

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA DE BEJAIA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES BIOLOGIQUES DE L'ENVIRONNEMENT



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en écologie et environnement
Option : pathologie des écosystèmes.

Thème

La pollution des sols par les
hydrocarbures

Présenté par :

M^{lle} BENYAHIA Noura
M^{lle} MAHDAOUI Kahina

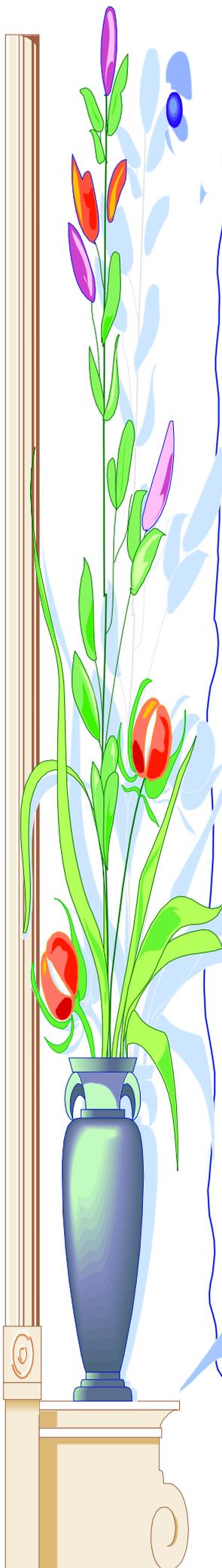
Membre de jury :

Président : M^r SIDI HACHEMI
Promoteur : M^r MADANI
Co-Promotrice : M^{me} BELKACEMI

Examineur : M^{em} OULABSIR-KASSAMA
M^r RAMDANI



Promotion 2011/2012



REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier en premier lieu notre dieu de nous avoir donné le courage et la patience pour la réalisation de notre travail jusqu'à sa fin.

En suite, nos vifs remerciements sont adressés à tous ceux qui nous ont soutenus dans la réalisation de ce modeste travail et particulièrement notre encadreur « M^r MADANI Khoudir » et notre co-promotrice « M^{me} BELKACEMI Hayet » pour toutes leurs orientations, leurs conseils durant l'année.

Nous tenons à remercier également le personnel de la SONATRACH en particulier M^r ALOUT et M^{me} CHALLAL pour leur disponibilité, leur aide et leur sympathie.

En fin, nos remerciements les plus sincères à tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Mille mercis à tout le monde.

DEDICACES

Ce rapport achevé avec l'aide de dieu, le tout puissant Est dédié à toutes personnes que j'aime. A mes très chers parents, qui se sont sacrifiés pour m'offrir un climat idéal de travail, qui n'ont jamais cessé de me témoigner leur affection et de m'apporter leur soutien depuis toujours. et leurs encouragements, consentis dans le souci de ma réussite.

A une fleur qui ne fanera jamais dans mon cœur, à une grande dame qui a su faire de moi la femme que je suis, à toi ma chère mère ;

A celui qui m'a toujours encouragée à continuer à combattre les périls de la vie ; celui qui a tant sacrifié et qui continue à sacrifier pour moi, sans lui je ne serais pas ce que je suis, à toi mon cher père ;

*A mes très chers frères Sofiane, Salem et Takfarines ;
Mon très cher grand père et ma très chère grand-mère que j'aime beaucoup ;*

A la mémoire de mes grands parents ;

Mes tantes Noura, Drifa ; Saida son mari et ses enfants ;

Mes oncles Mourad et Farouk ;

A toute ma famille, mes cousins et cousines ;

A tous mes amis et amies: Siham, Hamida, Amel, souad, djamila,

Kahina, Karima B, Farida, Ghania ,Karima A, Hadjira, et bob ,

surtout à ceux qui sont loin de moi en ces moments ;

A mon amie et binôme Noura et sa famille ;

A tous mes camarades de la promotion « Ecologie et Environnement 2012».



KAHINA

DEDICACES

Ce rapport achevé avec l'aide de dieu, le tout puissant Est dédié à toutes personnes que j'aime. A mes très chers parents, qui se sont sacrifiés pour m'offrir un climat idéal de travail, qui n'ont jamais cessé de me témoigner leur affection et de m'apporter leur soutien depuis toujours. et leurs encouragements, consentis dans le souci de ma réussite.

A mes sœurs : Zahia, Lila, Samira, Razika, Fouzia et Farida

A mes neveux : Doudine, Boualem, Hakim, Ziyad et Youba

A mes nièces : Nihad et Mayssa

A mes cousins et cousines en particulier Ahcene

A mes tantes et oncles

A toute ma grande famille Benyahia sans exception

A tous mes Amis (es) en particulier Laid

A ma binôme Kahina et toute sa famille



Noura

Liste des abréviations

°C : Degré Celsius

g : Gramme

mg /L : Milligramme par litre

m³ : Mètre cube

m : Mètre

BTX : Benzène-Toluène-Xylène

pH : Potentiel hydrogène

H% : Pourcentage d'humidité

Log₁₀ : Logarithme décimal

MO : Matière organique

GNO : Gélose nutritive ordinaire

DCO : Demande chimique en oxygène

Pb : Le plomb

Cr : Le chrome

PAF% : pourcentage de la perte au feu

TMN : Termina Marin Nord

TMN : Termina Marin Sud

NE : Nord-est

HAP : Hydrocarbure aromatique polycyclique

Liste des figures

Figure V.1 : Taux d'humidité (H%) différents échantillon du sol pollués par les hydrocarbures.....	42
Figure V.2 : La perte au feu des différents échantillons du sol pollué par des hydrocarbures.....	43
Figure V.3 : La variation des PH des différent échantillons du sol pollué par des hydrocarbures.....	44
Figure V.4 : La courbe d'étalonnage du chrome.....	46
Figure V.5 : La courbe d'étalonnage de plomb.....	53

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Solubilité des hydrocarbures.....	8
Tableau I.2 : Comparaison des propriétés physique de quelque hydrocarbure.....	8
Tableau III.1 : Avantages et inconvénients des déférentes méthodes de traitement des sols contaminés.....	33
Tableau IV.1 : Vitesse moyenne et direction du vent.....	38
Tableau IV.2: températures moyennes.....	39
Tableau IV.3 : Répartition des températures moyennes mensuelles en (°c) durant l'année 2010dans la région de Bejaia [Département HSE de SONATRACH Bejaia, 2012].....	42
Tableau IV.4 : Etablissement de la courbe d'étalonnage du chrome.....	47
Tableau V.1 : Résultat de dosage de chrome de l'échantillon.....	57
Tableau V.2 : Résultat de la DCO.....	58
Tableau V.3 : Résultat de dosage de plomb de l'échantillon.....	59

Introduction1

Partie théorique

Chapitre I : Notion Générales Sur Les Hydrocarbures

I.1. Notion générales sur la chimie des hydrocarbures.....3

 I.1.1. Historique.....3

 I.1.2. Définition des hydrocarbures.....3

 I.1.3. Nature et classification des hydrocarbures.....3

 I.1.3.1. Hydrocarbures Aliphatiques.....4

 I.1.3.1.1. Composés saturés.....4

 I.1.3.1.2. Composés non saturés.....5

 I.1.3.2. Hydrocarbures Naphténiques.....6

 I.1.3.3. Hydrocarbures Aromatiques.....6

 I.1.3.4. Asphaltènes.....6

 I.1.3.5. Résine.....6

 I.1.4. Les propriétés physico- chimiques des hydrocarbures.....7

 I.1.4.1. La densité.....7

 I.1.4.2. La viscosité.....7

 I.1.4.3. Le point d'écoulement.....8

 I.1.4.4. La température de fusion.....8

 I.1.4.5. La température d'ébullition.....8

 I.1.4.6. Les caractéristiques de distillation.....8

 I.1.4.7. La solubilité.....8

 I.1.4.8. La polarité.....9

 I.1.5. Principales sources d'hydrocarbures.....10

 I.1.5.1. Pétrole brut.....10

 I.1.5.1.1. Définition.....10

 I.1.5.1.2. Composition.....10

Sommaire

I.1.5.1.3. Classification des pétroles bruts.....	11
I.1.6 .Les hydrocarbures aromatiques polycycliques(HAP) dans les sols.....	11
I.1.6.1. Présentation des HAP.....	11
I.1.6.1.1. Caractéristiques générales des HAP.....	11
I.1.6.1.2. Propriétés chimiques des HAP	12
I.1.6.2. Toxicité des HAP	13
I.1.6.3. Effet des HAP.....	13
 Chapitre II : Le sol et sa pollution par l'hydrocarbure	
II.1. Le sol.....	14
II.1.1. Définition de sol.....	14
II.1.2. Formation d'un sol.....	14
II.1.2.1. Définition.....	14
II.1.2.2. Le profil du sol.....	15
II.1.2.2.1. Le profil A/C	15
II.1.2.2.2. Le profil A(B) C.....	15
II.1.2.2.3. Le profil ABC.....	15
II.1.2. Caractéristiques et propriétés physiques des sols.....	16
II.1.3. Les Eléments constitutifs de la phase solide du sol.....	16
II.1.3.1. Les éléments grossiers.....	16
II.1.3.2. La terre fine.....	16
II.1.3.2.1. Les sables et les limons.....	17
II.1.3.2.2. Les argiles.....	17
II.1.3.3. La matière organique.....	17
II.1.4. Caractéristiques et propriétés biologiques du sol.....	17
II.2. La pollution.....	18
II.2.1. Définition de la pollution.....	18
II.2.2. Définition d'un site pollué.....	19

II.2.3. Définition de sol pollué.....	19
II.2.4. Définition d'un polluant.....	19
II.2.5. Principaux types de polluants.....	19
II.2.5.1. Polluants minéraux.....	19
II.2.5.2. Polluants organiques.....	19
II.2.6. Type de pollution.....	20
II.2.7. Les cause de la pollution.....	20
II.3. Principales sources de contamination par les hydrocarbures.....	20
II.3.1. Suintements naturels.....	20
II.3.2. La pollution chronique.....	21
II.3.3. La pollution accidentelle.....	21
II.3.4. La pollution par l'apport atmosphérique.....	21
II.4. Devenir et comportement des hydrocarbures dans le sol.....	21
II.4.1. Phase résiduelle.....	21
II.4.2. Phase de vapeur.....	21
II.4.3. Phase liquide ou flottante.....	22
II.4.4. Phase dissoute.....	22
II.5. Impacts de la pollution par des hydrocarbures.....	22
II.5.1. Toxicité des hydrocarbures.....	22
II.5.2. Effets des hydrocarbures.....	23
II.5.2.1. Effets sur l'homme.....	23
II.5.2.2. Effets sur l'atmosphère.....	24
II.5.2.3. Effets sur l'eau douce.....	24
II.5.2.4. Effets sur la végétation.....	24
II.5.2.5. Effets sur les oiseaux	24

Chapitre III : Les méthodes de traitement des hydrocarbures

III.1. Méthodes de réhabilitations des sols pollués par des hydrocarbures.....	25
III.1.1. Techniques chimiques.....	26
III.1.1.1. Les méthodes de mobilisation et d'extraction.....	26
III.1.1.2. Les méthodes par réaction chimiques.....	26

Sommaire

III.1.1.3. Les méthodes de lavage des sols.....	26
III.1.2. Techniques physiques.....	26
III.1.2.1. Les procédés physiques par piégeage.....	26
III.1.2.2. Les procédés physiques par évacuation.....	27
III.1.3. Techniques thermique.....	27
III.1.3.1. L'incinération.....	27
III.1.3.2. La vitrification.....	27
III.1.4. Techniques biologiques.....	28
III.1.4.1. La biodégradation.....	28
III.1.4.1.1. Définition.....	28
III.1.4.1.2. Les facteurs influencent la biodégradation.....	29
III.1.4.1.3. Mécanisme de la biodégradation.....	31
III.2. Etude comparative entre les méthodes de traitement des sols contaminés.....	32

Partie pratique

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1. Présentation du site.....	36
IV.1.1. Présentation du Terminal Marin de Bejaia.....	37
IV.1.2. Les données climatiques.....	37
IV.1.2.1. Le vent	38
IV.1.2.2. Les précipitations	38
IV.1.2.3. Les températures	39
IV.1.3. Rôle du département HSE (Hygiène Sécurité Environnement).....	39
IV.1.4. Rôle du service environnement.....	40
IV.2. Origine et prélèvement des échantillons.....	41
IV.2.1. Origine.....	41

Sommaire

IV.2.2. Matériels de prélèvement.....	41
IV.2.3. Technique d'échantillonnage.....	41
IV.3. Etude des conditions du milieu.....	41
IV.3.1. La température.....	41
IV.3.2. Les précipitations.....	42
IV.4. Etudes expérimentales.....	42
IV.4.1. L'humidité du sol.....	42
IV.4.2. La matière organique	43
IV.4.3. Le pH.....	44
IV.4.3.1. Détermination de l'acidité actuelle (pH eau).....	44
IV.4.3.2. Détermination de l'acidité d'échange (pH KCL).....	45
IV.4.4. Dosage de chrome.....	46
IV.4.4.1. Courbe d'étalonnage.....	46
IV.4.4.2. Dosage de Chrome de l'échantillon.....	45
IV.4.5. Détermination de la DCO (Méthode par dichromate de potassium).....	48
IV.4.6. Dosage du plomb par la dithizone (HDZ).....	49
IV.4.6.1. La courbe d'étalonnage.....	47
IV.4.6.2. Dosage du Pb de l'échantillon.....	52
IV.4.7. Observation microbiologique.....	52

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Résultats de l'étude pour l'applicabilité de la méthode biologique.....	54
V.2. Résultats expérimentales	55
V.2.1. L'humidité du sol.....	55
V.2.2. pH.....	56
V.2.3. La matière organique.....	57

Sommaire

V.2.4. Le chrome.....	58
V.2.5. La demande chimique en oxygène.....	59
V.2.6. Le plomb.....	60
Conclusion	62

Sommaire

II.2.6. Type de pollution.....	20
II.2.7. Les cause de la pollution.....	20
II.3. Principales sources de contamination par les hydrocarbures.....	20
II.3.1. Suintements naturels.....	20
II.3.2. La pollution chronique.....	21
II.3.3. La pollution accidentelle.....	21
II.3.4. La pollution par l'apport atmosphérique.....	21
II.4. Devenir et comportement des hydrocarbures dans le sol.....	21
II.4.1. Phase résiduelle.....	21
II.4.2. Phase de vapeur.....	21
II.4.3. Phase liquide ou flottante.....	22
II.4.4. Phase dissoute.....	22
II.5. Impacts de la pollution par des hydrocarbures.....	22
II.5.1. Toxicité des hydrocarbures.....	22
II.5.2. Effets des hydrocarbures.....	23
II.5.2.1. Effets sur l'homme.....	23
II.5.2.2. Effets sur l'atmosphère.....	24
II.5.2.3. Effets sur l'eau douce.....	24
II.5.2.4. Effets sur la végétation.....	24
II.5.2.5. Effets sur les oiseaux	24

Chapitre III : Les méthodes de traitement des hydrocarbures

III.1. Méthodes de réhabilitations des sols pollués par des hydrocarbures.....	25
III.1.1. Techniques chimiques.....	26
III.1.1.1. Les méthodes de mobilisation et d'extraction.....	26
III.1.1.2. Les méthodes par réaction chimiques.....	26

Sommaire

III.1.1.3. Les méthodes de lavage des sols.....	26
III.1.2. Techniques physiques.....	26
III.1.2.1. Les procédés physiques par piégeage.....	26
III.1.2.2. Les procédés physiques par évacuation.....	27
III.1.3. Techniques thermique.....	27
III.1.3.1. L'incinération.....	27
III.1.3.2. La vitrification.....	27
III.1.4. Techniques biologiques.....	28
III.1.4.1. La biodégradation.....	28
III.1.4.1.1. Définition.....	28
III.1.4.1.2. Les facteurs influencent la biodégradation.....	29
III.1.4.1.3. Mécanisme de la biodégradation.....	31
III.2. Etude comparative entre les méthodes de traitement des sols contaminés.....	32

Partie pratique

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1. Présentation du site.....	36
IV.1.1. Présentation du Terminal Marin de Bejaia.....	37
IV.1.2. Les données climatiques.....	37
IV.1.2.1. Le vent	38
IV.1.2.2. Les précipitations	38
IV.1.2.3. Les températures	39
IV.1.3. Rôle du département HSE (Hygiène Sécurité Environnement).....	39
IV.1.4. Rôle du service environnement.....	40
IV.2. Origine et prélèvement des échantillons.....	41
IV.2.1. Origine.....	41

Sommaire

IV.2.2. Matériels de prélèvement.....	41
IV.2.3. Technique d'échantillonnage.....	41
IV.3. Etude des conditions du milieu.....	41
IV.3.1. La température.....	41
IV.3.2. Les précipitations.....	42
IV.4. Etudes expérimentales.....	42
IV.4.1. L'humidité du sol.....	42
IV.4.2. La matière organique	43
IV.4.3. Le pH.....	44
IV.4.3.1. Détermination de l'acidité actuelle (pH eau).....	44
IV.4.3.2. Détermination de l'acidité d'échange (pH KCL).....	45
IV.4.4. Dosage de chrome.....	46
IV.4.4.1. Courbe d'étalonnage.....	46
IV.4.4.2. Dosage de Chrome de l'échantillon.....	45
IV.4.5. Détermination de la DCO (Méthode par dichromate de potassium).....	48
IV.4.6. Dosage du plomb par la dithizone (HDZ).....	49
IV.4.6.1. La courbe d'étalonnage.....	47
IV.4.6.2. Dosage du Pb de l'échantillon.....	52
IV.4.7. Observation microbiologique.....	52

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Résultats de l'étude pour l'applicabilité de la méthode biologique.....	53
V.2. Résultats expérimentales	54
V.2.1. L'humidité du sol.....	54
V.2.2. pH.....	55
V.2.3. La matière organique.....	56

Sommaire

V.2.4. Le chrome.....	57
V.2.5. La demande chimique en oxygène.....	58
V.2.6. Le plomb.....	59
Conclusion	60

Introduction

Introduction

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

Le phénomène de pollution inquiète de plus en plus les sociétés modernes par les nuisances qu'il entraîne aussi bien sur l'altération de l'environnement que sur la santé des organismes vivants, dont l'homme [LECOMPTE P 1998].

