SPmoy et SPbio).

**Tableau V.1** : Résultats d'analyses physico-chimiques des échantillons du sol étudiés SP, SPmoy, SPbio

	SP initial	SPmoy initial	SPbio initial
<b>H (%)</b>	10,5	8,6	20
<b>Ph</b>	7,69	7,89	8,36
<b>CE (S/m)</b>	0,961	0,842	0,262
<b>Nitrites (mg/L)</b>	0,222	0,103	0,234
<b>Nitrates (mg/L)</b>	686,25641	268,717949	865,487179
<b>N (%)</b>	0,123	0,115	0,052
<b>CT (mg/L)</b>	0,04714	0,06366	0,212
<b>Teneur HC (TPH g /kg de sol)</b>	32,6	27,2	81,3

L'importance de la texture sableuse des échantillons du sol ciblés, suggère une bonne perméabilité facilitant ainsi la circulation des fluides contenant les nutriments et l'oxygène qui seront ainsi plus accessibles aux microorganismes.

Les résultats montrent que les sols pollués (**SP, SPmoy**) se caractérisent par un faible taux d'humidité (**10,5 et 8,6 %**), qui pourrait être liée aux caractéristiques de la zone de prélèvement (texture sableuse du sol et/ou aux températures élevée, environ 50 °C).

Cependant, un certain taux d'humidité est indispensable au développement des microorganismes dans le sol. C'est un paramètre très important dans le processus de biodégradation.

L'échantillon SP et SPmoy, ont montré un taux d'humidité légèrement supérieur à 2%, valeur seuil en dessous de laquelle il y a limitation de la croissance d'après plusieurs auteurs [99].

Le sol pollué avec le gasoil (**SPbio initial**) présente un taux d'humidité de 20%. Ce pourcentage semble être supérieur à ceux trouvés par les échantillons cibles (**SP, SPmoy**). Le taux d'humidité présent dans le sol pollué avec le gasoil peut favoriser le développement des micro-organismes.

Les sols pollués (**SP et SPmoy**) se caractérisent par un **pH** légèrement alcalin (7,69 et 7,89) et une salinité élevée (0,961 et 0,842 g/L), selon la classification de Soltner (1981) et de Durand (1983), respectivement. Ceci peut être attribué à la nature géologique du sol. Le pH du milieu peut affecter l'activité microbienne. En effet, la valeur du pH enregistré par les sols pollués, appartient à l'intervalle optimal de la croissance de la plupart des bactéries (pH allant de 5 à 9), avec un optimum se situant aux alentours de 7 [100].

**SPbio initial** montre un pH de 8,36, cette valeur n'est pas loin de la valeur du pH des sols pollués **SP et SPmoy**. Le pH du **SPbio initial** rentre dans l'intervalle de la croissance de la plupart des micro-organismes (pH allant de 5 à 9).

La forte salinité signalée par les sols pollués (**SP et SPmoy**) peut réduire le nombre de microorganismes dans le sol [101]. Conduisant ainsi, au ralentissement des processus de dégradation des matières organiques. Une valeur de conductivité élevée peut constituer donc une barrière naturelle pour la biodégradation [102]. En effet, de nombreux sols désertiques se caractérisent par une haute concentration en sel selon [103].

Le sol pollué avec le gasoil (**SPbio**) admet une conductivité de 0,262 (S/m). Cette valeur paraît largement inférieure à celle trouvée par **SP et SPmoy**, donc une faible salinité peut entraîner la multiplication des bactéries.

Les sols pollués **SP, SPmoy et SPbio** ont montré des concentrations de (0,222; 686,25641 mg/L) ; (0,103; 268,717949 mg/L) et (0,234; 865,487179 mg/L) en (nitrites; nitrates), respectives.

Un pourcentage de 0,123 ; 0,115 et 0,052 % en azote est observé pour les sols pollués **SP, SPmoy et SPbio**, respectivement. Le sol pollué avec du gasoil, est le moins riche en azote par comparaison aux deux autres **SP et SPmoy**. L'azote fait partie des éléments nécessaires pour le développement des micro-organismes. Il joue un rôle important dans la synthèse des protéines et des bases azotées de la cellule microbienne.

Les sols pollués **SP, SPmoy et SPbio** ont enregistré une concentration en carbone total de 0,04714 ; 0,06366 et 0,212 mg/L, respectivement. Le sol pollué avec le gasoil (**SPbio**) a montré une concentration élevée en carbone total par rapport aux autres sols **SP, SPmoy**.

Les sols **pollués SP, SPmoy et SPbio** ont montré des concentrations de (0,222; 686,25641 mg/L); (0,103; 268,717949 mg/L) et (0,234; 865,487179 mg/L) en (nitrites; nitrates), respectives.

Le dosage des hydrocarbures totaux (TPH) dans les **sols pollués (SP, SPm et SPbio)** a enregistré la présence d'une très forte teneur en hydrocarbure 32,6 ; 27,2 et 81,3 g/kg, respectivement. Ces valeurs sont largement supérieures à la valeur fixée par la norme Néerlandaise (0,1 g/kg de sol) [104]. Cela montre que les sols considérés dans ces études sont très pollués, d' où le risque de pollution de l'environnement, ce qui nécessite donc leur traitement.

## V.2 Détermination de la demande chimique en oxygène des différents sols pollués (SP, SPmoy et SPbio)

En plus de l'analyse des paramètres des sols pollués, la mesure en **DCO** des échantillons de sols pollués est donnée par le tableau V.2.

**Tableau V.2 :** Valeur en DCO de **SP, SPmoy et SPbio**

Echantillon initial	DCO (mg/L)
<b>SP</b>	922,5
<b>SPmoy</b>	622,5
<b>SPbio</b>	972,5

Des valeurs de 922,5 ; 622,5 et 972,5 mg/L en DCO ont été obtenues par les sols pollués **SP, SPmoy, et SPbio**, respectivement. Ces valeurs dépassent largement la norme de pollution de sol dont la valeur limite est 120 O<sub>2</sub> mg/L. Selon [105], quand la demande chimique en oxygène (DCO) est élevée cela indique une pollution forte au niveau du site étudié .[106]

## V.3 Etude cinétique de l'acclimatation de Ba

L'acclimatation a été réalisée sur le consortium Ba considéré dans cette étude, la caractérisation initiale des différents consortiums a montré les résultats regroupés dans le tableau V.3.

Les résultats d'analyse montrent que le pH des différents consortiums utilisés varie de 6,44 - 8,5. Cet intervalle de p H est favorable pour la croissance des micro-organismes.

**Tableau V.3 :** Caractérisation initiale des différents consortiums Ba, Fm, BH, et Bdtt

	PH	DCO (mg/L)	Conductivité (S/m)	Turbidité (NTU)
<b>Fm</b>	8,5	-	-	-
<b>Ba</b>	6,61	497,5	1,738	-
<b>Bdtt</b>	6,44	13890	1,607	537
<b>BH</b>	7,14	1627,5	4,77	196

Une DCO de 497,5 ; 13890 et 1627,5 mgO<sub>2</sub>/L est enregistrée pour le consortium Ba, Bdtt et BH, respectivement. Cela montre que le consortium Bdtt utilisé est très en matière oxydable par rapport au consortium Ba et BH.

Une turbidité de 537 et 196 NTU est obtenue pour le consortium Bdtt et BH, respective. Le consortium Bdtt paraît plus riche en matière en suspension par rapport au consortium BH.

La cinétique d'acclimatation du consortium Ba est représentée par la Figure 1. Une augmentation de la matière organique oxydable de 497,5 à 954 mg O<sub>2</sub>/L est enregistrée après une journée d'adaptation, la valeur de la turbidité de 6,88 NTU. La valeur constante de la turbidité le long de l'acclimatation peut s'expliquer par la résistance des microorganismes à la toxicité du polluant. Après 15 jours d'adaptation une DCO de 697 mg O<sub>2</sub>/L est obtenue avec une augmentation de turbidité de 18,8 NTU.

Cette diminution de la DCO est due probablement à la consommation de la matière organique par les microorganismes développés après 15 jours d'adaptation. Le pH est presque constant durant l'acclimatation, sa valeur appartient à l'intervalle favorable pour la multiplication des bactéries.

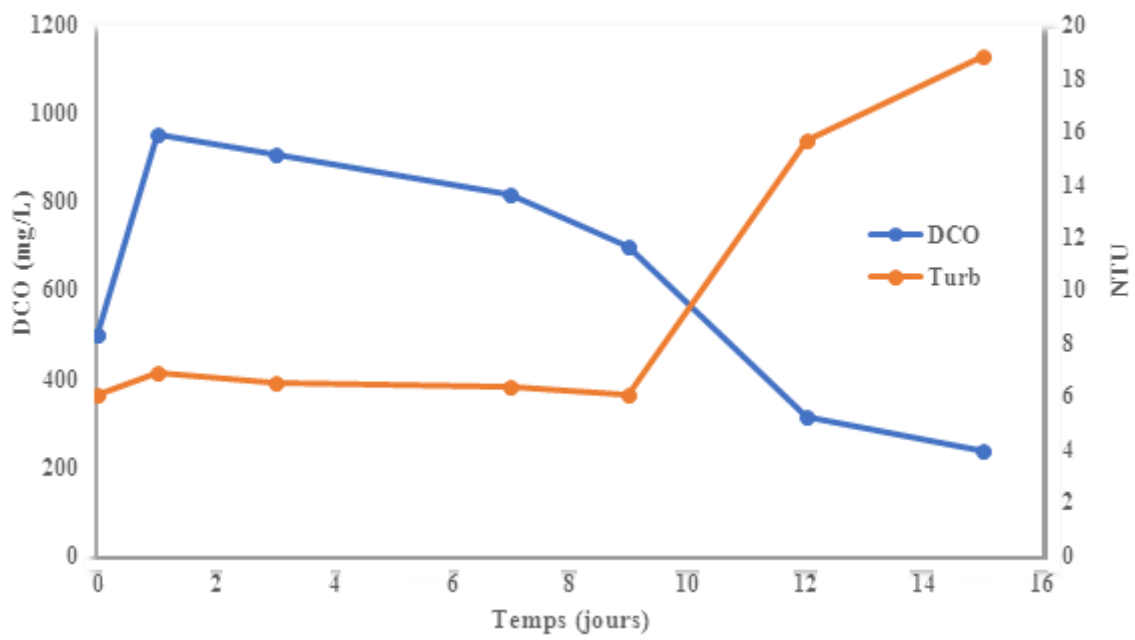


Figure 01 : Evolution de la DCO et turbidité au cours de l’acclimatation par BA

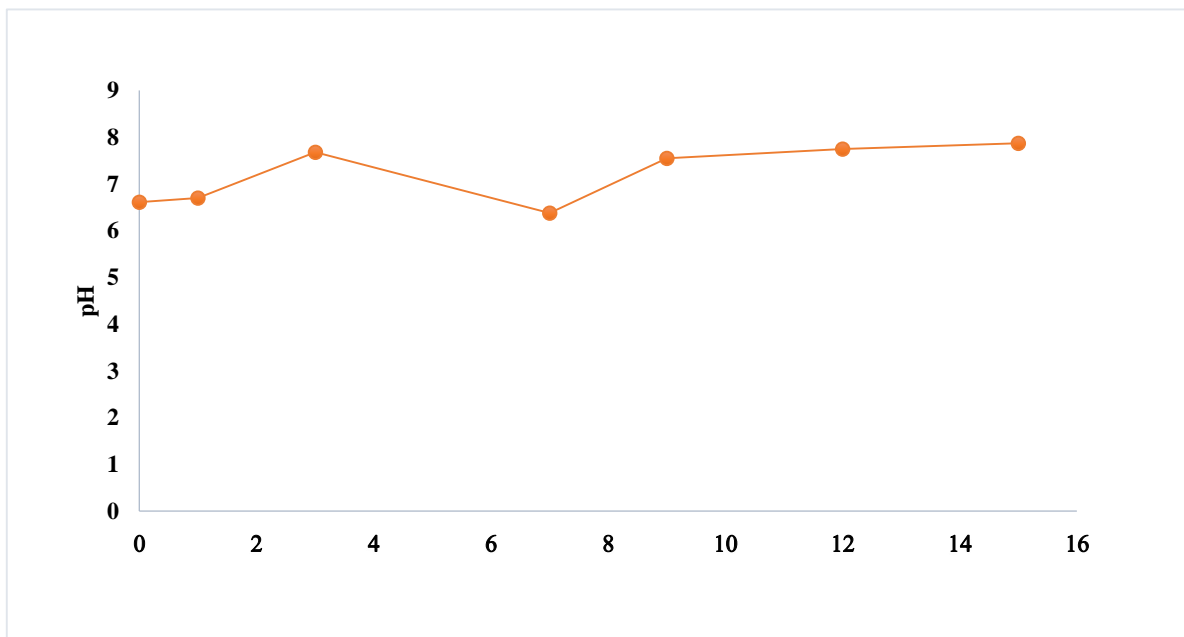


Figure 02 : Suivi du pH au cours de l’acclimatation par BA

#### V.4 Etude de la bioremédiation

Nous avons réalisé un ensemble d’essais de bioremédiation par microcosmes pendant

