



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة زيان عاشور – الجلفة

Université Ziane Achour - Djelfa

كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté des Sciences de la Nature et de la vie

قسم علوم البيولوجيا

Département des Sciences Biologiques



Projet de fin d'étude

En vue de l'obtention du Diplôme de Master 2

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Écologie Végétale et Environnement

EFFET ECOTOXICOLOGIQUE DES HYDROCARBURES (GASOIL) SUR LES PLANTES LEGUMINEUSES (LA FEVE *Vicia faba*)

Présenté par : DIFI Zouina

BENMAHDJOUBA Nedjma

Les membres de jury :

Président	Mr AMRAOUI Abdelbaki	MCA	UZA-Djelfa
Promoteur	Mr MORTET Ahmed	MAB	UZA-Djelfa
Examineur	Mme DEHBI Faouzia	MAA	UZA-Djelfa
Examineur	Mme TOUIL Souhila	MCB	UZA-Djelfa

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous remercions tout d'abord ALLAH qui nous a donné la force et le courage de compléter ce travail.

*C'est avec beaucoup de reconnaissance que nous adressons mes sincères remerciements à Monsieur **MORTET Ahmed** pour avoir accepté d'encadrer ce travail, pour la confiance qu'il nous a fait et pour les conseils qu'il nous a accordé tout au long de la réalisation de ce modeste travail.*

Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et qu'ils retrouvent à travers ce mémoire le fruit de leurs longues années de travail.

Enfin, Nous remercions nos familles et tous nos amis et collègues et tous qui ont participé au succès de ce travail de près ou de loin.

Merci à tous.

Dédicaces

Tout d'abord, Je dédie ce travail :

*A ma très chère mère Oumssadd Moubarek qui est la lumière de ma vie, et qui
a attendu avec patience le fruit de sa bonne éducation ;*

*A mon très cher père Abderrahman qui m'a éclairé mon chemin et qui m'a
encouragé et soutenu tout au long de mes études ;*

Que Dieu leur donne une bonne santé et une longue vie.

A mes deux merveilleuses grands-mères ; Avec mes souhaits d'une longue vie.

*A mes deux grands-pères, que Dieu leur fasse miséricorde et leur mette au
paradis.*

A mon cher frère : Hadi.

A mes chers sœurs : Karima ; Amina ; Yasmin ; Saida ; Rania.

*Merci pour vos toutes prières et votre soutien sans faille. Que l'esprit d'amour
règne toujours au milieu de nous.*

A tous ma grande famille.

A tous mes amis et tous ceux qui est cher.

A tous mes enseignants.

*Je ne citerai pas de nom pour qu'il n'y a pas de jaloux et de n'oublier
personne.*

A mon encadreur Mr Mortet Ahmed.

*A mon amie Nedjma avec qui j'ai partagé ce travail et toute sa respectueuse
famille.*

A tous ceux qui m'aime, merci pour tous.

A tous mes collègues et ma promotion de master II : 2020-2021.



Zouina

Dédicaces

Je tiens à dédier ce travail :

Aux êtres les plus chers à mon cœur dans ce monde, mes parents en hommage à leurs sacrifices. Je leur demande de me pardonner pour tous les soucis que je leur ai causés. Que Dieu leur donne santé et longue vie.

A celui qui m'a toujours soutenu moralement et matériellement au cours de mes études, notamment au cours de mes moments difficiles, à qui j'ai éprouvé un profond respect. Mon adorable père.

A celle qui a sacrifié tout ce qu'elle a de cher pour me prodiguer une éducation, un soutien, une assistance et un encouragement pour enfin devenir ce que je suis maintenant. Ma chère mère.

A tous mes chers frères.

A tous mes chères amies sans exception.

A tous les gens de ma promotion, enseignants et étudiants.

A toutes les personnes qui me sont très chères.

Nedjma

Résumé

Les composés pétroliers sont considérés comme l'un des polluants les plus courants dans l'environnement en tant que facteur affectant les plantes. C'est pourquoi notre étude met en évidence l'effet toxique des hydrocarbures sur les légumineuses.

Les résultats de l'étude ont montré que la pollution par les hydrocarbures (comme l'huile de moteur par exemple) augmente le taux de germination, contrairement à d'autres hydrocarbures (comme le gasoil et le pétrole brut) qui réduisent le temps de germination et augmentent le taux journalier.

Les informations tirées des études de la pollution par les hydrocarbures varient d'une espèce à l'autre. En parallèle, les légumineuses (et en particulier la fève), comme des phytoremédiateurs, ont prouvé qu'elles ont une grande capacité à éliminer cette pollution. Grâce au système racinaire développé, ces dernières vont provoquer des changements dans les propriétés physiques, les propriétés chimiques et biologiques du sol, permettant ainsi d'améliorer l'état de l'environnement avec l'évolution microbienne et naturelle de la végétation.

Mots clés : Hydrocarbures, Gasoil, Pétrole brut, Pollution, Légumineuses, Phytoremédiation.

Abstract

Petroleum compounds are considered one of the most common pollutants in the environment as a factor affecting plants. This is why our study highlights the toxic effect of hydrocarbons on legumes.

The results of the study showed that pollution by hydrocarbons (such as motor oil) increases the germination rate, unlike other hydrocarbons (such as gasoil and crude oil) which reduce the time to germination and increase the daily rate.

Information from studies on oil pollution varies from species to species. At the same time, legumes (and in particular broad bean), as phytoremediators, have proven that they have a great capacity to eliminate this pollution. Because of the developed root system, this latter will cause changes in the physical, chemical and biological properties of the soil, thus improving the state of the environment with the microbial and natural evolution of the vegetation.

Key words : Hydrocarbons, Gasoil, Crude oil, Pollution, Legumes, Phytoremediation.

ملخص

تعتبر المركبات البترولية من أكثر الملوثات شيوعًا في البيئة كعامل مؤثر على النباتات، وهذا ما يجعل ذلك سببا في تسليط الضوء للتأثير السام للهيدروكربونات على البقوليات من خلال دراستنا الحالية. أظهرت نتائج الدراسة أن التلوث بالهيدروكربونات (مثل زيت المحرك مثلا) يزيد من معدل الإنبات على عكس الهيدروكربونات الأخرى (مثل الديزل والنفط الخام) والتي تقلل من وقت الإنبات وتزيد المعدل اليومي له.

تختلف المعلومات المستمدة من دراسات التلوث الهيدروكربوني من نوع لآخر. في الوقت نفسه، أثبتت البقوليات (وخاصة الفول)، كمعالجات نباتية، أثبتت أن لديها قدرة كبيرة على القضاء على هذا التلوث. بفضل نظام الجذر المتطور لديها، يتسبب هذا الأخير في تغييرات في الخصائص الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية للتربة، وبالتالي تحسين حالة البيئة العامة مع التطور الميكروبي والطبيعي للنباتات.

الكلمات المفتاحية: الهيدروكربونات، الغازوال، البترول، التلوث، البقوليات، المعالجة النباتية.

Liste des tableaux

Tableau 1: Principaux polluants retrouvés sur les sites pollués (Zmirou et al., 2003). -----	10
Tableau 2: Polluants du sol et leurs sources (Calvet, 2003). -----	13
Tableau 3: Les principales dégradations du sol et leurs effets (Glorennec, 2005). -----	13
Tableau 4: Propriétés physiques des principaux hydrocarbures pétroliers (Fingas, 2012). --	15
Tableau 5: Typologie simplifiée des principaux composés hydrocarbonés (Colin, 2000). --	16
Tableau 6: Principales propriétés physico-chimiques du gasoil (INRS, 2006 ; RA, 2017). -	18
Tableau 7: Evolution de la consommation des légumineuses kg/an/personne (Roudaut et Lefrancq, 2005).-----	26
Tableau 8 : Les maladies de la féverole. -----	32
Tableau 9: Différent traitement de bioremédiation (Vidali, 2001). -----	43
Tableau 10: Quelques exemples d'études de phytoremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures.-----	47
Tableau 11: Les principaux essais de phytoremédiation réalisés à l'UMMTO. -----	48

Liste des figures

Figure 1: Processus influençant le devenir des polluants dans les sols (Maes et al., 2007). -	14
Figure 2: Composition du gasoil (Marchal et al., 2003). -----	17
Figure 3 : Cycle de fixation d'azote (Pertet, 1998).-----	23
Figure 4: Dialogue moléculaire entre la plante et la bactérie lors de mise en place d'une association symbiotique fixatrice d'azote (Lezrek, 2008).-----	24
Figure 5: La production mondiale de quelques légumineuses (FAO, 2016). -----	25
Figure 6: Principaux états membres cultivant des légumineuses à graines et principales espèces cultivées (Schneider et al., 2015). -----	25
Figure 7: (a) Graines de <i>Vicia faba major</i> , (b) Graines de <i>Vicia faba minor</i> , (c) Graines de <i>Vicia faba equina</i> (Nuessly et al., 2004). -----	27
Figure 8 : La forme de <i>Vicia faba L</i> (Wojciechowski et al., 2004). -----	28
Figure 9: Caractéristiques botaniques d'une plante de féverole (<i>Vicia faba L.</i>) (Larousse agricole, 2002). -----	29
Figure 10: Stades de germination (Weber und Bleiholder et al., 1990). -----	31
Figure 11: Chaîne de transmission des polluants organiques chez les êtres vivants (Harmens et al., 2013). -----	35
Figure 12: Cycle des polluants dans le système sol-plante par différentes voies de transformation (Eriksson et al., 2003). -----	36
Figure 13: Les différents mécanismes de la phytoremédiation des sols (Alchimia, 2016). --	45
Figure 14: Les principales voies de prélèvement des molécules organiques par les plantes (Collins et al., 2005).-----	49

Liste des abréviations

- % : Pourcentage.
- ° : Degré.
- °C : Degré Celsius.
- **ADN** : Acide désoxyribonucléique.
- **ARN** : Acide ribonucléique.
- **BTEX** : Benzène, Toluène, Ethylbenzène, Xylène.
- **C** : Carbone.
- **Ca** : Calcium.
- **CE** : Conductivité électrique.
- **Cm** : Centimètre.
- **CO₂** : Dioxyde de carbone.
- **CO** : Carbone organique.
- **COV** : Composé organique halogéné volatil.
- **etc** : Et cetera / et cætera.
- **FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- **Fe** : Fer.
- **FSN** : Fixation symbiotique de l'azote atmosphérique.
- **g** : gramme.
- **G** : Gasoil.
- **H₂O** : eau distillée.
- **H** : Hydrogène.
- **HAM** : Hydrocarbures aromatiques monocycliques.
- **HAP** : Hydrocarbures aromatiques polycycliques.
- **HC** : Hydrocarbures.
- **HCP** : Hydrocarbures pétroliers.

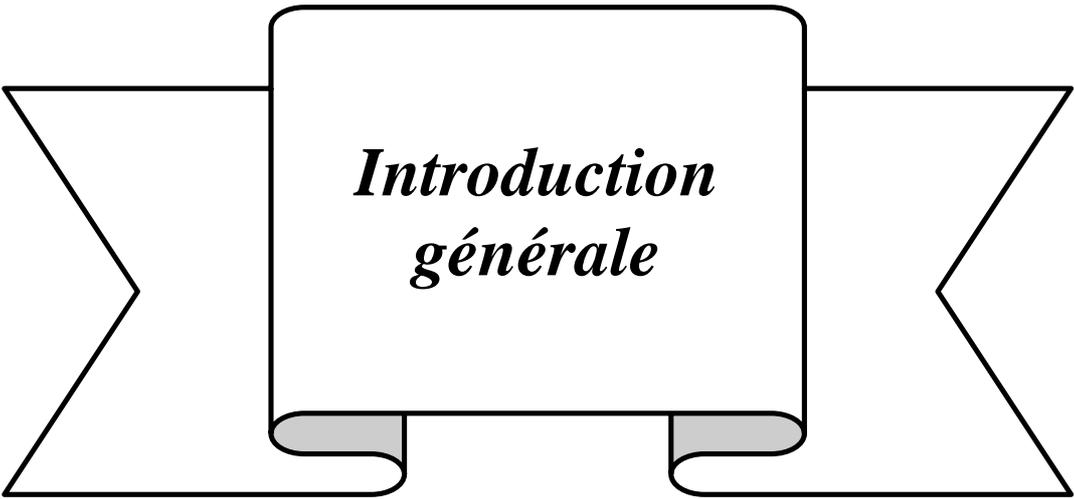
- **HM** : Huile de moteur.
- **K** : Potassium.
- **Kg** : kilogramme.
- **L** : Litre.
- **ml** : Millilitre.
- **Mn** : Manganèse.
- **MO** : Matière organique.
- **N** : Azote.
- **N₂** : Azote moléculaire.
- **O₂** : Oxygène.
- **P** : Phosphore.
- **Pb** : Plomb.
- **PCB** : Polychlorobiphényle.
- **Pé** : pétrole.
- **pH** : Potentiel d'Hydrogène.
- **T°** : Température.
- **Zn** : Zinc.

Table des matières

Remerciements	III
Dédicaces	IV
Dédicaces	V
Résumé	VI
Abstract	VII
ملخص	VIII
Liste des tableaux	IX
Liste des figures	X
Liste des abréviations	XI
Table des matières	XIII
Introduction	1
Chapitre I : Les hydrocarbures	4
1. Définition des hydrocarbures	4
2. Classification des hydrocarbures	4
2.1. Hydrocarbures aliphatiques	4
2.1.1. Les hydrocarbures aliphatiques saturés	4
a. Les alcanes linéaires	4
b. Les alcanes ramifiés	5
c. Les cycloalcanes	5
2.1.2. Les hydrocarbures aliphatiques insaturés	5
a. Les oléfines	5
b. Les acétyléniques	5
2.2. Les hydrocarbures aromatiques	5
2.2.1. Les hydrocarbures mono-aromatiques (HAM)	6
2.2.2. Les hydrocarbures poly-aromatiques (HAP)	6
2.3. Les composés polaires	6
2.4. Les asphaltènes	7
3. Source de pollution par les hydrocarbures	7
3.1. Sources naturelles	7
3.2. Sources anthropiques	7
4. Devenir des hydrocarbures dans l'environnement	8
4.1. Evaporation	8
4.2. Solubilisation	8
4.3. Emulsification	8
4.4. Sédimentation	9
4.5. Photo-oxydation	9
4.6. Biodégradation	9
5. Pollution des sols par les hydrocarbures	9

5.1. Origine de la pollution des sols par les hydrocarbures -----	10
5.2. Source des hydrocarbures dans le sol -----	11
5.2.1. Les activités industrielles -----	11
5.2.2. Les activités urbaines -----	11
5.3. Les principaux polluants du sol -----	11
5.3.1. Composés organiques -----	11
5.3.2. Composés inorganiques -----	12
5.4. Comportement et devenir des hydrocarbures dans le sol -----	13
6. Caractéristiques physico-chimiques des hydrocarbures -----	15
6.1. Densité -----	15
6.2. Viscosité -----	15
6.3. Solubilité -----	16
6.4. Volatilité -----	16
7. Exemple de principaux hydrocarbures utilisés (le Gasoil) -----	17
Chapitre II : Les légumineuses -----	20
1. Généralités : -----	20
2. Classification botanique -----	20
2.1. Mimosacées -----	20
2.2. Césalpiniacées -----	21
2.3. Papilionacées -----	21
3. Caractéristiques botaniques -----	21
4. La fixation biologique de l'azote atmosphérique -----	22
4.1. Les fixations symbiotiques d'azotes -----	22
4.2. Mise en place de la nodulation chez les légumineuses -----	23
5. Production et consommation de légumineuses -----	24
5.1. Production mondiale -----	24
5.2. Consommation mondiale -----	26
5.3. Légumineuses en Algérie -----	26
6. Exemple de principaux légumineuses [La FEVE (fêverole) : <i>Vicia faba</i> (L.)] -----	26
6.1. Présentation de la fève -----	26
6.2. Classification botanique de la fève -----	28
6.3. Caractéristiques de la fève -----	28
6.3.1. Caractères botaniques -----	28
6.3.2. Caractères culturels -----	29
6.4. Cycle végétatif de la fève -----	30
6.5. Maladies de la fève -----	32
Chapitre III : Les effets écotoxicologiques et les méthodes de décontamination -----	34
1. Impact sur le sol -----	34
1.1. Effet sur les propriétés physiques -----	34

1.2. Effet sur les propriétés chimiques -----	34
1.3. Effet sur les propriétés biologiques-----	35
2. Impact sur l'homme -----	35
3. Impacts sur l'environnement -----	36
4. Impact sur le végétale-----	37
4.1. Impact sur les légumineuses (la fève en particulier)-----	37
5. Les méthodes de remédiation des sols contaminés par les hydrocarbures-----	41
5.1. Méthodes physiques -----	41
5.2. Méthodes chimiques -----	42
5.3. Méthodes thermiques -----	42
5.4. Méthodes biologiques -----	42
5.4.1. Bioremédiation -----	42
5.4.2. Phytoremédiation -----	43
5.4.2.1. Les avantages-----	43
5.4.2.2. Les inconvénients-----	44
5.4.2.3. Les mécanismes de la phytoremédiation-----	45
5.4.2.3.1. Rhizofiltration-----	46
5.4.2.3.2. Phytoextraction -----	46
5.4.2.3.3. Phytostabilisation-----	46
5.4.2.3.4. Phytodégradation -----	46
5.4.2.3.5. Phytostimulation-----	46
5.4.2.3.6. Phytovolatilisation -----	46
5.4.2.4. Les travaux de recherche effectués sur la phytoremédiation-----	46
5.4.2.4.1. Les recherches effectuées dans le monde-----	46
5.4.2.4.2. La recherche effectuée en Algérie -----	48
5.4.2.4.3. Les légumineuses dans la dépollution-----	49
Conclusion-----	52
Références Bibliographiques -----	55



***Introduction
générale***

Introduction

Depuis les siècles passés à ce jour, la pollution est un problème influent subi par les pays du monde, car c'est l'un des risques les plus chroniques qui pèsent sur l'écosystème (**Soltani, 2004**).

Parmi ces phénomènes, la pollution par les hydrocarbures a une importance de plus en plus grande sur les plans environnementaux, sanitaires et économiques. Cette pollution peut avoir un impact sur la santé humaine et l'équilibre des écosystèmes aussi bien marins que continentaux (**Mbonigaba et al., 2009**). En effet, de nombreux dégâts réels ont été constatés lors d'accidents (fuites de pétrole), de rejets ou de déversements volontaires, pouvant entraîner des catastrophes écologiques irréversibles (**Soltani, 2004**).

L'augmentation constante de l'utilisation des hydrocarbures a endommagé le sol qui est soumis à un épuisement continu sous plusieurs formes telles que l'érosion du sol, l'épuisement des nutriments (**Odat et Alshammari, 2011**) et la diminution du pH du sol et de la teneur en quelques sels minéraux (**Chaineau et al., 1996**), ce qui présente un danger lors d'un contact direct avec l'homme ou l'animal ou indirect par la chaîne alimentaire, par le phénomène de la bioaccumulation avec le piégeage par les végétaux et les animaux des polluants ou de leur produits de dégradation jusqu'à des teneurs atteignant les seuils de toxicité (**Scriban, 1999**). Le contact entre le produit pétrolier et la surface foliaire des végétaux va entraîner des dégâts qui vont dépendre de la nature du produit lui-même et de la dose appliquée (**Bergue et Mérienne, 1986**).

Les hydrocarbures sont très répandus dans l'environnement, leur principale source est le pétrole, mais ils sont aussi formés par des procédés biologiques ou de synthèse (**Weisman, 1998**). Ils entraînent une perturbation dans la teneur organique des sols (**Wyszkowski et Ziolkowska, 2008**) et donc peuvent endommager de façon permanente leurs caractéristiques (ce qui peut aboutir à des sols peu fertiles). Par ailleurs, le problème majeur rencontré dans les sols pollués par les produits pétroliers est l'atteinte de la nappe phréatique affectant ainsi la qualité des eaux (**Scow, 2003**). Par conséquent, un déséquilibre nutritionnel peut avoir eu lieu dans les semis aux sols contaminés, ce dernier peut rendre défavorable à la survie et le développement de la plante entraînant un retard dans la germination, une induction d'une chlorose précoce, une réduction dans le tir et la longueur des racines (**Minai-Tehrani et al., 2008/2012**) et même une très faible production de biomasse végétale (**Edema et al., 2009**).

Introduction Générale

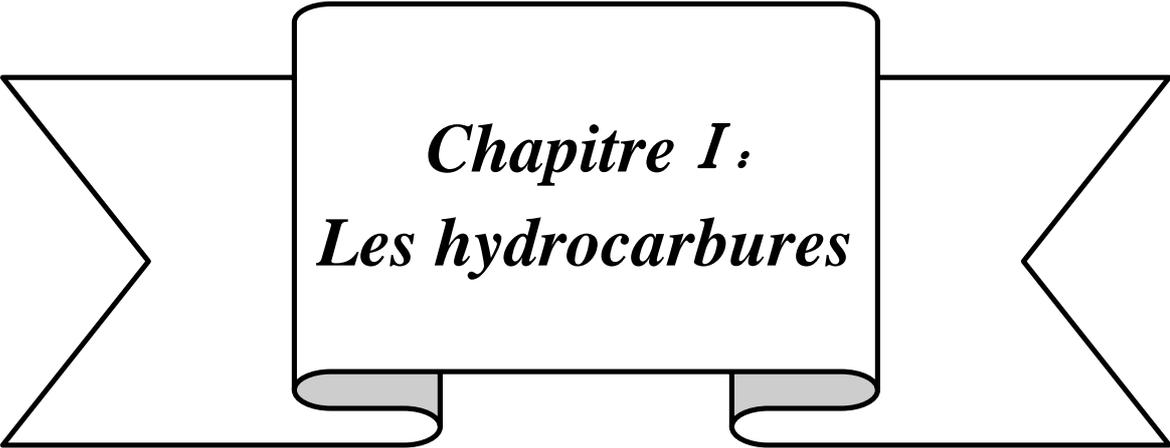
Il est donc nécessaire de trouver des outils capables d'aborder de manière aussi globale et intégrée que possible ces problèmes, dans le souci d'améliorer les connaissances et le contrôle des phénomènes mis en cause. La perception de ces problèmes environnementaux a entraîné de nombreux efforts pour nettoyer l'environnement (**Leahy et Colwell, 1990**). Un de ces efforts est la phytoremédiation qui est une technique nouvelle, respectueuse de l'environnement et promotrice pour éliminer de nombreux contaminants tels que les hydrocarbures (**Luepromchai et al., 2007**).