Les conséquences écologiques de ce type de pollution pétrolière sont difficiles à évaluer, et ce, pour plusieurs raisons dont la complexité du polluant, les pétroles bruts sont constitués par un nombre considérable de composés. Par ailleurs, on ne peut parler d'un pétrole mais de pétrole d'origine, de composition donc de toxicités très différentes et les hydrocarbures pétroliers présentent des modifications physico-chimiques considérables; le polluant qui agira sur les organismes et sur les biocénoses sera généralement différent du polluant d'origine.

La contamination des sols et des sous-sols résulte des conséquences cumulées des diverses activités humaines. Cette contamination, trop négligée jusqu'à une époque récente, est préoccupante par ses conséquences environnementales, sanitaires et socioéconomiques [CDLIN F., 2000].

Le sol constitue le principal point de fuites environnementales des hydrocarbures, et la multiplication, au cours de ces dernières années, des pollutions dues au transport et à l'exploitation du pétrole ont eu cependant le mérite d'augmenter les connaissances scientifiques sur le développement de nouveaux moyens de lutte et de prévention.

Les techniques des sols reposent généralement sur des processus physico-chimiques qui sont très coûteux et peuvent entraîner des pollutions supplémentaires. D'où l'intérêt porté depuis quelques années sur la remédiation biologique.

Le recours aux bioprocédés, basés sur l'emploi de microorganismes capables d'assimiler les hydrocarbures peut constituer une alternative dans la mesure où ils sont efficaces, rentables, économiques et écologiques. En effet de nombreuses études ont établi que la biorestoration est la technologie la plus appropriée pour le nettoyage des sites pollués.

Introduction

Notre mémoire est structuré en deux parties :

La première partie présentera des notions générales sur la chimie des hydrocarbures à savoir leurs natures, propriétés physico-chimiques, devenir, impacts et méthodes de traitement des sols contaminés ainsi que leurs biodégradations.

La deuxième partie consistera à la présentation du site d'étude, ainsi que le matériel et les méthodes utilisés pour le suivi analytique, en suite l'interprétation des résultats obtenus.

I.1. Notion générales sur la chimie des hydrocarbures

I.1.1. Historique

L'Algérie est l'un des pays producteurs de pétrole et de gaz naturel. Ce sont les deux principales sources d'énergie du pays. L'exploitation de cette énergie fossile constitue l'un des piliers de notre économie industrielle. C'est pourquoi il est important, voire impératif, de développer une recherche scientifique permettant une utilisation économique et rationnelle de ces ressources.

La valorisation de cette matière passe forcément par la recherche, le développement et la mise en œuvre de procédés efficaces de prospection, de production, d'extraction, de transport, de traitement, de transformation et de stockage de ces hydrocarbures.

L'utilisation de ces deux sources en tant que matières premières pour l'industrie chimique connaît actuellement une croissance accélérée en vue de son optimisation tarissable et de permettre la promotion d'autres ressources énergétiques nouvelles. [1]

I.1.2. Définition des hydrocarbures

Un hydrocarbure est un composé organique contenant exclusivement des atomes de Carbone (C) et d'Hydrogène (H). Il possède en conséquence une formule brute de type : C_nH_m , où « n » et « m » sont deux entiers naturels et parfois des atomes d'Oxygène (0 – 2%), d'Azote (0-1%) et de Soufre (0-3%).

On distingue trois (03) séries distinctes des Hydrocarbures : La série des hydrocarbures saturés, la série des insaturés et celle des aromatiques.

I.1.3. Nature et classification des hydrocarbures

Les hydrocarbures, que l'on appelle communément Pétrole ou Huile, sont des composés refermant essentiellement des atomes de Carbone et d'Hydrogène. Le Pétrole est aussi désigné sous le nom de « Brut » [LALLEMAND ,1974 et LEFEBVRE ,1986], qui est un liquide noir quelquefois avec des reflets verdâtres et généralement plus légers que l'eau. Il est plus ou moins fluide et son odeur est habituellement forte et caractéristique [NORMAND, TREILL 1985, POSHTHUMA 1977].

Les hydrocarbures peuvent être subdivisés en trois (03) classes principales : Aliphatiques, naphthéniques et aromatiques.

Les autres éléments sont minoritaires. Ce sont les composés sulfurés azotés, oxygénés dont une partie est plus au moins polymérisée et constitue la catégorie des Asphaltènes et des résines. Certains de ces produits tels que les Phénols, bien que n'étant pas des hydrocarbures au sens strict du terme, contribuent pour une part non négligeable à la toxicité des pétroles [PERES, BELLAN et COL 1976].

La classification des hydrocarbures est comme suit:

I.1.3.1. Hydrocarbures Aliphatiques

Ce sont des composées à chaîne ouverte constituant la série acyclique ainsi appelée par le corps gras [GESAMP, 1993]. Suivant la nature des liaisons entre les carbones, on subdivise cette série en :

I.1.3.1.1. Composés saturés

Ce sont des molécules constituées de chaînes carbonées à simple liaison entre eux, de formule C_nH_{2n+2} , subdivisées en trois (03) catégories en fonction de leurs structures :

➤ Alcanes linéaires

La formule semi-développée d'un alcane linéaire peut s'écrire en ligne droite.

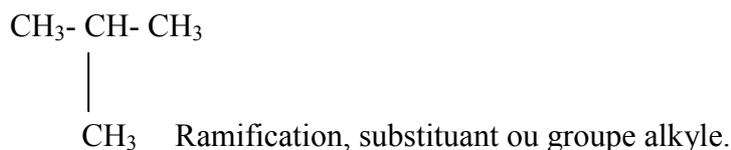
Example:



Ils constituent une des classes les plus abondantes (10- 40%) des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut [Soltani 2004].

➤ Alcanes ramifiés

La formule semi-développée d'un alcane ramifié ne peut pas s'écrire en ligne droite :

Exemple :

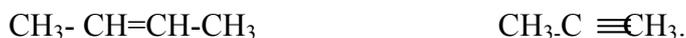
Un alcane ramifié est constitué d'une chaîne carbonée principale (la chaîne carbonée la plus longue : Ici 03 carbones) sur laquelle sont greffés un ou plusieurs substituants.

➤ **Alcane cycliques au cyclo-alcane**

Ils renferment des composés cycliques, saturés non benzéniques et le plus souvent substitués, les plus rencontrés dans le pétrole brut ce sont les cyclés de cinq (05) à (06) atomes de carbone, qui peuvent représenter entre 30 - 50% de pétrole brut. [Soltani ,2004].

I.1.3.1.2. Composés non saturés

Un hydrocarbure est dit insaturé s'il possède au moins une double liaison Carbone – Carbone ou une triple liaison Carbone – Carbone.

Exemple:

Ces liaisons constituent les insaturations d'une molécule.

➤ **Les alcènes**

Ce sont des hydrocarbures insaturés possédant au moins une liaison double Carbone – Carbone. Celles en double liaison ont pour formule générale C_nH_{2n} , « n » étant un nombre entier positif supérieur ou égal à 2.

Exemple : $n = 2 \longrightarrow C_2H_4$.

➤ **Les alcynes ou les hydrocarbures acétyléniques**

Une molécule d'alcyne s'écrit sous la formule générale C_nH_{2n-2} et contient une triple liaison.

I.1.3.2. Hydrocarbures Naphténiques

Ce sont des composés à chaîne fermée, saturés renfermant des formes monocycliques en C₅ (Cyclopentane) et en C₆ (Cyclohexane), formant la série cyclique.

Deux ou plusieurs cycles peuvent se condenser entre eux pour donner des hydrocarbures polycycliques.

Ils sont en général peu toxiques, mais plus rémanant que les aliphatiques et moins que les composés aromatiques. Certains produits (Stéran, Trope) sont parfois utilisés comme témoins d'une contamination pétrolière [PERES, BELLAN et COL, 1976].

On distingue deux (02) types d'hydrocarbures naphténiques :

- ✓ **Hydrocarbures naphténiques saturés :**
 - Naphtène de formule générale (C_nH_{2n}).
- ✓ **Hydrocarbures naphténiques non saturés :**
 - Une double liaison conjuguée : Cyclooléfiniques ;
 - Deux (02) doubles liaisons conjuguées : Cyclodiofiniques ;
 - Trois (03) doubles liaisons conjuguées : Benzéniques ou aromatique.

I.1.3.3. Hydrocarbures Aromatiques

Plusieurs familles d'hydrocarbures aromatiques et polyaromatiques dont le nombre de noyaux varie de (02) à (06) sont présentes dans les pétroles bruts. Ces composés sont dominés par des composés mono-, di- et tri- aromatiques. En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne représentent que 10% à 30% des hydrocarbures totaux d'un pétrole brut. Certains cycles aromatiques peuvent être associés à des noyaux (cycle à 05 ou à 06 atomes de carbone) saturés (naphtéo-aromatiques) [LEFEBVRE, 1978].

I.1.3.4. Asphaltènes

Les Asphaltènes correspondent à une classe de composés de haut poids moléculaire, insolubles dans le Pentane ou l'Hexane. La structure de ces composés est mal connue du fait, de leur composition chimique complexe (à base de cycle aromatique condensé, de naphtéo-aromatiques, de ramifications et d'hétéroatomes (O, N, S) [LEFEBVRE, 1978].

I.1.3.5. Résines

Cette fraction correspond à des molécules hétérocycliques, telles que :

- Des composés oxygénés : Phénols, acides carboxyliques, alcools, aldéhydes ;
- Des composés soufrés : Mercaptans, sulfures disulfures ;
- Des composés azotés : Pyridines, quinoléines...etc. Les dérivés soufrés sont dans la plupart des cas plus abondantes que les composés oxygénés ou azotés. [LEFEBVER, 1978].

I.1.4. Les propriétés physico- chimiques des hydrocarbures

Il est essentiel de connaître les propriétés physiques et chimiques des hydrocarbures pour être capables de déduire leurs comportements une fois qu'ils seront soumis à l'environnement.[HARNOIS LUC ; 2001].

Les principales propriétés sont:

I.1.4.1. La densité

La plupart des hydrocarbures sont plus légères que l'eau ($d < 1$), la densité d'un hydrocarbure déterminera :

- Sa capacité à flotter ;
- sa tendance à se volatiliser ;
- sa fluidité [LALLEMAND, 1974].

Les ramifications ont peu d'influence sur la densité.

I.1.4.2. La viscosité

La viscosité est représentée par la résistance à l'écoulement : Cela veut dire que les hydrocarbures à haute viscosité s'écoulent difficilement, par contre ceux du cas inverse sont très fluides.

La viscosité des paraffines normales augmente avec le nombre d'atomes de Carbone. Ceci résulte de l'augmentation des forces de cohésion intermoléculaires et des enchevêtrements qui empêchent les molécules de glisser les unes sur les autres. Les ramifications sur les chaînes principales diminuent la viscosité [LEFEBVRE, 1978].

I.1.4.3. Le point d'écoulement

C'est la température en dessous de laquelle un hydrocarbure ne s'écoule plus. Si la température ambiante est inférieure à son point d'écoulement, le produit se comporte comme un solide [LALLEMAND, 1974].

I.1.4.4. La température de fusion

Le point de fusion des alcanes normaux augmente avec le nombre d'atomes de Carbone, mais de façon non régulière.

I.1.4.5. La température d'ébullition

Les températures d'ébullition des hydrocarbures normaux augmentent avec leurs nombres d'atomes de Carbone. Ceci résulte de l'augmentation des attractions entre les molécules lorsque la longueur de la chaîne augmente. L'introduction de la ramification dans la chaîne principale, diminue la température d'ébullition.

Exemple :

- Le pentane normal bout à 36°C ;
- l'iso pentane (méthylbutane) bout à 28°C ;
- et de néo pentane (tétra méthane) à 9,5°C.

I.1.4.6. Les caractéristiques de distillation

Elles reflètent sa volatilité. Lorsque la température d'un hydrocarbure augmente, certains composés de ce produit arrivent à leur point d'ébullition et se distillent [LEFEBVRE, 1978].

I.1.4.7. La solubilité

La solubilité des hydrocarbures dans l'eau augmente avec la polarité des composés, c'est-à-dire, quand leur poids moléculaire diminue [MATTEI.G, 1995].

Les hydrocarbures aromatiques sont les plus solubles, ce qui accentue leur toxicité [LACAZE, 1980]. La solubilité de certains hydrocarbures est présentée dans le tableau suivant :

Tableau I.1 : Solubilité des hydrocarbures :

Type d'hydrocarbure	Solubilité mg/L	Type d'hydrocarbure	Solubilité mg /L
Paraffine :		Oléfine :	
-iso pentane	48	-éthane	131
-n-hexane	9,5	-propène	200
-triméthyle pentane -2, 2,4	2,5	-hexane-1	50
-n-octane.	0,7	Aromatique :	
Cycloparaffine :		-benzène	1780
-cyclopentane	156	-toluène	515
-cyclohexane	55	-o-xylène	175
-cyclooctane	7,9	-ethylbenzène	125

Source : [BERNE .F, 1991].

I.1.4.8. La polarité

Les hydrocarbures sont apolaires ou peu polaires [BERNE.F, 1991].

Tableau I.2 : Comparaison des propriétés physiques de quelques hydrocarbures :

Famille	Hydrocarbure	Formule brute	Point d'ébullition (°C)	Fusion (°C)	Densité par rapport à l'eau
Alcane (C _n H _{2n+2})	Hexane	C ₆ H ₁₄	68,7	95	0,66
	Octane	C ₈ H ₁₈	125,7	57	0,70
	Dodécane	C ₁₂ H ₂₆	216,3	10	/
Cyclanes (CH ₂) _n	Cyclohexane	(CH ₂) ₆	81	7	0,78
	Cyclooctane	(CH ₂) ₈	151	15	0.83
Benzène et dérivés (Hydrocarbures aromatiques)	Benzène	C ₆ H ₆	80	5,5	0,88
	Toluène	C ₆ H ₅ CH ₃	111	-95	0,87
	Métaxylène	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	139	-97	0,88

Source : [LACAZE, 1980].

I.1.5. Principales sources d'hydrocarbures

Les principales sources d'hydrocarbures sont :

- Le pétrole brut ;
- le charbon ;
- les gaz naturels ;
- les animaux et les plantes.

Mais c'est incontestablement le pétrole brut qui reste la source la plus importante. [LEFEBVRE ,1978].

I.1.5.1. Pétrole brut

I.1.5.1.1. Définition

Le pétrole brut est un liquide noir, quelquefois à reflets verdâtres et généralement plus léger que l'eau. Il est plus ou moins fluide suivant son origine .Son odeur est habituellement forte et caractéristique [NORMAND et TREIL., 1985].

Le mot pétrole veut dire « Huile », il est appelé aussi «Huile de Pierre», venu du mot latin «*Pétrolium*». Le pétrole est aussi désigné sous le nom de « Pétrole Brut » ou « le Brut ».

I.1.5.1.2. Composition

Le pétrole brut est constitué presque exclusivement d'hydrocarbures dont certains trouvent des applications dans les essences, carburants, huiles de graissage...etc. [LEFEBVRE, 1986].

Le pétrole brut est un mélange extrêmement complexe de molécules où dominant les hydrocarbures, mais qui renferment aussi en petites quantités des composés soufrés, oxygénés, azotés, et souvent à l'état de trace des composés métalliques.

- Carbone 84 à 87% ;
- Hydrogène 12 à 14% ;
- Soufre 0,06 à 7% ;
- Azote moins de 1,7% ;
- Oxygène 0,05 à 3,6%.

Le pétrole brut dont dérive les produits pétroliers comprend généralement plus de 90% d'hydrocarbures liquides ou gazeux. Le reste est constitué de composés non hydrocarbures.

On distingue :

- Composés soufrés : tel que H_2S ;
- Composés azotés : tel que la Pyridine ;
- Composés oxygénés : tel que les Phénols (le contenu d'un pétrole brut en oxygène peut atteindre 2%) ;
- **Les métaux:** Tels que le Fer, le Zinc, le Chrome...etc. Mais les deux principaux sont le Nickel et le Vanadium ; Ces métaux sont chimiquement liés à des molécules organiques ;
- **Les Asphaltées:** Composés non volatils et de masse moléculaire élevée.

Tous les types d'hydrocarbures sont présents dans le Pétrole brut sauf les Oléfines et les Alcènes qui sont absents [LEFEBVRE ,1978].

I.1.5.1.3. Classification des pétroles bruts

Selon la prédominance des hydrocarbures, les pétroles bruts sont classés en :

- **Pétroles légers (bruts légers) :** qui renferment une proportion plus élevée de fraction essence, relativement peu de Résine et de Soufre ;
- **Pétroles lourds (bruts lourds) :** contenant plus de Résine, ces bruts sont les meilleurs des Bitumes [PROSKOURIAKOV et al ,1981].

