

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté des sciences biologiques et sciences agronomiques  
Département de Biologie Animale et Végétale



## Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master en écologie et environnement

Spécialité : Biodiversité et Environnement

### Thème

**Etude bibliographique de l'effet de la pollution du sol par les hydrocarbures sur les propriétés microbiologiques du sol**

**Présenté par :**

M<sup>lle</sup> Djenadi Sihem  
M<sup>lle</sup> Aider Meriem

**Devant le jury composé de :**

M <sup>me</sup> MANSOUR BENAMAR M.	Maître de conférences B (UMMTO)	Présidente
M <sup>me</sup> CHIBANE G.	Maître assistante A (UMMTO)	Promotrice
M <sup>me</sup> SADOUDI ALI AHMED Dj.	Professeur (UMMTO)	Co-promotrice
M <sup>me</sup> SAHMOUNE SIDI MANSOUR F.	Maître assistante A (UMMTO)	Examinatrice

**Présenté le 16/12/2020**

## **Remerciements**

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

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à notre promotrice madame CHIBANE G maitre assistante classe A à l'U.M.M.T.O, pour ses précieuses orientations, son aide, ses conseils

Tous nos remerciements à notre Co-promotrice madame SADOUDI DJ Professeur au département de biologie à L'U.M.M.T.O pour la qualité et son suivi.

Nous tenons à remercier vivement :

Madame MANSOUR BENAMAR M .pour avoir accepté de présider

Le jury, madame SAHMOUN, Pour avoir accepté d'examiner notre travail.

**Sihem et Meriem**

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leurs soutiens moral et matériel, que dieu tout puissant me les gardent

À mon cher frère Fateh et mes deux chers sœurs Yasmine et fériel

À mon binôme et sa famille

À tous mes amis(es)

À toutes la promotion de biodiversité et environnement 2019/2020

**Meriem**

## **Dédicaces**

Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond amour

Á mes parent ma mère ‘Nadia’ et mon père ‘Mhenna’ qui ont toujours cru en moi et qui était présente quand j'en avais besoin, leurs encouragements, leurs patience, et leurs sacrifices juste pour que je consacre tout mon temps rien que pour mes études, que dieu les protèges.

Á mes chers frères ‘Azzedine, Moh Arezki’ que dieu les gardent.

Á mes chères sœurs ‘Lydia, Kahina’ que j'aime plus que les mielleuses sœurs du monde

Á ma chère sœur ‘Lynda’ et son mari ‘moumouh’ que dieu les gardent

Á ma chère nièce Nour et mon cher neveu Mohand Amaziane

Á mon binôme et sa famille

Á tous mes amis(es)

Á toute la promotion de biodiversité et environnement 2019/2020 ; Et à tous ceux qui m'aiment.

**SIHEM**

## Liste des abréviations

**NB : nombre des champignons**

**NC : nombre des bactéries**

**HCP : hydrocarbures pétroliers**

**HC : hydrocarbures**

## Liste des figures

<b>Figure1</b> : Accidents dans les stations-services (Mansot, 1996).....	20
<b>Figure2</b> : Source de contamination du sol dans une station-service (Piedrafita, 2017).....	21
<b>Figure 3</b> : Exemple de composition d'une essence (Marchal et <i>al.</i> , 2003).....	22
<b>Figure 4</b> : Exemple de composition d'une gazole (Marchal et <i>al.</i> , 2003) .....	23
<b>Figure 5</b> : Relations entre la microbiologie du sol et les autres disciplines (Roger, 2001)...	31
<b>Figure6</b> : Nombre de la microflore dans les trois transects A, B et C (Chikhaoui et Hettak, 2019).....	36
<b>Figure7</b> : Nombre de colonies de champignons dans les trois transects A, B et C (Chikhaoui et Hettak, 2019).....	37

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Classes granulométriques du sol (Baize, 2000).....	9
<b>Tableau 2</b> : Composition élémentaires des hydrocarbures pétroliers (Speight, 2014).....	18
<b>Tableau 3</b> : Propriétés physico-chimique des essences (Colombano, 2014).....	22
<b>Tableau 4</b> : Propriétés physico-chimiques des gazoles (Colombano, 2014).....	23
<b>Tableau 5</b> : Exemples des microorganismes dépolluantes (Bouderhem,2011) .....	37

# Sommaire

**Liste des Abréviations**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**.....1

## **Chapitre I**

### **Le sol**

1.	Définition du sol.....	3
2.	Constituants du sol.....	4
	2.1. La phase solide du sol.....	4
	2.2. La phase liquide du sol.....	5
	2.3. La phase gazeuse du sol.....	6
3.	Propriétés du sol .....	6
	3.1. Propriétés chimiques.....	6
	3.2. Propriétés physiques.....	8
	3.3. Propriétés biologiques .....	11

## **Chapitre II**

### **La Pollution du sol par les hydrocarbures**

1.	Définition.....	13
2.	Principaux types de polluants .....	13
	2.1. Polluants minéraux .....	13

2.2. Polluants organiques .....	14
3. Pollution du sol par les hydrocarbures.....	15
3.1. Définition des hydrocarbures .....	15
3.2. Nature et origine .....	15
3.3. Composition et caractéristiques.....	16
4. Principales sources de pollution du sol par les hydrocarbures.....	18
4.1. Sources naturelles .....	18
4.2. Sources anthropiques .....	19
5. Hydrocarbures : carburants d'usage courant.....	21
5.1. Les essences.....	21
5.2 .Les gazoles .....	22
6. Devenir des hydrocarbures dans le sol.....	23
6.1. Volatilisation.....	24
6.2. Solubilisation.....	24
6.3. Adsorption.....	25
6.4. Dégradation.....	25
7. Effets éco toxicologiques des hydrocarbures.....	27
7.1. Effet sur le sol .....	29
7.2. Effet sur la sante de l'homme .....	29
7.3. Effet sur l'environnement	

## **Chapitre III**

### **Microbiologie du sol**

1. Définition de la microbiologie du sol .....	30
2. Relation avec les autres disciplines .....	30

3. Rôle des microorganismes dans la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures .....	31
3.1. Bio remédiation .....	31
3.2. Principe de la bio remédiation.....	32
3.3. Principales méthodes de la bio remédiation.....	32
3.4. Microorganismes utilisés dans la dégradation des hydrocarbures .....	33
4. Quelques résultats obtenus au laboratoire de pathologie des écosystèmes .....	36
4.1. Biomasse bactérienne .....	36
4.2. Champignons.....	38

Conclusion

Références bibliographiques



## **Introduction générale**

Le sol est une ressource naturelle qui supporte la croissance des plantes et assure ainsi la production primaire dont dépend directement la population humaine. C'est un milieu vivant et fragile qui abrite d'intenses échanges et transformations biologiques et physico-chimiques. Il est constitué d'un fond géochimique correspondant à la teneur naturelle en éléments traces trouvée dans les sols. C'est une interface biologique et géochimique déterminante dans le maintien du fonctionnement des écosystèmes (Robert, 1996). Le sol joue un rôle prépondérant dans le déterminisme de la qualité des eaux, de l'air et de la chaîne alimentaire. C'est aussi un milieu de transit, de stockage et de transport de nombreuses substances, quelle que soit leur nature, organique ou inorganique, résultant de processus naturels ou d'activités domestiques.

La civilisation et l'activité de l'homme sont indéniablement les causes principales de la contamination ou la pollution du sol.

La pollution des sols et des sous-sols résulte des conséquences cumulées de diverses activités humaines qui utilisent de manière non raisonnée les multiples fonctions du sol, les pratiques agricoles, les opérations de génie civil, la gestion de déchets, la déforestation et les pollutions accidentelles organiques et chimiques. Cette contamination, trop négligée jusqu'à une époque récente, est préoccupante par ses conséquences environnementales, sanitaires et socio-économiques (Noumeur, 2008).

La pollution du sol par les hydrocarbures (pétrole, essence, gaz, etc.), est très importante. Elle intervient dans 80% des cas de pollution du sol, ce qui met en péril la qualité des sols, les ressources naturelles, la végétation, les micro-organismes et la santé humaine. Elle constitue une menace très sérieuse pour l'environnement ; les émissions d'hydrocarbures dans les divers biotopes terrestres et aquatiques provoquent d'importantes modifications dans les apports aux trois compartiments de la biosphère en comparaison des flux naturels (Ramade, 1992).

Les hydrocarbures sont considérés comme l'une des principales sources d'approvisionnement en énergie à travers le monde. Ils constituent généralement les principaux contaminants à la fois pour les écosystèmes aquatiques que terrestres. La pollution des sols par les hydrocarbures est due, entre autre aux stations-services (fuites des cuves de stockages, points de remplissages, les îlots de pompes, etc.) qui sont une source importante et répandue dans l'espace (Colin, 2000).

L'Algérie est l'un des grands pays producteur de sources énergétiques fossiles (gaz et pétrole). L'exploitation de gisement du pétrole ne cesse d'augmenter d'une année à une autre.

L'extraction, le transport et l'utilisation de cette source d'énergie entraînent des risques de pollution (accidentelle et/ou chronique) de l'environnement pouvant influencer l'équilibre écologique et parfois entraîner la destruction des écosystèmes (Soltani, 2004).

Les microorganismes jouent un rôle primordiale dans la bioremédiation, ils sont très divers dans la nature et composés de bactéries et de champignons. Plusieurs espèces microbiennes sont recensées et qualifiées aptes à dégrader des hydrocarbures tels que *Pseudomonas sp*, *Mycobacterrium sp* et *Rhodococcus sp*. Ces espèces bactériennes sont connues pour la dégradation des hydrocarbures pétroliers (Abdelly, 2007). La plupart d'entre elles sont isolées à partir des sols contaminés.

Le présent travail est un support bibliographique se subdivisant en trois chapitres qui sont :

- Le premier chapitre rapporte les données relatives aux sols (constituant, propriétés).
- Le deuxième chapitre fait référence à la pollution du sol (par les hydrocarbures)
- Le troisième chapitre présente la microbiologie du sol et les résultats du travail de l'année précédente 2018-2019
  
- On termine ce travail par une conclusion générale.

## 1. Définition du sol

Le sol est une unité naturelle, superficielle et souvent meuble résultant de la transformation, la décomposition et l'altération de la roche mère au contact de l'atmosphère et des êtres vivants sous l'action de l'eau et de l'air. Il est issu le plus souvent d'une roche sous-jacente, sous l'influence des processus physiques, chimiques, et biologiques. C'est un milieu biologique différencié en horizons d'épaisseur variable où se développe une activité intense des plantes, des animaux et des bactéries qui, par leurs actions, agissent sur le sol pour un bon équilibre (Deprince, 2003).

En pédologie, le sol est défini comme la partie de la croûte terrestre où la géologie et la biologie se rencontrent. C'est un milieu vivant, sur un support organique et minéral solide. Aussi une ressource naturelle essentielle, utilisée dans plusieurs secteurs d'activité tels que l'industrie, l'agriculture et l'urbanisme. Pour les géologues, le sol est la partie superficielle de la roche mère altérée par les conditions climatiques, biologiques et anthropiques. Pour les agriculteurs, Le sol est simplement un milieu riche qui permet la récolte de nombreux produits végétaux (Benyahia et Mahdaoui, 2011).

Les perceptions les plus récentes définissent le sol comme étant un système interactif, un bioréacteur non renouvelable, variable dans l'espace avec des contours indéfinis. De ce fait, le sol est considéré comme un « complexe bio-organo-minéral structuré » (Gaviglio, 2013).

Les sols sont des médias ouverts et dynamiques, échangeant de la matière et de l'énergie avec l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère, ils doivent accomplir cinq fonctions principales de base :

- offrir un habitat physique, chimique et biologiques pour les organismes vivants ;
- maintenir les activités et la diversité biologique pour subvenir à la croissance des plantes et la productivité des animaux ;
- fournir un support mécanique aux organismes vivants et à leurs structures ;
- réguler les flux d'eau, le stockage et le recyclage des cycles des nutriments et d'autres éléments ;
- filtrer, tamponner, transformer, immobiliser et détoxifier les substances organiques et inorganiques (Sahnoune, 2014).

## 2. Les constituants du sol

La vie du sol est liée aux échanges entre le monde minéral, organique. Le sol est un milieu poreux constitué d'un ensemble de 5 fractions : les minéraux solides, la matière organique, la fraction vivante, la phase gazeuse et la phase liquide (Calvet, 2003).

### 2.1. La phase solide du sol

La phase solide est la phase prépondérante du sol et représente 50 à 70% du volume. Elle est constituée d'un ensemble de particules solides élémentaires (minéraux primaires et secondaires) et de matière organique. On pourrait considérer les organismes vivants du sol comme une partie de la phase solide, puisqu'ils ne sont ni gazeux ni liquides (Calvet, 2003). On distingue deux fractions dans le sol :

#### 2.1.1. Fraction minérale

Les constituants de la fraction minérale du sol sont issus de la dégradation physique (altération mécanique) et chimique de la roche mère. Ils forment ' l'architecture' du sol. Les constituants inorganiques peuvent être décrits de trois manières différentes selon leurs propriétés. En effet, on peut étudier la composition élémentaire (avec la teneur en ces éléments chimiques), la minéralogie du sol (avec la nature et la teneur en minéraux) et la composition granulométrique (avec les proportions et les dimensions des particules) (Quenea, 2004).