L'action des végétaux sur la dégradation des hydrocarbures peut se faire de manière directe ou indirecte. En effet, les racines produisent des enzymes de type peroxydase, capables d'oxyder les hydrocarbures (**Jones et al., 2004**). Le transfert des polluants organiques aux parties aériennes de la plante représente un enjeu important pour la sécurité de l'alimentation humaine et animale (**Gao et Collins, 2009**). Les critères pour mesurer l'efficacité d'une plante à dépolluer des sols contaminés sont sa capacité à croître sur le sol contaminé et sa capacité à absorber de grandes quantités de polluants voire à les dégrader.

Les légumineuses sont classifiées parmi les plantes ayant une bonne accumulation des oligo-éléments (**Kuboi et al., 1986**) et peuvent éliminer efficacement les hydrocarbures présents dans les sols contaminés, sans supplémentation en nutriments (**Gaskin et Bentham, 2010**).

Dans la majorité des sols contaminés par les produits hydrocarbonés, le rapport C/N (carbone sur azote) est souvent déséquilibré puisqu'il y a un enrichissement en carbone total et une diminution de l'azote (**Morot, 1997**). De ce fait, l'activité symbiotique des légumineuses est plus qu'indispensable pour assurer leur croissance. Dans l'appui de cette affirmation, les légumineuses se sont révélées être les plus abondantes dans les sites contaminés par les hydrocarbures pétroliers (**Adam et Duncan, 2003**).

Dans ce cadre, l'objectif de ce simple travail est d'étudier l'effet écotoxicologique des hydrocarbures pétroliers (parmi lesquels le Gasoil) sur les légumineuses (comme exemple : la féverole).



Chapitre I :
Les hydrocarbures

Chapitre I : Les hydrocarbures

1. Définition des hydrocarbures

Le terme hydrocarbure (HC) est un terme générique qui désigne les mélanges de composés organiques présents dans des matières géologiques comme l'huile, le bitume et le charbon ou les dérivés de ces matières (**Lefebvre, 1978**). Les hydrocarbures sont des composés ubiquistes issus de la transformation diverse et successive de la matière organique (**Lutz, 2006**). Ils sont des composés organiques contenant exclusivement des atomes de carbones (C) et d'hydrogènes (H) (**Franaennec et al., 1998**), et présentent une grande importance commerciale. Ils sont utilisés comme carburants, combustibles, huiles lubrifiantes et produits de base en synthèse pétrochimique (**Fattal, 2008**).

2. Classification des hydrocarbures

Les hydrocarbures constituent la fraction la plus importante d'un brut pétrolier, ils représentent entre 65 et 95 % de la plupart des pétroles bruts (**Neff, 1979**). Ces hydrocarbures peuvent être classés en différentes familles selon leur origine géographique et géologique (**Tissot et Welte, 1984**). Les hydrocarbures aliphatiques (30 à 70 %), les hydrocarbures aromatiques (20 à 40 %), les composés polaires (5 à 25 %) et les asphaltènes (0 à 10 %) (**Neff, 1979**).

2.1. Hydrocarbures aliphatiques

Ce sont des composés à longue chaînes ouvertes linéaires ou ramifiées, qui peuvent être saturés (des alcanes) ou insaturés (des alcènes ou alcynes), substitués ou non (**Arnaud, 2004**).

2.1.1. Les hydrocarbures aliphatiques saturés

Ils sont représentés par les alcanes ou les hydrocarbures parafiniques (**Colin, 2000**). Ils ne comportent que des liaisons simples, covalentes et non polaires (**Hart et Conia, 2002**). Leur nom vient du grec **aleiphar** qui signifie huile ou graisse. Cette nomenclature vient du fait que les graisses sont des composés à chaîne ouverte (**Lefebvre, 1978**).

Parmi lesquels, on distingue :

a. Les alcanes linéaires

Les alcanes linéaires (**n-alcanes**, C_nH_{2n+2}), dont la longueur de leur chaîne varie de 7 à 40

atomes de carbone, constituent une des classes les plus abondantes (10 à 40 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier). Ils sont obtenus par distillation destructive de substances naturelles complexes, telles que la houille, et sont formés en grande quantité par vapocraquage au cours du raffinage du pétrole (Soltani, 2004).

b. Les alcanes ramifiés

Les alcanes ramifiés les plus abondants sont les iso-alcanes. Les autres composés ramifiés antéiso ou polyramifiés tels que les isoprénoïdes (exemple : pristane, phytane) sont beaucoup moins nombreux. Ces composés se trouvent dans le pétrole brut à des proportions sensiblement égales à celles des n-alcanes (Soltani, 2004).

c. Les cycloalcanes

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

2.1.2. Les hydrocarbures aliphatiques insaturés

Ils sont appelés insaturés car ils ne contiennent pas le maximum d'atome d'hydrogène possible (Richards *et al.*, 1984), sont très réactifs et sont à la base de nombreuses réactions organiques et ressemblent aux alcanes du fait de leurs molécules apolaires, ils réagissent avec l'oxygène.

a. Les oléfines

Ce sont des hydrocarbures qui comportent une double liaison carbone-carbone, ils sont représentés par les alcènes ou cyclènes de formule générale C_nH_{2n} (Lefebvre, 1978).

b. Les acétyléniques

Ou alcynes, caractérisés par l'existence d'au moins une triple liaison. Dans cette famille les composés cycliques ou bien les cyclynes sont très rares, de formule générale C_nH_{2n-2} (Lefebvre, 1978).

2.2. Les hydrocarbures aromatiques

En général, les hydrocarbures aromatiques sont moins abondants que les alcanes, et ne

représentent que 10 à 30 % des hydrocarbures totaux d'un brut pétrolier (Soltani, 2004). Ils regroupent tous les composés renfermant un ou plusieurs cycles insaturés, ce sont tous les produits pétroliers spécifiques composés à six atomes de carbone et chacun étant lié à un unique atome d'hydrogène (Ouahbi, 2012), comme celui constituant le benzène C_6H_6 (Guibet, 1997).

Parmi lesquels, on distingue :

2.2.1. Les hydrocarbures mono-aromatiques (HAM)

Ce sont des composés contenant un cycle benzénique C_6 sur lequel se lie une grande variété de radicaux (Lumière *et al.*, 2001). Sont des composés mono-aromatiques volatiles, inflammables et ayant des propriétés toxiques.

Provenant de la dégradation de la lignine et du pétrole brut, les hydrocarbures mono-aromatiques sont aussi d'origine pétrolière et pétrochimique (Negraia, 2010). Ils sont notamment présents dans les sols.

2.2.2. Les hydrocarbures poly-aromatiques (HAP)

Ce sont des composés dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques fusionnés et qui montrent une forte toxicité envers les organismes vivants et la santé humaine (Christian, 2006).

Souvent associés à des hydrocarbures BTEX ou alcanes, les hydrocarbures polyaromatiques sont difficilement dégradables en revanche, la biodégradation des hydrocarbures polyaromatiques augmente avec la température (Cao *et al.*, 2009).

2.3. Les composés polaires

Les composés polaires sont constitués de résines et d'asphaltènes. Les résines sont les plus petits et cette fraction correspond à des molécules hétérocycliques telles que :

- **Des composés oxygénés** : phénols, acides carboxyliques, alcools, aldéhydes, etc...
- **Des composés soufrés** : mercaptans, sulfures, disulfures, etc...
- **Des composés azotés** : pyridines, quinoléines, etc...

Les dérivés soufrés sont, dans la plupart des cas plus abondants que les composés oxygénés ou azotés. (Soltani, 2004).

La principale caractéristique des résines est leur polarité élevée. Ce qui les rend solubles dans l'eau et est à l'origine de leur biodisponibilité et de leur toxicité pour les organismes lors de déversement d'hydrocarbures en milieu aquatique (**Melbye et al., 2009**).

2.4. Les asphaltènes

Ils sont constitués de molécules polycycliques à haut poids moléculaire et la structure de ces composés est mal connue du fait d'une part de leur composition chimique complexe. Ils sont définis selon leur solubilité dans les solvants aromatiques (toluène ou le benzène). Ils précipitent suite à l'addition dans le pétrole, d'un excès de **n-alcanes**. Ils représentent la fraction des hydrocarbures la plus stable et jouent un rôle important dans la stabilisation de l'émulsion des hydrocarbures (**Gruyer et al., 2015**) et ils ont une influence considérable sur les propriétés physico-chimiques du pétrole brut, bien que ces produits soient souvent présents en faible quantité (**Tharanivasan et al., 2012**).

3. Source de pollution par les hydrocarbures

Les hydrocarbures sont émis dans le sol par des processus naturels ou anthropiques.

3.1. Sources naturelles

Les plus importants sont les prairies et les feux de forêt, Il existe d'autre sources telles que les éruptions volcaniques, l'érosion des roches, les fuites des réservoirs naturels ainsi que la production d'hydrocarbures par les végétaux supérieurs ou par les algues (**Girard, 2005**).

3.2. Sources anthropiques

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 pyrolytique correspondant à des processus de combustion 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 (**Fraser et al., 1997**) sont aussi à l'origine de déversement de produits variés tels que les carburants, les huiles lubrifiantes ou les débris pneumatiques (**Takada et al., 1990 ; Bomboi et Hernandez, 1991 ; Hahn et Rudiger, 1994**).

4. Devenir des hydrocarbures dans l'environnement

C'est par des processus physiques, chimiques et biologiques qu'un hydrocarbure va pouvoir être déplacé, transformé ou éliminé, après avoir été réparti dans l'environnement. Parmi les différentes altérations que peut subir un hydrocarbure, on cite :

4.1. Evaporation

L'évaporation est un phénomène qui touche les fractions de faible poids moléculaire et dépend de conditions atmosphériques (vent, vagues, température, ...). Les hydrocarbures les plus légers, ayant de 4 à 12 atomes de carbone (T° ébullition < 270 °C), qui représentent généralement près de 50 % des hydrocarbures totaux d'un brut moyen, sont éliminés rapidement dès les premiers jours, pouvant conduire à une pollution de l'atmosphère. La plupart des pétroles bruts déversés perdent jusqu'à 40% de leur volume dans les premières 48 heures ; alors que les fuels moins ils sont lourds, qui contiennent peu de composés volatils, s'évaporent très peu, même après plusieurs jours (Soltani, 2004).

4.2. Solubilisation

La solubilité des hydrocarbures dans l'eau est très faible. Un hydrocarbure est d'autant plus soluble que sa masse moléculaire est faible et que sa polarité est élevée. Il est important de noter que ces hydrocarbures solubles sont parmi les plus dangereux pour l'environnement, ils sont difficiles à éliminer et sont adsorbés par la faune et la flore (Goswami et Singh, 1991 ; Bouchez *et al.*, 1995).

4.3. Emulsification

Deux types d'émulsions peuvent se former :

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

précurseurs des résidus goudronneux retrouvés sur les plages, alors que les émulsions « huile dans l'eau » facilitent l'élimination des hydrocarbures (**Soltani, 2004**).

4.4. Sédimentation

La sédimentation est le passage du pétrole de la surface vers le fond. Ce phénomène concerne les résidus goudronneux constitués de la fraction pétrolière la plus lourde et dont la densité est supérieure à celle de l'eau de mer. La sédimentation conduit à la constitution d'agrégats de haute densité difficilement dégradable par voie naturelle (**Vandecasteele, 2005**).

4.5. Photo-oxydation

La photo-oxydation est observée au niveau de la surface de l'eau où l'air (oxygène) et la lumière (radiations solaires) sont présents pour la transformation des hydrocarbures (**Payne et Phillips, 1985**). L'efficacité de ce phénomène dépend de la nature des hydrocarbures et de la présence de composés non hydrocarbonés (**Bertrand et Mille, 1989**). Ainsi, la photo-oxydation touche plus particulièrement les composés aromatiques qui sont plus photosensibles que les composés aliphatiques. Parmi ces derniers, les composés ramifiés sont plus facilement photo-oxydés que les n-alcanes (**Rontani et Giusti, 1987**).

4.6. Biodégradation

La biodégradation est le processus naturel le plus important de la dépollution dans l'environnement. Les microorganismes en sont responsables, en particulier les bactéries. Les voies métaboliques d'oxydation des hydrocarbures, par les bactéries et les paramètres qui peuvent influencer la biodégradation, seront traitées plus loin (**Vogel, 2001**).

5. Pollution des sols par les hydrocarbures

La pollution par les hydrocarbures est due à des rejets, volontaires ou non, de produits pétroliers. Elle relève à la fois de la pollution chimique et de la pollution organique. La pollution par les hydrocarbures légers couramment commercialisés (pétrole, essence, kérosène, gasoil, solvants, huiles pour moteurs, etc...) interviennent dans 80% des cas de pollution du sol (**Lardjane et Mechraoui, 2001**). Il est très fréquent du fait de leur utilisation généralisée. En raison de leur solubilité et de leur biodégradabilité, à l'exception de certains d'entre eux (BETX), des mélanges de pollution dans les eaux souterraines sont assez étendus et posent souvent des problèmes de toxicité de la microflore et des difficultés dans le captage

des eaux. Contrairement aux hydrocarbures lourds, ils ont des viscosités élevées et ils sont peu solubles dans l'eau et peu volatiles donc persistants ; ces composés sont assez biodégradables à l'exception de certains d'entre eux qui peuvent se révéler toxiques pour la microflore autochtone. Leur présence dans le sol entraîne souvent une diminution de la perméabilité de celui-ci et une réduction de la circulation de l'eau au sein de la matrice (Colin, 2000).m

5.1. Origine de la pollution des sols par les hydrocarbures

Un site est pollué quand il présente un risque pérenne, réel et potentiel pour la santé humaine et/ou l'environnement, du fait d'une pollution des milieux résultant d'une activité actuelle ou ancienne. La présence des hydrocarbures sur les sols est généralement due à diverses activités telles que l'extraction et le raffinage du pétrole (Hill et Ghoshal, 2002), l'aluminerie, la sidérurgie, la cokéfaction (Arzayus *et al.*, 2001), la manipulation et le stockage des goudrons et du bitume, ainsi que des phénomènes de pyrolyse-pyrosynthèse de la matière organique (combustibles fossiles, bois ...), et d'imbrûlés. L'activité humaine [l'activité quotidienne (chauffage, fuel), les usines d'incinération des déchets, le transport routier par émission de gaz d'échappement] est également responsable de contamination des hydrocarbures dans l'environnement (Krein et Schorer, 2000).

Les hydrocarbures sont les principaux polluants dans le sol (tableau 1) avec un taux d'occurrence de 49 % (Zmirou *et al.*, 2003). Certains de ces polluants sont présents de façon naturelle et proviennent soit de la combustion de la matière organique, soit de l'altération de la roche mère du sous-sol. Cependant, les concentrations les plus importantes dans les sols sont d'origine anthropique (Lemière *et al.*, 2008).

Tableau 1: Principaux polluants retrouvés sur les sites pollués (Zmirou *et al.*, 2003).

Polluants – 756 cas étudiés	%
Hydrocarbures	49
Plomb	20
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	19
Solvants halogénés	15
Chrome	15
Zinc	15
Cyanure	12
Cuivre	11
Arsenic	10
Nickel	8
Polychlorobiphényles (terphényles)	7
Solvants non halogénés	7
Cadmium	7

5.2. Source des hydrocarbures dans le sol

La pollution, par hydrocarbures, localisée dans les sols peut avoir des origines différentes où l'activité anthropique est la principale source de nombreuses contaminations localisées ou diffuses au niveau des sols et sous-sols (**Colin, 2000**).

5.2.1. Les activités industrielles

Divers accidents et incidents sont liés à l'extraction, au stockage, à la transformation et aux transports des hydrocarbures. Dépôt des déchets dans et autour des sites en activité. Lors de la démolition des installations contenant des hydrocarbures.

5.2.2. Les activités urbaines

Les produits et les déchets dangereux au même titre que les activités industrielles, sont utilisés ou issus des activités artisanales ou commerciales par retombés atmosphériques de nombreuses sources de pollution atmosphérique.

❖ **Le cas de la station-service** : Les principales causes de la pollution ponctuelles du sol de ce genre d'installation sont les suivantes (**Adam, 2006**) :

- La corrosion des cuves de stockage.
- Les accidents de dépotage.
- Les ilots de pompes.
- La séparation d'hydrocarbures.
- Les points de remplissage.
- La canalisation entre les citernes et les ilots de pompes.

5.3. Les principaux polluants du sol

5.3.1. Composés organiques

- ❖ Groupes par classification chimique et/ou propriétés physicochimiques (**Ramade, 2005**) :
- Les composés organiques halogénés volatils ou COV (trichloroéthylène, tetrachloroéthylène, chlorure de vinyle, chlorométhane, chlorobenzène...), utilisés comme intrants dans l'industrie du textile (dégraissants et détergents) et dans l'industrie du papier (agents

de blanchiment).

- Les polychlorobiphényles ou PCB, utilisés comme huiles de transformateurs et de condensateurs, comme fluides caloripporteurs et hydrauliques, comme plastifiants, lubrifiants, dans les peintures, les vernis, les encres, les huiles de coupe.
 - Les BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène, xylène), utilisés comme solvants dans l'industrie chimique et cosmétique, dans l'imprimerie, ou générés par les industries de traitement du charbon (cokéfaction), ou encore présents dans les combustibles et carburants.
 - Les hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP (naphtalène, benzopyrène, phénanthrène, chrysène, etc...), produits par des processus de combustion (moteurs, chauffage, incinérations, fumoir en industrie agro-alimentaire...), ou générés par les activités de traitement du charbon (cokéfaction, usines à gaz) et l'industrie pétrochimique, ou encore utilisés comme intrants dans le traitement du bois (créosote).
 - Les dioxines et les furannes, issus principalement de la combustion de certains produits chlorés.
- ❖ Groupes par leurs fonctions (**Ramade , 2005**) :
- Les détergents : Tensio-actifs anioniques, non-ioniques, cationiques.
 - Pesticides : Pesticides organochlorés, Pesticides organophosphorés, herbicides.

5.3.2. Composés inorganiques

Les métaux lourds, phosphates, nitrates, nitrites, azote total, phosphore (**tableau 2, 3**) (**Ramade, 2005**).

Tableau 2: Polluants du sol et leurs sources (Calvet, 2003).

Polluants	Sources
Métaux lourds	Industrie minière, métallurgie
Hydrocarbures pétroliers	Industrie pétrolière, transport
HAP	Industries de la préservations du bois, combustion incomplète, épandages des boues usées
Substances xénobiotiques (PBC)	Rejets accidentels, mauvaise élimination, dépôts atmosphériques
Substances organiques (pesticides, restes de peintures, solvants...)	Agriculture, mauvaise élimination, industrie du nettoyage à sec...

Tableau 3: Les principales dégradations du sol et leurs effets (Glorennec, 2005).

Problèmes	Conséquences
Dégradation physique	Pertes en récoltes et terres agricoles ; pertes des fonctionnalités épuratrices ; baisse de productivité agricole ; contamination des cours d'eau ; modification de l'hydraulique.
Dégradation chimique	Modification des fonctionnalités du sol et remobilisation des métaux ; contamination des eaux de surface et des aquifères ; stérilisation des sols ; risque pour la santé humaine ; toxicité du sol et des ses produits ; pertes en terres agricoles.
Dégradation biologique	Perte de biodiversité ; aggravation des dégradations chimiques et physiques ; flux de gaz à effet de serre.

5.4. Comportement et devenir des hydrocarbures dans le sol

La manifestation du caractère polluant de composés organiques est étroitement liée à leur devenir dans le sol. **Bliefert et Perraud, (2004)** ont noté que le sol est considéré comme un milieu dynamique (vivant) et complexe, soumis à des influences climatiques différenciées et à des processus chimiques, physiques et biologiques.

Outre la toxicité propre du polluant, qui dépend de sa concentration et de la nature de la cible considérée, sa rétention par le sol et sa persistance sont les deux facteurs fondamentaux conditionnant le caractère polluant et/ou sa manifestation (**Bariusso et Calvet, 2004**).

Différents paramètres influencent la biodégradation des hydrocarbures dans les sols contaminés. Il peut s'agir des paramètres inhérents aux microorganismes du sol tels que la nature, la diversité de la flore bactérienne et fongique. La biodégradation des hydrocarbures dans les sols est également influencée par les caractéristiques intrinsèques du sol, telles que le pH, la température, les teneurs en oxygène, en eau et en nutriments (**Record, 2007 in Bonnard, 2010**).