L'unité de mesure du Pétrole est le Baril.

$$1 \text{ Baril} = 0.159 \text{ m}^3.$$

I.1.6. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans le sol

I.1.6.1. Présentation des HAP

I.1.6.1.1. Caractéristiques générales des HAP

Les HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques) sont des composés organiques pouvant avoir deux (02) origines. Les **HAP d'origine pyrogénique** formés lors de la transformation géologique de la matière organique se trouvent aujourd'hui dans les matières organiques fossiles (Pétrole, Houille). Les **HAP d'origine pyrrolique** se forment de la

combustion incomplète de la matière organique. Ces molécules sont regroupées avec d'autres polluants (polychlorobiphényles, dioxines et furanes) sous le terme de « Composés organiques hydrophobes » ou COH. Cette famille de polluants a pour principale caractéristique d'être persistante dans l'environnement. Les HAP regroupent quelques centaines de molécules composées d'au moins deux (02) cycles benzéniques. Il est habituel de restreindre les études sur les HAP à seize (16) d'entre eux, retenus comme polluants prioritaires par l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis (US-EPA). Cette sélection a été établie sur la base de leur abondance dans l'environnement, leur toxicité et les connaissances existantes.

I.1.6.1.2. Propriétés chimiques des HAP

Les HAP possèdent des propriétés chimiques particulières qui gouvernent leur comportement dans l'environnement et notamment dans le sol. Ces propriétés sont dépendantes du nombre de cycles benzéniques qui composent ces molécules. On parle de HAP de faible poids moléculaire ou HAP légers pour ceux possédant (02) ou (03) cycles benzéniques et des HAP de haut poids moléculaire ou HAP lourds pour ceux ayant (04) cycles benzéniques ou plus.

Les HAP légers possèdent une masse moléculaire comprise entre 120 et 180 g/mol alors que celle des HAP lourds est supérieure à 180 g/mol. D'une manière générale, les HAP sont caractérisés par une forte hydrophobie, c'est-à-dire qu'ils possèdent une affinité pour les phases lipophiles, alors qu'ils se solubilisent très peu dans l'eau. Leur hydrophobie augmente lorsque le nombre de cycles benzéniques et donc la masse moléculaire augmente. Avec ces deux cycles benzéniques, le naphtalène est le HAP le plus léger. Il possède la plus forte solubilité dans l'eau (31,8 mg/L à 25° C), 10^5 fois supérieure à la solubilité du benzo (g, h, i) Pérylène. En plus d'une hydrophobie croissante avec l'augmentation du nombre de cycles, les HAP présentent une volatilité décroissante avec l'augmentation du nombre de cycles.

La préférence des HAP pour les phases hydrophobes ainsi que leur faible capacité à être volatilisées est à l'origine de leur comportement dans les sols. Ainsi, avec une variation en fonction de la structure chimique des HAP, ces composés vont principalement s'associer avec les matières solides hydrophobes du sol. La persistance des HAP dans les sols est donc en partie la conséquence d'un faible transfert vers la phase aqueuse du sol ou vers le compartiment atmosphérique.

I.1.6.2. Toxicité des HAP

Les HAP sont des polluants à prendre en considération car ils présentent un risque pour la santé humaine et pour l'environnement. Les propriétés toxiques se différencient en fonction des composés. Les seize (16) HAP US-EPA présentent le plus grand risque, compte tenu de leur toxicité et des quantités retrouvées dans l'environnement.

I.1.6.3. Effets des HAP

Les HAP peuvent pénétrer dans le corps humain par inhalation, contact cutané ou ingestion. Une fois dans l'organisme, les HAP sont métabolisés au niveau du foie. En effet, cet organe contient des mono-oxygénases à cytochrome P-450 qui transforment les HAP par réactions d'oxydation, de réduction et d'hydroxylation. Une fois transformés ou « fonctionnalisés », les HAP deviennent plus hydrophiles et ne peuvent plus facilement être éliminés au lieu de s'accumuler dans le corps humain. Cependant, même si les HAP fonctionnalisés sont moins hydrophobes que leurs molécules d'origine, leur transformation accentue leur toxicité. Les époxydes et les dihydriols formés présentent en effet une forte toxicité qui varie en fonction des HAP considérés. Ces composés présentent tout d'abord une toxicité aiguë qui peut engendrer la mort d'un sujet en cas d'exposition à une forte dose. La toxicité est évaluée sur des mammifères comme la souris ; elle est exprimée par une DL50 qui représente la dose engendrant la mort (effet létal) de 50% des sujets.

La toxicité aiguë n'est pas le problème majeur posé par les HAP car les concentrations nécessaires pour l'atteinte sont très élevées et donc rarement rencontrées dans l'environnement. Les HAP sont plus problématiques par la toxicité chronique qu'ils engendrent ; il s'agit d'un effet néfaste du composé.

II.1. Le sol

II.1.1. Définition de sol

Le sol est défini comme la couche superficielle de la croûte terrestre composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants. Il résulte de l'altération de la roche mère sous-jacente sous l'influence de divers facteurs du milieu qui sont le climat, la topographie, la végétation et le temps. L'une des caractéristiques la plus importantes du sol c'est la structure, qui joue un rôle fondamental dans la fertilité du sol. [KHELLOUT, 2004].

II.1.2. Formation d'un sol

II.1.2.1. Définition

La pédologie considère le sol comme un milieu complexe et dynamique (change la forme).

-Complexe : c'est-à-dire caractérise par une atmosphère interne, une économie de l'eau particulière, une flore et une faune déterminés et des éléments minéraux.

-Dynamique : Car ces propriétés résultent de l'action commutatif continue de Cinq (05) facteurs :

- La roche mère
- Végétation et animation
- Climat
- Relief
- Le temps (Age)

Par suite des interactions de ces Cinq (05) facteurs quantum d'évolution annuel du sol il y a donc genèse (évolution du sol). D'autre part une synthèse de l'ensemble de ces facteurs permet de définir les différents types du sol de globe d'établir leur classification de déterminer leur distribution géographique. Ils ont résulté que les sols se distribuent par zone grossièrement parallèle au zone de climat et de végétation climatique c'est le principe de la zonalité des sols.

A mesure que l'évolution du sol se poursuit il s'approfondit en couches successives qu'on appelle des horizons de plus en plus nombreuses épaisses et distinctes dans l'ensemble va constituer un profil.

II.1.2.2. Le profil du sol

Une coupe du sol a la faveur d'un talus d'une route ou d'une fausse étude creusé artificiellement montre une superposition de couche successif se différencient par couleur, structure, texture (la composition agrometrique). On distingue trois (03) profile.

A/C A(B) C ABC de plus en plus différencié

II.1.2.2.1. Le profil A/C

Profil plus altère ou dans l'altération se limite à l'horizon coloré a la matière organique foncé c'est l'horizon A.

II.1.2.2.2. Le profil A(B) C

Formation d'un horizon d'altération (B) distinct de l'horizon A.

II.1.2.2.3. Le profil ABC

Profil à redistribution visible de certain élément du complexe d'altération alors horizon A se subdivise en deux sous horizons :

A₁ : riche en matière organique

A₂ : peu colore pauvre en matière organique.

II.1.3. Caractéristiques et propriétés physiques des sols

Le sol est un mélange de plusieurs phases : solide, liquide et gazeux. A la loupe, le sol est un mélange de grains durs, d'air, d'êtres vivants ou morts et d'humus. On peut donc décrire le sol comme un système polyphasique qui comprend :

- Une phase solide comportant les minéraux et les substances organiques inertes, mais aussi les êtres vivants.
- Une phase liquide, quasi exclusivement aqueuse qui outre l'eau, contient l'ensemble des substances et gaz dissous qui jouent un grand rôle dans les fonctions du sol (nutrition, réservoir et filtration de certains éléments).
- Phase gazeuse en équilibre avec la phase liquide. Elle constitue l'air du sol.

II.1.4. Les éléments constitutifs de la phase solide du sol

Pour la détermination des éléments constitutifs de la phase solide de sol il faut faire des analyses granulométriques.

La méthode granulométrique la plus courante est le tamisage. Mais cette méthode permet de connaître les tailles des grains de sable ou de graviers. (Les particules supérieures à 50 μm).

L'utilisation des tamis n'est pas possible pour des particules de dimension inférieure à 50 μm , les particules les plus fines sont étudiées en observant leur vitesse de chute dans un milieu moins dense qu'elles. C'est la méthode de la « pipete de Robinson ».

II.1.4.1. Les éléments grossiers

Ce sont des éléments $> 2\text{mm}$, on les classe par leurs dimensions:

- 0.2 à 2 cm : graviers ;
- 2 à 5 cm : cailloux ;
- 5 à 20 cm : pierres ;
- $> 20\text{ cm}$: blocs.

II.1.4.2. La terre fine

C'est la fraction de terre qui reste lorsqu'on retire les éléments grossiers (donc $< 2\text{mm}$, au tamis). La terre fine, débarrassée du calcaire et de la matière organique, peut être analysée dans le but de donner sa composition granulométrique : par un jeu de tamis, puis par les tubes de sédimentation. On peut classer les éléments de la terre fine par dimension :

- De 2mm à 0.2mm : sables grossiers ;
- De 0.2mm à 50µm : sables fins ;
- De 50µm à 20µm : limons grossiers ;
- De 20µm à 2µm : limons fins ;
- < à 2µm : argiles.[2].

II.1.4.2.1. Les sables et les limons

Ils constituent le squelette du sol et constitués en majorité de minéraux primaires. Les sables ne sont pas seulement des grains de quartz (SiO_2) mais aussi des grains de différentes compositions minéralogiques primaires (feldspath, micas, plagioclases, calcite...) et très peu de minéraux secondaires.

Dans les limons, la part de quartz et des minéraux primaires diminuent, en faveur des minéraux secondaires.

II.1.4.2.2. Les argiles

Ce sont des silicates d'alumine, plus ou moins hydratés, microcristallins à structure en feuillets, avec des particules très fines, non solubles dans l'eau qui y reste en suspension, ils sont globalement électronégatifs et ils ont la capacité de retenir des molécules d'eau.

II.1.4.3. La matière organique

De la litière à la matière organique humifiée : la mort des êtres vivants, leurs déchets et sécrétions apportent au sol sa matière organique, qualifié de fraiche avant qu'elle ne se transforme en matière humifiée (humus). [2]

II.1.5. Caractéristiques et propriétés biologiques du sol

La présence de racines, d'animaux et de microorganismes (Mollusques, annélides, rongeurs, bactéries et champignons) dans le sol est en interaction avec ses propriétés physiques et chimiques (structure, dynamique de la matière organique...). Cette présence d'êtres vivants est synonyme d'activité biologique, elle est en interaction:

-A long terme sur sa composition physique et sa dynamique (transformation des minéraux, enrichissement en matière organique via les producteurs primaires : végétaux).

-A court terme sur sa structure (qui elle-même définit le comportement physique du sol en terme de porosité et de circulation des fluides, eau et air) et la stabilité de cette structure.

-L'interaction entre biologie et chimie du sol se traduit par les êtres vivants qui vont être des facteurs clefs dans le cycle des éléments. Ils peuvent les faire passer d'une forme organique à une forme minérale (minéralisation) ou, à l'inverse, de la forme minérale à la forme organique (organisation ou rétrogradation). De plus, ils peuvent (surtout les bactéries), faire passer les éléments d'un état oxydé à un état réducteur ou vice-versa.

La biologie du sol a une fonction essentielle de dégradation et de recyclage des matières organiques, elles peuvent avoir en effet 3 issues à travers le métabolisme des êtres vivants :

- **L'assimilation** : les êtres vivants ingèrent, digèrent et assimilent la matière organique.
- **La sécrétion** : les êtres vivants sécrètent des molécules organiques dans le sol : citons en particulier les polysaccharides pour l'effet d'agrégation des particules du sol.
- **La minéralisation** : une partie de la matière organique est minéralisée sous forme d'ions minéraux, solubles, qui sont assimilables par les végétaux. [2]

II.2. La pollution

II.2.1. Définition de la pollution

La pollution peut être définie comme étant une modification défavorable de l'équilibre naturel susceptible de mettre en danger la santé de l'homme, les ressources biologiques, la faune et la flore. Cette modification résulte en totalité de l'action humaine.

Parmi les pollutions les plus redoutables sur l'environnement, la pollution pétrolière qui relève à la fois de la pollution chimique et celle organique. Elle est surtout importante en mer et sur les côtes.

La présence des hydrocarbures dans les différents milieux naturels provoque des effets désagréables pour l'homme et elle est la cause de propriétés organoleptiques mauvaises pour les animaux filtrateurs dont plusieurs deviennent de véritables réservoirs de mazout [LAMOTTE M etBOURLIERE F, 1983].

La pollution peut se définir comme une dégradation ou une perturbation du milieu, qui résulte en général de l'apport de matières ou de substances exogènes. Ses effets peuvent être modificateurs ou destructeur vis-à-vis du fonctionnement du milieu, selon la nature de la pollution ou la qualité du polluant. [Brigitte G et AL, 2003].

II.2.2.Définition d'un site pollué

Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), c'est un site, qui, du fait d'anciens dépôts de déchets ou d'infiltration de substances polluantes, présente une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement

II.2.3.Définition de sol pollué

Un sol pollué est un sol qui présente une pollution susceptible de provoquer une nuisance ou un risque pérenne pour les personnes ou l'environnement. [KHELLOUT, 2004].

II.2.4.Définition d'un polluant

Les termes normalisés de l'AFNOR définit le polluant comme un altéragène biologique, physique, ou chimique, qui au-delà d'un certain seuil, et parfois dans certaines conditions (potentialisation), développe des impacts négatifs sur tout ou partie d'un écosystème ou de l'environnement en général. [KHELLOUT, 2004].

II.2.5.Principaux types de polluants

Un polluant est une substance présentant des effets toxiques vis-à-vis des organismes vivants et qui peut provoquer la contamination de la chaîne alimentaire. On distingue deux types de polluants. . [KHELLOUT, 2004].

II.2.5.1.Polluants minéraux

Les métaux lourds : le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb (Pb), le chrome (Cr), vient ensuite Ni, Cu, Zn et Se qui est toxique pour les végétaux.

Les sels : les nitrates (NO_3^-), les sels de sodium.

II.2.5.2.Polluants organiques

Les polluants organiques d'origine industrielle incluent le pétrole et ses dérivés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les hydrocarbures chlorés 2
Les hydrocarbures les plus dangereux font partie des composés aromatiques et des hydrocarbures chlorés. Le benzène et le toluène sont deux composés aromatiques très utilisés en industrie, engendrant une pollution notable. De façon générale, les composés aromatiques sont toxiques et parfois cancérigènes, mutagènes. Le degré de dangerosité devient plus important quand le sol assure difficilement la dégradation biologique de ce type de produits. [KHELLOUT, 2004].

II.2.6.Types de pollutions

- La pollution du sol est souvent d'origine industrielle ou agricole : utilisation d'engrais, de pesticides...
- La pollution de l'eau qui peut résulter de la contamination des eaux usées, des rejets de produits (les produits phytosanitaires, ceux présents dans les engrais, les hydrocarbures...)
- La pollution par type ou agents polluants : pollution industrielle, radioactive, électromagnétique, thermique, lumineuse et spatiale.

II.2.7.Les causes de la pollution

L'origine des pollutions localisées ou diffuses est liée aux activités industrielles, militaires et urbaines, et souvent agricoles contemporaines ou passées :

- Déversement plus ou moins massif lors d'accidents de transport d'hydrocarbures par route ou chemin de fer (cas des gorges de Lakhdaria en 2007), lors de rupture accidentelle d'oléoducs (Ain Smara 2000 et Ahnif 2004) et d'inondations ou d'explosions d'unités de production industrielle ou de cuves de stockage hors sol dans les centres de distribution (Skikda 2008), lors des opérations de transfert et de distribution (Fausses manœuvres humaines).
- Déversement et enfouissements volontaires de déchets hydrocarbures, liés à des activités domestiques, artisanales, commerciales, agricoles ou industrielles.
- Retombées atmosphérique dans les zones urbaines et industrielles ou leur périphérie (hydrocarbures volatils, imbrulés de combustion diverses).

II.3. Principales sources de contamination par les hydrocarbures

Le sol peut être contaminé par les hydrocarbures de différentes manières. La principale contamination est généralement due aux suintements naturels, aux fuites qui se produisent au niveau des canalisations suite à des ruptures dues à la corrosion par exemple. Mais on distingue également d'autres contaminations qui sont dues aux apports atmosphériques, à la pollution chronique ou accidentelle...etc.

II.3.1. Suintements naturels

Selon RAMADE (1992) la contamination des sols par les hydrocarbures due aux suintements naturels est estimée à 0,6million de tonnes d'hydrocarbures par an, soit environ 10% du flux d'origine humaine. Ces suintements proviennent des gisements de pétrole exploités ou non [PERES ET COLL. ,1976]. Les fissures et les filtrations d'hydrocarbures sont déterminées par l'objectivité tectonique et dépendent des conditions géologiques et géochimiques [LACAZ ,1980].

II.3.2. La pollution chronique

Cette pollution est liée directement aux différentes activités de transport et de production du pétrole. Elle comprend plusieurs vecteurs tels que : les rejets des raffineries, les industries (usines pétrochimiques), les ateliers de réparation d'automobiles, les stations d'essence, les puits de pétrole, les boues et les eaux rejetées dans le sol après extraction.

II.3.3. La pollution accidentelle

Cette pollution peut être considérée comme étant l'une des plus redoutables sur le plan contamination des sols, car elle peut être de grande envergure, en conduisant à de graves conséquences.