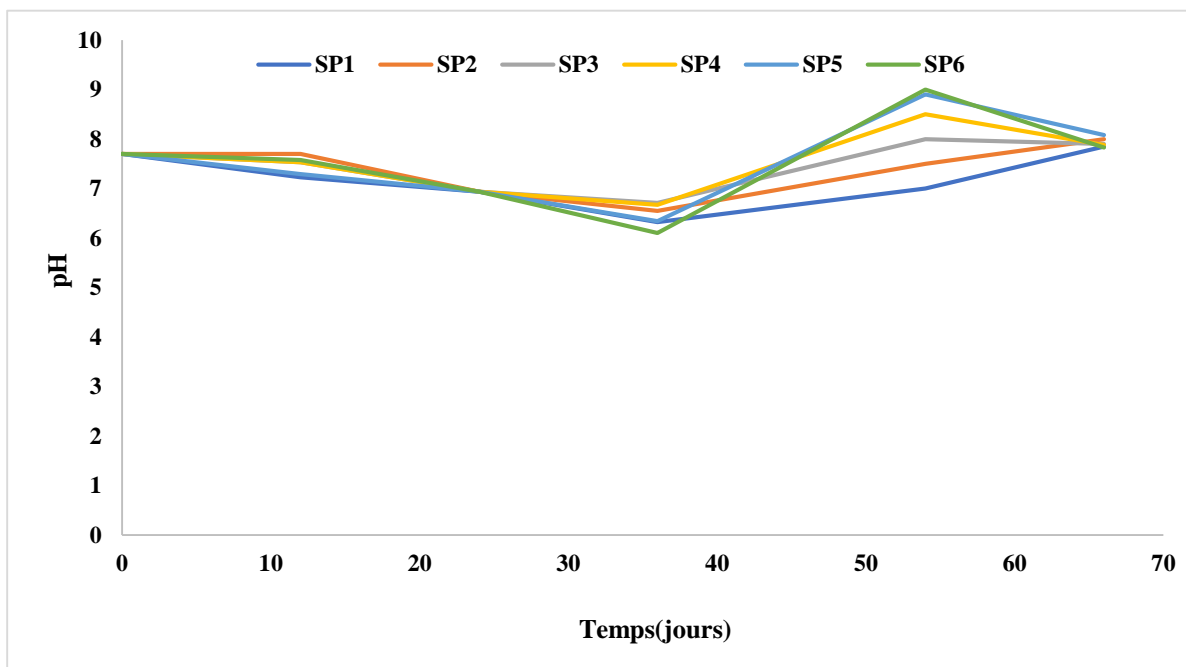
une période de traitement de 66 jours avec une culture mixte de microorganismes telluriques isolées des échantillons de SP et de la boue activée, et avec un fertilisant organique (fumier).

Les expériences de traitement de sol pollué ont été menées avec un taux d'humidité faible qui s'approche de l'humidité minimale à Ouargla. Les microorganismes sont adaptés à une humidité minimale.

Plusieurs paramètres ont été suivis durant la bioremédiation des échantillons de sol pollue.

**V.4.1 Evolution du pH**

Le pH c'est l'un des facteurs limitant la biodégradation microbienne c'est pour cela il est important de suivre son évolution dans les microcosmes de sol pollué.



**Figure 03 :** Evolution du pH des échantillons de SP en fonction du temps

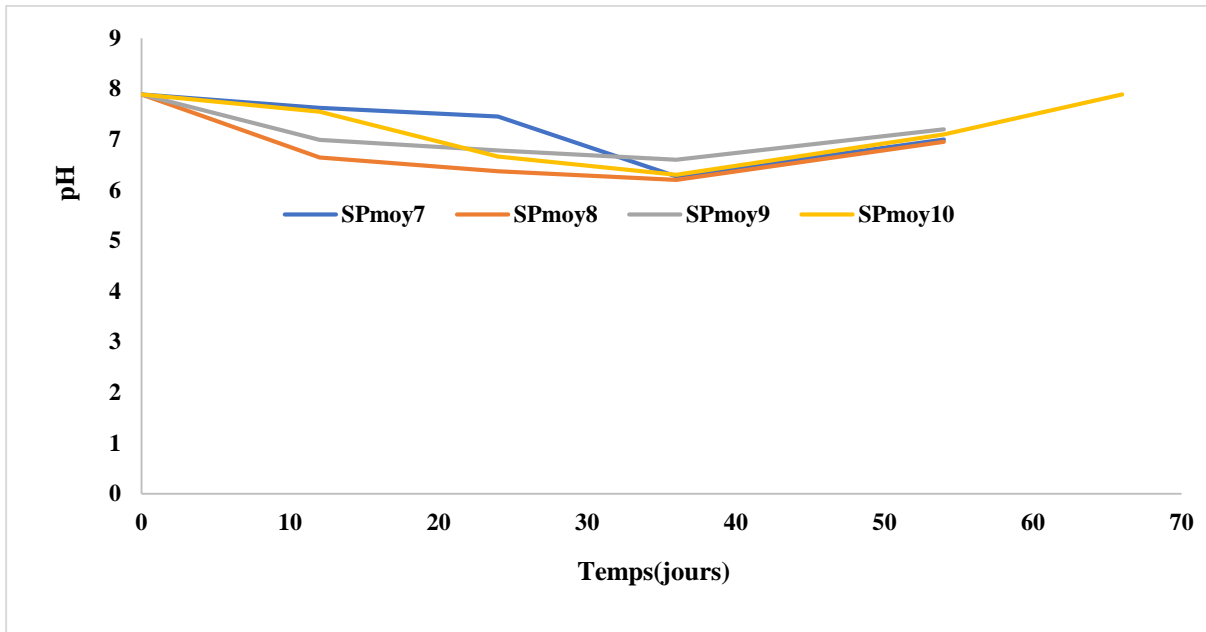


Figure 04 : Evolution du pH des échantillons de SPmoy en fonction du temps

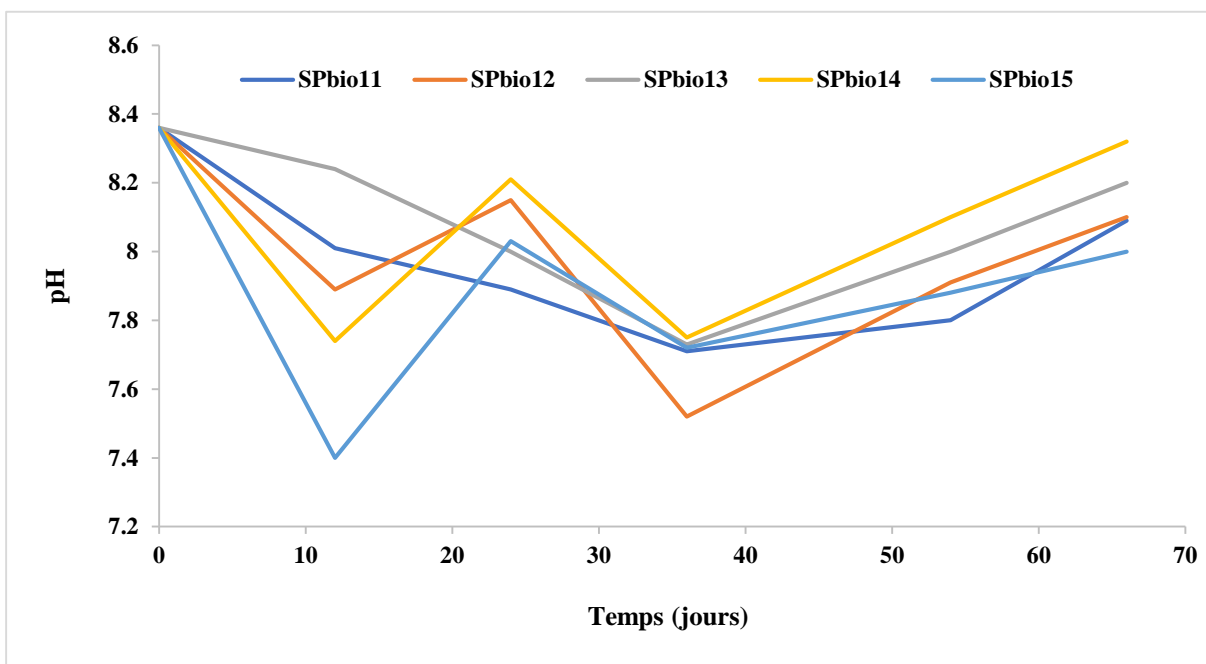


Figure 05 : Evolution du pH des échantillons de SPbio en fonction du temps

Pour l'ensemble des échantillons de sols pollués traités, il a été noté après 36 jours de l'expérience, une baisse légère du pH (dont les valeurs sont au voisinage de 6,3). A partir de 36 jours il y a eu une augmentation du pH (au voisinage de 8, puis à la fin de l'expérimentation une légère baisse du pH (dont les valeurs sont au voisinage de 7,8)).

La fluctuation du pH diffère selon le traitement appliqué. Durant toute la période de traitement des SP et SPmoy en microcosmes, le suivi du pH a montré qu'il était pratiquement compris entre 6,1 et 9. Le pH reste donc toujours dans un domaine de pH favorable pour les réactions biologiques [107] et à la croissance bactérienne (entre 5 et 9) selon [108], c'est aussi des valeurs de pH optimal pour la dégradation des hydrocarbures.

Il a été rapporté que toute fluctuation du pH au-delà de la plage optimale peut affecter la solubilité des hydrocarbures pétroliers et donc leur disponibilité aux bactéries dégradant le pétrole [109].

Des valeurs de pH légèrement alcalin (8) sont dans la marge optimale et favorable à la biodégradation des hydrocarbures selon plusieurs auteurs [110].

[111] ont remarqué que le taux de dégradation diminue de manière significative lorsque le pH augmente à 8 et 9.