La rétention des polluants organiques par le sol est le résultat des interactions avec les constituants organiques et minéraux des sols (**Barriuso et al., 1996**). Dès leur arrivée dans le sol, les polluants organiques se distribuent dans les trois phases : solide, liquide et gazeuse (**figure 1**).

Selon des constantes d'équilibre, d'adsorption, de désorption et de volatilisation, ces constantes sont caractéristiques de chaque produit, mais elles sont modifiées en fonction des conditions pédoclimatiques.

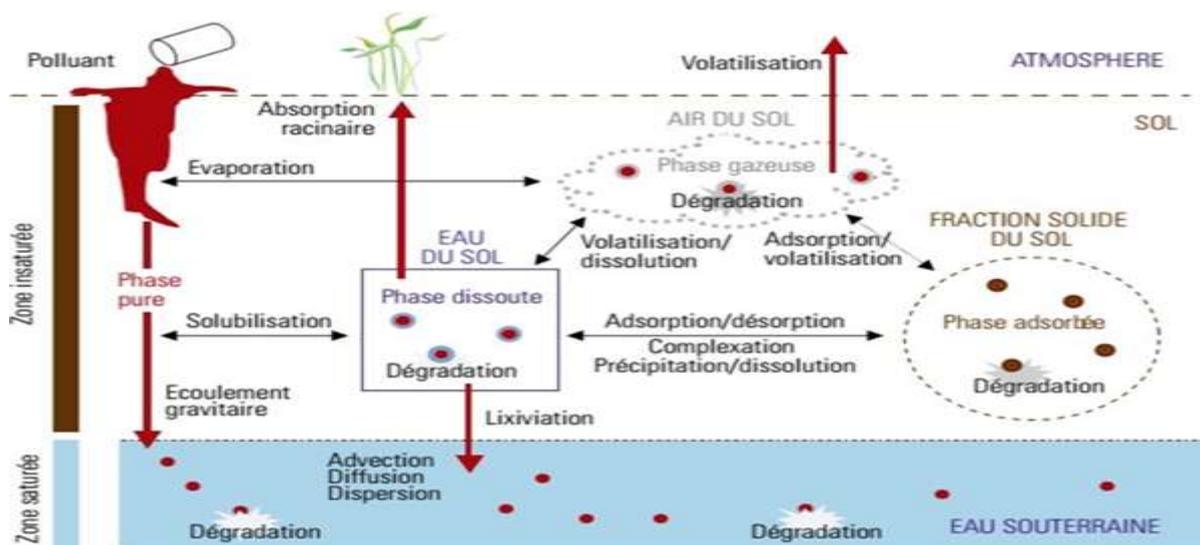


Figure 1: Processus influençant le devenir des polluants dans les sols (**Maes et al., 2007**).

La connaissance du comportement des polluants a donc une incidence majeure en termes de gestion des risques : vitesse de propagation, extension de la pollution, nombre de récepteurs atteints etc...

6. Caractéristiques physico-chimiques des hydrocarbures

Les hydrocarbures se caractérisent par diverses propriétés physiques (**tableau 4**).

Tableau 4: Propriétés physiques des principaux hydrocarbures pétroliers (**Fingas, 2012**).

Propriétés	Unité	Essence	Diesel	Pétrole brut		Mazout intermédiaire	Mazout lourd n°6
				Léger	Lourd		
Viscosité	mPa.s (15°C)	0,5	2,0	5 à 50	50 à 50 000	1000 à 15 000	10 000 à 50 000
Point d'écoulement	°C	-	-35 à -10	-40 à 30	-40 à 30	-10 à 10	5 à 20
Densité	g/ml (15°C)	0,72	0,84	0,78 à 0,88	0,88 à 1,00	0,94 à 0,99	0,96 à 1,04
Densité API	°API	65	35	30 à 50	10 à 30	10 à 20	5 à 15
Solubilité dans l'eau	mg/l	200	40	10 à 50	5 à 30	10 à 30	1 à 5
Point d'éclair	°C	-35	45	-30 à 30	-30 à 60	80 à 100	>100
Tension interfaciale	mN/m (15°C)	27	27	10 à 30	15 à 30	25 à 30	25-35

6.1. Densité

La densité est la masse par unité de volume. La plupart des hydrocarbures ont des densités comprises entre 0,7 et 0,99 g/ml à 15 °C (**tableau 4**) ; par conséquent, ils flottent sur l'eau. Cependant, la densité a tendance à diminuer pendant les processus d'altération des hydrocarbures, plus particulièrement lors du processus d'évaporation des fractions plus légères, lors des changements de température ou de l'interaction avec des particules (**Radović et al., 2012**).

Ainsi, les hydrocarbures coulent lorsque la densité des hydrocarbures devient supérieure à celles de l'eau douce (1,0 g/cm³) ou de l'eau marine (1,03 g/cm³).

6.2. Viscosité

La viscosité d'un hydrocarbure définit sa résistance à l'écoulement. Elle influe directement sur la perméabilité au niveau du sol. Elle est fondamentalement caractérisée par la proportion de composés lourds et légers qu'ils contiennent. Plus le pourcentage des

éléments légers est élevé, plus le pourcentage d'asphaltènes est faible et plus la viscosité est faible et les hydrocarbures deviennent plus visqueux au fur et à mesure que la température baisse (Colin, 2000).

6.3. Solubilité

La capacité d'une substance à se dissoudre dans de l'eau. Elle est importante chez les hydrocarbures car certains, une fois solubilisés, peuvent être toxiques pour les organismes aquatiques, même à très faibles concentrations. Les hydrocarbures pétroliers les plus solubles sont principalement les composés aromatiques légers (le benzène). En fait, la solubilité d'un produit pétrolier dans l'eau sera d'autant plus significative que sa proportion d'hydrocarbures légers est importante (Fingas, 2012).

6.4. Volatilité

La volatilité conditionne la répartition du produit entre la phase gazeuse et la phase liquide. Elle est définie, d'une part, par la pression de vapeur, et d'autre part, par la courbe de distillation (Ballerini *et al.*, 2007).

Blumer, (1976) note que la connaissance des propriétés physico-chimiques des hydrocarbures permet de mieux prévoir leur répartition et leurs impacts potentiels sur les différents compartiments de l'environnement (tableau 5).

Tableau 5: Typologie simplifiée des principaux composés hydrocarbonés (Colin, 2000).

Famille de polluants	Propriétés principales	Exemples	Activités génératrices
HC légers	<ul style="list-style-type: none"> • Très légers • Biodégradables • Solubilité variable • Volatiles • Viscosité variable • Adsorption variable 	<ul style="list-style-type: none"> • Essences • Gasoil • Fuels domestiques • Carburants d'aviation • Pétrole brut • Naphta • Solvants 	<ul style="list-style-type: none"> • Station-service • Dépôt de stockage • Installation de transport (oléoducs, fer, route, voies maritimes) • Raffineries • Usine de peintures
HC lourds	<ul style="list-style-type: none"> • Densité variable, en général plus lourds que l'eau • Peu biodégradables • Peu solubles • Peu volatils et visqueux • Adsorption forte 	<ul style="list-style-type: none"> • Fuels lourds • Goudron du pétrole • Créosote • Certaines huiles de coupe 	<ul style="list-style-type: none"> • Chaudières industrielles • Centrales thermiques • Usines à gaz • Raffineries • Traitements du bois

7. Exemple de principaux hydrocarbures utilisés (le Gasoil)

Le gasoil ou le diésel, qui est un liquide incolore ou légèrement jaune présentant une odeur de pétrole, est l'un des principaux produits de distillation du pétrole brut (l'intervalle de sa distillation est compris entre 180 et 380 °C). Le diésel, est très largement utilisé comme carburant automobile dans les moteurs à allumage par compression.

Les gasoils contiennent 2000 à 4000 hydrocarbures différents qui ne peuvent être totalement séparés par chromatographie en phase gazeuse (Marchal *et al.*, 2003), dont le nombre d'atomes de carbone varie entre 11 et 25. Les gasoils sont donc plus lourds que les essences et sont composés de produits moins volatils, donc plus persistant que l'essence (Ballerini *et al.*, 2007). C'est une catégorie intermédiaire entre les produits légers et lourds avec une masse volumique comprise entre 820 et 860 kg/m³ (Wauquier, 1994). Sa composition dépend du pétrole brut original. Ils ne contiennent pas d'alcènes et sont majoritairement constitués de n-alcane et cycloalcanes (Saada *et al.*, 2005).

La figure 02 montre la composition d'un gasoil.

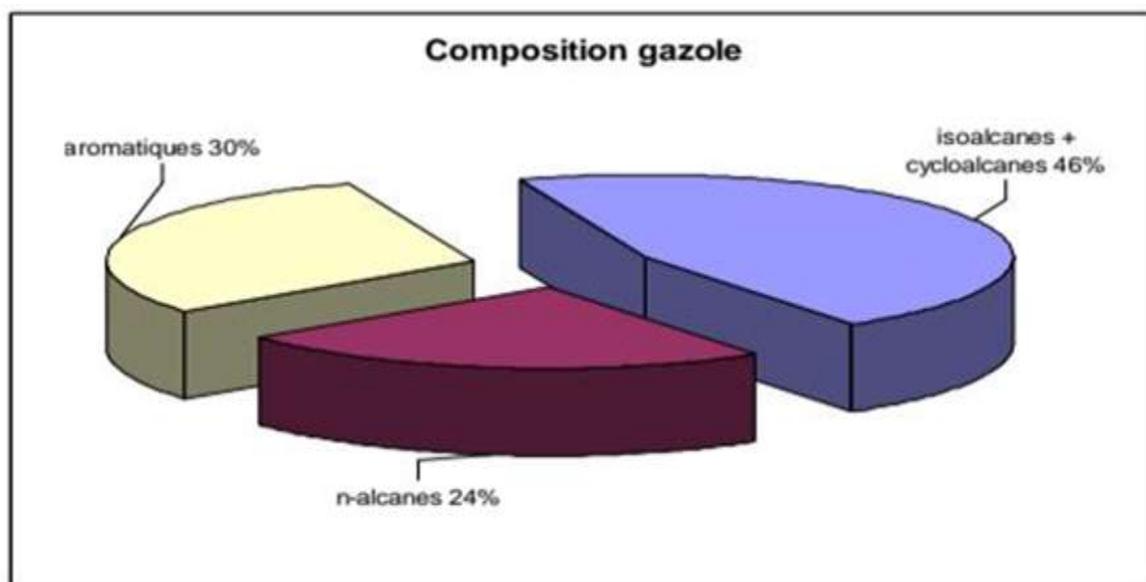


Figure 2: Composition du gasoil (Marchal *et al.*, 2003).

Contrairement aux moteurs à essence, le carburant diésel doit s'enflammer facilement pour que le moteur fonctionne de manière optimale. Cette aptitude à l'allumage est définie par l'indice de cétane. Par l'adjonction de divers additifs, on va augmenter cet indice et optimiser les caractéristiques de qualité de ce carburant.

Les propriétés physiques et chimiques des gasoils sont répertoriées dans (**tableau 6**).

Tableau 6: Principales propriétés physico-chimiques du gasoil (INRS, 2006 ; RA, 2017).

Analyse	Unité	Résultats
Apparence	-	Incolore à jaune
Point d'ébullition	°C	170 à 390
Solubilité	-	Pratiquement insoluble dans l'eau
Masse volumique à 15 °C	Kg/m ³	820 à 860
Température d'auto-inflammation	°C	220
Point d'éclair	°C	55-58
Limite d'explosivité dans l'air	% vol	Inférieur : 0,6 / Supérieur : 6,5
Pression de vapeur saturante à 20 °C	mbar	1
Viscosité dynamique à 37 °C	SUS	32,6-40,1
Teneur en soufre	%	0,061
Point d'écoulement	°C	-12
Teneur en eau	-	TND



Chapitre II :
Les légumineuses

Chapitre II : Les légumineuses

1. Généralités :

Les légumineuses, aussi appelées légumes secs, (comme le haricot, le lupin, le pois, la lentille, l'arachide, la luzerne, le trèfle, le soja, le pois chiche, la cacahuète, le mimosa ou l'acacia) sont l'un des groupes des végétaux supérieurs les plus abondants et les plus diversifiés dont le fruit est une gousse. Elles appartiennent à la famille des Fabacées, c'est une famille très diversifiée, qui comprend plus de 750 genres et 19.500 espèces (**Sprent *et al.*, 1987 in Lezrek, 2008**).

Elles sont l'une des cultures les plus importantes en raison non seulement de leur qualité nutritionnelle mais également pour leurs divers avantages agro-environnementaux. Les graines et poudres de légumineuses sont des sources importantes de protéines, glucides, vitamines, minéraux et fibres alimentaires (**Baljeet *et al.*, 2014 ; Rachwa-Rosiak *et al.*, 2015**).

Les légumineuses améliorent les pratiques agricoles et au maintien de la fertilité des sols. En effet, Elles accumulent des concentrations importantes d'azote dans leurs tissus. Une partie de cet azote est réincorporée au sol via la décomposition des tissus, ce qui permet de rétablir la fertilité des sols après des cultures plus exigeantes tel que les céréales (**Simon, 2005**). Elle est responsable pour une partie substantielle de la conversion du flux global de l'azote atmosphérique en forme fixe tel que l'azote ammoniacal qui est à son tour converti en composés organiques assimilables (**Wani *et al.*, 1995 ; Chalck, 1998**). Les légumineuses jouent aussi des rôles très importants dans la lutte contre l'érosion, la désertification et la dégradation des sols (**Thami et El-Mzouri, 2000**) ainsi que la réhabilitation des sites miniers après exploitation (**de Faria, 2005 ; Sekkour, 2008**).

2. Classification botanique

Selon (**Doyle, 1994 ; De Ladjudie *et al.*, 1998 ; Dommergues *et al.*, 1999 ; Doyle et Luckow, 2003**), la famille des légumineuses se subdivise en trois sous-familles : les Mimosacées, les Césalpiniciacées et les Papilionacées.

2.1. Mimosacées

La sous-famille des Mimosoideae, comprend environ 3000 espèces regroupées dans 77

genres (**Cannon, 2008**). Elles produisent des fleurs régulières regroupées en inflorescences denses. Les espèces sont représentées principalement par des arbres et des arbustes distribués dans les régions tropicales et subtropicales sur tous les continents. Les genres *Acacia*, *Calliandra*, *Mimosa* et *Prosopis* sont les plus représentatifs (**Simon, 2005 ; Fyad-Lameche, 2007**).

2.2. Césalpiniacées

La sous-famille des *Caesalpinoideae*, considérée comme la plus primitive, regroupe environ 4200 espèces dans 162 genres (**Simon, 2005 ; Cannon 2008**). Les espèces possèdent des fleurs aux corolles irrégulières et sont représentées par des arbres, arbustes et herbacées vivaces distribuées de régions tropicales aux régions tempérées. Les genres *Caesalpineae*, *Cassia*, *Cercis* et *Gleditzia* sont représentatifs de cette sous-famille (**Simon, 2005 ; Fyad-Lameche, 2007**).

2.3. Papilionacées

La sous-famille *Papilionoideae*, d'une évolution plus récente, comprend environ 14.000 espèces aux fleurs irrégulières, regroupées dans 476 genres (**Lewis *et al.*, 2003**). Parmi les tribus de cette catégorie, on citera la tribu des *Phaseoleae* à laquelle appartiennent de nombreuses espèces importantes utilisées pour l'alimentation humaine directe (soja, haricot, pois chiche ...etc.) ainsi que les plantes de pâturage les plus importantes utilisées par les agriculteurs (**Simon, 2005 ; Lee *et al.*, 2007**).

Les taxons des *Fabacées* produisent la même sorte de fruit ; la gousse, formée par un seul carpelle possédant deux zones de suture opposées. Chez les espèces spontanées, les gousses s'ouvrent à maturité pour expulser les graines (**Simon, 2005**).

De nombreux taxons de la famille des légumineuses sont capables de former des associations symbiotiques avec des bactéries fixatrices d'azote atmosphérique de la famille des *rhizobiaceae*. La proportion de ces taxons varie d'une sous-famille à autre, elle est de 90% pour les *Mimosoideae*, 20% pour les *Caesalpinoideae* et 97% pour les *Papilionoideae* (**Merabet, 2007**).

3. Caractéristiques botaniques

Les légumineuses appartiennent à l'ordre des rosales, dont elles représentent la famille la plus évoluée ; elles se situent dans le prolongement des rosacées auxquelles elles ressemblent

par les conformations du réceptacle. Elles se distinguent par leurs caractères plus spécialisés, en particulier :

- ❖ La zygomorphie des fleurs (dont la symétrie n'est pas axiale, le plus souvent bilatérale).
- ❖ La réduction du nombre des carpelles.
- ❖ Les prédominances des feuilles composées.
- ❖ Les présences des nodosités racinaires (**Laumonnier, 1979**). La grande famille des fabacées doit son unité à son fruit appelé les gousses ou légumes, d'où le nom des légumineuses sous lequel cette famille est plus connue (**Ozenda, 2000**). Les Fabacées (légumineuses), se trouvent sous forme de plantes herbacées, arbustes, arbres ou plantes grimpantes (**Judd et al., 2002**).

4. La fixation biologique de l'azote atmosphérique

La fixation biologique de l'azote est une étape clef du cycle de l'azote dans les écosystèmes terrestres, qui est une propriété qui conduit à une synthèse de composés organiques qui sont des substances protéiques à partir des composés inorganiques présents dans l'atmosphère.

4.1. Les fixations symbiotiques d'azotes

Les légumineuses constituent une famille très importante de plantes à fleurs, herbacées ou arborées dont l'une des propriétés majeures est qu'elles peuvent former un partenariat (association symbiotique) avec une classe de bactéries (*Rhizobium* sp.) capables de fixer l'azote atmosphérique inerte (N_2) pour le transformer en azote biologiquement utile (réactif) (**Vertès F et al., 2010**). Cet azote est essentiel à la croissance des végétaux, notamment pour la synthèse des acides nucléiques et des protéines. L'azote est abondant sur terre et représente 78% de l'atmosphère terrestre, mais toutes les formes ne sont pas utilisables par les végétaux (**Nemecek et al., 2008**). Les légumineuses hébergent dans les nodules développés sur leurs racines (**figure 3**). La ressource énergétique carbonée nécessaire à cette réaction ainsi qu'à la vie de la bactérie est fournie par la plante, on parle de relation symbiotique. Les espèces rhizobiacées symbiotiques sont souvent spécifiques d'une espèce légumineuse ou d'un groupe d'espèces apparentées (**Duc G et al., 2010**) dont la fixation de l'azote est catalysée par une enzyme appelée la nitrogénase (**Pierre D, 1996**).

La nitrogénase est sujet d'une régulation à trois niveaux : une régulation transcriptionnelle de **nifA** (protéine activatrice de la transcription des gènes nif), une régulation post-traductionnelle de l'activité de nifA envers l'activation de la transcription des autres gènes nif, et la régulation post-traductionnelle de l'activité de la nitrogénase quand les cellules sont soumises à un choc d'ammoniaque (Nesrine RIAHI, 2010). La fixation de l'azote a lieu dans des nodules qui sont des protubérances qu'on observe au niveau des racines. Leurs tailles et leurs formes varient selon la plante hôte (Danso, 1991), là que l'azote fixé par les légumineuses contribue à enrichir le sol en azote, en augmentant la nutrition azotée et les rendements des cultures succédant aux légumineuses. Ainsi les légumineuses influencent à long terme les propriétés physico-chimiques et biologiques des sols (Bado, 2002).

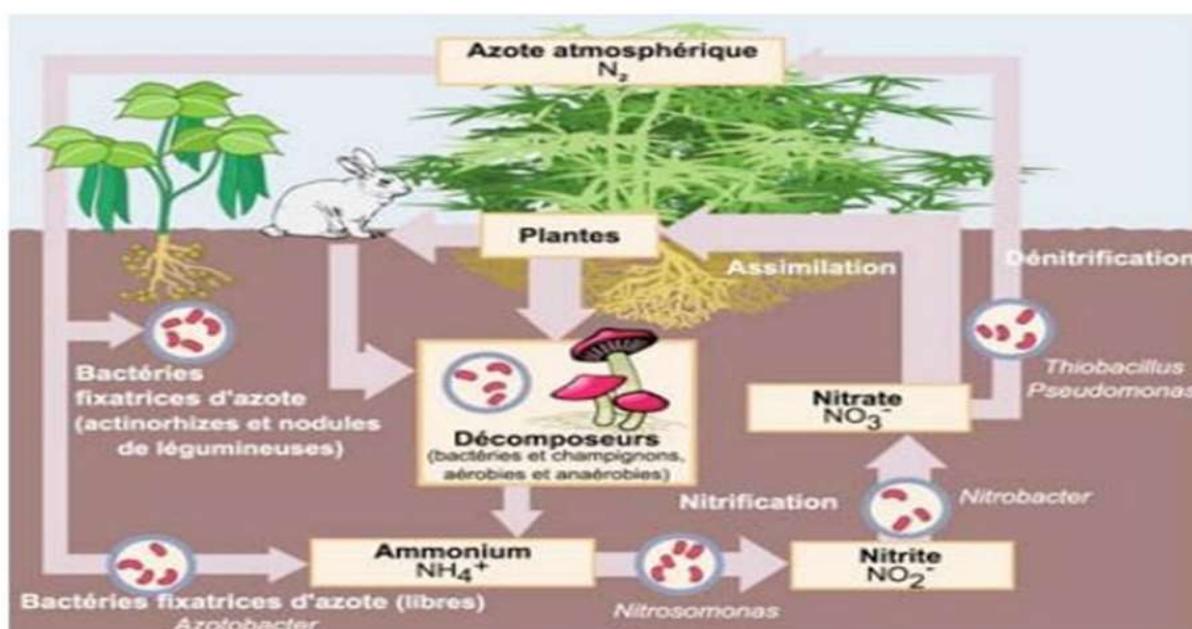


Figure 3 : Cycle de fixation d'azote (Pertet, 1998).