Les composés inorganiques sont répertoriés dans trois classes au minimum distinctes, suivant leurs tailles :

- les sables ont une taille entre 2000 et 50 $\mu$ m
- les limons entre 50-2 $\mu$ m
- les argiles sont <2 $\mu$ m

La texture d'un sol correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur, indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux. Les sols sont classés suivant leurs proportions relatives en particules argileuses, limoneuses et sableuses (Atlas et Bartha, 1992).

### 2.1.2. Fraction organique

La fraction organique du sol comprend tous les composés organiques simples ou complexes, isolés ou bien associés entre eux dans des ensembles vivants ou non vivants. Ils constituent l'habitat des organismes photosynthétiques terrestres

D'après Stevenson (1994), ils peuvent être classifiés en quatre catégories :

- les organismes vivants la (biomasse)
- les organismes morts en voie de dégradation
- les composés organiques des chaînes réactionnelles de la minéralisation
- les substances humiques.

Le sol est un habitat généralement favorable à la prolifération des microorganismes, leur nombre est supérieur à celui trouvé dans les eaux douces ou marines. La population microbienne s'élève, en effet à des valeurs comprises entre  $10^6$  et  $10^9$  bactéries par gramme de sol. Leurs abondance et leurs nature dépendent du type de sol, de la végétation, du climat et des diverses actions anthropiques (Atlas et Bartha, 1992).

### 2.2. La phase liquide du sol

La phase liquide du sol, souvent désignée par le terme « solution du sol », occupe une partie plus au moins importante de la porosité du sol. Elle est constituée d'eau où se trouvent diverses substances et minérales dissoutes et des particules en suspension (Quenea, 2004)

La composition de la solution du sol varie selon :

- le climat
- les apports anthropiques (fertilisants, produits de traitement phytosanitaire, etc.)
- l'activité biologique du sol (exsudats racinaires, produits de synthèse et de dégradation microbienne, etc.)

La solution du sol est principalement une solution d'électrolytes, généralement peu concentrée et dont la molarité totale est souvent de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-5}$  mol /L. Elle contient également des ions  $H^+$  et  $OH^-$  dont les concentrations déterminent la réaction du sol caractérisée par le pH (Atlas et Bartha, 1992).

## 2.3. La phase gazeuse du sol

La phase gazeuse du sol est constituée par les mêmes éléments que l'air atmosphérique, mais à cause de l'activité biologique, les teneurs de chaque composant peuvent changer considérablement. Sa composition dépend elle-même de la profondeur et du temps de renouvellement de l'air à l'intérieur du sol (Quenea, 2004).

Dans un sol bien aéré, les gaz qui règnent dans l'atmosphère du sol sont :

- l'azote (78 à 80%)
- l'oxygène (18 à 20%)
- le dioxyde de carbone (0,2 à 3%).

A la surface du sol, essentiellement, l'oxygène et le dioxyde de carbone ont un rôle important. En effet, la concentration en oxygène maintient les conditions d'aérobie ou d'anaérobie du sol impliquées dans les conditions de survie des micro-organismes. L'aération des sols est très importante pour la croissance des racines des végétaux. Le dioxyde de carbone influence l'acidité du sol par sa transformation chimique sous forme de carbonate en réaction avec la phase liquide du sol. La composition de cette phase gazeuse du sol peut contrôler fortement la distribution et l'activité des communautés bactériennes des sols.

L'air du sol contient également d'autres substances telles que NO, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S et parfois des composés organiques volatils (Atlas et Bartha, 1992).

## 3. Propriétés du sol

### 3.1. Propriétés chimiques

#### 3.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH exprime la réaction acide, neutre ou basique d'un corps selon qu'il renferme beaucoup ou peu d'ions H<sup>+</sup> libres en solution. Au niveau du sol, le pH est variable et il influe sur les propriétés du sol. Ces variations sont, cependant, limitées car si, en chimie le pH varie de 0 à 14 (7 étant la neutralité), le pH des sols a pour extrêmes 4.5 à 5 pour les sols plus acides et 8 pour les terres très basiques (Prevost, 2006).

Selon Chauda et Leclé, (1999), le pH est fortement influencé par la roche mère et la composition de la litière joue aussi un rôle en particulier à travers son rapport C/N. Il est exprimé par la relation :  $\text{pH} = -\log (1/ [\text{H}^+])$

### 3.1.2. La matière organique

La matière organique des sols résultant de la biodégradation et de la décomposition chimique des plantes et animaux morts au niveau des sols est appelée humus. Selon Halitim (1988), la matière organique est une substance qui n'a pas une composition chimique bien définie, elle comprend en proportions variables, selon les situations écologiques, les éléments suivants :

- des débris organiques peu ou non décomposés.
- des matières humifères ou en voie d'humification à des stades divers d'évolution en matière agricole, il convient de faire la distinction entre la matière organique fraîche et celle humifiée. C'est cette dernière qui joue un rôle important dans la fertilité des sols par l'évolution biochimique qu'elle y subit et par les propriétés physico-chimiques qui en découlent (Huber et *al.*, 2011)

La matière organique du sol joue trois rôles essentiels :

- énergétique, comme source de carbone
- physique, comme élément majeur de la structure du sol
- nutritionnel, pour l'alimentation des plantes.

Ces trois rôles dépendent des composés organiques, de leur quantité et de leur transformation. En effet, la matière organique améliore la structure et diminue l'érosion du sol, a un effet régulateur sur sa température, permet au sol de stocker davantage d'eau et représente aussi un milieu de culture pour les organismes vivants, contribuant ainsi à améliorer significativement la fertilité du sol. L'absence de la matière organique rend la structure du sol instable.

### 3.1.3. La capacité d'échange cationique

La capacité d'échange cationique (CEC ou T pour capacité totale) d'un sol est la quantité de cations que celui-ci peut retenir sur son complexe adsorbant à un pH donné. C'est une propriété des sols utile et intéressante car elle permet de caractériser le sol du point de vue de la régulation de la composition ionique de la composition du sol comme elle est reliée à des polluants métalliques (Calvet, 2003).

La capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure du pouvoir d'un sol à retenir et échanger des cations. Il s'agit d'un indicateur relatif du potentiel de fertilité d'un sol. Les sols ayant une CEC élevée peuvent retenir davantage de cations et possèdent une plus grande

capacité à les échanger que les sols ayant une faible CEC (Kessel, 2015). Il est pourtant d'un grand intérêt de comparer les sols différents au sujet de la quantité de cations basiques fixes par rapport aux cations acides; c'est une bonne indication de la fertilité minérale mais aussi du degré général d'évolution.

### 3.1.4. La conductivité électrique

C'est l'indice de la teneur en sels solubles dans le sol. Elle exprime approximativement la concentration des solutions ionisables présentes dans l'échantillon c'est à dire son degré de salinité. Cette propriété électrochimique est basée sur le fait que la conductance d'une solution s'accroît au fur et à mesure que les concentrations en cations et anions porteurs de charges électriques augmente (Clément, 2003).

## 3.2. Propriétés physiques

### 3.2.1. Texture

La texture d'un sol est l'ensemble des propriétés qui découlent de la composition granulométrique du sol (teneur en pourcentage de sables grossiers et fins, de limons, d'argile, d'humus et de calcaire). Elle est déterminée par l'analyse granulométrique.

La texture est le diamètre moyen des particules du sol, ou la composition granulométrique. On distingue :

- la texture minérale qui est la proportion des sables, limons et argiles mesuré par l'analyse granulométrique
- la texture organique qui reflète la proportion de fibres et de matériel fin micro agrégé dans les matériaux holorganiques (Halitim, 1988).

L'analyse granulométrique du sol (on dit aussi analyse mécanique) consiste à classer les éléments du sol d'après leur grosseur (tableau 1) et à déterminer le pourcentage de chaque fraction (Soltner, 1988). La texture conditionne directement la structure du sol, et donc la porosité et le régime hydrique. En particulier l'argile influence la formation du complexe argilo-humique, la capacité d'échange, la fertilité et la profondeur d'enracinement.

La texture est une propriété stable, ne variant qu'en fonction de l'évolution à long terme du sol, pour laquelle elle est une bonne indicatrice (Gobat et *al.*, 2010).

**Tableau 1** : Classes granulométrique du sol (Baize, 2000)

Classes	Terre fine					Terre grossière	
	Fraction limoneuse		Fraction sableuse		Fraction argileuse	Graviers	Cailloux
	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	Argile		
Diamètre des particules	<2µm à 20µm	20µm à 200µm	50µm à 2 mm	Particules de mois de 2µm	Particules de mois de 2µm	2mm à 20mm	<20mm

### 3.2.2. Structure

La structure désigne le mode d'assemblage des particules ; elle s'observe et se décrit à deux niveaux : à l'échelle macroscopique observable à l'œil nu et à l'échelle microscopique (microstructure ou micromorphologie). La structure du sol fait référence à la taille, la forme et la disposition des constituants solides (minéraux et organiques) et des constituants gazeux (vides), à la continuité des pores « dont certains sont occupés par de l'eau, d'autres, les plus grossiers, par de l'air. Il est donc clair que la structure du sol peut se décrire à plusieurs échelles (particules minérales, agrégats, parcelle) ( Duchaufour, 2001). Elle est influencée par les processus hydriques, tel que la rétention de l'eau, l'infiltration et le transfert préférentiel et dépend donc de l'échelle considérée.

Le complexe argilo-humique joue un rôle structural. Ce rôle est plus ou moins important selon les teneurs en eau du sol et varie en fonction du type et la teneur en argile. La matière organique augmente la stabilité des agrégats. Une mauvaise structure peut donc empêcher l'écoulement des eaux dans le sol et les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère (Calvet, 2003). Une bonne structure va assurer une grande facilité de circulation d'eau donc laisse s'écouler l'excès, assure une bonne aération, germination, pénétration profonde des racines et une bonne exploration par les racines des ressources nutritives du sol.

### 3.2.3. Porosité

La porosité désigne la fraction du volume total du sol occupé par des vides (eau +air) dans le sol tels que : la circulation de l'eau et de l'air, le transport de solutés et la croissance et

le développement des racines. Elle se caractérise par la distribution de la taille des pores suivant leur forme et leur connectivité. La porosité est exprimée par le rapport entre le volume des vides et le volume total du sol. C'est donc une grandeur adimensionnelle dont les valeurs varient typiquement entre 0.3 et 0.7. Habituellement 3 classes de taille de pores peuvent être distinguées :

- la microporosité (petite taille des pores)
- la méso porosité (taille des pores intermédiaire)
- la macroporosité (grande taille des pores)

La porosité peut être classée en fonction de la taille des pores mais également de leur origine. Selon leur origine, on distingue :

➤ la porosité structurale : dépend de la structure du sol. Elle résulte de l'association des agrégats entre eux. Elle est modifiable par les interventions sur le sol. La porosité structurale permet à l'eau et à l'air de diffuser dans le sol. Plus la porosité structurale est élevée plus l'eau diffuse, et donc la conductivité hydraulique est facilitée.

➤ la porosité texturale est directement liée à la texture du sol. Elle résulte de l'assemblage des particules élémentaires, elle n'est pas modifiable, contrairement à la porosité structurale. La porosité du sol joue un rôle important dans les échanges hydriques et gazeux, ainsi que dans le développement racinaire. Généralement, la compaction affecte la qualité physique du sol, réduit la porosité, ce qui entraîne une mauvaise aération du sol, un mauvais drainage et augmente la résistance à la pénétration des racines, par conséquent réduit la croissance et le rendement de la récolte (Lahlou et *al.*, 2005).

#### **3.2.4. Perméabilité**

La perméabilité d'un sol est définie par la vitesse d'infiltration de l'eau de gravité en cm par seconde (ou par heure, si la vitesse est lente). L'infiltration est le nom donné au processus d'entrée de l'eau dans le sol à travers la surface du sol et verticalement vers le bas, ce processus est d'une grande importance dans la pratique car son régime détermine souvent le ruissellement qui se forme à la surface du sol pendant les orages (Hillel, 1984).

La vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol est profondément affectée par l'état structural de la surface et l'état structural de la couche du sol intéressé par l'infiltration. Par exemple lorsque les pluies sont intenses, elles modifient la surface du sol, du moins lorsque la structure est instable, et peut là aussi, se former une couche compacte limitant la pénétration de l'eau (Henin et *al.*, 1969).