#### V.4.2 Détermination du taux de dégradation des hydrocarbures :

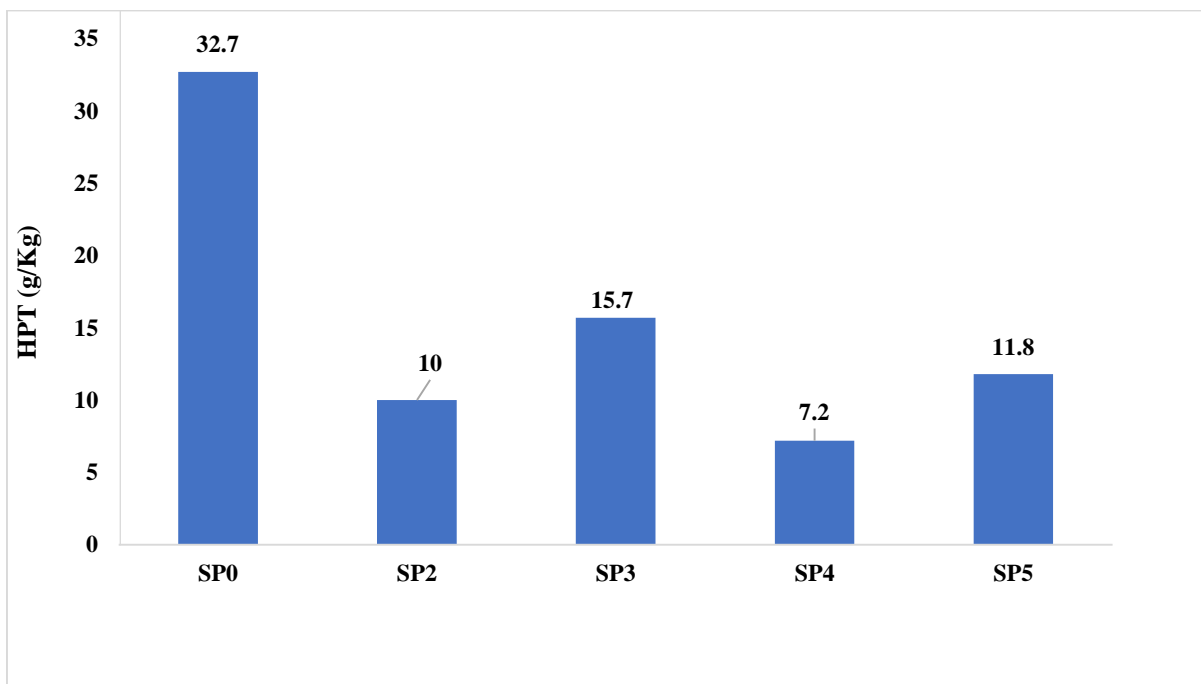


Figure 06 : Le taux de dégradation des HPT par le SP

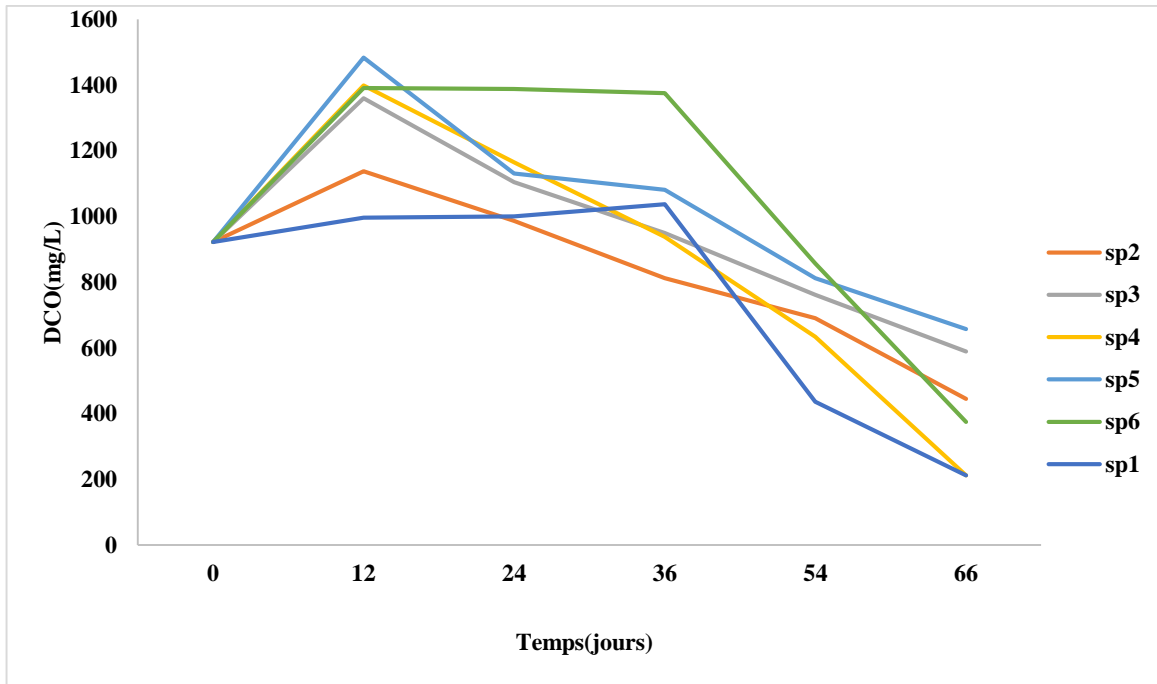


Figure 07: Evolutions des DCO dans SP

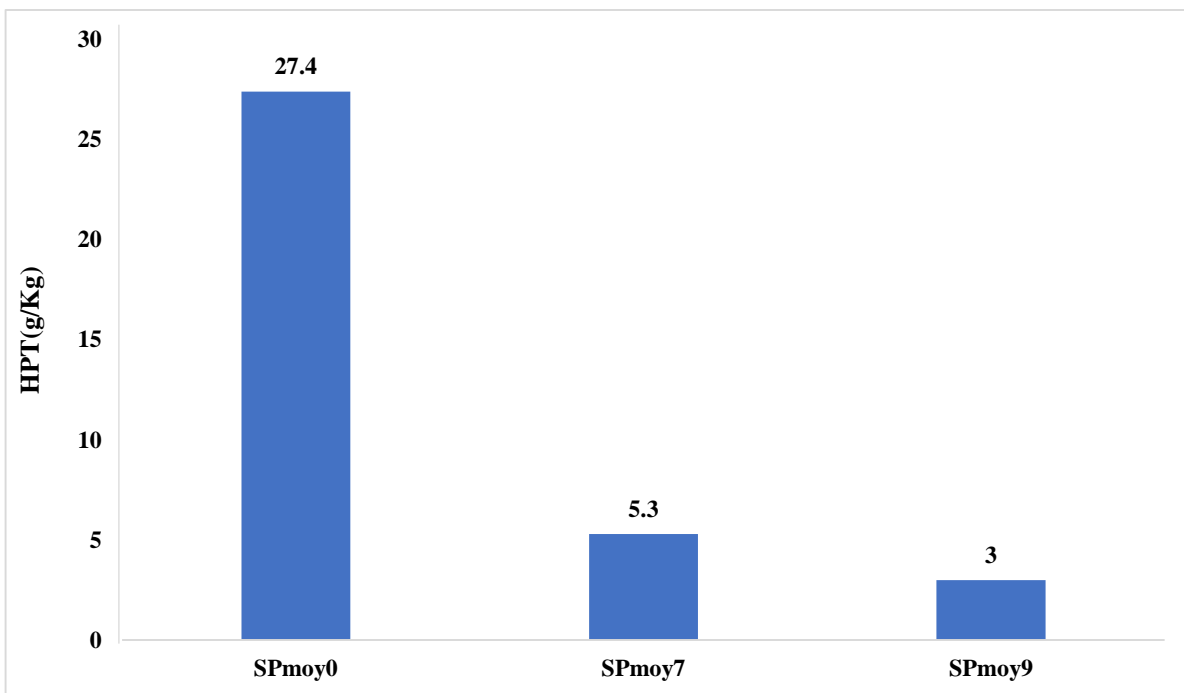


Figure 08 : Le taux de dégradation des HPT par le SPmoy

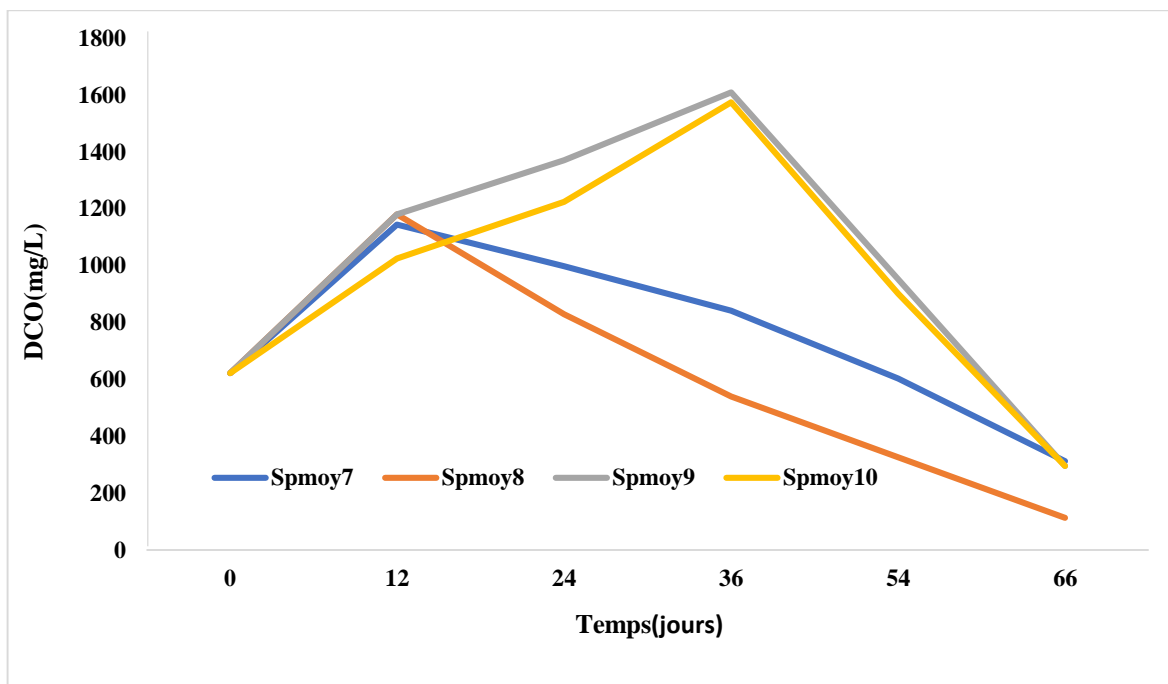


Figure 09 : Evolution de la DCO dans le SPmoy

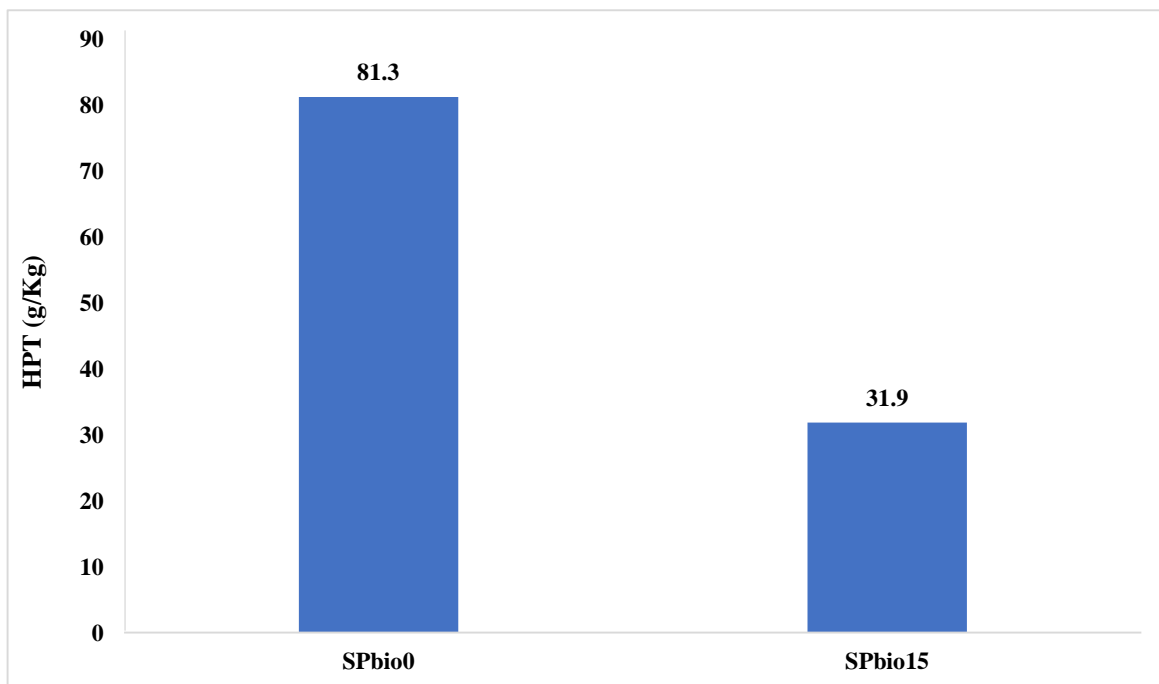
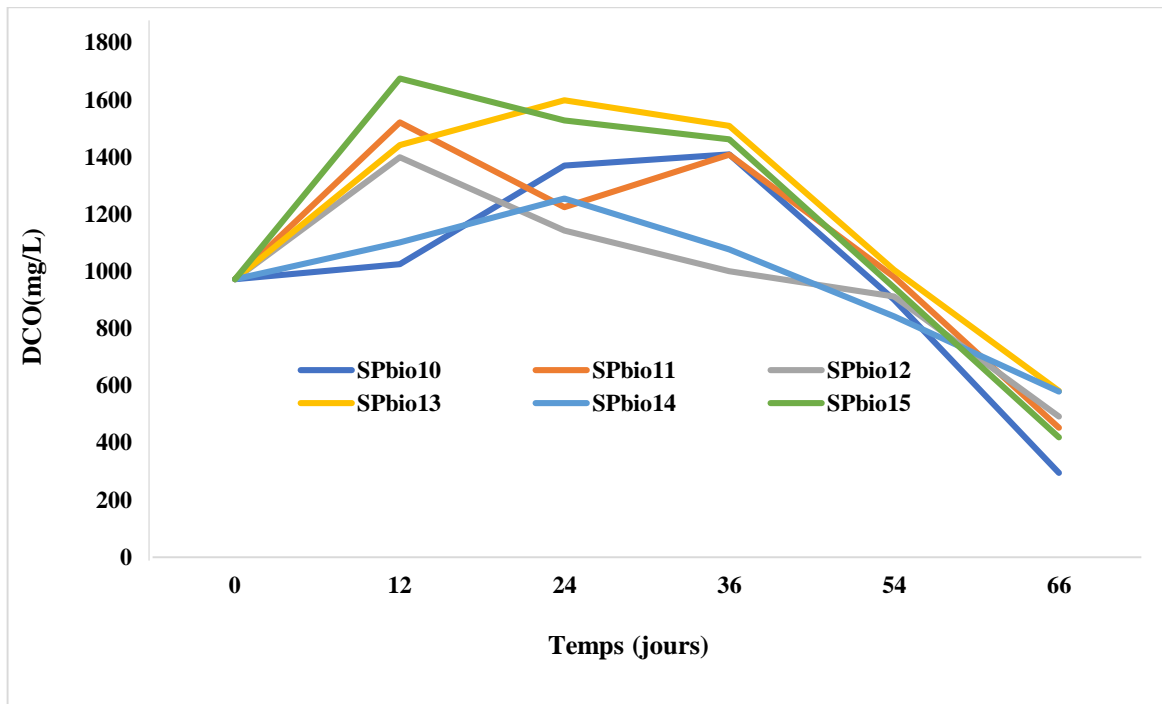


Figure 10 : Le taux de dégradation des HPT par le SPbio



**Figure 11** : Evolution de la DCO dans le SPbio

Les résultats montrent que les échantillons de sols pollués avant leur traitement présentent des valeurs de DCO et de TPH élevées (**DCO (mg/L) et TPH (g/kg) de SP, SPmoy, SPbio** respectivement : **(922,5 ; 622,5 et 972,5 mg/L), (32,7; 27,4 et 81,3 g/kg)** qui étaient supérieures à 120 mg/L et 0,1g/kg. Ce qui confirme une forte pollution en composés organiques notamment les hydrocarbures.