4.2. Mise en place de la nodulation chez les légumineuses

La formation de nodules est le résultat d'un dialogue moléculaire entre le microsymbionte et la plante hôte (Foucher et Kondorosi 2000 ; Limpens et Bisseling 2003 in Lazrek, 2008) (figure 4), qui sont des bactéries Gram négatif de la classe des α et β protéobactéries capables d'établir des associations symbiotiques avec les légumineuses. De nombreux signaux moléculaires spécifiques sont échangés entre la plante-hôte et les bactéries tout en long de la formation de la nodosité. Deux mécanismes contrôlés par la plante se mettent en place conjointement ; l'infection par les rhizobia et la formation d'un nouvel organe, les nodules ; situés le plus souvent sur le système racinaire et peuvent être parfois caulinaires, dans

lesquelles les bactéries se multiplient et réduisent l'azote de l'air (**Revellin, 2012**). La plante hôte fournit une niche protectrice et de l'énergie aux bactéries qui, en échange cèdent l'azote fixé à la plante. Le nombre (ou le poids) des nodules actifs sur le système racinaire est contrôlé par la plante-hôte (phénomène d'autorégulation). Selon le type d'association, la symbiose est plus ou moins efficace (efficace), cette efficacité est indépendante du nombre ou la taille des nodules et se traduit par une coloration plus ou moins rouge (leghémoglobine) du tissu central infecté du nodule (**Duhoux et Nicole, 2004**).

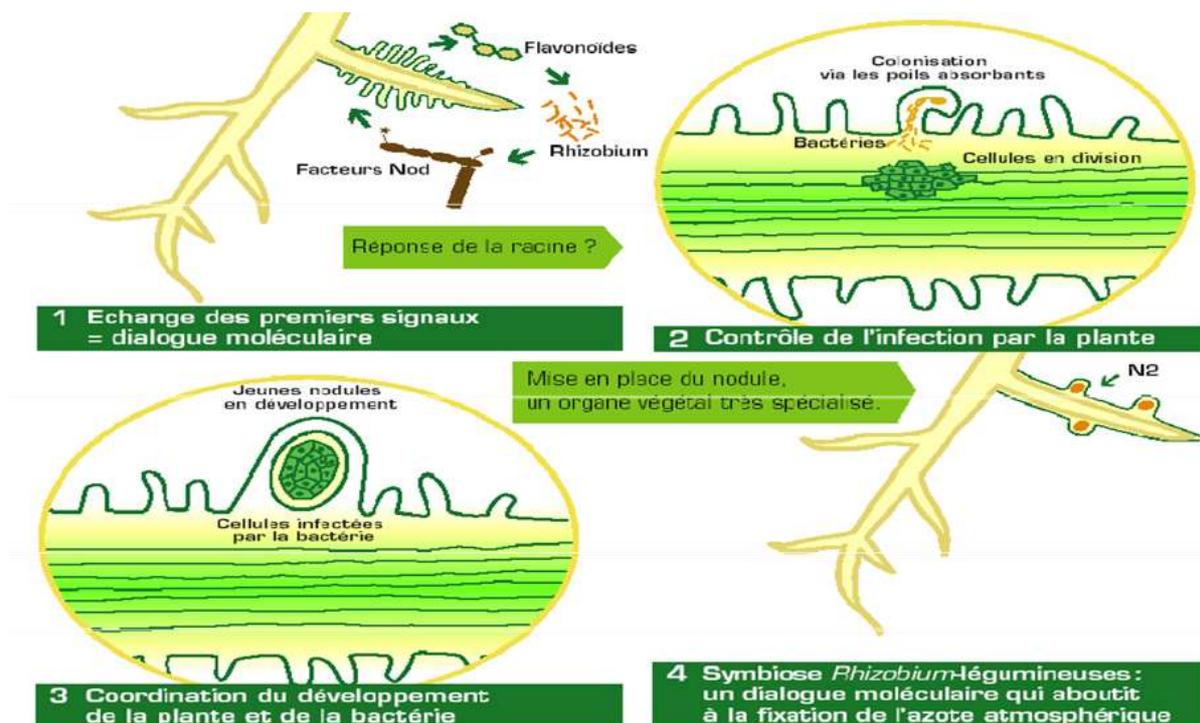


Figure 4: Dialogue moléculaire entre la plante et la bactérie lors de mise en place d'une association symbiotique fixatrice d'azote (**Lezrek, 2008**).

5. Production et consommation de légumineuses

5.1. Production mondiale

Les légumineuses sont cultivées partout dans le monde, mais plus particulièrement dans des pays en développement (Inde, Chine, Canada, en Australie, au Brésil, Nigeria) illustré en **Figure 5** (**Gordon, 2002**).

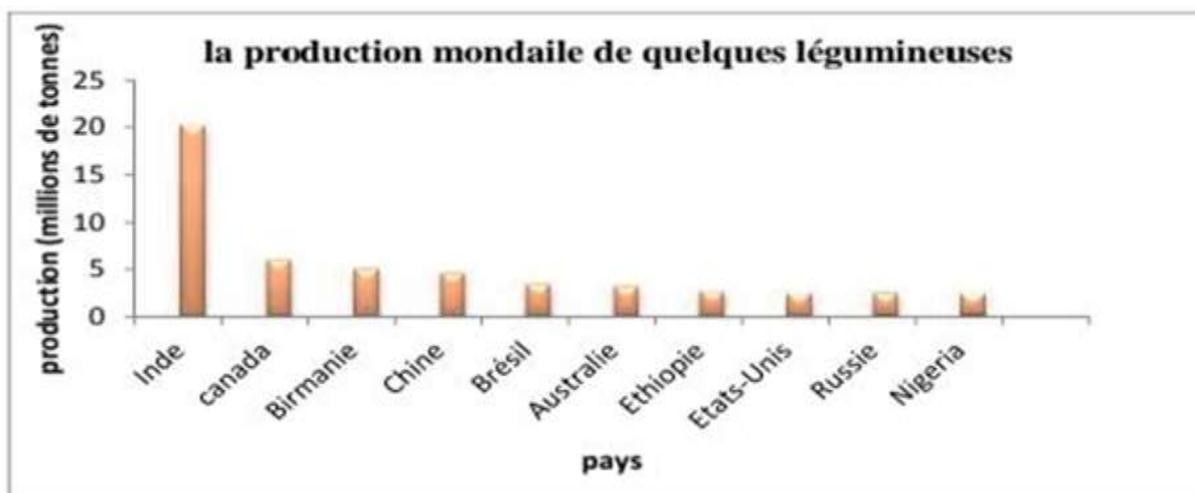


Figure 5: La production mondiale de quelques légumineuses (FAO, 2016).

Cette production mondiale des légumineuses à graines représente 12,5% de la production mondiale des céréales en 2012. Les légumineuses à graines hors soja ont connu plus de 50% d'augmentation en 30 ans (entre 1980 et 2010). Le pois représente 10,5 Mt alors que la féverole est de 6 Mt en 2010 (Schneider *et al.*, 2015).

Jusqu'aux années 2000, l'Inde produisait les deux tiers de la production mondiale de lentille qui était de l'ordre de 08 Mt dans les années 1990. Canada est ensuite devenu le deuxième acteur majeur. De nos jours, ces deux pays produisent 60% de la production mondiale de lentille (près de 05 Mt) tous types confondus. Les autres producteurs sont la Turquie, les Etats-Unis, l'Australie, l'Ethiopie et le Népal. L'UE produit moins du tiers de ses besoins avec 60000 tonnes produites principalement en Espagne (près de 50% en moyenne mais avec de fortes fluctuations interannuelles liées aux variations de rendement) et en France et importait près de 190 000 tonnes de lentilles dans les années 2010 (Schneider *et al.*, 2015).

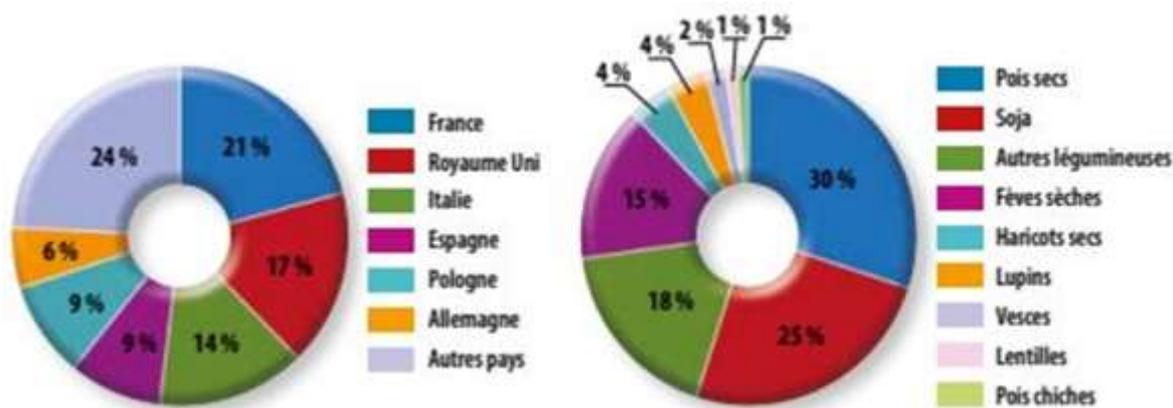


Figure 6: Principaux états membres cultivant des légumineuses à graines et principales espèces cultivées (Schneider *et al.*, 2015).

5.2. Consommation mondiale

Les légumineuses sont consommées dans tous les pays du Moyen-Orient, de l'Afrique du Nord, de l'Amérique latine et du sous-continent Indien afin de satisfaire les besoins alimentaires de leurs populations. Elles sont aussi consommées dans les pays développés mais à de moindres mesures (**Gordan, 2002**).

La consommation mondiale est d'environ 06 kg/an/personne en 2002 (**Roudaut et Lefrancq, 2005**). Le **Tableau 7** représente l'évolution de la consommation mondiale des légumineuses en kg/an/personne, on constate une baisse de consommation dans les années 80 puis une légère remontée dans les années 90.

Tableau 7: Evolution de la consommation des légumineuses kg/an/personne (**Roudaut et Lefrancq, 2005**).

1880	1937	1960	1985	1996	2002
10	5,5	3,7	1,4	1,7	2

5.3. Légumineuses en Algérie

Les légumineuses alimentaires ont toujours été présentes dans les systèmes de production agricole en Algérie. Sur le plan géographique, les espèces de légumineuses alimentaires les plus cultivées sont la lentille, le pois chiche, le pois, la fève et le haricot (**Abdelguerfi, 2003**).

La production nationale de légumes secs ne satisfait pas tous les besoins de la population algérienne. Malgré une augmentation des surfaces réservées à cet effet, le rendement reste assez faible de 0,4 à 1,4 tonnes/ha (**Amir et al., 2006**).

6. Exemple de principaux légumineuses [La FEVE (fêverole) : *Vicia faba* (L.)]

6.1. Présentation de la fève

La fève est une plante potagère de la famille des papilionacées cultivée depuis la plus haute antiquité entre 4000 avant J-C et le 3^{ème} millénaire avant J-C (**Getachew et Martin, 2006**). Son centre d'origine et de domestication se trouve en Asie occidentale (originaire de Perse), d'où elle s'est diffusée en Europe, en Afrique et en Asie centrale.

L'Ethiopie et l'Afghanistan sont considérés comme des centres secondaires de diversité.

Elle tenait dans nos contrées le rôle d'haricot avant que ce dernier soit importé d'Amérique du Sud (Abdallah, 1979). On n'en consomme en revanche que les graines, fraîches ou séchées (Schultz, 1972). La fève est cultivée sur tout le pourtour méditerranéen, elle constitue toujours une des bases de l'alimentation en Afrique du Nord et en Orient (Wikipédia, 2010 ; Ladizin, 1975). Ce sont des plantes herbacées robustes, pouvant dépasser 01 mètre. Les feuilles sont pennées et terminées par une pointe, avec des folioles larges, de couleur glauque, inflorescence en racème de deux à cinq fleurs (parfois fleur solitaire), à corolle blanche ou rosée, avec des taches noires sur les ailes. Le fruit est une gousse contenant des graines de forme ovale et aplatie avec une peau épaisse (Belkhodja, 1996).

D'après Gallais et Bannerot (1992) et Nuessly *et al.*, (2004), la classification basée sur le critère de la taille des graines est généralement retenue.

L'espèce *Vicia faba* L. renferme à son tour trois sous-espèces :

- *Vicia faba major* : La fève maraichère à grosses graines destinées à la consommation humaine.
- *Vicia faba minor* : La petite fève ou féverole utilisée pour l'alimentation du bétail.
- *Vicia faba equina* : La fève à cheval, à grains moyens, aussi appelée féverole ou févette dans certaines régions. Comme son nom l'indique, elle est également destinée à l'alimentation du bétail.



Figure 7: (a) Graines de *Vicia faba major*, (b) Graines de *Vicia faba minor*, (c) Graines de *Vicia faba equina* (Nuessly *et al.*, 2004).

6.2. Classification botanique de la fève

D'après Wojciechowski *et al.*, (2004), la classification est décrite comme suite :

- **Règne** : Plantae.
- **Sous-règne** : Tracheobionta.
- **Division** : Magnoliophyta.
- **Classe** : Magnoliopsida.
- **Sous-classe** : Rosidae.
- **Ordre** : Fabales.
- **Famille** : Fabaceae.
- **Genre** : *Vicia*.
- **Espèce** : *Vicia faba* L.



Figure 8 : La forme de *Vicia faba* L (Wojciechowski *et al.*, 2004).

6.3. Caractéristiques de la fève

6.3.1. Caractères botaniques

C'est une plante annuelle herbacée, à tige creuse quadrangulaire (deux orthostiques), sa hauteur varie de 60 centimètres à un mètre, à racine pivotante portant des nodosités renfermant les bactéries spécifiques fixatrices de l'azote atmosphérique (Laumonnier, 1979) (figure 9).

- Les feuilles, composées de 2 à 7 folioles et pennées, vertes brillantes en forme allongée, sont alternes sur la tige de section carrée.
- La tige présente un nombre variable (5 à 10) de nœuds végétatifs à sa base.
- Les fleurs classiques des légumineuses sont portées aux aisselles des nœuds (**Benachour, 2008**). Cette fleur de long de 3 cm environ est blanche avec de petites ailes tachetées de violet noirâtre.
- Les fruits sont des gousses, contenant de 3 à 12 grains, larges et ovales et de 3 à 8 cm de long (**Gallais et al., 1992**).



Figure 9: Caractéristiques botaniques d'une plante de fêverole (*Vicia faba* L.) (**Larousse agricole, 2002**).

6.3.2. Caractères cultureaux

- ❖ **La température :** La fêverole présente des exigences thermiques plus faibles que celle d'autres légumineuses (haricots et pois), la plantule résiste assez des gelées tardives que ne dépassent pas (-3°C), les fortes chaleurs lui sont néfastes (arrêt de croissance) (**Chaux, 1992**).
- ❖ **L'eau :** La fêverole est très sensible à la sécheresse, elle demande une bonne alimentation hydrique régulière en eau tout au long de sa végétation particulièrement durant la phase « début de floraison » (**Boussard, 1943**).
- ❖ **Exigences agro-pédologiques :** Compte tenu de ses exigences en eau, la fève préfère les sols profonds et peu acides (**Sibennaceur, 2007**).

6.4. Cycle végétatif de la fève

D'après **Weber und Bleiholder *et al.*, 1990** :

1- germination :

- Graine sèche
- Début de l'imbibition de la graine
- Imbibition complète
- La radicule sort de la graine
- La jeune pousse sort de la graine (apparition de la plumule)
- La jeune pousse se dirige vers la surface du sol
- La jeune pousse perce la surface du sol.

2- Développement des feuilles

- 02 feuilles écailleuses visibles
- Première feuille étalée
- 02 feuilles étalées
- 03 feuilles étalées
- 09 ou davantage de feuilles étalées.

3- Formation de pousses latérales :

- Pas de pousses latérales
- Début du développement de pousses latérales
- 03 pousses latérales discernables
- Fin du développement de pousses latérales
- 09 ou davantage de pousses latérales.

4- Elongation de la tige principale :

- Début de l'élongation de la tige principale
- L'élongation du premier entre-nœud est visible
- 02 entre-nœuds visibles
- 03 entre-nœuds visibles
- 09 ou davantage d'entre-nœuds visibles.

5- Apparition de l'inflorescence :

- Les boutons floraux sont formés mais toujours enveloppés par des feuilles
- les premiers boutons floraux sont visibles et ne sont plus enveloppés par des feuilles
- Les premiers boutons floraux sont individuellement visibles, toujours fermés mais dégagés des feuilles
- Les premiers pétales et de nombreux boutons floraux individuels toujours fermés sont visibles.

6- Floraison :

- Les premières fleurs sont ouvertes
- Les fleurs de la première grappe sont ouvertes
- Les fleurs sont ouvertes sur 3 grappes par plante
- Les fleurs sont ouvertes sur 5 grappes par plante
- La floraison s'achève
- Fin de la floraison.

7- Développement du fruit :

- Les gousses ont atteint leur taille finale.

8- Maturation des fruits et graines :**9- Sénescence :**

- La tige devient plus foncée
- 50% de la tige est brune ou noire
- Plante desséchée et morte, produit après récolte.

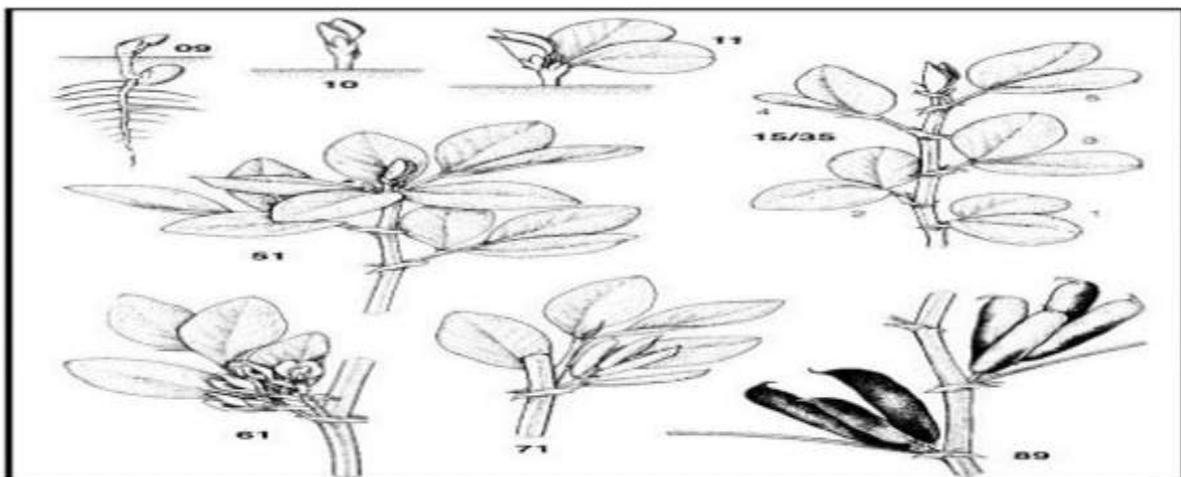


Figure 10: Stades de germination (Weber und Bleiholder *et al.*, 1990).

6.5. Maladies de la fève

Tableau 8 : Les maladies de la féverole.

Maladies et ravageurs	Nom scientifique	Dégâts	figure	référence
Rouille	<i>Uromyces fabae</i>	-peut occasionner des pertes de rendement jusqu'à 25 q/ha -la présence sur les feuilles de pustules de couleur brun rouge auréolées d'une partie plus claire		
Botrytis	<i>Botrytis fabae</i>	- petites taches brunes de 2-3 mm de diamètre dispersés sur la feuille pouvant entraîner une chute précoce des feuilles.		
Ascochytose	<i>Ascochyta fabae</i>	Généralement sur une feuille, pas plus de 2 tâches s'élargissent pour atteindre un diamètre supérieur à 3 mm, plus âgées sont de type "brûlure de cigarette" avec une plage blanche au centre.		
Bruches	<i>Bruchus rufimanus</i>	-Larve pénètre dans la gousse et dans la graine.		
Sitones	<i>Sitona lineatus</i>	-L'adulte mord les feuilles (encoches sur le bord des feuilles). -Détruisant les nodosités.		
Pucerons noirs	<i>Aphis fabae</i>	-forment des colonies ou manchons sur les tiges de féverole. -affaiblissent les plantes		ITAB, 2014



Chapitre III :
Les effets
écotoxicologiques et
les méthodes de
décontamination

Chapitre III : Les effets écotoxicologiques et les méthodes de décontamination

Les hydrocarbures ont un effet très dangereux sur l'environnement (et le sol en particulier), dont l'homme a découvert une grande variété de méthodes de réhabilitation des sols contaminés, possédant toutes des avantages et des inconvénients avec lesquels il doit composer. Or, la méthode choisie devra être en mesure de traiter la source de pollution, de maîtriser les impacts et de protéger les cibles exposées (**Colombano et al., 2010**).

1. Impact sur le sol

Les hydrocarbures sont des polluants très persistants qui affectent les composants et la fertilité ainsi que les propriétés du sol (**Koller, 2004**). Leur présence dans le sol modifie considérablement ses propriétés physiques, chimiques et biologiques.