La pollution accidentelle peut se produire lors des accidents de transport (camions citernes), les fuites de canalisation (rupture des oléoducs pendant les opérations de forage notamment lors des accidents survenus aux puits de pétrole.[BERGUE J.M et MERIENNE D,1996].

II.3.4. La pollution par l'apport atmosphérique

C'est une micropollution des sols provoquée par les particules contenues dans les fumées industrielles, gaz d'échappement des moteurs, les eaux de pluies, la neige et le brouillard.

Une autre pollution insidieuse est le pétrole qui se perd par évaporation au cours de son transfert de la raffinerie aux camions citernes, aux réservoirs du post de distribution puis à la voiture.Cette dernière cause de contamination de l'atmosphère urbaine par les hydrocarbures aliphatiques, aromatiques volatiles, peut se traduire à elle seule par des teneurs de l'ordre de 4mg/m^3 d'air [RAMDANE F, 1992].

II.4.Devenir et comportement des hydrocarbures dans le sol

Lorsqu'un hydrocarbure est déversé dans le sol, il pénètre dans les zones profondes et peut atteindre les nappes phréatiques. Cette migration est due à l'effet de la gravité.

Les hydrocarbures, une fois déversés dans le sol, se divisent en plusieurs phases qui sont [FIEVEZ Thierry, 1996] :

II.4.1.Phase résiduelle

Dans cette phase, les hydrocarbures, généralement ceux liquides, sont soit dans la phase non saturée en eau qu'on appelle la zone Vadose, soit sont emprisonnés dans les pores de la matrice du sol.

II.4.2.Phase de vapeur

Dans ce cas les hydrocarbures généralement ceux légers, sont soumis aux phénomènes de la volatilisation qui est sous l'effet des températures élevées. L'évaporation des produits volatils du

pétrole est immédiate et entraîne une modification des propriétés physico-chimiques des hydrocarbures.

II.4.3.Phase liquide ou flottante

Contrairement à la phase résiduelle, les hydrocarbures liquides qui ne sont pas restés dans la zone Vadose vont atteindre la nappe là où ils vont se disperser latéralement.

II.4.4.Phase dissoute

Certains composés sont solubles, alors ils sont dissous au contact de l'eau. Ce qui complique et rend quasi impossible leur récupération [LLOYD et coll., 1994].

II.5.Impacts de la pollution par les hydrocarbures

La pollution peut être définie comme étant une modification défavorable de l'équilibre naturel susceptible de mettre en danger la santé de l'Homme, les ressources biologiques, la faune et la flore.

Les produits pétroliers, du fait de leur utilisation massive, constituent des polluants importants des sols et des aquifères (souterraines). [SOLANO-SERENAL F ; MARCHAL R et VANDE CASTEELE J.P ; 2001].

L'action de ces produits sur les organismes n'est pas nécessairement létale, mais elle peut provoquer de graves dommages notamment lorsqu'il y a accumulation de ces hydrocarbures tout au long de la chaîne alimentaire.

II.5.1. Toxicité des hydrocarbures

Le pétrole brut contient des aromatiques très toxiques tel que le benzène, le toluène et le xylène.

- La toxicité tend à augmenter en relation avec la grosseur de la molécule ;
- Les composés les plus légers de chaque classe sont les plus toxiques.

La toxicité n'est pas le seul fait des hydrocarbures au sens chimique du terme, mais aussi de certains composés qu'ils accompagnent comme le phénol dans le cas des pétroles bruts, ou mal raffiné et le plomb tétra éthyle additif antidétonant des essences[LACAZ ,1980].

Les effets létaux et sub-létaux font l'objet d'essais biologiques. Le but de ces expériences est généralement d'identifier les espèces ou les stades du cycle biologique qui sont spécialement sensibles ou vulnérables au pétrole.

II.5.2.Effets des hydrocarbures

Les hydrocarbures rejetés dans l'environnement ont des répercussions énormes sur tout : plantes, animaux et êtres humains. Certaines espèces prouvent des changements de comportement à peine perceptibles ou des problèmes de santé à court terme. Certaines d'entre elles éprouvent des effets toxiques instantanés et aigus, parfois mortels, tandis que chez d'autres les répercussions se manifestent lentement et à long terme.

La contamination des sols par les hydrocarbures pétroliers peut causer de nombreux dégâts :

- Leur réactivité chimique et leur volatilité peuvent entraîner un danger d'incendie ou d'explosion.
- Les hydrocarbures les plus légers (c'est-à-dire ceux qui ont une masse moléculaire plus faible) sont mobiles et peuvent être transportés sur de grandes distances dans les nappes d'eau souterraines (ou dans l'air).
- Les hydrocarbures pétroliers peuvent causer des problèmes d'ordre esthétique notamment une odeur, un goût et une apparence désagréables.
- Dans certaines conditions, les hydrocarbures pétroliers peuvent dégrader la qualité du sol, en perturbant la rétention et la transmission de l'eau ou le cycle des substances nutritives des plantes.
- Les espèces végétales présentent un patron d'exposition qui est approprié pour les surfaces de terrains contaminés par ce qu'elles ne peuvent s'éloigner de l'aire de contamination.
- Les invertébrés sont aussi d'une importance écologique en termes de la structure des sols et des cycles de nutriments. Ils sont sensibles aux contaminations dans sol à cause de leur contact intime avec ceux-ci. [BOUNIF D, et MEKBEL O ,2005].

II.5.2.1.Effets sur l'Homme

Comme tout autre organisme vivant, l'homme n'est pas à l'abri d'une contamination par les hydrocarbures pétroliers.L'homme peut être exposé à l'intoxication par ces produits par inhalation ou ingestion directe en consommant des aliments d'origine végétale ou animale qui ont été en contact avec les hydrocarbures. Cette contamination s'avère dangereuse par l'effet de sommation. Sous forme gazeuse, les hydrocarbures agissent de manière indirecte en diminuant la quantité d'oxygène nécessaire l'homéostasie. A fortes concentrations par suite de leur fixation dans les lipides du système nerveux après pénétration dans les poumons, ils exercent une action anéantissante qui augmente avec le nombre de carbone de la chaîne [GOUGAM ,1990].

Dans la pratique, le danger principal présenté par les hydrocarbures aliphatiques comme l'essence par exemple, résulte par l'ingestion volontaire ou accidentelle. De petites quantités, entrant dans les poumons, suffisent en effet pour y provoquer rapidement une pneumonie massive [LEONARD ,1990].

A court terme, les hydrocarbures dessèchent la peau et peuvent provoquer des dermatoses et des eczémas par obturation des pores. A long terme, les hydrocarbures (lourds), en particulier les hydrocarbures aromatiques, peuvent favoriser le cancer de la peau à la suite de contacts prolongés avec cette dernière. [ANONYME1, 1987].

II.5.2.2.Effets sur l'atmosphère

La combustion du pétrole, telle nous la connaissons actuellement, pose de graves problèmes d'environnement car elle rejette dans l'atmosphère, en grandes quantités, des produits nocifs pour l'écosystème et pour la planète. L'effet de serre est l'une des graves conséquences de la combustion des hydrocarbures.

II.5.2.3.Effets sur l'eau douce

Les hydrocarbures affectent l'eau en lui donnant un goût désagréable, en agissant sur ces propriétés organoleptiques. La contamination des eaux souterraines par les hydrocarbures pétroliers constitue une menace de taille pour les aquifères, sources d'eau potable. La plupart des composés organiques sont très toxiques et ont une solubilité dans l'eau suffisante pour que leur temps de dissolution complète se chiffre en années, mais suffisamment élevée pour rendre les eaux inutilisables pour l'atmosphère.

II.5.2.4.Effets sur la végétation

Les hydrocarbures mono aromatiques comme le mélange benzène-toluène-xylène (BTX) sont connus pour être phytotoxiques. Les BTX dérangent les échanges entre les graines, sol, atmosphère ou ils altèrent les tissus de la plante [HENNER et al, 1997].

II.5.2.5.Effets sur les oiseaux

Les oiseaux sont particulièrement vulnérables à la pollution pétrolière. Pour de fortes contaminations par les produits pétroliers, l'air est emprisonné entre leurs plumes est éliminé, et la perte de flottabilité qui en résulte provoque leur mort par noyade [PERES, BELLAN et col, 1976], ainsi que l'imprégnation du plomage par le pétrole affecte son pouvoir isolant et l'oiseau meurt de froid [GESAMP, 1993].

III.1. Méthodes de réhabilitation des sols pollués par des hydrocarbures

Comme nous l'avons vu précédemment (chapitre II), les hydrocarbures pétroliers présentent un risque pour la santé humaine et les écosystèmes si leur concentration et leur mobilité sont trop importantes. Pour éviter la diffusion des hydrocarbures des sites contaminés vers les nappes phréatiques, des mesures doivent être prises en considération. Beaucoup de paramètres sont à prendre en compte avant de faire le choix d'une méthode de dépollution, tel :

- Le type de polluant et la variabilité de leur comportement (volatilité...);
- diversité des conditions locales (nature du sol, de la nappe, zone urbaine...);
- pollution récente ou ancienne, étendue ou non ;
- les exigences économiques et administratives.

Tout ceci nécessite un diagnostic préalable. En fonction de ces différents aspects, trois (03) grandes catégories d'actions peuvent être menées :

➤ 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.

➤ Les méthodes ex-situ

Ces méthodes consistent à l'excavation des sols contaminés, on parlera de méthodes « hors site » si le sol évacué vers un centre de traitement spécialisé, ou des méthodes « sur site » si le sol excavé est déposé sur le site pour être ultérieurement traité.

➤ Le confinement

Ce traitement consiste à mettre en place autour des matériaux pollués des barrières physiques pour empêcher le transfert du polluant.

La dépollution des sols contaminés peut être mise en œuvre à travers les techniques suivantes:

- Les techniques chimiques;
- les techniques physiques;
- les techniques thermiques;

- les techniques biologiques.

III.1.1. Techniques chimiques

Elles ont pour but de détruire les polluants ou les transformer en formes moins nocives, en provoquant les réactions chimiques entre le polluant et le réactif ajouté. Elles peuvent être applicables in-situ ou après excavation des sols. La majorité des procédés exigent que les sols soient sous forme de boues ou que les contaminations soient mobilisées dans un milieu liquide. Cette technique comporte plusieurs méthodes qui sont :

III.1.1.1. Les méthodes de mobilisation et d'extraction

Les applications in-situ se font par aspiration du sol contaminé par une solution chimiquement réactive, qui va s'infiltrer dans le sol et mobiliser le polluant. La solution chargée de polluants est ramenée en surface par pompage dans les puits et purifiée.

III.1.1.2. Les méthodes par réactions chimiques

Ces méthodes sont surtout utilisées pour des produits organiques, peu volatiles et qui ne sont pas biodégradables (solvants chlorés). Elles permettent de transformer les polluants en des composés moins toxiques et de mobilités différentes. Elles peuvent être réalisées par des réactions d'oxydation et de réduction [BOUNIF D et MEKBEL O, 2005].

III.1.1.3. Les méthodes de lavage des sols

L'opération consiste à injecter de l'eau directement dans le milieu contaminé, en amont de la pollution et à la pomper en aval, chargée de polluants.

III.1.2. Techniques physiques

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

Cette technique comporte deux (02) grands types : Celle par évacuation et celle par piégeage. À leur tour ces types comportent différentes méthodes.

III.1.2.1. Les procédés physiques par piégeage

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

- Le confinement qui consiste à isoler la source de pollution à l'aide de matériaux qui sont utilisés en couverture ou en parois verticales et horizontales ;
- La solidification et la stabilisation qui s'appliquent principalement sur des sols excavés ;
- Les polluants sont piégés dans une matrice, formant ainsi un matériau peu perméable et non réactif.

III.1.2.2. Les procédés physiques par évacuation

Ces procédés s'effectuent par différentes méthodes qui sont :

- **L'excavation** : Cette méthode consiste à extraire les terres polluées, les envoyer vers un centre de traitement spécialisé ou vers un centre d'enfouissement technique. Mais cette méthode présente un risque d'étendre la pollution ;
- **Le pompage** : Cette méthode peut être longue et pendant le traitement de l'eau, la nappe peut être alimentée en polluants par l'intermédiaire du sol. L'efficacité du pompage dépend des caractéristiques du milieu et du comportement du polluant. Cette méthode est surtout utilisée pour les phases de contamination liquides et organiques à la surface de la nappe phréatique ;
- **Le « venting »** : Cette méthode consiste à aspirer les polluants contenus dans un sol non saturé en envoyant dans le sol un flux d'air par l'intermédiaire d'une série de forage localisée en bordures de la zone à traiter, et à pomper au sein de la zone contaminée l'air chargé de gaz polluants. En sortie, les gaz polluants sont traités à leur tour avant leur rejet dans l'atmosphère.

III.1.3. Techniques thermiques

Ce traitement se fait soit par incinération avec valorisation énergétique soit par vitrification.

III.1.3.1. L'incinération

C'est une technique très ancienne, elle consiste à utiliser la haute température pour détruire les produits polluants qui sont convertis en gaz carboniques et en vapeur d'eau.

L'incinération se déroule en deux (02) étapes : La volatilisation, qui se fait dans un four rotatif à 400°C et la destruction à plus de 1000°C. [GABET S. 2004].

III.1.3.2. La vitrification

Consiste à transformer par élévation de la température, un sol contaminé en un matériau inerte. C'est une méthode thermique in-situ. Les températures nécessaires sont de l'ordre de 2000°C. [GABET S., 2004].

III.1.4. Techniques biologiques

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action des microorganismes (bactéries, champignons,...). Ces méthodes peuvent être utilisées seules 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 les polluants (hydrocarbures pétroliers) qui seront utilisés comme source de Carbone.

La décontamination se fait in-situ en introduisant dans le sol les éléments nutritifs nécessaires au développement de la biomasse ou bien en ex-situ en traitant le sol excavé.

Cette technique peut être réalisée par plusieurs procédés tel que les bio-pilles, bioréacteurs, champignons et bactéries.

III.1.4.1. La biodégradation

III.1.4.1.1. Définition

La biodégradation est l'élément clé du devenir des polluants organiques dans les sols et aquifères. Seule la biodégradation peut, dans ces milieux, assurer l'élimination complète par minéralisation du polluant. Donc, elle constitue un processus essentiel de l'épuration d'un milieu pollué dont la maîtrise exige des connaissances approfondies du métabolisme et de l'écologie des systèmes considérés [FAYOLLE, VANDECASTEELE et col, 2001].

Les hydrocarbures constituent une source de carbone et d'énergie pour les microorganismes rependus dans l'environnement marin (bactérie, moisissures, champignons et levures) responsables de la transformation des hydrocarbures en produits oxydés [BARTHA, ATLAS, 1987] et [LEAHY, COLWELL, 1990]. Par exemple, l'espèce *Pseudomonas putida* souche HS12 qui dégrade les Nitrochloro Benzène [PARK, 1999].

La conception, largement répondue récemment, montre que les produits pétroliers sont entièrement biodégradables et que les bactéries édaphiques sont, en premier, responsables de leur dégradation car elles peuvent utiliser ces hydrocarbures comme source de Carbone. Mais certains champignons peuvent en faire autant.

Les expériences variées conduites au laboratoire avec différents types de Pétrole aboutissent à des résultats difficilement applicables à l'environnement naturel. On admet aujourd'hui que presque tous les constituants du Pétrole sont biodégradables, mais que la vitesse de dégradation est très variable et peu connue dans les conditions naturelles.

La biodégradation consiste à transformer les hydrocarbures en Dioxyde de Carbone (CO₂), en Eau, en Ions, Nitrates, Phosphates ou en Sulfates. [DESTRIEUX et coll ; 1994].

Les polluants organiques peuvent être traités par des méthodes biologiques, c'est-à-dire que sont les microorganismes qui vont dégrader les éléments nocifs ; ceci rend le processus de dégradation plus adapté à l'environnement, puisque les polluants ne sont pas transformés mais détruits.

La science a montré que la plus part des composés carbonés et même quelques molécules minérales peuvent être dégradées par l'action des microorganismes. Ces méthodes peuvent être utilisées pour la décontamination des sols [TRANCHMONTAGNE J, 1999].

La biodégradation des hydrocarbures est une oxydation biochimique opérée par des microorganismes. Elle met en jeu des processus d'oxydation qui aboutissent à la formation des hydrocarbures de poids moléculaire plus faible, appelé « bioconversion ». Elle contribue aussi à la formation de gaz carbonique, d'eau, de sels minéraux et de biomasses lorsque la réaction est complète [PELMONT, 1985 ; GOYER et al, 1985].

III.1.4.1.2. Les facteurs influencent la biodégradation

La biodégradation a fait l'objet de plusieurs études, et pour la comprendre il faut savoir qu'elle n'est pas seulement dépendante du type et de la structure des composés organiques, mais elle se déroule sous l'influence de plusieurs facteurs. [GATELLIER, 1971 ; LACAZE, 1980 ; SIRVENS et TRAMLER, 1985 ; GOYER et al, 1985].

La biodégradation va être soumise à différents facteurs abiotiques et biologiques qui sont :

➤ **La concentration en microorganismes**

La biodégradation naturelle des hydrocarbures est influencée par de nombreux facteurs.

Le premier de ces facteurs est la faible concentration en microorganismes capables de métaboliser les hydrocarbures, car plus la concentration en microorganismes est importante, plus la biodégradation sera importante.

➤ Les facteurs biotiques

Les réactions chimiques (oxydation, hydro oxydation) de la biodégradation des hydrocarbures catalysés par les enzymes des bactéries dépendent aussi de la souche bactérienne. [GATELLIER, (1971) ; LACAZE, (1980) ; SIRVZNS et TRAMLEF, 1985].