Selon les figures précédentes, nous constatons qu'au cours du temps de traitements il y a eu une baisse dans les valeurs de la DCO mesurées sur les sols pollués traités. Ceci serait dû à la diminution de la teneur des polluants dans le sol par comparaison au sol témoins ou il n'y a pas eu une baisse significative.

Le meilleur abattement de la DCO est attribué :

- Au sol Sp4 qui a été enrichi par **le bouillon de dattes activé** avec une valeur de DCO de **212 mg/L** et avec HPT de 7,2g/kg
- Au sol SPmoy8 avec une valeur de DCO de **112,5 mg/L** qui a été enrichis avec **BH (Bushnell-Haas)**, et le SPmoy9 et SPmoy10 avec la même valeur de DCO de **295 mg/l** et HPT de 3g/kg qui ont été enrichis avec **le bouillon de dattes non activé**.
- Au sol SPbio15 avec une valeur de DCO de **418,75 mg/l** qui a été enrichis avec **FUMIER brute**.

V.4.3 Evolutions de CT et N et le UFC

Les histogrammes ci-dessous résument les résultats CT, N et de la croissance bactérienne.

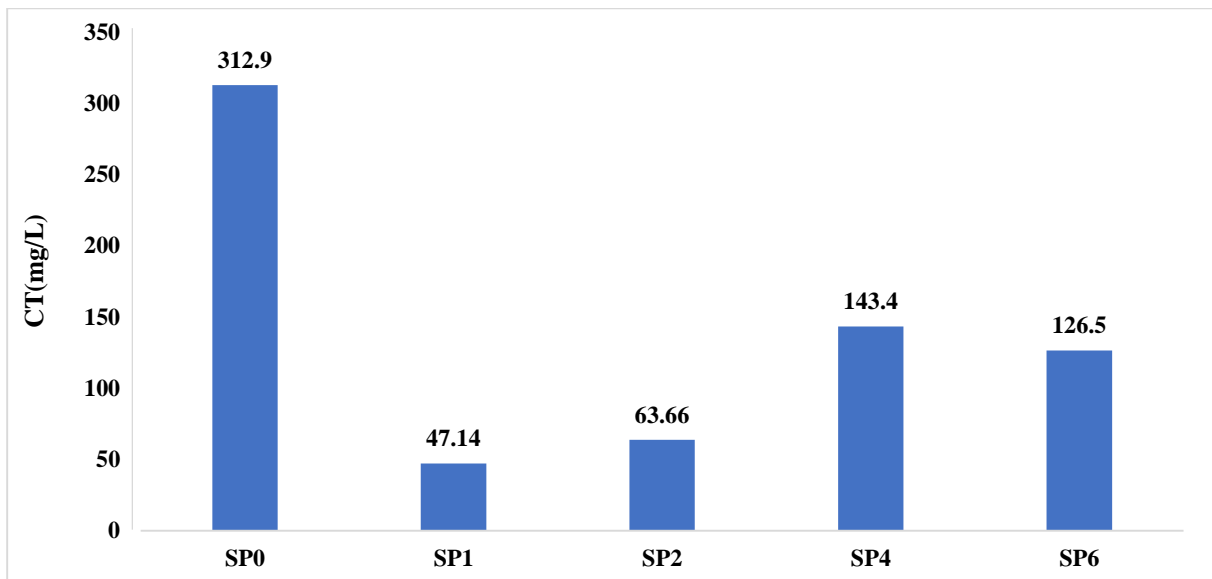


Figure 12 : Carbone total des échantillons SP

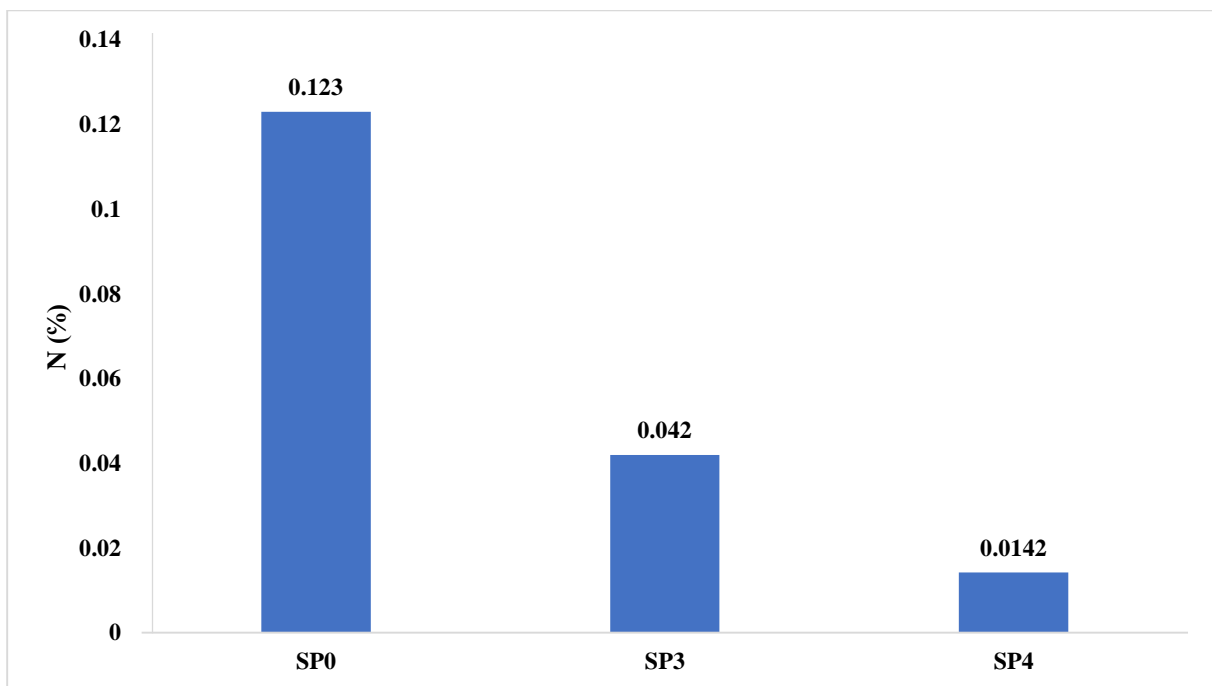


Figure 13 : Consommation d'Azote des échantillons SP

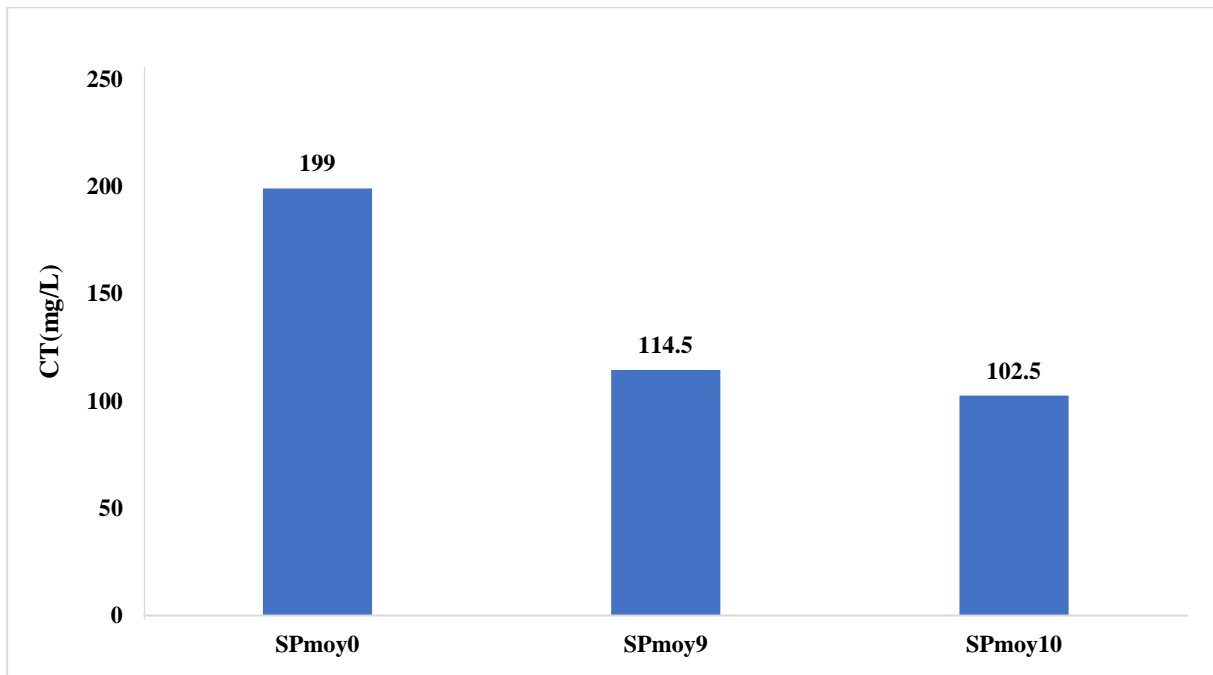


Figure 14 : Carbone total des échantillons SPmoy

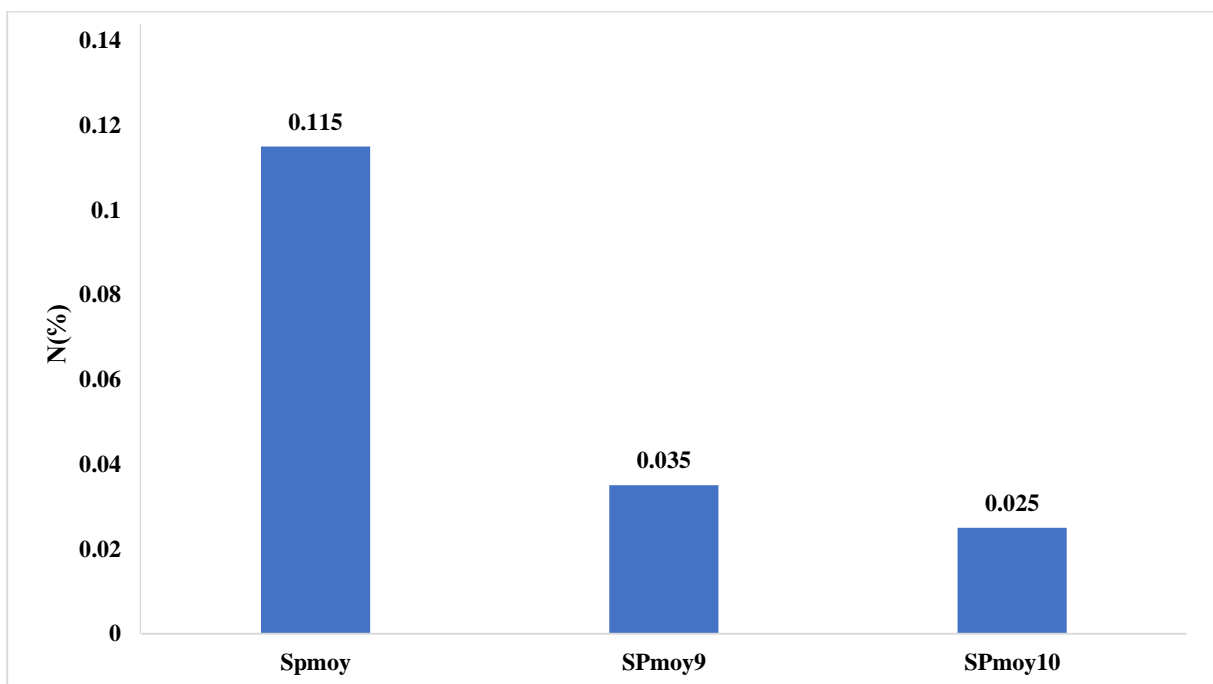


Figure 15 : Consommation d'Azote des échantillons SPmoy

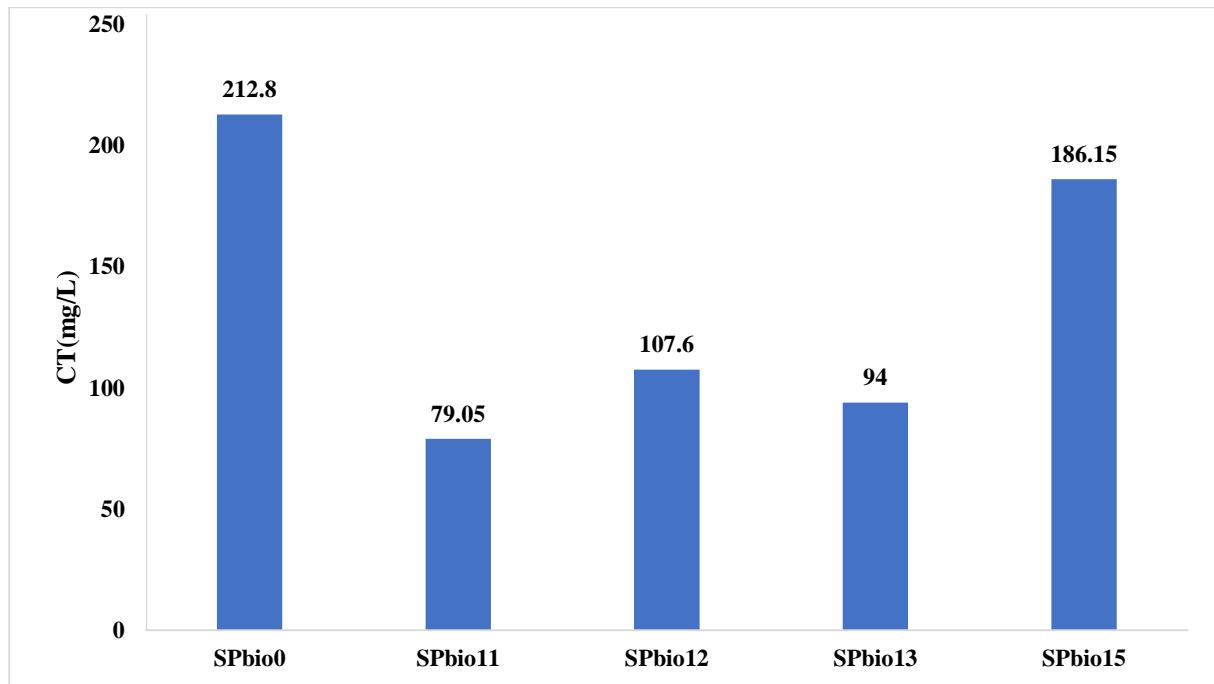


Figure 16 : Carbone total des échantillons SPbio

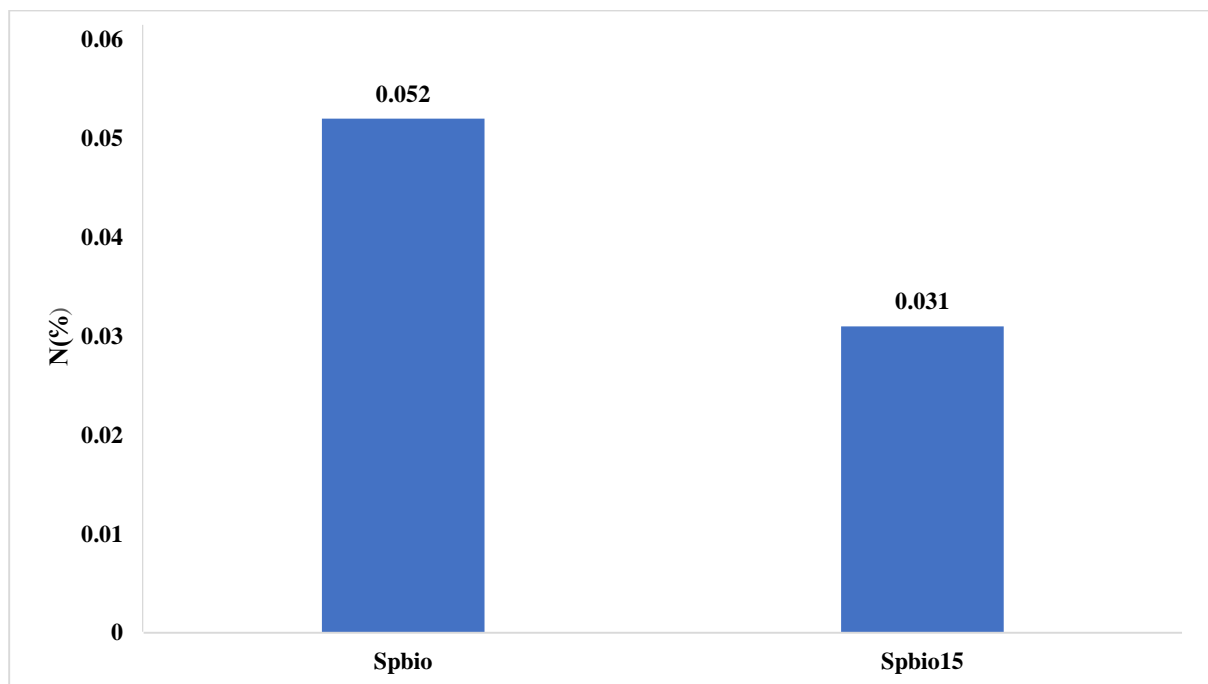


Figure 17 : Consommation d'Azote des échantillons SPbio

Selon les résultats de l'étude, on observe une diminution du pourcentage d'azote dans les différents sols (**Sp**, **Spmoy**, **Spbio**) : de **0,123 à 0,0142%** pour **Sp5** (Ba + Bdtt activé) et aussi pour **Sp4 0,0142%** (bdtt activé), et de **0,11 à 0,035%** pour **Sp9** (Bdtt non activé) et de **0,052% à 0,025%** pour **Sp11** (fumier activé). De plus, le taux de carbone total (comprenant le carbone organique et le carbone minéral) est passé de **312,9 à 47,14 mg/L** pour le **Sp1** (fumier activé), de **199 à 102,6 mg/L** pour le **Sp9** et de **212,8 à 79,05 mg/L** pour le **Sp11** (fumier activé).

Cette observation suggère une multiplication des bactéries, ce qui indique que les bactéries ont utilisé l'azote et le carbone comme source d'énergie pour leur croissance, ce qui a été justifié par l'augmentation de nombres de bactéries comme la montre la figure suivante :