1.1. Effet sur les propriétés physiques

Les études réalisées dans le but de déterminer l'effet des hydrocarbures sur les propriétés physiques du sol sont très limitées, quelques observations intéressantes ont été faites par certains auteurs.

Rouquerol et ses collaborateurs (1987) ont montré que les hydrocarbures enrobaient les particules minérales et assuraient leurs dispersions. **Mettauer et ses collaborateurs (1987)** in **Fezani et Khider (2007)**, soutiennent l'idée que la présence des hydrocarbures améliore la stabilité structurale d'un sol, accroît sa rétention en eau et réduit sa mouillabilité.

1.2. Effet sur les propriétés chimiques

Selon **Chaineau et ses collaborateurs (1996)**, les effets des hydrocarbures sur les propriétés chimiques du sol consistent généralement en :

- Une augmentation de la concentration en éléments traces tels que le manganèse (Mn), le zinc (Zn), le fer (Fe) et le plomb (Pb).
- Une élévation du pH du sol et de la teneur en potassium (K) et en calcium (Ca).
- Une diminution de la teneur du sol en phosphore (P) et une augmentation en carbone organique total.
- Une augmentation de la conductivité électrique (CE) entraînant l'inhibition de certaines

plantes très sensibles à la présence des sels.

1.3. Effet sur les propriétés biologiques

Les effets des hydrocarbures sur l'activité biologique du sol dépendent de leurs natures, de leurs concentrations dans le sol et d'autres facteurs liés au milieu (Duchaufour, 2001). Les composés organiques contaminants peuvent inhiber la croissance des micro-organismes et leur métabolisme. Cette inhibition est liée à des interactions avec la membrane cellulaire de ces composés fortement hydrophobes et à la formation de métabolites toxiques (Girard, 2005).

2. Impact sur l'homme

Une fois présents dans les différentes composantes de l'environnement, les hydrocarbures peuvent passer dans la chaîne alimentaire et se révéler à la fois cancérigènes, mutagènes et reprotoxiques lorsqu'ils sont soit inhalés, ingérés ou même absorbés (figure 11) par les êtres vivants (Qiu *et al.*, 1997 ; Mekhalif, 2009).

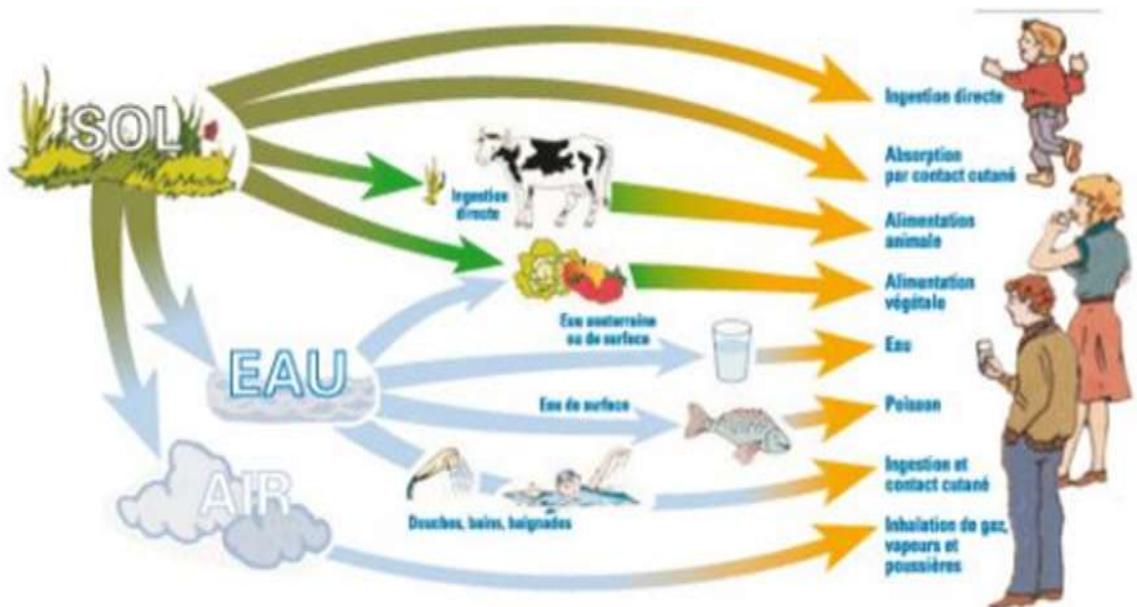


Figure 11: Chaîne de transmission des polluants organiques chez les êtres vivants (Harmens *et al.*, 2013).

Selon Harmens *et al.*, (2013), l'homme peut assimiler les hydrocarbures par trois voies :

- Par voie digestive, en ingérant des aliments qui contiennent des hydrocarbures.
- Par voie respiratoire, en respirant des poussières qui en contiennent.
- Par voie cutanée, en touchant des matériaux qui en contiennent.

La structure moléculaire de certains types d'hydrocarbures leur confère la possibilité d'être transformés dans l'organisme en composés extrêmement toxiques, appelés époxydes. Les époxydes réagissent très facilement avec l'ADN, ce qui peut entraîner des mutations génétiques conduisant parfois à des cancers. Certains hydrocarbures peuvent également affecter la reproduction ou le développement fœtal. Ces effets ont été démontrés en expérimentation animale, mais le risque existe également pour l'homme.

3. Impacts sur l'environnement

Les sols contaminés par les hydrocarbures présentent un danger lors d'un contact direct avec l'homme ou l'animal ou lors de leur transfert dans les chaînes alimentaires. C'est le phénomène de bioaccumulation avec le piégeage, par les végétaux et les animaux, des polluants ou de leurs produits de dégradation jusqu'à des teneurs atteignant les seuils de toxicité (Scriban, 1999). La pollution est une modification défavorable du milieu naturel (dégradation, altération) qui apparaît en totalité ou en partie comme le sous-produit d'action humaine (Rodrigo *et al.*, 2005).

Les hydrocarbures sont des contaminants environnementaux omniprésents. Ils constituent une classe des produits chimiques organiques dangereux dont certains de leurs effets toxiques sont reconnus comme fortement cancérigènes, génotoxiques, immunotoxiques, mutagéniques ou tératogéniques (Wang *et al.*, 2000 ; Rehmann *et al.*, 2001 ; Cheung et Kinkle, 2000 ; Alexander *et al.*, 2002 ; Kanaly *et al.*, 2002 ; Eriksson *et al.*, 2003).

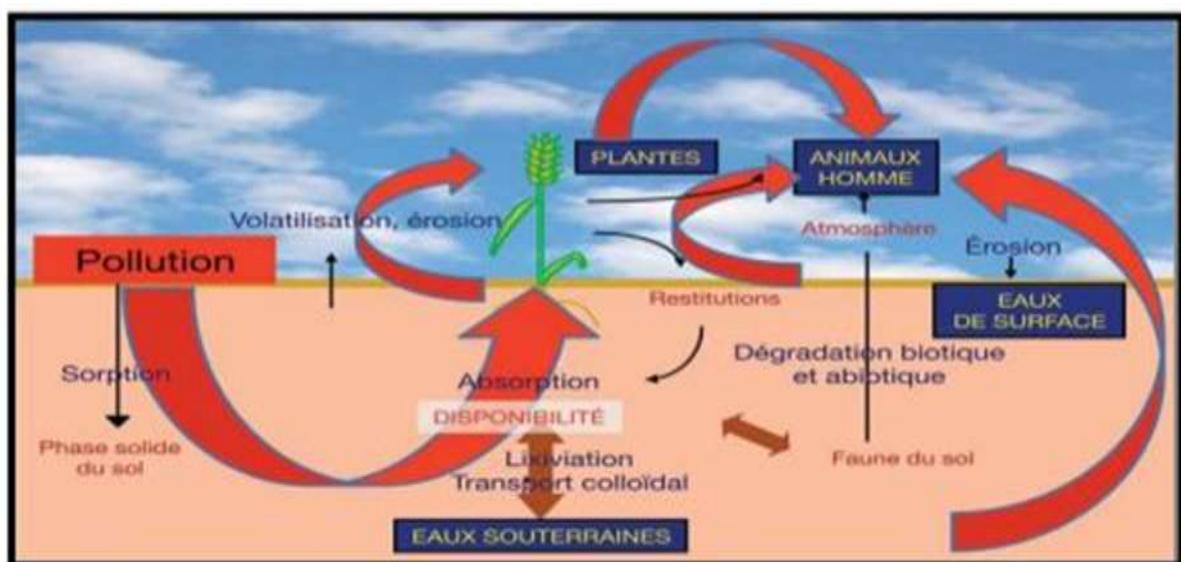


Figure 12: Cycle des polluants dans le système sol-plante par différentes voies de transformation (Eriksson *et al.*, 2003).

4. Impact sur le végétale

En ce qui concerne les végétaux, les impacts sont divers et ils sont en partie dus au taux de pénétration des hydrocarbures dans le sol. Les hydrocarbures s'infiltrant et le polluant peut toucher le système racinaire et limiter les échanges gazeux qui existent entre les racines et le sol. Or, c'est par les racines que les espèces vivaces se régénèrent. Selon **koller, (2004)**, les hydrocarbures ont un effet sur la germination et sur la croissance végétative qui a un impact négatif sur le rendement de la matière sèche.

Les effets des hydrocarbures sur les végétaux sont très divers selon les familles, ces effets peuvent également varier en fonction de la concentration (**Colin, 2000**). D'autres effets tels que l'apparition des chloroses, des diminutions de l'activité photosynthétique et de stress hydrique ont été rapportés par **Reilly et al., (1996)** cité par **Norini, (2007)**.

4.1. Impact sur les légumineuses (la fève en particulier)

D'après les résultats obtenus sur quelques espèces à savoir la fève, le pois, le soja et la Luzerne; ils nous ont permis de remarquer des différences existantes au niveau des plantes des sols témoins et les plantes des sols contaminés par le pétrole brut et le gasoil, ce qui nous confirme l'effet toxique des hydrocarbures sur les végétaux qui se traduit par une diminution du taux de levée, de la hauteur et de la longueur des entre-nœuds, du nombre des feuilles, de la biomasse végétale, du volume racinaire ainsi que du nombre des nodules. La levée constitue un premier diagnostic de réussite d'une culture. Une mauvaise levée peut avoir plusieurs causes liées à la conduite culturale (semis trop profond ou trop superficiel), climat ou à des parasites (**Mazliak, 1982**).

Selon **Mazliak (1982)**, le taux de germination est satisfaisant à partir de 85%. En se référant aux taux de levée, le pourcentage de levée de la fève dans les sols différemment contaminés par le gasoil et le pétrole brut est meilleur que celui obtenu avec la luzerne, le soja et le pois, cela peut être dû à la capacité de la fève à tolérer la pollution par le gasoil et le pétrole brut.

Les résultats sont différents de ceux rapportés par **Bergue (1986)**, la plus part des hydrocarbures n'ont pas d'effets irréversibles sur la germination de graines telles que la luzerne et le trèfle, alors que **Udo et Fayemi (1995) in Chaineau et al., (1997)**, ont dit les hydrocarbures peuvent entrer dans les graines, empêcher les réactions métaboliques et tuer l'embryon par une toxicité aiguë directe, Il y'a également une forte évidence que l'inhibition

de la germination soit corrélée à l'hydrophobie des hydrocarbures qui empêche et/ou réduit les échanges d'eau et de gaz surtout l'oxygène. **Bergue (1986)** a signalé que les effets des hydrocarbures sur la flore dépendent aussi de l'espèce végétale et du stade physiologie de la végétation.

La comparaison des résultats des espèces à savoir la fève, le pois, le soja et la luzerne, nous a permis de remarquer la différence existant au niveau des différents sols contaminés par le gasoil. Ces résultats nous laissent supposer que la fève tolère la pollution par les hydrocarbures à certaines concentrations. Parallèlement, nous avons remarqué que les tiges des plantes (fève, pois, soja et la luzerne) ont pris une couleur noirâtre. Les travaux réalisés par **Takilt et Taouachi (2013)**, sur la luzerne et celui de **Zerrouk et Ouhedda, (2013)** sur la fève, la luzerne, le soja et le pois ont révélé que les hydrocarbures aux différentes concentrations ont un effet néfaste sur la croissance végétale. **Chaineau et al., (1997)** ont associé la réduction de la croissance des plantes ainsi que la longueur entre nœuds lors d'une contamination du sol par les hydrocarbures, au déficit alimentaire causée par les hydrocarbures. Ils ont montré également que la concentration du gasoil a un effet sur la physiologie du végétal.

D'après **Giddens (1976)**, quelque soit la concentration en hydrocarbures, la croissance des plantes telles que la fève, l'orge et le maïs est réduite. Cette réduction serait dû à un manque d'assimilation d'eau et d'éléments nutritifs et au changement des propriétés du sol. Selon **Barea et al., (1983) ; Rovira et al., (1983) in Norini (2007)**, certains microorganismes, sont même capables de sécréter des phytohormones, substances régulant la croissance des plantes (auxines, gibérellines, cytoquinine, acide absissique et éthylène).

Les feuilles de la fève ont été affectées par la présence des différentes concentrations du gasoil et du pétrole brut dans le sol de culture, en présentant des chloroses, des jaunissements et une réduction du nombre des feuilles, ces résultats sont confirmés par les résultats de **Dominguez (2004)**. Ces signes de toxicité peuvent être dus à la diminution de la photosynthèse, soit par altération des réactions métaboliques en inhibant la synthèse de chlorophylle ou bien par un manque d'éléments essentiels pour ce processus, qui seront lessivés par les hydrocarbures ou immobilisés et donc devenus non assimilables, en tenant compte du fait que l'assimilation du nitrate a lieu principalement dans les feuilles et les racines. Selon **Njoku et al., (2009)**, la pollution du sol par le pétrole brut et le gasoil entraîne une faible perméabilité et une faible infiltration de l'eau dans le sol, qui affecter le

développement des feuilles. Selon **Raymond et al., (1975) in Norini (2007)**, les haricots cultivés dans les sols contaminés par le pétrole brut et le gasoil développent des déformations dans les feuilles et un retard significative de la croissance.

L'effet toxique des hydrocarbures sur la biomasse végétale (aérienne et racinaire) s'exprime par un retard significatif de la croissance (diminution de la taille des plantes, de leurs feuilles et de leurs racines), cette diminution se traduit par la réduction du poids sec (**Chaineau et al., 1997**).

Morot (1997), a noté que la nutrition azotée limitait généralement la croissance, le développement et le rendement végétal. Cette réduction de la biomasse végétale nous laisse penser au sol qui est la source d'une grande partie des éléments nécessaires au développement végétaux, le changement de ses propriétés (changement de la teneur en humidité, du pH et de la matière organique) influence la croissance végétale. Selon **Norini (2007)**, la diminution de la biomasse racinaire peut être due aux propriétés hydrophobes des hydrocarbures qui peuvent limiter l'effet bénéfique de l'association plante micro-organismes qui est basée sur les flux de la substance soluble. Cette atteinte de la racine ne permet pas à la plante d'augmenter sa surface de contact avec le milieu de culture pour optimiser la nutrition minérale.

D'après **Njoku et al., (2009)**, la diminution de la croissance des racines peut être due à la diminution de la pénétration de la racine ainsi l'inhibition de l'absorption des matériaux. **Norini (2007)**, a noté que les nutriments minéraux sont prélevés sélectivement de la solution du sol par la racine, la concentration et la disponibilité en minéraux dans la solution du sol dépendent de la propriété de ce sol ainsi que les activités métaboliques des racines.

Des valeurs très faibles de volume racinaire qui correspond à un mauvais développement du système racinaire de la fève. Dans les sols différemment contaminés par le gasoil et le pétrole brut, nous avons constaté que le système racinaire est très fin, moins ramifié et beaucoup moins développé. Selon **Njoku et al., (2009)**, la pollution du sol par le pétrole brut entraîne une faible infiltration de l'eau dans le sol, ce qui va affecter le développement des racines.

La diminution du nombre de nodosité, qui a été remarqué chez les plantes cultivées dans les sols contaminés par le pétrole brut, nous laisse supposer que la présence du pétrole et du gasoil dans le sol engendre une inhibition de l'activité biologique, cette inhibition est d'autant plus importante que la concentration du sol en hydrocarbures est élevée, confirmé par

Environ (1979) in Njoku (2009), en utilisant le soja dans des sols contaminés par le pétrole. Selon **Barriuso et al., (1996)**, l'action toxique des hydrocarbures provoque un ralentissement de l'activité microbienne du sol, se traduit par des modifications des caractéristiques physiologiques de la microflore, entre autre, la diminution du système enzymatique mais aussi de la diversité des micro-organismes. La composition des communautés microbiennes de la rhizosphère dépend du type de la plante, du type de la racine, de l'âge de la plante (**Norini, 2007**). L'atteinte du nombre des nodules peut être due à la diminution de l'apport des éléments minéraux tel que le phosphore qui permet l'amélioration de la symbiose légumineuses-rhizobia (**Bordeau et al., 1981 in Anonyme, 2000**), ainsi, qu'elle peut être due à l'augmentation du pH et de la conductivité électrique.

Une absence totale du nombre des nodules a été enregistré sur la racine de la fève. Une telle différence peut être due aux conditions de culture ou des conditions physico-chimiques plus défavorables à la symbiose. La symbiose y serait limitée par certains facteurs édaphiques (**Anonyme, 2000**). Selon **Anonyme (1987)**, une fréquence élevée de nodulations avec une souche résulte d'une part de la compétitivité de cette souche, et d'autre part aussi du caractère de nodulation préférentielle contrôlée par la plante hôte. Selon **Heller (1998)**, l'oxygène est nécessaire dans la fixation d'azote par l'activation de la chromoprotéine (légnémoglobines) au niveau de la plante hôte, tandis que l'accumulation des hydrocarbures dans le sol provoque l'absence de l'oxygène au niveau des pores qui sont occupés par les hydrocarbures au lieu de l'air.

Selon **Andrade et al., (2004) ; Ayotamuno et al., (2004) in Njoku et al., (2009)**, il existe une corrélation positive entre le pH du sol et la quantité des hydrocarbures ajoutée. Selon **Song et al., (1986) Phyn (1988) in Njoku et al., (2009)**, ils ont indiqué une diminution du pH suite à une dégradation du pétrole brut, cette diminution qui peut être due à l'accumulation des acides organiques (**Merkl et al., 2005a in Njoku et al., 2009**), ou à la production des radicaux d'acides par la nitrification (**Tisdale et Nelson, 1975 in Njoku et al., 2009**). Les bactéries se développent mieux dans les milieux neutres et légèrement alcalins. **Gabat (2004)**, a noté que l'activité microbienne est plus affectée par le pH.

Selon **Mathieu et Pielain (2003)**, la conductivité électrique d'une solution du sol est un indice des teneurs en sels solubles dans ce sol, elle exprime approximativement la concentration des solutés ionisables présents dans l'échantillon, c'est-à-dire son degré de salinité. Les hydrocarbures ont un effet sur la conductivité électrique en diminuant le degré de

la salinité des sols.

Chaineau et al., (1997) ont noté une augmentation de la conductivité électrique qui entrainera l'inhibition de certaines plantes très sensibles à la présence des sels. Par contre les travaux réalisés par **Khajehnouri (2011) in Amiri (2013)** sur les propriétés électriques des sols contaminés par les hydrocarbures, ont montré que la conductivité électrique du sol contaminé décroît avec l'augmentation de la saturation en hydrocarbure. La conductivité électrique, en principe, sensible à la composition minérale du sol, granulométrie, teneur en eau, chimie du fluide interstitiel, la teneur en métal et le degré de présence d'hydrocarbures.

5. Les méthodes de remédiation des sols contaminés par les hydrocarbures

Les hydrocarbures subissent une grande variété de mécanismes d'élimination au contact avec le sol (principalement par évaporation des fractions les plus légères et dégradation bactérienne). L'activité microbienne dans le sol s'accroît toujours fortement, quelle que soit la nature du sol et des hydrocarbures. Une bonne aération et un apport approprié de fertilisants tels que l'azote (N) et le phosphore (P) peuvent permettre d'éliminer jusqu'à 75 à 100% d'hydrocarbures (**Bergue et Mérienne, 1985**).

Les particulaire de dépollution dépend de certains paramètres tels que le type de polluant et la variabilité de son comportement (volatilité, adsorbabilité, polarité etc...), la diversité des conditions locales (nature du sol, de la nappe, accessibilité, disponibilité des surfaces utilisables à proximité, zone urbaine ou non), la qualification de la pollution (récente ou ancienne, étendue ou non). Par ailleurs, les exigences administratives et économiques sont à prendre en compte. Tout ceci nécessite donc au préalable, un diagnostic (**Bouderhem et Khelil, 2017**).

Selon **Soleimani et Jaber, (2014)**, les méthodes d'assainissement des sols peuvent être divisées en quatre parties (physique, chimique, thermique et biologique).

5.1. Méthodes physiques

Les traitements physiques constituent la grande majorité des techniques mises en œuvre aujourd'hui ; elles consistent dans leurs principe à transférer et concentrer la pollution vers des points de récupération sans les modifier ou les détruire, en se servant pour leurs transports des fluides présents dans le sol ou injectés. Les procédés d'extraction, de lavage et de confinement sont les plus souvent utilisés (**Colin, 2000**).