➤ Les facteurs chimiques

- Eléments nutritifs

Les hydrocarbures contiennent du carbone et d'hydrogène avec des petites quantités d'azote et de soufre, mais pas de phosphate. Ces microorganismes doivent trouver ces éléments dans leur environnement pour effectuer les différentes activités métaboliques de la croissance [ROSENBERG, 1993].

- L'oxygène

L'oxygène est un élément essentiel à la dégradation aérobie, et sert d'un facteur limitant dans la biodégradation [GOYER et al. 1995]. L'efficacité des enzymes oxygénases qui provoquent la rupture des hydrocarbures dépend en grande partie de la quantité moléculaire d'oxygène. Donc ce paramètre est proportionnel à la biodégradation [ROSENBERG, 1993, LACAZE, 1980].

La dégradation anaérobie des hydrocarbures est par ailleurs importante dans le cas des sites contaminés, surtout pour les hydrocarbures suffisamment solubles qui peuvent se diffuser dans les zones anoxiques et aquifères. [FAYOLLE, VANDECASTEELE et col, 2001].

- Le PH

Le PH du sol est très variable, de l'ordre de 2,6 à 11. La plupart des bactéries hétérotrophes et champignons préfèrent un PH proche de la neutralité.

Les PH extrêmes vont donc influencer négativement la capacité des populations microbiennes à dégrader les hydrocarbures [LEAHY et COLWELL 1990].

➤ **Les facteurs physiques**

- La température

La température varie sur une très large gamme suivant les conditions climatiques et géographiques, on sait que l'activité biologique des microorganismes est très sensible aux variations de la température [SIRVENS et TRAMLER, 1995].

Elle agit sur :

- l'état physiologique et la composition chimique du pétrole ;
- La vitesse de la biodégradation ;
- La composition de la communauté microbienne.

En général, on peut situer la température optimale de dégradation biologique aux alentours de 27°C. Encore une fois, cette température peut varier en fonction des hydrocarbures. [GOYER et al, 1995].

- L'humidité (humidité du sol)

La présence d'eau dans le sol est essentielle à la biodégradation puisqu'elle permet aux microorganismes de se mouvoir à travers la macro agrégat des sols et d'activer les processus métaboliques de ceux-ci. L'eau permet également aux hydrocarbures aromatiques polycycliques de se solubiliser relativement, leur permettant de passer de la phase liquide de sol pour ainsi devenir accessible aux microorganismes

III.1.4.1.3. Mécanismes de la biodégradation

La biodégradation est un processus qui se fait par étapes, impliquant différents microorganismes qui agissent en concert ou en succession pour provoquer la biodégradation des substances organiques [PHILIP, 1995].

La biodégradation aérobie des hydrocarbures pétroliers constitue la voie principale de détoxification et d'élimination des substances organiques.

Le mécanisme biochimique de la biodégradation des hydrocarbures dépend de la nature et la quantité du substrat, du type de microorganismes et de l'environnement extérieur. L'oxygène joue un rôle principal durant tout ce processus.

Deux (02) cas peuvent se présenter :

- L'hydrocarbure est transformé en un ou plusieurs composés intermédiaires à partir desquels sont élaborés les constitutions de la cellule.
- L'hydrocarbure subit une transformation chimique sans qu'il participe à la croissance du microorganisme [CHAMPAGANT et al, 1974].

Des expériences ont montré que la plus part des bactéries ont une préférence pour les n-alcanes par rapport à d'autres hydrocarbures. Les naphéniques sont moins dégradés, les aromatiques (C_nH_{2n-6}) sont les plus résistants.

III.2. Etude comparative entre les différentes méthodes de traitement des sols contaminés

Avant de procéder au choix de la technique, il faut présenter les avantages et les inconvénients de chaque technique.

Le tableau suivant indique avec une grande précision les limites et les performances de chaque méthode de traitement.

Tableau III.1 : avantages et inconvénients des différentes méthodes de traitement des sols contaminés. [BOUNIF.D et MEKBEL.O ,2005].

Type	Méthode	Avantages	Inconvénients
Thermique	Incinération	Elimination de la pollution.	-Demande un grand apport énergétique. -Les sols traités ne sont plus réutilisables -Coûts onéreux. -Nécessité de traitement de gaz dégagé
	Vitrification	-Rapide. -Faible teneur en polluants résiduels.	Pas de réapparition du tapis végétal. -Coût onéreux.
Physique	Confinement	-Simple, rapide et radicale. -Isolation de la pollution.	-Dégradation du sol
	Stabilisation	-Radicale -Pas de risque de migration de la pollution	-Dispersion possible des polluants
	Excavation	-Simple, rapide et radicale	-Dispersion possible des polluants
	Pompage	-Très efficace	Dégradation du sol
	Venting	-Efficace pour les hydrocarbures légers(essence) et tous les produits volatils. -Efficace pour les pollutions étendues	-Risque d'étendre la pollution -Problème de transport et de stockage des terres excavées

		pour de grandes profondeurs	
Chimique	Mobilisation et extraction	-Peu chère et facile à mettre en œuvre	-Risque de dispersion de la pollution -Les solutions réactives toxiques peuvent sérieusement dégrader le sol
	Réaction chimique	-Augmentation de dioxygène ce qui favorise une biodégradation	-Ne sont pas spécifique
	Lavage	-Rendement de 80% -Cout acceptable	-Risques d'étendre la pollution
Biologique	Biopiles	-Contrôle des émissions vers l'atmosphère -Rendement très intéressant	-Processus très lents
	Champignons	Efficace	Stade expérimental
	Landfarming	-technique légère -Cout attractif -Assez efficace	-Processus lents -Mobilisation de grandes superficies de terre -Terre en surface

A partir du tableau nous pouvons conclure que :

- Les méthodes thermiques sont des techniques à écarter puisqu'elles engendrent une autre forme de pollution (pollution atmosphérique par dégagement de gaz toxiques).

Elles ne permettent pas une réutilisation des sols qui seront complètement détruits et les couts de ces méthodes sont très onéreux.

- Les méthodes physiques et chimiques sont beaucoup plus recommandées du fait de leur efficacité et leur fiabilité, mais la mise en place de ces méthodes fait appel à des installations complexes.
- Les méthodes biologiques ont le mérite d'être des technologies propres qui permettent une dégradation de polluants sans risque majeur d'engendrer une autre pollution. Leur aspect très économique les rend très à la mode d'autant plus que des rendements très intéressants ont été obtenus à des couts attractifs en plus de leur application facile.

IV.1. Présentation du site



Figures IV.1 : présentation de site de prélèvement

SONATRACH (Société Nationale de Transport et de Commercialisation des Hydrocarbures) par l'activité TRC gère un réseau de canalisation d'une longueur totale d'environ 16000 km, intégrant trois gazoducs transcontinentaux, l'un vers l'Espagne via le Maroc, les deux autres vers l'Italie via la Sicile. L'activité TRC est chargée d'acheminer le pétrole brut, le gaz et le condensat vers les ports pétroliers, les zones de stockage du groupe et les pays d'exportation.

IV.1.1. Présentation du Terminal Marin de Bejaia

Le terminal marin de Bejaia s'étend sur une superficie de 55 hectares. Il est limité au nord par une voie ferrée, au sud par Oued Soummam, à l'est par le Golf de Bejaia et à l'ouest par la route nationale n°9.

Le terminal marin de Bejaia se compose de deux parcs de stockage :

➤ Le Terminal Marin Nord (TMN), qui dispose de :

12 bacs à toit flottant, d'une capacité de 35000 m³, d'un volume utile de 27500 m³ et un stock mort de 5000 m³ chacun, de diamètre de 56 m, de hauteur de 14,4 m. ils servent pour le stockage des deux produits brut et condensat.

01 bac de purge à toit fixe 4Y1, d'une capacité de 2900 m³ dédiée pour recevoir les résidus de la gare racleur arrivée. Il sert également à récupérer les purges des collecteurs et des manifolds.

➤ Le Terminal Marin Sud (TMS), qui dispose de :

04 bacs à toit flottant, d'une capacité de 50000 m³, d'un volume utile de 41000 m³ et un stock de 5000 m³ chacun, de diamètre de 56 m, de 14,650 m de hauteur. Ils servent pour le stockage de deux produits brut et condensat.

Le terminal marin est entièrement inscrit dans la zone industrielle de Bejaia. Les coordonnées géographiques de cette dernière sont :

- Latitude = 36° 45' 25'' Nord.
- Longitude = 05° 05' 50'' Est.

IV.1.2. Les données climatiques

La région de Bejaia est caractérisée par un climat méditerranéen avec des hivers humides et doux et des étés chauds.

De plus, la position géographique de Bejaia exerce une influence importante sur son climat. En effet, sa position en altitude, ainsi que sa situation par rapport à la mer sont à l'origine d'importantes variations du climat.

Dans cette région, considérée comme l'une des plus arrosées d'Algérie, la saison des pluies s'étale de novembre à avril.

IV.1.2.1. Le vent

D'après la répartition fréquentielle des vents et les roses des vents correspondantes, mensuelles (tableau ci-dessous) et annuelles, on constate que les vents les plus fréquents ont une direction dominante Nord-Est (NE) durant la période estivale (de juin à août) et une direction dominante Sud-Ouest (SO) pendant les autres périodes de l'année.

De plus, les vents de la région ont une vitesse supérieure à la moyenne annuelle entre les mois d'octobre et février.

Tableau IV.1: vitesse moyenne et direction du vent.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Vitesse moyenne (m/s)	4,7	4,3	3,9	3,5	3,6	3,4	3,6
Direction	SO	SO	SO	SO	SO	NE	NE

Mois	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne
Vitesse moyenne (m/s)	3,4	3,5	4,1	4,5	4,9	4,0
Direction	NE	SO	SO	SO	SO	SO

IV.1.2.2. Les précipitations

La frange côtière de Bejaia bénéficie des influences maritimes. C'est ainsi que son climat est doux et que cette partie de la région est bien mieux arrosée que tout le reste du territoire.

En effet, la région de Bejaia est l'une des plus pluvieuses d'Algérie, avec une pluviométrie moyenne de 900 mm/an. La répartition des pluies dans le cycle annuel est très inégale. Le maximum des pluies est atteint entre novembre et mars et culmine à plus de 160 mm entre janvier et février. Le minimum annuel est relevé entre mai et août avec une hauteur de pluie inférieure à 6mm en moyenne.

IV.1.2.3. Les températures :

La zone littorale au nord jouit d'un climat méditerranéen avec des hivers doux et une longue période estivale chaude, tempérée par des brises de mer. Les températures mensuelles moyennes sont présentées dans le tableau suivant.

Les températures varient entre 11 et 24°C. Le mois de janvier est généralement le plus froid et le mois d'août est le plus chaud.

Tableau IV.2: températures moyennes.

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Moyenne mensuelle (°C)	11,3	11,6	12,5	14,3	17,3	20,7	23,8

Mois	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne annuelle
Moyenne mensuelle (°C)	24,5	21,6	18,7	14,8	11,8	16,9

IV.1.3. Rôle du département HSE (Hygiène Sécurité Environnement)

- Application de la politique HSE du groupe en s'assurant de son application sur chaque site et formuler les axes et politiques spécifiques à l'activité en matière ;
- Participer aux opérations d'audits opérationnels pour l'amélioration des techniques de l'exploitation des installations des transports, de maintenance et de sécurité par références aux standards de l'industrie pétrolière ;
- Protéger et sauvegarder le patrimoine humain et matériels par des programmes de prévention, de suivi sanitaire et en cas d'incendie en dirigeant l'intervention, les opérations de dépollution et de bonification ;
- Contrôler le suivi des obligations et recommandations en matière de santé, sécurité et environnement ;
- Etudier et évaluer la compatibilité des nouveaux projets en vue d'assurer que l'engineering de sécurité et de protection de l'environnement soient conforme ;

- Rechercher, étudier et diffuser les textes réglementaires se rapportant à la santé, sécurité et à la protection de l'environnement.

IV.1.4. Rôle du service environnement :

- Appliquer la politique du groupe SONATRACH en matière HSE ;
- Appliquer le management HSE ;
- Application et respect de la réglementation et des normes environnementales ;
- Appliquer les procédures environnementales ;
- Réaliser l'inspection au niveau des stations ;
- Mise en œuvre des plans d'action environnementaux ;
- Suivi des études : études d'impact et les audits environnementaux ;
- Assurer le reporting journalier d'accidents et d'incidents ;
- Gestion des crises (déversement et fuites accidentelles) ;
- Suivi du plan des déchets liquides et solides.

IV.2. Origine et prélèvement des échantillons

IV.2.1. Origine

Notre échantillonnage a été effectué au niveau de la commune de Bejaia. Nous avons prélevé 8 échantillons au niveau du site pollué par le pétrole brut suite à une fuite sur la canalisation d'oléoduc qui est due aux agents corrosifs

IV.2.2. Matériels de prélèvement

Afin de réaliser notre échantillonnage, nous avons utilisé un matériel constitué d'une pioche, d'une pelle, de sacs en plastiques et des étiquettes pour numéroter les échantillons.

IV.2.3. Technique d'échantillonnage

➤ But et principe de l'échantillon

Les essais effectués au laboratoire portant nécessairement sur de petites quantités de sol, celles-ci devant permettre de mesurer des paramètres de l'ensemble de matériaux dans lequel nous avons fait le prélèvement. Il faut que l'échantillon utilisé au laboratoire soit représentatif de l'ensemble [DUPAIN R, et al, 1995]

-Prélèvement sur terrain d'une quantité notamment grande que celle qui sera utilisée pour les essais proprement dits.

-Au laboratoire, une autre quantité sera prélevée et il faut qu'elle soit également représentative de l'échantillon de départ

➤ Méthode de l'échantillon

L'échantillonnage a été réalisé sur une profondeur de 10cm en surface.

IV.3. Etude des conditions du milieu

IV.3.1. La température

La zone littorale au nord jouit d'un climat méditerranéen avec des hivers doux et une longue période estivale chaude, tempérée par des brises de mer. Les températures mensuelles moyennes de l'année 2010 sont présentées dans le tableau suivant :

Les températures varient entre 11 et 24°C. Le mois de janvier est généralement le plus froid et le mois d'août est le plus chaud.

Tableau IV.3 : Répartition des températures moyennes mensuelles en (°C) durant l'année 2010 dans la région de Bejaia [Département HSE de SONATRACH Bejaia, 2012].

Mois	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Moyenne mensuelle (°C)	11,3	11,6	12,5	14,3	17,3	20,7	23,8

Mois	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Moyenne annuelle
Moyenne mensuelle (°C)	24,5	21,6	18,7	14,8	11,8	16,9

IV.3.2. Les précipitations

La frange côtière de Bejaia bénéficie des influences maritimes. C'est ainsi que son climat est doux et que cette partie de la région est bien mieux arrosée que tout le reste du territoire.

En effet, la région de Bejaia est l'une des plus pluvieuses d'Algérie, avec une pluviométrie moyenne de 900 mm/an. La répartition des pluies dans le cycle annuel est très inégale. Le maximum des pluies est atteint entre novembre et mars et culmine à plus de 160 mm entre janvier et février. Le minimum annuel est relevé entre mai et août avec une hauteur de pluie inférieure à 6mm en moyenne.

IV.4. Etudes expérimentales

IV.4.1. L'humidité du sol

L'humidité et la capacité de retentions du sol sont des données fondamentales pour étudier et caractériser le régime hydrique du sol. Cette donnée est utilisée comme la bonne compréhension des phénomènes hydrologiques, mécaniques et chimiques du sol et de son influence sur le développement et la croissance des plantes ainsi que la microflore.

-Principe de la détermination de l'humidité du sol

Afin de déterminer l'humidité du sol nous avons pesé une quantité donnée de terre avant et après passage à l'étuve à 105° C. Le séchage à l'étuve doit être suffisamment long pour que le poids du sol ne varie plus avec le temps. La perte du poids subie par le sol représente le poids d'eau évaporée pendant le séchage. Cette méthode de mesure est la plus directe et la plus précise.

-Mode opératoire

- Prélever 0.5g de sol et la placer le dans un creuset. Peser le tout, c'est le «poids humide» (m_0).
- Porter le creuset à l'étuve à 105°C pendant 24h. Retirer le creuset et le laisser refroidir dans un dessiccateur puis le peser à nouveau. C'est « le poids sec» (m_1).

-Calcul

$$H\% = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \cdot 100$$

IV.4.2. La matière organique**-Principe de la détermination de la matière organique (MO)**

Après élimination de l'humidité du sol, la détermination de la MO se fait par la perte au feu dans un four à 520°C pendant une heure (1h). Le poids perdu représente le poids de la matière organique existant dans ce sol.

-Mode opératoire

- Prélever 0.5g de sol et le placer dans un creuset, porter le creuset à l'étuve à 105°C pendant 24h. Retirer le creuset et le laisser refroidir dans un dessiccateur puis le peser. C'est « le poids P1 ».
- Porter le creuset au four à 520°C pendant 1h, retirer le creuset et le laisser refroidir dans un dessiccateur puis le peser à nouveau. C'est « le poids P2 ».

-Calcul

$$PEF = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \cdot 100$$

IV.4.3. Le pH

-But

Le pH est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration d'une solution en ion H^+ .

$$pH = \text{Log}_{10} (1 / H^+).$$

Le pH est un facteur qui influence la croissance des microorganismes du sol. Les pH extrêmes vont influencer négativement la capacité des populations microbiennes à dégrader les hydrocarbures. Donc nous devant déterminer le pH du sol afin de savoir s'il est favorable pour l'action de la microflore du sol sur les hydrocarbures.