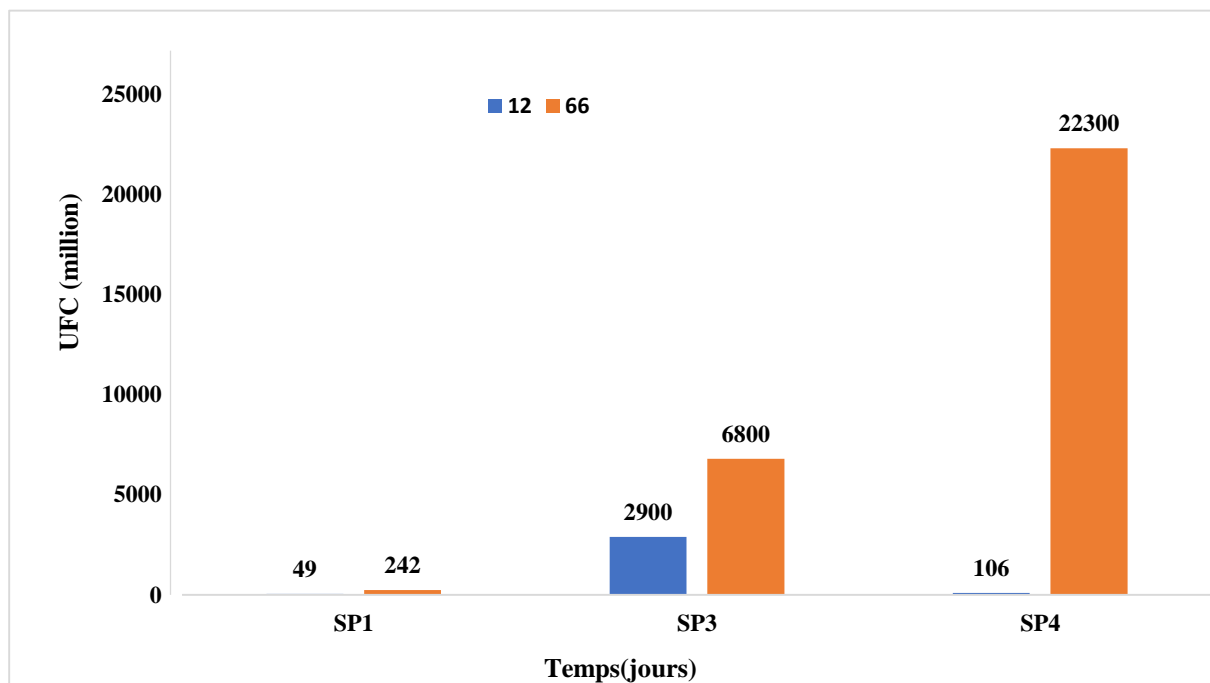


Figure 18 : Croissance bactérienne (UFC) des échantillons de sol

V.4.4 Dosages des nitrates et nitrites

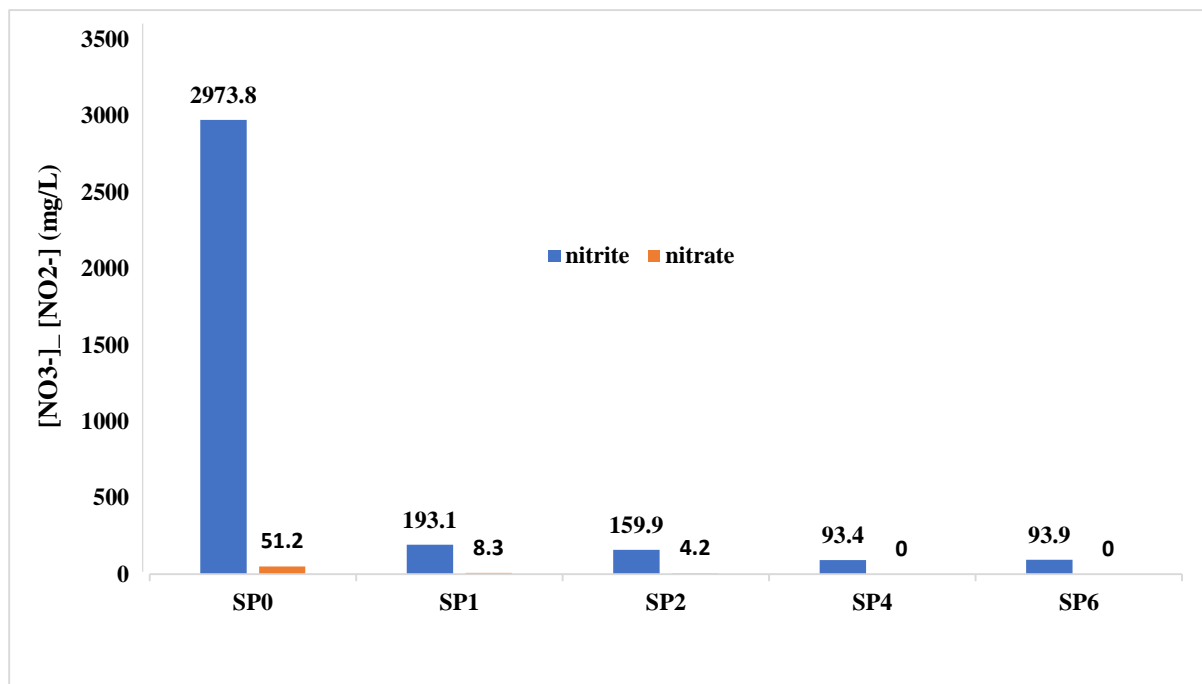


Figure 19 : Evolution des nitrates et nitrites pour SP

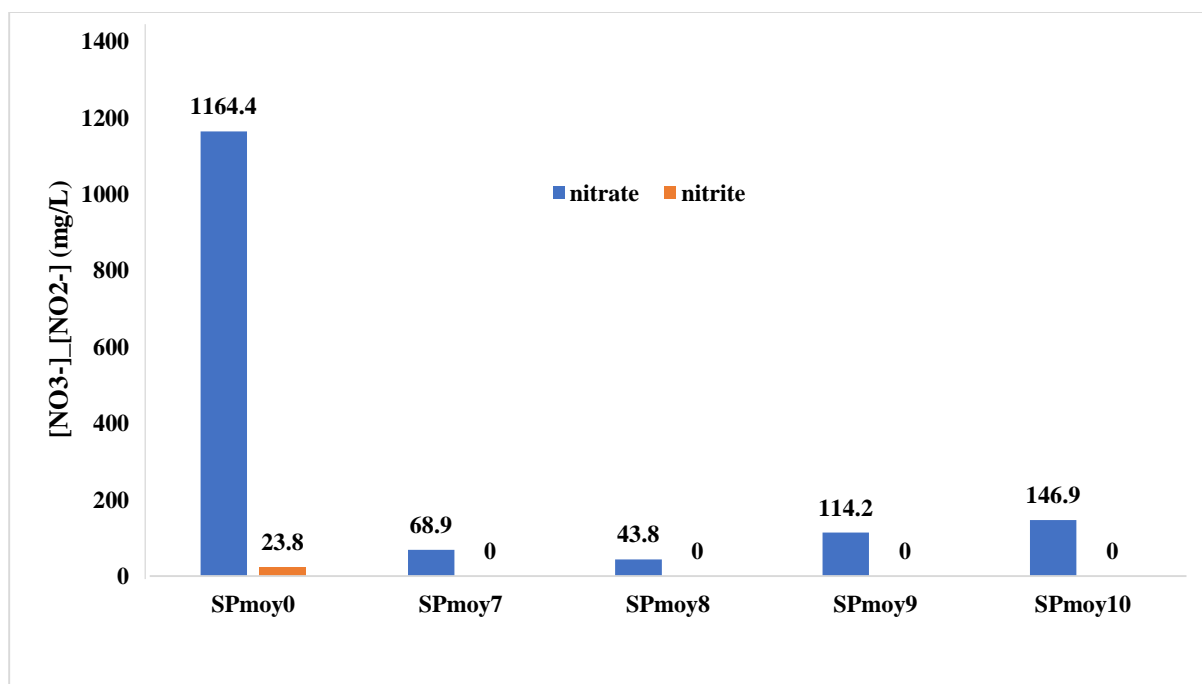
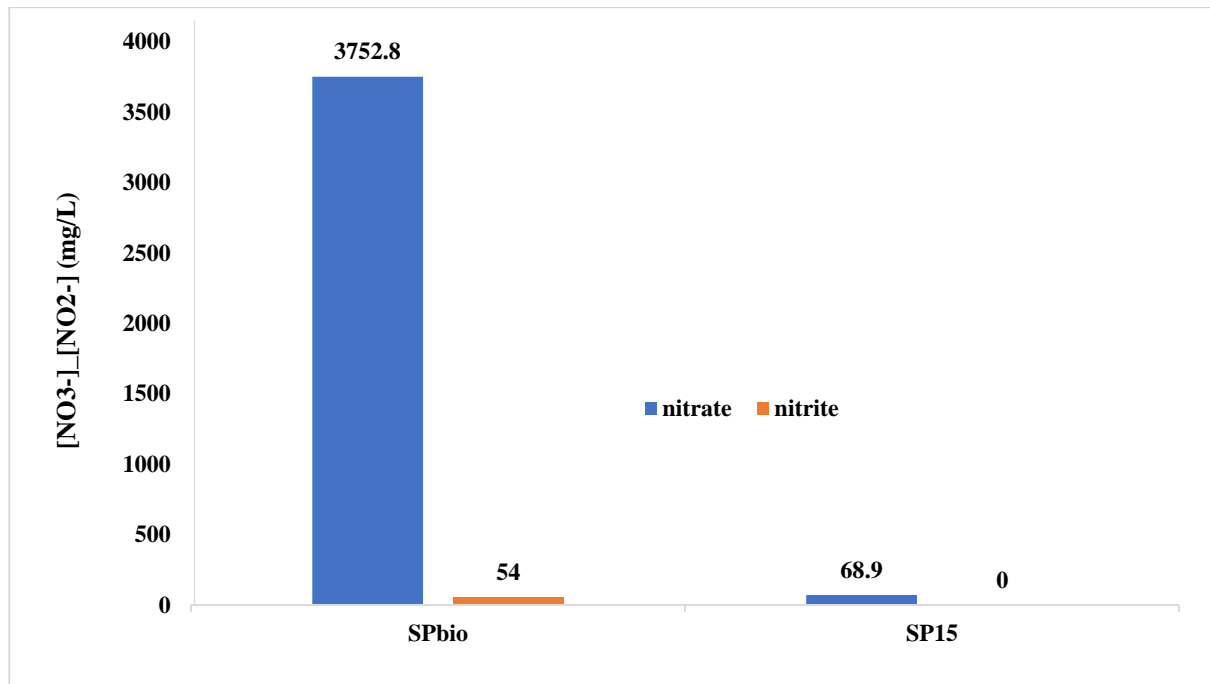


Figure 20 : Evolution des nitrates et nitrites pour SPmoy



**Figure 21** : Evolution des nitrates et nitrites pour SPbio

Une concentration importante en nitrates est observée initialement pour les différents échantillons. Cette concentration subit une diminution pour les différents sols pollués, après 66 jours de traitement, cela peut s'expliquer par l'utilisation des nitrates par les microorganismes de ces sols comme source d'azote et d'oxygène pour leur croissance, sachant que le traitement est réalisé dans un milieu anoxie.

Contrairement à la concentration initiale des nitrites étaient faible pour tous les échantillons, qui s'annule après le traitement.

# **Conclusion**

Ce travail a eu pour objectif la bioremédiation de sols pollués par les hydrocarbures prélevés au niveau de la base pétrolière de Hassi Messaoud.

Les analyses effectuées sur les échantillons de sols pollués ont montré que ces sols ont une texture sableuse, un pH alcalin, une salinité élevée, des teneurs élevées en carbone et des teneurs faibles en nutriments (N et P).

Ces sols présentent une forte pollution en Hydrocarbures (32,7 et 27,4 g/kg de sol) dépasse la norme qui est de (0,1g/kg) ce qui nécessite leur traitement. Ils renferment une flore autochtone assez satisfaisante pour mener un traitement de bioremédiation (bioaugmentation et biostimulation).

A cet effet, nous avons mené des essais de bioaugmentation par l'addition de consortium de microorganismes exogènes (boue activée). Ainsi que des essais de biostimulation par l'amendement du sol pollué par du fumier de mouton.

Les résultats obtenus, suite au traitement biologique pendant 66 jours, a montré une fluctuation du pH mais dont les valeurs sont restées dans la classe optimale pour la croissance des bactéries, ce qui est favorable à la biodégradation des HPT (hydrocarbures pétroliers totaux).

L'évaluation de la DCO a permis de voir que celle-ci diminuait au cours du temps dans les échantillons de sols traités indiquant une baisse en matière oxydables (une baisse particulière de la pollution carbone), ce qui a été confirmé par les analyses de carbone total.

La biostimulation est une méthode écologique et efficace qui permet d'éliminer la pollution des sols en hydrocarbures, et de valoriser des déchets organiques. Ce qui a été confirmé par le traitement du sol SP par le **Bouillon de dattes activé**. Ce mode de traitement a donné le meilleur résultat avec un rendement de dissipation des HPT de l'ordre de **78**, tant dis que les autres traitements ont donné un rendement situé entre **52 et 70%**.

Le traitement du sol SPmoy par le **Bouillon de dattes non activé** a donné le meilleur résultat avec un rendement de dissipation des HPT de l'ordre de **89%**.

Lors de cette étude, nous avons testé l'effet des souches indigènes de nos sols pollués (CM) et ainsi la bioaugmentation par les souches exogènes apportées par Ba (boue active). Les résultats ont montré que les souches indigènes (autochtones) de nos sols pollués (CM) ont donné de meilleurs résultats.

Cette étude a montré que la biostimulation a donné des résultats satisfaisants.

# **Bibliographie**

- [1]- Vidal, M. 'Bioremediation. An Overview'. *Pure and Applied Chemistry*, vol. 73, no. 7, Walter de Gruyter GmbH, July 2001, pp. 1163–1172, <https://doi.org/10.1351/pac200173071163>