En général la capacité d'absorption de l'eau par le sol est élevée au début de l'infiltration, en particulier quand le sol est initialement très sec. La perméabilité d'un sol dépend aussi de la porosité, mais surtout du taux de saturation en eau (Hillel, 1984).

### 3.2.5. Circulation de l'eau dans le sol

Les gradients présentés par les différentes forces agissant sur l'eau dans les sols déterminant la caractéristiques de ses flux au sien de la couverture pédologique, tant en direction qu'en débit

➤ Circulation de l'eau dans les sols saturés

Dans ce cas, l'eau se déplacé verticalement, sauf si elle est réorientée par un obstacle l'eau percole à travers le sol ; le drainage correspond au même mécanisme, mais sous-entend que l'on s'intéresse davantage à l'évacuation de l'eau en excès dans un sol (Duchaufour, 2001).

➤ Circulation de l'eau dans les sols non saturés

Lorsque la teneur en eau de la terre est inférieure à la capacité de rétention, l'effet de la gravité sur le déplacement d'eau devient faible, voire négligeable. Ceux-ci sont principalement réglés par les gradients du potentiel matriciel qui devient prédominant dans les sols (Duchaufour, 2001).

### 3.3. Propriétés biologiques

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

- A long terme avec sa composition physique et sa dynamique (transformation des minéraux, enrichissement en matière organique via les producteurs primaires : végétaux).
- A court terme avec sa structure (qui elle-même définit le comportement physique du sol en termes de porosité et de circulation des fluides, eau et air) et la stabilité de cette structure.

L'interaction entre biologie et chimie avec le 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 oxydé à un état réducteur ou vice-versa (Benyahia et Mahdaoui, 2012).

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 (Chantigny, 2005).

## 1. Définition

Ramade (1992) définit La pollution comme étant « une modification défavorable du milieu naturel qui apparaît, en totalité ou en partie comme un sous-produit de l'action humaine, à travers des effets directs ou indirects altérant les critères de répartition des flux d'énergie, des niveaux de radiation, de la constitution physico-chimique du milieu naturel et de l'abondance des espèces vivantes ».

La pollution des sols peut être localisée ou diffuse, elle peut résulter soit d'une contamination accidentelle soit d'un projet chronique. L'origine est le plus souvent industrielle mais peut aussi être urbaine ou agricole (Ademe/Adit, 2006).

Les trois grands mécanismes pourvoyeurs de pollution des sols sont :

- déversement plus ou moins massif lors d'accidents de transport d'hydrocarbures par route ou chemin de fer, lors de rupture accidentelle d'oléoducs et d'inondations ou d'explosions d'unités de production industrielle ou de cuves de stockage hors sol dans les centres de distribution, lors des opérations de transfert et de distribution.
- déversement et enfouissements volontaires de déchets des hydrocarbures, liés à des activités domestiques, artisanales, commerciales, agricoles ou industrielles.
- retombées atmosphériques dans les zones urbaines et industrielles ou leur périphérie (hydrocarbure volatils, imbrulés de combustion diverses).

## 2. Principaux types de polluants

Un polluant est toute substance d'origine naturelle ou anthropique qui s'accumule dans le sol et modifie l'équilibre naturel de ce dernier à la suite d'une intervention humaine. On distingue deux types de polluants (Khellout, 2004).

### 2.1. Polluants minéraux

Il s'agit d'un ensemble ou de composés dont l'accumulation est responsable d'une pollution du sol. Généralement, ils sont non biodégradables, accumulatifs et toxiques quand ils sont présents en grande quantité (Khellout, 2004).

Cas des métaux lourds : ce sont des minéraux, qualifiés ainsi du fait de leur densité élevée. Les principaux métaux lourds sont le cadmium (Cd), le mercure (Hg), le plomb(Pb), le chrome(Cr), vient ensuite Ni, Cu, Zn et qui sont toxiques pour les végétaux (Khellout, 2004).

Les polluants minéraux sont présents naturellement à des concentrations généralement basses dans les sols. Ils proviennent, en grande partie, de l'altération de la roche mère du sous-sol. Les activités anthropiques peuvent conduire à une augmentation de ces concentrations naturelles. L'accumulation des métaux lourds dans l'environnement est liée à leur utilisation comme matières premières pour de nombreux produits industriels ou comme catalyseurs chimiques. On les trouve également dans des produits tels que les pesticides ou les engrais qui sont distribués sur une large surface. Ils sont aussi apportés sous forme de déchets urbains ou industriels, solides, liquides ou gazeux (Eshighi Malayri, 1995).

Les métaux lourds peuvent être absorbés directement par le biais de la chaîne alimentaire entraînant alors des effets chroniques ou aigus :

- ils causent des allergies
- ils changent le code génétique
- ils produisent des radicaux libres
- ils endommagent les cellules nerveuses
- ils remplacent ou substituent les minéraux essentiels
- ils neutralisent les acides aminés utilisés pour la détoxification.

## 2.2. Polluants organiques

Ce sont, en grande majorité, des produits de synthèse issus de l'activité anthropique. Ils proviennent principalement d'activités industrielles (production d'énergie, métallurgie, industries chimiques...), urbains (transport, traitement des déchets ....) et agricoles (utilisation de produits phytosanitaires)

Les polluants organiques renferment une large gamme de composés qui peuvent être classés selon :

- leurs origines (pesticides, carburants, explosifs, résidus de l'industrie pétrolière, déchets issus de la production de coke,)
- leurs structures chimiques (hydrocarbures, diphényles poly-chlorés (HDP), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), benzène /toluène/éthyle-benzène /xylène (BETX), dioxines ...etc.)
- leurs propriétés chimiques ou physiques (liquides non aqueux, composés organiques volatiles).

Les polluants organiques d'origine industrielle incluent le pétrole et ses dérivés, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les hydrocarbures chlorés

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 et mutagènes. Le degré de dangerosité devient plus important quand le sol assure difficilement la dégradation biologique de ce type de produits (Khellout et settouf, 2004).

### 3. Pollution du sol par les hydrocarbures

#### 3.1. Définition des hydrocarbures

Les hydrocarbures, encore appelés carbures d'hydrogène, sont des restes de matières organiques mortes, qui par décomposition après plusieurs années forme sous terre un composé organique. C'est à ce composé organique qu'on attribua la formule  $C_nH_m$  ou « n » et « m » sont deux entiers naturels. Ce sont parmi les substances polluantes les plus dangereuses pour l'environnement.

Les hydrocarbures constituent une classe ubiquiste de composés naturels. On les rencontre non seulement dans les sites contaminés par le pétrole mais aussi dans la plupart des sols et sédiments en petite quantité. Ils font partie des produits chimiques les plus importants pour l'humanité et sont notamment utilisés comme source d'énergie primaire. Ils ont la particularité d'être présent dans les différents compartiments des écosystèmes, c'est-à-dire dans l'eau, le sol et l'air ambiant.

Les HC regroupent différents produits pétroliers (pétrole brut, pétrole raffiné, Kérosène, essences, fuel, lubrifiants, et huiles à moteurs). Ils constituent la fraction la plus importante d'un brut pétrolier et ils représentent entre 65 et 95 % de la plupart des pétroles bruts (Morgan et Watkinson, 1994). On définit les HC par des familles de dérivés en fonction de leur utilisation ; ces familles sont basées sur des coupes de raffinage pétrolier. Il est possible de préciser le nombre d'atomes des molécules et leurs composants (Lemière et *al.*, 2001).

#### 3.2. Nature et origine

Le pétrole est une roche liquide carbonée, ou huile minérale. Suite à la sédimentation des matières organiques végétales et animales et à leur enfouissement sous d'autres couches sédimentaires.

La décomposition de ces matières organiques provoque une perte d'oxygène dans le milieu induisant des réactions réductrices. Puis, sous l'action combinée de la chaleur (60°C) et de la

pression (enfouissement d'environ 1200 à 1800 mètre), la transformation en hydrocarbures débute. Ce pétrole en formation est moins dense que la roche qui l'entoure, il migre donc vers la surface. Si le pétrole est arrêté dans sa progression par des roches imperméables, il se concentre pour former des poches qui sont à l'origine des réservoirs actuels (Benchouk, 2018). Dans l'environnement plusieurs origines des hydrocarbures peuvent être distinguées :

- **Les hydrocarbures fossiles**, qui proviennent de la décomposition d'une grande quantité de matière organique coincée entre deux couches sédimentaires.
- **Les hydrocarbures actuels**, qui sont produits par des bactéries décomposant la matière organique.

Cette production a lieu essentiellement dans les zones humides (tourbières, marins) et en quantité limitée. Le changement climatique pourrait accroître cette production dans les zones actuellement gelées et relâcher de grandes quantités de méthane dans l'atmosphère terrestre, ce qui accentuerait d'autant plus l'effet de serre.

- **Les rejets industriels et urbains**, qui est les sources d'hydrocarbures pétroliers pyrolytiques. (Djarbaoui, 2011).

### 3.3. Composition et caractéristiques

Le pétrole brut est parmi les mélanges les plus complexes des composés organiques qui se produisent sur la terre. Les progrès récents de la spectrométrie de masse à ultra-haute résolution ont permis d'identifier plus de 17 000 composants chimiques distincts et le terme de pétroleomique est inventé pour exprimer cette complexité récemment découverte (Hassanshahian et Cappello, 2013).

Malgré le fait que les principaux composants présents dans les hydrocarbures soient le carbone et l'hydrogène, une proportion significative d'autres atomes peut être présente. Celle-ci inclut l'oxygène, le soufre et l'azote (Morgan et Watkinson, 1994), et des métaux tels que le calcium et le magnésium. Les hydrocarbures peuvent être classés en groupes de structures différentes.

#### 3.3.1. Les hydrocarbures aliphatiques

Ce sont des hydrocarbures à chaînes droites ; saturés ou insaturés.

- Les hydrocarbures aliphatiques saturés sont des alcanes de formule générale  $C_nH_{2n+2}$ , ce sont les plus représentés dans le pétrole et vont du méthane aux chaînes contenant 40 atomes de carbone et plus.
- Les insaturés comportent les alcènes de formule générale  $C_nH_{2n}$ . Ces molécules contiennent une double liaison et les alcynes qui ont pour formule  $C_nH_{2n+2}$  et contenant une triple liaison dans leur molécule. Ils sont rares dans les pétroles bruts, plus communs dans les produits de raffinage (Cerniglia, 1992).

### 3.3.2. Les hydrocarbures cycliques

Ils peuvent être :

- saturés : appelés cyclanes qui sont des cycles saturés isomères des alcanes ;
- insaturés appelés cyclènes s'ils possèdent une double liaison dans leurs cycles ;
- cyclines s'ils ont une triple liaison.

Ils sont dits hétérocycliques si le cycle de leur molécule contient des atomes autres que le carbone tels que le soufre, l'azote et l'oxygène.

Les hydrocarbures aromatiques sont des composés contenant au moins un noyau benzénique dans leurs molécules. C'est un cycle insaturé à six atomes de carbone. Ils constituent une proportion très importante du pétrole et s'étalent du benzène aux HAP.

Ce sont des composés hydrophobes, persistants dans les écosystèmes à cause de leur faible solubilité dans l'eau (Cerniglia, 1992) ; certains, tels que l'anthracène, sont quasiment insolubles (solubilité de 0.7 mg/l).

Le tableau 2 donne la composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers d'après SPEIGHT (2014).

**Tableau 2:** Composition élémentaire des hydrocarbures pétroliers (Speight, 2014)

Eléments	Pourcentage
Carbone	83 à 87%
Hydrogène	10 à 14%
Azote	0,1 à 2%
Oxygène	0.05 à 6.0%
Soufre	0.05 à 6.0%
Métaux	<0.1%

#### 4. Les principales sources de la pollution du sol par les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont émis dans l'environnement par des processus naturels ou anthropiques. Il apparaît que les hydrocarbures d'origine anthropique prennent progressivement le pas sur ceux d'origine naturelle. D'après Colin (2000), la pollution par les hydrocarbures localisée des sols peut avoir des origines diverses et l'activité anthropique est la principale source de nombreuses contaminations localisées ou diffuses au niveau des sols et sous-sols.

##### 4.1. Sources naturelles

Les feux de forêt et de prairie sont considérés comme les plus importants processus naturels qui génèrent les hydrocarbures. Il existe cependant d'autres processus tels que les éruptions volcaniques et les fuites des réservoirs, l'érosion des roches ainsi que la production d'hydrocarbures par les végétaux supérieurs (cires) ou par les algues. La production par ces végétaux est marquée par la prédominance des n-alcanes ainsi que les réactions géologiques associées à la production de fuel fossile et minéral (Rocher et Moilleron, 2003).

Selon (Lemiere et *al.*, 2001) certains des HC tels que les HC aromatiques polycycliques (HAP) peuvent avoir une origine naturelle (ex : sols des forêts de sapins ou de hêtres autour des lacs).