Le pH varie de 0 et 14 ; suivant qu'il est supérieur ou inférieur à 7 ; la solution est acide ou basique.

➤ L'acidité actuelle ou pH eau

Cette acidité exprime la concentration en ions H^+ dissociés présent dans la solution du sol à un instant donné, en équilibre avec les radicaux qui les ont libéré et avec les autres ions dans le milieu.

➤ L'acidité potentielle ou d'échange ou pH (KCL)

L'acidité potentielle correspond à la quantité des ions H^+ échangeables, capables d'être remplacés par certains ions métalliques au fur et à mesure d'une neutralisation.

IV.4.3.1. Détermination de l'acidité actuelle (pH eau)

L'acidité actuelle est exprimée par le pH ou le logarithme de la concentration en ions H^+ à l'état libre dans la solution du sol.

-Mode opératoire

Nous utilisant un pH-mètre à électrode de verre préalablement étalonné à l'aide des solutions tampons de pH connu.

- Peser 1 g de sol séché et le placer dans un bécher de 100 ml ;
- Ajouter 20 à 30 ml d'eau distillée ;

- Agiter énergiquement la suspension pendant 5 minutes à l'aide d'un barreau magnétique ;
- Laisser 10 minutes au repos et agiter à nouveau pendant 5 minutes.
- Mesurer le pH de la suspension ;
- La lecture de pH se fait quand l'aiguille de l'appareil s'est stabilisée et au bout de quelques instants
- Après chaque mesure, rincer l'électrode à l'eau distillée avec un papier absorbant

IV.4.3.2. Détermination de l'acidité d'échange (pH KCL)

Il est possible d'obtenir une évaluation de l'acidité potentielle en ayant recours à l'acidité d'échange en présence d'une solution saline. Les colloïdes du sol vont libérer une partie de leurs ions H^+ en présence de KCL. Il y'aura abaissement du pH. Le pH (KCL) est toujours inférieur au pH eau.



-Mode opératoire

- Ajouter 3.72 g de KCL pur à la suspension aqueuse précédente et agiter pendant une minute pour dissoudre le sel, puis relever à nouveau le pH. Nous allons constater que le pH (KCL) est plus stable que le pH eau.

IV.4.4. Dosage de chrome**IV.4.4.1. Courbe d'étalonnage ;****-Mode opératoire**

- Les réactifs

-Préparation diphénilcarbazine

- 0.1 g Diphénilcarbazine ;
- 80 ml Alcool éthylique à 95° ;
- 170 ml Solution d'acide sulfurique au 1/10.

Cette solution doit être conservée au réfrigérateur et en flacon teinté à l'abri de la lumière.

-Préparation de la solution mère étalon de chrome à 0.1g/L

- 0.0374 mg de chrome de potassium ;
- 100 ml d'eau distillée.

-Préparation de la solution fille étalon de chrome

- 1 ml de la solution étalon mère ;
- 99 ml d'eau distillée.

Nombre d'étalon	1	2	3	4	5	6
Solution étalon de chrome 1mg /ml	0	2.5	5	7.5	10	15
Eau distillée (ml)	25	22.5	20	17.5	15	10
Equivalent en mg/l de Cr⁶⁺	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6
Diphénilcarbazine	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5

-Laisser au repos pendant 10 minutes pour permettre un complet développement de la coloration rouge –violette.

-Effectuer la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 540 nm par rapport au blanc (25 ml eau distillée – 1.5 ml diphénylcarbazide).

Tableau IV.4 : Etablissement de la courbe d'étalonnage du chrome.

N° étalon	1	2	3	4	5	6
Absorbance	0	0.06	0.137	0.206	0.268	0.393
Concentration (mg/L)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6

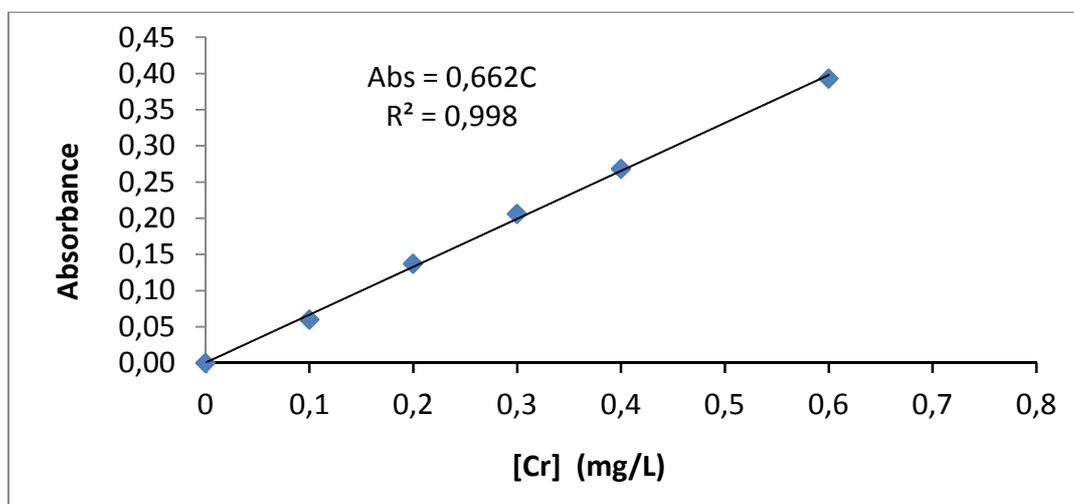


Figure IV.2. La courbe d'étalonnage de chrome.

➤ **Dosage de Chrome de l'échantillon**

-Mode opératoire

• **Préparation de filtrat**

- Etuver 1gde sol à 105°C pendant 16h, retirer le creuset et le laisser refroidir dans un dessiccateur ;
- Broyer le sol dans un mortier en porcelaine ;
- Ajouter 1 ml de HNO₃ et 3 ml de HCL (eau régale),
- Chauffer à ébullition en recouvrant avec un verre de montre pendant 15 minutes ;
- A la fin filtrer et ajouter 50 ml d'eau distillée.

Pour le dosage de l'échantillon :

- Introduire 1 ml du filtrat de chaque matière dans une fiole de 25 ml ;

- Compléter avec de l'eau distillée au trait de jauge ;
- Ajouter 1.5 ml de diphénylcarbazide ;
- Mesurer l'absorbance à 540 nm.

IV.4.5. Détermination de la DCO

-Méthode par dichromate de potassium.

-Principe :

Dans des conditions définies, certaines matières contenues dans l'eau sont oxydées par un excès de dichromate de potassium, en milieu acide et en présence de sulfate d'argent et de sulfate de mercure. L'excès de dichromate de potassium est dosé par le sulfate de fer et d'ammonium.

-Réactifs

- Eau distillée ;
- Sulfate de mercure cristallisé ;
- Solution de sulfate d'argent :
 - 6,6 g de sulfate d'argent cristallisé
 - 1000 ml d'acide sulfurique ;
- Solution de sulfate de fer et d'ammonium à 25 N :
 - 98 g sulfate de fer et d'ammonium ;
 - 20 ml d'acide sulfurique ;
 - 1000 ml d'eau distillée.

Le titre de cette solution doit être vérifié tous les jours :

- Solution de dichromate de potassium à 25 N ;
 - 12,2588 g de dichromate de potassium séché 2h à 110°C ;
 - 1,485 g de phénanthroline ;
 - 0,695 g de sulfate de fer ;
 - 100 ml d'eau distillée.

-Vérification de titre de la solution de sulfate de fer et d'ammonium

Dans un bécher, mettre 25 ml de dichromate de potassium 0,25 N et compléter à 250 ml par l'eau distillée. Ajouter 75 ml d'acide sulfurique, laisser refroidir. Ajouter quelques gouttes de solution de ferrié et déterminer la quantité nécessaire de sulfate de fer et d'ammonium pour obtenir le virage au rouge violacé.

$$T = \frac{K_2Cr_2O_7(ml) \cdot 0.25N}{Fe(NH_4)_2(SO_4)_2(ml)}$$

-Mode opératoire

- Introduire 0,5 ml de filtrat (1g de sol +20 ml de l'eau distillée) et compléter avec l'eau distillée jusqu'à 10 ml dans un tube ;
- Ajouter 5 ml de solution de dichromate de potassium 0,25 N puis 15ml de solution de sulfate d'argent et 1ml de solution de mercure ;
- Porter à ébullition pendant 2 heures et 120°C sous réfrigérant à reflux adapté au tube ;
- Laisser refroidir ;
- Diluer à 70 ml avec de l'eau distillée ;
- Ajouter quelque goutte de solution de ferroïne ;
- Déterminer la quantité nécessaire de la solution de sulfate d'argent et d'ammonium pour obtenir le virage rouge brun.

-Expression des résultats

$$DCO\left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{v_0 - v_1}{V} \cdot 8000 \cdot T$$

V_1 : Volume de la solution de fer et d'ammonium nécessaire au dosage de $K_2Cr_2O_7$ dans l'échantillon en ml ;

V_0 : Volume de la solution de fer et d'ammonium nécessaire au dosage de $K_2Cr_2O_7$ dans l'eau distillée ;

V : Volume de l'échantillon ;

T : Titre de solution de fer et d'ammonium.

IV.4.6. Dosage du plomb par la dithizone (HDZ)**IV.4.6.1. La courbe d'étalonnage****-Dosage de l'échantillon****Mode opératoire**

- Principe
- Réactif

-Tampon ammoniacal $pH = 9.5$ ($pK_a_{NH_4^+/NH_4} = 9.24$)

- Peser 2.675 g de sel de chlorure d'ammonium correspondant à la préparation de 500ml d'une solution 0.1 molaire de NH_4^+ ;
- Transférer cette masse dans une fiole de 500 ml ;
- Ajouter 100 ml d'eau, ensuite 3.4 ml d'ammoniaque concentré à 28 % équivalent à la préparation de 500 ml d'une solution 0.1 M DE NH_3 ;
- Dissoudre complètement le chlorure d'ammonium avant de compléter avec l'eau distillée au trait de jauge ;
- Contrôler le pH de la solution tampon préparée à l'aide d'un pH- mètre, et ramener son pH à 9.5 si c'est nécessaire, avec quelques gouttes d'ammonium concentré.

-Solution diluée ammoniacale à 0.5 %

Préparer 1 litre d'une solution ammoniacale à 0.5% en prélevant 5 ml d'ammoniaque concentré à 28 % dans une fiole de 1 litre, puis on complète avec l'eau distillée au trait de jauge.

-Solution ammoniacale à 14%

Préparer 500 ml d'une solution ammoniacale à 14 % , en prélevant 70 ml d'ammoniaque concentré à 28 % dans une fiole jaugée de 500 ml, ensuite compléter au trait de jauge avec l'eau distillée.

-Solution de dithizone à 20 mg /L

- Préparer 1 litre d'une solution de dithizone à 20 mg /L, en pesant 20 mg de dithizone qu'on transférera dans une fiole jaugée propre de 1 litre ;
- Ajouter 500 ml de solution ammoniacale à 0.5 % ;
- Agiter la solution jusqu'à dissolution complète de la dithizone ;
- Ajouter goutte à goutte la solution ammoniacale à 14 % jusqu'à apparition de la coloration verdâtre ;
- Complète avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge.

-Solution mère de Pb à 100 mg /L

Préparer 100 ml d'une solution contenant 26.11 mg de $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ correspondant à une solution titrée de 100 mg /L de Pb.

-Solution fille (10 mg/L)

Prélever 10 ml de la solution mère à 100 mg /L de Pb dans une fiole de 100 ml, qu'on complètera avec l'eau distillée au trait de jauge.

-Solution étalon de Pb^{2+}

- Préparer 6 fioles de 25 ml ;

- Introduire dans chacune des récipients un volume spécifique de la solution fille à 1 mg/L.

N° d'étalon	1	2	3	4	5	6	7
Solution fille de plomb 1mg/l (ml)	0.125	0.25	0.5	0.75	1	1.25	2.5
Eau distillée (ml)	17.5	17.375	17.25	17	16.75	16.5	16.25
Tampon ammoniacal à PH 9.5 (ml)	2.5						
Dithizone à 20 mg/L (mL)	5						
[Pb ²⁺] (mg/L)	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1

Agiter les solutions pendant 1mn, avant de mesurer les absorbances à 510 nm par rapport au blanc (17.5 ml eau distillée – 2.5 ml tampon ammoniacal – 10 ml dithizone).

Tableau IV.5 : Etablissement de la courbe d'étalonnage du plomb.

N° étalon	1	2	3	4	5	6	7
Absorbance	0	0.008	0.011	0.016	0.024	0.020	0.031
Concentration [Pb ²⁺] (mg/L)	0	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1

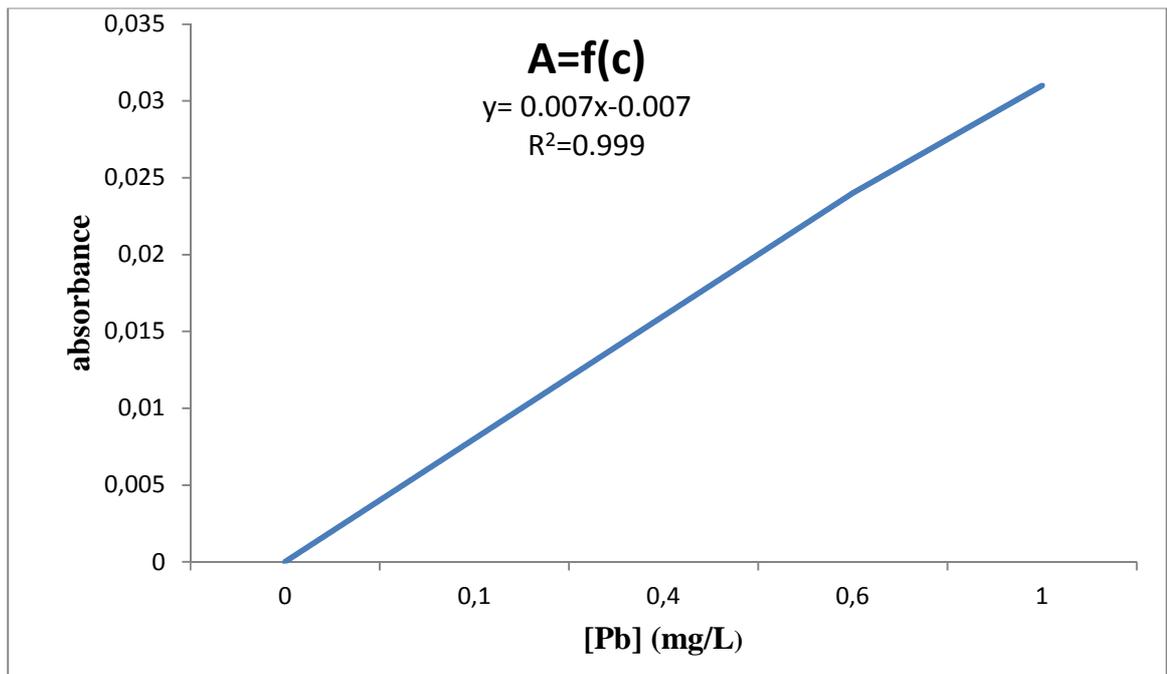


Figure IV.3 : La courbe d'étalonnage de plomb

IV.4.6.2. Dosage du Pb de l'échantillon

- Introduire 1 ml du filtrat de chaque matière dans une fiole de 25 ml puis diluer avec 17.5 ml d'eau distillée ;
- Ajouter 2.5 ml de tampon ammoniacal, ensuite 5 ml de la dithizone à 20 mg /L ;
- Agiter les solutions ;
- Mesurer l'absorbance à 510 nm par rapport au blanc (17.5 eau distillée – 2.5 tampon ammoniacal – 5 ml dithizone).

IV.4.7. Observation microbiologique

-But

Le but de cette étude est de déterminer l'existence ou l'absence de microorganismes dans nos échantillons de sol contaminé.

-Mode opératoire

- En chaque échantillon, on pèse 1g de sol, puis on complète avec 8ml d'eau physiologique dans un tube à essai près d'un bec benzène (pour assurer la stérilité de l'endroit) ;

- On agit bien pendant 1 à 2 minutes, on laisse sédimenter en suite on prélève 1ml de chacun, on l'ensemence dans des boites de Pétri stériles et on ajoute la GNO liquide jusqu'à recouvrement complet des échantillons ;
- On les incube dans une étuve pendant 48heures à 30°C et on observe à l'œil nu.

V.1. Résultats de l'étude des conditions favorables pour l'applicabilité de la méthode biologique

Afin d'étudier le phénomène de la pollution et la biodégradation des hydrocarbures dans le sol, ainsi que les facteurs influençant ce processus, nous avons effectué un échantillonnage d'un sol contaminé par les hydrocarbures dans le site d'étude. Dans cette partie, nous allons essayer de voir si les conditions du milieu (pH du sol, température, précipitation, humidité, ...etc) sont favorables pour les microorganismes indigènes pour assurer une bonne dégradation des hydrocarbures et si notre sol pollué nécessite des travaux d'amélioration de son état.

-Température

Comme nous l'avons vu auparavant, la température est un paramètre de grande importance qui influe le phénomène de la biodégradation des hydrocarbures. La température varie sur une large gamme suivant les conditions climatiques et édaphiques. Et l'on sait que l'activité biologique des microorganismes est très sensible aux variations de température, car cette dernière agit sur l'état physiologique et la composition chimique du pétrole, ainsi que sur la vitesse de la biodégradation et la composition de la communauté bactérienne.