- [2]- La définition officielle des sols formulée par l'Afes en 2014, puis retenue en 2018
- [3]- Brady, N.C., Weil, R.R. *The Nature and Properties of Soils*. Pearson, 2016.
- [4]- Singer, M.J., Munns, D.N. *Soils: An Introduction*. Pearson, 1996
- [5]- Lal, R. *Encyclopedia of Soil Science*. CRC Press, 2005
- [6]- Dupont, S. 'Influence de La Structure Du Sol Sur La Répartition de La Phase Liquide et Sa Disponibilité Pour Les Plantes'. *Sciences Du Sol*, vol. 45, no. 3, 2023, pp. 125–140.
- [7]- Lavelle Patrick et Pashanasi Daniel « Biologie des sols : Formation, fonctionnement et biodiversité », éditions Dunod, 2020.
- [8]- Roland Jean Manuel de géotechnique : Tome 1, Géotechnique générale (2011) Ce manuel aborde divers aspects de la géotechnique, y compris la phase gazeuse du sol, en mettant l'accent sur les applications en ingénierie.]
- [9]- Bol, Roland, et al. *Les Sols et Leur Mystère » : Cet Ouvrage Explore Les Propriétés Physiques et Chimiques Des Sols et Leur Importance Pour l'agriculture et l'environnement*. 2019.
- [10]- Rey, R, S. Grimaldi, D. Raclot, C. Walter, "Gestion de la ressource en eau et de la qualité de l'eau dans les sols sableux", TSM, Techniques Sciences Méthodes, 2019.]
- [11]- Chahlaoui, M. Ouahmane, L. Bahi, "Caractérisation et classification des sols limoneux et argileux en milieu semi-aride", Larhyss Journal, 2019.]
- [12]- Saby, N, L. Arrouays, M. Walter, "La texture des sols : Un défi pour l'étude de la biodiversité", Innovations Agronomiques, 2021
- [13]- Chaouch M., M. Mechri, N. Elloumi, "Caractérisation de la texture et du rapport C/N de différents sols sablo-limoneux", *Annales de l'Institut National Agronomique de Tunisie*, 2022
- [14]- Lamers, M., & Vile, M. A. (2021). L'horizon O des sols forestiers : lien entre sa composition chimique et la composition de la litière. *Revue Forestière Française*, 73(5), 455-465.]

- [15]- Lemière, B., et al. (2022). Caractérisation des horizons A de sols sous prairies permanentes : une étude comparative à l'échelle nationale en France. *Étude et Gestion des Sols*, 29(3), 205-218
- [16]- Javaux, M. 'Dynamique de Formation Des Horizons B Argileux Dans Les Sols Forestiers Français : Résultats d'une Étude à Long Terme'. *Revue de Géographie Alpine*, vol. 111, 2023, pp. 1–16.
- [17]- Ratiarison, H. 'Caractérisation Des Horizons C de Sols Volcaniques : Étude de Cas à La Réunion'. *Journal de La Société Française de Pédologie*, vol. 27, no. 2, 2022, pp. 143–155.
- [18]- Krajewski- Jacques Bertrand et René Vautier "Hydraulique et hydrologie" de, 2019.
- [19]- Institut de recherche en sciences cognitives. (2019).
- [20]- Abdalla, M.M., Greve, M.B., Elsgaard, L., Magid, J. (2019)
- [21]- Marilley, L., Aragno, M. (2015].
- [22]- Madigan, M. T., Martinko, J. M., Bender, K. S., Buckley, D. H., & Stahl, D. A. (2018).
- [23]- Badis et al., 2006 ; Procop et al., 2020)
- [24]- (Omura, 1992).
- [25]- (Mathieu, 2008).
- [26]- (Fattal, 2008).
- [27]- Gaudu, F. Bioremediation Des Sols Pollués Aux Hydrocarbures. *Biologie Gestion Marketing*. 2014.
- [28]-Bocard, C. Marées Noires et Sols Pollués Par Les Hydrocarbures: Enjeux Environnementaux et Traitement Des Pollutions. 2006.
- [29]- IUPAC Recommendations 1995. *Pure & Appl. Chem.* Vol.67. Nos 8/9, pp.1307-1375, 1995.
- [30]- AIT\_OUMERACI. M. MEMOIRE HAP Bourbier Biostimul ENP 2020
- [31]- Wauquier J. P., *Pétrole brut : produits pétroliers, schémas de fabrication*, édition Technip, Paris, (1994).