5.2. Méthodes chimiques

Les traitements chimiques ont pour but de détruire les polluants ou de les transformer en une forme moins nocive pour l'environnement et ceci par l'intermédiaire de réactions chimiques se produisant entre le polluant et le réactif ajouté. Ils peuvent être applicables *in situ* ou après excavation des sols. La majorité des procédés exigent que les sols soient sous forme de boues ou que les contaminants soient mobilisés dans un milieu liquide. (**Masten et Davie, 1997**). Selon **Lecompte (1998)**, les techniques les plus utilisées sont les méthodes de mobilisation et d'extraction, les méthodes destructives par réaction et les méthodes électrochimiques.

5.3. Méthodes thermiques

D'après **Girard, (2005)**, le principe des méthodes thermiques est de porter le matériel pollué à haute température pour le détruire, en extraire les polluants ou les immobiliser. Elles sont adaptées aux polluants facilement convertibles en CO₂ et en H₂O. Les méthodes les plus utilisées sont l'incinération, la désorption thermique et la pyrolyse (**Colin, 2000**).

5.4. Méthodes biologiques

Les procédés biologiques permettent de dégrader les polluants par l'action des organismes (bactéries, champignons, levures, plantes). Ils peuvent être utilisés seuls ou en complément d'une autre technique. La décontamination par voie biologique consiste donc à stimuler un phénomène naturel pour en augmenter le rendement afin de détruire le polluant organique, ces derniers sont transformés en général en molécules de moins en moins polluantes (**Delage et Schrefler, 2005 ; Colin, 2000**).

5.4.1. Bioremédiation

Les techniques de bioremédiation utilisent les propriétés dépolluantes de micro-organismes (bactéries, micro algues, 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. La bioremédiation se déroule généralement en conditions d'aérobies. Cependant, l'application de systèmes de bioremédiation en condition d'anaérobies permet la dégradation d'un certain nombre de molécules récalcitrantes. (**Koller, 2004**). Les différentes technologies utilisées dans la bioremédiation sont résumées dans le (**tableau 09**).

Tableau 9: Différent traitement de bioremédiation (Vidali, 2001).

Techniques	Principe
Bioaugmentation	Addition d'une culture des bactéries dans le milieu contaminé. Utilisée couramment dans les bioréacteurs et le système <i>ex-situ</i> .
Biofiltration	Utilisation d'un bio filtre pour traiter les émissions gazeuses.
Biostimulation	Stimulation des populations de micro-organismes indigènes, présente dans le sol ou les eaux souterraine, elle peut être utilisée <i>in-situ</i> ou <i>ex-situ</i> .
Bioréacteurs	Déroulement de la biodégradation dans des réacteurs ou bassins.
Biolixiviation	Excavation de la couche à dépolluer, son emballage dans une membrane étanche, l'apport des nutriments indispensable aux microorganismes et sol ainsi traité. Utilisé pour la dépollution des métaux non dégradables.

5.4.2. Phytoremédiation

La phytoremédiation est définie comme l'utilisation des plantes pour éliminer ou transformer les polluants en composés moins toxiques. La phytoremédiation repose essentiellement sur les interactions entre les plantes, le sol et les microorganismes pour réduire, dégrader ou immobiliser des composés organiques ou inorganiques qui polluent le sol, l'eau ou l'air (Reeves *et al.*, 2001 ; Schwartz *et al.*, 2006). Cette technologie est utilisée, *in situ* ou *ex situ*, pour éliminer les métaux, les pesticides, les solvants, les explosifs, les hydrocarbures, les radionucléides, etc... La phytoremédiation regroupe différentes méthodes qui se veulent toutes des techniques d'amélioration des sols et de l'eau contaminés par l'établissement d'un couvert végétal. Elles seront appliquées en fonction de type de contamination et des objectifs de remédiation à atteindre (Pivetz, 2001 ; Usepa, 2001 ; Sait *et al.*, 1995).

5.4.2.1. Les avantages

La phytoremédiation est la méthode la moins destructrice car elle utilise des organismes naturels et préserve l'état naturel de l'environnement contrairement à l'emploi de procédés chimiques, il n'y a donc pas d'impacts négatifs sur la fertilité des sols et les végétaux produits peuvent être exploités (Lecomte, 1998). D'un point de vue économique, les coûts sont réduits où les techniques de la phytoremédiation sont en général de 10 à 100 fois moins coûteuses que les techniques physico-chimiques (Illović *et al.*, 2012).

Les principaux avantages de la phytoremédiation en comparaison avec les méthodes classiques de remédiation peuvent être résumés comme suit :

- Elle est peu coûteuse : des études ont indiqué que la mise en œuvre de la phytoremédiation peut entraîner des économies de 50 à 80% par rapport aux technologies traditionnelles.
- Elle est moins perturbatrice pour l'environnement : la phytoremédiation peut fournir un habitat aux animaux, favoriser la biodiversité, et aider à accélérer la restauration des écosystèmes qui étaient auparavant perturbés par l'activité humaine. Egalement, la phytoremédiation peut favoriser une meilleure qualité de l'air ou de l'eau, et la végétation peut aider à réduire l'érosion par le vent ou l'eau.
- Elle ne pose pas un besoin de disposition de sites : les installations de phytoremédiation peuvent améliorer l'esthétique des friches industrielles ou autres sites contaminés.
- Elle a une grande probabilité d'acceptation par le public de point de vue esthétique.
- Elle implique plusieurs mécanismes de dépollution.
- Elle évite le terrassement et le trafic public : les forêts et autres végétations servent de stocks de carbone pour aider à piéger le CO₂ émis à partir d'autres sources.
- Elle a ce caractère versatile de traiter divers types de produits dangereux (**Wan et al., 2016**).

5.4.2.2. Les inconvénients

La phytoremédiation présente cependant des inconvénients non négligeables. Les plantes doivent être en contact avec le polluant pour pouvoir agir. La phytodépollution est donc limitée par la profondeur des racines des plantes utilisées, celles-ci peuvent atteindre 02 mètres de profondeur dans le cas des herbacées et plus de 05 mètres pour les arbres (**Negri et al., 2003**). D'autres inconvénients varient avec et le type de contamination pour lequel la méthode serait utilisée. Ainsi, les principales limites et contraintes de la phytoremédiation viennent des problèmes suivants :

- La formation de la végétation pourrait être limitée par d'extrêmes toxicités de l'environnement : si les concentrations de contaminants extrêmement élevées ne permettent pas aux plantes de pousser ou de survivre, la phytoremédiation est susceptible d'être plus efficace ou raisonnable pour des concentrations plus faibles de contaminants.

Egalement, si des espèces non indigènes sont sélectionnées pour la phytoremédiation, les conséquences de leur impact dans l'écosystème pourraient être mal connues.

- Les contaminants accumulés dans les feuilles peuvent encore être relâchés dans l'environnement.
- La solubilité de quelques contaminants peut augmenter, causant d'énormes dégâts environnementaux et/ou la migration des polluants : afin de réussir l'assainissement, la contamination doit généralement être assez peu profonde de telle sorte que les racines des plantes puissent atteindre les contaminants.
- Longue durée du processus : Le temps nécessaire pour atteindre les objectifs peut être plus long avec la phytoremédiation contrairement à d'autres technologies de traitement. La phytoremédiation peut nécessiter plusieurs saisons de croissance pour qu'un arbre croisse et se développe.
- La phytoremédiation pourrait être appliquée pour l'assainissement de nombreux sites contaminés. Cependant, les voies de transformation des contaminants, ainsi que l'identité des métabolites sont peu documentés (Das et Chandran, 2010).

5.4.2.3. Les mécanismes de la phytoremédiation

Différents mécanismes sont utilisés, par les plantes, afin de faciliter la décontamination des sols pollués (Macek *et al.*, 2000 ; Susarla *et al.*, 2002 ; Vaziri *et al.*, 2013). Chacun de ces mécanismes ont des effets sur le volume, la mobilité ou la toxicité des contaminants (figure 13).

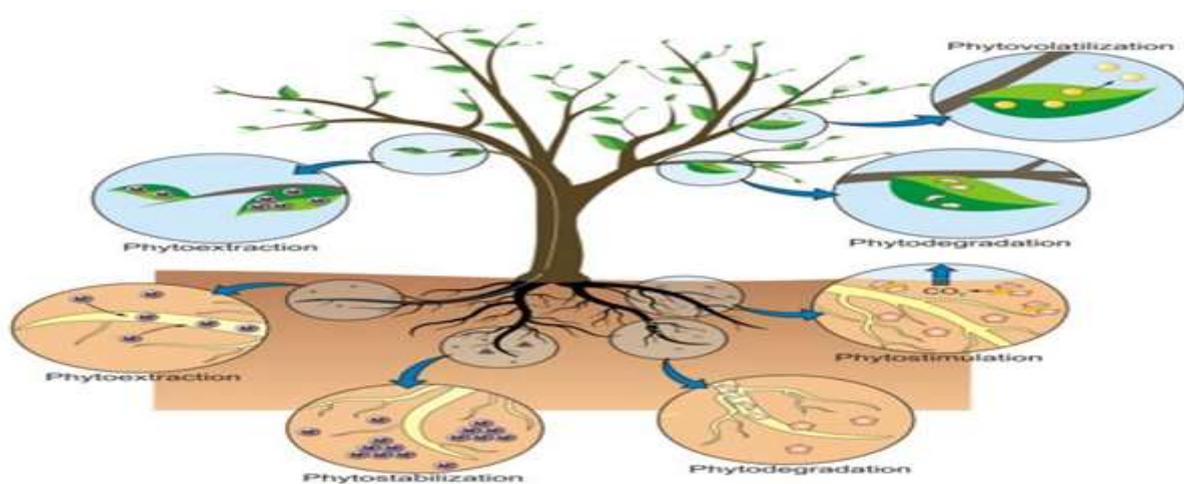


Figure 13: Les différents mécanismes de la phytoremédiation des sols (Alchimia, 2016).

5.4.2.3.1. Rhizofiltration

C'est l'utilisation des racines des plantes pour absorber, concentrer ou précipiter les polluants d'un effluent liquides (**Koller, 2004**).

5.4.2.3.2. Phytoextraction

Elle consiste à utiliser, sur un sol contaminé, des plantes accumulatrices pour extraire, transporter et concentrer les polluants du sol dans les parties récoltables de la plante. Pour que cette technique soit efficace, il faut que le polluant soit disponible pour les racines et que celle-ci puissent le tolérer et l'absorber (**Koller, 2004**).

5.4.2.3.3. Phytostabilisation

Il s'agit de limiter la disponibilité des métaux lourds transitant au sein du sous-sol (notamment grâce au transfert via la nappe phréatique) en les piégeant dans un réseau racinaire où ils peuvent s'accumuler et être ainsi immobilisés (**Lecompte, 1998**).

5.4.2.3.4. Phytodégradation

Des plantes absorbent et décomposent les contaminants par l'action d'enzymes ou par des processus métaboliques comme l'oxydation et la réduction. Par ces processus les polluants organiques sont dégradés puis libérés hors de la plante (**Cunningham et al., 1996**).

5.4.2.3.5. Phytostimulation

Elle consiste à l'utilisation des plantes pour la stimulation des microorganismes présents dans la rhizosphère, engendrant ainsi une activité biodégradatrice plus élevée (**Delage et Schrefler, 2005**). Elle ne met pas vraiment en contacte les polluants et les végétaux. Elle s'agit enfin d'une stimulation de la dégradation microbienne et fongique par les enzymes libérés dans la rhizosphère racinaire (**Lecompte, 1998**).

5.4.2.3.6. Phytovolatilisation

Elle sert à la stimulation de la volatilisation au moyen des plantes qui absorbent les polluants puis les éliminent par transpiration (**Delage et Schrefler, 2005**).

5.4.2.4. Les travaux de recherche effectués sur la phytoremédiation

5.4.2.4.1. Les recherches effectuées dans le monde

Vers une recherche permanente de connaissances sur le pouvoir des plantes, selon **Illovic**

et al., (2012), en France et en Europe, la phytoremédiation se situe à un stade expérimental avancé: sites pilotes, serres, etc... Les chercheurs tentent d'améliorer les capacités accumulatrices des plantes, en les modifiant génétiquement. Différents centres de recherche dans le monde notamment aux Etats-Unis et au Canada, mais également en Europe comme en France, travaillent sur la modification et la recherche de plantes capables d'accumuler suffisamment de polluants pour dépolluer un site contaminé. De nombreux projets s'effectuent dans le monde et en France dans des laboratoires ou en grandeur nature dans des champs réalisés par des centres de recherches et des universités. Des recherches en biotechnologie sont également effectuées en laboratoires pour améliorer la capacité d'absorption en modifiant les racines. D'autres réflexions et expérimentation sont en cours et l'évolution dans le domaine permettra de compléter les utilisations rationnelles d'une plante vers une problématique identifiée (Illovic *et al.*, 2012).

Tableau 10: Quelques exemples d'études de phytoremédiation des sols contaminés par les hydrocarbures.

Noms scientifiques des plantes	Résultats des recherches
<i>Avena barbata</i>	Dégradation à plus de 75% du phénanthrène en atrazine et augmentation significative de la population des bactéries (de $6,83E4$ à environ 10^7) dans les sols pollués (Miya and Firestone, 2001).
<i>Festuca arundinacea</i> , <i>Medicago sativa</i>	Après une expérience de culture en pot de 150 jours, les taux d'élimination de 8 HAP étaient de 86,50% et 90,67% (fluoranthène), 93,27% et 79,53% (pyrène), 100% et 100% (benzo-a-anthracène, chrysène, benzo-b-fluoranthène, benzo-k-fluoranthène, dibenzo-a,h-anthracène), 99,53% et 99,6% (benzo-a-pyrène), respectivement chez <i>Festuca arundinacea</i> et <i>Medicago sativa</i> (Xiao et al., 2015).
<i>Elymus triticoides</i> , <i>Festuca arundinacea</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Secale cereale</i> , <i>Hordeum vulgare</i>	L'introduction des rhizobactéries dans les sols pollués par les Hydrocarbure a contribué à (Qixing et al., 2011): <ul style="list-style-type: none"> - augmenter la tolérance de ces plantes aux HAP et à la créosote et améliorer leur élimination ; - promouvoir la croissance des plantes, augmenter leur tolérance aux HCT ; - augmentation de la biomasse végétale par la réduction du stress des plantes.
<i>Helianthus annuus</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Digitaria ciliaris</i>	Augmentation du nombre de champignons et bactéries bénéfiques dans les sols contaminés (McCutcheon et Schnoor, 2004).
<i>Elyusine indica</i> , <i>Panicum maximum</i> , <i>Pennisetum glaucum</i>	Dans les sols pollués à 2%, 3% et 4% <i>E. indica</i> a éliminé les hydrocarbures totaux à 91%, 86% et 88% respectivement. <i>P. glaucum</i> a montré des capacités phytoremédiatrices de 78% et 88% respectivement dans les sols pollués à 1% et 5%. Chez <i>P. maximum</i> les réduction maximum d'HCT étaient de 84% dans les sols pollués à 4% (Njoku et al., 2014).
<i>Glycine max</i>	Réduction à plus de 55% du pétrole brut dans le sol (Njoku et al., 2009).
<i>Panicum virgatum</i> , <i>Schizachyrium scoparium</i> , <i>Medicago sativa</i>	Réduction à 100% de la concentration de HAP après 6 mois de traitement (McCutcheon et Schnoor, 2004).

5.4.2.4.2. La recherche effectuée en Algérie

Les travaux de recherche en Algérie sont encore au stade expérimental au niveau de quelques facultés ces dernières années sur des sols contaminés par les hydrocarbures (tableau 11).

Tableau 11: Les principaux essais de phytoremédiation réalisés à l'UMMTO.

Les espèces utilisées	Le sol pollué	Résultats	Auteur et année
-Orge (<i>Hordueum vulgare</i> L.) -Luzerne (<i>Medicago Sativa</i> . L)	- sol CP à 2% et 5% provient de l'INA	-effet d'hydrocarbure sur le sol et les deux espèces (luzerne et l'orge) -Plus la concentration des hydrocarbures augmente plus leurs effets est importants -effet positif de Luzerne sur l'activité biologique du sol.	ALI AHMED H et BELKAID, (2006)
-Orge (<i>Hordueum vulgare</i> . L.) -Haricot (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	-sol contaminé par le pétrole à 5% provient de l'ITMA	-L'essence plus biodégradable que le pétrole -L'essence est moins toxique que le pétrole brut. -Diminution du rendement végétal -Modification de la microflore bactérienne. -Les légumineuses sont plus efficaces dans la biodégradation d'hydrocarbures	FEZANI et KHIDER (2007).
-Le Pois, (<i>Pisum sativum</i> L.) -Le Pois chiche, (<i>Cicer arietinum</i> L.)	sol provient de l'ITMA	-Effet toxique des hydrocarbures sur les deux espèces et sur le sol. -Le pois est plus efficace dans la biodégradation des hydrocarbures que le pois chiche.	BENAMARA et MOHAMMADI (2010).
-Haricot, (<i>Phaseolus Vulgaris</i> L.) -Pois chiche, (<i>Cicer Arietinum</i> L.)	Sol provient de l'ITMA (Boukhalfa) contaminé par -Le pétrole. -L'essence	Sol provient de l'ITMA (Boukhalfa) contaminé par -Le pétrole. -L'essence	AIT TAYEB et TITOUCHE (2011)
-Fève (<i>Vicia faba</i> . L) -Trèfle (<i>Trifolium alexandrium</i> . L)	Sol provient de l'ITMA, contaminé par le pétrole à 5%.	la fève est plus résistant que le trèfle en vers le pétrole. -la présence des nodules dans la fève favorise la décontamination des sols	BELKACEM et ROUAS (2012)

5.4.2.4.3. Les légumineuses dans la dépollution

Le sol est un écosystème complexe mettant en jeu différentes interactions étroites, entre le sol, la plante et les microorganismes qui peuvent conditionner le devenir des polluants et en particulier les hydrocarbures, qui peuvent être soumis aux différents processus, l'absorption, adsorption et la biodégradation qui peuvent conduire à la diminution de la concentration des hydrocarbures. Selon (Duchaufour, 2001 ; Morel, 2010), les Légumineuses sont considérées comme des plantes ayant un bon potentiel de phytoremédiation. La symbiose de ces légumineuses avec des bactéries du genre *Rhizobium* leur confèrent un avantage supplémentaire par rapport à d'autres plantes utilisées en phytoremédiation.

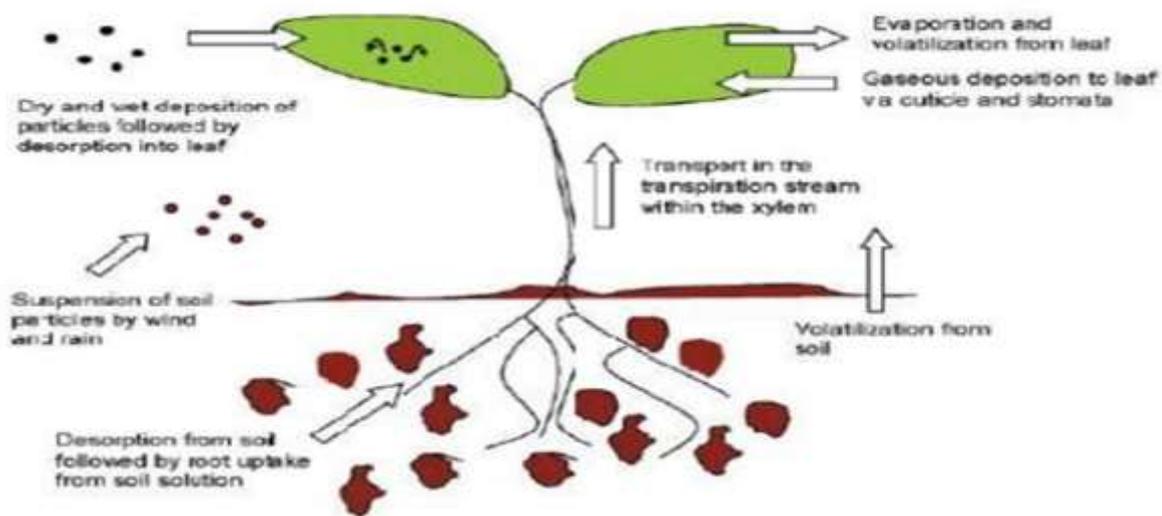


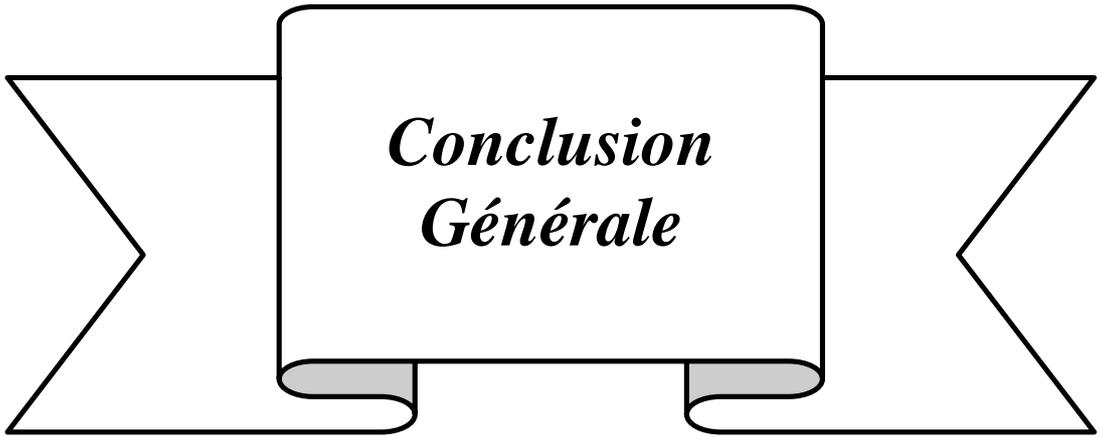
Figure 14: Les principales voies de prélèvement des molécules organiques par les plantes (Collins *et al.*, 2005).