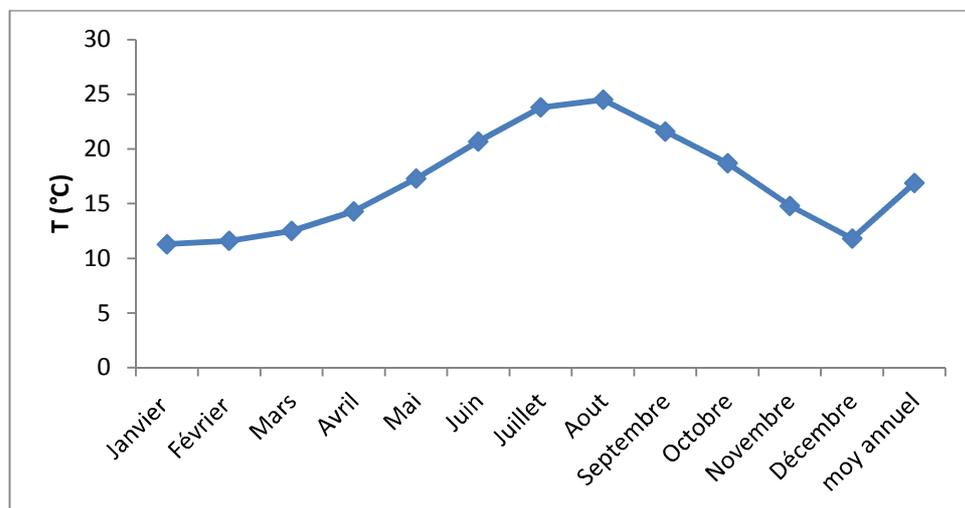


Figure V.1 : Distribution des températures moyennes mensuelles de la région de Bejaia pour l'année 2010.

Dans notre cas, pour la région de Bejaia, à partir du tableau des températures et le graphe de distribution des températures moyennes, nous remarquons que le mois le plus chaud est le

mois d'aout avec une température moyenne 24.5°C, alors que le mois le plus froid est le mois de janvier avec une valeur de 11.3°C.

Nous constatons donc que la température moyenne annuelle est de 16.9°C.

Il faut noter que la température du sol est un peu plus élevée que celle de l'atmosphère à raison que les sols sont caractérisés par la capacité d'emmagasiner la chaleur, surtout ceux riche en humus. De plus les températures élevées (entre 30 et 37°C) favorisent la diversité des communautés microbiennes du sol. En effet il n'existe pas des microorganismes qui dégradent entièrement une sorte d'hydrocarbure. La dégradation complète est effectuée par plusieurs populations. Par exemple, la dégradation par les champignons est toutefois partielle et nécessite l'intervention des bactéries pour une minéralisation complète [LEAHY et COLWELL ,1990].

Donc nous pouvons conclure que les températures enregistrées dans la région de Bejaia sont favorables pour l'application de la méthode biologique pour la dégradation des hydrocarbures.

V.2. Résultats expérimentales

V.2.1. L'humidité du sol

La présence de l'eau dans le sol est essentielle à la biodégradation puisqu'elle permet aux microorganismes de se mouvoir à travers les micros agrégats du sol et d'activer les processus métaboliques de ceux-ci. L'eau permet également aux hydrocarbures aromatiques polycycliques de se solubiliser relativement, leur permettant de passer de la phase liquide du sol pour devenir accessibles aux microorganismes.

D'après les résultats obtenus au laboratoire lors de la mesure de l'humidité réelle du sol prélevé, nous avons retrouvé qu'elle est 0.154%.

Nous pouvons déduire que le taux d'humidité du sol est trop faible, donc ce paramètre n'est pas favorable pour le bon déroulement du processus de la biodégradation.

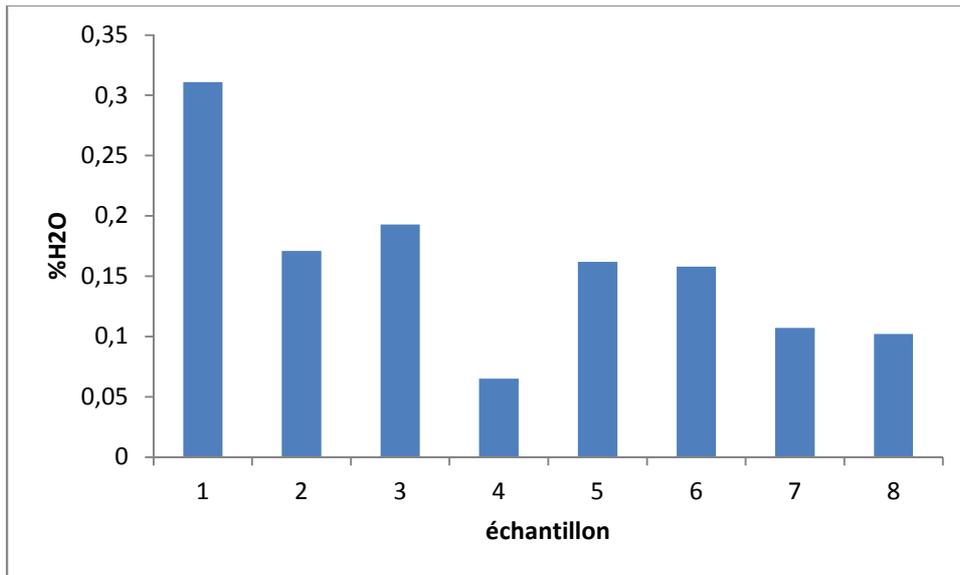


Figure V.2 : Taux d’humidité (H%) des différents échantillons du sol pollués par les hydrocarbures.

V.2.2. Le pH

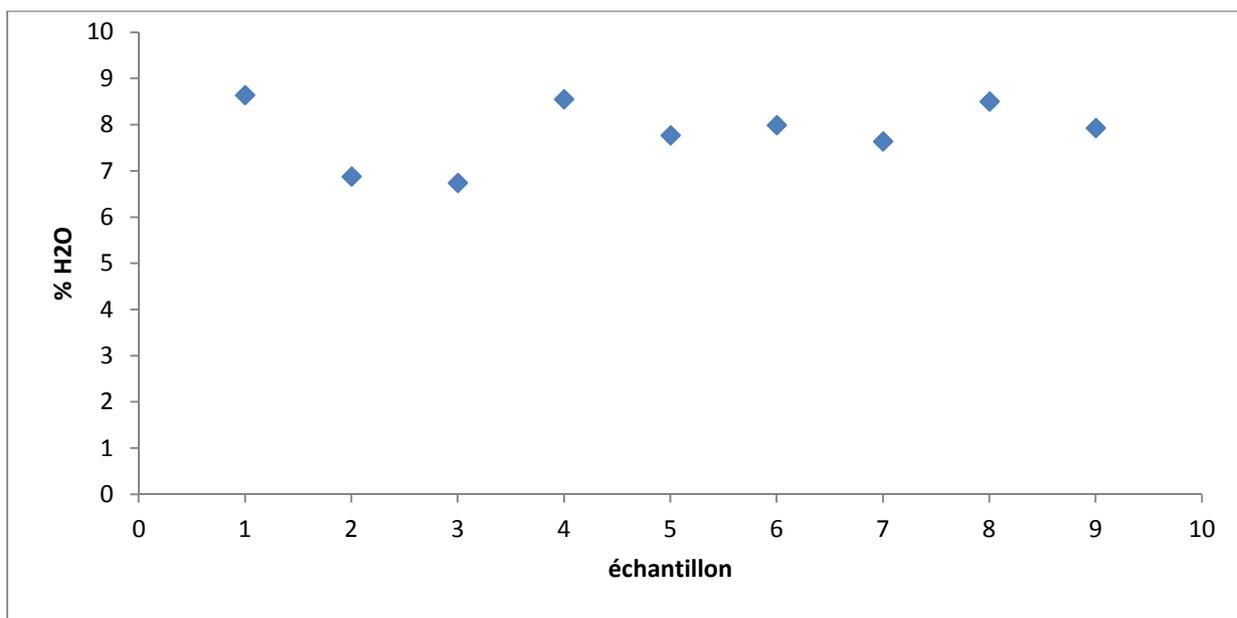


Figure V.3 : tracé de la variation des pH des différents échantillons du sol pollués par des hydrocarbures

Pour assurer une bonne dégradation dans le sol, les bactéries et les champignons préfèrent un pH proche de la neutralité. Les pH extrêmes vont donc influencer négativement la capacité des populations microbiennes à dégrader les hydrocarbures. Or, le pH du sol prélevé est de 7.84. Donc

nous pouvons constater que ce pH est très favorable pour les microorganismes dégradant les hydrocarbures.

Il faut noter également que si le pH du sol est acide, il peut favoriser la solubilisation des métaux lourds qui sont très toxiques pour les bactéries dégradant les hydrocarbures.

V.2.3. La matière organique

La présence de la matière organique dans le sol est essentielle pour le développement et la croissance de la microflore, a son tour peut dégrader les hydrocarbures présent dans le sol. Ces hydrocarbures représentent une source supplémentaire de carbone.

D'après les analyses faites au laboratoire, la moyenne de MO pour tous les échantillons est de 0.135%.

Donc on déduit que le taux de la MO présente dans ce sol est trop faible, donc ce paramètre aussi n'est pas favorable pour le bon déroulement du processus de la biodégradation.

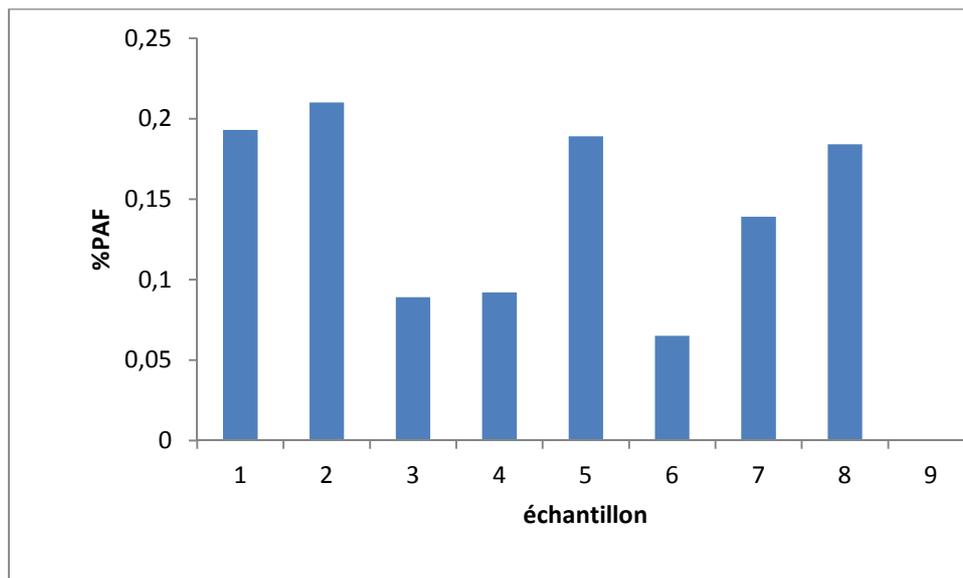


Figure V.4 : La perte au feu des différents échantillons du sol pollués par des hydrocarbures

V.2.4. Le chrome

On a obtenus ces concentration a partir de cette équation ($Abs=0.6628C$) c'est l'équation de la courbe d'étalonnage.

Tableau V.1 : résultats de dosage du chrome des échantillons.

Echantillon n°	1	2	3	4	5	6	7	8	moyenne	norme OMS
Absorbance	0.002	0.009	0.008	0.008	0.009	0.006	0.015	0.012	/	0.005
[Cr] (mg/L)	0.075	0.339	0.302	0.302	0.339	0.226	0.566	0.453	0.325	

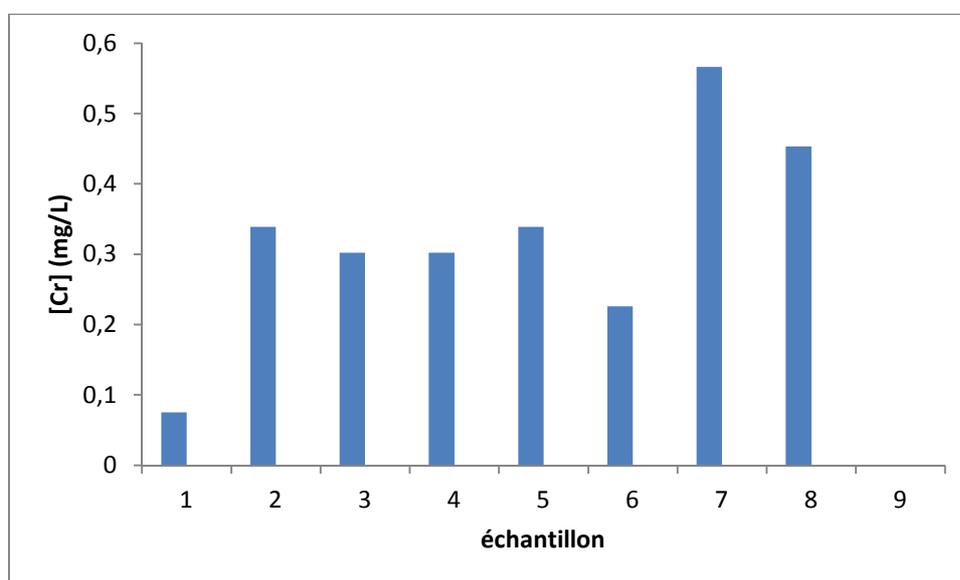


Figure V.5 : résultats de dosage du chrome des échantillons.

D'après la courbe d'étalonnage, on a obtenu des concentrations moyennes selon cette équation : $y=0.662x$ (y est l'absorbance, x est la concentration). On remarque que les concentrations sont très élevées par rapport aux normes de l'OMS.

On remarque aussi que l'échantillon1 est moins pollué avec une concentration qui est de 0.075mg/L, alors que l'échantillon7 avec la valeur de 0.566mg/L, et donc le plus pollué de tous les autres échantillons. La moyenne qui est de 0.325mg/L est largement supérieure aux normes, donc on déduit que notre sol est très pollué par le chrome.

V.2.5. La demande chimique en oxygène

Tableau V.2 : Résultat de la DCO

N° d'échantillon	DCO mgO ₂ /L	DCO mg O ₂ /1g de sol
01	1040	2912
02	1456	4076.4
03	1920	5376
04	2880	8064
05	288	806.4
06	864	2419
07	640	1792
08	2560	7168
Moyenne	1456	4076.7

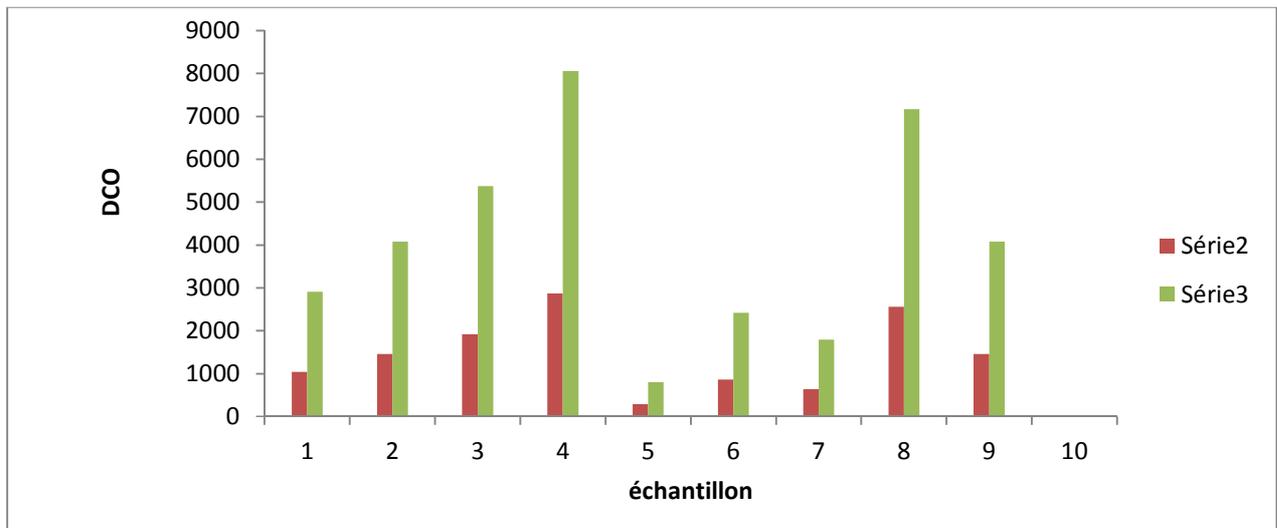


Figure V.6 : Résultats de la DCO en mg de O₂/L et par mg de O₂ /1g de sol.

La DCO est très élevée, elle dépasse largement les normes de l’OMS, cela est du aux eaux de lessivage. De là on déduit que notre sol est très pollués.