- [32]- Chitour C. E., Propriétés physiques des hydrocarbures et des fractions pétrolières, Office des Publications Universitaires d'Alger, (1999).
- [33]- (Fingas, 2013).
- [34]- (Pernot, 2012).
- [35]- Neff J. M., Ostazeski S., Gardiner W., Stejskal I. 2000
- [36]- (Fritsche et Hofrichter (2000))
- [37]- (Thiem et Schulze)
- [38]- Vidali, M. 'Bioremediation. An Overview'. Pure and Applied Chemistry, vol. 73, no. 7, Walter deGruyter GmbH, July 2001, pp. 1163–1172, <https://doi.org10.1351/pac200173071163>.
- [39]- (Ehlers et Loibner, 2006).
- [40]- (Schwarzenbach et Westall, 1981).
- [41]- Karickhoff, Samuel W. 'Semi-Empirical Estimation of Sorption of Hydrophobic Pollutants on Natural Sediments and Soils'. *Chemosphere*, vol. 10, no. 8, Elsevier BV, Jan. 1981, pp. 833–846, [https://doi.org10.1016/0045-6535\(81\)90083-7](https://doi.org10.1016/0045-6535(81)90083-7).
- [42]- Martial.P et F. Mbogne, "bio remédiation augmentée de sols contaminés aux hydrocarbures lourds par ajout de substrats organique", [Mémoire de Master], Montréal, Université du Québec, école de technologie supérieure, génie de l'environnement, 2017.
- [43]- (Ramade, 2007).
- [44]- Morelli, Irma Susana, et al. 'Laboratory Study on the Bioremediation of Petrochemical Sludge-Contaminated Soil'. *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 55, no. 4, Elsevier BV, June 2005, pp. 271–278, <https://doi.org10.1016/j.ibiod.2005.03.001>.
- [45]- (Jose, 1999).
- [46]- Yang, Si-Zhong, et al. 'Bioremediation of Oil Spills in Cold Environments: A Review'. *Pedosphere*, vol. 19, no. 3, Elsevier BV, June 2009, pp. 371–381, [https://doi.org10.1016/s1002-0160\(09\)60128-4](https://doi.org10.1016/s1002-0160(09)60128-4)
- [47]- (Lefebvre, 1978).
- [48]- (Zebbey,2017).

- [49]- (Gan,2009).
- [50]- (Ballerini et Vandecasteele, 1999).
- [51]- (Reddy et Tekola 2004).
- [52]- Colombano, S. A., et al. Quelles Techniques Pour Quels Traitements - Analyse Coûts-Bénéfices. Rapport Final BRGM-RP-58609-FR. 2010, pp. 1–399.
- [53]- Micheal, Koning, et al. 'Environmental Biotechnology. Concepts and Applications'. Copyright © 2005, edited by H. Jördening et al., vol. 3, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2005, pp. 527–30585.
- [54]- (Colin, 2000).
- [55]- Kumar, A., et al. 'Review on Bioremediation of Polluted Environment: A Management Tool'. International Journal of Environmental Sciences, vol. 1, no. 6, 2011, pp. 1079–1093.
- [56]- (Treu et Falandysz, 2017).
- [57]- Mazziotti, M. 'Impact Des Exsudats Racinaires de Miscanthus x Giganteus Sur Les Microorganismes Impliqués Dans La Bioremédiation d'un Sol Contaminé Au Benzo (a) Anthracène'. Collegium Sciences et Technologies Ecole Doctorale RP2E «Ressources, Procédés, Produits, Environnement, 2017.
- [58]- (Vogel, 1996).
- [59]- Bégin, R., and A. Prus. «Lignes Directrices Pour Le Traitement de Sol Par Biodégradation, Bioventilation, Ou Volatilisation (Direction Des Politiques Du Secteur Industriel Service Des Lieux Contaminés). 1999.
- [60]- Colombano, S. Quelles Techniques Pour Quels Traitements - Analyses Coûts-Bénéfices, Rapport Final BRGM-RP-58609-FR. Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Vol. 399, 2010.
- [61]- (Nassiri, 2010).
- [62]- (Koller, 2004).
- [63]- Pelmont, J. Bactérie et Environnement: Adaptation Physiologique. 1994.
- [64]- (Leena Grace et Selvaraj, 2010).
- [65]- Agarry'. Agarry, Chapitre, vol. 5, 2001.

- [66]- Naseri, M., et al. 'Bioremediation Treatment of Hydrocarbon Contaminated Arctic Soils: Influencing Parameters'. *Environ Sci Pollut Res*, vol. 21, 2014, pp. 11250–11265. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3122-2>
- [67]- Ratiarison, H. 'Caractérisation Des Horizons C de Sols Volcaniques : Étude de Cas à La Réunion'. *Journal de La Société Française de Pédologie*, vol. 27, no. 2, 2022, pp. 143–155.
- [68]- (Gaudu, 2014).
- [69]- (ICSS 2006).
- [70]- (Lecomte (1998) et Gabet (2004)).
- [71]- (Nam, 2003).
- [72]- (Scriban 1999).
- [73]- Zahed M. A., H. A. Aziz, M. H. Isa et L. Mohajeri, Effect of initial oil concentration and dispersant on crude oil biodegradation in contaminated seawater, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 84 (2010) P438–442.
- [74]- (Iqbal, 2007).
- [75]- (Chandra, 2013).
- [76]- Scriban R., 1999. *Biotechnologie*. 5ème Edition, TEC&DOC, Paris, pp. 96-865.
- [77]- (J. P. Vandecasteele, 2005).
- [78]- Mukherjee, A. K., and K. Das. 'Correlation between Diverse Cyclic Lipopeptides Production and Regulation of Growth and Substrate Utilization by *Bacillus Subtilis*strains in a Particular Habitat'. *FEMS Microbiology Ecology*, vol. 54, 2005, pp. 479–489.
- [79]- Ballerini, D., and J. P. Vandecasteele. 'La Restauration Par Voie Microbiologique Des Sols Contaminés Par Les Polluants Organiques'. *Biotechnologie*, Coordinateur R. Scriban, 1999, pp. 835–865.
- [80]- (Scribian, 1999).
- [81]- (Riviere, 1975).
- [82]- M. J. Jourdain et A. M. Charissou (2007).
- [83]- (ESTCP, 2007).

- [84]- Perfumo, Amedea, et al. 'Thermally Enhanced Approaches for Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soils'. *Chemosphere*, vol. 66, no. 1, Elsevier BV, Jan. 2007, pp. 179–184, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.05.006>.
- [85]- (sims, 1989).
- [86]- (Miller 2004).
- [87]- (Li, 2016).
- [88]- Saada, A., et al. Etat Des Connaissances Sur l'atténuation Naturelle Des Hydrocarbures Rapport Intermédiaire Résultat de La Phase 1. Rapport BRGM/RP-53739-FR, Étude Réalisée Dans Le Cadre Des Opérations de Service Public Du BRGM. Vol. 16, 2004.
- [89]- (CPVQ, 1992).
- [90]- Christophe J, D. La bouse : historique, importance et écosystème. Thèse de doctorat. Ecole nationale vétérinaire de Toulouse, 2016.
- [91]- (Letellier et Florent, 2012).
- [92]- (Letellier et Fleurent, 2012).
- [93]- Atagana 2008.
- [94]- Orji, F. A., et al. 'Laboratory Scale Bioremediation of Petroleum Hydrocarbon - Polluted Mangrove Swamps in the Niger Delta Using Cow Dung'. *Malaysian Journal of Microbiology*, vol. 8, no. 4, 2012, pp. 219–228.
- [95]- Hamzah, A., et al. 'Oil Palm Empty Fruit Bunch and Sugarcane Bagasse Enhance the Bioremediation of Soil Artificially Polluted by Crude Oil. Soil and Sediment Contamination'. *An International Journal*, vol. 23, no. 7, 2014, pp. 751–762.
- [96]- (BAIZE, 1988).
- [97]- (BAIZE, 1988).
- [98]- (Bonneau et Souchier, 1994).
- [99]- (MADSEN 1996, BALLERINI, 1999).
- [100]- (Ballerini 1999 et Gabet 2004).
- [101]- (Jingqiu, 2015).

[102]- (Bertrand, 1993).

[103]- (David et Makahanlanyane, 2015).

[104]- (Gabet, 2004).

[105]- (Belhadj 2001).

[106]- Bertrand A.R.V., Briant J., Castela A., Degobert P., Gatellier C., Masson M., Oudin J., Pottier J. Prévention et lutte contre la pollution au cours des opérations de forage et de production en mer, ed TECHNIP, France . 1971.823 p.

# **Annexes**

### I. Potentiel d'hydrogène

La détermination des pH à l'eau est d'intérêt, car elle révèle l'acidité potentielle ou l'activité d'échange du sol (BONNEAU et SOUCHIER, 1994). La mesure du pH se fait le plus fréquemment dans une suspension aqueuse, le rapport de la masse du sol au volume d'eau varie suivant les méthodes, ou la texture du milieu. Le pH eau est déterminé selon la norme AFNOR X 31-103), par la mesure du pH d'une suspension de sol dans l'eau (rapport masse/volume = 1/5) obtenue suite à une heure d'agitation puis décantation pendant 2heures. Le pH de la suspension a été mesuré à l'aide d'un pH-mètre HANNA.



Figure 01 : PH mètre



Figure 02 : Lixiviation des sols

### II. Demande chimique en oxygène

La demande chimique en oxygène (DCO) est un paramètre utilisé pour mesurer la quantité d'oxygène requise pour dégrader biochimiquement les matières organiques présentes dans un échantillon. Elle est généralement exprimée en milligrammes d'oxygène consommés par litre d'échantillon (mg/L). La mesure de la DCO est effectuée dans un réacteur dédié appelé réacteur de DCO (DCO mètre) où l'oxydation des composés organiques se produit, elle se fait sous une température de 148 C pendant 120min.

La mesure de la DCO a été effectuée selon la norme du Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec : MA-315 DCO 1.0.

Les figures ci-dessous représentent le matériel utilisé :



Figure 03 : Centrifugeuse



Figure 04 : DCO-mètre



Figure 05 : Spectrophotomètre UV-Visible

### III. Dosage de nitrates et nitrites

#### III.1 réactifs pour le dosage des nitrates :

- Phénol
- Acide sulfurique,  $H_2SO_4$  Pur ( $d=1,84$ )
- Ammoniaque ( $NH_4OH$ )
- Nitrates de potassium  $KNO_3$  en poudre

#### III.2 réactifs pour dosage des nitrites :

- Acide orthophosphorique concentré  $H_3PO_4$
- Sulfanilamine  $C_6H_8O_2N_2S$
- Dichlorure de N-(1-naphtyl) ethylene diamine  $C_{10}H_7NHCH_2NH_2, 2HCl$
- Nitrite de sodium  $NaNO_2$  en poudre



Figure 06 : Préparation des nitrates



Figure 07 : Préparation des nitrites

#### IV. Humidité

La détermination de l'humidité du sol est effectuée conformément à la norme (NF X 31-102). Le principe de cette méthode consiste à sécher un échantillon de sol donné dans une étuve à une température de **105°C** pendant une durée de 24 heures.

Pour déterminer l'humidité résiduelle (Hu) exprimée en pourcentage de l'échantillon de sol, la formule suivante est utilisée :

$$\text{Hu (\%)} = (m0 - m1) / m0 * 100$$

Où :

- m0 : représente la masse de la prise d'essai avant séchage (en grammes).
- m1 : représente la masse de la prise d'essai après séchage (en grammes).
- Hu : correspond au taux d'humidité exprimé en pourcentage.

### V. Matière organique

La teneur en matière organique (MO) dans un échantillon de sol a été déterminée selon la norme NF X31-071 (AFNOR, 1994).

Elle est définie comme étant la différence entre la masse de la prise d'essai de l'échantillon obtenue après séchage à 105°C pendant 1h (m1) et la masse après séchage à 550°C pendant 20min (m2) rapportée à la masse initiale (m0). Elle est calculée selon l'équation suivante :

$$\text{MO (\%)} = [(m1-m2)/m0]. 100$$

Avec :

m0 : masse de l'échantillon avant séchage (g)

m1 : masse de l'échantillon après séchage (à 105°C/1h) (g)

m2 : masse de l'échantillon après séchage (à 550°C) (g)

MO : teneur en matière organique (%)



**Figure 08** : Four à moufle

### VI. Détermination de la conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique (CE) est utilisée pour évaluer la concentration des sels dissous dans l'eau, ce qui permet d'obtenir une indication indirecte de la salinité. La méthode standard NF X 31-113 (AFNOR, 1987) (Baize, 2000) est utilisée pour déterminer la conductivité électrique. Cette méthode implique l'extraction des sels solubles dans l'eau à partir d'un échantillon de sol. Pour ce faire, un mélange de sol et d'eau est préparé dans un rapport de 1/5 (m/v), puis agité pendant 30 minutes et filtré. La conductivité de la solution obtenue est ensuite mesurée à l'aide d'un conductimètre de type PHYWE, dans des conditions spécifiques. La

conductivité électrique est généralement exprimée en décisiemens par mètre (ds/m) (Baize, 2000).



**Figure 09 :** Conductimètre

## VII. Turbidité

La turbidité, telle que définie par la norme NF EN ISO 7027 (NF EN ISO 7027, 2000), est le phénomène de réduction de la transparence d'un liquide en raison de la présence de matières non dissoutes, telles que des particules colloïdales ou en suspension. Cette turbidité dépend de la concentration des matières en suspension dans l'échantillon, ainsi que des caractéristiques optiques et géométriques de ces particules (**Bertrand-Krajewski et al., 2000; Ruban et al., 2010**).