## 4.2. Sources anthropiques

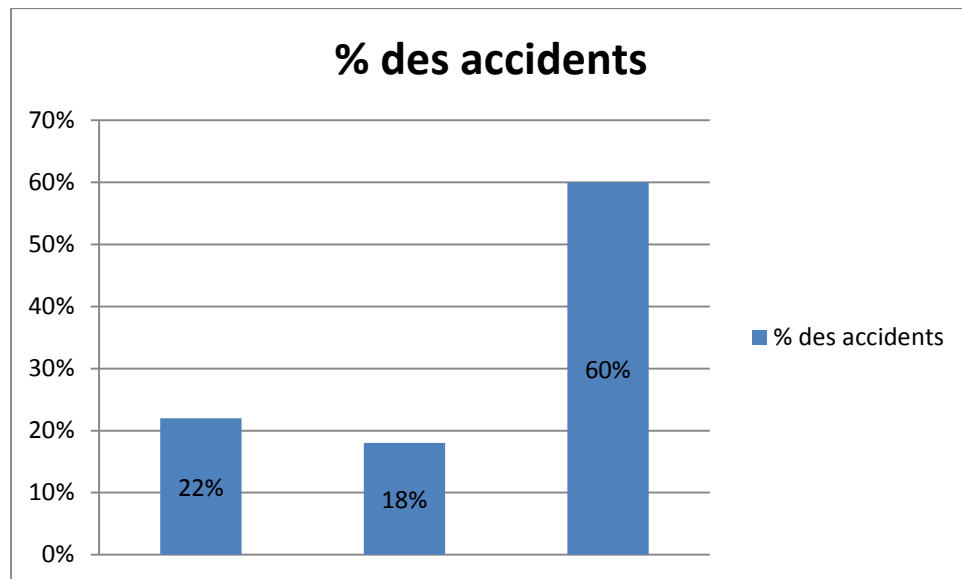
Les hydrocarbures présents dans les sols proviennent généralement d'une pollution pétrolière (production, raffinage, transport) ou issue de la pétrochimie, d'usines à gaz, de certaines industries chimiques ou industries mécaniques.

Deux sources anthropiques sont généralement distinguées : d'une part, les sources pétrolières correspondant à une pétrogenèse à basse température et, d'autre part, les sources pyrolytiques correspondant à des processus à haute température. La circulation automobile constitue l'une des principales sources d'hydrocarbures puisqu'elle combine les deux processus. Les véhicules émettent des gaz d'échappement provenant de la combustion incomplète des carburants et sont aussi à l'origine de déversements de produits variés (carburants, huiles, débris de pneu, etc.) (Rocher et Moileron, 2003).

les stations-services, sont parmi les principales sources de pollution du sol à cause des déversements des hydrocarbures lors du remplissage des cuves de stockage de la station ou de la distribution de carburant, lors d'une fuite dans les réservoirs ou dans les canalisations entre les citernes et les ilots de pompages c'est une pollution ponctuelle (Colin, 2000).

### ❖ Cas particulier des stations-services

Les stations-services se définissent comme l'ensemble des installations et des activités destinées à stocker et à transférer les hydrocarbures. Elles sont une source importante de pollution urbaine. L'exploitation de ce type d'activité représente une source potentielle de nuisances (bruit, pollution atmosphérique, pollution du sol et des eaux) pour le voisinage direct mais aussi pour l'environnement, en général. Les accidents se produisant dans les stations-service conduisent, le plus souvent, à des pollutions du sol ou du sous-sol et, de façon moins fréquente, à des explosions et des incendies, (Piedrafita et *al.*, 2007) (Figure1)

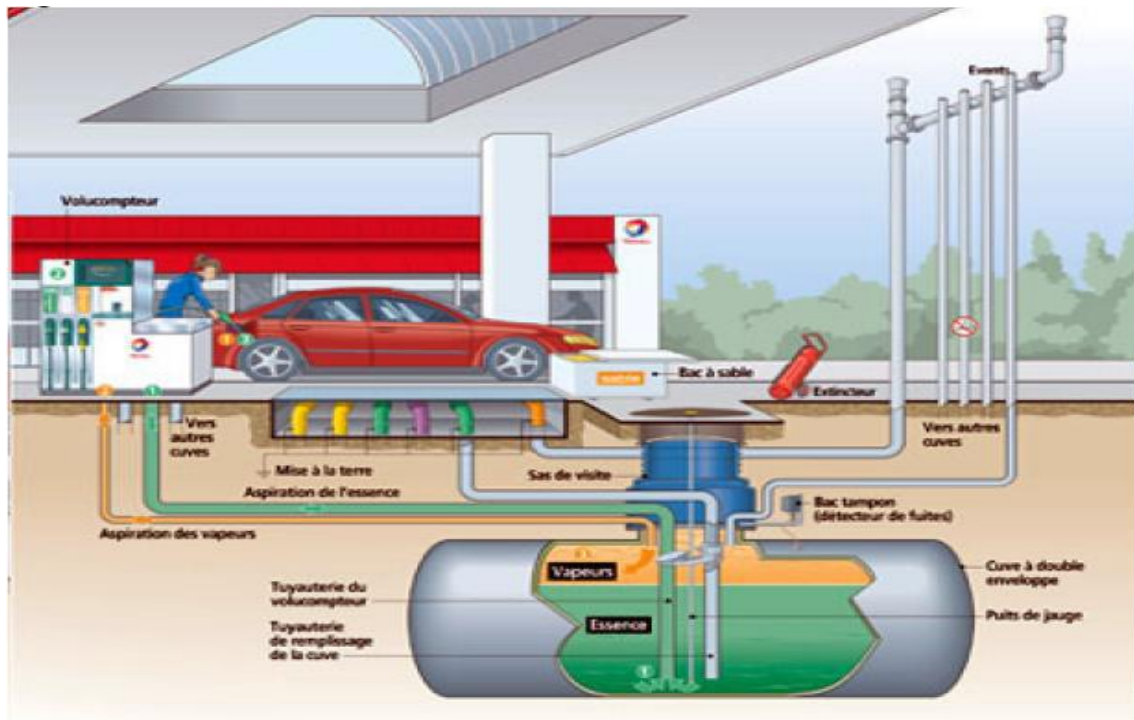


**Figure 1** Accidents dans les stations-services (Mansot, 1996).

Le phénomène de pollution des sols et sous-sols provenant des stations-services se scinde, en deux catégories :

- d'un côté, la pollution accidentelle due au déversement d'hydrocarbure lors du remplissage des stocks de la station.
- de l'autre côté, lors de la distribution de carburants (Piedrafita et al., 2007).

Le schéma ci – dessous montre les sources de pollution potentielle des sols dans une station-service (Piedrafita, 2007) (Figure2)



Source : TOTAL

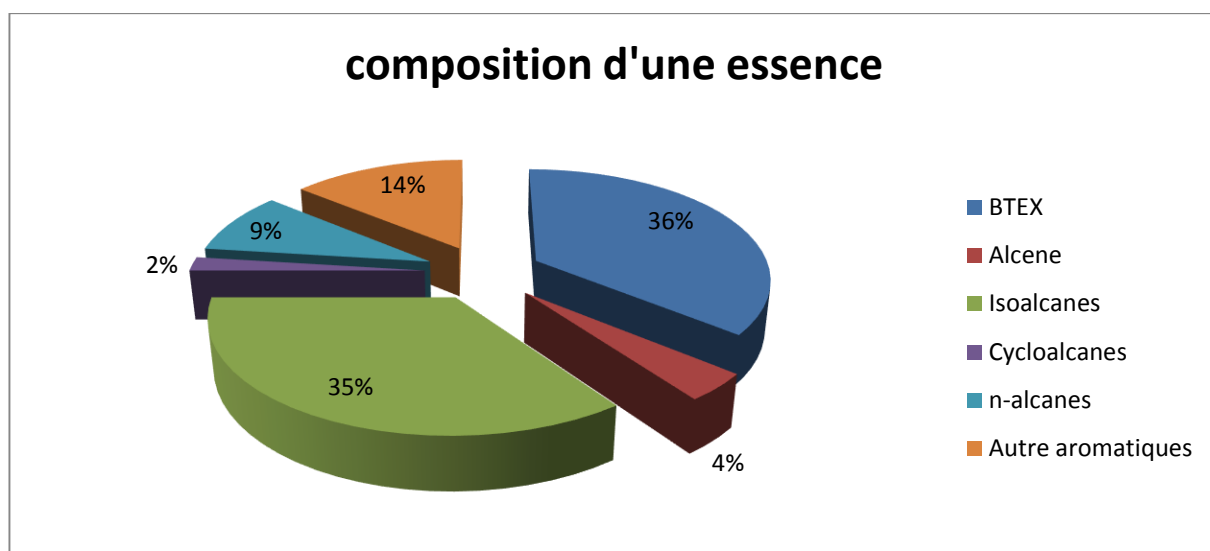
**Figure 2 :** Source de contamination du sol dans une station-service (Piedrafita ,2007)

## 5. Les hydrocarbures : carburants d'usage courant

Les carburants tels que l'essence et le gazole sont stockés et vendus dans les stations-services. Il s'agit des mélanges complexes d'hydrocarbures pétroliers (Marchal et *al.*, 2003). Leur composition en hydrocarbures dépend de facteurs comme l'origine du pétrole brut soumis au raffinage et les conditions de raffinage.

### 5.1. Les essences

L'essence utilisée comme carburant dans les moteurs thermiques ou moteur à explosion à allumage commandé est un mélange d'hydrocarbure auxquels sont parfois ajoutés d'autres produits combustibles ou adjuvants. Les essences contiennent généralement environ 230 hydrocarbures différents, qui comprennent entre 4 et 10 atomes de carbone. Selon MARCHAL et *al.* (2003), les essences sont composées de 5 classes principales d'hydrocarbures : les n-alcanes, les iso alcanes, les cyclo alcanes, les alcènes et les aromatiques .Les aromatiques sont majoritairement présents, La figure3, montre la composition d'une essence.



**Figure 3** : Exemple de composition d'une essence (Marchal et *al.*, 2003).

L'essence se présente sous une couleur jaune très pale voire transparente. Elle est par ailleurs fortement odorante, facilement inflammable et très volatile.

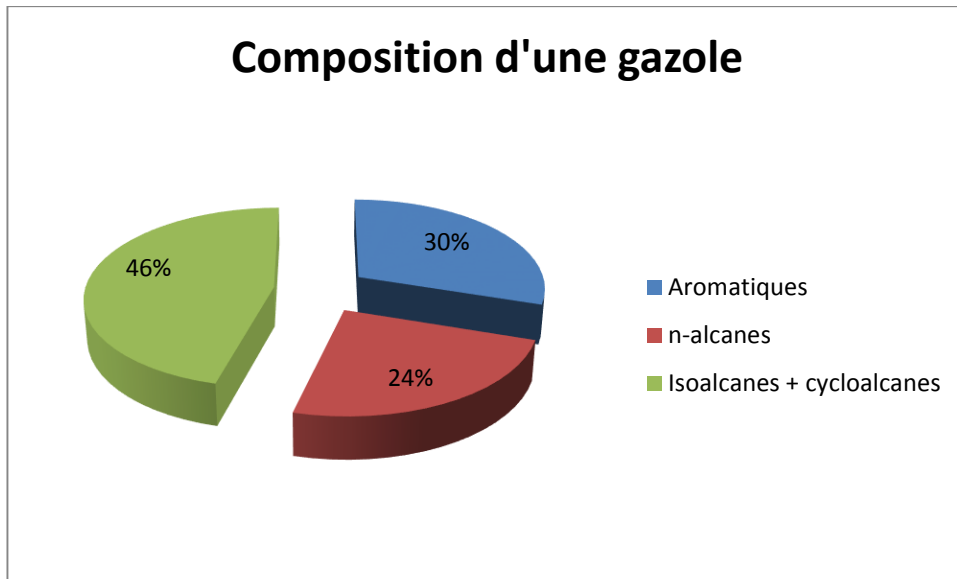
Les propriétés physiques et chimiques des essences sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 3**: Propriétés physico-chimiques des essences (Colombano, 2014).

<b>Température de fusion</b>	<-60° C
<b>Température de vaporisation</b>	25 à 220° C
<b>Solubilité dans l'eau</b>	De 100 à 250 mg/l
<b>Masse volumique à 15°C</b>	De 680 à 780 kg/m <sup>3</sup>
<b>Température d'auto-inflammation</b>	450°C
<b>Limites d'explosivité dans l'air</b>	Inférieure : 1.4% vol supérieure : 7.6% vol
<b>Pression de vapeur saturante</b>	De 350 à 900 HPA

## 5.2. Les gazoles

Le gazole est très largement utilisé comme carburant automobile dans les moteurs à allumage par compression. Les gazoles contiennent 2000 à 4000 hydrocarbures différents dont le nombre d'atomes de carbone varie entre 11 et 25. D'après Marchal et *al.*(2003), les gazoles sont donc plus lourds que les essences et sont composés de produits moins volatiles. Ils ne contiennent pas d'alcènes et sont majoritairement constitués de n-alcanes et cycloalcanes (Figure 3).