Le changement qui a été enregistré dans les bandes caractéristiques des groupements fonctionnels relatifs aux hydrocarbures dans le sol contaminé à 8% cultivés par les différentes espèces à savoir la fève, le pois, le soja et la luzerne ; peut être dû à l'utilisation des hydrocarbures par ces plantes ou leur dégradation par les micro-organismes du sol. D'après les travaux réalisés par Dominguez (2004), la formation des nouveaux groupements fonctionnels est probablement due à l'activité microbienne. Schnoor *et al.*, (2003) ont noté que le sol est une matrice complexe servant de support au développement des plantes et des micro-organismes qui se nourrissent des composés organiques ou inorganiques. Les composés en excès peuvent alors être utilisés comme source d'énergie par les plantes et les micro-organismes. D'après les résultats Belkacem et Rouas (2012), la biodégradation des

hydrocarbures n'est pas totale. Les plantes cultivées dans les sols contaminés à 8%, ont montré un changement dans la composition chimique par rapport à celles cultivées dans les sols témoins, Ceci peut être expliqué par le fait que ces plantes ont absorbé puis stocké les hydrocarbures dans leurs tiges.

Autre étude a montré que les plantes sont capables d'absorber et de métaboliser un grand nombre de polluants organiques et inorganiques. Les plantes secrètent des exsudats racinaires qui stimulent la bioremédiation microbienne au niveau de la rhizosphère (**Abdelly, 2007**). Selon **Kaputska et Reporter (1993), OCDE (1984) in Rivière (1998)**, les plantes ont la capacité de stockage, ou au contraire de dégradation, qui sont très variable en fonction de l'espèce. L'absorption par la racine et la translocation vers la partie aérienne est en fait limitée, très variable et dépendante de l'espèce végétale concernée et les conditions environnementales (**Norini, 2007**).

Slimani (2015), a dit que l'action du pétrole se traduit par une diminution du rendement végétal avec l'augmentation de la concentration du pétrole, et ça apparaît clairement à partir de la concentration 6% suite à la diminution du taux de levée, de la hauteur des plantes, du nombre de feuilles par plant, de la longueur des entre nœuds, du nombre des nodules, de la biomasse végétale ainsi que du volume racinaire. En comparant le pH des sols témoins au pH des sols contaminés cultivés par les différentes espèces, la concentration et la culture modifient ses valeurs. Au regard de ces résultats, nous nous apercevons que la toxicité des hydrocarbures est différente d'une espèce à l'autre et que la fève résiste mieux vis-à-vis du pétrole brut et le gasoil, elle peut être utilisée comme moyen biologique de décontamination des sols pollués par les hydrocarbures. Après l'analyse du sol et des plantes par la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (**FTIR**), nous pouvons conclure que les légumineuses telles que la fève, le pois, le soja et la luzerne ont la capacité de l'absorption, de la translocation vers la partie aérienne et du stockage ou en contraire de dégradation des hydrocarbures qui sont très variables en fonction de l'espèce.



***Conclusion
Générale***

Conclusion

Parmi les principaux polluants présents dans l'environnement, les hydrocarbures sont présents en tant qu'éléments naturels ou du fait des activités humaines. Elle peut conduire à des risques de modification de l'équilibre de l'écosystème et de la santé humaine. Cependant, le manque de connaissances de base a conduit aux mécanismes d'accumulation d'hydrocarbures dans le sol et les plantes. D'où l'élucidation de ces mécanismes pour mieux comprendre comment réduire le taux de ces polluants. Le but de ce travail était d'évaluer l'effet toxique des hydrocarbures (huile moteur, gasoil, pétrole brut...etc.) sur les légumineuses (fève, pois, pois chiches, haricots, soja...etc.) et de connaître la réponse de ces espèces aux différentes attaques causées par les polluants utilisés.

A travers les résultats des expériences atteintes par les chercheurs dans ce domaine, nous concluons que l'effet de l'huile de moteur n'affecte pas significativement le taux de germination de quelques légumineuses (comme le soja), alors que l'inverse est vrai pour le gasoil et le pétrole brut, qui les affecte, car cet effet est dans la barrière physique causée par les polluants qui enveloppent les graines et les empêchent d'entrer de l'eau et de l'oxygène. Il exerce une pression fortement accrue en raison de tests d'interventions dans les relations hydriques des plantes.

A l'échelle morphobiométrique, l'effet du stress des hydrocarbures se traduit par une diminution de la surface foliaire totale, de la longueur et de la taille des racines, ce qui affecte son rendement. Ces changements sont dus à une modification de la fertilité des sols se traduisant par un déséquilibre, une mauvaise croissance voire une très faible production de biomasse et une augmentation du pH et de la conductivité électrique.

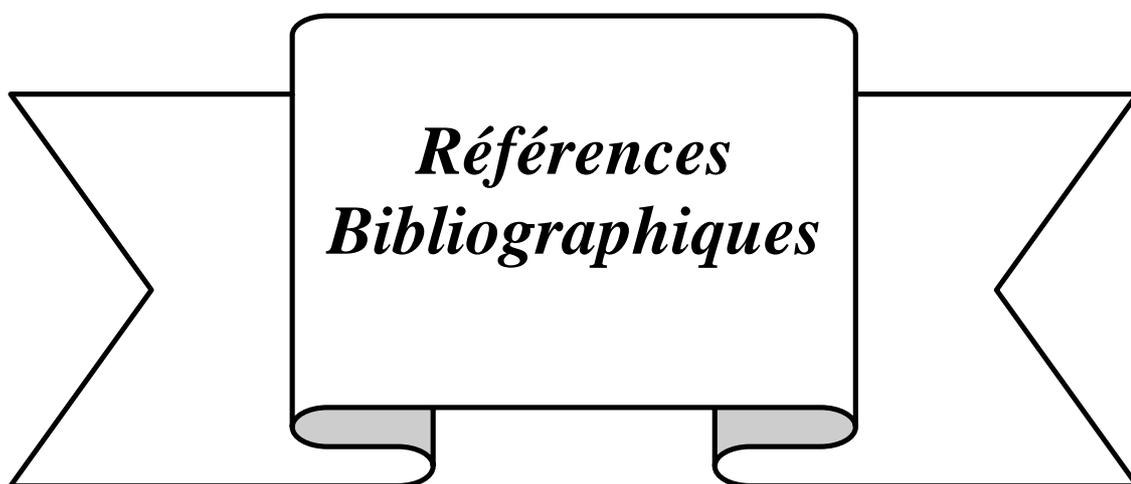
A la lumière de ces résultats, on constate que la toxicité des hydrocarbures diffère d'une espèce à l'autre, puisqu'il a été constaté que les féveroles sont plus résistantes que les autres légumineuses, car ils supportent ces concentrations et peuvent être utilisés comme moyen biologique de désinfection des sols contaminés avec des hydrocarbures.

Enfin, nous suggérons quelques vues souhaitables :

- L'application de cette étude sur différents stades de cycle de vie sur le champ.
- L'étude des enzymes impliquées dans la réponse au stress hydrocarboné.

Conclusion Générale

- Le dosage des hydrocarbures dans les sols et les différentes parties des plantes utilisées.
- L'application des études génétiques et la recherche des marqueurs moléculaire pour une amélioration de la tolérance.
- Extraire les hydrocarbures des plantes après un essai de phytoremédiation pour élucider les mécanismes par lesquels ces plantes décontaminent le sol.



*Références
Bibliographiques*

Références Bibliographiques

Abdelguerfi, A. et Ramdane, S.A., 2003. Evaluation des besoins en matière de renforcement des capacités nécessaires à la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité importante pour l'agriculture. Thèse de doctorat en agriculture: 77.

Abdely, C., 2007. Biorémédiation/phytoremédiation. Institut supérieure et de la formation contenant. Université Tunis. 8: 144.

Abdullah, S., 1979. The origin and evolution of *Vicia faba* L., in Proc. Ist méditerranéen conf. Genet: 713-746.

Adam, G., Duncan, H.J., 1999. Effect of diesel fuel on growth of selected plant species. Environmental geochemistry and health, Vol. 21 (4): 353-357.

Adam, G., Duncan, H.J., 2002. Influence of diesel fuel on seed germination. Environmental Pollution, Vol. 120 (2): 363-370. * Adam, G., Duncan, H.J., 2003. The effect of diesel fuel on common vetch (*Vicia sativa* L.) plants. Environmental geochemistry and health, Vol. 25 (1):123-130.

AIT TAYEB Z. ET TITOUCHE H., 2011. Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes (*Phaseolus vulgaris* L et *Cicer arietinum* L), du sol et essai de phytoremédiation. Memoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie U.M.M.T.O: 22-68.

Alchimia, 2016. La phytoremédiation : du Cannabis pour nettoyer les sols. Blog Growshop Alchimia. URL <https://www.alchimiaweb.com/blogfr/phytoremediation-cannabis-nettoyer-sols-contamines>.

Alexander, M., 2002. Aging, Bioavailability, and Overestimation of Risk from Environmental Pollutants. Environmental Science & Technology 34(20): 4259-4265.

Amir, Y., Haennib, A.L., Anon, A., 2006. Physical and biochemical differences in the composition of the seeds of Algerian leguminous crops. Journal of Food Composition and Analysis,20: 466–471.

Amiri, N., 2013. Ecotoxicité des hydrocarbures sur le sol et un essai de décontamination. Mémoire d'ingénieur. UMMTO: 70.

Arnaud, P., 2004. Chimie organique. Edition DUNOD, Paris: 208.

Arzayus, K.M., Dickhut, R.M., Canuel, E.A., 2001. Fate of Atmospherically Deposited Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Chesapeake Bay. Environ. Sci. Technol. 35, 2178–2183. <https://doi.org/10.1021/es001672s>.

Bado, B.V., 2002. “ Rôle des légumineuses sur la fertilité des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéenne et soudanienne du Burkina Faso”: 7.

Références Bibliographiques

- Ballerini, D., Guibet, G.C., Montagne, X., 2007.** Carburants. Encyclopaedia Universalis: 22.
- Barriusso, E., Calvet, R., Schiavon, M. et Soulas, S., 1996.** Etude et gestion des sols, les pesticides et les polluants organiques des sols, transformation et dissipation: 284.
- Belkacem, S. et Rouas, F., 2012.** Toxicité des hydrocarbures vis-à-vis des plantes Fève (*Vicia faba* L.) et Trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.), Essai de phytoremédiation. Mémoire d'Ingénieur d'Etat en Biologie. UMMTO: 54.
- Belkhodja, M., 1996.** Action de la salinité sur le comportement physiologique, métabolique, minérale et recherche de marqueurs moléculaires chez la fève (*Vicia faba* L.). Thèse de Doctorat en Es-science naturelle: 255.
- Benachour, K., 2008.** Diversité et activité polinisatrice des abeilles (Hymenoptera Apoidea) sur les plantes cultivées. Thèse de doctorat, université Mentouri de Constantine: 151.
- Bergue, J.M., Mérienne, D., 1985.** La pollution des sols par les hydrocarbures - PDF [WWW Document]. URL <https://docplayer.fr/8277970-La-pollution-des-sols-par-les-hydrocarbures.html>.
- Bergue, J.M., Mérienne, D., 1986.** La pollution des sols par les hydrocarbures. Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, Vol. 146: 57-66.
- Bertrand, J.C., Mille, G., 1989.** Devenir de la matière organique exogène. Un modèle : les hydrocarbures. In : Bianchi, M., Marty, D., Bertrand, J. C. et Gauthier, M. J. Editions, Les microorganismes dans les écosystèmes océaniques. Masson (Paris), chapitre, Vol. 13: 343-385.
- Bliefert, C. et Perraud, R., 2004.** Chimie de l'environnement (Air, Eau, Sol, Déchets). Edit. De Boeck: 343-359.
- Blumer, M., 1976.** Polycyclic aromatic hydrocarbons in nature. Scientific American, Vol. 234 (1): 34-45.
- Bomboi, M.T. et Hernandez, A., 1991.** Hydrocarbon in urban runoff their contribution to the wastewaters « Water Research » 25(5): 557-565.
- Bonnard, M., 2010.** Relations biodisponibilité, génotoxicité, écotoxicité des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans les sols de friches industrielles. Thèse doctorat. Université Paul Verlaine: 175.
- Bouchez, M., 1995.** Les hydrocarbures aromatiques polycycliques dans l'environnement. Revue de l'Institut Français du Pétrole (IFP), Vol. 51 (03): 407-419.
- Bouderhem, A., Khelil, A.O.E.H., 2017.** Isolation and characterization of crude oil degrading bacteria from soil of Ouargla (Algeria).

Références Bibliographiques

- Boussard, O., 1943.** Culture légumière, éd. J-B. Bailliere et fils, Paris: 276-286.
- Calvet, 2003.** « Le Sol Propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces ». Tome 1, Ed France Agricole – Dunod.99: 58-60.
- Cannon, S., 2008. Chapitre 3 : Legume comparative genetics.
- Cao, B., Nagarajan, K., Loh, K.C., 2009.** Biodegradation of aromatic compounds: current status and opportunities for biomolecular approaches. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 85: 207-282.
- Chaineau, C., Morel, J., Oudot, J., 1996.** Land treatment of oil-based drill cutting in an agricultural soil. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 25: 858-867.
- Chaineau, C., Morel, J., Oudot, J., 1997.** Phytotoxicity and plant uptake of fuel oil hydrocarbons. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 26: 1478-1483.
- Chaineau, C.H., Morel, J.L., Oudot, J., 2000.** Bioremediation and biodegradation. Biodegradation of fuel Oil Hydrocarbons in the rhizosphere of Maize. *J. Environ. Qual.* V295: 569-578.
- Chalck, P.M., 1998.** Dynamics of biologically fixed N in legume-cereal rotations: a review. *Aust. J. Res.* 49: 303-316.
- Chaux, L., 1992.** Production des légumières. Edition Tec et Doc. paris: 17.47.
- Cheung, N., 2000.** Effect of Soil Properties on Bioavailability and Extractability of Phenanthrene and Atrazine Sequestered in Soil. *Chemosphere* 48(1): 109-115.
- Christian, L., 2006.** Method for determining the age of diesel spills in the soil, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 13: 4 :142-149.
- Colin, F., 2000.** Pollution localisée des sols et des sous-sols par les hydrocarbures et les solvants chlorés. Edition Tec & Doc. Rapport n° 44. Académie des sciences. Paris: 417.
- Collins, C., Fryer, M., Grosso, A., 2005.** Plant Uptake of Non-Ionic Organic Chemicals. *Environmental Science & Technology* 40(1): 45-52.
- Colombano, S., Saada, A., Guerin, V., Bataillard, P., Bellenfant, G., Beranger, S., Hube, D., Blanc, C., Zornig, C., Girardeau, I., 2000.** Quelles techniques pour quels traitements, analyse coût bénéfiques (Rapport final BRGM1RP-58609-FR). *Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)*: 403.
- Cunningham, S.D., Anderson, T.A., Schwab, A.P., Hsu, F.C., 1996.** Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agron. USA*.
- Danso, S. K. A., 1991.** Biological nitrogen fixation in tropical agrosystems: twenty years of biological nitrogen fixation in Africa. In *Biol. Nitrogen fixation and sustainability of tropical*

Références Bibliographiques

- agriculture. Ed. by Mulongoy K., Gueye M. and Spender D.S.C (John Wiley and Sons): 488.
- Das, N., Chandran, P., 2010.** Microbial Degradation of Petroleum Hydrocarbon Contaminants: An Overview. *Biotechnol. Res. Int.* 2011. <https://doi.org/10.4061/2011/941810>.
- De Lajudie, P., Dupuy, N., Ndiaye, A., Neyra, M., Boivin, C., Gillis, M et Dreyfus, B., 1998.** Acacia : nodulation et rhizobium associés. site.359-375.
- De Lajudie, P., Fulele-Laurent, E., Willems, A., Torck, U., Coopman, R., Collins, M. D., Kersters, K., Dryfus, B.L. et Gillis, M., 1998a.** Description of *Allorhizobium undicola* gen. nov. sp. nov. For nitrogen-fixing bacteria efficiently nodulating *Neptunia natans* in Senegal. *Int. J. Syst. Bacterio.* 48: 1277-1290.
- De Lajudie, P., Willems, A., Nick, G., Moreira, F., Molouba, F., Hoste, B., Torck, U., Neyra, M., Collins, M. T., Lindström, K., Dreyfus, B., et Gillis, M., 1998b.** Characterization of tropical tree rhizobia and description of *Mesorhizobium plurifarum* sp. nov. *Int. J. Syst. Bacteriol.* 48: 369-382.
- Delage, P. et Schrefler, B., 2005.** Géomécanique environnementale : sols pollués et déchets. Lavoisier: 249.
- Dominguez, E.R. et Pichtel, J., 2004.** Phytoremediation of soil contaminated with used motor oil. II greenhouse studies. *Ball state University. Environ ENG SCI*.vol, 21: 180.
- Dommergues, Y., Duhoux, E. et Diem, H.G., 1999.** Les arbres fixateurs d'azote, (Ed) CIRAD, ESPACE, FAO, IRD; Montpellier, Rome, Paris: 499.
- Doyle, J.J. et Luckow, M.A., 2003.** The rest of the iceberg. Legume diversity and evolution in a phylogenetic context. *Plant Physiology* 131: 900-910.
- Doyle, J.J., 1994.** Phylogeny of the legume family: an approach to understanding the origins of nodulation. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 25: 325–349.
- Duc, G., Mignolet, C., Carrouée, B. et Huyghe, C., 2010.** “Importance économique passée et présente des légumineuses : Rôle historique dans les assolements et facteurs d'évolution“. *Innovation agronomiques*, (11): 1-24.
- Duchaufour, P., 2001.** Introduction à la science du sol : sol, végétation et environnement. 6ème édition MASSON, Paris Milan Barcelone: 498.
- Duhoux, E. et Nicole, M., 2004.** Biologie végétale : Association et interaction chez les plantes: 166.
- Edema, N.E., Obadoni, B.O., Erheni, H., Osakwuni, U.E., 2009.** Eco-phytochemical studies of plants in a crude oil polluted terrestrial habitat located at Iwhrekan, Ughelli North local government area of Delta State. *International journal of science and nature*, Vol. 7 (9):

Références Bibliographiques

49-52.

Eriksson, T., Hibbs, M.S., Yoder, A.D., Delwiche, C.F., Donoghue, M.J., 2003. « The physiology of the plants and soil ».these de magester .vol 23.paris:126-222.

FAO., 2016. “Légumineuses Des graines nutritives pour un avenir durable“.13-22,36-37: 51-52 .

Fattal, P., 2008. Pollution des cotes par les hydrocarbures. Presse universitaire de Rennes: 498.

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 U.M.M.T.O: 73.

Franaennec, J.P., Leprince, P., Trembouze, P., Edern, Y., 1998. Le raffinage de pétrole. Pétrole brut - produit pétrolier - schéma de fabrication Tom 5. Technip. Fuel. Applied and Environmental Microbiology, Vol. 66 (10): 4205-4210.

Fyad Lameche, F.Z., 2007. Les Légumineuses ou Fabacées. Cours présentés à la faculté des Science. Département de Biotechnologie. Université d’Oran Es-senia. Algérie.

Gabat, 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: 176.

Gallais, A., Bannerot, H., Cousin, R., 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées : les protéagineux (la féverole), éd INRA ; Paris: 189-203.

Gallais., et Bannerot., 1992. Amélioration des espèces végétales cultivées : objectifs et critères de sélection. 1, Paris: 266.

Gao, Y., Collins, C., 2009. Uptake Pathways of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in White Clover. Environmental Science & Technology, Vol. 43: 6190-6195.

Gaskin, S.E., Bentham, R.H., 2010. Rhizoremediation of hydrocarbon contaminated soil using Australian native grasses. Science of the Total Environment, Vol. 408 (17): 3683-3688.

Giddens, J., 1976. Spent motor oil effects on soil and crops. J. Environ. Qual. Vol 5. N°2: 179-181.

Girard, C.M., Walter, C.H. et Berthelin, J., 2005. Sols et environnement. Edition DUNOD, Paris (France): 436.

Glorennec, P., 2005. Explication et réduction de l’incertitude liée à l’ingestion de sol en évaluation des expositions environnementales. Environnement, risques & santé: 258-62.

Gordon, B., 2002. “Proteines végétales“ .Ed.Tech et Doc., Lavoisier, Paris: 150-200.