V.2.6. Le plomb

Tableau V.3 : résultats du dosage de plomb

N° d'échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	Moyenne	Norme
Absorbance	0.058	0.055	0.036	0.061	0.058	0.048	0.068	0.085	/	50μg/L
Concentration (mg/L)	232.125	221.425	153.55	242.85	232.125	196.425	267.85	328.55	234.362	

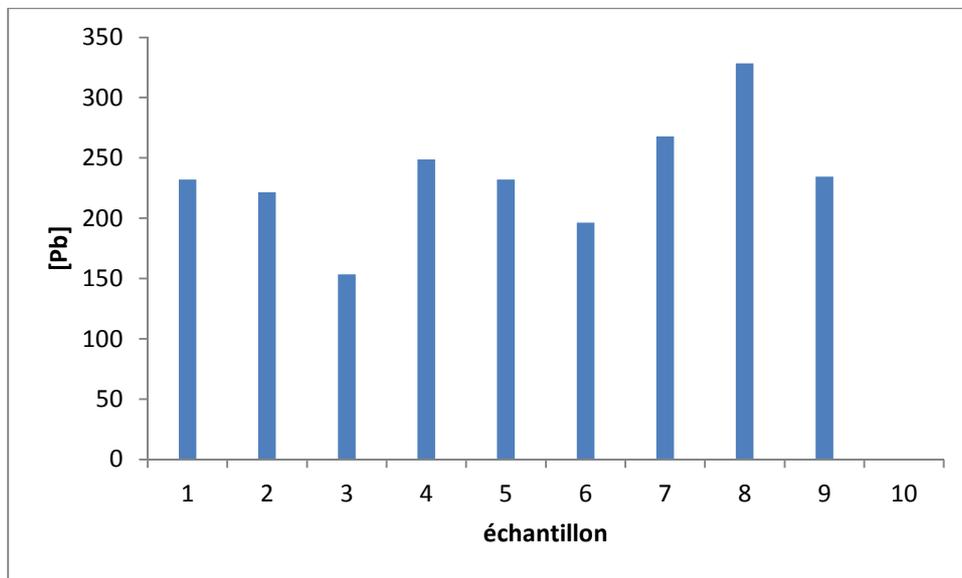


Figure V.7 : résultats du dosage du plomb des échantillons

La présence de plomb à des teneurs plus élevée, qu'il soit solubilisé ou fixé sur les matières en suspension, doit être reliée à une cause externe. Ce métal est en effet si répandu et si utilisé dans l'industrie que les possibilités de pollution sont extrêmement nombreuses et variées. Les activités humaines (emploi de plomb tétraéthyle dans les carburants comme antidétonant remplacé aujourd'hui par d'autres additifs organiques, fusion des minerais, utilisation de combustibles fossiles), le lessivage par les eaux de pluies... entraînant la formation d'aérosols plombifères constituent, actuellement, la principale source de plomb dans l'hydrosphère.

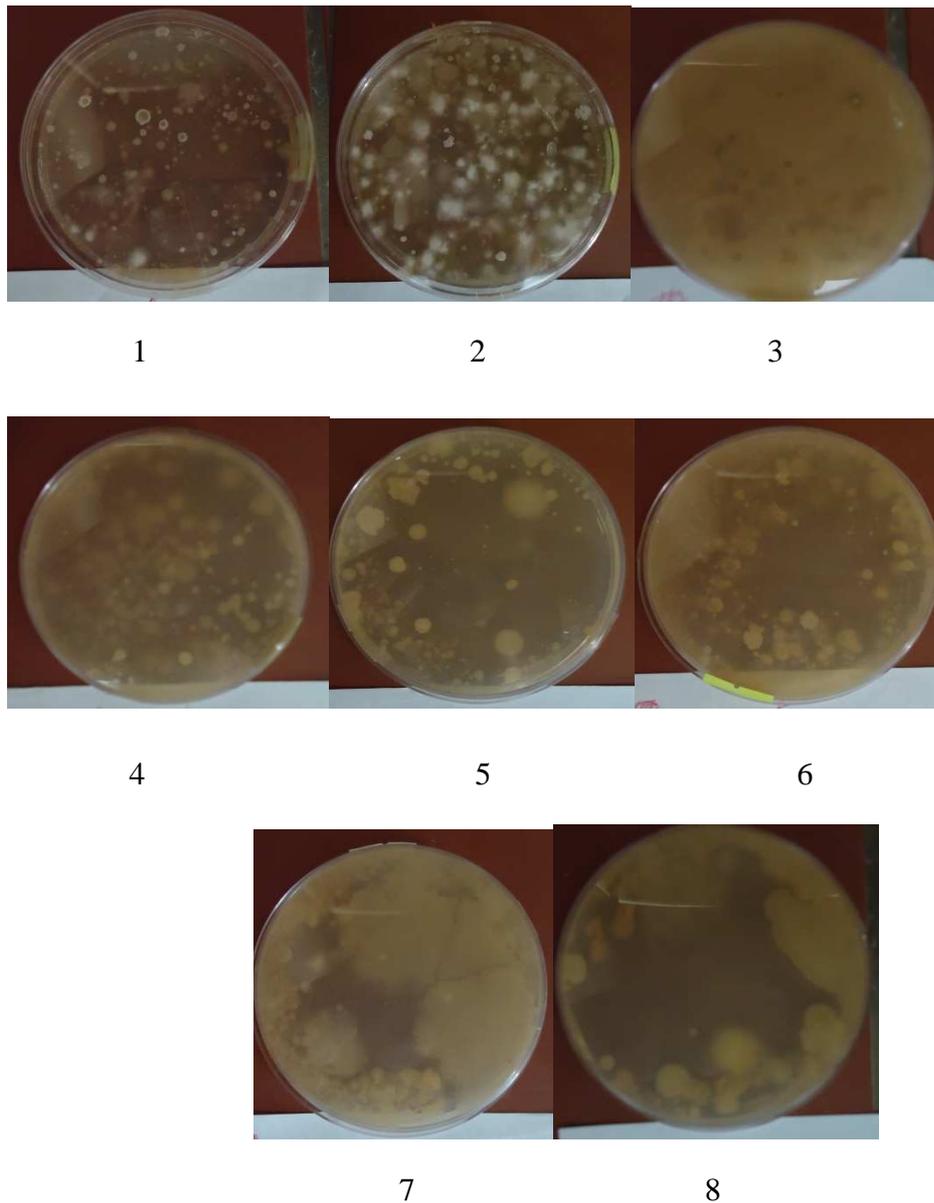


Figure V.8 : résultats de l'analyse microbiologique.

Après ensemencement et incubation pendant deux jours à 30°C, on a obtenu les résultats des figures ci-dessus. On remarque la prédominance des colonies de champignons notamment l'échantillon 3, 7 et 8 qui sont sous forme d'un tapis, en plus la présence de colonies bactériennes.

On constate la présence de microorganismes (bactéries et champignons) dans ces sols pollués qui peuvent utiliser les hydrocarbures comme source nutritionnelle, donc la possibilité d'une dégradation complète et partielle de ces polluants, et la dépollution de ces sols.

Et pour cette raison, l'isolement et l'identification de ces souches par des spécialistes dans le domaine sont nécessaires pour en savoir plus sur leurs conditions favorables et leur métabolisme vis-à-vis de ces polluants.

Conclusion

La pollution des sols et des sous sols par les hydrocarbures résulte des conséquences cumulées de diverses activités humaines. Cette contamination trop négligée jusqu'à une époque récente est préoccupante par ces conséquences environnementales, sanitaires et socioéconomiques.

Les résultats d'analyse des conditions du milieu montre que la température et le pH sont très favorables pour les microorganismes indigènes responsables du processus de biodégradation alors que l'humidité ainsi que la matière organique du sol s'avère être moins favorables.

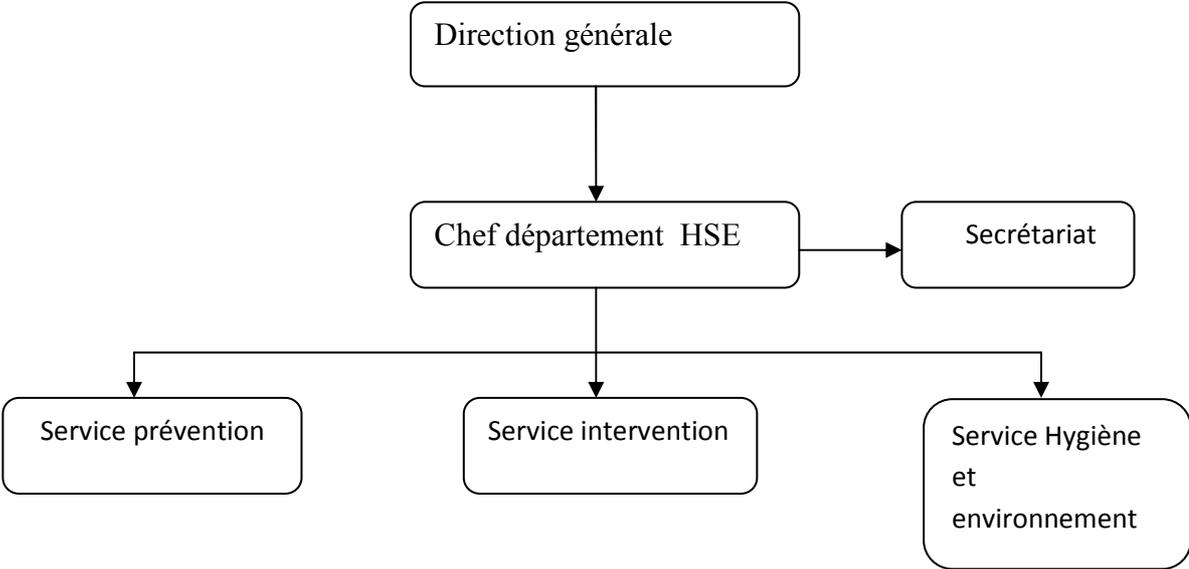
Dans ce cas, nous pouvons ajouter au sol un conservateur d'humidité dont le but d'améliorer son état en matière d'eau malheureusement nous n'avons pas pu déterminer les teneurs du sol en éléments nutritifs, par manque de moyens.

De leurs côtés, les résultats obtenus, après isolement des souches, nous ont permis d'apparenter des colonies des bactéries et des champignons.

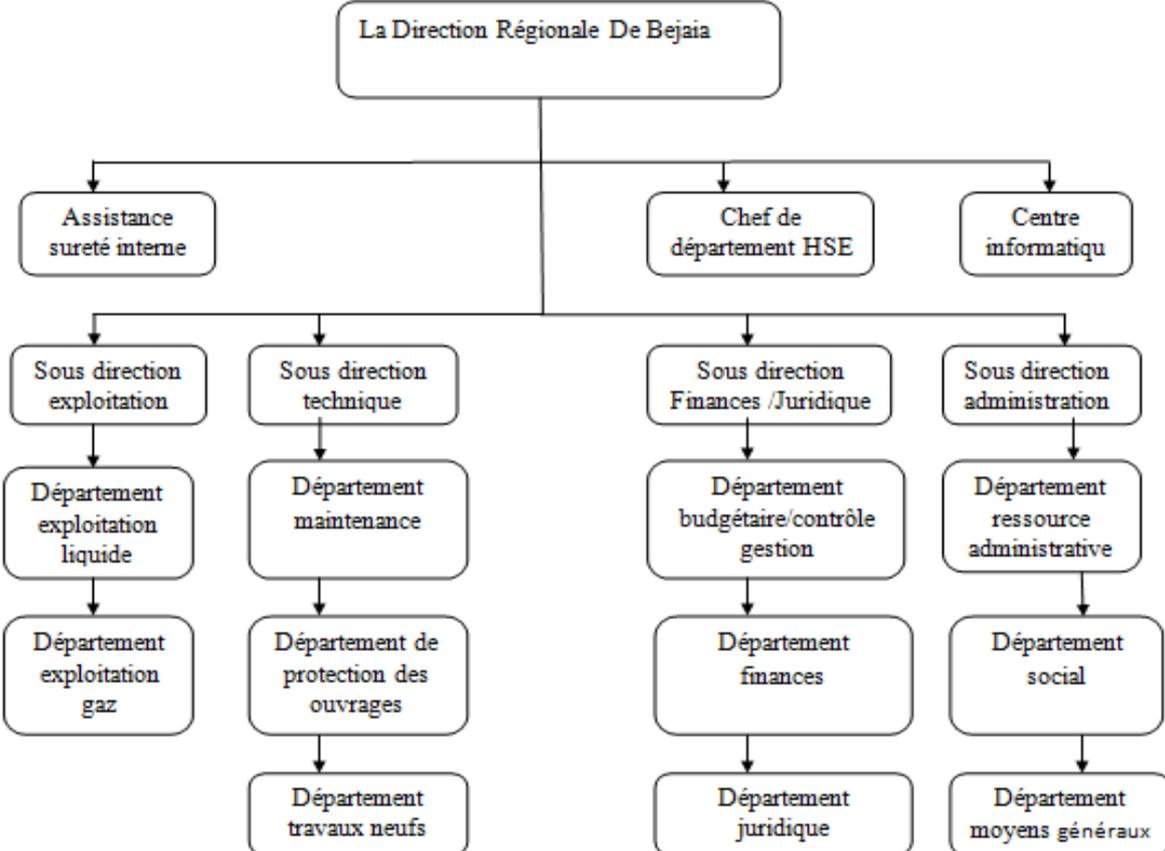
En l'absence des résultats précis sur le phénomène de la biodégradation des hydrocarbures, d'autres essais seront nécessaires pour mettre en évidence ce processus de biodégradation des hydrocarbures, étant donné qu'il s'agit de préoccupations d'actualité à l'échelle de la SONATRACH.

Le traitement biologique est une solution bien fondée et prometteuse qui permettra à la SONATRACH, une réelle prise en charge de la pollution des sols et à des coûts abordables.

Annexe 1 : Organigramme du département HSE



Annexe 2 : Organisation de la Direction Régionale RTC de Bejaia



Annexe 3 : Image satellitaire du terminal marin sud de SONATRACH



Source : Google Earth 2006

Annexe 4 : Appareillage utilisés lors des manipulations



DCO-mètre



*plaque
chauffante*



pH mètre



Etuve



Dessiccateur



Balance

Annexe 5 : Composition du milieu de culture GNO (Gélose Nutritive Ordinaire) en grammes par litre d'eau distillée

Extrait de levure.....	2
Extrait de viande.....	1
Peptone.....	5
NaCl.....	5
Agar.....	15

pH final = 7,4

Références bibliographiques

❖ Ouvrages et mémoires :

- **ANONYME 1 (1987). R.O.C.C** : centre régional méditerranéen de lutte contre la pollution par les hydrocarbures. Guide de lutte contre la pollution par les hydrocarbures en méditerranée UNEP/PNUE.
- **BERNE. F (1991)**. Traitement des eaux. Ed, Masson. Paris. P 14-20.
- **BERQUE JM, MERIENNE. D (1996)**. La pollution des sols par les hydrocarbures. Edition Bull Licrison. P 26.
- **BOUNIF. D, MEKBEL. O (2005)**. La biodégradation des hydrocarbures dans le sol. Thèse d'ingénieur. P 15.
- **FIEVEZ Thierry (1996)**. La biodégradation des matières grasses par les microorganismes. {<http://www.environnement.gov.com>}.
- **GESAMP (IMO /FAO/UNECO/WHO/IAEA/UN/UNEP/Joint group of Experts on the scientific aspects of Marine pollution.**(1993)- Impact of oil and Related chemical. On the marine Environment. GESAMP Repport and studies n° 50. IMO, London. P.180.
- **GOUGAM. H (1990)**. Contribution à l'étude de la pollution des eaux souterraines par les hydrocarbures. Thèse magister USTHB.
- **HARNOIS, LUC.(2001)**. Géochimie des milieux sédimentaires. Edition Coop.uqan, P 123.
- **HENNER. PM, CHIAVON. JL, MOREL. E (1997)**. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAA), occurrence and remediation methods. Ang mag 25, P9-10.
- **KHELLOUT.Settouf.** (2004-2010), Impact de la pollution par le pétrole sur la stabilité structurelle d'un sol.p13.
- **LACAZE .J (1980)** la pollution aux milieux marins p1-18.

- **LALLEMAND (1974).** Information sur le pétrole .Edition Tech. Paris P7-9.
- LAMOTTE. M et BOULIERE. F (1983).** Problème d'écologie volume 4. Edition Masson, P215.
- **LEFEBVRE.G (1986).** Notion de chimie du pétrole, édition Technip, Paris. P 41.
- **LEFEBVRE.G (1987).** Chimie des hydrocarbures, édition Technip, Paris. P 9-60.
- **LEONARD. A (1990).** Les mutagènes de l'environnement et leurs effets biologiques. Edition Masson, P 306.
- **LLOYD. D, DEUEL. JR et GEORGE. H (1994).** Soil remediation for the industry Edition Penn Well, P216.
- **MATTEL. G , G2ORGES (1985).** Biodégradation des hydrocarbures d'origine pétroliers par voie microbiologique, Dossier N°02 Novembre 1995.
- **NORMAD. X et TREIL.A (1985).** L'industrie du raffinage du pétrole. Leçon Sommaires 5^{ème} ed.Techniq.Paris. P363
- **PERES J.M., BELLAN G et col (1676).** La pollution des eaux marines.ed.Ghantier.P231.
- **POSHTHUMA. J.(1977)** Composition of pétrolum.Rapp.PV. Réum.Com.Int.Explor.Mer.171. p7-16.
- PROSKOURIAKOV. & al.(1981)** la chimie du pétrole et du gaz.Mir.Mosco, p13-201.
- **RAMADE. F (1992).** Elément d'écologie appliquée : action de l'homme sur la biosphère, 5^{ème} Ed, Editiscience international, P 577.
- **SOLANO-SERENA. F., MARCHAL. R et VANDECASTEEL. JP (2001).** Biodégradation de l'essence dans l'environnement, Ed tec. Oil gaze sciena and technology – Rev lfp, vol.56 (2001), n°5, P479-498.

❖ Sites internet :

- www.nasr-dz.org (Direction de la Programmation de la Recherche, de l'Evaluation et de la Prospective).
- www.echangetv.levantin.free.fr/Cours.
- www.echangetv.levantin.free.fr/Cours.