**Figure3** : Exemple de composition d'un gazole (Marchal et *al.*, 2003) .

Le gazole est un liquide incolore ou légèrement jaune qui présente une odeur de pétrole. Les propriétés physiques et chimiques des gazoles sont répertoriées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau 4**: Propriétés physico-chimiques des gazoles (Colombano, 2014).

Température d'ébullition	Solubilité dans l'eau	Masse volumique à 15°C	Limites d'explosivité dans l'air	Pression de vapeur saturante
170-390°C	Très peu soluble	0.82-0.89g/m <sup>3</sup> à15°C	Inférieure : 1% vol Supérieure : 6% vol	1 Pa à 20°C

## 6. Devenir des hydrocarbures dans le sol

Les informations relatives au comportement et devenir des HC dans l'environnement sont nécessaires pour identifier les milieux potentiellement pollués et prévoir l'impact sur la santé. Après avoir été répandu dans le sol, c'est par des processus physiques, chimiques et biologiques qu'un HC va pouvoir être déplacé, transformé, ou éliminé (Soltani, 2004) ; ces mécanismes peuvent être classés en trois classes :

➤ mécanisme avec conservation de la masse : dispersion, diffusion, solubilisation, volatilisation

- mécanisme destructifs : dégradation physique ou chimique
- mécanisme de dilution (Gomez, 2010).

### 6.1. La volatilisation

Le terme « volatilisation » comprend tous les processus physico-chimiques de transfert des composés du sol ou des plantes vers l'atmosphère (Koller, 2004).

Ce phénomène touche les fractions de faible poids moléculaire et dépend des conditions atmosphériques (vent, humidité, température), de la pression de vapeur et de la densité des vapeurs des contaminants. Elle dépend de la pression de vapeur de chaque hydrocarbure, du nombre d'atomes de carbone et du type d'hydrocarbure, les propriétés du sol jouent aussi un rôle dans la volatilisation des HC. En effet, plus l'humidité du sol est grande, plus la quantité de pores disponibles pour le passage des vapeurs est faible, et donc moins la volatilisation sera importante la volatilisation (Saada et *al.*, 2005) (dans un sol sableux, les pores ont un diamètre important, ce qui favorise de plus grands transferts de masse de vapeur vers l'atmosphère et donc une plus grande atténuation contrairement au sol argileux ).

A partir d'une pression de vapeur supérieur à 133 Pa le produit est relativement volatil. Lorsque la constante de Henry dépasse  $100 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ , les composés passent facilement de la phase liquide à la phase gazeuse (Hanna, 2004).

Il faut noter que la volatilisation est un mécanisme de transformation du polluant qui ne conduit pas à sa destruction.

### 6.2. La solubilisation

La solubilité des hydrocarbures dans le sol dépend de leur nature et leur poids moléculaire. Les composés légers sont relativement solubles, par contre les produits plus lourds sont très peu solubles.

Généralement les carburants sont des composés insolubles ou très peu solubles dans l'eau mais certains d'entre eux peuvent partiellement se dissoudre (HAP et HC à faible nombre d'atomes de carbone) ceux-ci figurent parmi les hydrocarbures les plus dangereux pour l'environnement et les plus difficiles à éliminer est sont absorbés par la faune et la flore. Ils sont plus solubles lorsque leurs masse moléculaire est faible et que leurs polarité est élevée (Soltani ,2004).

La solubilisation joue un rôle important dans la détermination du degré de dispersion et de migration des hydrocarbures, ainsi que leurs degré d'exposition aux microorganismes responsables de la dégradation biologique (Bergue et Merienne, 1986).

### 6.3. L'adsorption (sorption)

La sorption est un processus dynamique au cours duquel les molécules sont continuellement en équilibre entre la phase solide et la phase liquide (particule du sol). C'est un facteur important qui détermine le sort de nombreuses molécules organiques influencées par la matière organique et les minéraux contenus dans le sol.

Après pénétration des polluants organiques dans le sol, ils sont adsorbés par celui-ci, ou ils restent en phase gazeuse ou en solution. Les substances ayant une densité plus grande que celle de l'air se déplacent de haut en bas, tandis que les substances plus légères sont transportées vers le haut.

Les polluants organiques sont fixés au sol en fonction de leurs solubilités dans l'eau, de leurs structures moléculaires et de leurs groupes fonctionnels (Koller, 2004).

Selon Saada et *al* (2005), le degré d'adsorption est directement lié au contenu en carbone organique du sol ; plus le milieu est riche en matière organique et /ou en minéraux fins (granulométrie  $<2\mu\text{m}$ ), plus il est favorable aux mécanismes de l'adsorption

Il existe deux mécanismes de sorption : l'adsorption physique qui est due à des forces électrostatiques, et l'adsorption chimique qui met en jeu des liaisons chimiques entre le solide adsorbant (matière organique) et le fluide adsorbé (HC).

### 6.4. La dégradation

La dégradation est un processus essentiel dans la dissipation d'un produit par sa transformation. Elle influe sur la persistance et les possibilités de contamination. Ce processus peut entraîner une dégradation totale du produit ou simplement former des produits intermédiaires de dégradation (Gendrault, 2004).

Les hydrocarbures une fois sorbés au sol peuvent subir des dégradations abiotiques (hydrolyse, les réactions d'oxydoréductions, la photolyse) et des transformations biotiques liées aux micro-organismes des sols.

#### 6.4.1. Dégradation biotique

C'est une transformation des composés carbonés en différents sous-produits, par l'action des microorganismes présents dans le sol, principalement les bactéries et /ou les champignons. Ces derniers s'en nourrissent et produisent des enzymes qui vont réagir avec les

molécules d'HC pour les transformer en sous-produits plus simples, généralement le CO<sub>2</sub> et le H<sub>2</sub>O lorsque la dégradation est complète (Rivière, 1998).

La dégradation de ces composés dépend de leurs structures chimique et des facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité, l'oxygène disponible, le pH et la salinité. Plus la masse molaire ou le nombre de cycles augmente, plus la vitesse de biodégradation diminue (Saada et al., 2005). La dégradation du polluant peut être complète dans ces conditions.

La biodégradation des HC par les microorganismes appelés hydrocarbonoclastes est l'un des premiers mécanismes conduisant à l'élimination des HC dans l'environnement (Soltani, 2004).

#### 6.4.2. Dégradation abiotique

Selon Fattal (2008), les trois processus principaux de la dégradation abiotique des polluants sont : la photolyse, les réactions d'oxydoréduction et l'hydrolyse chimique, elles seraient responsables de la perte de 20% d'hydrocarbures aromatiques dans le sol.

- La photolyse : c'est une décomposition chimique (oxydation) des HC sous l'effet de la lumière, après absorption de l'énergie, la molécule est déstabilisée et peut réagir généralement avec l'O<sub>2</sub> pour former une molécule oxydée. Elle provoque des pertes de chaînes aliphatiques (Lampi, 2005).
- Les réactions d'oxydoréductions abiotiques peuvent avoir lieu dans les sols ou dans l'eau selon la nature du polluant et les conditions redox du milieu. Elles mettent en jeu des couples redox sans intervention biologique (Saada et al., 2005).
- L'hydrolyse : est un processus de dégradation des molécules par l'action de l'eau sur un polluant dans les phases aqueuses des milieux. Elle est consécutive à la dissociation ionique de l'eau, et est influencée par le pH et la température du sol (Hanna, 2004).

### 7. Effets éco toxicologiques des hydrocarbures

Les hydrocarbures légers sont plus toxiques que les hydrocarbures lourds (Fattal, 2008). La pollution par les HC pose d'importants problèmes dans l'environnement, vis-à-vis des microorganismes, les plantes, les animaux et de la santé humaine. En raison de leurs caractères liposolubles, peuvent s'accumuler dans la faune et la flore et tout au long de la chaîne trophique (Ramade, 2007).

## 7.1. Effet sur le sol

Le sol étant le support indispensable aux animaux, aux végétaux terrestres et à l'homme. Toute pollution de celui-ci, retentira sur la flore, la faune et sur l'homme lui-même (Koller, 2004).

La présence des hydrocarbures au niveau d'un sol avec des concentrations plus ou moins élevées peut affecter ses propriétés physiques, chimiques et biologiques.

### 7.1.1. Effet sur les propriétés physiques du sol

Les études réalisées dans le but de déterminer l'effet des hydrocarbures sur les propriétés physiques du sol sont vraiment limitées.

Rouquerol et ses collaborateurs (1987) ont montré que les hydrocarbures enrobent les particules minérales et assurent leur dispersion. Quant à Mettauer et ses collaborateurs (1987) in Fezni et Khedir, (2007), ils soutiennent l'idée que la présence des HC améliore la stabilité structurale du sol, accroisse sa rétention en eau et réduise sa mouillabilité. Cependant, d'autres auteurs Onojake et Osuji, (2012) ont démontré que l'humidité et la capacité de rétention de l'eau sont considérablement réduits par les HC ce qui entrave la circulation de l'air et de l'eau dans la matrice du sol et donc réduit l'infiltration de l'eau dans le sol.

La contamination du sol par les HC augmente sa densité (Amiri, 2013). Les hydrocarbures provoquent aussi une augmentation de l'humidité du sol avec 2% plus que les sols non pollués avec un pouvoir de rétention plus élevé (Bergue et Mérienne, 1986).

### 7.1.2. Effet sur les propriétés chimiques

Les effets qui peuvent être générés lors d'une contamination par les HC sur les propriétés chimiques du sol sont :

- Une augmentation de la teneur en carbone organique total du sol qui peut être le résultat de la minéralisation microbienne des composés d'hydrocarbures (Chaîneau et *al.*, 1996).
- Une augmentation de la teneur en matière organique est constatée dans le sol contaminé. Elle est dû à l'apport des hydrocarbures qui sont des composés organiques (Ramade, 1992 ; Amiri, 2013).

- L'azote organique augmente de façon continue dans les parcelles traitées. Cet enrichissement est la conséquence du déséquilibre carboné provoqué par l'apport d'hydrocarbures (le rapport C/N voisin de 45). Il traduit l'activité d'une microflore capable de métaboliser les déchets hydrocarbonés en utilisant une source d'azote autre que celle des réserves insuffisantes du sol (Rouquerolet et *al.*, 1987).
- Une augmentation de la concentration du sol en éléments chimiques à l'état de traces tels que le manganèse(Mg), le zinc(Zn), le fer(Fr) et le plomb(Pb) (Chaineau et *al.*, 1996).
- Une augmentation de la conductivité électrique (CE) entraînant l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence des sels (Sauchelli ,1969 in Fizani et Khider, 2007).
- Une diminution du pH dans le sol et de la teneur en potassium (K), en calcium (Ca) et en phosphore (P) (Chaineau et *al.*, 1996).
- une diminution de la teneur du sol en phosphore (P) et une augmentation en carbone organique total (Chaineau et *al.*, 1996).

### 7.1.3. Effet sur les propriétés biologiques

Les effets des hydrocarbures sur l'activité biologique du sol dépendent de leur nature, de leur concentration dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu.

Selon Jumbo (1991) cité par Duchaufour (2001), les hydrocarbures s'ils sont incorporés au sol en quantité limitée (moins de 2% de la couche 0-15cm) n'exercent pas d'action directe vis-à-vis des micro-organismes, mais ils exercent une action nocive indirecte. Les composés humiques enrichis en lipides, deviennent à leur tour hydrophobe et difficilement biodégradable. La perméabilité excessive du sol ne permet pas la constitution de réserves hydriques suffisantes.

L'imprégnation des sols en hydrocarbures a pour effet global une multiplication intense de la microflore, en particulier, des champignons, des bactéries et des levures ( Rouquerol et *al.*,1987).

### 7.2. Effet sur la santé de l'homme

L'effet de la pollution des sols par les hydrocarbures sur l'homme est considéré comme limité et négligeable en absence d'un contact prolongé (Fattal, 2008). En cas de contact direct avec l'homme ou lors de leur transfert dans la chaîne alimentaire par le phénomène de bioaccumulation, les hydrocarbures sont susceptibles d'induire l'apparition des cancers chez les organismes qui leurs sont exposés par inhalation, par ingestion ou par contact (Girard et *al.*, 2005).

Les effets toxicologiques de tous les HAP sont imparfaitement connus ; toutefois les données expérimentales disponibles chez l'animal ont montré que certains HAP induisent des effets systémiques tels que des troubles hématologiques, immunologiques et hépatiques, ainsi que des effets sur la reproduction. D'autres HAP ont des effets génotoxiques et cancérigènes. L'exposition humaine aux HAP peut se faire via l'alimentation, par voie pulmonaire ou par voie cutanée. Les HC cycliques provoquent des cancers tels que la leucémie et cancer de poumon (Amirad, 2011).