L'unité de mesure utilisée pour évaluer la turbidité, conformément à la norme **NF EN ISO 7027 (2000)**, est le FNU (Formazin Nephelometric Unit). La turbidité est généralement exprimée dans une plage allant de 0 FNU à 40 FNU, en se basant sur la quantité de lumière diffusée par l'échantillon.



**Figure 10 :** Turbidimètre

### VIII. Hydrocarbures pétroliers totaux (HPT) :

Les hydrocarbures pétroliers totaux présents dans le sol sont quantifiés par gravimétrie. Avant cette étape, une extraction des hydrocarbures du sol est réalisée à l'aide d'un extracteur ultrasonique (Wisd WB-11) à une température de 35°C, en utilisant du dichlorométhane comme solvant. Le mélange résultant, composé de dichlorométhane et de l'extrait d'hydrocarbures, est filtré préalablement. Ensuite, la quantification des hydrocarbures totaux (TPH) est réalisée en pesant l'échantillon après évaporation de l'extrait collecté à l'aide d'un rota vapeur (BÜCHI Labortechnik AG R-II).

$$\text{TPH}\% = (P_1 - P_2) / P_1 * 100$$

Avec :

P<sub>1</sub> : ballon rempli

P<sub>2</sub> : le ballon vide

Les illustrations ci-dessous représentent le matériel et le produit utilisés lors de l'extraction :

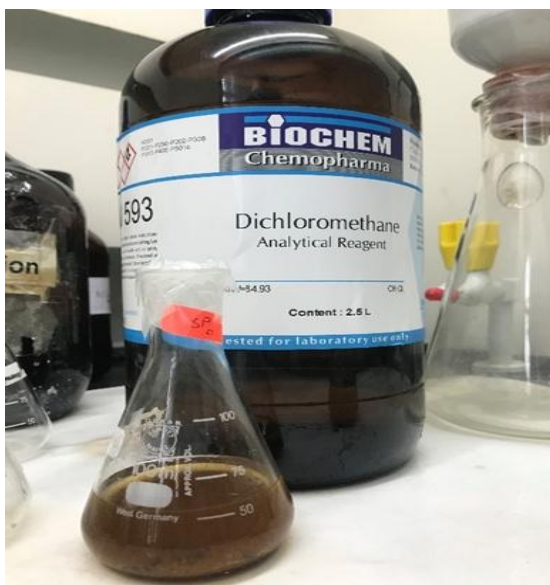


Figure 11: Dichlorométhane



Figure 12: Extracteur ultrason



Figure 13 : Bain ultrason

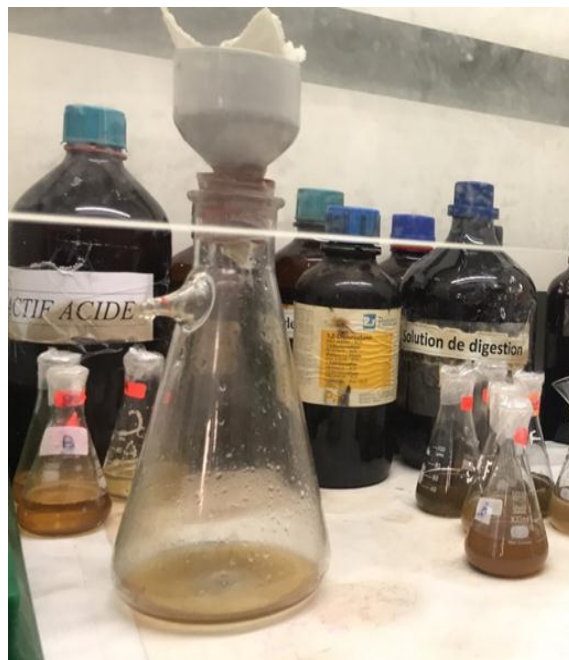


Figure 14 : Pompe sous vide

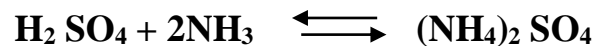
## IX. Rota vapeur

Cet appareil est utilisé pour évaporer les solvants à basse température et sous vide, permettant ainsi la récupération des composés souhaités.



Figure 15: Rota vapeur

## X. Azote



La teneur en azote ammoniacal se calcul comme suit :

$$N(\%) = \frac{(V_1 - V_0) * T * 0,014}{m} * 100$$

où

$V_0$  : volume d'acide versé pour le blanc

$V_1$  : volume d'acide versé pour l'échantillon

T : titre de l'acide sulfurique (0,5 Mol/l)

m : prise d'essai de l'échantillon

## XI. Analyses microbiologiques

### XI.1 Le dénombrement après culture de la microflore totale :

Pour quantifier la microflore présente dans les différents échantillons contaminés par les déversements d'hydrocarbures et les fluides de forage, nous avons réalisé une culture sur gélose nutritive.

Les résultats de la charge microbienne sont exprimés en UFC (nombre d'Unités Formant Colonies) / g de sol selon la formule ci-dessous. .

Seules les boîtes contenant entre 30 et 300 colonies au niveau de deux dilutions successives sont retenues pour le dénombrement.

$$N = n / V.d$$

Où :

N : nombre d'UFC par millilitre

n : la somme des colonies des boîtes interprétables

V : Volume de la solution déposée (ml)

d : Facteur de la première dilution retenue.

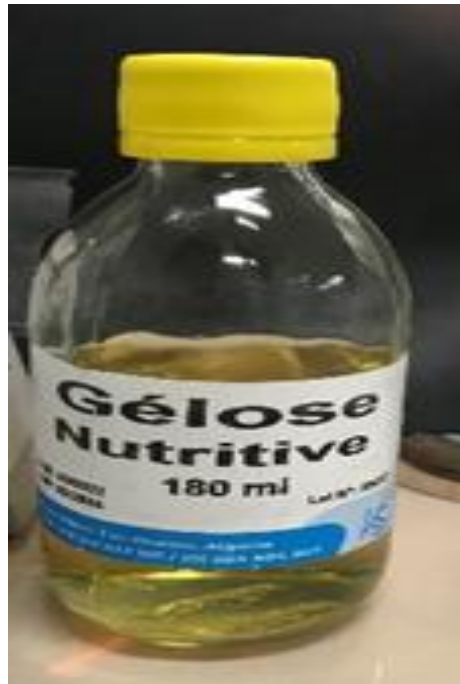


Figure 16 : Gélose nutritive

## XII. Préparation de la solution mère et dilutions

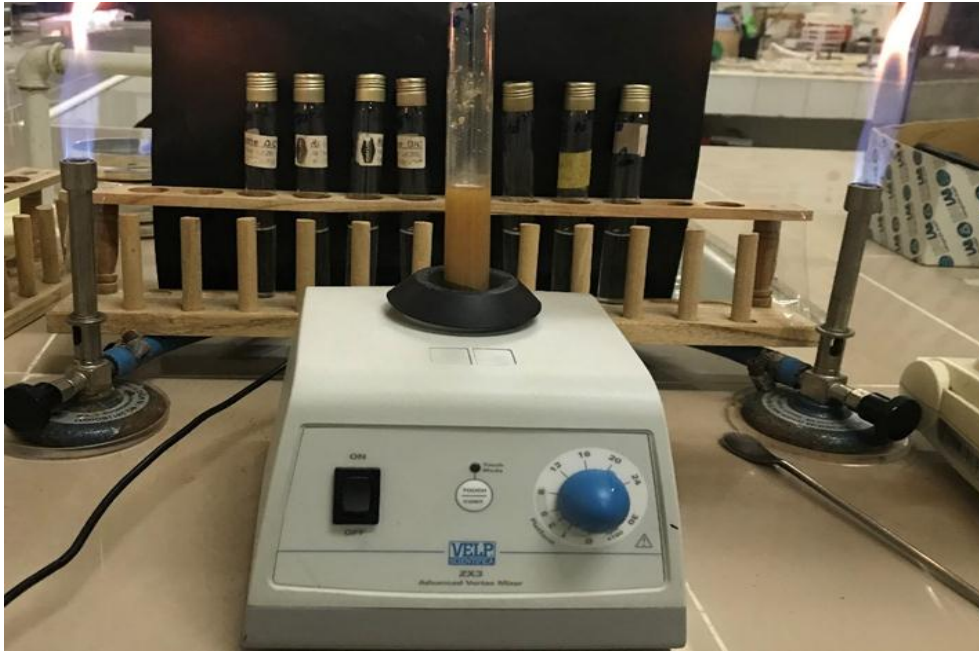
Dans un tube à essai contenant 9 ml d'eau physiologique stérile, 1g de sol est ajouté. Le mélange est vigoureusement agité à l'aide d'un vortex mixer, ce qui entraîne une dilution de  $10^{-1}$ . Ensuite, 1 mL de cette dilution est mélangé avec 9 mL d'eau physiologique, ce qui correspond à une dilution de  $10^{-2}$ . Ce processus est répété de manière successive jusqu'à obtenir une dilution de  $10^{-9}$ .



Figure 17 : Préparation de la solution mère



Figure 18 : Les dilutions



**Figure 19 :** Vortex mixer

### **XII.1 Produits et Matériels :**

- Gélose nutritive (GN) pour le dénombrement des bactéries.
- Eau physiologique
- Tubes et Flacons
- Pipete
- Boites de Pétri.
- Le bac à eau de javel.
- Etuve 30°C (pour les bactéries 3jours) et 25°C (pour les champignons 5jours)
- Agitateur
- Echantillons de sol
- Bain marie
- Micropipette

### **XII.2. Dénombrement :**

Dans la zone aseptique, versez la gélose liquide en surfusion (en la faisant fondre au bain-marie).

Dans la zone aseptique, agitez doucement chaque tube de dilution, puis prélevez 0,1 ml de chaque tube à l'aide d'une micropipette. Ensuite, versez le contenu prélevé sur le milieu nutritif gélosé correspondant à la dilution.

Après une incubation de 48 heures à une température de 30°C, comptez les colonies à l'aide d'un compteur de colonie.

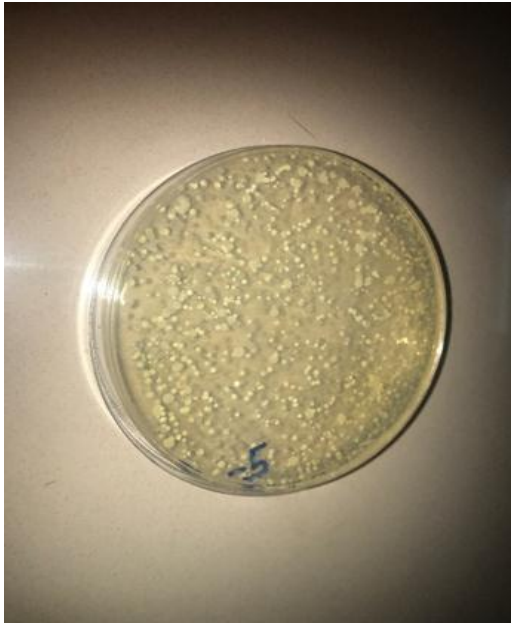
On tient compte que des boîtes qui contiennent un nombre de colonies compris entre 30 et 300 pour le dénombrement.



**Figure 20 : Prélèvement**



**Figure 21 : Versement de la gélose nutritive**



**Figure 23 :** Boite pétrie



**Figure 24 :** Le conteur de colonie

## **Résumé :**

La présente étude a pour objectif la bioremediation d'un sol pollué par les hydrocarbures par les deux techniques bioaugmentation et biostimulation. L'analyse physicochimique des échantillons du sol a révélé que ces derniers présentent une forte pollution. La caractérisation physicochimique de fumier de mouton, de bouillon de datte, et de BH, a montré qu'ils pouvaient être utilisés comme amendements organiques et inorganiques pour les souches autochtones du sol vu leurs richesses en carbone, minéraux et oligoélément. Le traitement biologique bioremédiation, pendant 66 jours, a donné le meilleur résultat pour le bac contenant le bouillon de datte (bdtt) avec la sciure de bois, avec un rendement de dégradation de TPH de 89%. Tous les bacs sauf le témoin ont donné également des résultats très satisfaisants compris entre 52% et 89%.

**Mots clés :** Bioremédiation, Bioaugmentation, Biostimulation, gasoil, amendement de déchets organiques, hydrocarbures pétroliers, sol contaminé.

## **Summary:**

This study aims to bioremediate a soil polluted by hydrocarbons using two techniques: bioaugmentation and biostimulation. Physicochemical analysis of soil samples revealed a high level of pollution. The physicochemical characterization of sheep manure, date broth, and BH showed that they could be used as organic and inorganic amendments for indigenous soil strains due to their carbon, mineral, and trace element content. The biological treatment of bioremediation, carried out for 66 days, yielded the best result for the container containing date broth (bdtt) with wood shavings, with a TPH degradation efficiency of 89 %. All containers except the control also yielded very satisfactory results ranging from 52 to 89 %.

**Keywords:** Bioremediation, Bioaugmentation, Biostimulation, diesel fuel, organic waste amendment, petroleum hydrocarbons, contaminated soil.