Références Bibliographiques

- Goswami, P., Singh, D.H., 1991.** Different modes of hydrocarbons up-take by two *Pseudomonas* species. *Biotechnology and bioengineering*, Vol. 37: 1-11.
- Gruyer, N., Groleau, P.E., Triffault-Bouchet, G., Ouellet, A., Dupont, F., 2015.** Hydrocarbures pétroliers : caractéristiques, devenir et criminalistique environnementale - URL <https://docplayer.fr/52397786-Hydrocarbures-petroliers-caracteristiques-devenir-et-criminalistique-environnementale.html>.
- Guibet, J.C., 1997.** Carburants et moteurs : Technologie, énergie et environnement. Edition technip, Paris, Vol. 1: 21-70.
- Hahn, H.H. et Rudiger, P., 1994.** The contribution of parked vehicle emissions to the pollution of urban runoff. *The Science of the Total environment* 146: 525-353.
- Harmens, H., Foan, L., Simon, V., Mills, G., 2013.** Terrestrial mosses as biomonitors of atmospheric POPs pollution: a review. *Environ. Pollut. Barking Essex* 1987 173, 245– 254. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.10.005>.
- Hart, H. et Conia, J.M., 2002.** Introduction à la chimie organique. 1er cycle. Classes préparatoires. Cours et exercices résolus. Ed DUNOD Paris: 567.
- Heller, R., Esnault, R., Lance, C., 1998.** physiologie végétale, nutrition. 6eme édition Dunod. Paris: 323.
- Illovcic, S. et Bonnarme, V., 2012.** Ces plantes qui guérissent l’habitat phytoépuration et génie végétale .Ed EYROLLES. Institut Français d’Urbanisme – Université Paris: 130.
- Institut National de Recherche et Sécurité (INRS),, 2006.** France, Combustibles et Carburants Pétroliers, ED 989 *Aide-mémoire technique*: 7.
- ITAB, 2014.** Fiche technique : la culture de la féverole en AB.
- Jones, D.L., Hodge, A., Kuzyakov, Y., 2004.** Plant and mycorrhizal regulation of rhizodeposition. *New Phytologist*, Vol. 163: 459-480.
- Kinkle, B.K., M.J., Sadowsky, K., Johnstone, and W. C. Koskinen., 2002.** Tellurium and selenium resistance in rhizobia and its potential use for direct isolation of *Rhizobium meliloti* from soil. *Appl. Environ. Microbiol.* 60, 1674-1677.
- Koller, E., 2004.** Traitement des pollutions industrielles (eau, air, déchet, sol, boues). Edition DUNOD Paris: 424.
- Krein, A., Schorer, M., 2000.** Road runoff pollution by polycyclic aromatic hydrocarbons and its contribution to river sediments [WWW Document]. *Water Res.* URL <https://eurekamag.com/research/003/551/003551275.php>.
- Kuboi, T., Noguchi, A., Yazaki, J., 1986.** Family-dependend cadmium accumulation

Références Bibliographiques

characteristic in higher plants. *Plant and Soil*. Vol. 92: 405.

Lardjane, N. et Mecheraoui, H., 2001. Etude de la bioremédiation d'un sol pollué. Mémoire d'ingénieur d'état en chimie d'environnement, université de Boumerdes: 51.

Laumonier, R., 1979. Culture légumière et maraichère, édition. J-B-BAILLIERE, 19 rue Hautefeuille, Paris : 116-134.

Lazerek, F., 2008. Analyse de la diversité génétique et symbiotique des populations naturelles tunisiennes de *Medicago truncatula* et recherche de QTL liés au stress salin. Thèse doctorat. Toulouse III: 255.

Leahy, J.G., Colwell, R.R., 1990. Microbial degradation of hydrocarbons in the environment. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 54: 305-315.

Lecompte, R., 1998. « Les sites pollués ,traitements des sols et des eaux souterraines'. 48-.Lavoisier tec et doc ,Ed ,Dunod .Paris :204.15-19.

Lecomte, P., 1998. Les sites pollués, traitement des sols et des eaux souterraines 2 èmeédition Lavoisier TEC & DOC: 204.

Lee, G.-J, Wu, X., Shannon, J.G., Sleper, D.A. and Nguyen, H.T., 2007. Chapter 1: Soybean. *Genome Mapping and Molecular Breeding in Plants Oilseeds*, Volume 2: 1-53. C. Kole (Ed.). © Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Lefebvre, J., 1978. Livre: Chimie des hydrocarbures, Edition Technip, Paris: 277.

Lemière, B., Seguin, J.J., Le Guern, C., Guyonnet, D., Baranger, Ph., Saada, A., 2008. Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes Applications dans un contexte de gestion des impacts sur les eaux souterraines - URL <http://docplayer.fr/15688253-Guide-sur-le-comportement-des-polluants-dans-les-sols-et-les-nappes-applications-dans-un-contexte-de-gestion-des-impacts-sur-les-eaux-souterraines.html>. Adam, 2006. Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, France. Ecotoxicité des sols et des déchets. Résultats des tests biologiques. ADEME édition ADEME. www.ademe. Fr. Site pollué et sols: 96.

Lewis, G.P., Schrire, B.D., Mackinder, B.A., Lock, J.M., ed., 2003. Legumes of the World. Royal Botanic Gardens, Kew, UK.

Luepromchai, E., Lertthamrongsak, W., Pinphanichakarn, P., Thaniyavarn, S., Pattaragul-wanit, K., Juntongjin, K., 2007. Biodegradation of PAHs in petroleum contaminated soil using tamarind leaves as microbial inoculums. *Songklanakar Journal of Sciences and Technology*, Vol. 29: 515-527.

Lumière, B., Jeannot, R., Chiron, S., avec la collaboration d'Augustin, F., Drmendrail, D., 2001. Guide morphologique pour l'analyse des sols pollués. Edition BRGM, 2001: 25.

Références Bibliographiques

- Lutz, S., 2006.** Evaluation du risque des de transfert des hydrocarbures aromatiques polycycliques du sol vers le lait des ruminants laitier:184.
- Macek, T., Macková, M., Kás, J., 2000.** Exploitation of plants for the removal of organics in environmental remediation. *Biotechnol. Adv.* 18, 23–34.
- Maes, M., Schadek, S. et Brahy, V., 2007.** La contamination locale des sols: 519.
- Marchal, R., Penet, S., Solano, F., Vandecasteele, J.P., 2003.** Gasoline and diesel oil biodegradation. *Oil and gas science and technology. Revue IFP, Editions Technip*, Vol. 58: 441-448.
- Martin, B., 2006.** “ Introduction à la Microbiologie”. 2 eme Edition, Pearson: 143-624.
- Mastens, J., Davies, S.H.R., 1997.** Efficacy of in-situ ozonation for the remediation of polycyclic aromatic hydrocarbons contaminated soils, *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 28: 327-335.
- Mathieu, C. et Pieltain, F., 2003.** Analyse chimique des sols. Tome 2: 387.
- Mazliak, P., 1982.** Physiologie végétal, croissance et développement. Tome 2: 465.
- Mbonigaba, J.J.M., Nzeyaimana, I., Bucagu, C., Culot, M., 2009.** Caractérisation physique, chimique et microbiologique de trois sols acides tropicaux du Rwanda sous jachères naturelles et contraintes à leur productivité. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, Vol. 13 (4): 545-558.
- Mekhalif, F., 2009.** Réutilisation des eaux résiduaires industrielles épurées comme eau d’appoint dans un circuit de refroidissement. URL <https://docplayer.fr/17452529-Memoire-de-magister-reutilisation-des-eaux-residuaires-industrielles-epurees-comme-eau-d-appoint-dans-un-circuit-de-refroidissement.html>.
- Melbye, A.G., Brakstad, O.G., Hokstad, J.N., Gregersen, I.K., Hansen, B.H., Booth, A.M., Rowland, S.J., Tollefsen, K.E., 2009.** Chemical and toxicological characterization of an unresolved complex mixture-rich biodegraded crude oil. *Environ. Toxicol. Chem.* 28, 1815–1824. <https://doi.org/10.1897/08-545.1>
- Merabet, C., 2007.** Diversité et rôle des rhizobia des régions salées et arides d’Algérie. Thèse de Doctorat, Université d’Oran.
- Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C., 2004.** Phytoremediation in the tropics, the effect of crude oil on the growth of tropical plants. *Bioremediation Journal*, Vol. 8: 177-184.
- Merkl, N., Schultze-Kraft, R., Infante, C., 2005a.** Assessment Of Tropical Grasses And Legumes For Phytoremediation Of Petroleum-Contaminated Soils. *Water. Air. Soil Pollut.* 165, 195–209. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-4979-y>.

Références Bibliographiques

- Miana de Faria, S., 2005.** Azorhizobium doebereineriae sp. nov. Microsymbiont of Sesbania virgata (Caz.) Pers. Syst. Appl. Microbiol. 29(3):197-206.
- Minai-Tehrani, D., Tavakoli-Temah, A., Rashidfarokhi, A., Noormohammadi, A., Khoda-karami, A., Talebi, M., 2012.** The effect of light crude oil contaminated soil on the growth and germination of Sorghum bicolor. In : Dobránszki J (Ed) Sorghum. The European Journal of Plant Science and Biotechnology, Vol. 6 (1): 81-84.
- Morel, J.L., 2010.** Stratégies de rémédiation in situ des sols pollués- la phytoremédiation. Laboratoire sols et environnement UMR 1120 INPL-INRA: 6.
- Morot-Gaudry, J.F., 1997.** Assimilation de l'azote chez les plantes. Aspects physiologique, bio- chimique et moléculaire. Edition INRA, Institut Nationale de la Recherche Agricole, Paris: 75-90.
- Neff, J.M., 1979.** Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment, source, fate and biological effect. Applied science, Essex, England: 262.
- Negraia, G., 2010.** Impact écotoxicologique des hydrocarbures mono-aromatiques (HCM) dans l'environnement au Canada. Centre Universitaire De Formation En Environnement, Université de Sherbrooke: 99.
- Nemecek, T., Von Richthofen, J.S., Dubois, G., Casta, P., Charles, R. et Pahl, H., 2008.** "Environmental impacts of introducing grain légumes into European crop rotations". European Journal of Agronomy, 28: 380–393.
- Nesrine, R., 2010.** Étude de la régulation de la nitrogénase chez Rhodobactercapsulatus à la noirceur. Mémoire de master : microbiologie et immunologie. Faculté des études supérieures et postdoctorales : Université de Montréal: 76.
- Njoku, k., Akinola, O. et Oboh, B.O., 2009.** Phytoremediation of crude oil contaminated soil. Edition marslandpress: 85.
- Norini, M.P., 2007.** Eco dynamique des hydrocarbures aromatiques polycycliques et des communautés microbiennes dans les sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique. Thèse de Doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I: 75-9.
- Odat, S., Alshammari, A.M., 2011.** Seasonal variations of soil heavy metal contaminants along urban roads: A case study from the city of Hail, Saudi Arabia. Jordan Journal of Civil Engineering, Vol. 5 (4): 581-591.
- Ouahbi, H., 2012.** Les trois grandes classes de procédé pétrochimiques, master varenape.
- Ozenda, P., 2000.** Les végétaux : organisation et diversité biologique, 2ème édition Dunod, Paris: 417-424.

Références Bibliographiques

- Pertet, B., 1998.** Transport de l'auxine et développement du nodule actinorhizien chez l'arbre tropicale *Casuarina glauca*. Thèse de doctorat, université de Montpellier II: 77.
- Pierre, Davet., 1996.** Vie microbienne du sol et production végétale. INRA Paris : 389.
- Pivetz, B.E., 2001.** "Phytoremediation of Contaminated Soil and groundwater at hazardous waste sites". Ground Water Issue, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development and Office of Soil Waste and Emergency. Environ:15-18.
- Qiu, X., Leland, T.W., Shah, S.I., Sorensen, D.L., Kendall, E.W., 1997.** Field Study: Grass Remediation for Clay Soil Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, in: Phytoremediation of Soil and Water Contaminants, ACS Symposium Series. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/bk-1997-0664.ch014>: 186–199.
- R.A., 2017.** Raffinerie d'Arzew Oran Algérie. Certificat de qualité N° 17GO029. BAC: T223. 30/01/2017.
- Rachwa-Rosiak, D., Nebesny, E. et Budryn, G., 2015.** "Chickpeas-composition, nutritional value, health benefits, application to bread and snacks: a review." Critical Review in Food Science and Nutrition, 55(, 1137-45. * Baljeet, S.Y., Ritika, B.Y. et Reena, K., 2014. Effect of incorporation of carrot pomace powder and germinated chickpea flour on the quality characteristics of biscuits. International Food Research Journal, (21), 217–22.
- Radović, J.R., Domínguez, C., Laffont, K., Díez, S., Readman, J.W., Albaigés, J., Bayona, J.M., 2012.** Compositional properties characterizing commonly transported oils and controlling their fate in the marine environment. J. Environ. Monit. JEM 14, 3220– 3229. <https://doi.org/10.1039/c2em30385j>.
- Rahman, K.S.M., Rahman, T.J., Kourkoutas, Y., Petsas, I., Marchant, R., Banat, I.M., 2001.** Enhanced bioremediation of n-alkane in petroleum sludge using bacterial consortium amended with rhamnolipid and micronutrients. Bioresour. Technol. 90: 159–168.
- Ramade, F., 2005.** Eléments d'écologie : « écologie appliquée aux éléments écologiques ». Thèse de Doctorat. Université de (Paris). Édition Dunod, 6ème dds.5418.
- Raymond, J.G., George, J., 1975.** Phytosociology of roadside communities to identify ecological potentials of tolerant species. ResearchGate 1.
- Record, C., 2007.** Marée noire et sols pollués par les hydrocarbures. Edition technique: 167. * Fingas, M., 2012. The Basics of Oil Spill Cleanup [WWW Document]. CRC Press. URL <https://www.crcpress.com/The-Basics-of-Oil-Spill-Cleanup/Fingas/p/book/9781439862469>.
- Reeves, 2006.** « Hyper accumulation of trace elements by plants in: morel, Chavarria g. and goncharovan (EDS) phytoremediation of metal-contaminated soils ». NATO science series: IV: earth and environmental sciences volume 68. Springer, New York 45: 590-600.

Références Bibliographiques

- Reilley, K.A., Banks, M.K., Schwab, A.P., 1996.** Organic chemicals in the environment, dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Rhizosphere. *J. Environ. Qual.* 25. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500020002x>.
- Revellin, Cecile., 2012.** Les symbioses fixatrices d'azote. UMR Agrécologie. INRA. Université de Bourgogne: 36.
- Revière, J.L., 1998.** Evaluation des risques écologiques des sols pollués. Edition. TECHNIQUE & DOCUMENTATION: 230.
- Richards, A.E., Hocking, P.J., Simpson, R.J., George, T.S., 1984.** Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. CSIRO Publishing. *Crop and Pasture Science*, 60: 339.
- Roudaut, H. et Lefrancq, E., 2005.** "Les légumes et fruits". In: *Alimentation théorique*. Ed: Amazon: 149-151.
- Rougerol, 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*: 156.
- Saada, A., Nowak, C. et COQUEREAU, N., 2005.** Etat des connaissances sur l'atténuation naturelle des hydrocarbures rapport intermédiaire résultat de la phase 1.
- Sait, D.E., Blaylock, M., Kumar, N.P.B.A., Dushenkov, V., Ensley, B.D., Chet, I. et Raskin, I., 1995.** "Phytoremédiation: a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants". *Biotechnology* 16: 468-473.
- Schneider, A. et Huyghe, C., 2015.** Les légumineuses pour des systèmes agricoles et alimentaires durables. Edition Quae: 21-23,31.
- Schnoor, J.L. et McCutcheon, S.C., 2003.** Phytoremediation – transformation and control of contaminants. Dans Wiley-Interscience, Inc, NJ, USA: 987.
- Schultz, M., 1972.** The role of Nod signal structures in the determination of host specificity in the Rhizobium-legume symbiosis. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*. (12): 137-149.
- Scow, K.M., 2003.** Rate of biodegradation, in: Lyman, W.J., Rosenblatt, W.F., (Eds.) *Handbook of Chemical Property Estimation Methods*, Washington DC, 1990: 960.
- Sekkour, S., 2008.** Essai d'introduction d'un couple symbiotique Rhizobium-Acacia saligna pour la revégétalisation de la Sablière de Sidi Lakhdar (Wilaya de Mostaganem). Mémoire de magister. Université d'Oran.
- Simon, J.P., 2005.** Plantes utilisées par l'Homme : chapitre 11 les légumineuses. Préparés pour le département de Sciences biologiques. Université de Montréal.

Références Bibliographiques

- Slimane, M., 2015.** Effet du pétrole brut sur la croissance et la nodulation de la fève (*Vicia faba* L.), le pois (*Pisum sativum* L.) et la luzerne (*Medicago sativa* L.). Mémoire de fin d'étude de master. Spécialité : Protection de l'Environnement, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou : 50-51p.
- Soleimani, M., Jaber, N., 2014.** Comparison of Biological and Thermal Remediation Methods in Decontamination of Oil Polluted Soils | OMICS International. URL <https://www.omicsonline.org/open-access/comparison-of-biological-and-thermal-remediation-methods-in-decontamination-of-oil-polluted-soils-2155-6199.1000e145.php?aid=24606>.
- Soltani, M., 2004.** Distribution lipidique et voies métaboliques chez quatre bactéries Gram négatives hydrocarbonoclastes. Variation en fonction de la source de carbone. Thèse de doctorat, Université de Paris 6: 281-284.
- Song, F., Chen, M., Xing, J., Liu, Z., Liu, S., 1986.** Characterization of the rutin-metal complex by electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Analytical Sciences*, Vol. 20: 1147-1151.
- Sprent, J.I., 1987.** Nitrogen fixation. In: Paleg L.G. & Aspinall D., eds. *The physiology and biochemistry of drought resistance in plants*. Sydney, Australia Academic Press: 131-151.
- Susarla, S., Medina, V.F., Mccutcheon, S.C., 2002.** Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination. *Ecol. Eng.* 18, 647-658. [https://doi.org/10.1016/S0925-8574\(02\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0925-8574(02)00026-5).
- Takada, H., Onda, T. et Oguran, B., 1990.** Determination of PHA in urban street dusts and their source materials by capillary gas chromatography. *«Environmental Science and Technology»*24(8): 1179-11.
- Takilt, O. et Taouachi, F., 2013.** Effets de la concentration du pétrole sur la croissance du trèfle (*Trifolium alexandrinum* L.) et de la luzerne (*Medicago sativa* L.) et essai de phytoremédiation: 60.
- Tharanivasan, A.K., Yarranton, H.W., Taylor, S.D., 2012.** Asphaltene Precipitation from Crude Oils in the Presence of Emulsified Water. *Energy Fuels* 26, 6869-6875. <https://doi.org/10.1021/ef301200v>.
- Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984.** *Petroleum formation and occurrence*. Springer, Berlin: 1-13.
- Vandecasteele, J.P., 2005.** *Microbiologie pétrolière*, Edition Technip. Vol. 2: 34.
- Vaziri, A., Panahpour, E., Beni, M.H.M., 2013.** Phytoremediation, a Method for Treatment of Petroleum Hydrocarbon Contaminated Soils. *Int. J. Farming Allied Sci.* 2, 909-913.
- Vertès, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Thiébeau, P., Corson, M., 2010.** Connaître et maximiser les bénéfices environnementaux liés à l'azote chez les légumineuses, à l'échelle

Références Bibliographiques

de la culture, de la rotation et de l'exploitation. *Innovations Agronomiques* 11 (2010): 25-44.

Vidali, M., 2001. Bioremédiation an overview. *Pure appl. chem*: 222.

Vogel, T.M., 2001. Bioremédiation des sols. *Technique de l'ingénieur. Traité de génie de procédés*: 3982.

Wan, X., Lei, M., Chen, T., 2016. Cost-benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil. *Sci. Total Environ.* 563-564, 796-802. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.080>.

Wang, E.T., Tan, Z.Y., Willems, A., Fernandez-Lopez, M., Reinhold-Hurek, B., et Martinez-Romero, E. (2000). *Sinorhizobium morelense* sp. nov., isolated from *Leucaena leucocephala* that is highly resistant to multiple antibiotics. *Int. J. Syst. Microbiol.* 52: 1687-1693.

Wani, S.P., Rupela, O.P. and K.K. Lee., 1995. Sustainable agriculture in the semi-arid tropics through biological nitrogen fixation in grain legumes. *Plant and Soil* 174: 29-49.

Wauquier, G.P., 1994. *Pétrole brut : Produits pétroliers, schémas de fabrication.* Edition Technip: 478.

Wauquier, J.P., Leprince, P., Trembouze, P., Favennec, J., Edern, Y., 1994. *Le raffinage de pétrole : exploitation des gisements de la raffinerie.* Tome 5. Edition Technip: 23.

Weber und Bleiholder et al., 1990; Lancashire et al., 1991, in Uwe Meier., 2001. *Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées.* 2ème Edition.

Weisman, W.H., 1998. *Total petroleum hydrocarbon criteria working group Series Vol. 1: Analysis of petroleum hydrocarbons in environmental media.* Amherst Scientific Publishers. Massachusetts: 23.

Wojciechowski, M.F., Lavin, M., Sanderson, M. I., 2004. Phylogeny of legumes leguminous based on analysis of the plastid mat K gene resolves many well-supported subclades with the family. *Am I*: 1846-1862.

Wyszkowska, J., Kucharski, J., Jastrzębska, E., Hlasko, A., 2001. The biological properties of the soil as influenced by chromium contamination. *Polish Journal of Environmental Studies*, Vol. 10: 37-42.

Wyszkowska, J., Kucharski, J., Waldowska, E., 2002. The influence of diesel oil contamination on soil microorganisms and oat growth. *Rostlinná Výroba*, Vol. 48: 51-57.

Wyszkowski, M., Ziolkowska, A., 2008. Effect of petrol and diesel oil on content of organic carbon and mineral components in soil. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*. Vol. 2 (1): 54-60.

Références Bibliographiques

Zerrouk, R. et Ouhadda, M., 2013. Phytotoxicité des hydrocarbures vis-à-vis de la luzerne, du pois et de la fève. Mémoire d'Ingénieur d'Etat. Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou: 56.

Zmirou D., Beausoleil de Coninck P., Déportes I., Dor F., Empereur Bissonet P., Hours M., Keck G., Lefebvre L. et Rouisse L., 2003. Déchets et sols pollués. Environnement et santé publique - Fondements et pratiques: 397-440.