Les hydrocarbures aromatiques monocycliques ont des effets hématologiques et immunologiques. Le benzène peut provoquer des troubles neuropsychiques chez l'homme. Le styrène peut altérer l'appareil génito-urinaire et le phénol serait toxique pour le foie et les reins (Colin, 2000)

Les alcanes peuvent provoquer des brûlures œsophagiennes et gastriques suite à une exposition à long terme. L'éthylène peut entraîner des troubles des fonctions visuelles, une diminution de la pression artérielle et une diminution de la fréquence cardiaque (Picot et Montandon, 2013).

### **7.3. Effet sur l'environnement**

A travers l'étude de l'évolution des HC dans les phases liquides et gazeuses du sol, on peut dire que les terrains contaminés entraînent une extension de la contamination, que ce soit par voie aérienne (entraînement des poussières contaminées et migration des vapeurs) ou souterraine (migration des eaux contaminées) (Fattal, 2008).

## 1. Définition de la microbiologie du sol

La microbiologie du sol est une des branches de l'écologie microbienne qui a essentiellement pour objectif l'étude du rôle des micro-organismes dans le sous-écosystème (dénommé système sol-plante) constitué par le sol, la microflore, la faune du sol et la flore. Les micro-organismes du sol y jouent deux rôles essentiels: d'une part, ils sont responsables de nombreuses transformations chimiques et même physiques qui se déroulent dans les sols; d'autre part, ils agissent directement ou indirectement sur la nutrition des plantes. En fait, il existe tout un réseau d'interactions complexes entre les micro-organismes du sol, les plantes, la faune du sol et les composantes chimiques et physiques du système sol-plante, de sorte qu'il est souvent difficile d'élucider le comportement d'un micro-organisme donné dans de tels systèmes (Alexander, 1977).

## 2. Relations avec les autres disciplines

Pour mener à bien ses recherches dans le domaine de l'observation et de l'expérimentation, le microbiologiste du sol doit faire appel à de nombreuses disciplines : bactériologie, mycologie, algologie, zoologie, phytophysiologie, phytopathologie et, bien entendu, pédologie, agronomie et écologie (figure 5). La biochimie constitue pour lui l'outil essentiel nécessaire à la mise en évidence des nombreuses réactions impliquées dans les interactions entre la microflore tellurique et les autres composants de l'écosystème sol-plante.

La biologie moléculaire et la génétique ont fourni à la microbiologie du sol de nouveaux outils permettant :

- L'identification fine de souches autochtones ou introduites dans les écosystèmes naturels ou cultivés,
- D'envisager la transformation génétique de souches pour une utilisation agronomique ou en relation avec la protection de l'environnement et la dépollution de sols (Roger et Garcia, 2001).

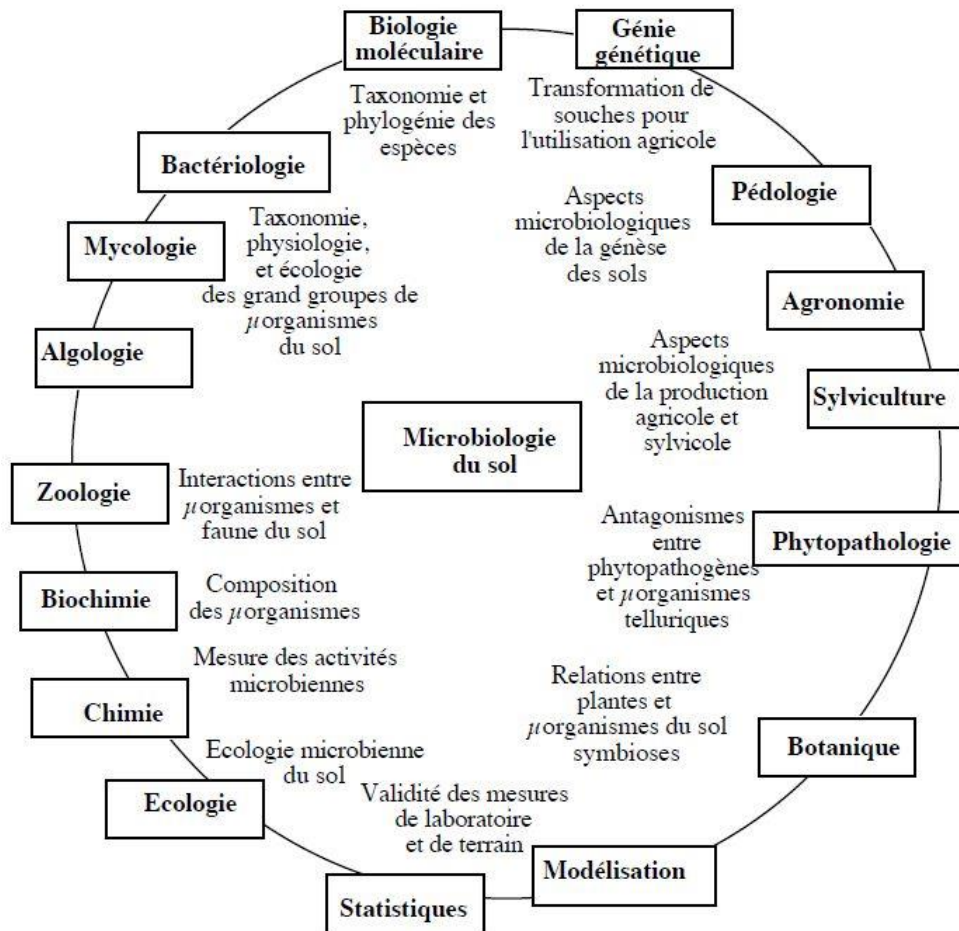


Figure 5 : Relation entre la microbiologie du sol et les autres disciplines (Roger, 2001).

### 3. Rôles des microorganismes dans la décontamination des sols pollués par les hydrocarbures

#### 3.1. La bio remédiation

Une technique alternative plus intéressante à ces méthodes physiques, thermiques et chimiques, la bio remédiation s'appuie sur le métabolisme et l'activité des êtres vivants (bactéries, champignons).

A pour avantage indéniable qu'elle est naturelle, qu'elle n'implique aucune intervention humaine, et donc aucun effet supplémentaire sur la flore, et surtout qu'elle est moins chère. Son inconvénient majeur est qu'elle est peut être lente. Le challenge est donc d'accélérer ce processus naturel (Abdelly, 2007).

### **3.2. Principe de la bio-remédiation**

Le procédé de la bio-remédiation consiste à activer la capacité naturelle que possèdent de nombreux micro-organismes (bactéries, champignons), à dégrader les polluants en composés inertes, comme l'eau et le gaz carbonique. Ces organismes peuvent être indigènes (déjà présents dans la zone polluée) ou exogènes (ajoutés au milieu), ou encore être prélevés sur le site contaminé ou bien cultivés au laboratoire puis réintroduits dans le sol (bio-augmentation). La bio-remédiation se déroule, généralement, en conditions d'aérobies. Cependant l'application de système de bio-remédiation en conditions d'anaérobies permet la dégradation d'un certains nombres de molécules récalcitrantes (Abdelly, 2007).

### **3.3. Les principales méthodes de la bio-remédiation**

La bio-remédiation peut être renforcée par les deux approches complémentaires suivantes :

#### **3.3.1. La bio-augmentation**

C'est une méthode de traitement in-situ qui consiste à introduire des cultures de microorganismes à la surface du milieu contaminé pour accélérer le phénomène de biodégradation des contaminants organique. Ce sont des microorganismes exogènes qui sont isolés, cultivés, et réinjectés en plus grande quantité, afin d'accélérer le rendement de la biodégradation. Des consortiums bactériens exogènes dont la capacité de dégradation du polluant est connue sont utilisés (Adem, 2006).

L'application du bio-augmentation est essentiel dans le cas où aucun micro-organisme capable de dégrader les composés cibles n'est présent dans la communauté naturelle ou si l'activité de la communauté naturelle est inhibée. Les microorganismes employés peuvent être issus de sélections réalisées à partir d'échantillons environnementaux (sols, sédiments, boues, etc.) (Abdelly, 2007).

#### **3.3.2. La bio-stimulation**

C'est une méthode de traitement in-situ qui consiste à améliorer les processus de biodégradation des polluants, elle consiste en l'ajout de composés spécifiques pour optimiser

l'activité des micro-organismes indigènes du sol responsables de la biodégradation des contaminants, les conditions de croissance sont obtenues entre autre par le contrôle de la T° du pH, et même par l'ajout de nutriment spécifiques, parmi les principaux nutriments, on peut citer l'azote, le phosphore, et les éléments traces tels que le calcium, le sodium et le magnésium (Lecomte, 1998).

Le principal avantage de la bio stimulation est que la bio-remédiation nécessite des micro-organismes indigènes déjà présents qui sont bien adaptés à l'environnement sous-sol, et sont bien répartis spatialement dans la sous-surface (Adams et *al.*, 2014).

### **3.4. Les microorganismes utilisés dans la dégradation des hydrocarbures**

Une grande variété de micro-organismes indigènes du sol et des eaux présente la capacité à dégrader les hydrocarbures.

Les bactéries et les champignons sont des médiateurs primaires dans la dégradation des HC, les plus étudiés et semblent les plus efficaces. En effet, ils sont capables de métaboliser une large gamme des hydrocarbures, les transformant partiellement en métabolites ou en les minéralisant complètement (Benchouk , 2018).

#### **3.4.1. Les bactéries**

Dans le sol, les bactéries sont des organismes de quelques micromètres, elles sont unicellulaires, parfois mobiles. Ce sont les plus abondants de la flore microbienne et métaboliquement les plus actifs. En fonction des propriétés physico-chimiques du sol ; tous les types physiologiques bactériens sont représentés dans la microflore tellurique : autotrophes et hétérotrophes, thermophiles et psychrophiles, aérobies et anaérobies très répandus (Bousseboua, 2005).

Les bactéries sont la classe des microorganismes activement impliqués dans la dégradation des hydrocarbures, des sites contaminés, un certain nombre d'espèces bactériennes sont connues pour la dégradation des hydrocarbures pétroliers, la plupart d'entre eux, représentant l'efficacité de la biodégradation, elles sont isolées à partir de sols contaminés à long terme par les déchets pétrochimiques (Haritash et Kaushik, 2009).

Les différents genres bactériens fréquemment décrits pour leur capacité à dégrader les HC dans les environnement de sol comprennent : *Achromobacter*, *Acinetobacter*, *Arthrobacter*, *Bacillus*, *Collimonas*, *Corynebacterium*, *Dietzia*, *Flavobacterium*, *Gordonia*, *Nocardia*, *Cardioides*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Sphingomonas* et d'autres clones bactériens (Benchouk , 2018).

Selon Pelmont (1995), les caractéristiques des bactéries aptes à biodégrader les hydrocarbures sont les suivantes :

- génétiquement stables.
- aptes à se reproduire rapidement suite à un entreposage de longue durée.
- aptes à biodégrader une vaste étendue de polluants pétroliers.
- activité enzymatique et croissance des bactéries dans des conditions environnementales optimales
- aucun effet secondaire néfaste et produit finaux non toxiques
- la majorité des souches bâtonnées Gram négatives
- 63% pigmentés (orange, jaune et orange)
- 32% des bactéries mobiles ou motiles
- 5% des bactéries à Gram positives, filamenteuses.

### 3.4.2. Les champignons

Les champignons sont des organismes de quelques micromètres à quelques millimètres. Moins nombreux que les bactéries, ils ne résistent pas à des températures supérieures à 50°C et ont la capacité de dégrader les composés organiques les plus complexes (cellulose, lignine, etc.), les plus récalcitrants (HAP, etc.) (Haritash et kaushik, 2009). Ce sont des organismes à caractère polaire, à fort pouvoir oxydant, qui préfèrent un environnement acide, riche en azote et qui, par Co métabolisme excrètent des enzymes solubles (lignine-peroxydases, peroxyde d'hydrogène, etc.) capables de dégrader les HC pétroliers lourds. Il existe deux familles de champignons : les filamenteux lignolytiques et les non lignolytiques.

En général, Les champignons du sol forment une biomasse aussi importante que celle des bactéries, leurs activités métaboliques sont multiples et fondamentales à l'équilibre écologique des sols, par : leurs interactions avec les systèmes racinaires des plantes, leurs aptitude de colonisation et de dégradation des débris organiques de grande taille et des composés de structures complexes (Bousseboua, 2005).

Les avantages principaux des champignons par rapport aux bactéries sont leurs capacités à se propager dans les sols grâce à leurs mycéliums et à produire des enzymes extracellulaires par exemple des oxydases à large spécificité de substrats qui permettent un meilleur contact avec les hydrocarbures

De nombreuses études en sols ont démontré l'utilité et l'efficacité des champignons pour la bio-remédiation des sols pollués par les hydrocarbures, parmi ces champignons les genres : *Amorphoteca*, *Neosartorya*, *Talarmocyces*, *graphium*, *Candiada*, *Yarrowia*, *pichia*, *aspergillus*, *Cephalosporium*, *Pencillium*, *Cunninghamella*, *Fusarium*, *Mucor phanerochaete*, *sporbolomyces* et *trichoderma* (Benchouk, 2018).

Quelques exemples de genres microbiens incluant des microorganismes agissant dans la biodégradation des hydrocarbures sont présentés dans le tableau

**Tableau 5** : exemples de microorganismes dépollueurs (Bouderhem A, 2011)

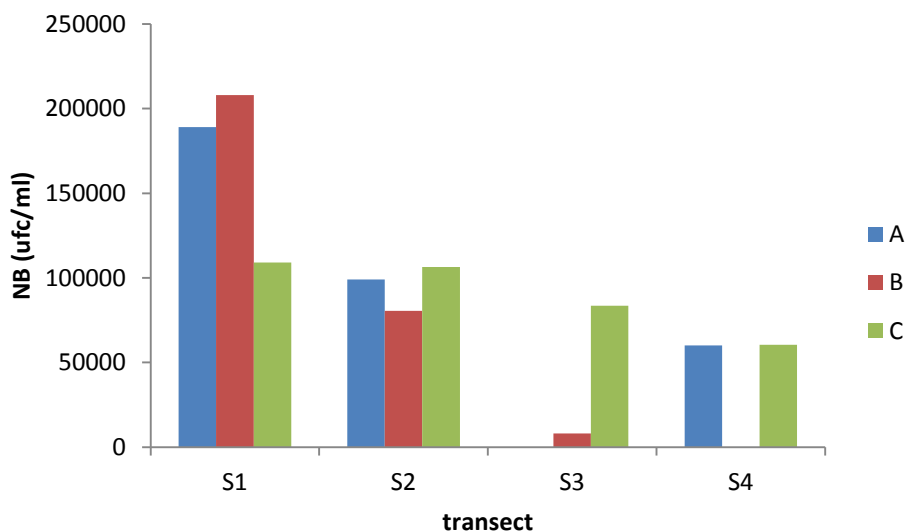
	Bactéries	Champignons
Gram -	Gram +	Aspergillus
Pseudomonas	Micrococcus	Penicillium
Xanthomonas	Arthrobacter	Acremonium
Acinetobacter	Rhodococcus	Fusarium Trichoderma
Flavobacterium		
Agrobacterium		

#### 4. Quelques résultats obtenus au laboratoire de Pathologie des écosystèmes

D'après les travaux effectués au laboratoire de recherche de pathologie des écosystèmes de l'université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou dans l'année précédente (2019), les résultats suivants ont été observés :

L'échantillonnage a été effectué au mois de Mars. Chikhaoui et Hettak (2019) ont entamé leur travail expérimental par le choix de trois transects. Chaque transect est subdivisé en 4 strates selon un gradient de pollution. Ces 4 strates sont séparées d'un 1m de distance. Les échantillons ont été extraits à l'aide d'un quadrat a une profondeur de 15cm de la surface. Ces derniers sont mis dans des sacs à zip et transportés à l'obscurité dans une glacière au laboratoire où ils sont conservés au frais

##### 4.1. Biomasse bactérienne du sol

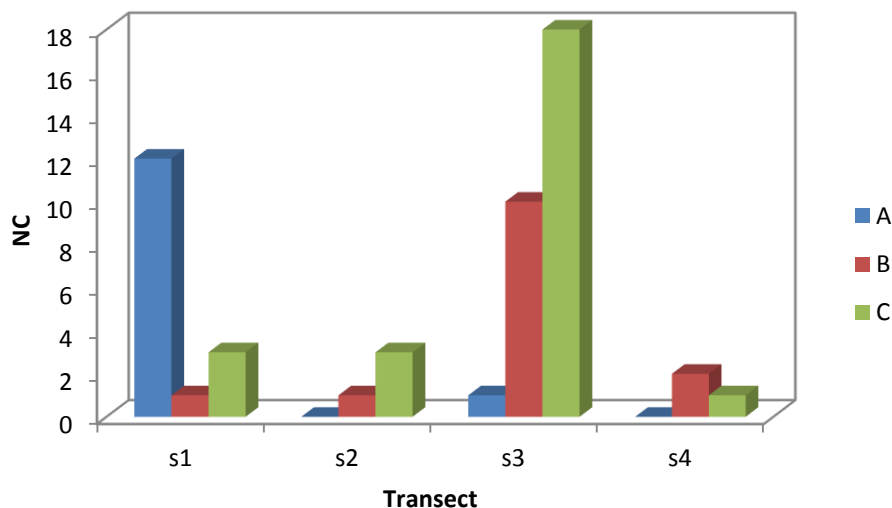


**Figure6:** Nombre de la microflore dans les trois transects A, B et C (Chikhaoui et Hettak, 2019)

Les résultats du dénombrement des colonies bactériennes sur gélose nutritive pour les différents échantillons de sols étudiés

D'après les résultats enregistrés, Chikhaoui et Hettak (2019) ont montré que le nombre de bactéries était important dans les strates proches de la source de pollution et diminution progressive en s'éloignant de la source. Ces résultats concordent à ceux de Dali et Iddir (2018) Qui ont montré que le nombre de bactéries est élevé dans le sol contaminé par rapport au sol non contaminé. L'apport des hydrocarbures dans le sol accroît de façon considérable les activités bactériennes (Bergue, 1986)

#### 4.2. Champignons



**Figure7:** Nombre de colonies de champignons dans les trois transects A, B et C (Chikhaoui et Hettak, 2019)

Chikhaoui et Hettak (2019) ont remarqué le nombre de colonies de champignons isolées est élevé dans la strate 3 pour la strate B et C, et aussi dans la strate 1 du transect A.

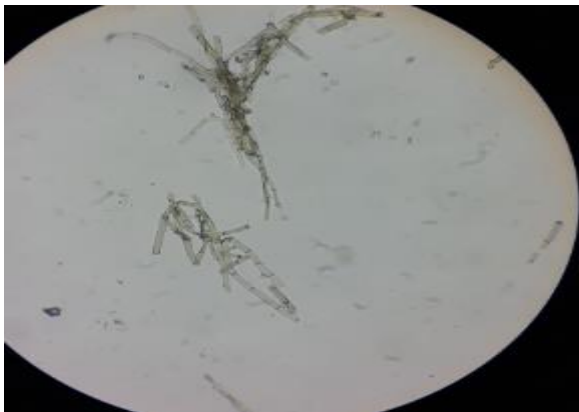
Selon Degranges et al (1977), le nombre de champignons de la parcelle polluée ne présente pas des variations importantes, par contre celui de la parcelle non pollué diminue sensiblement

Après le dénombrement de colonies des champignons Chikhaoui et hettak (2019) ont remarqué que le nombre de colonies est faible par rapport aux bactéries, ces résultats sont similaires à ceux de Dari (2013).

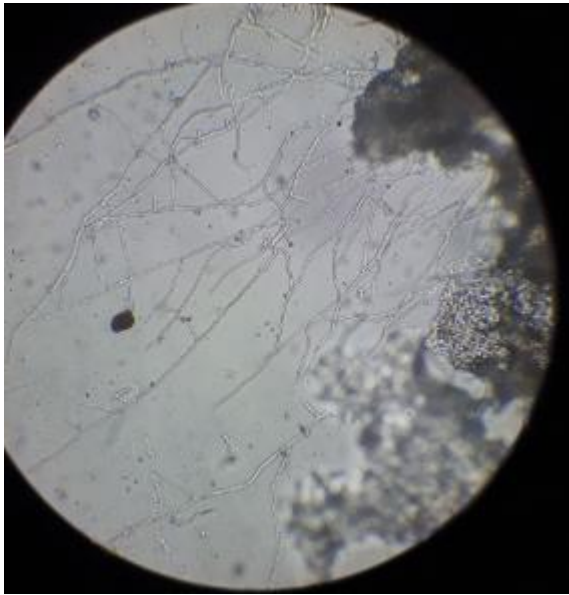
**4.2.1 Quelques Exemples des champignons :**



**Figure 1:** Rhizopus (Chikhaoui et Hettak, 2019)



**Figure 2:** Mycellia sterillia (Chikhaoui et Hettak , 2019)



**Figure 3 :** *Aspergillus niger* (Chikhaoui et hettak, 2019)

### Conclusion

Les hydrocarbures sont des polluants organiques très nocifs aussi bien pour l'homme que pour l'environnement. En effet, certains d'entre eux peuvent présenter une grande toxicité du fait de leurs pouvoirs mutagènes et/ou cancérogènes. Le raffinage, le stockage et le transport des produits pétroliers constituent des sources ponctuelles de la pollution des sols.

Les sols sont, avec les milieux aquatiques et l'atmosphère, une des trois composantes majeures de la biosphère. A ce titre, ils ont joué et jouent en permanence un rôle déterminant dans l'apparition et le maintien de l'activité biologique et de la biodiversité à la surface de la planète

Les sols exercent une fonction environnementale importante en contribuant à la qualité de l'environnement, non seulement en tant que partie de celui-ci, mais aussi par leur influence sur la qualité de l'air et de l'eau. La pollution des sols est le résultat des activités minières et d'industries lourdes comme l'industrie pétrolière ou l'industrie chimique. Ce qui met en péril la qualité des sols, les ressources naturelles et les êtres vivants. C'est pour cette raison qu'on s'intéresse aujourd'hui à la décontamination des sols pollués en utilisant des processus à avantage écologiques, de mise en œuvre facile et peu coûteux.

Dans un sol perturbé, les microorganismes régulent les processus de restauration qui permettent à la vie florale et faunique de recoloniser le sol car elle joue un rôle essentiel dans la décomposition de la matière organique. Pour cela, plusieurs auteurs considèrent que les propriétés microbiologiques du sol servent d'indicateurs utiles de la santé du sol. Ils ont constaté que les bactéries essentiellement les *Pseudomonas* sont capables de décomposer les HC par diverses voies métaboliques permettant la dégradation de plusieurs composés.

Les bactéries utilisent le pétrole comme source de carbone : ce qui peut expliquer leurs proliférations dans le sol contaminé par rapport au sol non contaminé. L'évolution de la biomasse microbienne dans les sols pollués par les hydrocarbures est le résultat de l'adaptation des bactéries aux conditions extrêmes (des températures en dessous de 0°C ou très élevées) et l'utilisation de xénobiotiques comme source de carbone et d'énergie.

D'après les résultats du dénombrement des bactéries, Chikhaoui et Hettak (2019) ont remarqué que le nombre de microorganismes varie d'une strate à une autre ; le nombre élevé est enregistré dans les strates polluées. Ce nombre diminue progressivement en s'éloignant de la source de pollution.

La bio remédiation constitue la meilleure solution à la décontamination des sites pollués aux hydrocarbures. Elle est relativement lente et peut durer plusieurs années, de nombreuses stratégies visent alors à l'accélérer parmi lesquelles retenons, la bio augmentation qui, consiste à enrichir un milieu pollué avec une ou plusieurs espèces de micro-organismes (bactériens, champignons) Il serait nécessaire de mener une caractérisation des hydrocarbures du sol étudié, identifier les souches de micro-organismes (bactéries, champignons) et tester le pouvoir dégradant des souches.

---

## Références bibliographiques

### A

**ABDELLY C., (2007).** Bioremédiation /Phytoremediation. Thèse de doctorat. Institut supérieur de l'éducation et de la formation continue, Tunis.

**ADEME / ADIT (2006)** "Traitement biologiques des sols pollués : recherche et innovation", (Etude réalisée pour le compte de l'ADEME par L'ADIT –Société Nationale d'Intelligence Stratégique) ,92p.

**ALEXANDER M., (1977).** Introduction to soil microbiology. J Wiley and Sons Inc. 2<sup>ème</sup> Edition, NY, 467p.

**AMIARD J.C., (2011).** Les risques chimiques environnementaux .Ed Lavoisier, Paris ,782p

**AMIRI N., (2013).** Ecotoxicité des hydrocarbures sur le sol est un essai décontamination. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en biologie, Université Mouloud Mammeri de Tizi- ouzou, Algérie.

**ATLAS R., BARTHA R., (1992).** Microbial ecology .Fundamentals and applications .3<sup>rd</sup> Edition, The Benjamin /Cumming Publishing Company, San Francisco California (USA), 563p.

### B

**BAIZE D., (2000).** Guide des analyses courantes en pédologie .Ed INRA, Paris ,257p.

**BENCHOUK A., (2018).** Bio remédiation des sols pollués de pétrole par les micro-organismes indigènes et amélioration génétique de leur pouvoir. Université d'Ibn Badis Mostaganem, faculté des sciences de la nature et de la vie .

**BENYAHIA ET MAHDAOUL; (2012).** La pollution des sols par les hydrocarbures .Mémoire magister. Université Abderrahmane Mira de Bejaia, Algérie.

**BERGUE J et Mérienne D., (1986).** La pollution des sols par les hydrocarbures. Laboratoire régionale de ROUEN. Réf : 3141, pp 57-66.

**BERTNARD J.C., CAUMETTE P. Et LEBARON P., (2011).** Ecologie Microbienne: Microbiologie Des milieux naturels. ED, Presse universitaire L'addour, 1002p

---

**BOUDERHEM A ., (2011) .** Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la bio détection des sols pollués par les hydrocarbures .Mémoire Magister, Université Kasdi Marabah Ouargla, Algérie.

**BOUSSEBOUA H., (2005).** Elément de microbiologie. Campus –club, Algérie (2ème Edition), 179-199p.

## C

**COLOMBANO S, SAADA A, VICTOIR E, GUIERIN V ., (2014).** Nature des produits pétroliers d'origine du vieillissement : tentative de l'identification de la source via la prise en compte des impacts et analyse de l'âge approximatif des déversements. Rapport final, 166p.

**CALVET J., (2003).** Le sol propriétés et fonction. Ed Dunod, France, 456p.

**CERNIGLIA C.E., (1992).** Biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons .Biodegradation 3:351-368.

**CHAIANEU C.H., MORE J .L et OUDOT j., (1996).** Land treatment of oil-based drill cutting in an agricultural soil .journal of environment quality, vol: 25, p 858-867.

**CHANTIGNY M & ANGERS D. , (2005).** Activité microbiologique et qualité des sols : quoi de neuf sous nos pieds. Édition CRAAQ, p 2-10.

**CHAUDE J ET LECLE.RC., (1999).** Ecophysiologie végétale ,283p.

**CHIKHAOUI D et HETTAK L., (2019).** Effets des hydrocarbures sur les propriétés physiques, chimiques et microbiologiques du sol des stations-services. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi ouzo, Algérie.

**Clément M., PIELTAIN F., (2003).** Analyse chimique du sol .Edition TEC&DOC ,387p.

**COLIN F., (2000).** Pollution localisée des sols et sous –sols par les hydrocarbures et par les solvants chlorés .Edition TEC et DOC, 417p.

## D

**DEPRINCE A., (2003).** La faune du sol : diversité, méthodes d'étude, fonctions et perspectives. Le courrier de l'environnement, n°49, juin 2003.

---

**DJERBAOUI A. ; (2011).** Utilisation de souches bactériennes autochtones dans la production de bio surfactant et la bio remédiation des sols de Hassi Messaoud contaminés par les hydrocarbures. Diplôme de Magister de science de la nature et de la vie, microbiologie appliquée, Ouargla.

**DOMMEGUES Y. MANGENOT F ., (1970).** Ecologie microbienne du sol. Ed Masson, paris, 796p.

**DUCHAUFOUR P., (2001).** Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement .6<sup>ème</sup> Edition DUNOD, Paris ,331p.

## E

**ESHIGHI MALAYRI B., (1995).** Décontamination des sols contenant des métaux lourds à l'aide de plantes et de microorganismes. Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1 (France).

## F

**FATTAL P.; (2008).** Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse Universitaire de Rennes ,498p.

**FEZANI S ET KHIDER F., (2007).** Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes, leurs caractérisations et leurs effets sur la microflore du sol. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie.

## G

**GABET S ., (2004).** Remobilisation d'hydrocarbures Aromatiques polycycliques (HAP) présents dans les sols contaminés à l'aide d'une tension d'origine biologique. Thèse de doctorat, Université de Limoges

**GAVIGLIO C., (2013).** Gestion des sols viticoles. Edition France agricole, p1.

**GENDRAULT S., (2004).** Etude d'un traitement combiné bio-physico-chimique pour la décontamination des eaux polluées en atrazine. Thèse de Doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon (France).

**GIRARDM C., WALTER C., REMY J .C ., BERTHLIN J .ET MOREL.J.I., (2005).** Sol et environnement. Edition DUNOD, Paris ,529p.

---

**GOBAT M. J., ARAGNON M. ET MATTHEY W. , (2010).** Le sol vivant : bases de pédologie –biologie des sols. Presses Polytechniques et Universitaires. 3<sup>ème</sup> édition Romandes ,817p.

**GOMEZ D., (2010).** Etude approfondie de l'influence de la nature chimique des fine polluants d'hydrocarbure sur le calcule de risque sanitaire. Ecole de haute étude en santé publique ,74p.

## H

**HALITIM A., (1988).** Les sols des régions arides d'Algérie. Edition .O. P. U, Alger, 384p.

**HANNA k ., (2004).** Etude de faisabilité de l'Utilisation de molécules-cagel dans la dépollution des sols. Solubilisation et extraction de polluants organiques par les cyclo dextrines. Thèse de Doctorat. Ecole Doctorale, Chimie de Lyon.

**HARITASH A.k.et KAUSHIK C.P. ; (2009).** Biodegradation aspects of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs): A review. Journal of hazardous Matériels, Vol:169, p1-15

**HASSAN SHAHIAN M ET CAPPELLO S (2013).** Grude oil biodegradation in the marine environments. Biodegradation6engineering and technology

**HENIN S., Gras R ET Monnier G., (1969).** L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. Edition Masson et Cie, paris ,332p

**HILLEL D., (1984)-l'eau et le sol .principe et processus physique.** Ccobaye, libraire-éditeur, Louvain la neuve, p288.

**HUBER R., (2011).** Origins: Spéculations on the cosmos, Earth and mankind, p 224.

## K

**KESSEL J., (2015).** OR6-001-S100A12 as pro-inflammatory Art, 2p.

**KHELLOUT SETTOUF. , (2004-2010).** Impact de la pollution par le pétrole sur la stabilité structurelle d'un sol, p13.

**KOLLER E., (2004).** Traitement des Pollutions Industrielles (eau, air, déchet, sol, boues) Edition DUNOD, paris, p424.

---

## L

**Lahlou S., OUADIA M., le BISSONNAIS Y et MRABET R., (2005).** Modification de la porosité du sol sous les techniques culturales de conservation en zone semi-aride Marocaine .Etude et Gestion des sols 12 :69-76.

**LAMPI M., (2005).** Environnemental photoinduced toxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons.Occurence and toxicity of photomodified PAHs and predictive modeling of photoinduced toxicity .Thèse du Doctorat. Université Waterloo Ontario de Canada .

**LECOMTE P., (1998).** LES Sites Pollués, traitement des sols et des eaux souterraines. 2ème édition Lavoisier TEC &DOC.

**Lemière B., SERGUIN J. J., le GUERN C ., GUYONNET D BARANGER pH ., (2001).** guide sur le comportement des pollutions dans les sols et les nappes. BRGM/RP -50662-FR.

## M

**MANSOT J., (1996).** Les accidents dans les stations-services face aux risques. N°319, INERIS.

**MARCHALR., PENET M., SOLANO-SERENA F., VANDECASTELE J. P., (2003)** .Gasoline and diesel oil biodegradation .oil &gas science and technology-rev .IEF,VOL 58 .Edition Techno, pp :441-448.

**METTING FB JR., (1992).** Soil microbial ecology applications in agricultural and environmental magement. Marcel Dekker Inc, NY, 646pp.

**MORGAN P.; WATKINSON R .J., (1994).** Biodegradation of components of petroleum. Biochemistry of microbial degradation .VOL.2 N°1.PP 1-31.

## N

**NOUMEUR, S., (2008).** Biodégradation du 2.4-dichlorophénol par le microbiote tellurique de la région de Hamla (Batna) .Mémoire de Magister, Université Mentouri, Constantine.

---

## O

**ONOJAKE M. C., OSUJI L .C., (2012).** Assessment of the physio chemical properties of hydrocarbon contaminated soil. Archives of applied science research .VOL .4.Pp:48-58.

## P

**PAUL E. & CLARK F .E.; (1996).** Soil microbiology and biochemistry. 2<sup>nd</sup> edition. Academic Press San Diego, CALIFORNIA (USA), p340.

**PELMONT, J. (1995).** Bactéries et environnement-adaptation biologique, tome1, OPU, P875

**PICOT A. et MONTANDO F., (2013).** Ecotoxicochimie appliquée aux hydrocarbures .Ed Lavoisier, paris, 668p

**PIEDRAFITA M ., (2007).** La pollution ponctuelle des sols : le cas des stations-services dans la région de Bruxelles-capitale. Mémoire Diplôme d'Etudes spécialisées en Gestion de l'environnement, Université libre de Bruxelles, Bruxelles.

**PREVOST G., (2006).** La pierre sculptée ,640p

## Q

**QUENEA K., 2004.** Etude structural et dynamique des fractions lipidiques et organiques réfractaires de sols d'un chrono séquence foret /mais (CESTAS, sud-ouest de la France). Thèse de Doctorat, Université de Paris 6 (France).

## R

**RAMADE F., (1992).** Précis d'éco toxicologie. Edition Masson, Paris, 300p.

**RAMADE F., (2007).** Introduction à l'éco toxicologie fondements et applications. Edition Tec et Doc Lavoisier.

**Rivière J.L., (1998).** Evaluation du risque écologique des sols pollués. Edition Lavoisier Tec et Doc, Paris.

**ROBERT, M., (1996).** .Le sol : interface dans l'environnement, ressource pour le développement, Paris : Masson, 244p.

**ROCHER V., MOILLERON R., (2003).** Identification des sources d'hydrocarbures en milieu urbain : approche automatisée (centre d'enseignement et de recherche sur l'eau, la ville et l'environnement, Université Paris XII-val de marne, Créteil).

---

**ROGER PA, GARCIA J-L., (2001).** Introduction à la microbiologie du sol. Polycopié de cours. Université de Provence, Université de la méditerranée, Ecole supérieure d'ingénieurs de Lumi, 192p.

**ROUQUEROL T., Amir H., Amir A., (1987).** Effet de l'épandage de résidu pétrolier de raffinerie sur l'évolution de la matière organique. L'activité de densité microbienne d'un sol agricole, revue d'écologie et de biologie du sol ,156p

## S

**SAAdA A., NOWAKC. COQUEREAU N., (2005).** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures. Rapport intermédiaire. Résultats de la phase 1. Rapport du BRGM, RP53739-FR ,107p.

**SAHNOUN R., (2014).** Analyse et caractérisation physico-chimique des sols d'Entreposage de la station de pétrole. .Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

**SOLTANI M., (2004).** Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre souches Gram négatif hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat de l'université de paris.

**SOLTNER D., (1988).** Les bases de la production végétales. Le sol, le climat, la plante. Tome1.16ème édition Coll. Science et technique agricoles, paris ,466p.

**SPEIGHT J.G., (2014).** The chemistry and technology of petroleum-fifth. Edition CRC Press, Etats-Unis, 984p.

**SULAIMAN A ., ALRUMMAN S .A ., DOMINIC B .,STRANDING A ., GRAEME I .P., (2015).** Effects of hydrocarbon contamination on soil microbial community and enzyme activity. Journal of King Saud University –Science .Vol :27: p 31-4.

## V

**VERDIN, A ., LOUNES HADJ SEHERAOUI ,A ., & ROGER ,D., (2004).** Les agents de bio remédiation des sols pollués par les hydrocarbures polycyclique aromatique .Revue francophone d'écologie industrielle. Laboratoire de mycologie /phytopathologie /environnement (M.P.E.)- Calais. Université du Littoral (U.L.C.O) – côte d'Opale (N37) ,p09.

**Résumé :**

L'un des principaux problèmes environnementaux est la pollution du sol par les hydrocarbures. Ces derniers constituent une menace très sérieuse pour l'environnement, ils proviennent généralement du déversement d'hydrocarbures lors du remplissage des stocks de la station ou de la distribution des carburants.

La bio-remédiation est l'un des moyens biologiques qui permet de détruire ou de rendre le polluant moins toxique ou non toxique, elle fait appel aux agents biologiques tels que les micro-organismes. Tout en limitant l'utilisation excessive de produits chimiques.

L'évolution de la biomasse microbienne dans les sols pollués par les hydrocarbures est le résultat de l'adaptation des bactéries aux conditions extrêmes (des températures en dessous de 0°C ou très élevées) et l'utilisation de xénobiotiques comme source de carbone et d'énergie.

**Mots clés :** pollution des sols, bio-remédiation, microorganismes.

**Abstract**

One of the main environmental problems is the pollution of the soil by oil. These constitute a very serious threat to the environment, they generally come from the spill of oil during the filling of the stocks of the station or the distribution of fuels.

Bio-remediation is one of the biological means that destroys or makes the pollutant less toxic or non-toxic, it uses biological agents such as microorganisms. While limiting the excessive use of chemicals.

The evolution of microbial biomass in soils polluted by hydrocarbons is the result of the adaptation of bacteria to extreme conditions (temperatures below 0°C or very high) and the use of xenobiotics as a source of carbon of energy

**Key words:** soil pollution, bioremediation, microorganisms